



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره اول، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی تأثیر شرایط هیدرولیکی جریان بر شکل‌گیری الگوی جریان ثانویه در پیچان‌رودهای تند با استفاده از مدل ریاضی SSIIM

* حسین ساریخانی‌خرمی^۱ و حسین منتصری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه یاسوج، آستادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه یاسوج

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: رودخانه‌های طبیعی یکی از اصلی‌ترین منابع فراهم‌کننده آب و انرژی برای انسان به‌شمار می‌روند. طراحی و مدیریت سیستم‌های بهره‌برداری از رودخانه نیاز به فهم کاملی از مکانیک جریان و انتقال رسوب دارد. پیچان‌رودها یکی از رایج‌ترین انواع رودخانه‌ها در طبیعت هستند که جریان بسیار پیچیده در آن برقرار است. خاصیت سه‌بعدی و پیچیده جریان در پیچان‌رودها لزوم بررسی الگوی جریان در این مجاری را با مدل‌های عددی سه‌بعدی مطرح می‌سازد. هدف از این پژوهش بررسی الگوی جریان و پیش‌بینی محل فرسایش و رسوبگذاری در پیچان‌رودها و همچنین مطالعه تأثیر پارامترهای عدد فرود (Fr) و نسبت عرض به عمق (B/h) بر میدان جریان می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل ریاضی سه‌بعدی SSIIM1.1 به مطالعه الگوی جریان آشفته در کانالی با مولد سینوسی و زاویه ۵۰ درجه با مقطع مستطیلی به عرض $B=40$ cm و بستر صلب پرداخته شده است. جهت حل دستگاه معادلات از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ و $k-\omega$ استفاده شد و خصوصیات جریان مانند الگوی جریان اولیه و ثانویه مورد مطالعه قرار گرفت. جهت واسنجی و صحت‌سنجی نتایج عددی نیز از نتایج آزمایشگاهی تیپ و داسیلوا استفاده شده است.

یافته‌ها: با تغییر عدد فرود از ۰/۱۵ به ۰/۴۱، در الگوی جریان ثانویه و نحوه توزیع سرعت تغییری رخ نداد اما عمق آبستگی در نزدیکی ساحل داخلی افزایش یافت. همچنین با کاهش نسبت B/h از ۱۲/۵ به ۴ تعداد گردابه‌های موجود در مقطع از ۲ عدد به ۳ عدد افزایش یافت و مشخص شد در رودخانه‌های عریض قدرت جریان ثانویه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد اما همچنان روند نزولی و صعودی بودن آن مشابه رودخانه‌های عمیق می‌باشد.

نتیجه‌گیری: مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که الگوی جریان به‌وسیله هردو مدل آشفتگی به خوبی پیش‌بینی شده اما مدل $k-\omega$ در بعضی موارد نتایج نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد الگوی تنش برشی به تغییرات عدد فرود وابسته است اما الگوی جریان ثانویه با تغییر عدد فرود تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین تغییرات نسبت عرض به عمق (B/h) بر روی الگوی جریان ثانویه و الگوی تنش برشی تأثیر می‌گذارد به طوری که برای $B/h < 8$ سلول چرخشی کوچکی علاوه بر سلول چرخشی اصلی در نزدیکی ساحل خارجی به وجود می‌آید.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، شبیه‌سازی عددی، پیچان‌رودها، مدل‌های آشفتگی، جریان ثانویه، SSIIM

* مسئول مکاتبه: h.sarikhani66@gmail.com

مقدمه

ارائه شده است، تعریف می‌شود که پارامترهای به‌کار رفته در آن در شکل ۱ شرح داده شده است (۱۱).

$$\theta = \theta_0 \cos\left(2\pi \frac{L_c}{L}\right) \quad (1)$$

در این پژوهش طول موج کانال بر اساس رابطه ۲ که توسط یالین (۱۹۹۲) ارائه شده، به‌دست آمده است (۱۶).

$$\Lambda_M \approx 2\pi B \quad (2)$$

همچنین پارامتر سینوسی کانال و نسبت عرض به شعاع در هر نقطه از خط مرکزی به‌ترتیب به‌وسیله رابطه‌های ۳ و ۴ قابل محاسبه‌اند.

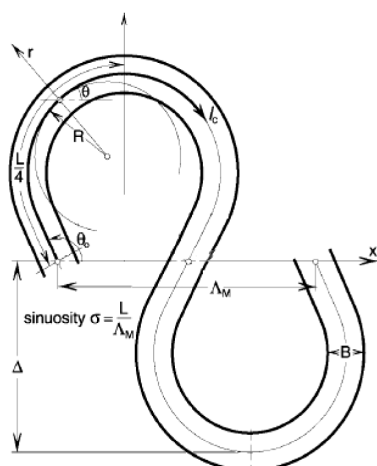
$$\sigma = \frac{L}{\Lambda_M} = \frac{1}{J_0(\theta_0)} \quad (3)$$

$$\frac{B}{R} = \theta_0 J_0(\theta_0) \sin\left(2\pi \frac{L_c}{L}\right) \quad (4)$$

باید به این نکته توجه شود که بیش‌ترین مقدار $\theta_0 = 138^\circ = 2.41 \text{ rad}$ برای کانال سینوسی $J_0(\theta_0) = 0$ و $\sigma \rightarrow \infty$ می‌باشد، هر چند که معمولاً هرگز این اتفاق نمی‌افتد و در $\sigma = 8.5$ $\theta_0 = 126^\circ = 2.20 \text{ rad}$ قوس‌های کانال با هم برخورد می‌کنند و الگوی پیچان‌رودی به هم می‌خورد. در صورتی که $\theta_0 \leq 30^\circ$ باشد پیچان‌رود با زاویه کوچک و در صورتی که $\theta_0 \geq 110^\circ$ باشد پیچان‌رود با زاویه بزرگ نامیده می‌شود. در چند دهه اخیر پژوهش‌های بسیاری بر روی الگوی جریان در کانال‌های پیچان‌رودی توسط پژوهشگران مختلفی انجام شده است.

امروزه رودخانه‌ها به منزله شاه‌رگ جوامع قلمداد می‌شوند. رودخانه‌های طبیعی یکی از اصلی‌ترین منابع فراهم‌کننده آب و انرژی برای انسان به‌شمار می‌روند که در این میان تأمین آب (اعم از مصارف کشاورزی و یا مصارف آشامیدنی یا صنعتی) مهم‌ترین نقش اقتصادی رودخانه‌ها می‌باشد. طراحی و مدیریت این سیستم‌ها نیاز به فهم کاملی از مکانیک جریان و انتقال رسوب دارد. رودخانه‌های پیچان‌رودی^۱، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین شکل رودخانه در طبیعت، الگوی جریان بسیار پیچیده‌ای در آن برقرار است. این پیچیدگی نه فقط به‌خاطر آشفتگی و طبیعت سه‌بعدی جریان، بلکه به‌خاطر توپوگرافی و تغییرات عمق جریان در عرض نیز می‌باشد. پدیده‌ای که در کانال‌های پیچان‌رودی مشاهده می‌شود وجود جریان چرخشی یا جریان ثانویه است. تعدادی از پژوهشگران علت به وجود آمدن این جریان را شرح داده‌اند. به‌طورکلی این جریان چرخشی ناشی از عدم توازن بین گرادیان فشار عرضی (به‌دلیل اختلاف ارتفاع سطح آزاد آب) و نیروی گریز از مرکز وارد بر سیال می‌باشد. وجود جریان ثانویه باعث تغییر تنش برشی در سواحل و بستر و در نتیجه باعث فرسایش در ساحل خارجی می‌شود. بر اثر این جریان ثانویه، جهت خطوط جریان در سطح آب سمت قوس خارجی و در نزدیکی بستر به سمت قوس داخلی است. لانگبین و لئوپولد (۱۹۶۶) نشان دادند که خط مرکزی پیچان‌رود تابع قواعدی است که صرف‌نظر از حرکت موج‌گونه، بهترین توصیف برای آن منحنی با مولد سینوسی^۲ است (۵). خط مرکزی کانال به‌وسیله رابطه ۱ که توسط لئوپولد و لانگبین در سال ۱۹۶۶

1- Meandering
2- Sine-Generated



شکل ۱- مشخصات کانال با مولد سینوسی.

