

مطالعه عددی سه بعدی تغییرات تراز بستر در قوس ۱۸۰ درجه

امیررضا منصوری^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، افشین هنربخش^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران - آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار مهندسی رودخانه، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

salehi@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۷)

چکیده - خاصیت سه بعدی جریان در خم‌های رودخانه‌ای، لزوم بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در این مجاری را با استفاده از مدل‌های عددی سه بعدی مطرح می‌سازد. در تحقیق حاضر، با استفاده از مدل عددی سه بعدی «سیم» (SSIIM) تغییرات تراز بستر (پوشیده از ماسه یکنواخت) در قوس ۱۸۰ درجه با انحنا نسبی ملایم بررسی شده است. واسنجی ارتفاع زبری بستر نشان می‌دهد که بهترین همخوانی با داده‌های گزارش شده آزمایشگاهی در $k_s \approx 4/5 d_p \approx 6/25 d_s = 8 \text{ mm}$ حاصل می‌شود. در این حالت مدل می‌تواند پشته رسوبی و ناحیه فرسایشی مورد انتظار در نیمه اول قوس و همچنین نواحی فرسایشی و رسوب‌گذاری نیمه دوم قوس را به خوبی مدل‌سازی کند؛ هرچند مقادیر حداکثر آبشستگی بستر و حداکثر ارتفاع تاج ناحیه رسوب‌گذاری در کانال، بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی شده است. همچنین در ادامه، با هدف بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر فیزیک مسأله، اثر تغییر در ضریب زبری، اندازه شبکه میدان و همچنین اثر تغییر در عدد فرود جریان بر پیش‌بینی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که با تغییر در میزان زبری بستر، مقدار فرسایش در قیاس با مقدار رسوب‌گذاری در بستر، تغییر بیشتری از خود نشان می‌دهد. بررسی اثر اندازه شبکه میدان نیز نشان داد که مدل تا حدی به اندازه شبکه حساس است. تغییر در عدد فرود جریان نیز به طور قابل توجهی بر میزان تغییرات شیب عرضی بستر اثر می‌گذارد.

کلید واژگان: تغییرات تراز بستر، توپوگرافی، جریان ثانویه، تنش برشی، قوس ۱۸۰ درجه، شبیه‌سازی عددی.

۱- مقدمه

طبیعی به ندرت در مسیری مستقیم جریان دارند و معمولاً در الگویی نامنظم مسیر خود را طی می‌کنند، لذا مطالعه جریان در کانال‌های خمیده و قوسی شکل در بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. مشخصه اصلی جریان در کانال‌های باز قوسی شکل، جریان ثانویه قوی‌ای است که با نام‌هایی چون حرکت

فرایند جریان در رودخانه‌های طبیعی، یکی از پیچیده‌ترین و ناشناخته‌ترین پدیده‌های موجود در طبیعت است. جریان در رودخانه‌ها از نوع آشفتنه و کاملاً سه بعدی بوده و در عین حال رودخانه در بستری کاملاً نامنظم جریان دارد که همواره در معرض تغییرات ناشی از فرایند آبشستگی و رسوب‌گذاری است. از آنجا که رودخانه‌های

سطح آب در کانال در دو حالت کانال با بستر زیر و کانال با بستر صاف پرداخت. وی در ادامه تحقیقات با انجام مطالعات نظری دقیق، نهایتاً به ارائه یک مدل تحلیلی دوبعدی برای بررسی الگوی جریان در قوس های مختلف پرداخت.

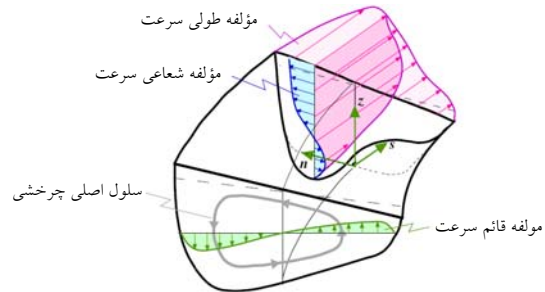
موسونی و گوتز اولین کسانی بودند که توجه ویژه ای به توزیع قدرت جریان حلزونی و نحوه تغییرات آن در طول کانال معطوف کردند [۳]. ایشان همچنین برای اولین بار وجود چرخه دوم جریان ثانویه در نزدیکی قوس داخلی را گزارش کرده اند. بنا به گزارش ایشان، این چرخه تنها در نسبت های $B/h < 10$ عرض کانال و h عمق آب در کانال اتفاق می افتد.

پیرستانی با انجام آزمایش های مختلف، الگوی سه بعدی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با بستر صلب را بررسی کرد [۴].

بویج با استفاده از روش گردابه های بزرگ^۱ به مدل سازی ساختار جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه بسیار ملایم ($R_c/B = 8/2$) با بستر صلب پرداخت [۵]. وی همچنین در تحقیق خود با مدل سازی همان قوس با مدل آشفتگی k-ε نتایج حاصل از این دو مدل را با یکدیگر کرد. بارزترین نکته مطالعه بویج، نشان دادن عدم کارایی مدل آشفتگی k-ε در مدل سازی سلول چرخشی خلاف جهت نزدیک جدار بیرونی بود.

ادگارد و برگز به بررسی آزمایشگاهی توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک پرداختند [۶]. آنان با ارائه تغییرات تراز بستر پس از زمان تعادل، به وجود یک پشته رسوبی در امتداد دیواره داخلی و دو حفره آبشستگی در امتداد دیوار خارجی کانال اشاره کرده اند. آنان الگوی فرسایش را در طول کانال دارای رفتار نوسانی عنوان کرده و محل وقوع حداکثر آبشستگی را در نزدیکی جدار بیرونی، واقع در مقطع عرضی ۵۵ درجه گزارش کرده اند.

ثانویه، چرخش ثانویه، جریان عرضی و چرخش عرضی نیز نامیده می شود. شکل (۱) الگوی جریان ثانویه شکل گرفته در بازه قوسی شکل از کانال روباز را نشان می دهد.



شکل ۱ الگوی جریان شکل گرفته در بازه قوسی شکل از کانال روباز [۲]

بر اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیر یکنواخت سرعت طولی، الگوی جریان خاصی به نام جریان حلزونی تشکیل می شود که باعث تغییرات زیادی نسبت به جریان در کانال مستقیم می شود. این جریان حلزونی اصلی ترین نقش را در شکل گیری و توسعه تغییرات تراز بستر و نیز چگونگی توزیع تنش برشی در کف کانال ایفا می کند. مسیر حرکت ذرات سیال و رسوب بستر به قدرت جریان حلزونی در کانال بستگی دارد. لذا برای مدل سازی عددی تغییرات بستر در مسیرهای رودخانه ای لازم است آثار جریان حلزونی بر ذرات سیال و رسوب در مدل اعمال شود؛ فقط مدل عددی سه بعدی توانایی مدل سازی کامل چنین پدیده مهمی در ریخت شناسی جریان های رودخانه ای خواهد داشت.

رزوفسکی [۱] جزء اولین محققانی است که در زمینه شرایط هیدرولیکی جریان در انحنای آبراهه ها و تأثیر شعاع انحنا و عرض رودخانه و زاویه قوس بر الگوی جریان آشفته در قوس به طور کامل مطالعاتی را انجام داده است. او آزمایش های خود را بر روی قوس ۱۸۰ درجه تند ($R_c/B = 1$) شعاع قوس مرکزی کانال R_c و B عرض کانال) با بستر صلب انجام داد و در آن به برداشت پروفیل سرعت در میدان و نیز الگوی تغییرات

بررسی هیدرودینامیکی جریان در یک کانال آزمایشگاهی و نیز فرسایش جدارها در رودخانه طبیعی پرداختند [۱۰]. آنان در مطالعات خود با بررسی توزیع سرعت در مقاطع مختلف و نیز الگوی جریان ثانویه در کانال نشان دادند که مدل «سیم» از توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی میدان جریان در کانال‌های خمیده دارد.

صفرزاده با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۲ به بررسی الگوی جریان آشفته در قوس ۱۸۰ درجه با بستر صلب پرداخت [۱۱]. وی در مطالعه خود با به‌کارگیری دو مدل آشفستگی k-ε استاندارد و مدل k-ω نشان داد که دقت مدل k-ω در پیش‌بینی میدان جریان نسبت به مدل k-ε بالاتر بوده اما با آنکه مدل اول در پیش‌بینی جریان ثانویه دوم در خروجی قوس ناتوان بوده است، مدل k-ω توانسته هر دو چرخه مورد انتظار در مقطع عرضی کانال را پیش‌بینی کند.

ویلسون و همکاران نیز با استفاده از مدل عددی «سیم» به بررسی الگوی جریان و نحوه پخش ماده رنگی در کانال آزمایشگاهی منندری پرداختند [۱۲]. آنان چالش اصلی کار خود را، نحوه مدل‌سازی زبری بستر، با توجه به تغییر شکل‌ها و شکل‌های بزرگ ایجادشده در بستر کانال عنوان کرده‌اند.

در این مقاله، با هدف رسیدن به درک روشنی از فیزیک حاکم بر میدان جریان و انتقال رسوب در انحنای رودخانه، تغییرات تراز بستر در قوس ۱۸۰ درجه ملایم، با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی «سیم» مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- روش کار

۲-۱- آشنایی با مدل «سیم»

مدل «سیم» معادلات ناویر-استوکس^۳ و مدل آشفستگی k-ε استاندارد را با استفاده از شبکه سه‌بعدی غیرمتعامد^۴

بلانکارت و گراف نیز به بررسی الگوی جریان و توپوگرافی بستر در کانال خمیده با بستر متحرک پرداختند [۲]. بررسی بردارهای عرضی سرعت در مطالعات این دو محقق نشان داد که در مقطع رأس قوس، دو چرخه در خلاف جهت یکدیگر به وضوح دیده می‌شود. همچنین محل حداکثر سرعت در مرز بین دو سلول چرخشی رخ داده است.

