

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی عددی اثر نسبت شعاع انحنا به عرض بر الگوی جریان در قوس 90 درجه

سمیه الیاسی¹، افشین اقبالزاده^{2*}، محمد واقفی³، میترا جوان²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران- آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

3- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

*کرمانشاه، کد پستی 67346-67149

eghbalzadeh@gmail.com

چکیده- الگوی جریان در رودخانه‌ها پس از ورود به قوس به شکل مارپیچی بوده و دارای ماهیت کاملاً سه-بعدی و توأم با آشفتگی زیاد است. با توجه به اهمیت بالای بررسی چنین جریانی، در تحقیق حاضر ابتدا الگوی جریان در یک کانال دارای قوس 90 درجه با بستر صلب که نسبت شعاع به عرض آن برابر 4 است، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی سطح آزاد و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG برای بستن معادلات ناویر استوکس استفاده شده است. نتایج بدست آمده تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. سپس در ادامه، به منظور بررسی نسبت شعاع به عرض بر الگوی جریان، از کانالهایی با نسبت های شعاع به عرض 2، 3، 4 و 5 استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده در خصوص سرعت طولی جریان، در ابتدای قوس بطور کلی برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض، سرعت بیشینه در نزدیکی جداره داخلی رخ می‌دهد. به سمت انتهای قوس، برای حالت نسبت شعاع به عرض برابر 2 (تندترین قوس)، سرعت بیشینه در مقطع همچنان در نواحی نزدیک جداره داخلی اتفاق افتاده، اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض محل وقوع سرعت بیشینه به نواحی نزدیک جداره خارجی منتقل می‌شود. در خصوص سطح آزاد با کاهش نسبت شعاع به عرض (تندتر شدن قوس) شیب جانبی افزایش می‌یابد.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عددی، الگوی جریان، قوس 90 درجه، FLOW-3D.

1- مقدمه

رودخانه‌ها اغلب توأم با پیچانورد و مسیرهای منحنی است. درک هیدرولیک جریان در خم رودخانه، مطالعه جریان‌های ثانویه، سرعت‌های طولی و عرضی، قدرت جریان‌های ثانویه، آشفتگی جریان و پیچیدگی آن مورد

با توجه به نقش حیاتی رودخانه‌ها در زندگی بشر، مطالعه رفتار آن‌ها ضروری است. در طبیعت مسیر

1. Renormalized Group $k-\epsilon$ Model (RNG)

واقفی و همکاران (1388) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در قوس 90 درجه پرداختند. آنها همچنین مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای در خصوص الگوی جریان و آبستگی در حالت وجود آبشکن در قوس 90 درجه انجام دادند.

بر اساس اطلاعات بدست آمده، تاکنون هیچ تحقیقی بر اساس شبیه‌سازی عددی در خصوص اثر نسبت شعاع به عرض بر الگوی جریان در قوس 90 درجه انجام نشده است. بنابراین در تحقیق حاضر با شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در قوس 90 درجه با استفاده از نرم-افزار FLOW-3D، اثر نسبت‌های مختلف شعاع به عرض بر الگوی جریان مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

2- مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر نسبت شعاع انحنا به عرض کانال قوسی 90 درجه بر الگوی جریان با استفاده از مدل عددی پرداخته شده است و برای صحت‌سنجی نتایج عددی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط واقفی (1387) در یک کانال قوسی شکل با زاویه 90 درجه واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. ارتفاع کانال 70 سانتی‌متر و عرض آن 60 سانتی‌متر است. این کانال متشکل از یک مسیر مستقیم به طول 7/1 متر در بالادست و یک مسیر مستقیم در پایین‌دست به طول 5/2 متر است که این دو مسیر مستقیم توسط یک قوس 90 درجه با شعاع انحنا داخلی 2/1 متر و شعاع انحنا خارجی 2/7 متر به هم متصل شده‌اند. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر 4 می‌باشد ($R/B=4$). شیب کف 0/001 بوده و کف این کانال از رسوبات فریز شده با قطر متوسط معادل 1/28 میلی‌متر پوشیده شده است. دبی ورودی جریان 25 لیتر بر ثانیه است. شکل 1 نمای کانال و ابعاد هندسه آن را نشان می‌دهد. در شکل 2 نقاط برداشت داده‌های