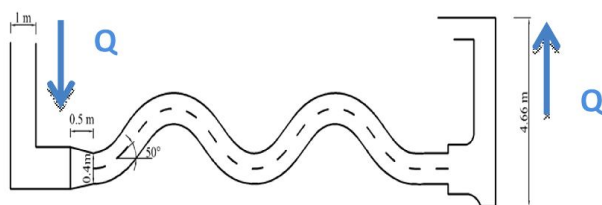
Figure 1. Characteristics channels with sine generator.

همکاران (۲۰۰۶) از اجراهای اصلی سیلوا (۱۹۹۵) و اجراهای تیپ (۲۰۰۱) استفاده کردند تا محل دقیق ناحیه‌های همگرایی و واگرایی جریان‌های مختلف وابسته به θ_0 را به دست آورند (۳). همچنین مقایسه الگوی جریان رودخانه‌ها در بستر صاف و تغییر شکل یافته محور کار پژوهشگرانی مانند رزوسکی (۱۹۶۱)، ین و هو (۱۹۹۰)، ادگارد (۱۹۸۴)، نیلسون و اسمیز (۱۹۸۹)، بلانکارت و گراف (۲۰۰۱) بوده است (۱۱). در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SSIM به بررسی الگوی جریان در یک کانال پیچان‌رودی با زاویه ۵۰ درجه پرداخته شده است. بدین منظور مدل آزمایشگاهی تیپ (۲۰۰۱) با استفاده از مدل عددی SSIM1.1 شبیه‌سازی و نتایج مدل عددی بر اساس نتایج آزمایشگاهی واسنجی شده و سپس بر اساس داده‌های آزمایشگاهی داسیلوا (۱۹۹۵) برای $\theta = 30^\circ$ صحت‌سنجی شده است. در ادامه به بررسی الگوی جریان اولیه، ثانویه و تنش برشی بستر توسط مدل‌های آشفتگی پرداخته شده است. همچنین اثر عدد فرود و نسبت عرض به عمق جریان (B/h) بر الگوی جریان، قدرت جریان ثانویه و الگوی تنش برشی بستر بررسی شده است.

L_c : مختصات طولی در امتداد خط مرکزی کانال
 L : طول پیچان‌رود
 θ_0 : زاویه انحراف کانال در $L_c = 0$ (زاویه پیچان‌رودی)
 θ : زاویه انحراف کانال در هر نقطه L_c
 R : شعاع کانال در هر مقطع
 B : عرض کانال
 λ_M : طول موج پیچان‌رود
 σ : پارامتر سینوسی
 Δ : دامنه تغییرات پیچ کانال

سیلوا (۱۹۹۵) آزمایش‌های خود را بر روی کانال پیچان‌رودی با زاویه θ برابر ۳۰ و ۱۱۰ درجه انجام داد (۲). زوایای انتخاب شده نمونه زاویه‌های کوچک و بزرگ بودند. سیلوا مشاهده کرد که رفتار جریان در کانال ۳۰ و ۱۱۰ درجه کاملاً با هم متفاوت است. بررسی الگوی جریان در کانال سینوسی بزرگ همچنین توسط وایتینگ و دیتریچ (۱۹۹۳) که از زاویه $\theta_0 = 110^\circ$ استفاده کرده‌اند، انجام شده است (۱۵). ترمینی (۱۹۹۶) سرعت، عمق و زاویه انحراف جریان نسبت به خط مرکزی کانال را در کانال ۱۱۰ درجه اندازه‌گیری کرد. الگوی جریان اندازه‌گیری شده توسط این پژوهشگر شبیه اندازه‌گیری‌های پژوهشگران قبلی در کانال‌های بزرگ بود (۱۲). تیپ (۲۰۰۱) پژوهش سیلوا را با اندازه‌گیری الگوی جریان در کانال سینوسی با زوایای ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه ادامه داد. وی متوجه شد که الگوی جریان در کانال ۵۰ و ۹۰ درجه همانند الگوی جریان در زوایای کوچک و بزرگ است و الگوی جریان در کانال ۷۰ درجه حد وسط آن‌هاست (۱۱). ویلد هاگن (۲۰۰۴) به بررسی الگوی جریان و رسوب در یک کانال سینوسی با استفاده از نرم‌افزار SSIM پرداخته است (۱۴). داسیلوا و

مواد و روش‌ها
مشخصات میدان حل: مطالعه حاضر براساس کارهای آزمایشگاهی تیپ (۲۰۰۱) طراحی شده است (۱۱).
میدان حل مربوطه عبارت است از کانالی با مولد سینوسی با مقطع مستطیلی، زاویه θ برابر ۵۰ درجه، عرض ۴۰ سانتی‌متر، طول ۷۱۴ سانتی‌متر و با بستری صلب که از ماسه‌ای با دانه‌بندی $d_{50} = 2.2 \text{ mm}$



شکل ۲- مشخصات میدان حل.

Figure 2. Field solution Characteristics.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی جریان.

Table 1. Hydraulic flow characteristics.

| عمق جریان در بالادست کانال Channel upstream water depth (cm) | سرعت در بالادست کانال Speed upstream channel (m/s) | عدد رینولدز Reynolds number Re | عدد فرود Forud number Fr | زاویه پیچان‌رود Meander angle θ (Degree) | شیب طولی کانال Channel longitudinal slope S |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------|---|---|
| 3.2 | 0.2 | 6325 | 0.32 | 50 | 0.001 |

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

قوانین و معادلات حاکم بر میدان جریان: معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر استوکس و معادله پیوستگی بیان می‌شوند. با فرض دائمی بودن جریان ($\partial / \partial t = 0$) و صرف‌نظر کردن از نوسانات جرم مخصوص ($\rho' = 0$)، معادلات مومنوموم و پیوستگی به‌ترتیب زیر بیان می‌شوند:

مدل $k-\varepsilon$ استاندارد: مدل $k-\varepsilon$ معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد و بر حسب دو متغیر k (انرژی جنبشی جریان) و ε (استهلاک انرژی جنبشی جریان) بیان می‌شود. معادلات کلی مربوط به مدل به قرار زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j) \quad (۵)$$

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 ذیل، مقدار جابجایی هر سلول به‌دست می‌آید:

$$\Delta h_{ij} = \frac{1}{\rho g} (p_{ij} - p_{ref}) \quad (11)$$

شبکه‌بندی میدان حل: به‌منظور شبکه‌بندی میدان حل با استفاده از نرم‌افزار Excel، برنامه‌ای جهت تولید شبکه میدان حل نوشته شد. این برنامه با به‌کار گرفتن الگوریتم خاصی، شبکه میدان را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که در نواحی نزدیک به دیواره به‌علت داشتن گرادبان‌های شدیدتر، از شبکه ریزتری استفاده شود. تعداد گره‌های استفاده شده بعد از حساسیت‌سنجی ۵۹۸۹۲ عدد انتخاب گردید. مشخصات شبکه میدان حل و زمان‌های اجرای محاسبات برای هر دو مدل آشفتگی توسط رایانه‌ای با مشخصات (Intel Core i5, 2.3GHZ, 4GB RAM) به تفکیک در جدول ۲ آورده شده است.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j k_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} K_j \right)_j + G + B - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_j \varepsilon_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_j \right)_j + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

مدل انتقال تنش برشی ($SST \ k - \omega$): این مدل به‌منظور آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند مدل $k - \omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k - \varepsilon$ مستقل از جریان آزاد دور از دیواره ارائه شده است. معادلات کلی مربوط به مدل به قرار زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} \frac{\partial U}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \omega) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \quad (10)$$

$$\frac{\gamma}{V_t} \tau_{ij} + \frac{\partial U}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

قابلیت نرم‌افزار: مدل^۱ SSIIM بر اساس 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 جهت‌مند مرتبه دوم (Second Order Upwind) استفاده می‌شود. برای ارتباط ترم فشار و سرعت روش SIMPLE مورد

1- Sediment Simulation In Intakes with Multiblock

جدول ۲- مشخصات شبکه مش بندی.

