



Numerical simulation of erosion and sedimentation pattern in meandering channels with moving bed

Hossien Montaseri¹ | Hossein Sarikhani² | Reza Khalili³

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Water Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: hmontaseri@yu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Water Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: h.sarikhani@mail.yu.ac.ir
3. Department of Environmental Engineering, Department of Water and Wastewater, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: re_khalili@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 September 2023

Received in revised form

27 January 2024

Accepted 16 February 2024

Published online 14 March 2024

Keywords:

Bed topography

Sedimentation

Numerical simulation

Erosion

ABSTRACT

Natural rivers are principal resources of water and energy. Design and operational management of natural rivers needs a complete knowledge of mechanics of flow pattern and sediment transport. The complex three-dimensional flow characteristics in river bends reveals the necessity of using a three-dimensional numerical model. The numerical model used in the present study is called SSIIM, an acronym for Sediment Simulation in Intakes with Multi block option. In this study, in the first step, SSIIM is applied to investigate the characteristics of turbulent flow in a Sine-Generated channel with 70-degree angle, the rectangular cross section of width $B = 40\text{cm}$ and fixed bed. In addition, a comparison has been also made between the turbulence models, the flow characteristics such as Longitudinal and transverse velocity, Water level and bed Shear stress has been considered. The results have been validated with laboratory data. The results show that SST-k- ω model has better consistency with experimental data than k- ϵ model. Also distribution of bed shear stress depends on Froude number although secondary flow is independent. Furthermore, distribution of bed shear stress and secondary flow is dependent on the width to depth ratio. For $b/h < 8$, another circulation cell occurs near the outer bank. In the second step, to investigate the variation of channel bed subjected to steady flow, Channel with movable bed has been employed. Comparison of results show good agreement between computed and measured bed topography. Finally, the effective parameters including interval time step, grid size, Froude number, width to depth ratio and meandering angle has been investigated. Results show that by increasing the Froude number and the ratio of width to depth point bar and point pool gradually migrate downstream channel. Whereas by increasing meandering angle, point bar and point pool moving Upstream.

Cite this article: Montaseri, H., Sarikhani, H., & Khalili, R. (2024). Numerical simulation of erosion and sedimentation pattern in meandering channels with moving bed. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 187-205.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.364863.1102>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.364863.1102>



شبیه‌سازی عددی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال‌های پیچان‌رودی با بستر متحرک

حسین منتصری^۱ | حسین ساریخانی^۲ | رضا خلیلی^۳۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران گرایش منابع آب دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: hmontaseri@yu.ac.ir۲. گروه مهندسی عمران گرایش منابع آب دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: h.sarikhani@mail.yu.ac.ir۳. گروه مهندسی محیط‌زیست گرایش آب و فاضلاب دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: re_khalili@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

بستر متحرک

رسوب‌گذاری

شبیه‌سازی عددی

فرسایش

فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس رودخانه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی در سازه‌های رودخانه‌ای می‌شود. از این رو، الگوی جریان و انتقال رسوبات در کانال‌های روباز پیچان‌رودی نگاه مهندسی رودخانه را به خود جلب کرده است. از آنجایی که میدان جریان در خم رودخانه‌ها به صورت سه‌بعدی است، لذا در چند دهه اخیر پیش‌بینی تغییرات تراز بستر و تغییر مکان سواحل به کمک برنامه‌های کامپیوتری بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SSIM به مدل‌سازی تغییرات توپوگرافی بستر کانال‌های پیچان‌رودی با مولد سینوسی و بستر متحرک پرداخته شده است و تغییرات تراز بستر در آن تحت شرایط مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت حل میدان جریان از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST، جهت برآورد بار رسوبات از روش فاین‌راین و برای محاسبه فشار از روش SIMPLE استفاده شده است. پس از صحت‌سنجی و واسنجی مدل، الگوی تنش برشی در حالت بستر صلب، با الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در حالت بستر متحرک مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل به‌خوبی توانسته تغییرات تراز بستر را پیش‌بینی نماید. در نهایت با تغییر در پارامترهای مؤثر بر فیزیک مسئله مانند انتخاب گام زمانی، شبکه‌بندی میدان، الگوی انفصال ترم جابه‌جایی معادلات حاکم، عدد فرود، نسبت عرض به عمق، زاویه پیچان‌رودی و منحنی دانه‌بندی تأثیر این عوامل بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود و نسبت عرض به عمق، چاله فرسایشی و پشته رسوبی ایجاد شده در کانال به تدریج به سمت پایین دست کانال مهاجرت می‌کند. این در حالی است که با افزایش زاویه پیچان‌رودی پشته رسوبی و چاله فرسایشی به سمت بالادست کانال انتقال می‌یابد.

استناد: منتصری، حسین؛ ساریخانی، حسین و خلیلی، رضا (۱۴۰۳). شبیه‌سازی عددی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال‌های پیچان‌رودی با بستر متحرک. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۱۸۷-۲۰۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.364863.1102>



۱. مقدمه

فرسایش در خم رودخانه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی در سازه‌های رودخانه‌ای می‌شود. از این‌رو، الگوی جریان و انتقال رسوبات در کانال‌های روباز پیچان‌رودی نگاه مهندسی رودخانه را به خود جلب کرده است (Mazlomi Mochani *et al.*, 2023). میدان جریان در خم رودخانه‌ها به صورت سه‌بعدی است، لذا در چند دهه اخیر پیش‌بینی تغییرات تراز بستر و تغییر مکان سواحل به کمک برنامه‌های کامپیوتری بیش‌ازپیش مورد توجه قرار گرفته است (Azhikodan and Yokoyama, 2021). ساختار جریان از یک جریان ثانویه قدرتمندی تشکیل شده است که تنش برشی زیادی بر روی سواحل و بستر ایجاد می‌کند و در نتیجه باعث فرسایش قسمتی از سواحل در انحنای رودخانه‌ها می‌شود (Tassi *et al.*, 2023). جریان حلزونی براساس عدم تعادل نیروهای اینرسی و گرادیان عرضی فشار به وجود می‌آید. بر اثر این جریان ثانویه، جهت خطوط جریان در سطح آب به سمت قوس خارجی و در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی است (Tangi *et al.*, 2022). اکثر رودخانه‌های موجود در طبیعت دارای شکل پیچان‌رودی هستند. پیچان‌رودها متداول‌ترین الگو براساس شکل و پلان بستر در طبیعت هستند. این نوع رودخانه‌ها شامل ترکیبی از یک سری پیچ‌های پیوسته است که توسط مسیرهای کوتاه و مستقیم به هم متصل می‌شوند و عموماً در محل جلگه‌ها و دشت‌های سیلابی تشکیل می‌شوند (Azhikodan and Yokoyama, 2021).

ویلسون و همکاران (۲۰۰۳) توزیع سه‌بعدی سرعت را در یک کانال پیچان‌رودی با بستر فرسایش‌ناپذیر محاسبه کردند که نتایج، تطابق خوبی با مدل آزمایشگاهی داشت. ویلدهاگن (۲۰۰۴) به بررسی الگوی جریان و رسوب در یک کانال سینوسی با استفاده از نرم‌افزار SSIIM پرداخته است، نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. ال‌تهاوی (۲۰۰۴) آزمایش خود را بر روی کانال ۷۰ درجه انجام داد.

سیسینگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی دینامیک جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه پرداختند. یک مدل سازی عددی سه‌بعدی به نام NaysCUBE در این مطالعه برای توصیف الگوی جریان و فرایند انتقال رسوب در یک خم رودخانه تیز به‌عنوان مکمل استفاده شد. این مدل از معادله RANS برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند که در آن یک جریان سه‌بعدی کاملاً پیچیده کنترل می‌شود. با وجود محدودیت‌های مدل RANS، NaysCUBE به خوبی الگوی جریان و پدیده تلاطم را در یک کانال بستر متحرک با انحنای شدید بازتولید می‌کند. در مقایسه با داده‌های یک آزمایش قبلی، تنظیم مورفولوژیکی به‌اندازه کافی شبیه‌سازی شده است. سازه‌های جریان سه‌بعدی برای تعیین اقدامات متقابل مناسب برای آب‌شستگی محلی و حفاظت از ساحل رودخانه مفید هستند (Sisingih *et al.*, 2021).