صالحی نیشابوری و اقبال‌زاده با انجام آزمایش‌های مختلف، به بررسی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند [۷]. ایشان هدف اصلی تحقیق خود را بررسی تأثیر حفره‌های ناشی از برداشت ماسه در بستر کانال دارای مسیرهای انحنادار ۱۸۰ درجه عنوان کرده‌اند.

دهقانی و همکاران به مطالعه تأثیر شرایط جریان بر تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند [۸]. نتایج مطالعات آنان نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها، در نیمه اول قوس یک تپه رسوبی در قوس داخلی و یک چاله فرسایشی در مجاورت قوس خارجی شکل می‌گیرد. همچنین در نیمه دوم قوس، تپه رسوبی دیگری در مجاورت جدار داخلی و چندین ناحیه فرسایشی در نزدیکی جدار خارجی شکل گرفته است.

در زمینه مطالعات عددی بر روی قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک نیز، وو و همکاران به توسعه مدل عددی سه‌بعدی برای محاسبه جریان و انتقال رسوب در کانال‌های باز پرداختند [۹]. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل ایشان نشان داد که در مدل‌سازی فرآیند رسوب‌گذاری در نزدیکی جدار داخلی، نتایج پیش‌بینی شده تا حدی بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی بوده است. ضعف مهم مدل عددی وو و همکاران، در نظر نگرفتن اثر شیب جانبی بستر بر نحوه انتقال بار بستر در معادلات بوده است.

رایت و همکاران نیز با به‌کارگیری مدل عددی سه‌بعدی «سیم» و نیز مدل عددی دوبعدی «ریپا»^۱ به

2. Fluent
3. Navier - Stokes
4. Non Orthogonal

1. RIPA

در این جمله که در واقع بیان کننده اثر آشفتگی بر میدان جریان است، حروف دارای علامت پریم (') مؤلفه های نوسانی سرعت در جریان آشفته و علامت خط (-) روی آنها مقادیر متوسط گیری شده زمانی این کمیت ها است.

از آنجا که لازم است برای بستن سیستم معادلات فوق، از مدل های آشفتگی استفاده شود، مدل «سیم» از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده می کند. جزئیات بیشتری را درباره معادلات فوق و مدل آشفتگی مزبور در [۱۵، ۱۶] می توانید ببینید.

۲-۳- معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب

مدل «سیم»، برای محاسبه بار بستر، از رابطه ارائه شده توسط فن راین بهره می گیرد [۱۷]:

$$\frac{q_b}{d_{\Delta}^{1/5} \sqrt{(s-1)g}} = 0.053 \frac{T^{2/3}}{D_*^{1/3}} \quad (4)$$

در این رابطه که برای ذرات با قطر متوسط ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون ارائه شده، q_b نرخ انتقال بار بستر در واحد عرض، d_{Δ} قطر متوسط ذرات رسوب و s نسبت چگالی رسوب به چگالی سیال است. D_* پارامتر بدون بعد قطر ذره و T پارامتر انتقال است که از روابط زیر به دست می آید [۱۸]:

$$D_* = d_{\Delta} \left(\frac{(s-1)g}{v^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

در این رابطه v لزجت سینماتیکی سیال است.

$$T = \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} = \frac{u_*^2 - u_{*c}^2}{u_{*c}^2} \quad (6)$$

که u_* سرعت برشی بستر $(u_* = \frac{\bar{u}\sqrt{g}}{C})$ ، C ضریب شزی و \bar{u} (سرعت متوسط جریان) [۱۹] و u_{*c} سرعت برشی بحرانی (نمودار شیلدز) است.

برای محاسبه بار معلق، همان طور که در ادامه در بخش ۴-۲ نشان داده خواهد شد، با توجه به مشخصات هیدرولیکی جریان و رسوب مورد استفاده در آزمایش دهقانی [۸] و با هدف کاهش زمان محاسبات، مدل «سیم»

جابه جا نشده حل می کند. برای منفصل سازی از روش حجم کنترل با استفاده از طرح قاعده توانی^۲ یا طرح جهت مند مرتبه دوم^۳ استفاده می شود. برای ارتباط دهی جمله فشار و سرعت، روش «سیمپل»^۴ [۱۳] استفاده می شود. در این مدل، با استفاده از روش حل ضمنی، ابتدا مقادیر سرعت و سایر متغیرهای میدان (نظیر فشار، k و ϵ) محاسبه شده و در مرحله بعد، مؤلفه های سرعت به دست آمده، در حل معادلات انتقال و پخش رسوب برای اندازه های مختلف دانه بندی رسوب مورد استفاده قرار می گیرند [۱۴].

۲-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته، با معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر-استوکس و معادله پیوستگی به صورت زیر توصیف می شوند [۱۵]:

معادله بقای اندازه حرکت (مومنتوم):

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

و معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

در معادلات فوق x_i مؤلفه های دستگاه مختصاتی دکارتی ($i=1,2,3$)، t زمان، ρ ، p ، u_i به ترتیب مؤلفه های سرعت، فشار، چگالی و لزجت ملکولی است. جمله سوم سمت راست معادله (۱) که به تنش آشفتگی یا تنش رینولدز موسوم است، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \quad (3)$$

1. Non Staggered
2. Power Law (PL)
3. Second Order Upwind (SOU)
4. SIMPLE

۲-۴- شرایط مرزی

برای محاسبات میدان جریان، در ورودی بالادست میدان، برای پارامترهای سرعت و آشفتگی از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است. در مرز خروجی، برای تمامی متغیرها شرط مرزی گرادین صفر اعمال می شود. در سطح آب نیز، شرط مرزی گرادین صفر برای تمامی متغیرها - به جز انرژی جنبشی آشفتگی (k) - اعمال شده و برای پارامتر مزبور نیز در سطح آب مقدار صفر اعمال می شود. برای شرط مرزی جدار، مدل «سیم» از قانون جدار [۲۲] برای مرزهای زبر در سلولهای مجاور جدار استفاده می کند.

۳- داده‌های آزمایشگاهی

میدان مورد نظر برای شبیه سازی عددی، نتایج مربوط به مطالعات آزمایشگاهی دهقانی و همکاران [۸] شامل کانال خمیده با زاویه مرکزی 180° درجه است که در بالادست و پائین دست دو کانال دسترسی مستقیم با طولهای به ترتیب $7/2$ و $5/2$ متر دارد. دیوار و بستر این کانال از جنس پلکسی گلاس ($k_s = 0/0001 \text{ m}$ ، k_s زبری معادل) ساخته شده است [۴]. در آزمایشهای مربوط به حالت بستر متحرک، بستر کانال از یک لایه ماسه نسبتاً یکنواخت ($d_s = 1/25 \text{ mm}$ و $\sigma_g = 1/3$) به ضخامت 20 سانتی متر پوشیده شده است. سایر مشخصات هندسی کانال، مشخصات هیدرولیکی جریان و مشخصات رسوب در شکل (۲) و جدولهای (۱) تا (۳) نمایش داده شده است.

جدول ۱ مشخصات هندسی کانال 180° درجه تربیت مدرس [۸]

شکل مقطع	شیب طولی کف کانال	عرض کانال B (m)	شعاع مرکزی قوس R_c (m)
مستطیلی	۰/۰۰۱۵	۰/۶۰	۲/۶

جدول ۲ مشخصات هیدرولیکی آزمایش [۸]

دبی ورودی (lit / s)	عمق بالادست (m)	عدد فرود (Fr)	رینولدز (Re)
۲۲	۰/۰۹۷	۰/۳۹	۳۵۰۰۰

به جای حل معادله جابه جایی - پخش برای غلظت رسوب، ابتدا غلظت رسوب در حالت تعادل در سطح مبنا را با استفاده از رابطه زیر به دست می آورد [۱۹]:

$$C_a = 0/015 \frac{d_s^{1/3}}{a} \frac{\left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1/5}}{\left[\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \frac{g}{v^2} \right]^{1/4}} \quad (7)$$

C_a غلظت رسوب در سطح مبنا و a ارتفاع سطح مبنا است که در مدل «سیم» برابر با ارتفاع زبری بستر قرار داده می شود. τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی برای شروع حرکت ذرات رسوب، ρ_w و ρ_s به ترتیب چگالی آب و رسوب و g شتاب جاذبه زمین است. سپس غلظت حاصل از رابطه (۷) با استفاده از رابطه راوز [۲۰] (رابطه (۸))، میان یابی شده و توزیع عمودی غلظت برای سلولهای واقع در فاصله بین سطح آب تا سطح مبنا به دست می آید [۱۷]:

$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right]^{ku} \frac{w}{ku} \quad (8)$$

C غلظت رسوب در سلول مورد نظر، h عمق آب، y فاصله سلول مورد نظر تا سطح مبنا، w سرعت سقوط ذره رسوب، K ثابت ون کارمن است که برابر $0/4$ فرض می شود.

در مورد سلولهای مجاور بستر، معمولاً پیوستگی رسوب ارضا نخواهد شد که این به معنای احتمال ایجاد پدیده فرسایش و رسوب گذاری در این سلولها است. اکنون با اعمال معادله پیوستگی رسوب و محاسبه اختلاف پیوستگی رسوب در هر سلول، می توان مقادیر عددی فرسایش یا رسوب گذاری را در این دسته از سلولها تعیین کرد. این مقدار اساس محاسبه تغییرات تراز بستر در میدان است [۲۱].