توجه بسیاری از محققان هیدرولیک بوده است، بطوری که کارهای آزمایشگاهی و عددی فراوانی برای درک این پدیده‌ها انجام پذیرفته است. برای اولین بار الگوی جریان در قوس توسط شکری در سال 1950 و با استفاده از یک مدل فیزیکی بررسی شد. رودی در سال 1978 از بررسی‌های خود در یک قوس تند چنین نتیجه گرفت که محل وقوع حداکثر سرعت با نزدیک شدن به خروجی قوس به سمت جداره خارجی متمایل می‌شود. لین و همکاران در سال 1999 با استفاده از یک مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان در دو قوس 90 و 180 درجه را بررسی کردند و چنین نتیجه‌گیری کردند که اندازه مؤلفه اصلی سرعت در نزدیکی دیواره خارجی در طول کانال افزایش می‌یابد و به خاطر خاصیت انتقال جانبی مومنت طولی توسط جریان ثانویه، اندازه سرعت در طول دیوار خارجی بیشتر از دیواره داخلی است. بویج در سال 2002 به مدل‌سازی ساختار جریان در قوس 180 درجه بسیار ملایم ($R_c/B = 8.2$) با بستر صلب با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ و مقایسه نتایج حاصل از این مدل‌سازی با نتایج حاصل از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بر روی همین قوس پرداخت و چنین نتیجه‌گیری کرد که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در مدل‌سازی سلول چرخشی خلاف جهت جریان ثانویه اصلی در نزدیک جدار خارجی کارایی لازم را ندارد. در سال 2004 بلانکارت و گراف بر روی یک کانال خمیده با بستر متحرک الگوی جریان و توپوگرافی بستر را مورد بررسی قرار دادند. آنها با بررسی بردارهای عرضی سرعت به این نتیجه رسیدند که در مقطع رأس قوس، دو چرخش در خلاف جهت یکدیگر به وضوح دیده می‌شود که در مرز بین این دو جریان چرخشی حداکثر سرعت رخ می‌دهد. ناجی ابهری و همکاران در سال 2010 به مطالعه آزمایشگاهی و عددی توزیع سرعت در قوس 90 درجه پرداختند و برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار SSIIM استفاده کردند.

رفته است. سطح آزاد با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی شده است. در مرز خروجی با توجه به معلوم بودن ارتفاع سیال شرط مرزی فشار مشخص در نظر گرفته شده است. در این شرط مرزی، در مرز خروجی فشار ثابت فرض می‌شود که با اعمال این شرط می‌توان با تعیین عمق جریان در پایین‌دست کانال، ارتفاع جریان در کانال را بر اساس مقدار مورد استفاده در آزمایشگاه تنظیم کرد.

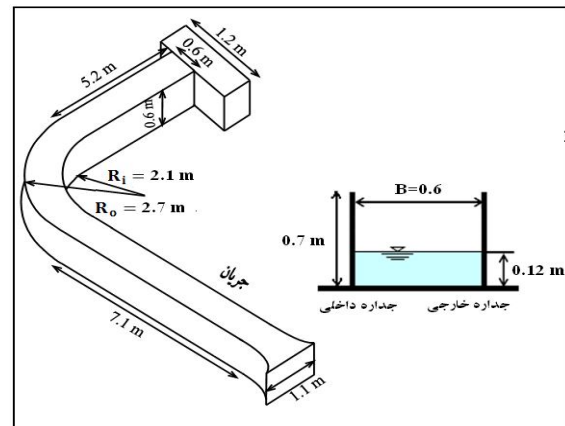
با توجه به هندسه پیچیده، شبکه‌بندی این کانال قوسی به روش چند بلوکی و به صورت غیر یکنواخت انجام شده است. شبکه‌بندی میدان حل در عمق غیریکنواخت بوده و در نزدیکی کف و سطح آب شبکه ریزتری به کار برده شده است. همچنین در مسیرهای مستقیم بالادست و پایین دست در جداره‌ها و ورودی و خروجی بلوک‌ها از شبکه ریزتری استفاده شده است. از سه بلوک در مسیر مستقیم بالادست کانال، قوس 90 درجه و مسیر مستقیم پایین دست استفاده شده است.