در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SSIIM به بررسی الگوی فرسایش و رسوب در یک کانال پیچان‌رودی با زاویه ۷۰ درجه پرداخته شده است. بدین منظور مدل آزمایشگاهی ال‌تهاوی با استفاده از مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی و نتایج مدل عددی براساس نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. سپس به بررسی قدرت جریان ثانویه و تنش برشی بستر و مقایسه آن با الگوی فرسایش و رسوب پرداخته شده است. همچنین اثر عدد فرود، نسبت عرض به عمق جریان (B/h) و زاویه پیچان‌رودی بر الگوی فرسایش و رسوب مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش رودخانه‌های پیچان‌رودی به دلیل شکل غالب در طبیعت جهت مطالعه و بررسی انتخاب شده است. در چند دهه اخیر پژوهش‌گران سعی در شبیه‌سازی و ساده‌سازی پیچان‌رودها جهت بررسی الگوی جریان و رسوب‌گذاری داشته‌اند. به این منظور گاه از یک قوس و گاه از چند قوس به هم پیوسته و متناوب با انحنای ثابت (الگوی دایروی) یا با

۱.۲. مدل عددی

نسخه مقدماتی مدل SSIIM^۲ در سال ۹۱-۱۹۹۰ در بخش مهندسی هیدرولیک در انستیتو تکنولوژی نروژ تهیه شده و در سال ۲۰۰۱ دوباره به‌روز و مورد استفاده گسترده قرار گرفته است (Vaghefi *et al.*, 2017). مبنای آن براساس حجم کنترل محدود می‌باشد و معادلات ناویراستوکس و مدل‌های آشفتگی را با استفاده از یک شبکه سه‌بعدی غیرمتعامد جابه‌جا نشده حل می‌کند. برای منفصل‌سازی نیز از الگوریتم توانی (Power Law) یا الگوریتم جهت‌دار مرتبه دوم (Second Order Upwind) استفاده می‌شود (Khalili *et al.*, 2021). برای ارتباط ترم فشار و سرعت روش SIMPLE مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از روش حل ضمنی، میدان سرعت محاسبه شده و مؤلفه‌های آن در حل معادلات انتقال و پخش برای اندازه‌های مختلف رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرند. SSIIM هم‌چنین پروفیل سطح آب را در حالت‌هایی که تغییرات سطح آب در آن‌ها شدید و تند نباشد، با استفاده از برون‌یابی فشار در سلول‌های داخلی نزدیک سطح آب تعیین می‌نماید. به این صورت که یک سطح مرجع در سلول واقع در پایین‌دست تعریف شده و در این سلول سطح آب اجازه تغییر مکان نخواهد داشت. فشار در این سلول به‌عنوان فشار مرجع (p_{ref}) انتخاب می‌شود و سپس با استفاده از رابطه (۵)، مقدار جابه‌جایی هر سلول به‌دست می‌آید (Gomez-Quinones *et al.*, 2011):

$$\Delta h_{ij} = \frac{1}{\rho g} (p_{ij} - p_{ref}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

۱.۱.۲. قوانین و معادلات حاکم بر میدان جریان

قوانین حاکم عبارتند از قانون بقای جرم و بقای مومنتم که معادلات پیوستگی (۶) و ناویراستوکس (۷) از آن‌ها استخراج می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (-p \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن، U : سرعت متوسط در طول زمان t ، x : مختصات در سیستم فضایی، ρ : چگالی آب، p : فشار، δ : دلتا کروئکر و u : نوسانات سرعت در طول زمان و با گام زمانی Δt . در این پژوهش برای مدل کردن تنش‌های رینولدز از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ استفاده شده است. مدل جهت محاسبه تنش‌های آشفتگی $\overline{u_i u_j}$ از رابطه لزجت گردابه‌ایی استفاده می‌کند (Radan and Vaghefi, 2016):

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \nu_t = \frac{c_{\mu} k^2}{\varepsilon} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که انرژی جنبشی آشفتگی k و نرخ استهلاک انرژی ε توسط معادلات نیمه تجربی زیر به‌دست می‌آیند:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که تولید انرژی آشفتگی P_k طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌گردد (Caliskan *et al.*, 2022):

$$P_k = \nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

۲.۲.۲. معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب

انتقال و انتشار رسوبات به دو شکل صورت می‌گیرد؛ بار معلق و بار بستر. غلظت بار معلق از معادله انتقال - انتشار به صورت زیر محاسبه می‌شود (Larson and Kraus, 1995).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن، c غلظت رسوبات، ω سرعت سقوط، U سرعت جریان، x بعد فضا و Γ مجموع ضریب پخشیدگی آشفتگی و ضریب پخشیدگی مولکولی می‌باشد.

$$\Gamma = \frac{v_t}{Sc} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این رابطه، Sc عدد اشمیت است که مقدار آن بین 0.7 تا $1/0$ منظور می‌گردد. برای محاسبه غلظت رسوبات معلق نزدیک بستر در SSIIM از فرمول Van Rijn استفاده می‌شود که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد (رابطه ۱۴):

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5}}{a \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho v^2} \right)^{0.1}} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

که در آن، C_{bed} غلظت رسوبات نزدیک بستر، d قطر ذرات رسوب، a ارتفاع معادل زبری رسوبات زمانی که فرم‌های بستر وجود ندارد، برابر زبری معادل (K_s) و زمانی که فرم بستر وجود دارد برابر نصف ارتفاع متوسط فرم‌های بستر می‌باشد، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی، ρ و ρ_s به ترتیب جرم واحد حجم آب و دانه‌های رسوبی می‌باشند. در مدل SSIIM از فرمول تجربی بار بستر Van Rijn به طور پیش فرض استفاده می‌شود که به صورت زیر می‌باشد (Shobe et al., 2017):

$$\frac{q_b}{d_{50}^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - 1)g}{\rho}}} = 0.053 \frac{\left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{2.1}}{D_{50}^{0.3} \left[\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right]^{0.1}} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در آن، q_b بار بستر می‌باشد.

۳.۲. مدل آزمایشگاهی

مطالعه حاضر براساس کارهای f طراحی شده است. میدان حل مربوطه عبارت است از کانالی با مولد سینوسی با مقطع مستطیلی، زاویه θ برابر 70° درجه، عرض 80 سانتی‌متر، طول 1500 سانتی‌متر و با بستری صلب که از ماسه‌ای با دانه-بندی $d_{50} = 0.65$ mm پوشیده شده است. همچنین ابتدای کانال دارای مسیر مستقیمی به طول 200 سانتی‌متر است. شکل (۲) مشخصات هندسی میدان حل را نشان می‌دهد. دبی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی 11 لیتر بر ثانیه و عمق متوسط جریان برابر $7/5$ سانتی‌متر می‌باشد. شرایط هیدرولیکی در جدول (۱) نشان داده شده است.

۴.۲. تولید شبکه بندی میدان

مدل عددی SSIIM به تنهایی قادر به تولید شبکه مورد نظر برای میدان حل نمی‌باشد و به همین منظور باید با استفاده از برنامه‌های کمکی و یا برنامه نویسی، شبکه مورد نظر را با فرمت خاص برای آن تولید کرد. از این رو، با استفاده از نرم افزار اکسل مش بندی میدان حل انجام شد. با توجه به اهمیت نواحی مختلف، مش بندی متفاوتی انجام گردید. دو قسمت مستقیم کانال که دارای اهمیت کمی می‌باشد مش‌ها مقادیر بزرگ تری نسبت به مش‌های موجود در کانال دارند و برعکس در نزدیکی جداره‌ها که تغییرات بیش تر است مش بندی دارای مقادیر ریزتری نسبت به سایر نقاط کانال می‌باشد.