Table 2. Meshed grid Characteristics.

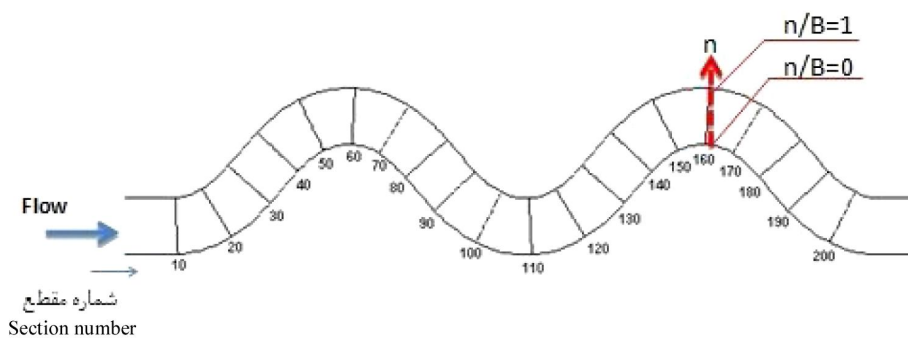
| CPU Time (min) | طرح انفصال Separation | تعداد گره‌ها Number of nodes | شبکه Grid | مدل آشفتگی Turbulence model |
|----------------|-----------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|
| 45 | SOU | 59892 | 217×23×12 | $k-\varepsilon$ |
| 45 | SOU | 59892 | 217×23×12 | SST $k-\omega$ |

SSIM1.1، زبری کانال می‌باشد. تخمین زبری بستر در مدل‌سازی عددی همواره یکی از مشکل‌ترین گام‌ها به‌شمار می‌رود. پارامتر زبری در SSIM1.1 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 Backwater استاندارد انجام می‌شود و دیگری محاسبه تنش برشی در میدان که عامل شکل‌دهی تراز بستر می‌باشد.

همان‌طور که دیده می‌شود زمان اجرای هر دو مدل تقریباً یکسان است. بنابراین برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب در ادامه به صحت‌سنجی این مدل‌های آشفتگی پرداخته می‌شود.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل ریاضی: در شکل ۳ مقاطع عرضی مختلف، همچنین محور n در امتداد عرض کانال مشخص شده است که در ساحل پایین $n=0$ و در ساحل بالا $n=40$ cm ($n/B=1$) می‌باشد. پارامتر مهم در واسنجی مدل عددی



شکل ۳- مشخصات مقاطع عرضی مورد نظر.

Figure 3. Characteristics cross sections.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{21.1} \quad (12)$$

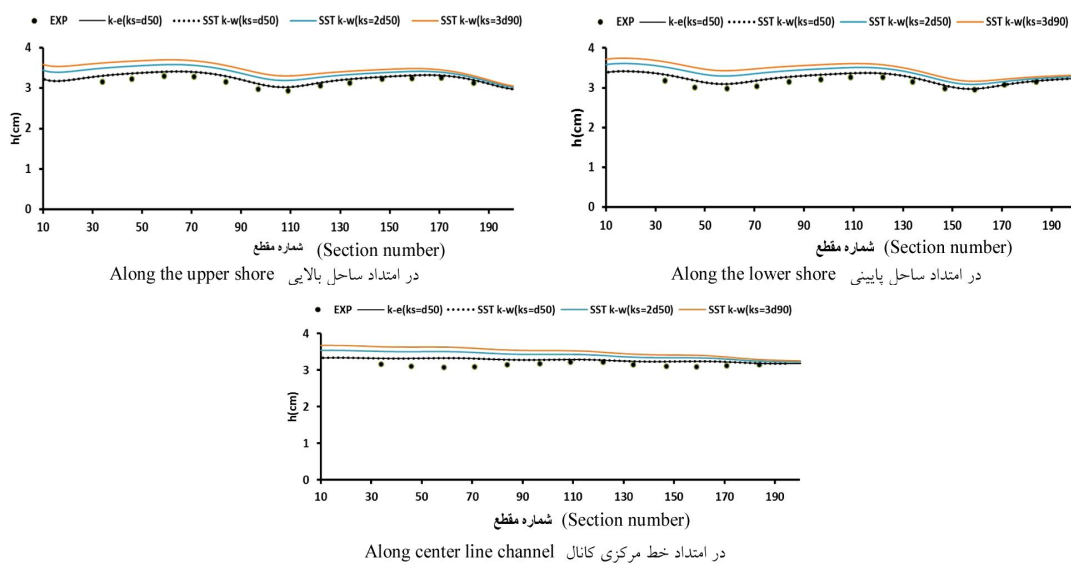
که در آن، k_s را برابر d_{50} معرفی می‌کند. پس از چند بار تکرار مدل‌سازی، در $k_s = d_{50} = 2.2$ mm

SSIM برای محاسبه سطح اولیه آب در میدان، از

پارامتر استریکلر ($k_{st} = \frac{1}{n}$) استفاده می‌کند که در این رابطه n ضریب مانینگ می‌باشد. استریکلر در سال ۱۹۲۳ رابطه زیر را برای محاسبه n پیشنهاد کرد:

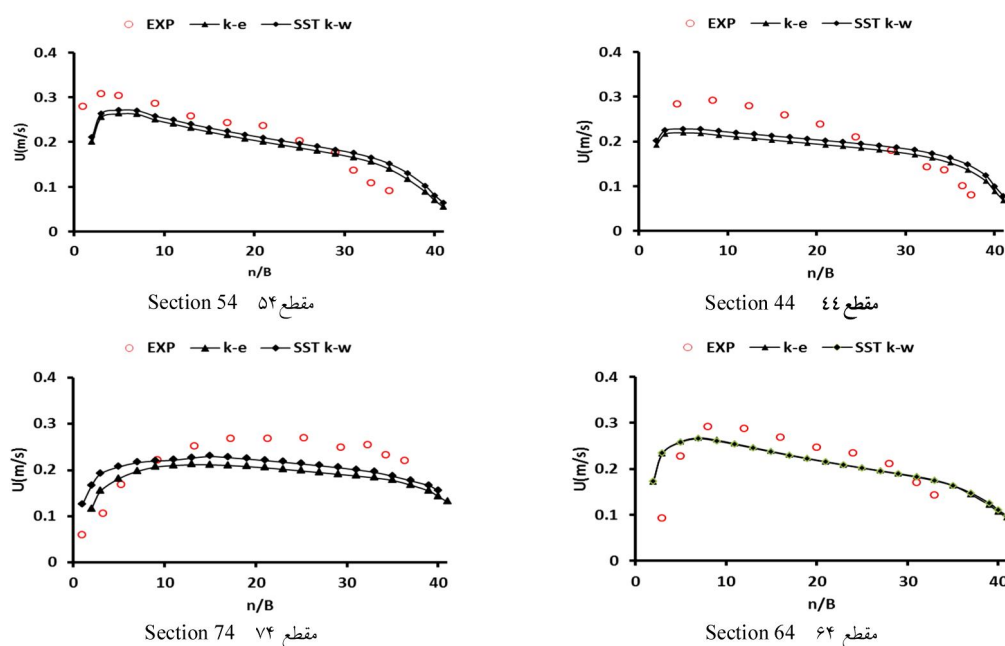
آب در جداره خارجی مثبت و در جداره داخلی منفی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوی کلی حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل SSIIM1.1 با الگوی آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. همچنین در شکل ۵ پروفیل‌های سرعت در نیمه عمق در مقاطع عرضی مختلف پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. مشخص است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل $SST\ k-\omega$ نسبت به $k-\epsilon$ از تطابق و هم‌خوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. مقدار میانگین خطا در مدل آشفتگی $SST\ k-\omega$ حدود ۳/۷۵ درصد و در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حدود ۴/۶۵ درصد محاسبه شده است.