با توجه به اینکه هدف اصلی مقاله حاضر بررسی اثر نسبت شعاع انحنا به عرض بر الگوی جریان در قوس 90 درجه است، در شکل 3 قوس‌های مورد بررسی با نسبت‌های شعاع متوسط به عرض 2، 3، 4 و 5 نمایش داده شده‌اند. بر اساس پیشنهادات ارائه شده، در صورتی که نسبت شعاع به عرض بیشتر از 3 باشد، قوس ملایم و در حالتی که نسبت شعاع به عرض کمتر از 3 باشد، قوس تند نامیده می‌شود.

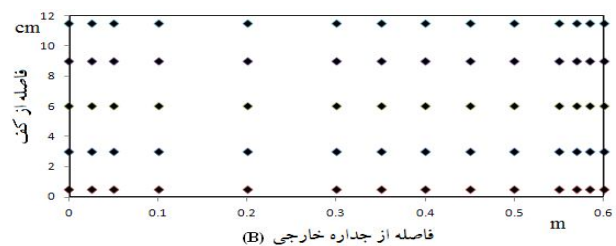
3- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به الگوی جریان در قوس 90 درجه با نسبت شعاع انحنا به عرض 4 مقایسه شده و سپس تأثیر شعاع انحنا بر روی الگوی جریان، با استفاده از مدل عددی مورد بررسی و مطالعه قرار خواهد گرفت. در شکل 4 نتایج عددی

آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت در یک مقطع عرضی از کانال نمایش داده شده است. در نقاط نشان داده شده در این شکل نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند.



شکل 1 کانال آزمایشگاهی



شکل 2 نقاط برداشت داده‌های آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت

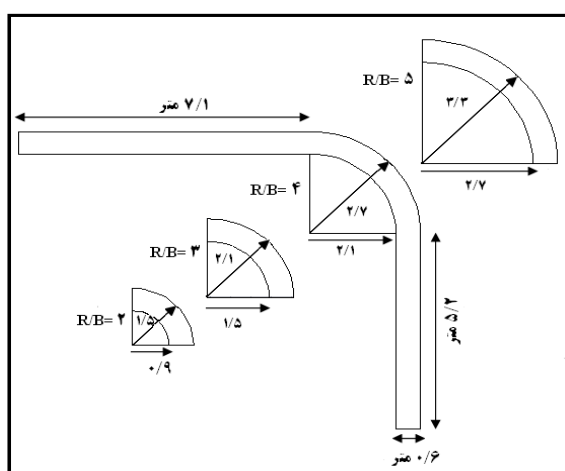
در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان در نرم‌افزار FLOW-3D همان معادلات ناویراستوکس هستند. برای بستن معادلات ناویراستوکس از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG استفاده شده است. برای مدل‌سازی سطح آزاد از روش VOF¹ استفاده شده است.

شرایط مرزی مورد استفاده به این ترتیب بوده است که در مرز ورودی از شرط مرزی دبی ثابت استفاده شده است. در دیواره‌ها و بستر کانال شرط مرزی دیوار اعمال شده است. در کف کانال زبری برابر 0/00128 متر تعریف شده است. در مرز فوقانی میدان محاسباتی شرط تقارن بکار