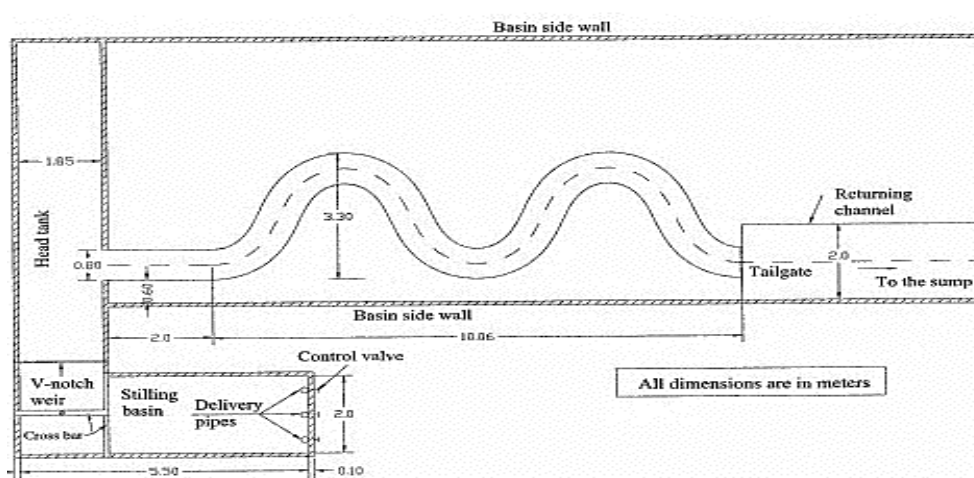


Figure 2. Geometric characteristics of the flow field

Table 1. hydraulic characteristics of the flow field

Flow depth upstream of the channel (centimeters)	Speed upstream of the channel (m/s)	Reynolds number (Re)	Froude number (Fr)	Meandering angle (degrees)	Runtime (min)
7.5	0.18	13750	0.21	70	45

به‌منظور مش‌بندی کانال، ابتدا باید مختصات خط مرکزی کانال و سواحل کانال سینوسی (در سیستم کارتزین) از روابطی که در ادامه آمده، محاسبه و ترسیم شود. با توجه به شکل (۳) به‌راحتی می‌توان نحوه‌ی محاسبه مسیر کانال با مولد سینوسی را درک کرد.

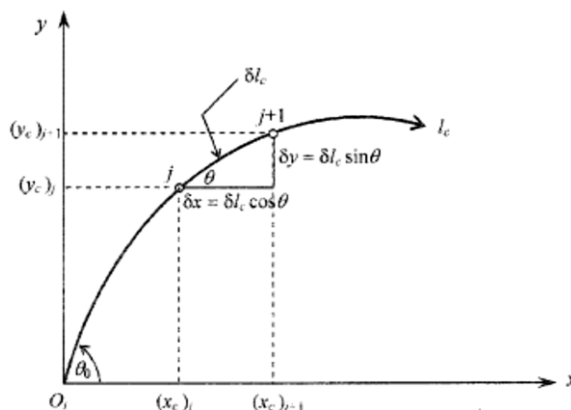


Figure 3. How to calculate the center line of the sinus channel in Cartesian coordinates

اگر دو نقطه بر روی خط مرکزی کانال طوری نزدیک به هم انتخاب شوند که بتوان مسیر بین آن‌ها را خطی فرض کرد (شکل ۳) می‌توان به روابط زیر دست یافت که در آن، نسبت $\frac{\delta l_c}{L}$ مقدار ثابت ۰/۰۰۱ توصیه شده است.

$$(x_c)_{j+1} = (x_c)_j + L \frac{\delta l_c}{L} \cos \theta \tag{رابطه ۱۶}$$

$$(y_c)_{j+1} = (y_c)_j + L \frac{\delta l_c}{L} \sin \theta \tag{رابطه ۱۷}$$

طول و همچنین زاویه کانال در هر نقطه طبق روابط زیر قابل محاسبه‌اند:

$$L = 2\pi B\sigma = 2\pi B/J_0(\theta_0) \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$\theta = \theta_0 \cos\left(2\pi \left(\frac{l_c}{L}\right)\right) \quad \text{رابطه ۱۹}$$

که در این روابط، $J_0(\theta_0)$ تابع بسل از درجه اول و صفرمین مرتبه از θ_0 می‌باشد و طبق رابطه (۲۰) به دست می‌آید:

$$J_0(\theta_0) = 1 - 2.2499997 \left(\frac{\theta_0}{3}\right)^2 + 1.2656208 \left(\frac{\theta_0}{3}\right)^4 - 0.3163866 \left(\frac{\theta_0}{3}\right)^6 \\ + 0.04444479 \left(\frac{\theta_0}{3}\right)^8 - 0.0002100 \left(\frac{\theta_0}{3}\right)^{12} + \varepsilon (\varepsilon < 5 \times 10^{-8}) \quad \text{رابطه ۲۰}$$

مقادیر θ_0 و B با توجه به هندسه کانال توسط محقق انتخاب می‌شود. با شروع از نقطه (۰،۰) می‌توان به مختصات نقطه بعدی دست یافت و این کار را تا طول دلخواه ادامه داد. در یک مقطع عرضی مختصات ساحل چپ و راست که به ترتیب با (x_{ib}, y_{ib}) و (x_{ob}, y_{ob}) نشان داده می‌شوند از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$x_{ib} = x_c + \frac{B}{2} \sin\theta \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$y_{ib} = y_c - \frac{B}{2} \cos\theta \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$x_{ob} = x_c - \frac{B}{2} \sin\theta \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$y_{ob} = y_c + \frac{B}{2} \cos\theta \quad \text{رابطه ۲۴}$$

۵.۲. تنظیم شبکه بندی میدان

در شرط مرزی اعمال شده برای دیواره‌ها براساس قانون جداره، تنظیم فاصله گره‌ها در جهت عمود بر جداره اهمیت خاصی دارد. علاوه بر این Schlichting در نتایج حاصل از آزمایش‌های خود برای آن که قانون جداره‌ها در فاصله y معتبر باشد پیشنهاد داد که مقدار y باید به گونه‌ای انتخاب شود که پارامتر y^+ (رابطه ۲۵) بین ۳۰ تا ۳۰۰۰ باشد:

$$y^+ = \frac{U^* y}{\nu} \quad \text{رابطه ۲۵}$$

در این رابطه، y فاصله مرکز سلول واقع در ناحیه کاملاً آشفته تا جداره کانال، U^* سرعت برشی و ν لزجت سینماتیکی سیال برابر 10^{-6} می‌باشد. لذا در انتخاب شبکه بندی میدان در جهت عرضی و ارتفاعی این نکته باید کنترل شود. در جهت طول کانال نیز شبکه بندی میدان باید به شکلی باشد که در نواحی که تغییرات پارامترهای جریان شدیدتر است از شبکه ریزتری استفاده کنیم. همچنین اولسن برای جلوگیری از واگرایی در حین حل معادلات پیشنهاد می‌کند که شبکه موردنظر در دو جهت طول و عرض به گون‌هایی انتخاب شود که نسبت Δx به Δy هر سلول بین ۲ تا ۳ باشد.

با توجه به این نکات، مشخصات تعداد مش‌ها در شبکه میدان حل به صورت $30.2 \times 23 \times 12$ به ترتیب در جهت طولی، عرضی و ارتفاعی انتخاب شد. در این شبکه مقدار y^+ در نزدیکی جداره‌ها در حدود ۷۱ و در کف نیز در حدود ۳۰ خواهد بود. همچنین نسبت Δx به Δy هر سلول تقریباً سه خواهد شد.

در زیر به عنوان نمونه، نحوه محاسبه مقدار y^+ برای عرض کانال ذکر شده است. در این شبکه عرض سلول نزدیک جداره در شبکه تولیدشده برای مقطع عرضی کانال برابر با ۰/۰۱ متر است. لذا خواهیم داشت:

$$y = \frac{1}{2} * 0.01 = 0.005 \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{0.00184}{0.4 * 0.0308} = 0.149 \text{ m/s} \quad \text{رابطه ۲۷}$$

$$\frac{U}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30y}{\kappa_s} = \frac{1}{0.4} \ln \frac{30 * 0.005}{0.0022} \Rightarrow U^* = 0.0141 \quad \text{رابطه ۲۸}$$

$$y^+ = \frac{U^* y}{\nu} = 71 \quad \text{رابطه ۲۹}$$

مشخصات شبکه میدان حل و زمان اجرای محاسبات توسط رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i5, 2.3GHZ, (4GBRAM) به تفکیک در جدول (۲) آورده شده است.

Table 2. Mesh network specifications**

Channel angle	Number of networks	Number of nodes	Separation plan	CPU Time (min)
30	217 × 23 × 12	59892	SOU	45

** The dimensions of the meshes near the walls are 1 cm, the dimensions of the meshes in the rest of the places are 4 cm.