و $k_{st} = 58.5$ ($n=0.0171$) بهترین نتیجه حاصل شد و سطح آب در بالادست منطبق بر مقدار گزارش شده گردید. در شکل ۴ تغییرات تراز سطح آب پیش‌بینی شده توسط مدل در امتداد ساحل پایین و بالا و خط مرکزی کانال برای مقادیر مختلف k_s با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در این حالت مقدار میانگین خطا به کم‌تر از ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد؛ ملاحظه می‌شود رابطه ارائه شده توسط استریکلر برای $k_s = d_{50}$ تطابق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. شیب جانبی سطح آب قبل از رسیدن به قوس شروع به شکل‌گیری می‌کند. به بیان دیگر با رسیدن به قوس، تحت اثر نیروی گریز از مرکز، سطح آب در جداره خارجی افزایش یافته و در جداره داخلی کاهش می‌یابد، به طوری که الگوی تغییرات نسبی سطح



شکل ۴- تغییرات تراز سطح آب در امتداد کانال.

Figure 4. Change in water level along the canal.

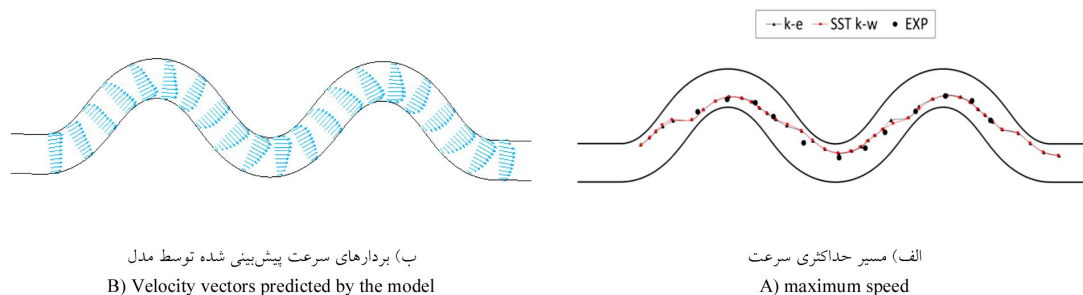


شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سرعت طولی در مقاطع مختلف در نیمه عمق.

Figure 5. Compare numerical and experimental results Longitudinal velocity profiles at different sections in the mid-depth.

مدل آشفتگی استفاده شده است. جهت آزمون واسنجی مدل، از کانال ۳۰ درجه داسیلوا (۱۹۹۵) استفاده شده است (۲). مشخصات هندسی این کانال و هیدرولیکی جریان در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقایسه نتایج نشان از واسنجی خوب مدل دارد. بررسی خطوط جریان در ترازهای مختلف: خطوط جریان در ۳ تراز نزدیک بستر، عمق متوسط و نزدیک سطح آب در شکل ۷ نشان داده شده است.

در شکل ۶- الف مسیر حداکثری سرعت در کانال برای مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل عددی با یکدیگر مقایسه شده است. در شکل ۶- ب بردارهای سرعت نیز در مقاطع عرضی مختلف نشان داده شده است که چگونگی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و $SST k-\omega$ مشاهده می‌شود مدل آشفتگی $SST k-\omega$ نتیجه قابل قبول‌تری ارائه داده است، بنابراین در ادامه از این



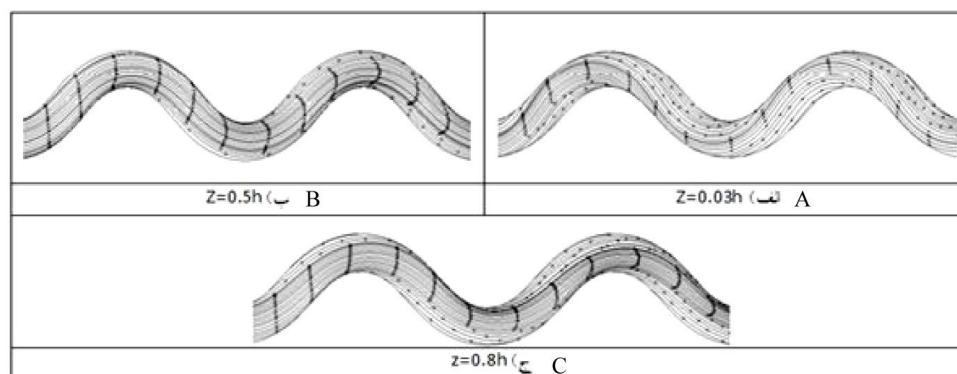
شکل ۶- تغییرات سرعت در کانال در نیمه عمق.

Figure 6. Velocity variations at mid-depth in the channel.

جدول ۳- مشخصات هیدرولیکی جریان کانال سیلوا (۱۹۹۵).

Table 3. Hydraulic flow characteristics in Da Silva channels.

| عمق متوسط جریان | سرعت متوسط | عدد رینولدز | عدد فرود | زاویه پیچان رود | شیب طولی کانال | d_{50} |
|--------------------|------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|----------|
| Average depth (cm) | Average velocity (m/s) | Reynolds number Re | Forud number Fr | Meander angle (degree) θ (D) | Channel longitudinal slope S | (mm) |
| 3.2 | 0.16 | 5250 | 0.29 | 30 | 0.001 | 2.2 |



شکل ۷- خطوط جریان.

Figure 7. Streamlines.

دیواره داخلی تا حدی فشرده شده و در نهایت گرادیان سرعت شدیدی بر روی جداره داخلی ایجاد خواهد کرد که نشان از وجود جریان ثانویه قوی در این بازه از کانال است.

بررسی تأثیر عدد فرود بر الگوی جریان: به منظور بررسی تأثیر عدد فرود بر الگوی جریان مدل با ۴ عدد فرود مختلف اجرا شده است (جدول ۴). با توجه به این که SSIM محاسبات عمق را از پایین دست به سمت بالادست انجام می دهد، نحوه انتخاب دبی ها و عدد فرود بدین صورت بوده که با تغییر میزان دبی ورودی و عمق پایین دست، عمق جریان در ورودی تقریباً ثابت باشد تا فقط اثر عدد فرود در نظر گرفته شود.

خطوط جریان در نزدیکی بستر (شکل ۸- الف) بیانگر انحراف شدید خطوط جریان به سمت جداره داخلی کانال است. در ورودی کانال ذرات نزدیک بستر به شدت به سمت دیواره داخلی کشیده می شوند، به شکلی که ذراتی که وارد قوس می شوند در نزدیکی های راس قوس به دیواره برخورد می کنند. بنابراین انتظار می رود در یک کانال با بستر متحرک، مصالح کف به سمت دیواره داخلی حرکت کند. دقت در مسیر خطوط جریان در عمق متوسط (شکل ۸- ب) نشان می دهد که خطوط جریان تأثیر چندانی از جریان ثانویه نگرفته اند و تقریباً با تبعیت از انحنای کانال مسیر خود را طی می کنند. الگوی کلی خطوط جریان در صفحه نزدیک سطح آب، انحراف به سمت دیواره خارجی کانال است (شکل ۸- ج). همچنین در مقاطع حدود ۳۰ تا ۴۰ خطوط جریان در نزدیکی

جدول ۴- مشخصات هیدرولیکی جریان.

