

بررسی عددی سه بعدی تغییرات الگوی جریان در دو قوس متوالی همگرا و واگرا از یک رودخانه طبیعی با استفاده از مدل SSIIM.2

روح الله کریمیان کاکلکی^۱، افشین هنربخش^۲، غلامرضا شمس قهفرخی^۳، علیرضا داوودیان دهکردی^۴، مهدی پژوهش^۵

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۴

چکیده:

بررسی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچانرودی بسیار پیچیده تر از رودخانه‌های مستقیم است. همچنین اکثر رودخانه‌ها در مسیر قوس‌ها به لحاظ تغییرات عرض کانال یکنواخت نیستند. لذا، استفاده از یک مدل عددی قوی برای شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه‌ها ضروری است. در این تحقیق از مدل عددی سه بعدی SSIIM جهت شبیه‌سازی الگوی جریان در بازه پیچانرودی از رودخانه دوآب واقع در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. برای این منظور پس انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و واسنجی مدل، مقادیر سرعت محاسبه شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت در مقطعی از یک قوس نسبتاً یکنواخت از رودخانه با استفاده از معیارهای خطای RMSE و MAPE مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مقادیر این دو معیار به ترتیب برابر ۰/۰۸۱ و ۰/۰۷۵ می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که کارایی مدل خوب می‌باشد. علاوه بر این خصوصیات مختلف جریان شامل پروفیل‌های سرعت عمودی و طولی، خطوط سرعت در جهات طولی و عرضی و همچنین توزیع تنش برشی بستر در محل دو قوس همگرا و واگرا مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر سرعت در جهت طولی در مقاطع انتخابی، در قوس همگرا بیشتر از قوس واگرا می‌باشد. همچنین تراکم خطوط جریان و مقادیر تنش برشی بستر در بازه حدفاصل دو قوس حداکثر می‌باشند. بنا بر این میتوان گفت که الگوی جریان بخوبی توسط مدل شبیه‌سازی گردیده است.

کلمات کلیدی: رودخانه‌های پیچانرودی، تنش برشی بستر، رودخانه دوآب صمصامی، خطوط جریان.

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، پست الکترونیک:

karimian.roh@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد و مسئول مکاتبات، پست الکترونیک:

afshin.honarbaksh@gmail.com

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، پست الکترونیک: g.shams@eng.sku.ac.ir

^۴ استاد گروه پترولوژی دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، پست الکترونیک: alireza.davoudian@gmail.com

^۵ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، پست الکترونیک: drpajooesh@gmail.com

مقدمه

بررسی رفتار رودخانه‌ها و الگوی جریان با توجه به اینکه رودخانه‌ها عمدتاً در مسیری پیچانرودی (مئاندری) جریان دارند بسیار پیچیده بوده و مستلزم استفاده از تکنیک‌های جدید و پیشرفته می‌باشد. از طرفی شبیه‌سازی الگوی جریان از موضوعات مورد علاقه بسیاری محققین در زمینه مهندسی رودخانه و مطالعات رسوب گذاری محسوب می‌گردد (Ruther, 2006). به‌طور کلی عوامل مختلفی بر روی الگوی جریان در قوس‌ها مؤثر بوده که شامل نیروی گریز از مرکز در اثر انحناء جریان و غیر یکنواختی پروفیل سرعت عمودی، تنش متقاطع عرضی و گرادیان فشار شعاعی ایجاد شده در اثر شیب جانبی سطح آب می‌باشد (Chow, 1959). اثرات همزمان چنین عواملی تولید نوعی جریان به نام جریان حلزونی می‌کند. از نخستین مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی خصوصیات و الگوهای جریان در قوس‌ها می‌توان به تحقیق (Mockmore, 1944) اشاره نمود. همچنین (Rozovskii, 1957) جزء اولین محققینی بود که به بررسی سه بعدی مؤلفه‌های سرعت جریان پرداخت. (Leschziner and Rodi, 1979) مدلی سه بعدی به روش تفاضل محدود جهت بررسی اثرات گرادیان فشار بر روی الگوی جریان ارائه نمود. (Lien et al., 2010) به بررسی اثر جریانات ثانویه بر روی معادلات عمق متوسط و همچنین بررسی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه توسط مدل دوبعدی پرداخت. همچنین (Najiabari et al., 2010) به بررسی اثرات جریان ثانویه بر روی توزیع سرعت و همچنین الگوی حداکثر سرعت طولی در یک قوس ۹۰ درجه پرداختند. نتایج حاصله نشان از دقت خوب مدل عددی در پیش بینی پروفیل‌های طولی سرعت و الگوی جریان ثانویه دارد. در دهه‌های اخیر مدل‌های عددی فراوانی جهت تحلیل جریان و بررسی حمل رسوب در کانال‌ها و رودخانه‌ها تهیه گردیده که همراه با افزایش قدرت رایانه‌ها، این مدل‌ها دارای توسعه روزافزون می‌باشند. در شرایط

ساده به لحاظ شکل و فرم کانال و همچنین خصوصیات جریان می‌توان از انواع مدل‌های یک بعدی جهت بررسی جریان و رسوب استفاده نمود که می‌توان به مطالعات Ballos اشاره نمود. در شرایط پیچیده تر می‌توان از مدل‌های دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق جهت حل معادلات در آب‌های کم عمق که فاقد جریان‌های ثانویه و نوسانات شدید آشفتگی در عمق هستند، استفاده نمود. حال با توجه به شرایط طبیعی رودخانه‌ها که منجر به ایجاد تغییرات زیاد فشار و همچنین ایجاد جریانات ثانویه قوی در عمق می‌گردد، مستلزم استفاده از مدل‌های سه بعدی قوی گسترش یافته هستیم. این مدل‌ها از الگوریتم‌های بسیار قوی در حل مسائل جریان بهره برده که این موضوع تحلیل سه بعدی جریان و رسوب را در شرایط پیچیده طبیعی ممکن می‌سازد. که می‌توان به مطالعات (Bradbrook et al., 2001) و (Huang et al., 2006) اشاره نمود.