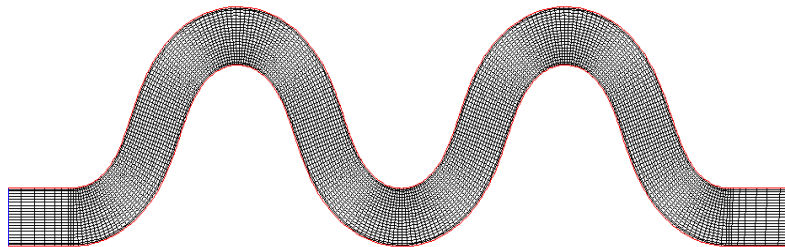


Figure 4. Field meshing

۲.۶. شرایط مرزی در مدل عددی

برای اعمال شرایط مرزی سرعت و آشفتگی در ورودی بالادست میدان، از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است. شرط مرزی دیریکله به این معناست که مقادیر متغیرها در مرز معین باشد. اعمال این شرایط در مدل SSIIM، با دادن دبی و سطح آب در پایین دست و همچنین مشخص کردن عدد استریکلر و زبری اعمال می‌شود. مدل به این ترتیب و با استفاده از الگوریتم یک‌بعدی برگشت آب استاندارد سطح آب در ورودی بالادست میدان را پیدا کرده و سرعت ورودی معین را به بالادست اعمال می‌نماید. همچنین در این مرز لازم است تا مقادیر پارامترهای آشفتگی نظیر انرژی جنبشی (k) و استهلاک (ϵ) به مدل اعمال شود. این کار برای پارامترهای آشفتگی به‌سادگی پارامتر سرعت نیست. علت این امر آن است که توزیعی آزمایشگاهی برای پارامترهای فوق وجود ندارد. لذا در مدل، برای تخمین این پارامترها از روابط تقریبی استفاده شده است. با توجه به این که مقدار سرعت در ورودی کانال مشخص است، لذا می‌توان تنش برشی بستر را در ورودی تخمین زد. سپس مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در بستر در مرز بالادست از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{c_\mu}} \quad \text{رابطه ۳۰}$$

این رابطه براساس این فرض به‌دست‌آمده که بین تولید و اتلاف آشفتگی در سلول‌های بستر تعادل وجود دارد. با داشتن لزجت گرداب‌های و مقدار k (رابطه ۲۶) مقدار ϵ در بستر در مرز ورودی کانال قابل محاسبه است:

$$v_t = c_\mu \frac{k}{\epsilon} \quad \text{رابطه ۳۱}$$

حال مدل با فرض تغییرات خطی k از بستر تا سطح آب در مرز ورودی، توزیع عمودی، k و ϵ را در مرز بالادست به‌دست می‌آورد. در روابط فوق k انرژی جنبشی آشفتگی، $c_\mu = 0.09$ ، ϵ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی، τ تنش برشی بستر

و ρ چگالی سیال می‌باشد. در مرز خروجی، برای تمام متغیرها شرط مرزی گرادیان صفر اعمال می‌شود. در سطح آب نیز، شرط مرزی گرادیان صفر برای تمام متغیرها به‌جز انرژی جنبشی (k) اعمال شده و برای پارامتر مزبور نیز در سطح آب مقدار صفر اعمال می‌شود. برای شرایط مرزی جداره، SSIIM از قانون جداره‌ها برای سلول‌های مجاور جداره استفاده می‌کند. پروفیل سرعت مربوط به ناحیه لگاریتمی قانون جداره برای بستر زبر به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{U}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{30y}{k_s} \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

که در آن، U سرعت جریان، U^* سرعت برشی، κ ثابت ون کارمن، y فاصله از جداره و k_s ارتفاع زبری جداره می‌باشد. در مورد شرط مرزی جداره تنظیم فاصله گره‌ها در جهت عمود بر جداره اهمیت ویژه‌ای دارد. در محاسبات انتقال رسوب (حل معادله انتقال و پخش) در بالادست مدل با توجه به شرایط کانال آزمایشگاهی، غلظت رسوب برابر صفر قرار داده شده است. در جداره‌های جانبی، سطح آب و مرز خروجی پایین‌دست برای متغیر غلظت رسوب، شرط مرزی گرادیان صفر اعمال شده است. شرط مرزی در بستر برای معادله انتقال و انتشار توسط رابطه فاین-راین تعیین می‌گردد:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.5}}{a \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w V^2} \right)^{0.1}} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

که در آن، C_{bed} غلظت رسوبات نزدیک بستر، d قطر ذرات رسوب، a ارتفاع معادل زبری رسوبات زمانی که فرم‌های بستر وجود ندارد، برابر زبری معادل (K_s) و زمانی که فرم بستر وجود دارد برابر نصف ارتفاع متوسط فرم‌های بستر می‌باشد. τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی، ρ_s و ρ_w به‌ترتیب جرم واحد حجم آب و دانه‌های رسوبی می‌باشند. با این حساب، برای غلظت رسوب برای سلول‌های نزدیک بستر، معادله انتقال و پخش حل‌نشده و به‌جای آن غلظت رسوب حاصل از رابطه (۲۸) در مرکز نزدیک‌ترین سلول به بستر کانال به‌عنوان شرط مرزی اعمال می‌شود. حال اگر فاصله سطح بستر تا مرکز اولین سلول در مجاورت بستر آن قدر زیاد باشد که از ارتفاع زبری بیش‌تر شود، SSIIM غلظت حاصل از رابطه (۲۸) را با استفاده از رابطه راوز (رابطه ۲۹)، میان‌یابی کرده و توزیع عمودی غلظت در آن فاصله را به‌دست می‌آورد.

$$\frac{C_{cell}}{C_{bed}} = \left[\frac{h-b}{b} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{ku_*} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

که در آن، h عمق آب، b نصف ارتفاع سلول مجاور بستر، w سرعت سقوط ذره رسوب، u_* سرعت برشی و C_{cell} غلظت رسوب در سلول موردنظر می‌باشد.

۷.۲. کالیبراسیون و صحت سنجی مدل

پارامتر مهم در کالیبراسیون مدل عددی SSIIM، زبری کانال می‌باشد. پارامتر زبری در SSIIM با دو هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی محاسبه سطح اولیه آب در کانال برای تعریف هندسه اولیه میدان، که با استفاده از الگوریتم یک‌بعدی Back water استاندارد انجام می‌شود و دیگری محاسبه تنش برشی در میدان که عامل شکل‌دهی تراز بستر می‌باشد. SSIIM برای محاسبه سطح اولیه آب در میدان، از پارامتر استری کلر ($k_{st} = \frac{1}{n}$) استفاده می‌کند که در این رابطه، n ضریب مانینگ می‌باشد. استریکلر در سال ۱۹۲۳ رابطه زیر را برای محاسبه n پیشنهاد کرد:

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{21.1} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

که در آن، k_s را برابر d_{50} معرفی می‌کند. مقدار زبری معادل در رودخانه‌ها معمولاً برابر ضریبی از اندازه معرف ذرات رسوبی بستر، $k_s = \alpha d_{50}$ در نظر گرفته می‌شود که ضریب α براساس مدل انتخاب می‌گردد. پس از چندبار تکرار مدل‌سازی، در $k_s = 7d_{50} = 4.55 \text{ mm}$ و $k_{st} = 16.4$ بهترین نتیجه حاصل شد و تراز بستر و سطح آب با مقدار گزارش‌شده از کار آزمایشگاهی، تطابق خوبی یافت. مشخصات مقاطع که در ادامه جهت بررسی نواحی فرسایش و رسوب از آن‌ها استفاده شده در زیر آمده است (مقاطع به فاصله یکسان $l_c/L = 0.0625$ از یکدیگر انتخاب شده‌اند).