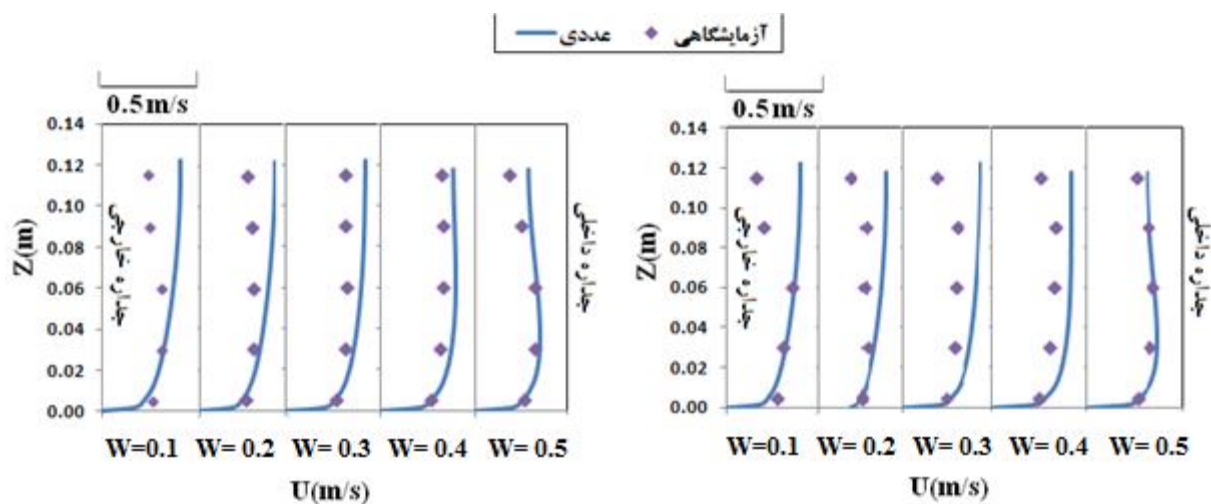
1. Volume of Fluid

اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد یکی از دلایل این مسأله بر اساس گزارش‌های مربوط به تحقیقات آزمایشگاهی، تشکیل جریان ثانویه‌ای با جهت چرخش متفاوت با جریان ثانویه اصلی قوس در نزدیکی جداره خارجی در این زوایا باشد. در نتایج بدست آمده توسط مدل حاضر برای نسبت شعاع انحنا به عرض 4 چنین جریانی مشاهده نشد.

و آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت طولی (در راستای جریان) در عمق در زوایای 40 و 50 درجه در فواصل مختلف از جداره خارجی قوس مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، انطباق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در قسمت‌های نزدیک به کف بیشتر است؛ اما در نواحی نزدیک سطح آب شامل قسمت‌های میانی و مجاور جداره خارجی در زاویه 40 درجه و نواحی نزدیک جداره خارجی در زاویه 50 درجه مقداری



شکل 3 قوس‌های مورد بررسی با نسبت شعاع به عرض‌های مختلف



ب) 50 درجه از قوس

الف) 40 درجه از قوس

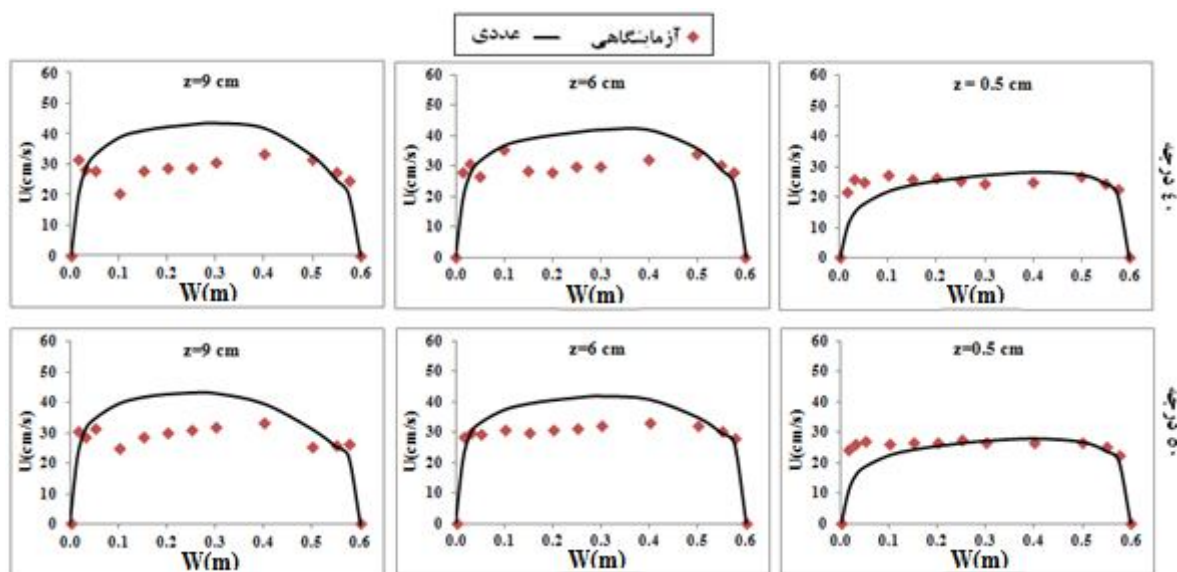
شکل 4 مقایسه پروفیل سرعت طولی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در در نقاط مختلف مقطع عرضی