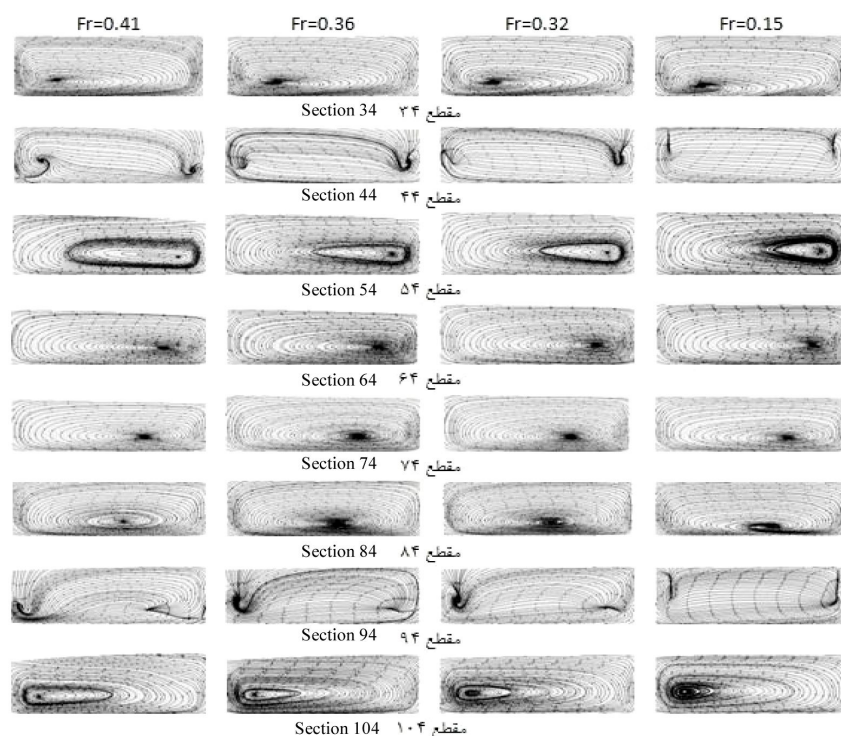
Table 4. Hydraulic flow characteristics.

| عدد فرود (Fr) | عمق آب در ورودی h (m) | دبی ورودی Q(Li/s) |
|---------------|-----------------------|-------------------|
| Foud number | Water depth | Input discharge |
| 0.15 | 0.0328 | 1 |
| 0.32 | 0.0326 | 2 |
| 0.36 | 0.0329 | 2.5 |
| 0.41 | 0.0321 | 4 |

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. بنابراین مقدار K_{xy} در هر مقطع از کانال بر اساس مقادیر مختلف عدد فرود محاسبه شده است. شکل ۱۰ نمایانگر تغییرات قدرت جریان حلزونی در طول کانال نسبت به تغییرات فرود جریان است. با توجه به این شکل تغییر عدد فرود تأثیر قابل توجهی بر قدرت جریان ثانویه نداشته و در همه حالت‌ها الگوهای رشد و استهلاك جریان ثانویه بر یکدیگر منطبق است.

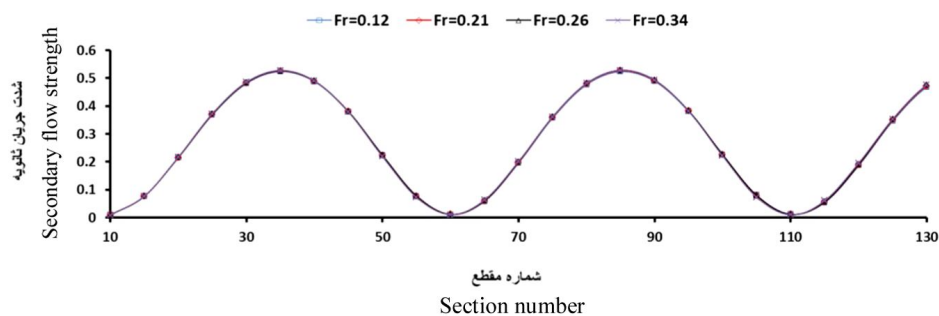
شکل ۹ الگوی جریان ثانویه برای مقادیر مختلف فرود را نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر عدد فرود بر قدرت جریان ثانویه، به بررسی کمی تغییرات قدرت جریان ثانویه در مقاطع عرضی پرداخته شده است. شکری در سال ۱۹۴۹ با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، جهت بحث کمی بر روی این پدیده، معیار زیر را برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرده است:

$$S_{xy} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} = \frac{\sum (v_i^2 + w_i^2) \Delta A_i}{\sum (u_i^2 + v_i^2 + w_i^2) \Delta A_i} \quad (13)$$



شکل ۸- الگوی جریان ثانویه برای فرودهای مختلف ($B/h \approx 12.5$).

Figure 8. Secondary flow pattern for different foud number.

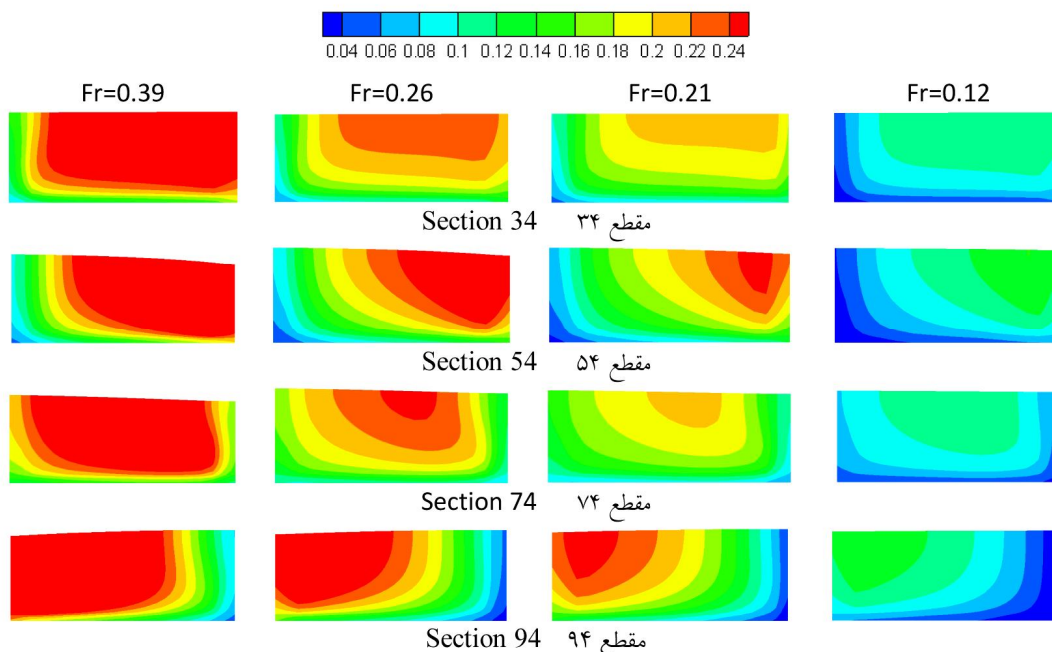


شکل ۹- قدرت جریان ثانویه.

Figure 9. Secondary flow strength.

پیدا کرده که علت این امر هم می‌تواند ناشی از این باشد که با افزایش عدد فرود سرعت نیز افزایش یافته است.

مقایسه کانتور سرعت در مقاطع عرضی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود نحوه تغییرات توزیع سرعت در مقاطع عرضی مختلف در طول کانال تغییری نمی‌کند و فقط مقدار ماکزیمم سرعت افزایش



شکل ۱۰- کانتور سرعت در مقاطع عرضی برای فرودهای مختلف.

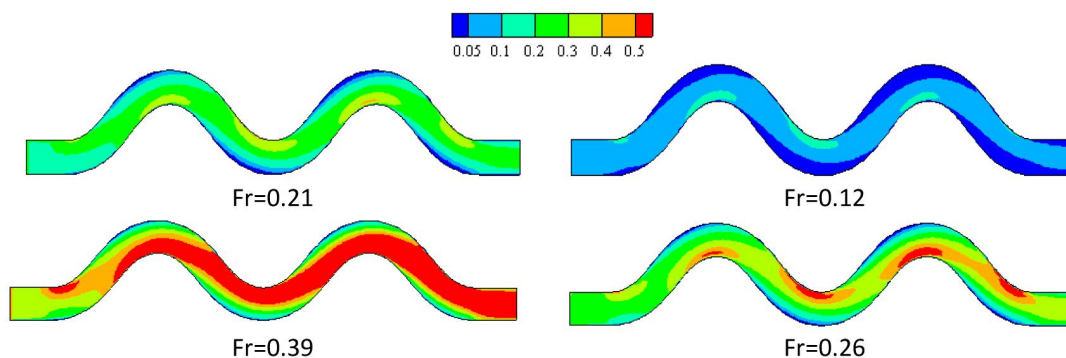
Figure 10. Contour speed at different cross sections for landing.