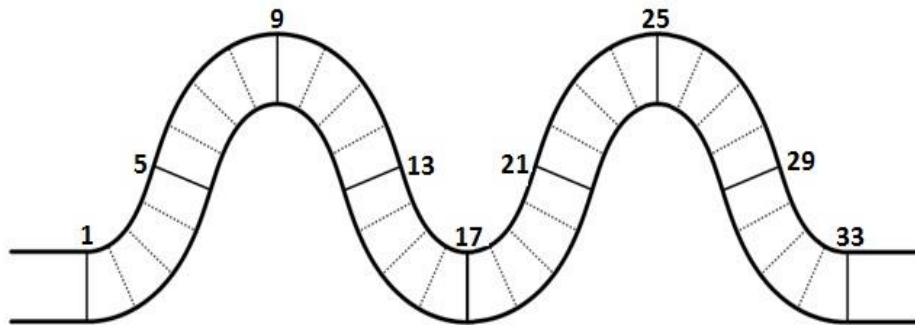


Figure 5. The position of sections

Table 3. Specifications of sections

Section number	$\frac{l_c}{L}$	Section number	$\frac{l_c}{L}$	Section number	$\frac{l_c}{L}$
1	0	7	0.375	13	0.75
2	0.062	8	0.437	14	0.812
3	0.125	9	0.5	15	0.875
4	0.187	10	0.562	16	0.937
5	0.250	11	0.625	17	1
6	0.312	12	0.675	18	1.062

۳. بحث و نتایج

۳.۱. بررسی تغییرات تراز بستر

در شکل (۵) نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی پس از پایان آزمایش مقایسه شده است. با توجه به شکل مدل به‌خوبی توانسته الگوی کلی شکل‌گیری نواحی متعدد رسوب‌گذاری و فرسایش را در بستر نشان دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است مدل $k - \epsilon$ در نواحی نزدیک جداره نتوانسته به‌خوبی نواحی فرسایشی را پیش‌بینی نماید. $B=0$ ساحل پایینی و $B=80$ ساحل بالایی کانال می‌باشد. جریان با ورود از مسیر مستقیم به داخل قوس، تحت اثر انحنای کانال قرار گرفته، شرایط هیدرودینامیکی آن تغییر یافته و جریان ثانویه شکل می‌گیرد و این باعث ایجاد حرکت در رسوبات بستر و تغییر در پروفیل کف کانال می‌گردد.

در مقطع ۵ یک تپه رسوبی کوچکی نزدیک ساحل بالایی کانال تشکیل شده است، در حالی که در ساحل پایینی کانال فرسایش وجود دارد. با پیشروی در کانال و در مقطع ۷ مشاهده می‌شود تپه رسوبی از بین رفته، اما هم‌چنان در ناحیه ساحل پایینی کانال فرسایش وجود دارد. چاله فرسایشی در این نواحی به‌علت قدرت‌گرفتن جریان ثانویه رخ می‌دهد که در بخش‌های بعدی شرح داده خواهد شد. با نزدیک شدن به رأس قوس (مقطع ۹) و ضعیف شده قدرت جریان ثانویه در ساحل پایینی تپه رسوبی تشکیل شده است، در حالی که چاله فرسایش به سمت ساحل بالایی کانال ایجاد می‌شود. این روند در طول کانال ادامه دارد.

تغییرات تراز بستر در طول کانال در مدل آزمایشگاهی و عددی در پایان آزمایش در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است الگوی فرسایش و رسوب در مدل عددی و آزمایشگاهی بر یکدیگر تطابق خوبی دارند.

۲.۳. بررسی تغییرات بستر در طی زمان

شکل (۷) تغییرات تراز بستر، در طی زمان شبیه‌سازی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شدت فرسایش و رسوب‌گذاری در طی زمان همواره روندی افزایشی دارد. در فاصله زمانی کوتاهی پس از اجرای مدل مهم‌ترین پدیده شکل‌گیری یک چاله فرسایشی در رأس قوس‌های داخلی کانال است. هم‌چنین مشاهده می‌شود تپه رسوبی کوچکی در رأس قوس‌ها و چسبیده به ساحل داخلی در حال ایجاد شدن است. با گذشت ۵۰ دقیقه از زمان اجرای مدل، از محدوده نواحی فرسایشی کانال کاسته و به محدوده نواحی رسوبی افزوده شده است. هم‌چنین ارتفاع تپه رسوبی و عمق چاله فرسایشی افزایش پیدا کرده است. با گذشت ۸۰ دقیقه از شروع محاسبات تقریباً تمام پدیده‌های موردانتظار در کانال شکل گرفته است.

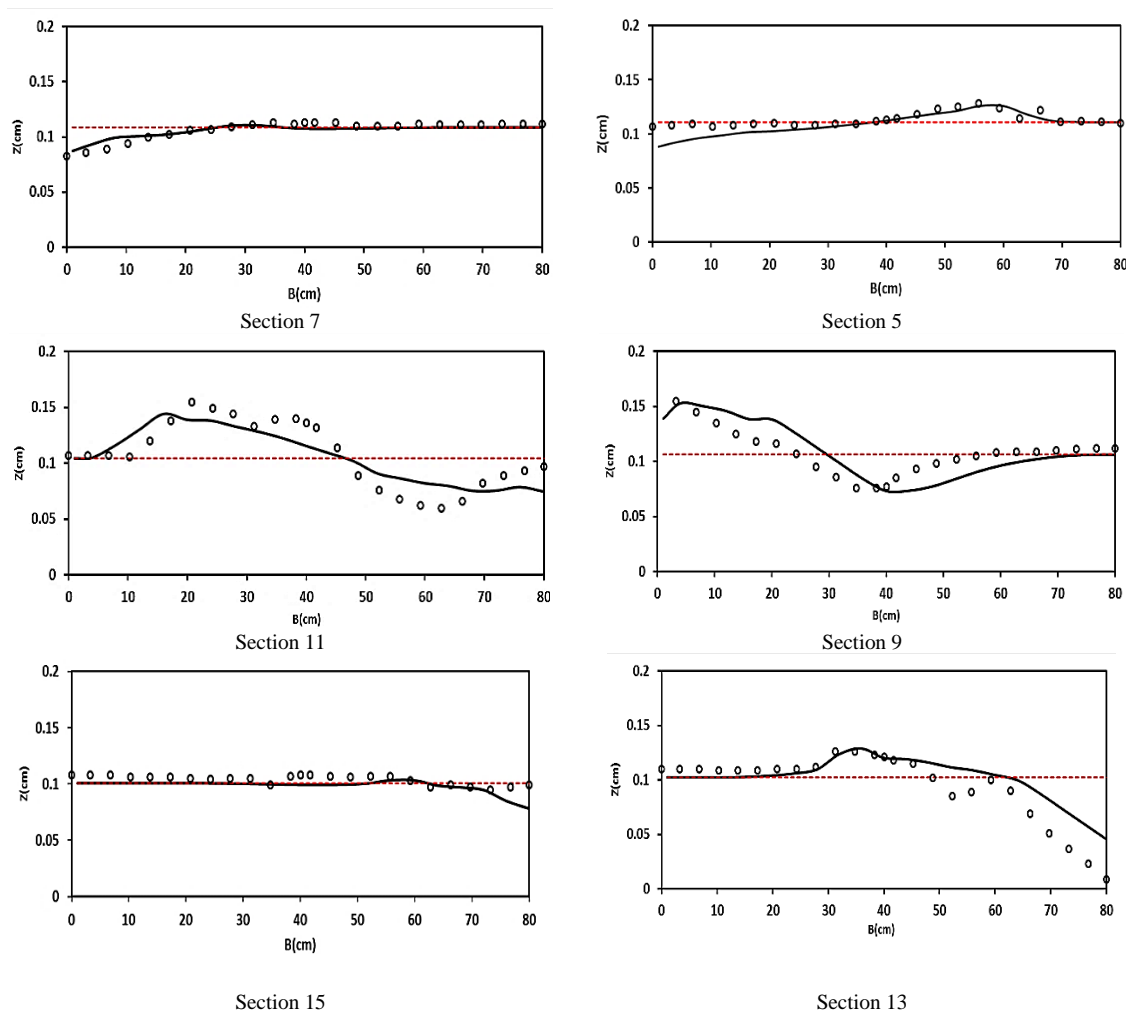
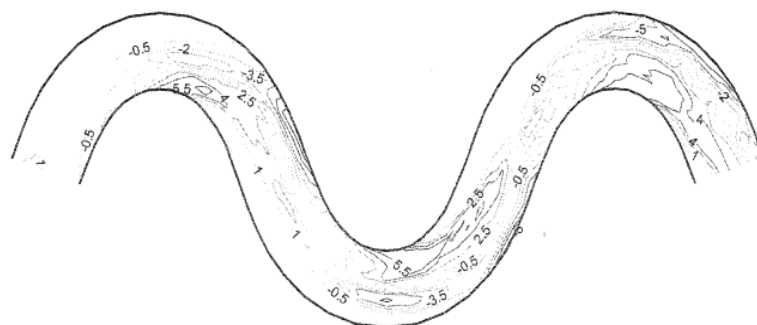


Figure 6. Comparison of bed level obtained from numerical and laboratory model at the end experiments.
 Primtental model: o o o Numerical model: Ex —————



A) Laboratory results (unit is centimeter)



