

شبیه سازی جریان و رسوب در پیچ و آبگیری از پیچ

معصومه رستم آبادی^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، امیررضا زراتی^۳

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر

Salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۱/۱۹]

چکیده - مطالعه طرح‌های ساماندهی یا مدیریتی در رودخانه‌ها نیازمند تحلیل جریان و رسوب در آن‌هاست. ماهیت سه بعدی جریان در پیچ رودخانه‌ها، تحلیل جریان و رسوب را در آنها مشکل می‌نماید. توسعه مدل‌های عددی سه بعدی و پیشرفت قدرت محاسبات رایانه‌ها، منجر به استفاده روزافزون از مدل‌سازی عددی در بررسی‌های هیدرودینامیکی جریان و رسوب شده‌است؛ اما اکنون هنوز صحت و دقت نتایج مدل‌های عددی در شرایط پیچیده جریان به ویژه در جریان همراه با رسوب مشخص نشده‌است. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب در پیچ و آبگیری از پیچ مدل عددی سه بعدی SSIIM2 مورد استفاده قرار گرفته و با مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی یا صحرایی، دقت مدل عددی در هر مورد بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل یاد شده در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و پیش‌بینی جریان ثانویه در قوس، هیدرودینامیک جریان در قوس به همراه آبگیر و آستانه و همچنین پیش‌بینی سطح آزاد در آبگیری از قوس از دقت قابل قبولی برخوردار است. خطای مدل در پیش‌بینی توپوگرافی بستر در آبگیری از قوس نسبتاً زیاد است، اما زمانی که هندسه‌های پیچانی و جریان ثانویه قوی در مورد مطالعاتی وجود نداشته باشد، می‌توان به نتایج تغییرات توپوگرافی پیش‌بینی شده مدل عددی SSIIM2 اطمینان نمود استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ و خطای موجود در معادلات انتقال رسوب از عوامل ایجاد خطای مدل عددی است.

واژگان کلیدی: قوس، آبگیر، آبستگي، SSIIM2

۱- مقدمه

میدانی و بیشتر عدم امکان آن، توجه بیشتر پژوهشگران را به سمت مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه‌سازی عددی معطوف نموده است. در مقایسه با مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌های عددی کم هزینه‌تر بوده و به راحتی امکان تغییر پارامترهای مختلف و بررسی تأثیر آن‌ها در نتایج وجود دارد. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه بیشتری به مطالعات عددی در مدل‌سازی جریان شده‌است [۱]. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات کيات و همکاران^۱، [۲]، کلیفورد و همکاران^۲، [۳]، مک ویلیام و همکاران^۳، [۴] و شن و دیپلاس^۴، [۵] اشاره نمود. در مدل‌های عددی سه بعدی، معادلات رینولدز حل می-

تحلیل جریان و رسوب در رودخانه‌ها به منظور مطالعه طرح‌های ساماندهی یا مدیریتی صورت می‌گیرد. جریان در رودخانه‌ها به ویژه رودخانه‌های قوسی دارای پیچیدگی‌های زیادی است. ماهیت کاملاً سه بعدی جریان در پیچ رودخانه‌ها به علت وجود جریان‌های ثانویه، هندسه دارای انحنا و تغییرات عمق آب در عرض و تغییرات تراز بستر، مطالعه و تحلیل را مشکل‌تر می‌نماید. اگر سازه‌های درون جریان مانند سازه‌های کنترل رسوب یا سازه‌های بیرون جریان مانند آبگیرها به پیچ رودخانه اضافه شود، مشکلات بررسی جریان و رسوب بیشتر می‌شود. پژوهشگران از مطالعات میدانی، مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه‌سازی عددی در بررسی جریان و رسوب در رودخانه‌ها استفاده می‌نمایند. هزینه بسیار زیاد مطالعات

1 Kiat et al
2 Clifford et al
3 MacWilliams et al
4 Shen and Diplas

مدل SSIM2 را برای شبه‌سازی تغییرات بستر و تغییر توزیع دانه بندی مصالح کف در خم 90° که بستر آن با مصالح غیریکنواخت پوشانده شده‌بود به کار بردند و نشان دادند نتایج مدل عددی هماهنگی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۱]. شکیبائی‌نیا و همکاران در شبه‌سازی جریان و تغییرات بستر در محل پل با دیواره هادی در یک فلوم مستقیم با استفاده از این مدل بیشینه عمق آبستنگی را با حدود ۱۸٪ خطا پیش‌بینی نمودند [۱۲]. شکیبائی‌نیا و همکاران این مدل را برای بررسی جریان ثانویه، توزیع سرعت، جدایی جریان و تغییرات سطح آزاد در اتصال دو آبراهه مستقیم با زوایای مختلف به کار بردند و بیشینه خطای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد را در اتصال 90° دو آبراهه حدود ۵٪ گزارش نمودند [۱۳]. شاملو و اثنی عشری [۱۴] به بررسی عددی الگوی جریان در آبگیری جانبی از کانال مستقیم با استفاده از SSIM2 پرداختند و ضمن اشاره به انطباق مناسب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای مختلف هندسی آبگیر و کانال اصلی و پارامترهای هیدرولیکی مانند عدد فرود و دبی آبگیری بر ابعاد ناحیه جدایی جریان در آبگیر را بررسی کردند. کرمی مقدم و همکاران [۱۵] به بررسی ابعاد صفحه تقسیم جریان ورودی به آبگیر جانبی در کانال مستقیم با مقطع دوزنقه‌ای پرداختند و اشاره نمودند SSIM2 ابعاد صفحه تقسیم جریان را با خطای ۱۲٪ نسبت به مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. سیدیان و شفاعی بجستان [۱۶] این مدل را برای تعیین ابعاد مجرای جریان و قدرت جریان گردابی در آبگیری جانبی از مسیر مستقیم به کار بردند و به دقت قابل قبول نتایج آن در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اشاره نمودند.

۲- روش حل

۲-۱- معادلات حاکم در مدل عددی

مدل عددی SSIM با حل معادلات سه بعدی رینولدز (معادله ۱) با روش حجم محدود و الگوی انفصال آپویند مرتبه دو با کوپل سرعت و فشار با روش سیمپل و به صورت ضمنی به حل میدان جریان می‌پردازد.

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

شوند که در آن‌ها جملات مربوط به آشفتگی با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی مدل می‌شوند. این مدل‌ها علاوه بر تقریب ترم-های لحظه‌ای با ترم‌های متوسط‌گیری شده، دارای ضرایب تجربی هم است. از طرفی در مدل‌هایی که بتوانند علاوه بر جریان، انتقال رسوب و تغییرات بستر را شبه‌سازی نمایند، فرضیه در نظر گرفته شده در معادلات انتقال رسوب نیز بر تقریب‌های مدل‌سازی عددی می‌افزاید. پس باید در مطالعات عددی، ضمن شناخت فرضیه موجود، صحت و دقت نتایج در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی یا برداشت‌های میدانی تأیید شده و پس از اطمینان از نتایج و دقت مورد قبول مدل عددی، از آن مدل استفاده نمود.