است.

پس از صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، در ادامه اثر تغییر شعاع انحنا بر الگوی جریان عبوری از قوس بررسی خواهد شد. در شکل 6 توزیع سرعت‌های طولی در عرض در سه عمق مختلف و به ازای نسبت شعاع به عرض‌های مختلف به ترتیب در زوایای الف) 20 درجه، ب) 45 درجه و ج) 70 درجه نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل 6- الف مشاهده می‌شود، در زاویه 20 درجه (ابتدای قوس) بطور کلی برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض، سرعت بیشینه در نزدیکی جداره داخلی رخ می‌دهد، زیرا با ورود جریان به قوس به دلیل ایجاد نیروی گریز از مرکز، سطح آب در نزدیکی جداره خارجی به تدریج افزایش و در نزدیکی جداره داخلی مقداری کاهش می‌یابد. بنابراین در نزدیکی جداره خارجی قوس، گرادیان فشار طولی مثبت ایجاد می‌شود که موجب کاهش سرعت جریان در این ناحیه می‌شود. از طرف دیگر در نزدیکی جداره داخلی گرادیان فشار طولی منفی تقویت شده که منجر به افزایش سرعت در این ناحیه خواهد شد.

از طرفی افزایش امکان ایجاد خطای آزمایشگاهی در اندازه‌گیری مقدار سرعت در نزدیکی سطح آب هم می‌تواند یکی از دلایل وقوع اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و عددی در این ناحیه باشد. بطور کلی انطباق بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی از قوس خارجی به سمت قوس داخلی بهتر می‌شود، بطوری که اختلاف بین نتایج در قوس داخلی به کمترین میزان می‌رسد.