B) Numerical results (unit is meter)

Figure 7. Laboratory comparison of bed level changes with numerical results

چاله فرسایشی به سمت میانه و کمی به سمت پایین دست کانال متمایل گشته است. هم‌چنین پشته رسوبی به تدریج به سمت پایین دست کانال مهاجرت کرده است. دوان نیز در بررسی عددی یک کانال پیچان‌رودی آزمایشگاهی پدیده مشابهی را در مورد مهاجرت پشته رسوبی شکل گرفته در قوس، به سمت پایین دست، طی زمان گزارش کرده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که در مراحل اولیه و دقایق ابتدایی از شروع مدل‌سازی، میزان تغییرات در بستر بسیار چشم‌گیر بوده و با گذشت زمان نرخ تغییرات کاهش می‌یابد. تغییرات عرضی تراز بستر ناشی از جریان ثانویه موجود در مقطع عرضی کانال است. این جریان چرخشی یا عرضی، ذرات رسوب را از ساحل خارجی جدا کرده و با یک حرکت جانبی به سمت ساحل داخلی هدایت می‌کند که سبب پیدایش فرسایش در نزدیکی ساحل خارجی و رسوب‌گذاری در نزدیکی ساحل داخلی می‌شود. این فرایند در ساعات ابتدایی تکامل بستر به سرعت رخ می‌دهد و با گذشت زمان و تغییر شیب عرضی بستر از سرعت آن کاسته می‌شود که علت آن تعادل بین نیروهای ناشی از جریان ثانویه و گرانش می‌باشد.

شکل (۹) تغییرات پروفیل عرضی بستر در طی زمان‌های مختلف از شروع آزمایش در مقطع حداکثر آب‌شستگی در قوس اول (مقطع ۹) را نشان می‌دهد. در این شکل به‌خوبی مشاهده می‌شود با افزایش زمان چاله فرسایشی به سمت ساحل خارجی به‌آرامی مهاجرت می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، نیروهای مؤثر در تغییر شکل عرضی بستر، نیروی ناشی از چرخش عرضی جریان می‌باشد که بر ذرات رسوب واقع در بستر وارد می‌شود.

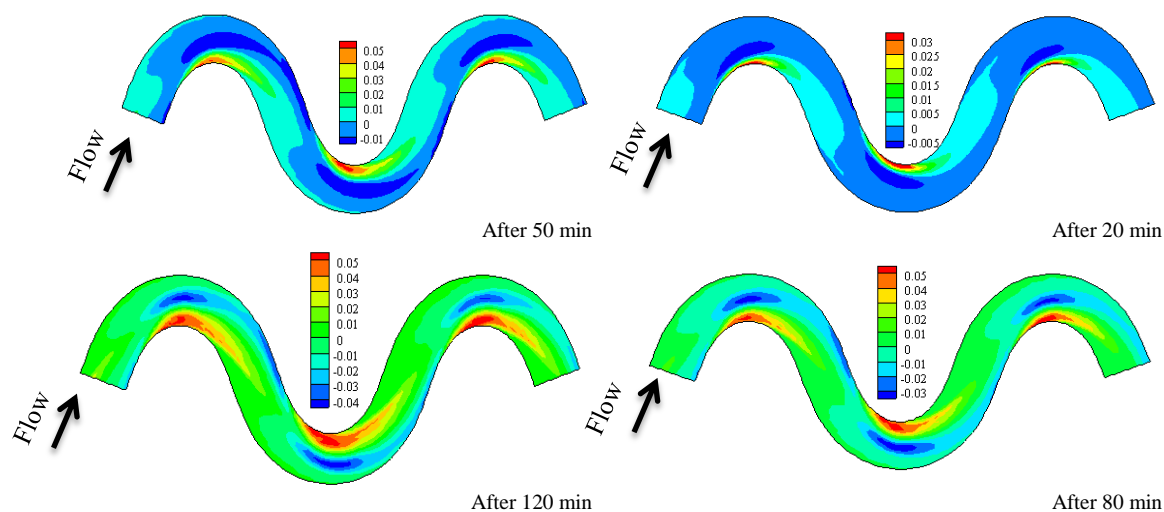


Figure 8. Examination of bed changes over time (unit is meter)

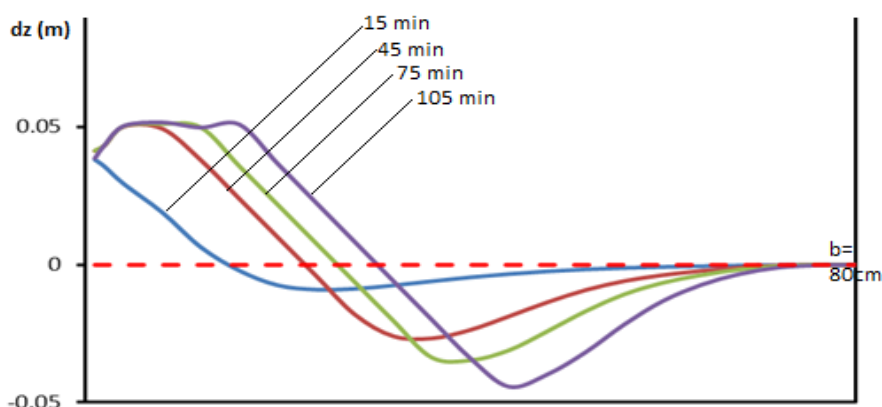


Figure 9. changes in the transverse profile of the bed over time in the section of maximum scour in the first arc

۳.۳. بررسی الگوی جریان ثانویه

علت اصلی انتقال ذرات رسوب، جریان ثانویه است. جریان نزدیک کف کانال، ذرات رسوب بار بستر را به سمت جداره داخلی منتقل می‌کند و در همین حال با شکل‌گیری شیب عرضی بستر، مؤلفه نیروی گرانشی، ذرات رسوبی بار بستر را به سمت جداره مقابل منتقل می‌کند، بنابراین تغییرات تراز بستر در جهت عرضی به وسیله هر دو نیروی ناشی از گرادیان فشار و نیروی گریز از مرکز کنترل می‌شود. شکل (۱۰) خطوط جریان ثانویه را برای مقاطع پنج، هفت، نه، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ را نشان می‌دهد. در هر مقطع، جداره سمت راست بیانگر ساحل پایینی و جداره سمت چپ بیانگر ساحل بالایی کانال است. در مقطع ۳ پشته رسوب کوچکی در ساحل بالایی کانال و ناحیه فرسایشی نسبتاً وسیعی در نیمه پایینی کانال شکل گرفته است. همچنین هسته سلول چرخشی ایجاد شده نزدیک بستر و جداره بالایی کانال است. در ادامه در مقطع ۵ با افزایش سطح شیب‌دار پشته رسوبی در نزدیکی مرکز کانال و تیز شدن تاج پشته، مقطع به دو قسمت تقسیم شده و سلول چرخشی دیگری نزدیک جداره بالایی مقطع ایجاد می‌شود که جهت چرخش آن پادساعت‌گرد و خلاف گردش جریان

تانویه اصلی است. در رأس قوس (مقطع ۹) علاوه بر پشته رسوبی بزرگی که نزدیک جداره پایینی مقطع شکل گرفته یک چاله فرسایشی نیز نزدیک مرکز کانال به‌وجود آمده است که به‌تدریج به سمت ساحل بالایی کانال انتقال میابد. این روند در طول کانال ادامه دارد.