آبگیری از رودخانه‌ها، به ویژه رودخانه‌های قوسی از پدیده‌های مهم و پیچیده مهندسی رودخانه است. تعیین شرایطی از آبگیری که بیشترین آبگیری با کمترین مقدار رسوب وارد شده به آبگیر را به همراه داشته باشد، مستلزم مطالعه و بررسی الگوی جریان در قوس و نیز آبگیری از قوس است. ایزدپناه به مطالعه آبگیری از قوس با روش تزریق رسوب (براده آهن) روی بستر صلب کانال 90° پرداخت [۶]. صفرزاده به مطالعه عددی الگوی جریان در آبگیری از قوس 180° با بستر صلب پرداخت [۷]. پیرستانی [۸] و دهقانی [۹] مطالعاتی آزمایشگاهی در زمینه آبگیری از قوس 180° با بستر صلب و آبرفتی انجام دادند. ابوالقاسمی (۱۳۸۵) به مطالعه آزمایشگاهی آبگیری از مئاندر با زاویه مرکزی $94/5^\circ$ با روش تزریق رسوب روی بستر صلب پرداخت [۱۰]. مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مطالعه الگوی جریان در آبگیری از قوس با بستر آبرفتی به صورت عددی انجام نشده‌است. در این پژوهش به مطالعه عددی هیدرودینامیک جریان و رسوب در پیچ و آبگیری از پیچ پرداخته شده‌است. با توجه به الگوی پیچیده جریان در پیچ و وجود جریان‌های گردابی و اندرکنش آبگیر و پیچ، لازم است دقت مدل عددی در شبه‌سازی جریان‌های ثانویه و تغییرات توپوگرافی بستر مورد بررسی قرارگیرد. پس ابتدا الگوی جریان و سپس تغییرات توپوگرافی بستر شبه‌سازی شده و از داده‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی استفاده شده‌است. شبه‌سازی با مدل سه بعدی SSIM2 صورت گرفته‌است. فیشر و همکاران^۱

ای تنظیم می شود که عمق جریان محاسبه شده با مدل عددی در بالادست به مقدار آزمایشگاهی برسد

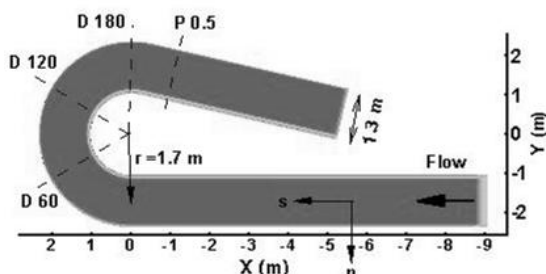
۳- به کارگیری مدل عددی

مدل عددی در دو بخش شبیه سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب در پیچ و سپس آبرگیری از پیچ مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه شرح هریک به تفصیل ارائه می شود.

۳-۱- الگوی جریان در پیچ با بستر صلب

به منظور بررسی نتایج مدل عددی در مدلسازی جریان در کانال قوسی، به شبیه سازی الگوی جریان در کانال قوسی و مقایسه نتایج آن با داده های آزمایشگاهی زنگ^۱ [۱۹] پرداخته شده است. مطابق شکل ۱ میدان حل مورد نظر عبارتست از قوس ۱۹۳° با شیب ۰/۲۲ در اتصال به دو کانال مستطیلی در بالادست و پایین دست قوس.

در جدول ۱ ویژگی های هندسی و هیدرولیکی این مدل آمده است. در مدل آزمایشگاهی کف کانال با ماسه به قطر متوسط ۲ mm زبر شده است. در مدل عددی نیز زبری مؤثر کف k_s سه برابر قطر متوسط مصالح در نظر گرفته شد.



شکل ۱ قوس ۱۹۳ درجه (مدل آزمایشگاهی زنگ [۱۹])

جدول ۱ ویژگی های مدل آزمایشگاهی [۱۹]

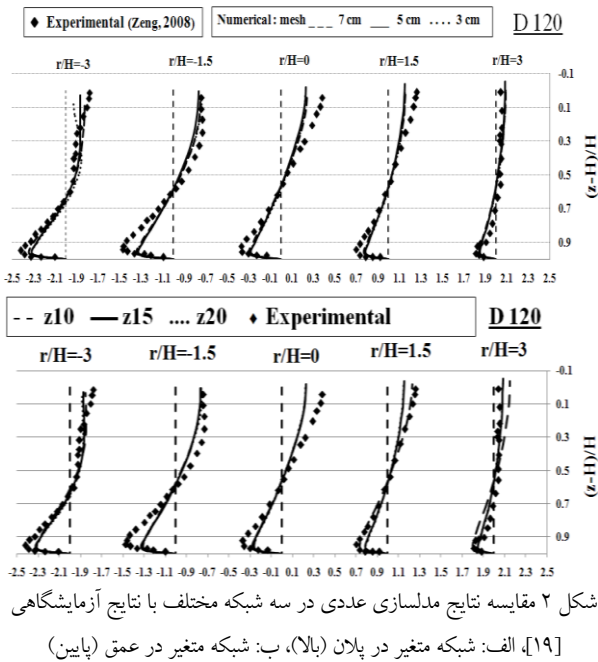
۱/۵۹	عمق جریان (m)
۸۹	دبی (lit/s)
۱/۳	عرض کانال (m)
۹	طول کانال بالادست (m)
۵	طول کانال پایین دست (m)
۱/۷	شعاع مرکزی قوس (m)
۱/۳۱	نسبت شعاع قوس به عرض کانال

جملات سمت چپ تساوی رابطه (۱) معرف تغییرات زمانی (t) و جابه جایی مولفه سرعت متوسط U_i ، و جملات سمت راست معرف تغییرات فشار (P) و تنش های رینولدز $\rho u_i u_j$ است. U_i و U_j نوسانات سرعت در جهت های مختلف است. مدل آشفتگی دو معادله ای k-ε در مدلسازی تنش های رینولدز به کار می رود. بدین منظور هریک از تنش های رینولدز با رابطه (۲) به مقادیر متوسط سرعت ها مرتبط می شوند [۱۸]:

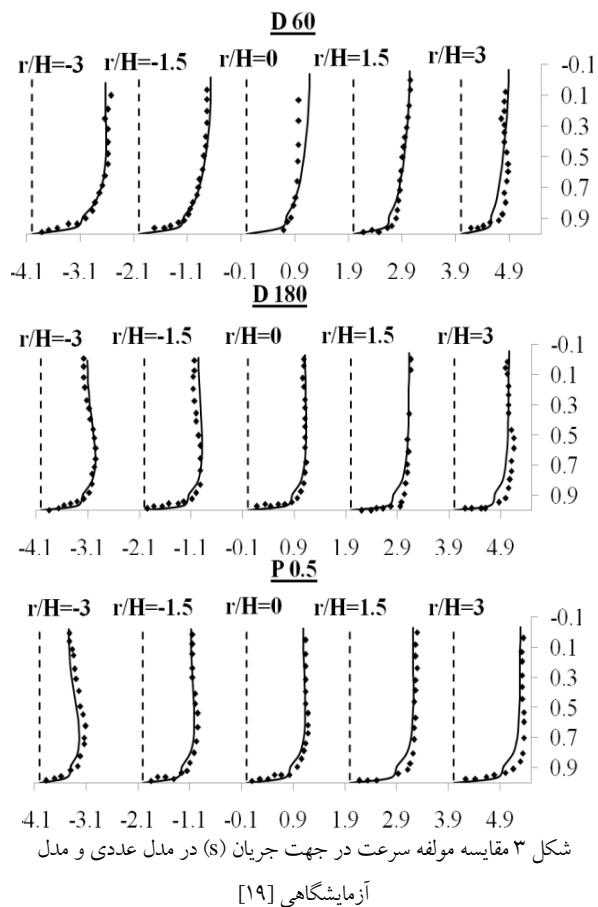
$$-\overline{u_i u_j} = c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2)$$