مدل‌های متعددی جهت شبیه‌سازی و بررسی الگوی جریان و رسوب و فرسایش تولید شده‌اند که دارای قابلیت‌های متفاوتی می‌باشند. مدل SSIIM یکی از مدل‌های سه‌بعدی توسعه یافته توسط گروه مهندسی محیط و هیدرولیک وابسته به مؤسسه تکنولوژی نروژ بوده که قابلیت استفاده از چندین مدل آشفتگی و نیز چندین فرمول برای منفصل سازی معادلات حاکم و حل آنها می‌باشد. در خصوص استفاده و بکارگیری مدل SSIIM نیز مطالعات متعددی انجام شده که می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: (Raieszadeh et al., 2014) به مدل‌سازی جریان در دشتهای سیلابی پوشیده از پوشش گیاهی پرداختند که در نهایت نتایج را با نتایج حاصل از بکارگیری و شبیه‌سازی در فلوم آزمایشگاهی مقایسه نمودند. ایشان مقدار خطای نسبی مربوط به توزیع عرضی سرعت متوسط تنش برشی بستر را به ترتیب ۷/۴۲ و ۱۰/۱ درصد محاسبه نمودند. (Arvandi et al., 2013) به بررسی اثر متقابل جریان حامل بار بستر از سرریزهای جانبی و موفولوژی بستر با استفاده از مدل SSIIM در یک کانال شماتیک

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

صمصامی واقع در استان چهارمحال و بختیاری انتخاب گردید. بازه انتخابی در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۴۵۵۲۳ تا ۴۴۵۵۶۴ و عرض‌های جغرافیایی ۳۵۹۸۸۷۶ تا ۳۵۹۸۶۲۳ واقع گردیده که جریان پس از عبور از مسیری نعل اسبی شکل، از انتهای بازه انتخابی به طول ۶۵۰ متر خارج می‌گردد. وجود مزارع متعدد پرورش ماهی و همچنین اراضی کشاورزی واقع در حاشیه رودخانه دوآب صمصامی، اهمیت تحقیقات پیرامون مسائل مهندسی رودخانه و تحلیل جریانات سیلاب و رسوب در رودخانه مذکور را افزایش می‌دهد. شکل ۱ مربوط به موقعیت بازه مورد مطالعه در ایران و استان چهارمحال و بختیاری بوده و شکل ۲ در واقع عکس هوایی بازه انتخابی تهیه شده توسط پهباد می‌باشد.



شکل (۱) - موقعیت رودخانه دوآب صمصامی در ایران و استان چهارمحال و بختیاری



شکل (۲) - تصویر هوایی از بازه مورد مطالعه تهیه شده توسط پهباد

پرداختند که در انتها قابلیت مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان در سرریزها را مناسب ارزیابی نمودند. (EsMAPEili et al., 2014) به مدل‌سازی عددی و سه بعدی جریان در مخازن مستطیل شکل کم عمق پرداخته که از اینرو نتایج حاصل از محاسبات مدل SSIIM را با مقادیر اندازه گیری شده حاصل از شبیه‌سازی جریان در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه فدرال سوئیس مقایسه و ارزیابی نمودند. (Elsaeed, 2011) در تحقیقی به ارزیابی مدل سه بعدی SSIIM در بررسی فرسایش در پایه‌های پل پرداخت که نتایج دارای تطابق مناسب با نتایج (Sharafaddin, 2003) می‌باشد. در تحقیقی دیگر (Abed et al., 2014) توانایی مدل SSIIM در شبیه‌سازی انتقال رسوب در منطقه بالادست بند القماس در کشور عراق را مناسب ارزیابی نمودند. (Zhang et al., 2014) به بررسی اثرات ناشی از کاهش رزولوشن شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی فرآیندهای مرفودینامیکی با استفاده از مدل SSIIM در یک مخزن طبیعی پرداختند. همانطور که اشاره گردید، عمده تحقیقات صورت گرفته بر روی بررسی و شبیه‌سازی با مدل SSIIM در شرایط آزمایشگاهی صورت گرفته و ما در این تحقیق به شبیه‌سازی الگوی جریان در بازه ای پیچانرودی و نعل اسبی شکل از رودخانه طبیعی و دائمی پرداخته و در نهایت با مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری مدل و مقادیر اندازه گیری شده سرعت، قابلیت مدل را بررسی و ارزیابی خواهیم نمود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق که در واقع بررسی و شبیه‌سازی الگوی جریان در یک رودخانه طبیعی عنوان گردید، بازه ای کاملاً تپیک به لحاظ وجود قوس‌های همگرا و واگرا و کناره‌های کاملاً فرسایشی و همچنین وجود جریانات دائمی و سیلاب های متعدد در فصول پر بارش از رودخانه دوآب

ارزیابی نتایج حاصل از محاسبات مدل، نسبت به ثبت سرعت جریان با استفاده از سرعت سنج مناسب در مقاطع مشخص و همچنین در نقاط مختلف از هر مقطع عرضی به لحاظ ارتفاعی و طولی از یک قوس نسبتاً یکنواخت اقدام و در گام بعد به مقایسه نتایج حاصل از مدل با مقادیر اندازه گیری شده در مقاطع عرضی مذکور گردید.

مدل عددی SSIIM

معادلات ناویر استوکس^۱ برای جریانات چسبنده و آشفته غیرمتراکم شامل معادله پیوستگی (۱) و معادله مومنوم (۲) به شکل زیر می باشد.

$$i=1,2,3 \frac{dU_i}{dx_i} = 0 \quad (1)$$

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

که در این معادلات U_i برابر است با سرعت متوسط در جهت X_i و ρ معادل تراکم آب، P معادل فشار و δ_{ij} مربوط به تابع دلتای کرونکر^۲ می باشد که برای حالت $i=j$ برابر ۱ و در سایر حالات برابر صفر می باشد. X_j ابعاد مکانی عمومی هستند. ترم آخر معادله ۲ یعنی $\rho u_i u_j$ - مربوط به تنش رینولدز^۳ بوده که بیانگر میزان انتقال حرکت بوده که به آشفتگی نسبت داده می شود. تنش رینولدز اغلب به صورت تقریب بوسینیسک^۴ به شکل زیر نشان داده می شود:

$$\rho$$

که k انرژی جنبشی آشفته بوده که به شکل زیر تعریف می شود:

$$(5)$$

$$k = \frac{1}{2} u_i u_j$$

جمع آوری داده های صحرائی

عملیات نقشه برداری

یکی از مهمترین و اساسی ترین داده های مورد نیاز جهت مدل سازی جریان و رسوب در کانال یا رودخانه طبیعی برداشت رقوم ارتفاعی بستر جریان جهت ایجاد هندسه مسئله می باشد. در این پروژه به منظور بالا بردن دقت شبکه حاصل از فایل ژئومتری، نقشه برداری بازه انتخابی به دو صورت برداشت هوایی توسط پهپاد (روش فتوگرامتری) و سپس توسط دوربین های توتال استیشن جهت بستر واقع در زیر آب و گاهاً رقوم سطح زمین واقع در زیر درختان انجام گردید. پس از برداشت و تهیه کامل نقشه رقوم - ارتفاعی منطقه، با توجه به اینکه فایل حاوی اطلاعات ژئومتری رودخانه (geodata) می بایست به صورت نقاط XYZ به مدل مورد استفاده معرفی گردد، نسبت به ایجاد نقاط ارتفاعی متعدد به صورت سیستماتیک و همچنین افزودن نقاط بیشتر با استفاده از نرم افزار Civil 3D در مکان هایی از رودخانه که تغییرات شیب بالا بوده و رژیم جریان را تحت تاثیر قرار می دهد، اقدام گردید.

ثبت خصوصیات بستر و جریان

یکی دیگر از اطلاعات مورد نیاز در مدل مورد استفاده مقادیر زبری بستر می باشد. بدین منظور نمونه های مختلفی از رسوبات بستر واقع در مرکز و سواحل چپ و راست تهیه و در آزمایشگاه خاک نسبت به دانه بندی و سپس تعیین مقادیر زبری مانینگ (n) اقدام گردید. همچنین به منظور بررسی کارائی و همچنین

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

که در آن U_t معادل ویسکوزیته گردابی است که توسط مدل $k-\epsilon$ به شکل زیر محاسبه می گردد:

$$(4)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

Reynolds stress³
approximation Boussinesque⁴

Navier-Stokes equations¹
Kroncker delta²

سال نهم شماره سی و پنجم بهار ۱۳۹۸

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] +$$

ساده خواهد بود. معمولاً تعیین آشفتگی بسیار مشکل می‌باشد. برای تعیین ویسکوزیته گردابی، برآورد مقدار تنش برشی در ابتدای بستر با استفاده از مقادیر سرعت امکان پذیر بوده سپس مقدار انرژی جنبشی متلاطم (k) در ابتدای بستر با استفاده از رابطه ۹ تعیین می‌گردد:

$$(9) \quad k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{\mu}}$$

با استفاده از مقدار ویسکوزیته متلاطم U_t و انرژی جنبشی آشفته (متلاطم) k در بستر، معادله ۴ مقدار μ در بستر را بدست می‌دهد. اگر k از بستر تا سطح آب به صورت بسیار خطی فرض گردد، می‌توان برای محاسبه توزیع عمودی مقدار μ مورد استفاده قرار گیرد. برای شرایط مرزی جریانی خروجی گردایان صفر در نظر گرفته شده است.

قانون دیوار^۲ (Schlichting, 1979) بعنوان شرایط مرزی برای بستر و دیواره به شکل زیر استفاده گردید:

همچنین زمان محاسبات را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. لذا یک شبکه بندی بهینه می‌تواند نتایج نزدیک تر به مقادیر اندازه گیری شده را بدست دهد. برای پیدا کردن بهینه ترین اندازه شبکه، بررسی‌های لازم به صورت تغییر اندازه شبکه از مقدار $130 * 30 * 25$ به ترتیب برای مقادیر طولی، عرضی و ارتفاعی بعنوان ریزترین اندازه شبکه تا درشتترین اندازه شبکه به صورت $80 * 10 * 15$ انجام گرفت. سپس با مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر سرعت، فشار و انرژی سینتیک متلاطم در شبکه بندی‌های مختلف، در نهایت اندازه شبکه $120 * 20 * 15$ بعنوان بهینه‌ترین اندازه شبکه مطابق شکل ۳ برای کل بازه انتخاب گردید.

که k به شکل زیر مدل سازی می‌شود:

$$(6) \quad P_k - \varepsilon$$

که P_k به شکل زیر می‌باشد:

$$(7) \quad P_k = v_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

که پراکندگی k توسط μ مشخص و به شکل زیر مدل می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

در معادلات ۴ الی ۸ پارامترهای C_μ ، σ_k ، σ_ε ، $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ ثابتهای تجربی هستند که به ترتیب و به طور تقریبی به مقادیر ۰/۰۹، ۱، ۱/۳، ۱/۴۴ و ۱/۹۲ تعیین گردیده‌اند (laundry and spalding, 1974).

شرایط مرزی برای معادلات ناویر استوکس (شامل شرایط مرزی برای جریان ورودی، جریان خروجی، سطح آب و بستر و دیواره‌ها) مشابه مدل پخشیدگی همرفت می‌باشد. شرایط مرزی دیریکله^۱ که می‌بایست برای جریان ورودی منظور گردد، برای سرعت نسبتاً

$$(10) \quad \frac{U}{U^*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right)$$

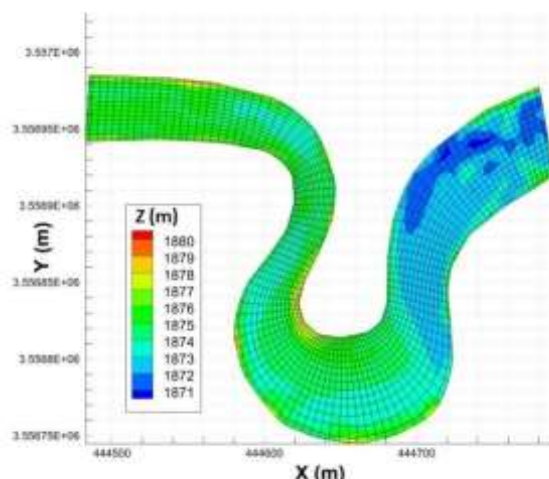
جاییکه U^* معادل سرعت برشی، U سرعت در مرکز سلول شبکه نزدیک به بستر، k ضریب ثابت معادل ۰/۴، y فاصله از دیواره تا مرکز سلول شبکه و k_s مربوط به زبری دیواره می‌باشد.