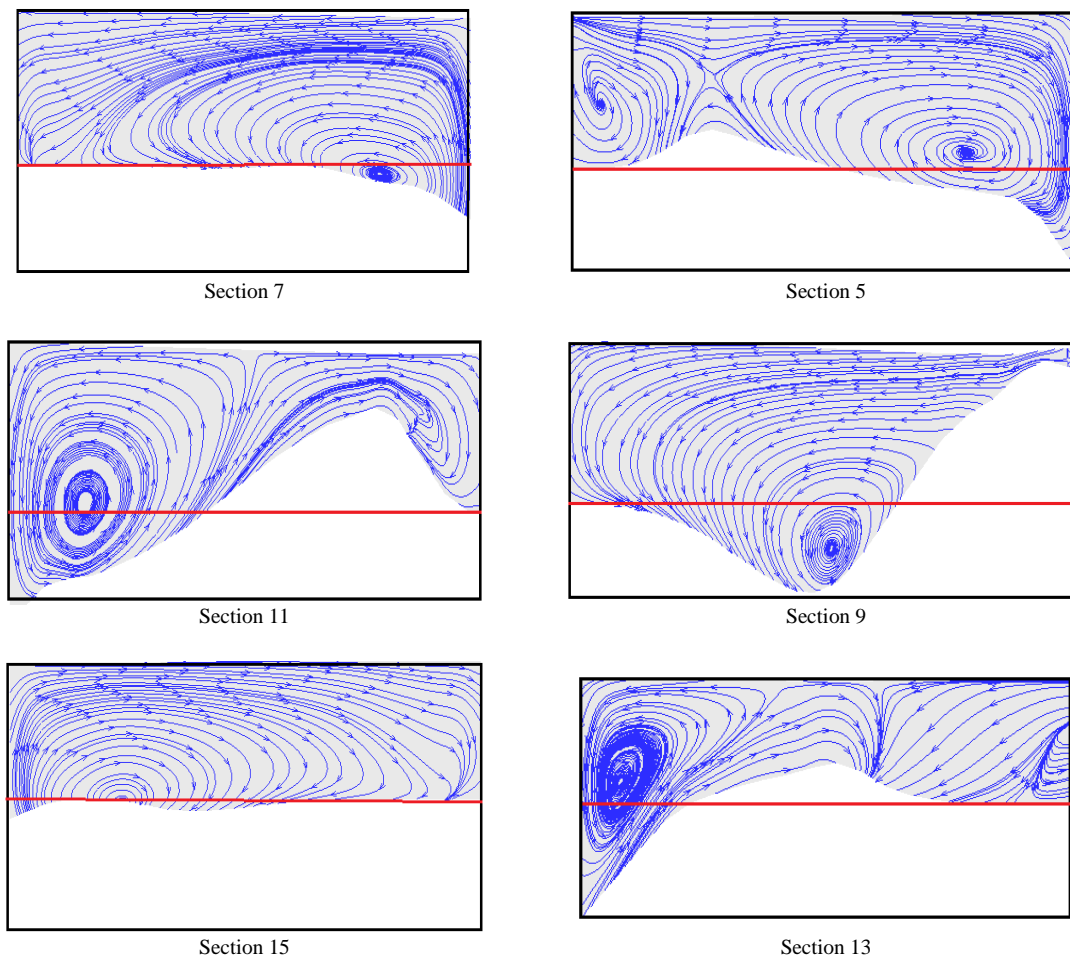


Figure 10. Secondary flow lines

۴.۳. بررسی اثر فرود بر روی الگوی فرسایش و رسوب

به‌منظور بررسی تأثیر عدد فرود بر الگوی جریان مدل با سه عدد فرود مختلف اجرا شده است (جدول ۴). با توجه به این که SSIM محاسبات عمق را از پایین‌دست به سمت بالادست انجام می‌دهد، نحوه‌ی انتخاب دبی‌ها و عدد فرود بدین‌صورت بوده که با تغییر میزان دبی ورودی و عمق پایین‌دست، عمق جریان در ورودی تقریباً ثابت باشد تا فقط اثر عدد فرود در نظر گرفته شود.

Table 4. Hydraulic characteristics of the flow

Width to depth (B/h)	Froude number (Fr)	Water depth at the entrance (m)	Input flow rate (Li/s)	Channel width (m)
11	0.18	0.07259	10	0.8
10.7	0.21	0.07507	11	0.8
10.3	0.28	0.07748	15	0.8

مقایسه تغییرات تراز بستر در فرودهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود در یک نسبت عرض به عمق ثابت به دلیل افزایش سرعت فقط بر ارتفاع تپه‌های رسوبی و عمق چاله‌های فرسایشی افزوده می‌گردد و الگوی کلی تغییرات تراز بستر تغییری نمی‌کند. در همه فرودها تپه‌های رسوبی نزدیک رأس قوس و دیوار داخلی و چاله‌های فرسایشی در نزدیک دیواره خارجی و در نیمه دوم قوس شکل گرفته‌اند.

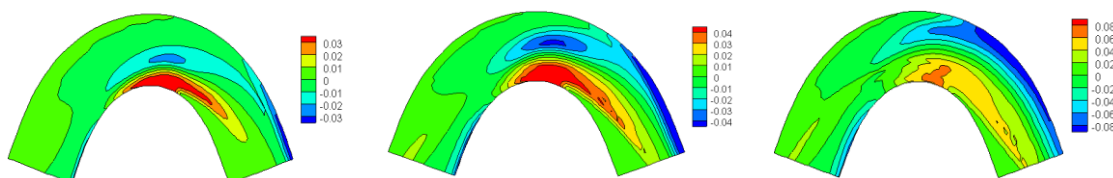


Figure 11. The contour of bed level changes

۵.۳. بررسی اثر عرض به عمق بر روی الگوی فرسایش و رسوب

جهت بررسی تأثیر B/h از سه نسبت مختلف استفاده شده است که مشخصات هیدرولیکی آن‌ها در جدول (۵) آمده است. در این مورد نیز تغییر عمق پایین‌دست و دبی جریان به گونه‌هایی صورت گرفته است که مقدار عدد فرود در بالادست کانال تقریباً ثابت باشد ($Fr \approx 0.21$) تا بتوان تأثیر B/h را به‌طور دقیق بررسی نمود. نسبت‌های B/h با توجه به مطالعات *da Silva et al.* (2012) انتخاب شده است که این مطالعات نشان از وجود پیچان‌رودها در طبیعت با $B/h \geq 4$ دارد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با کاهش نسبت عرض به عمق (B/h) تپه رسوبی و چاله فرسایشی به سمت بالادست حرکت می‌کند. لذا انتظار می‌رود در یک کانال با سواحل متحرک، با کاهش نسبت عرض به عمق سواحل به سمت راست انتقال یابند.

Table 5. Hydraulic characteristics of the flow

Width to depth (B/h)	Water depth at the entrance (m)	Input flow rate (Li/s)	Channel width (m)
4.2	0.190605	50	0.8
7.8	0.102411	19	0.8
10.7	0.075075	11	0.8

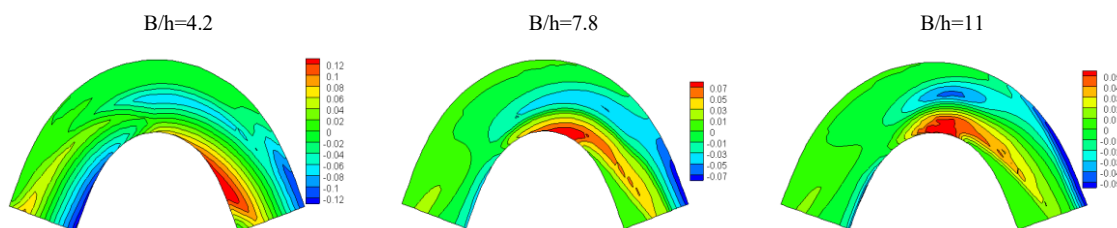


Figure 12. The contour of bed level changes

۶.۳. بررسی اثر زاویه بر روی الگوی فرسایش و رسوب

در شکل (۱۳) الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش در سه کانال ۳۰، ۷۰ و ۹۰ درجه با هم مقایسه شده است. توجه به شکل (۱۵) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه پیچان‌رودی تپه رسوبی نزدیک رأس قوس بیش‌تر به سمت ساحل داخلی متمایل گشته و محدوده بیش‌تری را در برمی‌گیرد. همچنین چاله فرسایشی به سمت نیمه اول قوس و ساحل داخلی متمایل می‌-

گردد. با توجه به بخش قبل، با تغییر نسبت عرض به عمق می‌توان از انتقال چاله فرسایشی و تپه رسوبی به نیمه اول قوسی جلوگیری کرد یا این امر را تسریع بخشید.