۴-۱- تولید و تنظیم شبکه بندی میدان

مدل عددی «سیم» به تنهایی توانایی تولید شبکه مورد نظر را برای میدان ندارد و به همین منظور باید با استفاده از برنامه‌های کمکی یا برنامه‌نویسی، شبکه مورد نظر، در قالبی خاص برای آن تولید شود. بدین منظور برنامه تولید شبکه برای کانال مزبور به زبان فورترن نوشته شد. برنامه مزبور به نحوی نوشته شده که بتواند مطابق خواست کاربر با گرفتن تعداد گره‌ها در جهت طول، عرض و نیز گرفتن تغییرات زاویه ($\Delta\theta$) در قسمت قوسی شکل کانال، شبکه غیریکنواختی را منطبق بر مرزها تولید کند. با استفاده از این برنامه و با توجه به زیاد بودن زمان تعادل در کانال آزمایشگاهی مورد نظر (در حدود ۴۸ ساعت) و سرعت بسیار پایین همگرایی و زمانبر بودن محاسبات در حالت بستر متحرک، سعی شد که تعداد گره‌های محاسباتی تا حد امکان کم باشند. اشلختینگ در نتایج حاصل از آزمایش‌های خود برای آنکه قانون جدار در فاصله y معتبر باشد، پیشنهاد کرد که y باید به گونه‌ای انتخاب شود که پارامتر y^+ (رابطه (۹)) در فاصله‌ی ۳۰ تا ۳۰۰۰ باشد [۲۶]:

$$y^+ = \frac{U^* y}{\nu} \quad (9)$$

در این رابطه، y فاصله مرکز سلول واقع تا جدار کانال است. رعایت این معیار در شبکه‌بندی میدان، در جهت عرضی و ارتفاعی الزامی است. لذا با رعایت این معیار و سایر نکات بالا، از شبکه‌ای با $91 \times 9 \times 7$ گره، به ترتیب در جهت‌های طول، عرض و عمق استفاده شده است. در ادامه، تأثیر شبکه‌بندی بر میدان، با انتخاب شبکه ریزتری بررسی خواهد شد.

۴-۲- تنظیمات مقدماتی محاسبات انتقال رسوب

در شبیه‌سازی عددی انتقال رسوب، بار معلق و بار بستر - هر دو - باید در محاسبات در نظر گرفته شوند؛ ولی با توجه به زمانبر بودن محاسبات انتقال رسوب برای هر دو بخش بار معلق و بار بستر در میدان، ابتدا به این موضوع

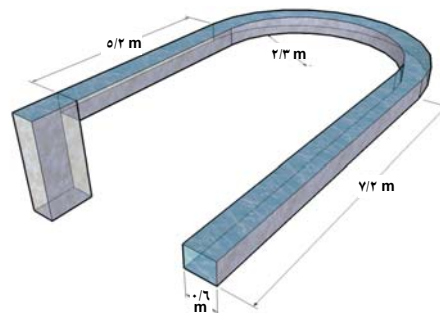
جدول ۳ مشخصات رسوب در آزمایش [۸]

چگالی رسوب (kg/m^3)	سرعت سقوط ([۱۹]) (m/s)	زاویه قرارگیری مصالح (درجه)
۲۶۵۰	۰/۱۵	۳۷

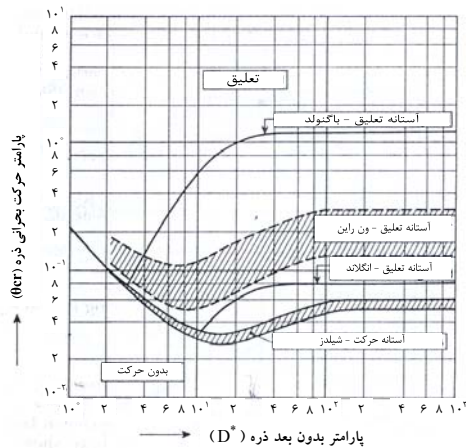
براساس مشخصات هندسی مذکور، انحنای نسبی این کانال برابر $R_c/B = 4/33$ بوده که خم را در رده خم‌های ملایم قرار می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، جریان حالت زیر بحرانی داشته و آشفته است.

۴-۳- اجرای مدل

برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی عددی و نیز مطالعات مقدماتی، در ابتدا لازم است هندسه میدان با شبکه‌بندی مناسبی تهیه شود. جزئیات این کار به تفصیل در بخش بعدی آورده خواهد شد. پس از تهیه شبکه مناسب، شرایط مرزی بخش ۲-۴ به میدان اعمال می‌شود. همچنین با توجه به اینکه مدل برای منفصل‌سازی معادله انتقال و پخش رسوب از نوعی روش ضمنی زمانی استفاده می‌کند [۱۲]، لذا لازم است گام زمانی مناسبی برای مدل تعیین شود. اولسن پیشنهاد می‌کند که گام زمانی باید به حدی باشد که تغییرات تراز بستر در هر تکرار از ۱۰ درصد عمق آب تجاوز نکند [۲۴]. در ادامه و با توجه به مطالعات سایر محققان ([۱۷، ۲۵])، گام زمانی ۲۰ ثانیه با تعداد تکرار داخلی ۱۰۰ بار برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. در حل معادلات جریان و انتقال رسوب نیز، معیار همگرایی (با توجه به بی‌بعد شدن مقادیر باقی‌مانده‌ها)، برابر با 10^{-3} در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ شمای هندسی کانال ۱۸۰ درجه تربیت مدرس [۸]



شکل ۴ نمودار آستانه تعلیق ذره،

ارائه شده توسط فن راین [۱۹]

اکنون اگر مقادیر D^* و θ_{cr} برای شرایط آزمایشگاهی دهقانی محاسبه شود مقادیر $D^* \approx 33$ و $\theta_{cr} \approx 0.17$ به دست می آید. بر اساس نمودار فن راین، دیده می شود که محل تقاطع D^* و θ_{cr} بالای منطقه آستانه تعلیق فن راین - که به معنای حرکت ذرات به صورت بار معلق است - قرار نمی گیرد، و این به آن معناست که بر اساس معیار فن راین نیز، در شرایط آزمایشگاهی دهقانی انتظار نمی رود ذره رسوبی در کانال به صورت بار معلق حرکت کند.

جدا از دو معیار کنترلی فوق، مشاهدات دهقانی و همکاران [۸] مبنی بر عدم حضور دانه های معلق در طول انجام آزمایش، فرض مدل سازی انتقال رسوب تنها بر اساس بار بستر را تایید می کند. لذا در این مطالعه با هدف کاهش زمان محاسبات در تنظیمات مربوط به اجرای محاسبات انتقال رسوب در مدل «سیم» به گونه ای عمل شد که محاسبات بار معلق نادیده گرفته شود.

۵- واسنجی مدل

برای واسنجی مدل، در ابتدا با استفاده از تنظیمات مقدماتی ذکر شده در بخش قبل و با در نظر گرفتن ارتفاع زبری برابر با قطر متوسط دانه ها ($k_s = d_s$)، مدل سازی انجام شد و نتایج، به عنوان «حالت پیش فرض» در نظر گرفته شد. سپس اندازه زبری تا حدی افزایش یافت که نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، همخوانی قابل قبولی را

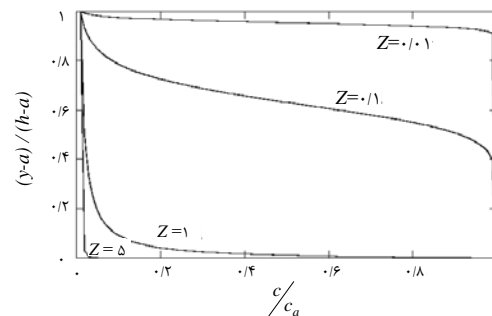
می پردازیم که نادیده گرفتن محاسبات بار معلق با هدف کاهش زمان محاسبات، تا چه اندازه در پاسخ ها تأثیرگذار خواهد بود. فن راین پارامتر تعلیق (Z) را به صورت زیر ارائه کرده است [۱۹]:

$$Z = \frac{w}{\beta k u_*} \quad (10)$$

β ضریبی است که معمولاً برابر ۱ در نظر گرفته می شود. این محقق پارامتر Z را به عنوان معیاری برای میزان انتقال بار معلق معرفی می کند. همچنین اگر با توجه به معادله راوز برای پروفیل عمودی غلظت (رابطه ۸)، نمودار تغییرات C/C_a برای سلولی به ارتفاع y از بستر، نسبت به Z نشان داده شود، شکل (۳) حاصل خواهد شد. چنانچه برای شرایط آزمایشگاهی مطالعه حاضر، پارامتر Z محاسبه شود، $Z \approx 12$ حاصل خواهد شد. از شکل (۳) به خوبی دیده می شود که برای $Z > 5$ در عمل هیچ دانه رسوبی در میدان یافت نمی شود که به صورت بار معلق حرکت کند. لذا با شرایط آزمایشگاهی دهقانی و بر اساس نمودار فوق پیش بینی می شود که تقریباً کل حرکت ذرات رسوب در کانال به صورت بار بستر باشد.

علاوه بر معیار فوق، فن راین [۱۹] نیز در مطالعات خود نموداری را برای آستانه حرکت ذرات به صورت بار معلق ارائه کرده است (شکل ۴). محور افقی این نمودار پارامتر بدون بعد ذره (D^*) (رابطه ۵) و محور قائم، پارامتر حرکت بحرانی ذره (θ_{cr}) (رابطه ۱۱) است:

$$\theta_{cr} = \frac{u_{*c}^2}{(s-1)gd_s} \quad (11)$$



شکل ۳ منحنی تغییرات پروفیل عمودی غلظت بر حسب

پارامتر تعلیق [۲۳]

آبشستگی در آن ناحیه از کانال منجر شده است. با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۶) مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی در این حالت همخوانی چندانی با نتایج آزمایشگاهی نشان نمی‌دهد. شکل (۵-ب) نتایج حاصل از تکرار مدل‌سازی با افزایش تدریجی ارتفاع معادل زبری بستر نشان می‌دهد که تا حدی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی مناسبی دارد.