تعیین شبکه محاسباتی بهینه، صحت سنجی مدل سه بعدی و شبیه سازی جریان

اولین و مهمترین گام اساسی به منظور شبیه سازی جریان با مدل SSIM تولید و تعریف هندسه جریان بوده که دقت در انتخاب نوع شبکه بندی و ابعاد شبکه در جهت طولی، عرضی و قائم، دقت محاسبات و

Wall law²

Dirichlet boundary conditions¹



شکل (۳) - شبکه بندی محاسباتی بهینه مورد استفاده در مدل سازی با SSIIM

باشند. در ادامه پارامترهایی که در دقت و همگرایی محاسبات نقش اساسی داشته، شامل ضرایب مختلف و الگوریتم‌های حل گذاری جریان توسط فایل Control به مدل معرفی گردید. همچنین مقادیر دبی ورودی و خروجی بر اساس سیلاب‌های ثبت شده (مقادیر حداکثر) در ایستگاه هیدرومتری واقع در ورودی بازه (پل افسر آباد) استخراج و به مدل معرفی گردید. با تعریف کلیه پارامترها، ضرایب و مقادیر مورد نیاز مدل، شبیه‌سازی با اجرای مدل انجام و پس از همگرایی محاسبات، نتایج حاصل بدست آمد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مقایسات آماری بر اساس شاخص‌های آماری RMSE و MAPE در جدول ۱ ارائه، که نشان دهنده توانایی بالای مدل عددی در شبیه‌سازی جریان در یک مقطع از کانال نسبتاً یکنواخت از رودخانه مورد مطالعه می‌باشد.

همچنین به منظور تعیین میزان دقت مدل سه بعدی در انجام محاسبات و شبیه‌سازی جریان، پروفیل‌های سرعت محاسبه شده توسط مدل عددی با مقادیر اندازه گیری شده در رودخانه برای یک قوس نسبتاً یکنواخت مقایسه گردید. بدین منظور از شاخص‌های آماری RMSE و MAPE برای مقایسه مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده سرعت در صفحه ای نزدیک به سطح آب استفاده شد که این شاخص‌ها توسط روابط ۱۱ و ۱۲ به شکل زیر تعریف می گردند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [V_{Mi} - V_{Pi}]^2} \quad (11)$$

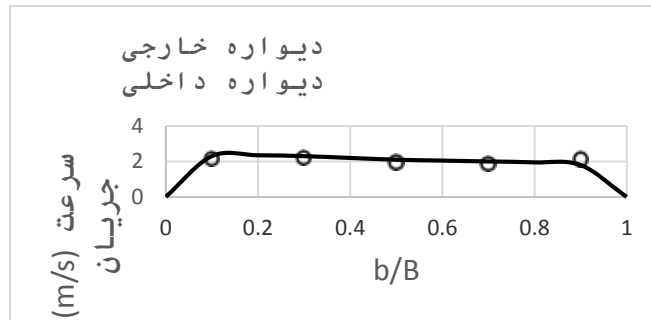
$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{Mi} - V_{Pi}}{V_{Mi}} \right| \times 100 \quad (12)$$

که در آن RMSE خطای جذر میانگین مربعات، MAPE میانگین درصد خطای مطلق، N تعداد داده‌های اندازه گیری شده، V_{Mi} و V_{Pi} به ترتیب مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده سرعت می

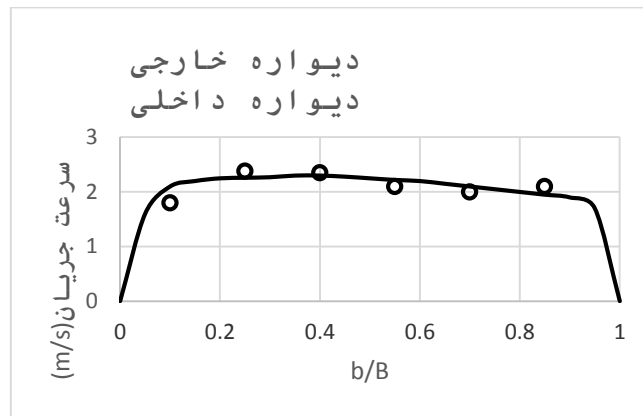
جدول (۱) - اختلاف آماری بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده در صفحه ای نزدیک به سطح آب

مقاطع عرضی			
شاخص آماری	۱۰ درجه	۴۵ درجه	۹۰ درجه
RMSE	۰/۰۹۱	۰/۰۷۳	۰/۰۸۵
MAPE	۰/۰۸۶	۰/۰۱۴	۰/۰۲۱

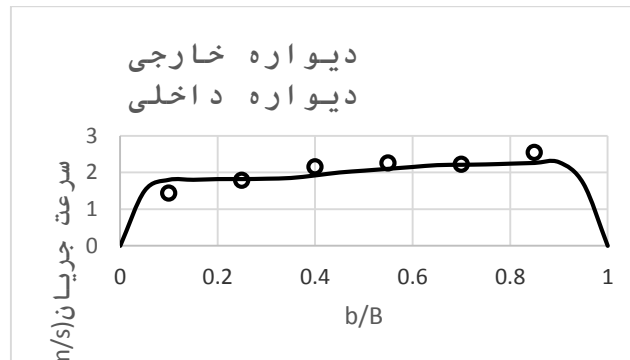
شکل ۴ نشان دهنده پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی مختلف و مقایسه آن با مقادیر اندازه گیری شده در رودخانه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، مدل عددی در برآورد مقادیر سرعت در طول مقطع عرضی دارای نتایج نزدیک به واقعیت بوده ولی در نزدیکی کناره‌ها این اختلاف بیشتر می‌شود. این موضوع به علت ضعف مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در نزدیک جداره‌ها بوده که در تحقیق (منتصری و آسیایی، ۱۳۹۲) نیز به آن اشاره گردیده است.