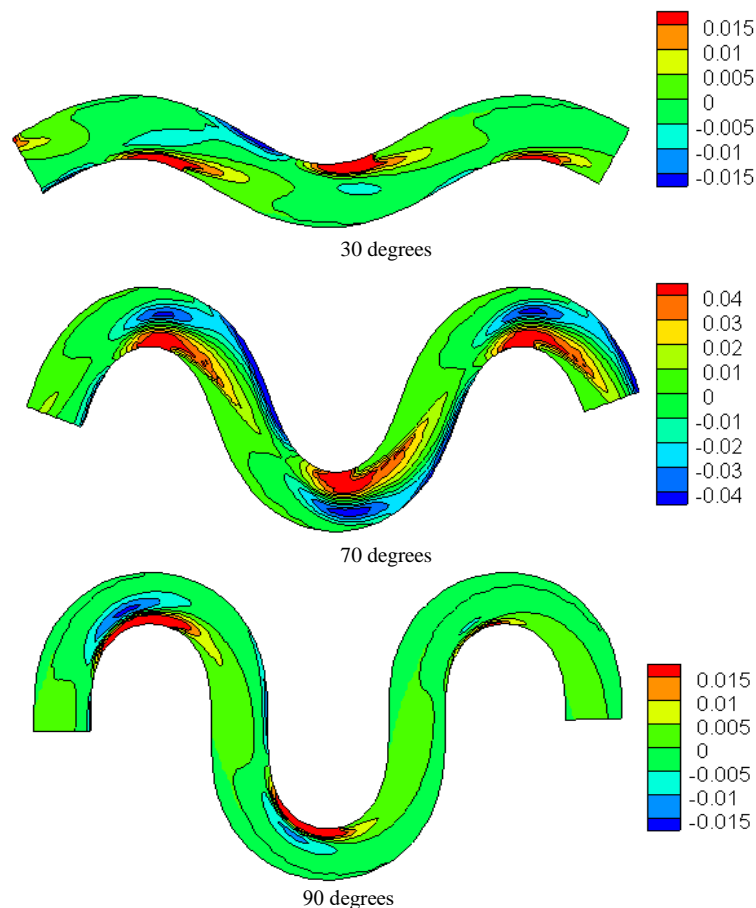


Figure 13. Sedimentation and erosion pattern

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی الگوی فرسایش و رسوب در کانال‌های پیچان‌رودی با بستر متحرک پرداخته شد و اثر پارامترهای مؤثر بر فیزیک مسئله مانند انتخاب گام زمانی، شبکه‌بندی میدان، الگوی انفصال ترم جابه‌جایی معادلات حاکم، عدد فرود، نسبت عرض به عمق، زاویه پیچان‌رودی و منحنی دانه‌بندی تأثیر این عوامل بر دقت پیش‌بینی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی موردبررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی به‌خوبی توانسته است تغییرات تراز بستر را شبیه‌سازی کند. مدل عددی در $k_s = 9d_{50}$ کالیبره شده و نتایج حاصل از آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

نتایج نشان می‌دهد در رأس کانال یک پشته رسوبی در ساحل داخلی و یک چاله فرسایشی در مقابل آن تشکیل شده است. شدت فرسایش و رسوب‌گذاری در طی گذر زمان تا رسیدن به حالت تعادل، همواره روندی افزایشی دارد پس از آن تغییرات بستر کاهش می‌یابد. در فاصله زمانی کوتاهی پس از اجرای مدل مهم‌ترین پدیده شکل‌گیری یک چاله فرسایشی

در رأس قوس‌های داخلی کانال است. هم‌چنین مشاهده می‌شود تپه رسوبی کوچکی در رأس قوس‌ها و چسبیده به ساحل داخلی به تدریج ایجاد می‌گردد. بررسی توزیع تنش برشی بستر طی زمان نشان می‌دهد تنش برشی به موازات تغییرات بستر دچار تغییر می‌شود. لذا پیش‌بینی تغییرات تراز بستر با استفاده از تنش برشی در حالت بستر صلب دقیق نبوده و فقط شمایی از الگوی کلی فرسایش و رسوب به ما می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که مدل عددی تا حد زیادی به گام زمانی وابسته نبوده، مگر در حالتی که گام زمانی به حدی بزرگ انتخاب شود که تغییرات در بستر در یک گام زمانی، باعث تغییرات زیادی در میدان جریان شده باشد. مقایسه تغییرات تراز بستر در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود، شیب عرضی کانال افزایش پیدا کرده، هم‌چنین چاله فرسایشی و پشته رسوبی به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند، ضمن این که عمق چاله و ارتفاع پشته افزایش پیدا می‌نماید. پارامتر B/h تأثیر فراوانی بر تغییرات تراز بستر دارد. با کاهش پارامتر B/h و افزایش قدرت جریان ثانویه، حداکثر عمق آب‌شستگی نیز افزایش یافته است. با افزایش زاویه پیچان رودی پشته رسوبی و چاله فرسایشی به سمت بالادست کانال مهاجرت می‌کند. ضمن این که تپه رسوبی و چاله فرسایشی بیش‌تر به سمت ساحل داخلی متمایل گشته و محدوده بیش‌تری را اشغال می‌کنند. بررسی نوع دانه‌بندی دانه‌های رسوب نشان می‌دهد استفاده از دانه‌بندی غیریکنواخت رسوب باعث افزایش ناحیه فرسایشی در طول کانال می‌گردد ضمن این که چاله فرسایشی و پشته رسوبی نسبت به حالت دانه‌بندی یکنواخت به سمت پایین دست کانال مهاجرت می‌کنند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Sine-Generated
2. Sediment Simulation In Intakes with Multi block

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Azhikodan, G., & Yokoyama, K. (2021). Erosion and sedimentation pattern of fine sediments and its physical characteristics in a macrotidal estuary. *Science of The Total Environment*, 753, 142025.
- Caliskan, S., Şevik, S., & Özdilli, Ö. (2022). Heat transfer enhancement by a sinusoidal wavy plate having punched triangular vortex generators. *International Journal of Thermal Sciences*, 181, 107769.
- da Silva, A.M.F., Ahmari, H., & Kanani, A. (2012). Characteristic scales and consequences of large-scale horizontal coherent structures in shallow open-channel flows. *Environmental fluid mechanics—Memorial volume in honour*, 85-105.
- Gomez-Quinones, J., Perez-Gonzalez, V.H., Moncada-Hernandez, H., Rossetto, O., Dieck-Assad, G., & Martinez-Chapa, S.O. (2011). A multi-channel sinusoidal generator for electrokinetic stimulation of microfluidic platforms, in: 2011 *IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, 20-25.
- Khalili, R., Zali, A., & Motaghi, H. (2021). Evaluating the Heavy Metals in the Water and Sediments of Haraz River, Using Pollution Load Index (PLI) and Geo accumulation Index (Igeo). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 933-942. (In Persian).
- Larson, M., & Kraus, N.C. (1995). Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine geology*, 126, 111-127.
- Mazlomi Mochani, M., Hatami, A., Moridi, A., & Khalili, R. (2023). Sensitivity assessment of the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI) and IRan Water Quality Index for Surface Water Resources (IRWQIsc) on the water quality of the Neka River. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 581-592.

- Radan, P., & Vaghefi, M. (2016). Flow and scour pattern around submerged and non-submerged T-shaped spur dikes in a 90° bend using the SSIIM model. *International journal of river basin management*, 14, 219-232. (In Persian).
- Rusyn, V., Skiadas, C.H., & Sambas, A. (2022). Non-autonomous Two Channel Chaotic Generator: Computer Modelling, Analysis and Practical Realization, *Chaotic Modeling and Simulation International Conference. Springer*, 361-369.
- Shobe, C.M., Tucker, G.E., & Barnhart, K.R. (2017). The SPACE 1.0 model: a Landlab component for 2-D calculation of sediment transport, bedrock erosion, and landscape evolution. *Geoscientific Model Development*, 10, 4577-4604.
- Tangi, M., Bizzi, S., Fryirs, K., & Castelletti, A. (2022). A dynamic, network scale sediment (dis) connectivity model to reconstruct historical sediment transfer and river reach sediment budgets. *Water Resources Research*, 58(2), 30784
- Tassi, P., Benson, T., Delinares, M., Fontaine, J., Huybrechts, N., Kopmann, R., Pavan, S., Pham, C.-T., Taccone, F., & Walther, R. (2023). GAIA-a unified framework for sediment transport and bed evolution in rivers, coastal seas and transitional waters in the TELEMAC-MASCARET modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 159, 105544.
- Vaghefi, M., Safarpour, Y., & Hashemi, S.S. (2017). Effect of T-shaped spur dike on flow separation in a 90° bend using SSIIM model. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka* 45.
- Wildhagen, J. (2004). Applied computational fluid dynamics with sediment transport in a sharply curved meandering channel. *Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe (TH), Germany*.
- Wilson, C., Boxall, J.B., Guymer, I., & Olsen, N.R.B. (2003). Validation of a three-dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 758-768.