شکل ۵ بررسی تغییرات تراز بستر پیش‌بینی شده توسط مدل عددی در

حالت پیش فرض ($k_s = d_0$) و (ب) حالت مبنا ($k_s \approx 6/25 d_0$)

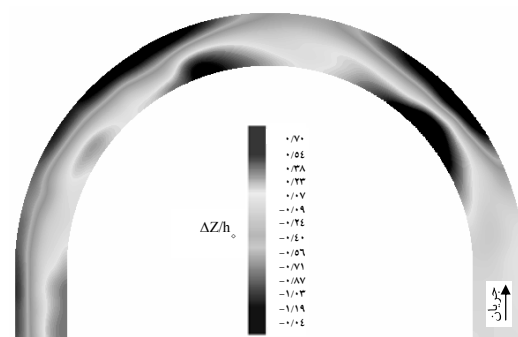
(ΔZ تغییرات تراز بستر و h_0 تراز اولیه سطح آب در مقطع عرضی پایین‌دست میدان است)

است. در نیمه اول و در مجاورت جدار داخلی، وجود یک پشته رسوبی در حدود زاویه ۵۰ تا ۶۰ درجه به‌وضوح دیده می‌شود. در نیمه دوم نیز وجود یک پشته رسوبی دیگر در حدود زاویه ۱۲۰ تا ۱۳۰ درجه و همچنین دو چاله آبشستگی در مجاورت جدار خارجی و بعد از زاویه ۱۳۰ درجه مشاهده می‌شود. مقایسه این نتایج با شکل (۶) حکایت از همخوانی مناسب الگوی شکل‌گرفته از تغییرات تراز بستر بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی دارد. لذا حالت اخیر به‌عنوان حالت مبنا برای مدل‌سازی‌های بعدی در نظر گرفته شده است.

برای ارتفاع زبری بستر تاکنون مقادیر تجربی گوناگونی توسط محققان مختلف پیشنهاد شده است. این مقادیر، از $k_s = d_0$ (از سوی وانونی) تا $k_s = 3 d_0$ (از سوی فن‌راین) متفاوت است [۱۲]، که هر یک در شرایط

با داده‌های آزمایشگاهی نشان دهد. این حالت نیز به‌عنوان «حالت مبنا» برای ادامه کار معرفی می‌شود.

شکل (۵) نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را با فرض $k_s = d_0$ نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی حالت پیش‌فرض در شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که تقریباً در کل طول قوس، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در تراز بستر مشاهده نمی‌شود. هرچند با نزدیک شدن به خروجی قوس و در مجاورت جدار خارجی، تا حدی فرسایش رخ داده و به شکل‌گیری حفره



شکل ۶ تغییرات تراز بستر اندازه‌گیری شده در کانال

تربیت‌مدرس در زمان تعادل

(۴۸ ساعت پس از شروع آزمایش) [۸]

این نتیجه در $k_s \approx 4/5 d_0 \approx 6/25 d_0 = 8 \text{ mm}$ به دست آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش زبری بستر تا این حد، پدیده‌های مورد انتظار در بستر قوس ۱۸۰ درجه به‌خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده

علاوه بر ضریب زبری دانه، شامل ضریب زبری شکل بستر^۳ نیز می‌شود [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، اسکات و همکاران در مدل‌سازی قسمتی از قوس رودخانه‌ای با مدل عددی سه‌بعدی «سی سی اچ ای»^۴ - که از روابطی مشابه روابط مدل عددی «سیم» در محاسبات انتقال رسوب استفاده می‌کند - ضریب زبری واسنجی شده را برابر $k_s \approx 6/65 d_s$ گزارش کرده‌اند [۲۸]. ویلدهاگن نیز که متاندر آزمایشگاهی را با مدل «سیم» شبیه‌سازی کرده است، ضمن اشاره به واسنجی مدل با $k_s = 10 d_s$ ، چنین نتیجه گرفته که مدل «سیم» به اصلاحاتی در الگوریتم محاسباتی تنش برشی بحرانی نیاز دارد، به شکلی که بتواند ارتفاع زبری حاصل از واسنجی را تا گستره مقادیر فیزیکی گزارش شده در مطالعات آزمایشگاهی، کاهش دهد [۱۷]. بدین ترتیب و با توجه به نتایج حاصل از مطالعات مشابه توسط سایر محققان که در بالا به آن اشاره شد، مشخص می‌شود که ارتفاع زبری حاصل از واسنجی در مطالعه حاضر $(k_s \approx 4/5 d_s \approx 6/25 d_s)$ در گستره‌ای منطقی قرار داشته و اختلاف چندانی با نتایج سایر محققان ندارد.

۶- تحلیل نتایج

۶-۱- بررسی و تحلیل عوارض و تغییرات تراز

شکل گرفته در بستر کانال در حالت مینا

همان‌طور که پیشتر ذکر شد با توجه به شکل (۵-ب) مشاهده می‌شود که مدل به‌خوبی توانسته الگوی کلی شکل‌گیری نواحی متعدد رسوب‌گذاری و فرسایش را در بستر توصیف کند. هرچند نواحی فرسایشی پیش‌بینی شده، گسترش افقی کمتری را در پلان نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، اما به‌عکس، در مورد ناحیه رسوب‌گذاری، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، عرض بیشتری از کانال را اشغال کرده است. شکل (۷) مقایسه تغییرات طولی بستر در مجاورت جدار داخلی و خارجی کانال را بین نتایج حاصل

آزمایشگاهی و میدانی مشخصی حاصل شده و اعمال آنها در شرایط دیگر، مستلزم واسنجی آن است. به‌عنوان مثال فن‌راین در مطالعات خود این‌گونه ذکر می‌کند که ضریب k_s در رابطه $k_s = 3 d_s$ ، در واقع میانگینی از ضرایب متعدد در گستره بین ۱ تا ۱۰ بوده که برای نتایج آزمایشگاهی بهترین همخوانی را نشان داده است [۱۸].

بر این اساس، برای واسنجی مقدار ضریب زبری بستر در مطالعات عددی، محققان معمولاً مقدار $k_s = 3 d_s$ را مبنای شروع محاسبات قرار داده و سپس با تغییر آن و مقایسه پاسخ‌های حاصل از مدل‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب زبری را برای مدل خود واسنجی کرده‌اند که در بسیاری از حالت‌ها، مقدار این ضریب واسنجی شده نسبت به مقدار اولیه انتخاب شده $(k_s = 3 d_s)$ ، بسیار متفاوت بوده است. به‌عنوان مثال، دوک و همکاران در مطالعه عددی قوس ۱۸۰ درجه آزمایشگاهی با مدل خود - که در آن از الگوریتم‌هایی مشابه الگوریتم‌های مدل «سیم» استفاده شده - ضریب زبری واسنجی شده را برابر $k_s = 40 d_s$ گزارش کرده‌اند [۲۷]. همین محققان در مدل‌سازی قوس دیگری در شرایط جریان غیردائم، ضریب زبری را در مقداری برابر $k_s \approx 11 d_s$ واسنجی کرده‌اند [۲۷]. ویلسون و همکاران نیز که در مطالعات خود به بررسی عددی متاندر آزمایشگاهی با مدل «سیم» پرداخته‌اند، عنوان کرده‌اند که ضریب زبری بستر به صورت $k_s \approx 13 d_s$ واسنجی شده است. این محققان ضمن اشاره به این که مقدار ضریب زبری واسنجی شده، از بیشترین مقدار گزارش شده تجربی (رابطه فن‌راین، $k_s \approx 3 d_s$) نیز بیشتر است، علت این مسأله را این نکته دانسته‌اند که تمامی مقادیر تجربی پیشنهاد شده، حاصل آزمایش در کانال‌هایی با بستر صاف بوده و لذا این مقادیر، تنها شامل زبری مرز اصطکاکی^۱ یا به بیان دیگر، زبری دانه‌ها^۲ است. در حالی که مقدار ضریب زبری واسنجی شده در مدل عددی،

3. Form Roughness
4. CCE 3D

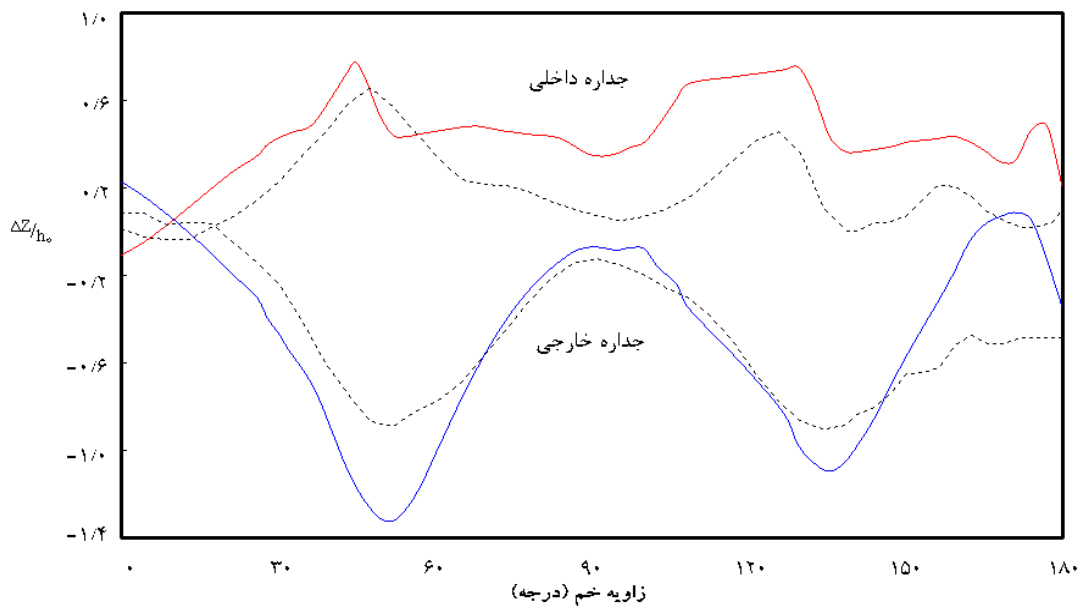
1. Fractional Boundary Roughness
2. Grain Roughness

هر سه جهت (مجموعاً ۸ برابر ریزتر) عمق چاله آبشستگی را ۱۰٪ افزایش داده است. لذا انتظار نداریم که اختلاف مدل‌سازی در تحقیق حاضر ناشی از دقت شبکه بوده باشد. هر چند این مسأله نیز در ادامه، با به‌کارگیری شبکه ریزتر کنترل می‌شود.