الف) مقطع عرضی ۱۰ درجه



ب) مقطع عرضی ۴۵ درجه



ج) مقطع عرضی ۹۰ درجه شکل

(۴) - مقایسه پروفیل‌های سرعت (خطوط پیوسته) در صفحه ای نزدیک به سطح آب در مقاطع عرضی مختلف با مقادیر داده‌های اندازه گیری شده در رودخانه (نقاط تو خالی)

هر یک از دو قوس انتخابی در درجات مختلف از ۰ تا ۹۰ درجه مشخص و درجه بندی گردید. عرض رودخانه در قوس همگرا از ۲۶ متر تا ۱۲ متر و همچنین در قوس واگرا از ۱۳ متر تا ۴۲ متر متغیر می‌باشد. در مرحله بعد خصوصیات مختلف جریان در مقاطع عرضی مختلف با زاویه انحاءهای ۱۰، ۴۵ و ۹۰ درجه از مدل SSIIM

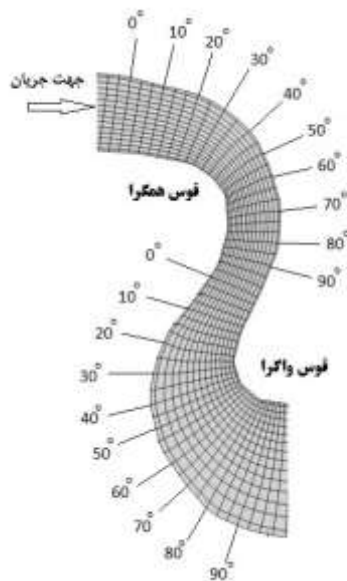
در تحقیق حاضر به منظور بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان در بازه انتخابی و به طور ویژه با هدف بررسی رفتار جریان در قوس‌های واگرا و همگرا در رودخانه نسبت به شناسایی و مشخص نمودن محدوده دو قوس متوالی از بازه نشان داده شده در شکل ۳ مطابق شکل ۵ اقدام گردید. سپس زاویه انحراف برای

عرضی مشاهده می‌گردد، مقادیر سرعت در پروفیل‌های عمودی از قوس واگرا دارای مقادیر پایین‌تری نسبت به قوس همگرا می‌باشد و این به علت کاهش سرعت در قوس واگرا با توجه به افزایش عرض کانال در این قوس رخ داده و در قوس همگرا عکس این حالت اتفاق می‌افتد. همچنین حداکثر و حداقل پروفیل سرعت عمودی در فواصل بدون بعد $0/7$ و $0/9$ از دیواره داخلی کانال اتفاق می‌افتد. علاوه بر این پروفیل‌های سرعت عمودی در محل مقطع 45° درجه برای هر دو نوع قوس همگرا و واگرا نسبت به قوس 90° درجه بهم نزدیک‌تر هستند.

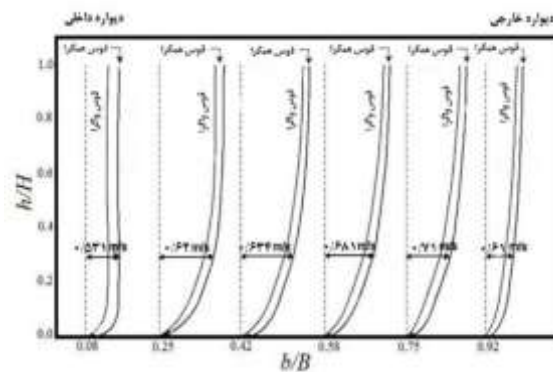
برای هر دو قوس همگرا و واگرا استخراج و با یکدیگر مقایسه گردید.

مقایسه پروفیل‌های سرعت عمودی

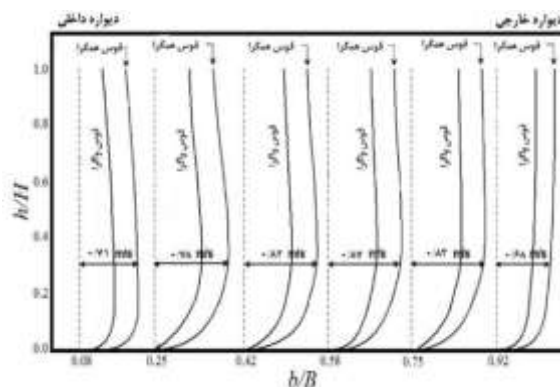
در اولین گام از بررسی خصوصیات جریان، پروفیل‌های سرعت عمودی در طول مقاطع عرضی 45° و 90° درجه و همچنین در فواصل یکسان از یکدیگر در طول هر مقطع عرضی ترسیم و سپس با یکدیگر مقایسه گردیدند (شکل ۶). با بررسی بیشتر اشکال مربوط به هر دو مقطع



شکل (۵) - موقعیت دو قوس 90° درجه همگرا و واگرا متوالی با درجه بندی زاویه انحراف قوس از 0° تا 90° درجه