می‌یابد، به شکلی که هسته پرسرعت، در نزدیک سطح آب قرار گرفته است. با نزدیک شدن به راس قوس (مقطع ۶۰) و قدرت گرفتن جریان ثانویه مهم‌ترین

مشاهده می‌شود با ورود جریان به قوس محل هسته پرسرعت به سمت جداره بالایی متمایل گشته است. سرعت از تراز بستر به سمت سطح آب افزایش

مناطق و در نتیجه ایجاد ناحیه با تنش برشی شدید در بستر و جداره داخلی کانال می‌شود که نواحی محتمل برای فرسایش هستند. در عوض مناطق با تنش برشی کم در نزدیکی دیواره خارجی، محتمل‌ترین مناطق جهت رسوب‌گذاری هستند که با تغییر عدد فرود، الگوی کلی ثابت مانده اما مقادیر تنش برشی و عرض ناحیه پرتنش با افزایش عدد فرود افزایش پیدا کرده است. علت این امر همان‌طور که ذکر شد می‌تواند ناشی از این باشد که با افزایش عدد فرود سرعت نیز افزایش یافته و بنابراین بر مقادیر حداکثر تنش برشی افزوده شده است. این افزایش به معنای امکان جابجایی بیش‌تر مصالح بستر با افزایش عدد فرود است.

پدیده، گسترش هسته پرسرعت به سمت بستر می‌باشد. نخستین انتظاری که از این فرآیند (افزایش گرادیان سرعت نزدیک بستر) می‌توان داشت تأثیر آن بر روند توزیع تنش برشی بستر و افزایش احتمال آبستگي در این بازه از کانال است. با تغییر انحنای قوس، محل هسته پرسرعت نیز تغییر می‌کند و این روند تا انتهای کانال ادامه دارد. تأثیر عدد فرود بر الگوی توزیع تنش برشی بستر پیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۱۱ نیز نشان داده شده است. نواحی پرتنش نزدیک دیواره داخلی و نواحی کم‌تنش در نزدیکی دیواره خارجی ایجاد شده است. علت ایجاد نواحی پرتنش، انتقال هسته پرسرعت به سمت جداره داخلی و گسترش هم‌زمان آن در صفحه نزدیک بستر که باعث ایجاد نواحی با گرادیان سرعت بالا در این



شکل ۱۱- الگوی تنش برشی بر حسب اعداد فرود مختلف.

Figure 11. Secondary flow strength.

بررسی تأثیر نسبت B/h بر الگوی جریان: جهت بررسی تأثیر B/h از چهار 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 گونه‌ای صورت گرفته است که مقدار عدد فرود در بالادست کانال تقریباً ثابت باشد

بررسی تأثیر نسبت B/h بر الگوی جریان: جهت بررسی تأثیر B/h از چهار 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 گونه‌ای صورت گرفته است که مقدار عدد فرود در بالادست کانال تقریباً ثابت باشد

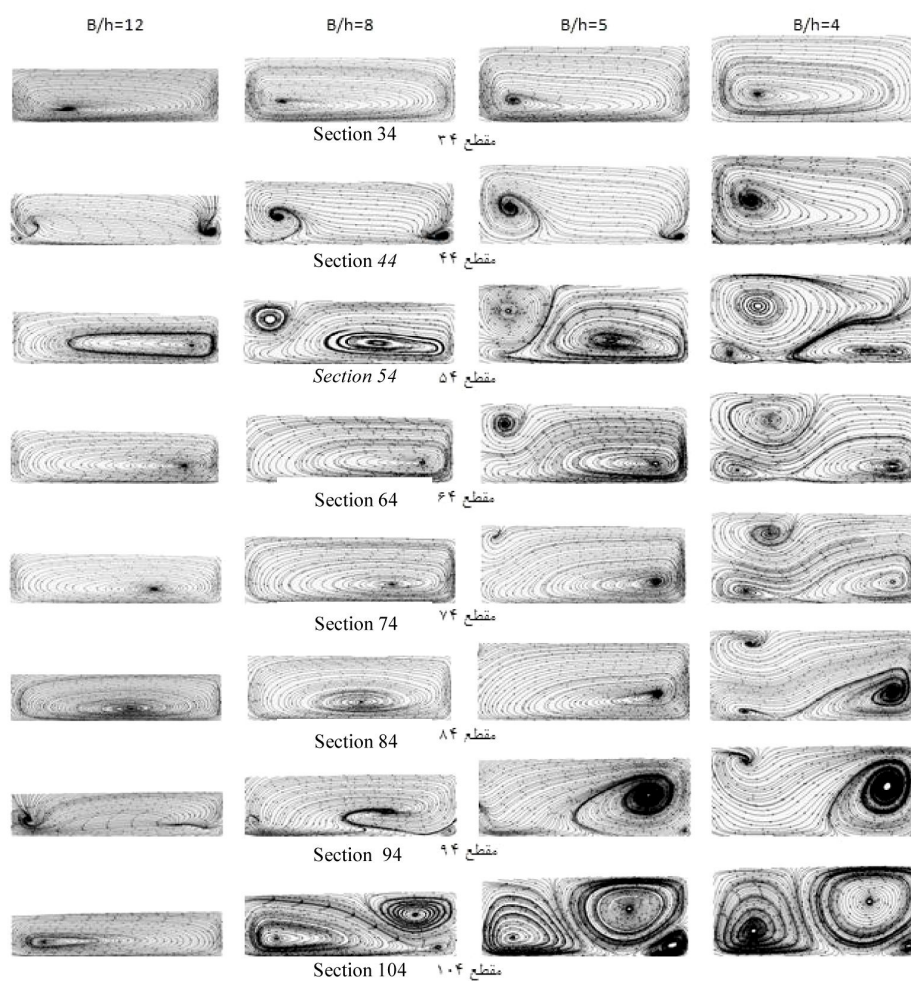
جدول ۵- مشخصات هیدرولیکی جریان.

Table 5. Hydraulic flow characteristics.

| B/h | Q(lit/s) | h(m) | B(m) |
|------|----------|-------|------|
| 12.5 | 2.53 | 0.032 | 0.4 |
| 8 | 4 | 0.5 | 0.4 |
| 5 | 7 | 0.08 | 0.4 |
| 4 | 9 | 0.1 | 0.4 |

گردابه اشاره کرده است گرچه ایشان نسبت‌های مختلف B/h را مورد بررسی قرار نداده‌اند. شاید علت عدم ذکر این پدیده در مطالعات سایر پژوهشگران این باشد که آن‌ها مطالعات خود را بر روی کانال‌هایی با نسبت‌های بالاتری از B/h انجام داده‌اند ($B/h > 10$). با کاهش نسبت عرض به عمق ($B/h=4$ و $B/h=5$)، سلول چرخشی ایجاد شده در نزدیکی سطح آب و ساحل خارجی به تدریج بزرگ‌تر شده تا جایی که از سلول چرخشی اصلی بزرگ‌تر می‌شود و باعث تفکیک سلول چرخشی اصلی مقطع به دو سلول چرخشی مجزا می‌شود. برای $B/h \leq 5$ علاوه بر دو سلول چرخشی موجود در مقطع یک سلول چرخشی کوچک نزدیک ساحل خارجی و بستر کانال و هم جهت با هسته چرخشی اصلی مقطع، به وجود می‌آید. ون‌بالن (۲۰۰۹) در مورد سلول چرخشی نزدیک دیواره خارجی پژوهش‌هایی انجام داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که این پدیده بر اثر نیروی گریز از مرکز و نا همسانگردی جریان آشفته به وجود می‌آید (۱۳).