علاوه بر عدم واسنجی کاملاً دقیق زبری بستر، سایر علل بنیادی این اختلاف بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی را می‌توان با بررسی خطاهای معمول در مدل‌سازی عددی انتقال رسوب توسط مدل «سیم» جستجو کرد. یک دسته از این خطاها از چگونگی تعریف فرایند انتقال رسوب در مدل عددی و فرضیات و تقریب‌هایی ناشی می‌شود که در ساده‌سازی معادلات حاکم بر این مدل به کار رفته است. به‌عنوان مثال، بر اساس ایده بوزینسک، تنش‌های رینولدز موجود در معادلات ناویر - استوکس از طریق ضریب لزجت گردابه‌ای به گردایان میانگین زمانی سرعت‌ها ارتباط داده می‌شود که مقدار ضریب لزجت گردابه‌ای، خود حاصل از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ است. بر این اساس لزجت آشفتگی به دست آمده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در عمل به صورت یک ضریب همگن محاسبه می‌شود.

از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نیز دیده می‌شود، تقریباً تمامی عوارض و پدیده‌های مورد انتظار در قوس پیش‌بینی شده است. با این حال، مقایسه مقادیر رسوب‌گذاری در نزدیکی جدار داخلی و فرسایش در مجاورت قوس خارجی نشان می‌دهد که مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی، دست بالا عمل کرده است. این اختلاف در حداکثر مقدار خود (در عمق چاله آبشستگی نیمه اول) به حدود ۴۰-۳۵ درصد می‌رسد، هرچند اختلاف نتایج در طول کانال به مراتب کمتر از این مقدار است.

یکی از مهمترین علل این پیش‌بینی بیش از اندازه را می‌توان در عدم واسنجی کاملاً دقیق زبری بستر دانست؛ به این معنا که با انجام تغییرات بیشتر و انجام مدل‌سازی‌های متعدد دیگر و دستیابی به مقدار k_s جدید، می‌توان نتایج عددی را به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر ساخت. اولسن در مدل‌سازی عددی قسمتی از رودخانه طبیعی با مشکل مشابهی در دست بالا بودن نتایج عددی نسبت به نتایج میدانی روبه‌رو بوده است [۲۵] و برای بررسی علت این مسأله، پارامترهای متعددی را در مدل خود (مدل «سیم») آزمایش کرده است. بررسی‌های وی نشان داده که ریزکردن شبکه تا دو برابر، در



شکل ۷ تغییرات طولی بستر در امتداد دو خط به فاصله $B/4$ از جدار داخلی و خارجی کانال

----- نتایج آزمایشگاهی
 ————— نتایج عددی

است که نتایج پیش‌بینی‌شده در جدار بیرونی در این مقاطع از کانال، فرسایش کمتری را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نشان دهند. البته این نکته نیز قابل ذکر است که قاسم و چادری در صحت‌سنجی مدل دوبعدی خود با مشکل مشابهی در خروجی قوس روبه‌رو بوده‌اند و علت اصلی این اختلاف را نیز، عدم قطعیت‌های نهفته در روابط تجربی مورد استفاده برای پیش‌بینی غلظت رسوب و نیز رابطه مورد استفاده برای پیش‌بینی جهت حرکت ذرات رسوب دانسته‌اند [۳۰].

دقت بیشتر در شکل (۵-ب) که پیشتر ارائه شد، همچنین نشان‌دهنده آن است که در کل طول کانال، قوس خارجی در معرض فرسایش و قوس داخلی در معرض رسوب‌گذاری قرار دارد. علت این پدیده نیز وجود جریان ثانویه است. جریان ثانویه به‌عنوان مشخصه اصلی جریان در کانال‌های خمیده، باعث می‌شود که مسیر حداکثر سرعت در سطح آب به سمت قوس خارجی منتقل شده و رسوب‌ها در کف به سمت قوس داخلی هدایت شوند. بر این اساس انتظار می‌رود که ذرات رسوب در کف، از قوس خارجی جدا شده و به سمت قوس داخلی حرکت کنند. در این شکل همچنین مشاهده می‌شود که یک ناحیه رسوب‌گذاری^۱ در نیمه اول قوس داخلی و یک ناحیه فرسایشی^۲ در روبروی این ناحیه تشکیل شده است. محققان مختلف علت اصلی تشکیل این دو ناحیه در نیمه اول کانال را، پاسخ جریان و بستر به تغییر در انحنای کانال، در تبدیل از مسیر مستقیم به مسیر قوسی شکل عنوان کرده‌اند [۶]. در واقع جریان با ورود از مسیر مستقیم بالادست 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 رسوب‌های بستر و تغییر در پروفیل کف کانال می‌شود. نکته مهم دیگر در مورد این دو پدیده در نیمه اول قوس، با دقت در شکل (۷) مشخص می‌شود. همان‌طور که در

اما مطالعات آزمایشگاهی [۲، ۵]) نشان داده است که ضریب لزجت گردابه‌ای به جهت بستگی داشته و لذا ناهمگن است. در نتیجه وجود فرض همگن بودن ضریب لزجت گردابه‌ای در مدل «سیم»، خود منشأ خطاهایی در پاسخ‌ها بوده است. یکی دیگر از خطاهای این دسته، استفاده از رابطه (۴) برای محاسبه بار بستر در مدل «سیم» است. این رابطه اساساً در کانال‌های مستقیم - که در آن‌ها پروفیل سرعت لگاریتمی بوده و جریان بیشتر خاصیت یک‌بعدی دارد - آزمایش شده [۱۸] و در نتیجه به‌طور کامل برای کانال‌های خمیده‌ای نظیر قوس ۱۸۰ درجه که در آن‌ها جریان کاملاً پیچیده و سه‌بعدی بوده و پروفیل سرعت از حالت لگاریتمی خود خارج شده، معتبر و دقیق نیست. علاوه بر این تخمین نادرست پارامتر a (سطح مبنا) می‌تواند عامل پیدایش خطاهایی بزرگ در مقادیر حاصل از مدل‌سازی شود. در مدل «سیم» پارامتر a برابر ارتفاع زبری فرض شده است [۲۴].

محققان مختلف (۲۹، ۹) مقادیر مختلفی را برای پارامتر a در مدل عددی خود به کار برده‌اند. تغییر (تخمین نامتناسب با وضعیت مسأله) این پارامتر می‌تواند باعث تغییرات چشمگیری در پاسخ‌ها شود.

بررسی بیشتر شکل (۷) همچنین نشان می‌دهد که در نزدیکی خروجی قوس و از زاویه ۱۴۰ درجه به بعد، در مجاورت جدار خارجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به‌طور ناگهانی دچار عدم همخوانی آشکاری با نتایج آزمایشگاهی می‌شود، به شکلی که مقدار فرسایش در این ناحیه از کانال به میزان چشمگیری کمتر از مقادیر مورد انتظار پیش‌بینی شده است. این پدیده را می‌توان ناشی از عدم توانایی مدل آشفتگی مورد استفاده در نرم‌افزار «سیم» در پیش‌بینی چرخه دوم جریان ثانویه - که در نزدیکی قوس خارجی رخ می‌دهد - دانست. زیرا وجود چرخه دوم جریان ثانویه، در نزدیکی قوس خارجی در این بازه از کانال، به انتقال حداکثر سرعت به سمت بستر منجر می‌شود و بنابراین انتظار داریم که فرسایش بیشتری در این ناحیه رخ دهد. با عدم مدل‌سازی این پدیده، طبیعی

1. Point Bar
2. Point Pool

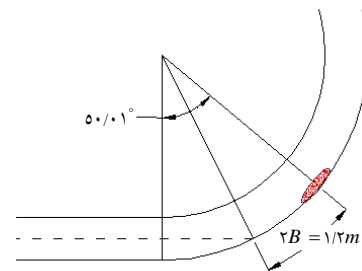
با پیشروی در امتداد کانال، مهم‌ترین اثری که به‌وضوح دیده می‌شود، تغییرات نوسانی تراز بستر در قوس داخلی و همچنین در قوس خارجی است، شکل (۷). علت رفتار نوسانی بستر در طول کانال را می‌توان این دانست که بستر در پاسخ به تغییر در انحنا کانال، مانند یک سیستم مستهلک‌کننده نوسانی انرژی عمل می‌کند. ماسلمان در تبیین تئوری این مسأله با تشبیه این رفتار به رفتار نوسانی سیستم جرم، فنر و میراگر، نتیجه می‌گیرد که همان‌طور که پاسخ سیستم فنر، جرم و میراگر به تحریک اولیه، حالتی نوسانی و کاهشی دارد، در فرایند ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نیز، پاسخ بستر رودخانه یا کانال به منبع اختلال محلی دائمی در هندسه میدان^۱، شکل‌گیری الگوی کاهشی و نوسانی از پشته‌های رسوبی متناوب در پایین‌دست آن منبع اختلال است [۳۲]. این محقق مثال‌هایی از منبع اختلال را تغییر ناگهانی در عرض رودخانه یا انقطاع ناگهانی در انحنا نسبی کانال می‌داند. بر این اساس در مطالعه حاضر، تبدیل مسیر از کانال مستقیم به کانال قوسی شکل ۱۸۰ درجه منبع اختلال در مطالعه حاضر به‌شمار می‌رود. شکل‌های (۵-ب) و (۷) همچنین در نیمه دوم قوس و در حدود زاویه ۱۲۵ تا ۱۴۰ وجود یک ناحیه رسوب‌گذاری را در نزدیکی قوس داخلی و یک ناحیه فرسایشی را در نزدیکی جدار خارجی نشان می‌دهند. علت شکل‌گیری این دو ناحیه نیز، با توجه به توضیحات بالا روشن می‌شود.