الف - مقطع عرضی ۴۵ درجه



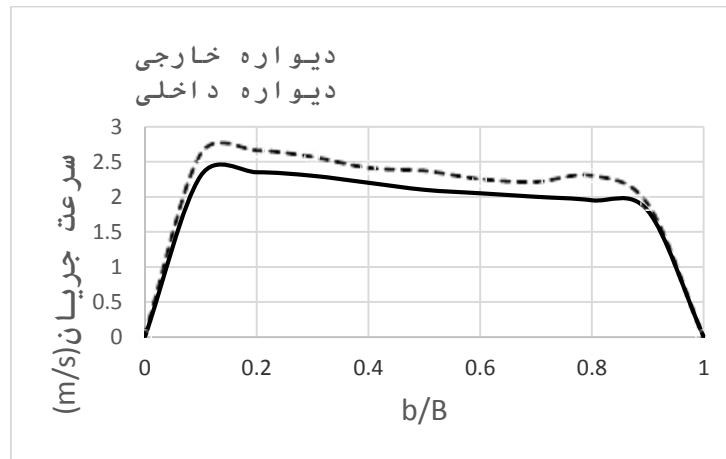
ب - مقطع عرضی ۹۰ درجه شکل

(۶) - مقایسه پروفیل‌های سرعت عمودی در مقاطع مختلف از قوس‌های همگرا و واگرا

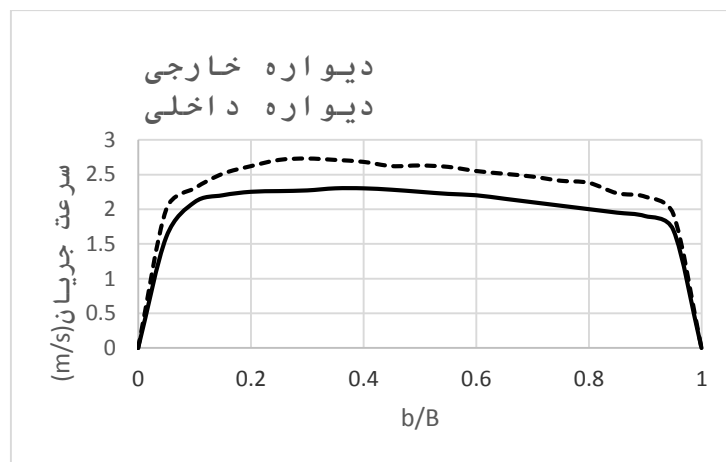
طولی در قوس داخلی بیشتر از مقدار آن در قوس خارجی می‌باشد و این مقدار کاهش از ابتدای قوس تا انتهای آن تغییر قابل توجهی ندارد. نتایج مذکور با نتایج حاصل از مطالعات قبادیان و محمدی (۲۰۱۱) که به مقایسه الگوی جریان در دو قوس یکنواخت و همگرا با زاویه ۱۸۰ درجه در یک مطالعه آزمایشگاهی پرداختند، مطابقت دارد. در این مطالعه مقادیر سرعت طولی در نقاط نظیر از هر دو قوس برای قوس همگرا همواره بیشتر از قوس واگرا محاسبه گردیده است. جدول ۲ نشان دهنده درصد اختلاف سرعت طولی در قوس همگرا و واگرا در صفحه ای نزدیک به سطح آب با مقادیر سرعت در قوس نسبتاً یکنواخت می‌باشد.

مقایسه پروفیل‌های سرعت در جهت طولی در قوس‌ها

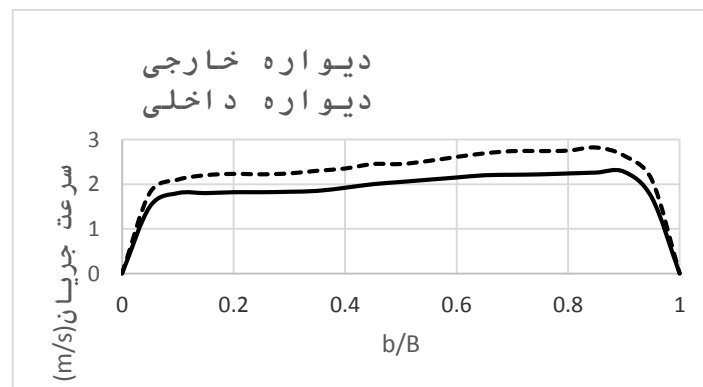
شکل ۷ تغییرات پروفیل سرعت در جهت طولی در صفحه ای نزدیک سطح آب در قوس‌های مختلف بازه انتخابی را نشان می‌دهد. با توجه به اشکال فوق در همه مقاطع عرضی مقدار سرعت در قوس واگرا با توجه به گسترش قوس و کاهش دبی واحد عرض کانال کمتر از قوس همگرا می‌باشد. این اختلاف با فاصله بیشتر از ابتدای قوس افزایش می‌یابد. همچنین پروفیل سرعت در جهت طولی تقریباً دارای اشکال یکسانی در هر دو نوع قوس رودخانه بوده که نشان می‌دهد حداکثر سرعت طولی در نزدیکی دیواره داخلی در ابتدای قوس اتفاق افتاده و پس از ورود به قوس، حداکثر سرعت به تدریج به سمت دیواره خارجی منتقل می‌گردد. به‌طور کلی در همه مقاطع عرضی مقدار کاهش سرعت در جهت



الف) مقطع عرضی ۱۰ درجه



ب) مقطع عرضی ۴۵ درجه



ج) مقطع عرضی ۹۰ درجه

شکل شماره ۷ - مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی در مقاطع مختلف از دو قوس همگرا (خطوط منقطع) و واگرا (خطوط پیوسته)

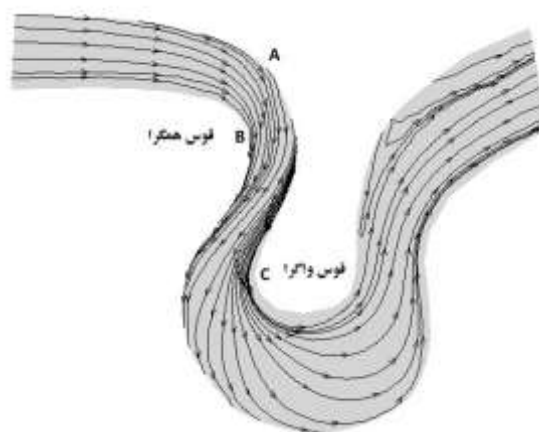
جدول (۲) - مقایسه درصد اختلاف سرعت‌های طولی در بین قوسها در صفحه ای نزدیک سطح آب

نوع قوس	قوس داخلی یا خارجی	۱۰ درجه	۴۵ درجه	۹۰ درجه
قوس واگرا	قوس داخلی	٪ ۱۱	٪ ۸	٪ ۱۵
	قوس خارجی	٪ ۸	٪ ۵	٪ ۱۱
قوس همگرا	قوس داخلی	٪ ۱۴	٪ ۱۱	٪ ۲۱
	قوس خارجی	٪ ۹	٪ ۶	٪ ۱۲

عرض کانال می‌باشد. الگوی خطوط جریان تا حدودی تحت تاثیر جریانات ثانویه در این نوع از قوس‌های رودخانه ای قرار گرفته و تقریباً مسیر منحنی آن را دنبال می‌کند. با توجه به مسیری که خطوط جریان در قوس همگرا نشان می‌دهند، چنانچه ذرات قابل حرکتی بر روی بستر قوس وجود داشته باشد، انتظار می‌رود این ذرات به سمت پایین دست دیواره داخلی شسته شوند. از بررسی بیشتر الگوی خطوط جریان و همچنین محل وقوع حداکثر خطوط مشاهده می‌گردد که در نزدیکی کناره داخلی از قوس واگرا، خطوط جریان دارای تراکم بیشتری بوده که البته در حالت تئوری انتظار می‌رود این تراکم در کناره خارجی اتفاق افتد. این مطلب می‌تواند ناشی از تاثیر توالی دو قوس همگرا و واگرا و نهایتاً اثر قوس همگرا بر روی الگوی جریان ورودی به قوس واگرا باشد.