شکل ۱۲ الگوی جریان ثانویه برای مقادیر مختلف نسبت عرض به عمق را نشان می‌دهد. بررسی بردارهای جریان ثانویه در مقاطع عرضی برای $B/h=4, 5, 8, 9, 10, 12, 14$ نشان می‌دهد به‌زای $B/h \leq 8$ در مقاطع حدود مقطع ۴۴ گردابه کوچکی نزدیک به سطح آب و ساحل خارجی به تدریج وجود می‌آید و از حدود مقطع ۵۰ (قبل از رسیدن به اولین رأس کانال) در قوس سلول چرخشی اصلی که نزدیک به بستر و ساحل داخلی است، به تدریج شکل می‌گیرد تا در حدود رأس قوس سلول چرخشی نزدیک سطح آب به سلول چرخشی اصلی تبدیل گردد. با عبور از رأس قوس، سلول چرخشی اصلی به تدریج از بین می‌رود و در حدود مقطع ۹۴ یعنی قبل از دومین رأس کانال مجدداً سلول چرخشی کوچک نزدیک به سطح آب به وجود می‌آید. این روند در طول کانال تکرار می‌شود. با مروری بر پژوهش‌های انجام شده در مورد کانال‌هایی با مولد سینوسی، ملاحظه می‌گردد تنها ویلدهاگن (۲۰۰۴) در مطالعات خود (که با $B/h=6$ انجام داده است) به این

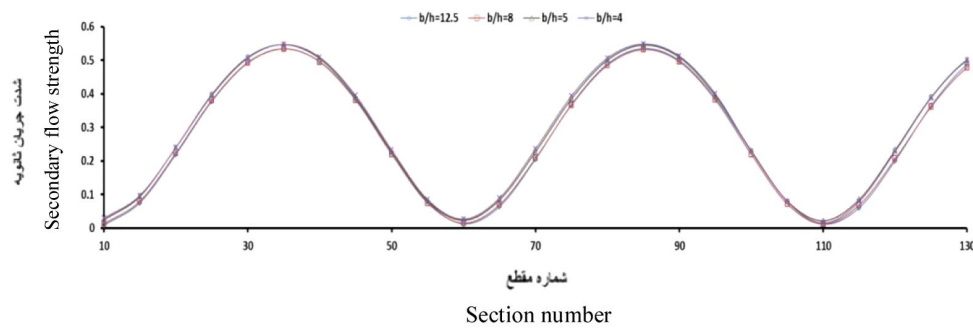


شکل ۱۲- الگوی جریان ثانویه برای نسبت عرض به عمق‌های مختلف ($Fr=0.32$).

Figure 12. Secondary flow pattern in different depth to width ratio.

پیدا می‌کند تا در قوس اول و در مقطع ۶۰ به کم‌ترین مقدار برسد. همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود با کاهش نسبت پارامتر B/h میزان قدرت جریان ثانویه افزایش می‌یابد.

شکل ۱۳ تغییرات قدرت جریان حلزونی در طول کانال برای مقادیر مختلف B/h را نشان می‌دهد. در هر چهار حالت قدرت جریان ثانویه در طول کانال به صورت متناوب و سهمی گونه تغییر می‌کند و نقطه اوج آن در مقطع ۳۵ اتفاق می‌افتد و به تدریج کاهش

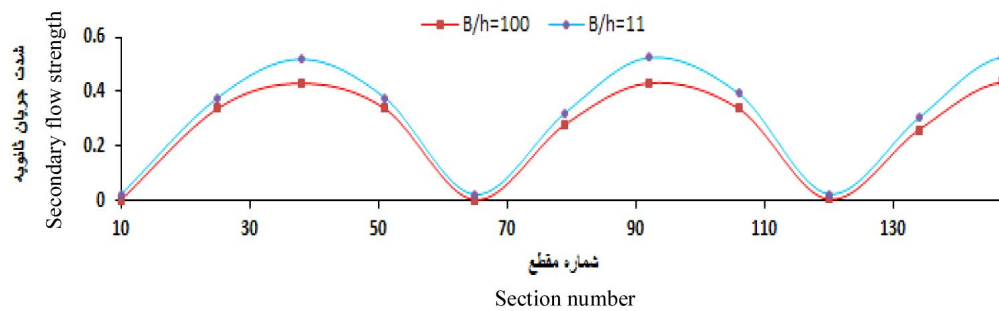


شکل ۱۳- قدرت جریان ثانویه.

Figure 13. Secondary flow strength.

در رودخانه‌های عریض قدرت جریان ثانویه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد اما همچنان روند نزولی و صعودی بودن آن مشابه رودخانه‌های عمیق می‌باشد.

همچنین مقایسه قدرت جریان ثانویه برای $B/h=100$ و $(h=0.036 \text{ m و } B=0.4 \text{ m})$ $B/h=11$ در شکل ۱۵ نشان می‌دهد $(h=0.02 \text{ m و } B=2 \text{ m})$

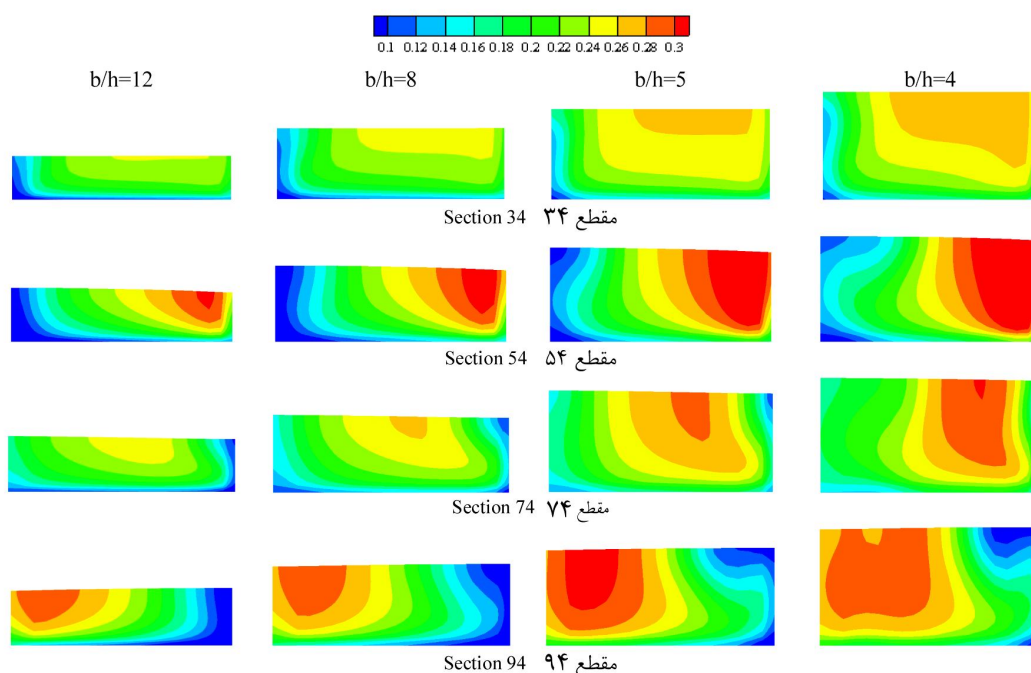


شکل ۱۴- قدرت جریان ثانویه.

Figure 14. Secondary flow strength.

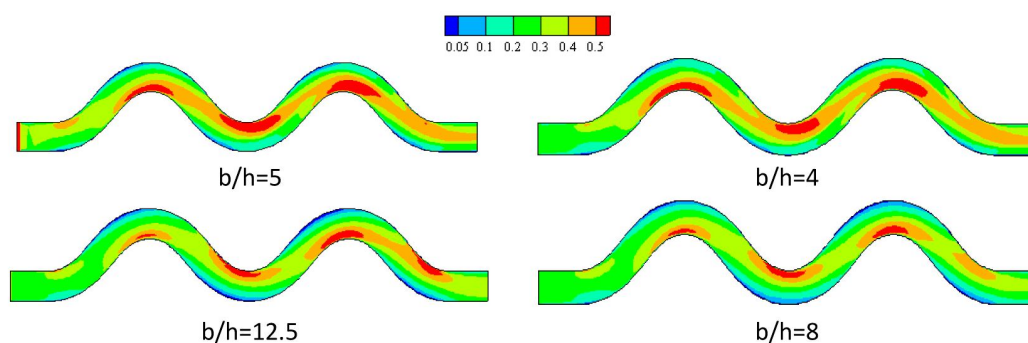
عمق (B/h) بر روی الگوی تنش برشی بستر در شکل ۱۶ مشخص است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت عرض به عمق، مقادیر تنش برشی و عرض ناحیه پرتنش کم‌تر می‌شود. مناطق پرتنش، نواحی محتمل فرسایش و مناطق با تنش کم‌تر، نواحی محتمل رسوب‌گذاری می‌باشند. بنابراین انتظار می‌رود افزایش پارامتر B/h موجب کاهش فرسایش در پیچان‌رودها گردد.