دقت بیشتر در شکل‌های (۵-ب) و (۷)، وجود یک ناحیه فرسایشی دیگر را در مقطع ۱۷۵ درجه به بعد (مقطع خروجی قوس) نشان می‌دهد. بررسی بیشتر تغییرات تراز بستر با گذشت زمان نشان می‌دهد که این ناحیه کانال، نخستین منطقه‌ای است که در آن ذرات رسوبی بستر در نزدیکی جدار خارجی شروع به حرکت می‌کند [۳۳]. علت شکل‌گیری این ناحیه فرسایشی ممکن است این باشد که در این ناحیه کانال، از ابتدای

این شکل دیده می‌شود، تغییرات فرسایشی رخ داده در حفره آبستستگی نیمه اول، بسیار بیشتر از تغییرات رسوب‌گذاری در پشته رسوبی روبه‌روی آن بوده است. علت اصلی این پدیده - تشدید فرسایش در قوس خارجی - ممکن است این باشد که با شکل‌گیری شیب عرضی بستر با گذشت زمان، عرض موجود برای جریان کاهش یافته و لذا سرعت در این ناحیه افزایش می‌یابد. دلیل دیگر شکل‌گیری این پدیده را می‌توان این دانست که با قدرت گرفتن جریان ثانویه و اثرگذاری آن بر پروفیل عمقی سرعت، حداکثر سرعت در این پروفیل به سمت بستر حرکت کرده و گرادیان‌های سرعت در آن ناحیه افزایش می‌یابد. لذا این هسته پرسرعت و تأثیر آن در تشکیل ناحیه‌ای با تنش برشی بالا، خود اثر مضاعفی بر تشدید فرسایش در قوس خارجی خواهد داشت.

شکل‌های (۵-ب) و (۷) همچنین نشان می‌دهند که محل شکل‌گیری این چاله فرسایشی در حدود زاویه ۶۰-۵۰ درجه است. رادکیوی در مطالعات خود موقعیت چاله فرسایشی در قوس‌ها را به اندازه دو برابر عرض رودخانه، پایین‌تر از محل تلاقی امتداد خط وسط جریان (در ناحیه مستقیم رودخانه قبل از خم) تخمین زده است [۳۱].

بر اساس این تعریف، محل احتمالی ناحیه فرسایشی برای کانال تربیت مدرس، در حدود زاویه ۵۰ درجه حدس زده می‌شود که با نتایج حاصل از تحقیق حاضر همخوانی دارد (شکل ۸). رادکیوی محل مزبور را محل رشد جریان ثانویه عنوان کرده و این مکان را به‌عنوان محل مناسبی برای احداث آبگیر جانبی عنوان کرده است [۳۱].



شکل ۸ پیش‌بینی موقعیت چاله فرسایشی نیمه اول بر اساس روش

پیشنهادی رادکیوی برای کانال ۱۸۰ درجه تربیت مدرس [۱۱]

وی زاویه بین بردارهای سرعت در سطح و کف را در حدود ۲۰ تا ۲۲ درجه گزارش کرده است. میزان انحراف محاسبه شده در نتایج حاصل از حل عددی در شکل (۹) نشان داده شده است. بررسی‌های انجام شده بر روی زوایای انحراف در این بازه کانال نشان داد که این زاویه از حدود ۱۷ تا ۲۰ درجه متغیر است که با مقدار گزارش شده توسط دهقانی همخوانی قابل قبولی را نشان می‌دهد.

۷- تحلیل حساسیت

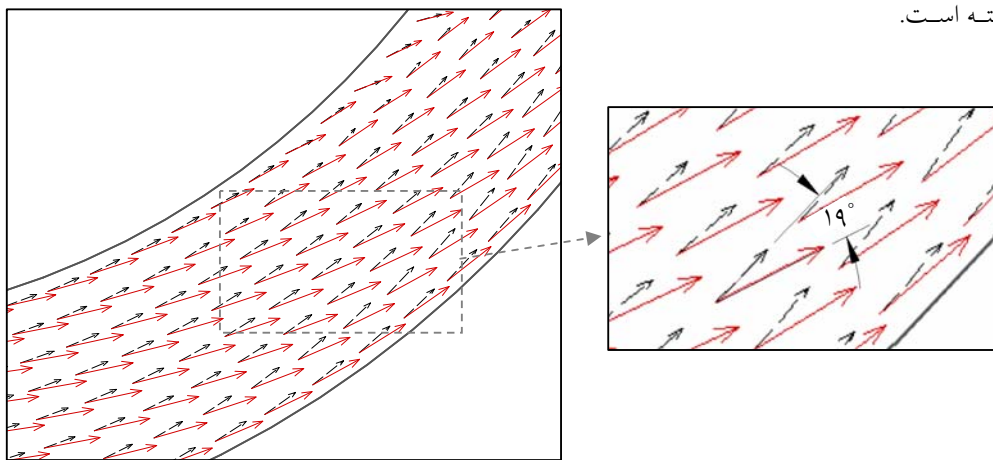
در این بخش، با هدف بررسی عوامل مؤثر بر شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر در کانال ۱۸۰ درجه با بستر متحرک، به تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف پرداخته می‌شود. برای این کار در ابتدا به بررسی نحوه تأثیر تغییرات زبری معادل (k_s) بر تغییرات تراز بستر پرداخته و سپس اثر شبکه‌بندی میدان بر پیش‌بینی توپوگرافی کف کانال بررسی می‌شود. در انتها نیز اثر عدد فرود جریان به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر الگوی جریان و انتقال رسوب در قوس مطالعه خواهد شد.

آزمایش و به‌علت تأثیر جریان ثانویه بر انتقال هسته پرسرعت به سمت جدار خارجی در مقطع خروجی قوس و گسترش و حرکت آن به سمت لایه‌های پایین نزدیک بستر، گرادپان‌های شدید سرعت در این بازه از کانال شکل گرفته و باعث ایجاد یک ناحیه پرتنش در خروجی قوس می‌شود. لذا این ناحیه پرتنش - که در طول آزمایش کانال با بستر متحرک، به دلیل باقی ماندن اثر جریان ثانویه در قوس، همواره دیده می‌شود - باعث شکل‌گیری ناحیه فرسایشی در این بازه از کانال می‌شود.

۶-۲- بررسی میزان انحراف خطوط جریان در

بستر کانال در مقایسه با صفحه نزدیک سطح آب

شکل (۹) جهت بردارهای انتقال ذرات رسوب در کف و سطح آب را در بازه ۱۰ تا ۵۰ درجه از کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل به‌خوبی دیده می‌شود، جریان ثانویه شکل گرفته در قوس باعث شده که بردارهای سرعت در کف بستر کاملاً به سمت قوس داخلی و بردارهای سرعت در صفحه نزدیک سطح آب به سمت قوس خارجی متمایل شوند. دهقانی در مطالعات آزمایشگاهی خود به اندازه‌گیری میزان انحراف این بردارها پرداخته است.



شکل ۹ مقایسه میزان انحراف بردارهای سرعت (جهت حرکت ذرات)

حاصل از حل عددی در صفحه نزدیک بستر و صفحه نزدیک سطح آب

→ صفحه نزدیک سطح آب → - - صفحه نزدیک بستر

۷-۱- بررسی نحوه تأثیر زبری معادل (k_s) بر تغییرات تراز بستر

شکل (۱۰) تأثیر زبری معادل کف کانال را بر نحوه پیش‌بینی تغییرات تراز بستر در مدل عددی نشان می‌دهد. تغییرات k_s از مقدار پیش‌فرض آن - یعنی برابر با قطر متوسط ذره - شروع شده و تا $k_s = 6/25 d_s$ - که در آن واسنجی مدل انجام شده - با نمونه‌های مختلفی ادامه داشته است. در هر مرحله نیز شبیه‌سازی برای ۴۸ ساعت زمان تعادل و با استفاده از گام زمانی ۲۰ ثانیه انجام شده است. از آنجا که تغییرات زبری معادل بر مقدار تنش برشی بستر (τ) تأثیر می‌گذارد، لذا انتظار داریم که افزایش k_s با تغییر در آستانه حرکت نخستین ذره رسوب بستر، به افزایش در مقدار فرسایش منجر شود. مقایسه شکل‌های (۱۰-الف) تا (۱۰-و) به‌خوبی پدیده‌های زیر را نشان می‌دهد:

۱. افزایش k_s ، مقادیر $\Delta z/h_s$ را به‌طور محسوسی تغییر می‌دهد. این تغییر، هم شامل مقادیر حاصل از رسوب‌گذاری و هم مقادیر حاصل از فرسایش می‌شود؛ اما نرخ تغییرات در مقادیر مربوط به نواحی فرسایشی بسیار شدیدتر است. به بیان دیگر، در حالی که مقدار حداکثر رسوب‌گذاری ($\Delta z/h_s$) خود را از حدود صفر به «+۰/۶۶» می‌رساند، مقدار حداکثر فرسایش ($\Delta z/h_s$) از حدود «-۰/۰۳» به «-۱/۷۷» می‌رسد. علت این تفاوت عمده در فرسایش نسبت به فرایند رسوب‌گذاری را می‌توان تأثیر مستقیم k_s بر میزان تنش برشی بستر دانست که اولین نتیجه آن، شکل‌گیری فرسایش است. به بیان دقیق‌تر جدایی ذرات رسوب تأثیر مستقیمی از k_s می‌گیرند، اما ته‌نشینی و رسوب‌گذاری آنها، تحت تأثیر پارامترهای دیگری نظیر نحوه رشد جریان ثانویه و غیره بوده و لذا k_s ، آن تأثیر شدید را بر فرایند رسوب‌گذاری ندارد.