مقایسه خطوط جریان در طول بازه

شکل ۸ مربوط به الگوی خطوط جریان در کل بازه مورد مطالعه بوده که نتایج پس از ایجاد توسط مدل SSIM به نرم افزار Tecplot منتقل و نسبت به ترسیم خطوط جریان اقدام گردیده است. همانطور که از الگوی خطوط جریان مشخص است، خطوط جریان در قوس همگرا پس از برخورد به دیواره خارجی در نقطه A به سمت قوس داخلی در نقطه B حرکت کرده در دو نقطه B و C دارای تراکم حداکثر بوده که این تراکم خطوط جریان به دلیل تنگ شدن کانال و افزایش مقدار دبی واحد عرض کانال می‌باشد. خطوط جریان پس از عبور از نقطه B و به سمت انتهای قوس واگرا از یکدیگر فاصله می‌گیرند که این نشان دهنده کاهش در مقدار دبی واحد



شکل (۸) - مقایسه خطوط جریان در بازه مورد مطالعه

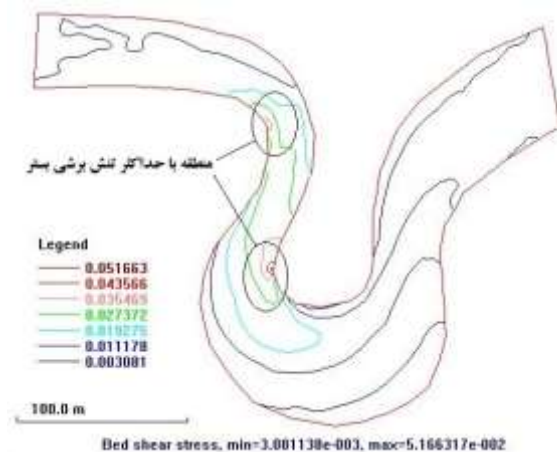
خلاف آنچه انتظار می‌رود دارای میزان بیشتری می‌باشد. دلیل این مطلب را می‌توان تداوم افزایش سرعت در حد فاصل زوایای ۴۵ درجه از قوس همگرا تا ۲۵ درجه از قوس واگرا و سپس تغییر ناگهانی مسیر کانال دانست. همچنین با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبل در خصوص حداکثر تراکم خطوط در قوس واگرا، توالی دو قوس همگرا و واگرا باعث ایجاد چنین منطقه ای با حداکثر تنش برشی بستر می‌شود.

نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف بررسی خصوصیات الگوی جریان در دو قوس همگرا و واگرا و همچنین اثر توالی این دو قوس در رودخانه‌های طبیعی به شبیه‌سازی سه بعدی جریان با حداکثر دبی مشخص در بازه انتخابی گردید. در ابتدا مدل عددی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل قوس نسبتاً یکنواخت کالیبره گردید. مقایسه مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در صفحه‌ای نزدیک به سطح آب نشان دهنده ماکزیمم مقادیر RMSE و MAPE برابر ۰/۰۸۱ و ۰/۰۷۵ به ترتیب بوده که نشان دهنده تطابق خوب بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده سرعت در محل قوس می‌باشد. همچنین خصوصیات و الگوهای جریان در دو قوس متوالی همگرا و واگرا مقایسه گردید. مقادیر سرعت طولی دارای مقادیر بیشتر به ترتیب در قوس‌های همگرا و واگرا می‌باشد. در کانال همگرا، حداکثر الگوی جریان در مقطعی از کانال نزدیک خط مرکزی در مقاطع عرضی ۴۰ تا ۶۰ درجه اتفاق افتاد که این موضوع برای قوس واگرا در مقطع عرضی ۲۵ درجه و متمایل به قوس داخلی اتفاق افتاد. در هر دو کانال همگرا و واگرا ناحیه ای با حداکثر تنش برشی در بستر مشاهده گردید که این حداکثر تنش برشی بستر در قوس واگرا دارای مقادیر بیشتری نسبت به قوس همگرا دارد که دلیل آن را می‌توان به تداوم افزایش سرعت جریان در بازه ای با مقطع تنگ در حدفاصل دو قوس دانست. الگوی خطوط جریان در قوس واگرا در انتهای قوس به دلیل کاهش مقدار دبی در واحد عرض کانال خطوط از هم فاصله می‌گیرند که عکس این حالت برای قوس همگرا اتفاق می‌افتد. با توجه به تراکم خطوط

مقایسه توزیع تنش برشی بستر

اگرچه مطالعه تغییرات بستر نیازمند آزمایشات و اندازه گیری‌های همزمان جریان سیال و ته نشینی و رسوبگذاری بستر و همچنین برهم کنش این دو می‌باشد، اما با این وجود پیش‌بینی فرسایش و الگوهای رسوبگذاری برای بسترهای تغییر پذیر (سیال) با در نظر گرفتن توزیع تنش برشی بستر امکان پذیر می‌باشد. همانند آنچه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، در هر دو حالت کانال همگرا و واگرا، منطقه ای با حداکثر تنش برشی مشاهده می‌گردد که به شکل دایره نشان داده شده اند. دلیل ایجاد چنین منطقه ای وجود یک گرادیان پر سرعت بوده که باعث انتقال یک هسته قوی و پرسرعت به سمت دیواره شده و در صفحه ای نزدیک به بستر گسترش می‌یابد.



شکل (۹) - توزیع تنش برشی بستر در طول بازه

همانطور که در شکل فوق دیده می‌شود، تنش برشی بستر در زاویه حدود ۴۵ درجه از ابتدای قوس همگرا به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس با مقداری متوسط ادامه داشته تا در زاویه ای حدود ۲۵ درجه از قوس واگرا مجدد به میزان حداکثر رسیده که پس از خروج از قوس دوباره تنش برشی بستر نزول می‌کند. اصلی ترین دلیل افزایش مقدار تنش برشی بستر در این بازه مربوط به تنگ شدگی مقطع رودخانه و همانطور که قبلاً نیز ذکر گردید، ایجاد یک گرادیان قوی و پرسرعت از جریان می‌باشد. همچنین میزان تنش برشی بستر پس از قوس واگرا کاملاً کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع نیز به علت کاهش سرعت در اثر بازشدگی کانال می‌باشد. مقادیر تنش برشی حداکثر بستر در قوس واگرا نسبت به قوس همگرا بر

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی به بررسی الگوی جریانات ثانویه در این ناحیه از قوس‌های رودخانه ای و یا حتی الامکان با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی اقدام و نتایج با الگوهای ناشی از جریان در قوس‌های منفرد مقایسه گردد.