در این رابطه k: انرژی جنبشی آشفتگی، ε: استهلاك انرژی جنبشی و c_{μ} ضریبی که برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته می شود. برای بار معلق رسوب معادله انتقال غلظت و برای بار بستر روش فن راین [۱۷] یا روش های دیگر مانند انگولند-هانسن، انیشتین و ... استفاده می شود. به علت رعایت اختصار از ارائه سایر معادلات چشم پوشی شده است، علاقمندان به [۱۸] مراجعه نمایند. در تولید شبکه محاسباتی امکان استفاده از شبکه ساختار یافته به صورت تک بلوکی یا تقسیم میدان جریان به چندین بلوک و شبکه غیرساختار یافته فراهم است. در این پژوهش هندسه و شبکه کلیه مدل ها با استفاده از برنامه نویسی به زبان فترن تولید شده است. در ورودی میدان جریان از شرط مرزی دبی معلوم و در خروجی میدان جریان از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده می شود. چون گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره خیلی شدید است، فرض می شود پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره از رابطه تجربی ای که قانون دیواره نامیده می شود تبعیت کند. همچنین برای محاسبه سطح آزاد، عمق جریان در یکی از سلول های مقطع خروجی به عنوان شرط اولیه به مدل داده می شود و در سایر سلول های سطحی، با توجه به میدان سرعت و فشار به دست آمده از حل عددی، عمق جریان محاسبه می شود. در مواردی که آبرگیر به قوس اضافه شده است، عمق جریان در یکی از سلول های انتهایی شبکه آبرگیر نیز به عنوان شرط اولیه در نظر گرفته می شود. از آنجا که در جریان های زیربحرانی مقطع کنترل در پایین دست است، لازم است عمق جریان در پایین دست مشخص باشد. اگر عمق جریان در بالادست مشخص بود، با سعی و خطا عمق جریان در پایین دست به گونه-

مقطع دیگر است که نشان دهنده قدرت بیشتر جریان ثانویه در این مقاطع است.



شکل ۲ مقایسه نتایج مدل سازی عددی در سه شبکه مختلف با نتایج آزمایشگاهی [۱۹]. الف: شبکه متغیر در پلان (بالا)، ب: شبکه متغیر در عمق (پایین)



شکل ۳ مقایسه مولفه سرعت در جهت جریان (s) در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۹]

مدل در شبکه ای یکنواخت با سلول های مربعی در پلان به طول ۵cm اجرا شده است. تعداد گره ها در راستای طولی، عرضی و عمقی به ترتیب ۳۱۶، ۲۷ و ۱۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است این مدل با سه شبکه مختلف با اندازه سلول های ۳ cm، ۵ cm و ۷ cm اجرا شد و پس از اجرای مدل ها پروفیل های سرعت پیش بینی شده در مقاطع مختلف با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد. به عنوان نمونه در شکل ۲-الف مولفه های سرعت شعاعی در مقطع 0° در هر سه شبکه با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. مطابق این شکل در هر سه شبکه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی انطباق بسیار خوبی دارد (بیشترین خطای مدل عددی ۱۲/۳٪ بوده است) و نتایج شبکه ۳ و ۵ سانتی متری تقریباً بر هم منطبق است، پس از شبکه ۵ سانتی متری در مطالعات بعدی استفاده شده است. به منظور تعیین تعداد سلول های محاسباتی در راستای قائم، در شبکه ۵ سانتی متری در پلان، مدل به ازای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سلول محاسباتی در راستای قائم (در شکل ۲-ب با z_{10} و z_{15} و z_{20} نشان داده شده است) اجرا شد و نتایج این سه شبکه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و در شکل ۲-ب به عنوان نمونه در مقطع 0° نشان داده شده است. مطابق این شکل در هر سه شبکه، نتایج انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و نتایج z_{15} و z_{20} کاملاً هماهنگ است، بنابراین از شبکه دارای ۱۵ سلول محاسباتی برای تحلیل نتایج استفاده شد. برای رعایت اختصار از ارائه جزئیات تغییر شبکه بندی در موارد مختلف شبه سازی در بخش های بعدی خودداری شده و نتایج نهایی شبه سازی ارائه شده است. علاقمندان به [۲۰] مراجعه نمایند.

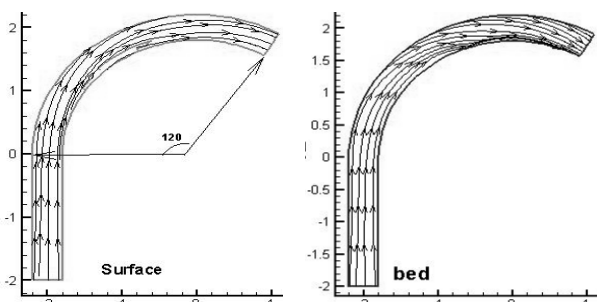
در مدل آزمایشگاهی مقادیر سرعت در راستای s و n در مقاطع D_{180} ، D_{60} و $P_{0.5}$ (درجه) که در شکل ۱ مشخص شده برداشت شده است. شکل های ۳ و ۴ مقایسه نمودارهای سرعت در جهت n (شعاعی) و جهت s (مماسی) در مقاطع یاد شده را در مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد. مطابق این شکل ها، روند سرعت ها در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی یکسان است (به جز در $r/H=3$ مقطع D_{60} در محاسبه v_n که به نظر می رسد داده های آزمایشگاهی همخوانی نداشته باشند، زیرا دارای روندی برخلاف روند سایر داده ها در r/H های دیگر آن مقطع هستند). انحنای پروفیل سرعت شعاعی در مقاطع 0° و 60° بیشتر از دو

مدل در شبکه‌ای یکنواخت با ۶۹، ۹ و ۷ سلول به ترتیب در راستای طولی، عرضی و عمقی اجرا شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی بلانکارت [۲۱]

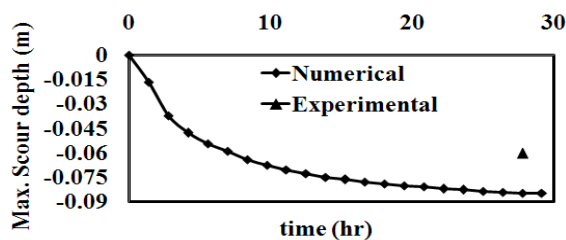
۰/۱۱۴	عمق جریان (m)
۱۷	دبی بالادست (lit/s)
۰/۴	عرض کانال (m)
۲	طول کانال بالادست (m)
۰/۷	طول کانال پایین دست (m)
۲	شعاع مرکزی پیچ (m)
۱۲۰	زاویه پیچ (درجه)
۵	نسبت شعاع قوس به عرض کانال
۲/۱	قطر متوسط مصالح (mm)

در شکل ۵ خطوط جریان حاصل از حل جریان در دو مقطع عمقی نزدیک کف و نزدیک سطح نشان داده شده است. انحراف خطوط جریان در سطح به سمت لبه خارجی و در کف به سمت لبه داخلی که از ویژگی‌های جریان در کانال‌های قوسی است کاملاً مشخص است.