۲. غیر از مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری، الگوی تغییرات نیز با افزایش k_s دستخوش تغییر شده است؛ به‌گونه‌ای که تا حدود $k_s = 4 d_s$ ، هیچ اثری از

شکل‌گیری پشته رسوبی و حفره آب‌سستگی نیمه اول در کانال دیده نمی‌شود. همچنین شکل‌گیری پشته رسوبی و ناحیه فرسایشی روبه‌روی آن در نیمه دوم، تنها بعد از k_s حدود $5 d_s$ رخ داده است.

۳. با افزایش k_s ، پشته رسوبی نیمه اول گسترش افقی پیدا کرده و کشیده‌تر شده است، (شکل ۱۰، هـ و). همزمان با این اتفاق، مساحت ناحیه فرسایشی روبه‌روی این پشته نیز در پلان افزایش یافته است. علت این گسترش افقی آن است که با افزایش k_s و زیاد شدن مقدار مطلق فرسایش و رسوب‌گذاری (بند ۱ همین بخش)، شیب عرضی بستر زیاد شده و به حدی می‌رسد که از مقدار زاویه ایستایی مصالح^۱ دانه رسوب بیشتر شود. در این حالت، ذرات رسوب توانایی سقوط بر روی سلول جاری بستر را نداشته و با حرکت به سمت کنارها، در سلول‌های مجاور نشست می‌کند. لذا نوعی کشیدگی اتفاق می‌افتد که تا زمان رسیدن به حالت تعادل بستر، ادامه دارد.

۷-۲- بررسی اثر اندازه شبکه‌بندی میدان بر پیش‌بینی تغییرات تراز بستر

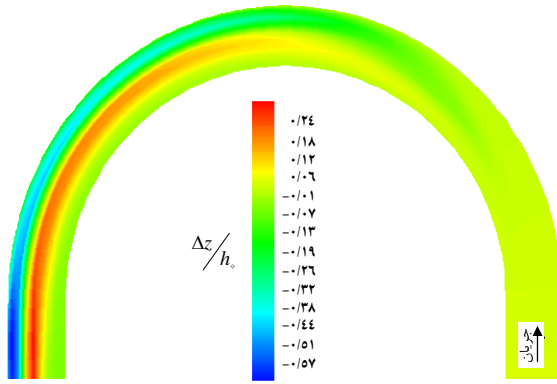
برای بررسی میزان وابستگی پاسخ‌ها به اندازه شبکه، از شبکه $7 \times 17 \times 221$ گره به‌ترتیب در جهات طولی، عرضی و عمقی در مقایسه با شبکه مبنا ($7 \times 9 \times 91$) استفاده شده است. با توجه به اینکه در شبکه مبنا و با هفت لایه عمقی در نظر گرفته شده، مقدار γ^+ برابر ۳۲ است، لذا با توجه به لزوم رعایت معیار پیشنهادی اولسن [۲۳] برای پارامتر γ^+ در جهت قائم و نزدیکی بستر، در شبکه ریز نیز از همان تعداد لایه برای جهت عمقی استفاده شده، اما در جهت عرض تعداد سلول‌ها ۲ برابر و در جهت طول $\Delta \theta$ از سه درجه به یک درجه کاهش یافته است.

شکل (۱۱) تأثیر استفاده از شبکه ریز را بر نتایج نشان می‌دهد. با دقت در این شکل به‌خوبی مشاهده می‌شود که تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در الگوی تغییرات تراز بستر در

1. Angle of Repose

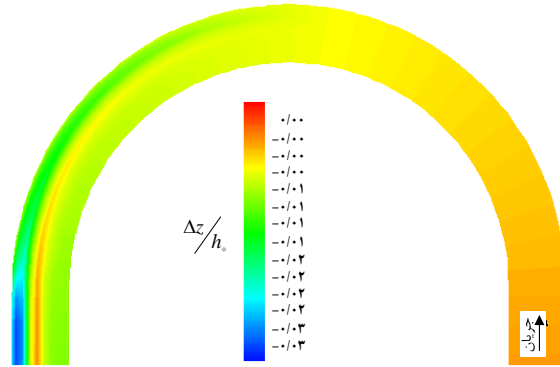
حدود ۱۵ درجه به سمت بالادست حرکت کرده که از این نظر تطابق بهتری را با داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان می‌دهد.

پلان به وجود نیامده است؛ هرچند مدل در شبیه‌سازی پشته رسوبی نیمه اول قوس تا حدی بهتر عمل کرده است. همچنین پشته رسوبی و ناحیه فرسایشی شکل گرفته در نیمه دوم، نسبت به نتایج حاصل از شبکه درشت در



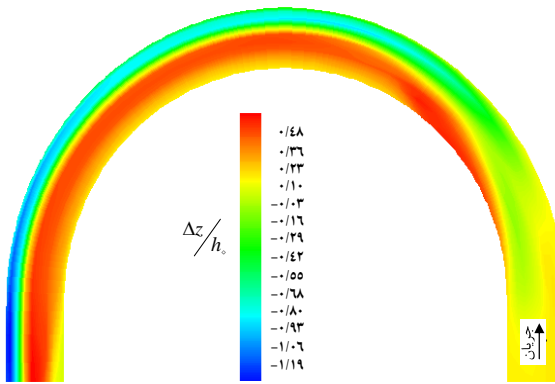
ب

$$k_s = 2mm \approx 1/5d_{\Delta}$$



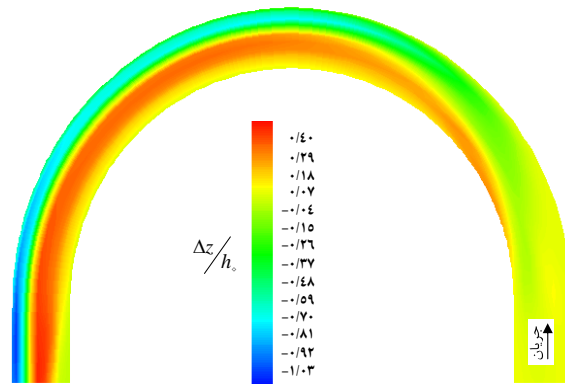
الف

$$k_s = 1/24mm = d_{\Delta}$$



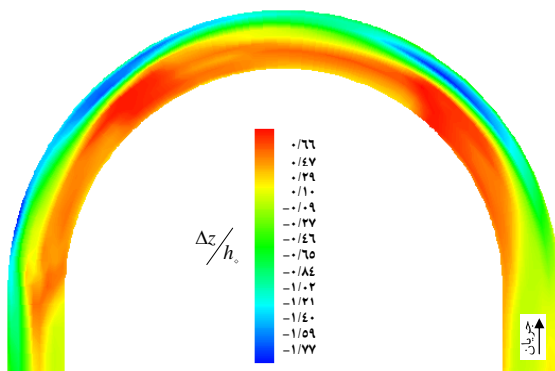
د

$$k_s = 5mm \approx 4d_{\Delta}$$



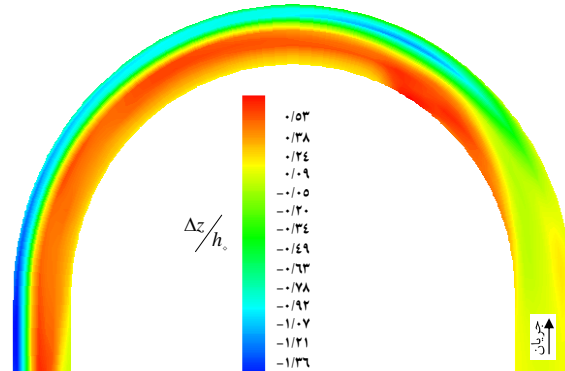
ج

$$k_s = 4mm \approx 3d_{\Delta}$$



و

$$k_s = 1mm \approx 6/25d_{\Delta}$$



ه

$$k_s = 6mm \approx 4/1d_{\Delta}$$

شکل ۱۰ بررسی اثر تغییر اندازه زبری بستر (k_s) بر تغییرات تراز بستر ($Q = 22 \text{ lit/s}$ ، $Fr = 0.39$)



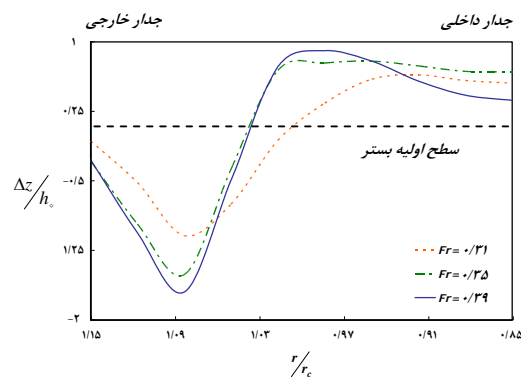
شکل ۱۱ بررسی تأثیر شبکه‌بندی بر تغییرات تراز بستر ($\Delta z/h_0$)

ب شبکه ریز

الف شبکه درشت (حالت مبنا)

۲-۳- بررسی تأثیر عدد فرود بر تغییرات تراز بستر در قوس ۱۸۰ درجه

شکل (۱۲) پروفیل عرضی بستر را در مقطع چاله فرسایشی واقع در نیمه اول قوس برای مقادیر مختلف عدد فرود نشان می‌دهد. این ناحیه از دید عملی برای مهندسان طراح بسیار حائز اهمیت است، زیرا حداکثر رسوب‌گذاری در این ناحیه رخ می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل تغییر شیب عرضی بستر با تغییر عدد فرود است. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که شیب عرضی جریان با افزایش عدد فرود، بیشتر شده و این افزایش تا محدوده عدد فرود ۰/۳۵ بیشتر بوده و پس از آن از نرخ تغییرات شیب عرضی بستر کاسته شده است.