جریان در نزدیکی کناره داخلی از قوس واگرا و همجنین ایجاد منطقه ای با حداکثر تنش برشی بستر در این ناحیه، توالی قوسهای همگرا و واگرا و در نتیجه ایجاد الگوی خاصی از جریانات ثانویه را می‌توان بعنوان مهمترین دلیل ایجاد چنین منطقه ای با الگوی خاص جریان دانست. لذا

منابع

- منتصری، ح و ح. آسیایی. ۱۳۹۳. ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی SSIIM2 در شبیه‌سازی میدان جریان در کانال قوسی U شکل با آبگیر جانبی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و یکم، شماره چهارم، ص ۲۹-۵۳.
- Abed, K. R., H. Hobi and A. J. Jihad. 2014. Numerical Modeling of Sediment Transport Upstream of AlGhammas Barrage. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(11): 469-477.
- Arvandi, S., A. Khosrojerdi, M. Rostami and H. Baser. 2013. Simulation of interaction of side weir overflows with bed-load transport and bed morphology in a channel (SSIIM2.0). *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 5(5): 255-261.
- Bradbrook, K.F., S.N. Lane, K.S. Richards, P. M. Biron and A. G. Roy. 2001. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences, *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 127(5): 351-368.
- Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics* New York: McGraw-Hill.
- Elsaeed, G. H. 2011. Validating SSIIM 3-D Numerical Model to Calculate Local Scour around Bridge Piers. *International Journal of Academic Research*, 3(3): 501-505.
- EsMAPEili, T., S. A. Kantoush, A. J. Schleiss, and S. Haun. 2014. Three-dimensional numerical modeling of flow field in rectangular shallow reservoirs. *Reservoir Sedimentation – Schleiss et al. (Eds)*. Pp. 11-19
- Ghobadian, R., and K. Mohammadi. 2011. Simulation of subcritical flow pattern in 180° uniform and convergent open-channel bends using SSIIM 3-D model. *International Journal of Water Science and Engineering*, 4(3): 270-283.
- Huang, S. L., Y. F. Jia, and S. Y. Wang. 2006. Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Channel Bends. *Journal of Hydrodynamics*, 18(4): 411-417.
- Lauder, B. E., and D. B. Spalding. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2): 269-289
- Leschziner, M. An and W. Rodi. 1979. Calculation of strongly curved open channel flow. *Journal of the Hydraulic Division*, 105(10): 1297-1314.
- Lien, H. C., J. C. Yang, K. C. Yeh and T. Y. Hsieh. 1999. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 125(10): 1097-1108.
- Mockmore, C. E. 1994. Flow around bends in stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1(109): 593-618.
- NajiAbhari, M., M. Ghodsian, M. Vaghefi and N. Panahpur. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3):292-298.
- Raeiszadeh, H., S. Boroomand-Nasab and H. Moazed. 2014. Numerical and Three-dimensional Modeling of Flow on Floodplains Covered with Vegetation by Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Options (SSIIM) Software, 6(9): 24-30
- Rozovskii, I. L. 1957. *Flow of Water in Bend of Open Channel*. Kiev: Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR.
- Ruther, N. 2006. *Computational Fluid Dynamics in Fluvial Sedimentation Engineering*, Year, Ph. D. Dissertation. Norwegian University of Science and Technology.
- Schlichting, H. 1979. *Boundary Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw-Hill.

Zhang, J., E. T. M. Andrés and Q. Zhang. 2014. Developments in computational fluid dynamics based modeling for disinfection technologies over the last two decades: A review. *Journal of Environmental Modelling & Software* 58: 71-85

Three-dimensional numerical investigation of flow pattern changes in two successive diverged and converged bends in a meandering reach of a natural river by SSIIM.2 model

Rohoallah. Karimian Kakolaki¹, Afshin. Honarbakhsh², Gholam. Reza. Shams Ghahfarokhi³, Ali. Reza. Davoudian Dehkurdi⁴ and Mehdi. Pajoohesh⁵

Abstract

Investigation of the flow pattern in meandering rivers is much more complicated than straight ones. Also, most rivers in the path of bends are not uniform due to channel width variations. is necessary. Therefore, the use of a robust numerical model for simulating flow pattern in rivers In this research, SSIIM three-dimensional numerical model was used to simulate the flow pattern in a meandering reach of the Doab river in Chaharmahal and Bakhtiari province. For this purpose, after doing field measurements and model calibration the velocity values calculated by the model by using RMSE were compared with the measured values in a relatively uniform section of bend error criteria. Results obtained showed that the values of these two criteria are 0.081 and MAPE and 0.075, respectively. This indicates that the model performance is good. Moreover, various flow characteristics including vertical and horizontal velocity profiles, the velocity lines in longitudinal and transverse directions and also the distribution of bed shear stress in location of two converged and diverged the bends are compared. The results of this study indicate that velocity values in longitudinal direction in converged bend is higher than diverged one. the high accuracy of the model in the study of flow pattern in the river bend. Furthermore, the density of the stream lines As result, it can .and the values of bed shear stress at the interval reach of two bends are maximum be said that flow pattern simulated well with the model

Key words: bed shear stress, Doab river, stream lines, meandering rivers.

¹Ph.D. student of Watershed Science and Engineering Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Email: karimian.roh@gmail.com

²Associate Professor of range and Watershed Management Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University and Corresponding Author, Email: afshin.honarbaksh@gmail.com

³Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahrekord University, Email: g.shams@eng.sku.ac.ir

⁴Full Professor, Department of Petrology, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Email: alireza.davoudian@gmail.com

⁵Assistant Professor, Department of range and Watershed Management Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Email: drpajoohesh@gmail.com