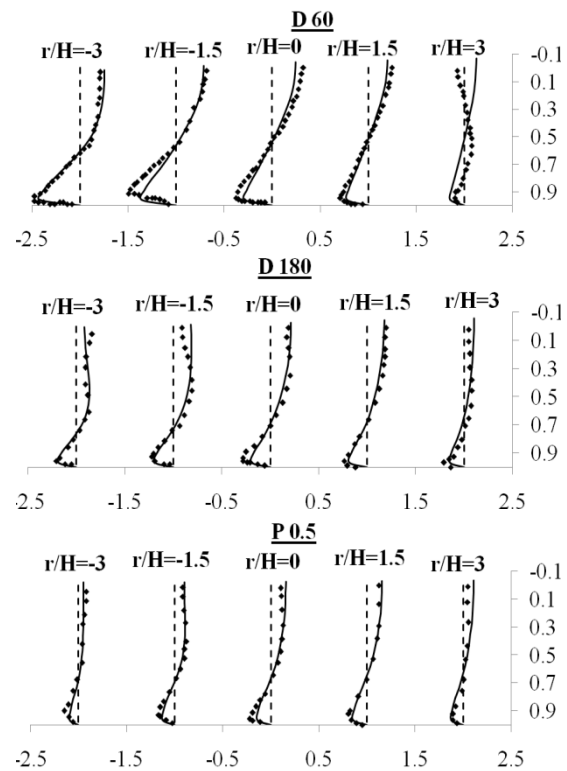
شکل ۵ خطوط جریان شبیه‌سازی شده در SSIM2 در قوس ۱۲۰°

در شکل ۶ نمودار تعادل تغییرات بیشینه عمق آبستگي در نیمه اول با زمان نشان داده شده است.



شکل ۶ نمودار تعادل تغییرات بیشینه عمق آبستگي در نیمه اول قوس

در مطالعات آزمایشگاهی دهقانی [۹] و مطالعات عددی صفرزاده [۷] نیز به قدرت بیشتر جریان ثانویه در نیمه اول قوس در حوالی زاویه ۶۰° و در نیمه دوم قوس در حوالی زاویه ۱۳۰° اشاره شده است. بنابراین مدل عددی در محل بیشترین قدرت جریان ثانویه دارای بیشترین خطاست که انحنای پروفیل سرعت را کمتر از مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است. از طرفی در مقطع P۰/۵ یعنی ۰/۵ متر پس از انتهای قوس که جریان‌های ثانویه مستهلک شده‌اند، کمترین خطا در محاسبه سرعت شعاعی مشاهده می‌شود. در محاسبه سرعت مماسی نیز بیشینه خطا در مقطع D۶۰ با مقدار ۰/۱۱/۴ رخ داده است.

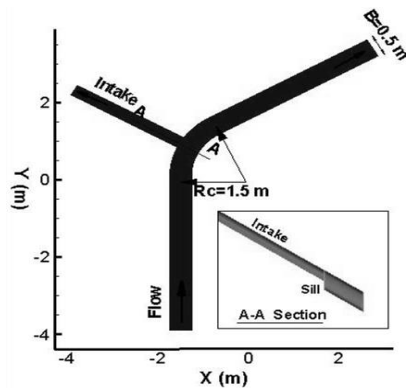


شکل ۴ مقایسه مولفه سرعت در جهت شعاع (n) در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی [۱۹]

۲-۳- مدل‌سازی الگوی جریان و آبستگي در پیچ

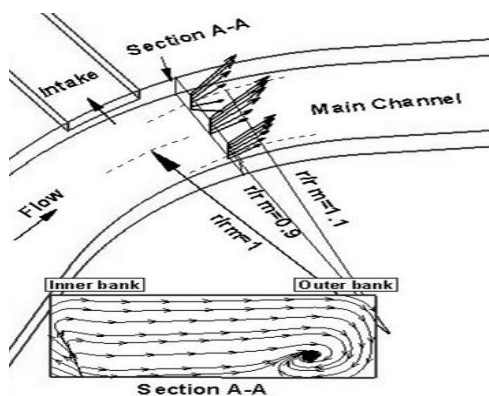
برای شبیه‌سازی الگوی جریان و آبستگي در کانال قوسی از نتایج آزمایشگاهی بلانکارت [۲۱] که شامل کانال قوسی ۱۲۰° با بستر آبرفتی در اتصال به دو کانال مستقیم در بالادست و پایین دست آن است استفاده شده است. در جدول ۲ ویژگی‌های هیدرولیکی و هندسی این مدل ارائه شده است.

عبارتست از، یک قوس 60° در اتصال به دو کانال مستطیلی در بالادست و پایین دست قوس با شیب کلی $0/0001$ و یک کانال آبگیر در موقعیت 30° در قوس که کف آن از کف کانال اصلی بالاتر است. کف کلیه کانالها صلب و ضریب زبری مانینگ $0/01$ گزارش شده است.



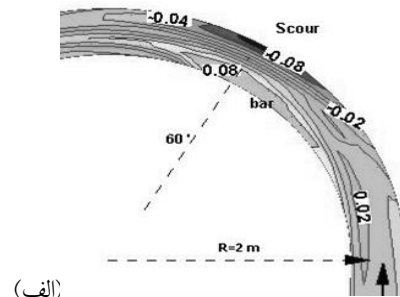
شکل ۸ قوس 60° درجه با آبگیر جانبی و آستانه ای و همکاران [۲۲]

در جدول ۳ ویژگی‌های این مدل نشان داده شده است. مدل در شبکه‌ای یکنواخت با سلول‌های مربعی در پلان به طول 3 cm اجرا شده است. تعداد گره‌ها در راستای طولی و عرضی 317 و 19 و در راستای قائم 15 ، 10 و 7 (برای انتخاب شبکه مناسب) در نظر گرفته شد. در این مدل پروفیل‌های قائم زاویه انحراف بردار سرعت کل از خط مماس بر شعاع در مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. شکل ۹ انحراف بردار سرعت را نسبت به خط مماس بر شعاع (خط چین) در مقطع پس از آبگیر در فواصل شعاعی مختلف نشان می‌دهد. زاویه انحراف منفی یعنی سرعت کل به سمت لبه داخلی قوس و زاویه انحراف مثبت یعنی سرعت کل به سمت لبه خارجی قوس منحرف شده است.