شکل ۱۲ تغییرات شیب عرضی بستر در مقطع حداکثر

آبشستگی نیمه اول قوس نسبت به تغییرات عدد فرود جریان

در این حالت گسترش ناحیه فرسایشی مورد انتظار در خروجی قوس نیز بهتر پیش‌بینی شده است. اما مقایسه مقادیر به‌دست آمده برای حداکثر آبشستگی و رسوب‌گذاری در کانال نشان می‌دهد که شبکه ریز، مقدار حداکثر عمق آبشستگی را در بستر تا حدود ۱۵ درصد بیشتر از شبکه درشت پیش‌بینی کرده که با یافته‌های اولسن (۱۰٪ اختلاف در نتایج شبکه‌های ریزو درشت) [۲۵] - در بخش ۶-۱ توضیح داده شد- مطابقت دارد.

پارامتر مهم دیگری که در تصمیم‌گیری برای انتخاب شبکه‌بندی مناسب تأثیر می‌گذارد، زمان اجرای محاسبات است. مقایسه زمان اجرای محاسبات برای شبکه ریز نشان می‌دهد که این زمان در رایانه پنتیوم ۴ با پردازنده‌ای به سرعت ۱/۶ گیگاهرتز و حافظه ۲۵۶ مگابایت، ۶ برابر بیشتر از زمان اجرای محاسبات در شبکه درشت است. لذا هرچند استفاده از شبکه ریز همخوانی عمومی بهتری را با داده‌های آزمایشگاهی در قیاس با نتایج حاصل از شبکه درشت نشان می‌دهد، اما با توجه به افزایش بسیار زیاد زمان محاسبات در این حالت، استفاده از شبکه‌بندی درشت معرفی شده در بخش قبل، در حل میدان جریان و انتقال رسوب مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

۸- نتیجه گیری

از مدل سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی است. بررسی نتایج همچنین نشان داد که در تمامی حالت ها یک ناحیه فرسایشی در نزدیکی قوس خارجی دیده می شود که علت آن وجود ناحیه با تنش برشی بالا در این بازه کانال است. حرکت رسوب ها در قوس نیز از این ناحیه شروع می شود. در مطالعه اثر تغییر زبری بستر بر نتایج نیز مشخص شد که تغییر در مقدار فرسایش در قیاس با تغییر در مقدار رسوب گذاری حساسیت بیشتری به k_s بستر نشان می دهد. بررسی اثر اندازه شبکه نشان داد که ریزتر شدن شبکه تأثیر قابل ملاحظه ای در پیش بینی الگوی تغییرات در بستر ندارد و در این حالت، مدل عمق آبستگي را حتی تا حدود ۱۵ درصد بیشتر پیش بینی کرد. افزایش عدد فرود جریان نیز، شیب عرضی بستر را دستخوش تغییر کرده و مقدار آن را افزایش می دهد و لذا حداکثر عمق حفره آبستگي و نیز تاج پشته رسوبی در این ناحیه از کانال زیاد می شود.

الگوی تغییرات تراز بستر سه بعدی در کانال قوسی شکل ملایم با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه با استفاده از مدل عددی سه بعدی «سیم» شبیه سازی شد. بررسی نتایج نشان می دهد که مقدار ضریب زبری بستر در مدل با $k_s \approx 4/5 d_s \approx 6/25 d_s = 8 \text{ mm}$ واسنجی شده و نتایج حاصل از آن تطابق خوبی را با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. همچنین مدل به طور کلی در پیش بینی نتایج، دست بالا عمل کرده است. در این زمینه، عللی مانند فرض همگن بودن ضریب لزجت گردابه ای در مدل آشفتگی به کار گرفته شده در مدل «سیم»، عدم توانایی این مدل آشفتگی در پیش بینی چرخه دوم جریان ثانویه در نزدیکی قوس خارجی از حدود زاویه ۱۳۵ درجه به بعد، استفاده از روابط تجربی در محاسبات بار بستر و عدم تطابق کامل فرضیات آن روابط با وضعیت مساله مورد مطالعه در این مقاله، از جمله دلایل اختلاف نتایج حاصل

۹- منابع

- [1] Rozovskii I. L., *Flow of water in bend of open channel*, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, 1957.
- [2] Blankaert K., Graf W. H.; "Outer-bank cell of secondary circulation and boundary shear stress in open-channel bends", *Proc. 1st RCEM Symp.*; 1999, pp533-543.
- [3] Mosonyi E., Gotz W.; "Secondary currents in subsequent model bends", *International Symposium on River Mechanics*; 1973, pp191-201.
- [4] پیرستانی محمدرضا؛ بررسی الگوی جریان و آبستگي در دهانه ورودی آبگیر کانال های دارای انحنا؛ رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ۱۳۸۳.
- [5] Booi R.; "Measurements and large eddy simulations of some curved flumes", *Journal of turbulence*; Vol.4, No.1, 2003, pp8-16.
- [6] Odgaard A. J., Bergs A.; "Flow processes in a curved alluvial channel", *Water Resources Research*; Vol.24, No.1, 1988, pp45-56.
- [7] صالحی نیشابوری سیدعلی اکبر، اقبال زاده افشین؛ «بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس»؛ ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه؛ ۱۳۸۱؛ صص ۵۷۴-۵۷۶.
- [8] دهقانی امیراحمد، قدسیان مسعود، صالحی نیشابوری سیدعلی اکبر، شفیع فر مهدی، «بررسی شرایط جریان بر تغییرات بستر کانال های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه»، *مجله هیدرولیک، تابستان ۱۳۸۵، صص ۱-۱۸.*
- [9] Wu W., Rodi W., Wenka T.; "3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*; Vol.126, No.1, 2000, pp4-15.
- [10] Wright N. G., Honarbakhsh A., Thorne C.; "Numerical modeling of bank erosion in meandering river channels", *Proceedings of the international conference on fluvial hydraulics*; 2002, pp633-638.
- [11] صفرزاده اکبر؛ شبیه سازی عددی الگوی جریان در آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۳.

- [12] Wilson C. A. M. E., Boxall J. B., Guymer I., Olsen N. R. B.; "Validation of a three-dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*; Vol.129, No.10, 2003, pp758-767.
- [13] Patankar, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, New York, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, 1980.
- [14] Olsen N. R. B., *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- [15] Ingham D. B., Ma L., *Fundamental equations for CFD in river flow simulations*, John Wiley & Sons, 2005.
- [16] Rodi W., *Turbulence models and their application in hydraulics*, Rotterdam, International Association for Hydraulics Research, 1993.
- [17] Wildhagen J., *Applied computational fluid dynamics with sediment transport in a sharply curved meandering channel*, Diploma thesis, University of Karlsruhe, 2004.
- [18] van Rijn L. C.; "Sediment transport, part I: bed load transport", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*; Vol.110, No.10, 1984, pp1431-1456.
- [19] van Rijn L. C.; "Sediment transport, part II: suspended load transport", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*; Vol.110, No.11, 1984, pp1613-1641.
- [20] Rouse H.; "Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence", *Transactions, ASCE*; Vol.109, Paper No.1965, 1937.
- [21] Olsen N. R. B., Kjellesvig H. M.; "Three dimensional numerical modeling of bed changes in a sand trap", *Journal of Hydraulic Research*; Vol.37, No.2, 1994, pp189-198.
- [22] Schlichting H., Gersten K., *Boundary layer theory*, New York, Springer Verlag, 2000.
- [23] Olsen N. R. B., *Hydroinformatics, fluvial hydraulics and limnology*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, 2004.
- [24] Olsen N. R. B., *A Three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes*, PhD thesis, University of Trondheim, 1991.
- [25] Olsen N. R. B., Pegg I., Molliex J., Berger H. M., Fjeldstad H. P.; "3D CFD modeling of sediment erosion in habitat improvement gravel", *XXXI IAHR Congress*; 2005.
- [26] Olsen, N. R. B., *CFD algorithm for hydraulic engineering*, The Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- [27] Duc B. M., Wenka T., Rodi W.; "Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*; Vol.130, No. 9, 2004, pp894-903.
- [28] Scott S., Jia Y., Wang S. S. Y.; "3D Numerical simulation of flow in Mississippi river and validation using field data", *XXIX IAHR Congress*; 2001.
- [29] Demuren A. O., "A numerical model for flow in meandering channels with natural bed topography", *Water Resources Research*; Vol.29, No.4, 1993, pp1269-1277.
- [30] Kassem A., Chaudhry M. H., "Numerical modeling of bed evolution in channel bends", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*; Vol.128, No.5, 2002, pp507-514.
- [31] Raudkivi A. J.; "Sedimentation, exclusion and removal of sediment from diverted water", *IAHR Hydraulic Structures, Design Manual*; 1993, pp63-87.
- [32] Mosselman E., Tubino M., Zolezzi G.; "The overdeepening theory in river morphodynamics: two decades of shifting interpretations", *unpublished, Kindly dedicated to the author of this paper*.

[۳۳] منصوری امیررضا؛ شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تغییرات

بستر در قوس ۱۸۰ درجه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۵.