تغییرات نسبت عرض به عمق بر توزیع سرعت در مقاطع عرضی نیز تأثیر می‌گذارد به طوری که با کاهش این نسبت خطوط هم‌سرعت به سمت دیواره پایینی متمایل می‌شوند که دلیل آن ایجاد گردابه در این ناحیه است. همچنین هسته پر سرعت در مجاورت ساحل پایینی ناحیه بیش‌تری نزدیک به کف کانال را اشغال می‌کند که بر روی فرسایش این ناحیه تأثیرگذار است (شکل ۱۵). تأثیر تغییرات عرض به



شکل ۱۵- کانتور سرعت در مقاطع عرضی برای نسبت‌های عرض به عمق مختلف.

Figure 15. Secondary flow strength.



شکل ۱۶- الگوی تنش برشی برای نسبت‌های مختلف عرض به عمق.

Figure 16. Pattern shear stress for different ratio of width to depth.

نتایج نزدیک‌تری نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان داده است.

- با تغییر عدد فرود در یک نسبت عرض به عمق (B/h) ثابت، قدرت جریان ثانویه تغییر چندانی نمی‌کند این در حالی است که عکس این مطلب صادق نیست و با افزایش نسبت عرض به عمق (B/h) در یک عدد فرود ثابت قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش الگوی جریان در کانال پیمان‌رودی ۵۰ درجه شبیه‌سازی عددی شده و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی، با دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ صورت گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد: - هر دو مدل آشفتگی به‌کار گرفته شده نتایج قابل‌قبولی ارائه داده‌اند اما مدل آشفتگی $k-\omega$

- الگوی تنش برشی به تغییرات عدد فرود وابسته است اما الگوی جریان ثانویه با تغییر عدد فرود تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین تغییرات نسبت عرض به عمق (B/h) بر روی الگوی جریان ثانویه و الگوی تنش برشی تأثیر قابل توجهی می‌گذارد.

- برای $B/h < 8$ ، قبل از رسیدن به هر رأس قوس کانال، سلول چرخشی کوچکی در جهت مخالف گردش سلول چرخشی اصلی و در نزدیکی ساحل خارجی و سطح آب به وجود می‌آید که بر روی فرسایش ساحل خارجی تأثیر می‌گذارد. برای

$B/h \leq 4$ سلول چرخشی دوم رشد کرده و موجب تقسیم سلول چرخشی اصلی به دو سلول چرخشی موجود در مقطع می‌شود. این در حالی است که برای $B/h > 8$ سلول چرخشی دوم مشاهده نمی‌شود.

- با تغییر عدد فرود، الگوی کلی تنش برشی ثابت مانده اما مقادیر تنش برشی و عرض ناحیه پرتنش با افزایش عدد فرود افزایش پیدا کرده است.

- با افزایش نسبت عرض به عمق، مقادیر تنش برشی و عرض ناحیه پرتنش کم‌تر شده و به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند.

منابع

1. Blanckaert, K., and Graf, W.H. 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend. J. Hydr. Engin. ASCE. 127: 10. 835-847.
2. Da Silva, A.M.F. 1995. Turbulent flow in sine-generated meandering channels. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston Canada.
3. Da Silva, A.M.F., El-Tahawy, T.H., and Tape, W. 2006. Variation of flow pattern with sinuosity in sine-generated meandering streams. J. Hydr. Engin. ASCE. 132: 10. 1003-1014.
4. Langbein, W.B., and Leopold, L.B. 1966. River mechanics—theory of minimum variance. U.S. Geol. Survey Prof. 442: 1-15.
5. Nelson, J.M., and Smith, J.D. 1989. Evolution and stability of erodible channel beds, P 321-378. In: S. Ikeda and G. Parker (eds), River Meandering, American Geophysical Union, Water Resources Monograph.
6. Odgaard, A.J. 1984. Bank erosion contribution to stream sediment load. Iowa Institute of Hydraulic Research, Rep. Iowa City, 280p.
7. Rozovskii, I.L. 1961. Flow of Water in Bends of Open Channels. Academy of Science of the Ukrainian SSR, Kiev. 1957; Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1961.
8. Shukry, A. 1949. Flow around bends in an open flume. Transactions, J. Hydr. Engin. ASCE. 115: 751-788.
9. Strickler, A. 1923. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und Geschlossene Leitungen, Berna.
10. Tape, W. 2001. Experimental investigation of flow patterns in meandering channels of moderate sinuosity. M.Sc. Thesis, department of Civil and Environment Engineering, University of Windsor, Windsor, Canada.
11. Termini, D. 1996. Evolution of a meandering channel with an initial flat bed: theoretical and experimental study of the channel bed and the initial kinematic characteristics of flow. Ph.D. Thesis, University of Palermo, Palermo, Italy. (In Italian)
12. Van Balen, W., Uijttewaal, W.S.J., and Blanckaert, K. 2009. Large-eddy simulation of a mildly curved open-channel flow. J. Fluid Mech. 630: 413-442.
13. Wildhagen, J. 2004. Applied Computational Fluid Dynamics with Sediment Transport in a Sharply Curved Meandering Channel. M.Sc. Thesis., University of Karlsruhe (TH).
14. Whiting, P.J., and Dietrich, W.E. 1993. Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders, 1. Observations. Water Resources Research, 29: 11. 3605-3614.

15. Yalin, M.S. 1992. River Mechanics. Pergamon press, Oxford. 219p.
16. Yalin, M.S., and da Silva, A.M.F. 2001. Variational approach to the determination of meandering flows. Proc. XXIX IAHR Congress, Beijing, Sept. 17-21: 231-237.
17. Yen, C., and Ho, S. 1990. Bed evolution in channel bends. J. Hydr. Engin. ASCE. 116: 4. 544-562.

Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(1), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Study effect of flow hydraulic conditions on the secondary flow pattern in bend meanders using SSIIM mathematical model

*H. Sarikhani Khorami¹ and H. Montaseri²

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, University of Yasuj,

²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Yasuj

Received: 08/01/2013; Accepted: 07/06/2015

Abstract

Background and Objectives: Natural rivers are one of the main sources of water and energy. Design and management of natural rivers need a complete understanding of mechanics of flow pattern and sediment transport. The complex three-dimensional flow characteristics in river bends necessitates the use of a three-dimensional numerical model. The purpose of this study is to predict the flow pattern and location of erosion and deposition in Sine-Generated channels. Also, the effect of Froude number and the ratio of width to depth on flow and bed shear stress was considered.

Materials and Methods: 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 the flow pattern and location of erosion and depositional in Sine-Generated channel having $\theta_0 = 50^\circ$ with rigid bed was predicted. The $k-\varepsilon$ and *SST* $k-\omega$ models were used to predict the turbulence in this simulation. For verification of the results of the numerical model the experimental data (da Silva and Tape) was used.

Results: By changing the Froude number from 0.15 to 0.41, flow pattern and velocity distribution did not change but increased erosion. Also by decreasing width to depth ratio from 12.5 to 4, the number of rotary cells in section increased from 2 to 3 and it was found in wider rivers, power of secondary flow decrease but the downward upward trend was the same as deep rivers.

Conclusion: The result of simulation shows that *SST* $k-\omega$ model has better accordance with experimental data than $k-\varepsilon$ model. 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, so that for $b/h < 8$, another rotary cell occurs near the outer bank.

Keywords: Flow pattern, Numerical simulation, Meandering, Turbulence models, Secondary flow, SSIIM

* Corresponding Author; Email: h.sarikhani66@gmail.com