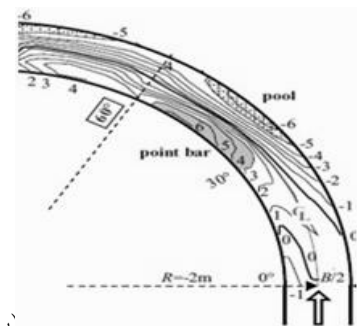


شکل ۹ طرح شماتیک زاویه انحراف بردار سرعت از خط مماس بر شعاع (خط چین) در r/rm های مختلف و خطوط جریان

مطابق این شکل پس از حدود 28 ساعت زمان جریان تغییرات بستر به تعادل رسیده است. تغییرات توپوگرافی بستر تعادل یافته مدل عددی در شکل ۷-الف و توپوگرافی بستر آزمایشگاهی در شکل ۷-ب نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

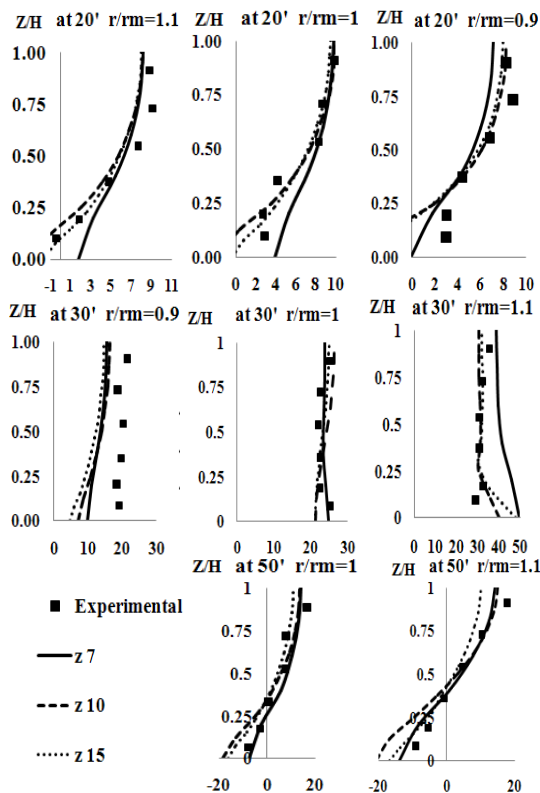
شکل ۷ مقایسه توپوگرافی بستر پیش بینی شده در مدل عددی (الف) با نتایج آزمایشگاهی بلانکارت [۲۱] (ب)

اعداد شکل ۷-الف تراز بستر را بر حسب متر و شکل ۷-ب تراز بستر را بر حسب سانتی‌متر نشان می‌دهند. مطابق این شکل دو حفره آبستگي یکی در نیمه اول قوس و دیگری در نیمه دوم و در رأس قوس شکل گرفته و پشته رسوبی نیز در لبه داخلی قوس و در نیمه اول تشکیل شده است. مطابق شکل ۷-ب محل بیشینه آبستگي و رسوبگذاری در نیمه اول قوس و در زاویه 55° است که در مدل عددی نیز به درستی پیش‌بینی شده است. بیشینه خطای مدل در پیش‌بینی عمق آبستگي در نیمه اول قوس 33% است که مدل عددی مقدار بیشتری برای عمق آبستگي پیش‌بینی کرده است.

۳-۳- الگوی جریان در آبگیری از پیچ با بستر صلب

به منظور بررسی نتایج مدل عددی در مدلسازی الگوی جریان در آبگیری از پیچ، به شبه‌سازی الگوی جریان در آبگیری از کانال قوسی و مقایسه نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی ای^۱ و همکاران [۲۲] پرداخته شده است. مطابق شکل ۸ میدان حل مورد نظر

شکل ۱۰ در خط مرکزی کانال یعنی $r/rm=1$ مدل عددی انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد، اما بیشترین خطای مدل عددی حدود ۴۰٪ در مقطع 30° در $r/rm=0.9$ که محل خط تقسیم جریان ورودی به آبگیر است و خطوط جریان دارای انحنای زیاد، رخ داده است، اما در سایر مقاطع خطای مدل عددی بسیار کم و حتی نتایج مدل عددی بر نتایج آزمایشگاهی هماهنگ است.



شکل ۱۰ مقایسه زاویه انحراف بردار سرعت از خط مماس بر شعاع در مقاطع مختلف قوس مدل عددی با نتایج ای و همکاران [۲۲] (محور افقی شکلها زاویه انحراف بردار سرعت است)

متوسط خطای مدل عددی در کلیه مقاطع نشان داده شده در شکل ۱۰ حدود ۲۱ درصد است. خطای بیشتر مدل عددی در پیش‌بینی الگوی جریان در آبگیری از پیچ در مقایسه با الگوی جریان در پیچ بدون آبگیر نشان دهنده پیچیده‌تر شدن الگوی جریان ناشی از اندرکنش آبگیر و پیچ و کاهش دقت مدل عددی است. استفاده از مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ می‌تواند از عوامل ایجاد خطای مدل عددی در پیش‌بینی جریان‌های ثانویه باشد. در مدل عددی SSIM2 برای اضافه نمودن آبگیر به کانال قوسی، باید از گزینه چند بلوکی استفاده شود. در حالت استفاده از گزینه چند بلوکی، در صورتی که سلول‌های محل اتصال بلوک‌های مجاور کاملاً بر هم

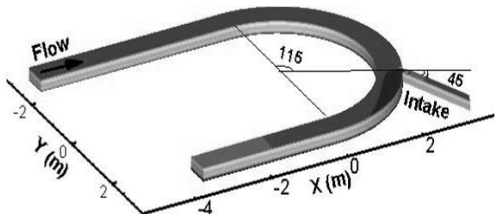
جدول ۳ ویژگی‌های مدل آزمایشگاهی ای و همکاران [۲۲]

عمق جریان (m)	۰/۰۵۵۵
دبی بالادست (lit/s)	۵/۳۸
دبی آبگیری (lit/s)	۲/۲۴
عرض (m)	۰/۵
طول کانال بالادست و پایین دست (m)	۴ و ۴/۷
شعاع مرکزی قوس (m)	۱/۵
نسبت شعاع به عرض	۳
طول آبگیر (m)	۲/۷
عرض آبگیر (m)	۰/۳
ارتفاع آبگیر از کف کانال (m)	۰/۰۲۵

مطابق این شکل در $r/rm=1/1$ فاصله شعاعی از مرکز قوس و rm شعاع مرکزی قوس)، در ترازهای نزدیک کف بردار سرعت به سمت راست خط مماس بر شعاع (یعنی زاویه انحراف منفی) و در ترازهای بالاتر به سمت چپ (زاویه انحراف مثبت) منحرف شده است. اما در 0.9 و $r/rm=1$ زاویه انحراف مثبت است. در پایین شکل ۹ خطوط جریان در مقطع عرضی پس از آبگیر نشان داده شده است. مطابق این شکل در نزدیکی دیوار خارجی قوس جریان گردابی شکل گرفته که منجر به انحراف بردار سرعت در سطح به سمت لبه خارجی و در کف به سمت لبه داخلی نسبت به خط مماس بر شعاع شده است.

شکل ۱۰ مقایسه پروفیل قائم زاویه انحراف بردار سرعت کل را در سه موقعیت $1/1$ ، 1 و $r/rm=0.9$ در مقاطع 20° ، 30° و 50° در هر سه شبکه محاسباتی نشان می‌دهد. محور افقی زاویه انحراف بردار سرعت از خط مماس بر شعاع و $z7$ ، $z10$ و $z15$ نتایج مربوط به مدل عددی به ترتیب با 0.7 ، 10 و 15 گره در راستای قائم است. مطابق این شکل به طور کلی روند نتایج عددی و آزمایشگاهی یکسان است، یعنی زوایای انحراف مثبت و منفی با همان روند مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی شده است. در مقاطع 20° و 50° درجه که از آبگیر فاصله دارد نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی به هم نزدیک‌تر است. نتایج مدل‌های $z10$ و $z15$ بسیار به هم نزدیک است و انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل دارای ۷ سلول محاسباتی در راستای قائم دارند. در کلیه مقاطع

قوس 180° در موقعیت 115° در قوس مورد استفاده قرار گرفته- است. در کف کانال اصلی تا ارتفاع ۳۰ سانتی متر رسوب با دانه بندی یکنواخت به قطر متوسط $1/28$ میلی متر ریخته شده است. در جدول ۴ ویژگی های هندسی و هیدرولیکی این مدل ارائه شده- است.

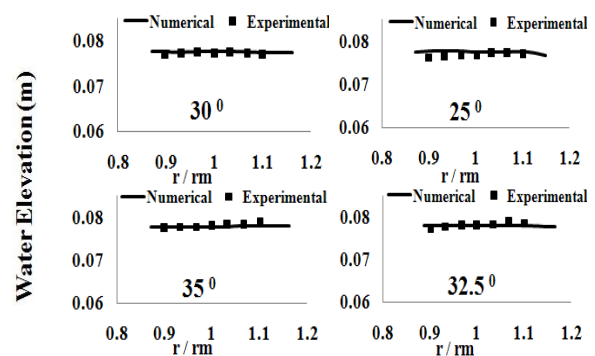


شکل ۱۲ طرح شماتیک مدل قوس 180° درجه با آبگیر

در شکل ۱۳-الف توپوگرافی بستر آزمایشگاهی [۹] نشان داده شده است. مطابق این شکل در دیواره داخلی قوس رسوبگذاری رخ داده و دو پشته رسوبی شکل گرفته است؛ یکی در نیمه اول در حوالی زاویه 50° و دیگری در نیمه دوم قوس در محدوده آبگیر که پس از آبگیر نیز ادامه دارد. در دیواره خارجی قوس نیز آبستنگی رخ داده که بیشترین مقدار آن در نیمه اول قوس و در محدوده زاویه 60° است و به تدریج از عمق آبستنگی کم شده تا اینکه در لبه پایین دست آبگیر به کمترین مقدار خود رسیده است. پس از آبگیر با توسعه مجدد جریان ثانویه آبستنگی رخ داده و حفره عمیق دیگری در حوالی زاویه 150° تشکیل شده است. مدل عددی نیز در لبه داخلی قوس رسوبگذاری و در لبه خارجی آبستنگی رخ داده است (شکل ۱۳-ب). محل بیشینه عمق آبستنگی در نیمه اول قوس به خوبی پیش بینی شده اما این حفره آبستنگی تا راس قوس نیز ادامه داشته برخلاف مدل آزمایشگاهی که در راس قوس آبستنگی کم شده است. مدل عددی عمق آبستنگی را در لبه آبگیر و در رأس قوس حدود

هماهنگ باشند، خطایی در محاسبات چند بلوکی بوجود نمی آید. در مورد مطالعاتی حاضر، در راستای شعاعی و مماس بر قوس، سلول های بلوک قوس و بلوک آبگیر کاملاً هم راستا است، اما به علت وجود آستانه برای آبگیر، سلول های این دو بلوک در راستای قائم هم امتداد نبوده که می تواند یکی دیگر از عوامل خطای مدل عددی باشد.

در این مطالعه داده های آزمایشگاهی تراز سطح آزاد در مقاطع 25° ، 30° ، 32.5° و 35° به ازای دبی آبگیری 0.74 و دبی بالادست 0.0794 متر مکعب بر ثانیه و عمق جریان 0.0738 نیز برداشت شده است. به منظور مقایسه سطح آزاد، این مدل به ازای شرایط هیدرولیکی یاد شده نیز شبیه سازی شده و تغییرات سطح آزاد در مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل ۱۱ مقایسه شده است.



شکل ۱۱ مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی ای و همکاران [۲۲] در تراز سطح آزاد در مقاطع مختلف قوس

مطابق این شکل هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در شبیه سازی سطح آزاد دیده می شود و بیشینه خطای مدل عددی در پیش بینی سطح آزاد حدود 4% بوده است

۳-۴- الگوی جریان و آبستنگی در آبگیری از پیچ

به منظور شبیه سازی الگوی جریان و آبستنگی در آبگیری از پیچ (شکل ۱۲)، مدل آزمایشگاهی دهقانی [۹] با آبگیری جانبی از

جدول ۴ ویژگی های هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی دهقانی [۹]

ارتفاع آستانه (m)	زاویه آبگیری	موقعیت آبگیر	طول آبگیر	عرض آبگیر (m)	شیب هر (درصد)	به عرض	زاویه قوس	شعاع مرکزی (درجه)	قوس (m)	پایین دست	طول کانال (m)	بالادست (m)	عرض کانال (m)	قطر متوسط (mm)	مصالح (mm)	دبی آبگیری (lit/s)	بالادست	عمق	جریان (m)
۰/۰۳	45°	115°	۲/۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۴/۳۳	180°	۲/۶	۳/۵	۷	۰/۶	۱/۲۸	۰/۵۷۵	۹	۳۸/۳	۰	۰	۰	

برای شبیه‌سازی آبراهه‌ها باید از گزینه چندبلوکی استفاده شود؛ که در قسمت بعد به آن پرداخته شده است.

۳-۵- تغییرات بستر در اتصال دو آبراهه مستقیم

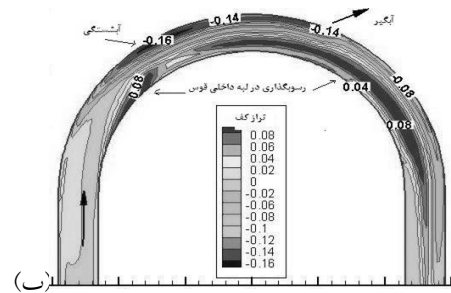
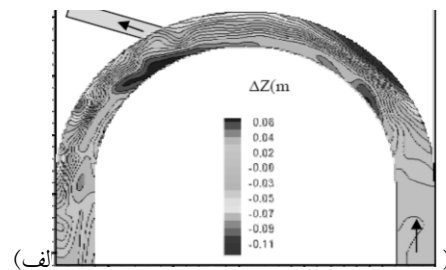
شکل ۱۴ قسمتی از اتصال دو رودخانه کاسکاسکیا^۱ و کوپر^۲ را نشان می‌دهد. اطلاعات هیدرولیکی و هندسی این مدل در جدول ۵ آمده است. در این مدل به ازای جریان دائمی در آبراهه‌ها تغییرات بستر پیش‌بینی شده در مدل عددی با نتایج صحرایی رودس^۳ [۲۳] مقایسه شده است. در این پژوهش به منظور تأمین شرایط یکنواخت برای جریان نزدیک شونده به محل اتصال دو رودخانه، طول ۲۰ متر برای بالادست محل اتصال دو رودخانه در نظر گرفته شده است. کف دو آبراهه در یک ترازند و سلول‌های محاسباتی محل اتصال دو بلوک همراستا شده‌اند. در شکل ۱۵ تغییرات توپوگرافی بستر حاصل از مدلسازی عددی نشان داده شده است. مانند این شکل در محل اتصال دو رودخانه حفره آبستگاری رخ داده و به سمت پایین دست پیشروی نموده است. همچنین در پایین دست محل اتصال، وجه سمت چپ رودخانه کاسکاسکیا با رسوب پر شده است. این الگو در شکل ۱۴ که در آن برداشت‌های میدانی نشان داده شده مشاهده می‌شود.

به منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با داده‌های میدانی، در مقطع $y=3\text{ m}$ تراز بستر در دو مدل عددی و آزمایشگاهی باهم مقایسه شده و در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل بیشینه خطای ۳۳٪ در محاسبه عمق آبستگاری رخ داده، اما الگوی رسوبگذاری و آبستگاری در مدل عددی مانند داده‌های صحرایی است

جدول ۵ ویژگی‌های اتصال دو رودخانه کاسکاسکیا و کوپر [۲۳]

رودخانه	کاسکاسکیا	کوپر
عمق (متر)	۰/۸	۰/۷
عرض (متر)	۷/۳	۸
طول (متر)	۱۰۰	۳۰
قطر متوسط مصالح کف (متر)	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۴۷۶
دبی (متر مکعب بر ثانیه)	۳/۸۵	۲/۶۳

۱۳۰٪ بیشتر از مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است، اما خطای مدل عددی در پیش‌بینی عمق آبستگاری در نیمه اول قوس حدود ۴۵٪ است. در هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی بیشینه ارتفاع پشته رسوبی در لبه داخلی قوس و نیمه اول ۸ سانتی متر است، اما در نیمه دوم مدل عددی پشته رسوبی را در محدوده وسیعی از لبه داخلی و با ارتفاع کمتر از مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی نموده است. ملاحظه می‌شود خطای مدل عددی در پیش‌بینی عمق آبستگاری در نیمه اول قوس تقریباً مانند قوس بدون آبگیر است، اما در نزدیک آبگیر که اندرکنش آبگیر و قوس و انحراف خطوط جریان به سمت آبگیر وجود دارد خطای مدل عددی زیاد شده است.



شکل ۱۳ مقایسه پروفیل بستر مدل آزمایشگاهی (الف) [۹] با مدل عددی (ب)

این مدل با تغییر شبکه، زبری کف و تغییر مدل‌های انتقال رسوب به کرات اجرا شد، اما بهترین نتایج، نتایج ارائه شده در این قسمت است. استفاده از مدل آشفستگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ و خطای موجود در معادلات انتقال رسوب می‌تواند از عوامل اصلی ایجاد خطای مدل عددی باشد. در مورد مطالعاتی حاضر نیز به علت وجود آستانه در ورودی آبگیر، سلول‌های عمقی بلوک‌های محاسباتی قوس و آبگیر در یک راستا قرار نگرفته‌اند. این عامل نیز می‌تواند در خطای مدل عددی بی‌تأثیر نباشد. برای روش‌تر شدن عامل اصلی خطا، به شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در اتصال دو آبراهه مستقیم پرداخته شده که در آن جریان ثانویه در قوس وجود ندارد و شکل جریان‌های ثانویه متفاوت است، اما هندسه جریان پیچیده است و

1 Kaskaskia
2 Copper
3 Rhodads

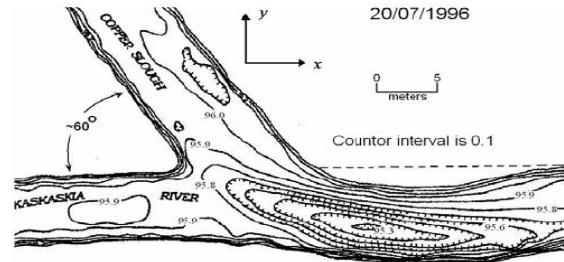
شبه سازی نشان می دهد مدل یاد شده در شبه سازی هیدرودینامیک جریان و پیش بینی جریان ثانویه در قوس، هیدرودینامیک جریان در قوس به همراه آبگیر و آستانه و همچنین پیش بینی سطح آزاد در آبگیری از قوس از دقت قابل قبولی برخوردار است. بیشترین خطا در محل اتصال آبگیر به قوس که در آن جریان حلزونی در قوس و جریان ثانویه مقابل آبگیر باهم تداخل دارند رخ داده است. در پیش بینی تغییرات بستر در کانال قوسی خطای نتایج مدل عددی حدود ۰.۳۳٪ بوده است، اما وقتی به قوس آبگیر هم اضافه می شود خطای مدل در پیش بینی توپوگرافی بستر بسیار افزایش می یابد. استفاده از مدل آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ خطای موجود در معادلات انتقال رسوب در کاربرد در هندسه های پیچانی در مدل عددی مورد استفاده و نیز عدم انطباق سلول های محاسباتی محل اتصال دو بلوک مجاور در حالت استفاده از گزینه چند بلوکی برای مدل سازی آبگیر متصل به قوس، از عوامل ایجاد خطا است. اما تغییرات بستر پیش بینی شده در اتصال دو آبراهه مستقیم به جز در نزدیکی محل اتصال، انطباق خوبی با داده های میدانی برداشت شده دارد، پس زمانی که هندسه پیچانی و جریان ثانویه قوی وجود نداشته باشد می توان به مدل سازی آبستگی با نرم افزار SSIIM2 با اطمینان پرداخت، همان گونه که جریان و تغییرات توپوگرافی بستر با این نرم افزار به وسیله ی پژوهشگران مختلفی در آبگیری از مسیر مستقیم مدل سازی شده است.

۵- سپاسگزاری

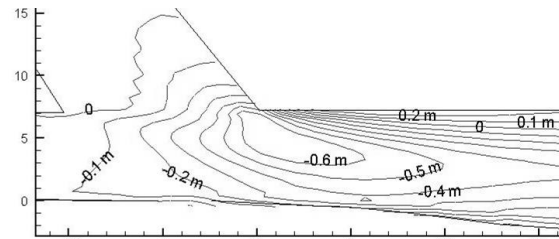
بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دفتر پژوهش های کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران به خاطر حمایت مالی پژوهش حاضر تحت قرارداد شماره RIV5-۸۹۰۶۹ با کد ۱۳۹۱/۰۶/۱۶ مورخ ۹۱/۵۳.پ/۱۰۷۹۲۹ اعلام می دارند.

۶- مراجع

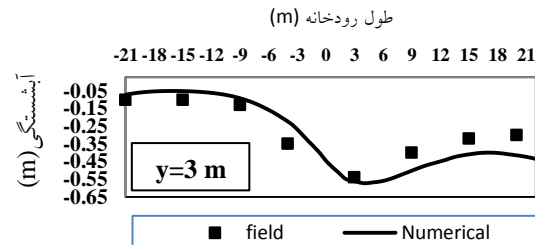
- [1] Sotiropoulos, F; and Diplas, P; "Special issue on river flow hydrodynamics: physical and ecological aspects"; Journal of hydraulic engineering, 136(12), 2010, 965-966.
 [2] Kiat, C, C; Ghani, A, A, Abdollah, R; Zakaria, N, A; "Sediment transport modeling for Kulim river- A case study". Journal of Hydro-environment Research, 2, 2008, 47-59.



شکل ۱۴ تغییرات بستر در اتصال دو رودخانه کاسکاسکیا و کوپر [۲۳]



شکل ۱۵ تغییرات توپوگرافی بستر شبه سازی شده با مدل عددی برای اتصال دو رودخانه کاسکاسکیا و کوپر



شکل ۱۶ مقایسه عمق آبستگی مدل عددی و اندازه گیری صحرایی [۲۳] در اتصال دو رودخانه کاسکاسکیا و کوپر

با دقت در توپوگرافی پیش بینی شده در مدل عددی ملاحظه می شود محل تشکیل حفره آبستگی در مدل عددی نسبت به داده های میدانی به محل اتصال دو رودخانه نزدیکتر است، اما بیشینه عمق آبستگی مانند داده های میدانی حدود ۶۰ سانتی متر پیش بینی شده است. بنابراین استفاده از گزینه چند بلوکی در مورد مطالعاتی حاضر، عامل ایجاد خطا نیست بلکه مدل آشفتگی و خطای موجود در معادلات انتقال رسوب عامل اصلی ایجاد خطاست. لازم به گفتن است الگوی جریان و انتقال بار معلق در آبگیری از قوس نیز شبه سازی شده است. علاقمندان برای مطالعه بیشتر می توانند به [۲۰] مراجعه نمایند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش مدل سه بعدی SSIIM2 در شبه سازی هیدرودینامیک جریان و آبستگی در هندسه های قوسی و آبگیری از قوس مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از

- [13] Shakibainia, A; Tabatabai, M.R.M; and Zarrati, A. R. "Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences"; Canadian Journal of Civil Engineering, 37(5), 2010, 772-781.
- [۱۴] شاملو، ح؛ اثنی عشیری، ع؛ "بررسی عددی هیدرولیک آبیگرهای جانبی رودخانه‌ای با استفاده از مدل عددی SSIIM2"؛ یادداشت تحقیقاتی، نشریه علمی-پژوهشی هیدرولیک، ۶(۳)، ۱۳۹۰، ۷۳-۸۱.
- [۱۵] کرمی مقدم، م؛ شفاعی بجستان، م؛ صدقی، ح. "مطالعه آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در آبیگر ۳۰ درجه منشعب از کانال دوزنقه‌ای؛ فصلنامه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۵۷(۳)، ۱۳۹۰، ۳۵-۴۷.
- [۱۶] سیدیان، س. م؛ شفاعی بجستان، م؛ "تعیین ابعاد مجرای جریان و قدرت گرداب حلزونی در محل آبیگرهای جانبی". مجله آب و فاضلاب، شماره ۴، ۱۳۹۰، ۸۳-۹۴.
- [17] van Rijn, L; Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua publications. 1993.
- [18] Olsen, N. R; A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multi block option; User's manual, 2011.
- [19] Zeng, J; Constantinescu, G; Blanckaert, K; Weber, L;"Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions"; Water Resources Research, Vol. 44, 2008, W09401.
- [۲۰] رستم‌آبادی، م؛ تعیین شرایط مناسب آبیگری از قوس با استفاده از مدل عددی؛ رساله دکتری مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۲.
- [21] Blanckaert, K; Flow and turbulence in sharp open-channel bends. Ph. D thesis. 2002. Cambridge University.
- [22] Ye, J; Mccorquodale; Barron, R. M; "A three-dimensional hydrodynamic model in curvilinear coordinates with collocated grid". International Journal for Numerical Methods in Fluid, 28: 1998, 1109-1998.
- [23] Rhoads, B. L; "Mean structure of transport-effective flow at an asymmetrical confluence when the main stream is dominant". In: Ashworth, P. J; Bennett, S.J; Best, J.L; McLelland, S. J Eds; Coherent flow structures in open channels. Wiley, ChiChester, 1996, 491-518, Chap. 24.
- [3] Clifford, N. J; Wright, N. G; Harvey, G; Gurnell, A. M; Harmar, O. P; And Soar, P. J; "Numerical Modeling of River Flow for Ecohydraulic Applications: Some Experiences with Velocity Characterization in Field and Simulated Data". Journal of Hydraulic Engineering, 136(12), 2010, 1033-1041.
- [4] MacWilliams, M; Tompkins, M; Street, R; Kondolf, G; and Kitanidis, P;"Assessment of the Effectiveness of a Constructed Compound Channel River Restoration Project on an Incised Stream"; J. Hydraul. Eng. 136, Special Issue on River Flow Hydrodynamics: Physical and Ecological Aspects, 2010, 1042-1052.
- [5] Shen, Y; and Diplas, P;"Modeling Unsteady Flow Characteristics of Hydro peaking Operations and Their Implications on Fish Habitat." J. Hydraul. Eng. 136, Special Issue on River Flow Hydrodynamics: Physical and Ecological Aspects, 2010, 1053-1066.
- [۶] ایزد پناه، ز و صالحی نیشابوری، ع.؛ "بررسی و انتقال رسوب در آبیگرهای جانبی در پیچ رودخانه". مجله علمی کشاورزی، جلد ۳۶، شماره ۲، ۱۳۸۲، ۱۵-۲۳.
- [۷] صفرزاده، ا؛ شبیه سازی عددی الگوی جریان در آبیگری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.
- [۸] پیرستانی، م؛ بررسی الگوی جریان و آبستگي در دهانه ورودی آبیگر کانالهای دارای انحناء؛ رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۸۳.
- [۹] دهقانی، ا. ا؛ مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب ورودی به آبیگر جانبی در قوس ۱۸۰ درجه. رساله دکتری مهندسی عمران گرایش هیدرولیک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [۱۰] ابولقاسمی، م؛ مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب ورودی به آبیگر جانبی در پیچانرود؛ رساله دکتری، گروه سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [11] Fischer-Antze, T; Ruther, N; Olsen, N. R; and Gutknecht, D; "Three-dimensional (3D) modeling of non-uniform sediment transport in a channel bend with unsteady flow. Journal of Hydraulic Research. 47(5), 2009, 670-675.
- [۱۲] شکیبائی نیا، ا؛ زراتی، ا؛ و مجدزاده طباطبایی، م؛ "کاربرد مدل سازی عددی در شبیه سازی پدیده های پیچیده مهندسی رودخانه". نشریه دانشکده فنی، ۴(۴)، ۱۳۸۷، ۴۴۳-۴۵۵.