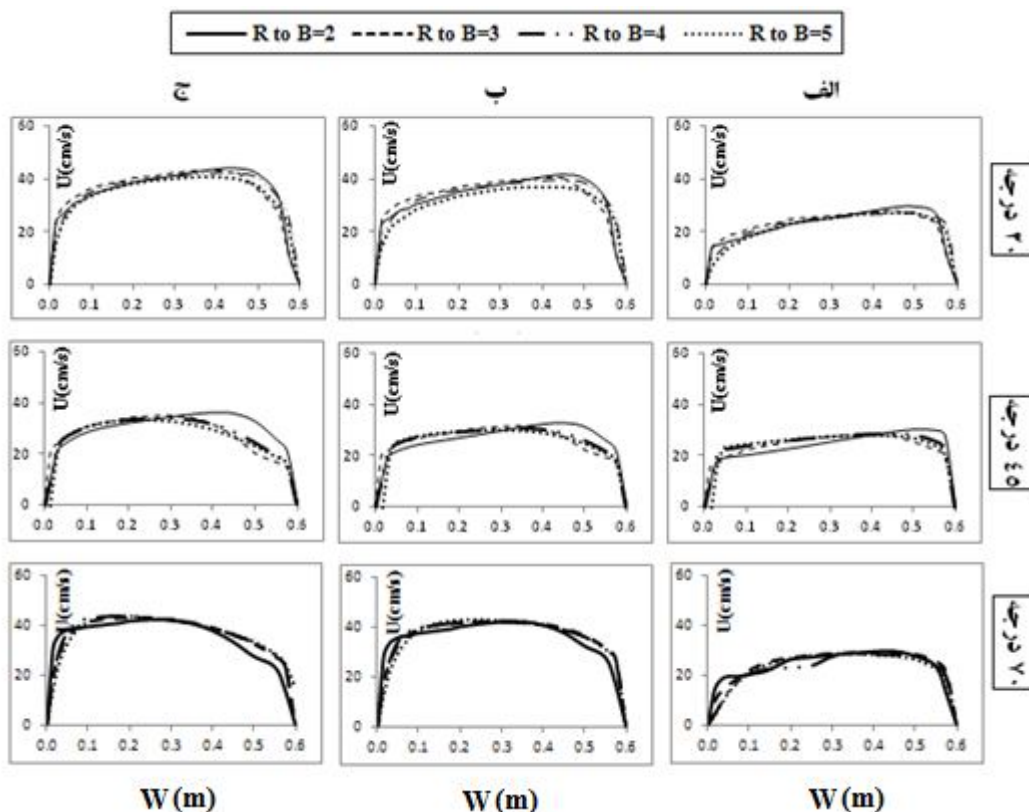
در شکل 5 نتایج بدست آمده در خصوص سرعت طولی در عرض از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. در این شکل پروفیل‌های سرعت طولی در زوایای 40 و 50 درجه، در عمق‌های 0/5 سانتی‌متری (نزدیکی کف کانال)، 6 سانتی‌متری (عمق متوسط) و 9 سانتی‌متری (نزدیکی سطح آب) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود، انطباق نسبتاً مناسبی بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی برقرار است. نتایج مدل عددی در نزدیکی قوس داخلی نسبت به قوس خارجی انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین مدل در نزدیکی کف کانال نتایج بهتری ارائه داده



شکل 5 مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی در عرض در زوایای 40 و 50 درجه، در عمق‌های 0/5 سانتی‌متری، 6 سانتی‌متری و 9 سانتی‌متری بین نتایج عددی و آزمایشگاهی

بر اساس نتایج مربوط به شکل 6- الف در نزدیکی جداره خارجی ($W=0.1$ m) با کاهش نسبت شعاع به عرض (تندتر شدن قوس) مقادیر سرعت کاهش می‌یابد؛ اما در نزدیکی جداره داخلی ($W=0.5$) با کاهش نسبت شعاع به عرض (تندتر شدن قوس) مقادیر سرعت افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده خواهد شد، مقدار افزایش و کاهش سطح آب در مجاور جداره‌های خارجی و داخلی، با کاهش نسبت شعاع به عرض افزایش خواهد یافت. این مسأله منجر به افزایش بیشتر سرعت در نزدیکی جداره داخلی و کاهش بیشتر آن در نزدیکی جداره خارجی، در قوس تند نسبت به قوس‌های ملایم شده است. طبق نتایج نشان داده شده در شکل 6، پروفیل‌های سرعت در قسمت میانی مقاطع مختلف در تمام نسبت شعاع به عرض‌های مورد بررسی نسبتاً مشابه هستند. در ناحیه میانی قوس (زاویه 45 درجه در شکل

6- ب) روند تغییر سرعت برای نسبت شعاع به عرض - های های مختلف در نزدیکی جداره خارجی مشابه این روند در زاویه 20 درجه (شکل 6- الف) است. در نزدیکی جداره خارجی کمترین سرعت مربوط به نسبت شعاع به عرض برابر 3 است. در زاویه 45 درجه برای قوس با نسبت شعاع به عرض برابر 2 (تندترین قوس)، سرعت بیشینه در مقطع همچنان در نزدیکی جداره داخلی اتفاق افتاده، اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض محل وقوع سرعت بیشینه به وسط مقطع منتقل شده است. در زاویه 70 درجه که در محدوده انتهای قوس واقع شده، طبق نتایج شکل 6- ج، سرعت بیشینه در مقطع برای نسبت شعاع به عرض‌های 3 و بالاتر به نواحی نزدیک جداره خارجی و برای نسبت شعاع به عرض 2 به وسط مقطع منتقل شده است.



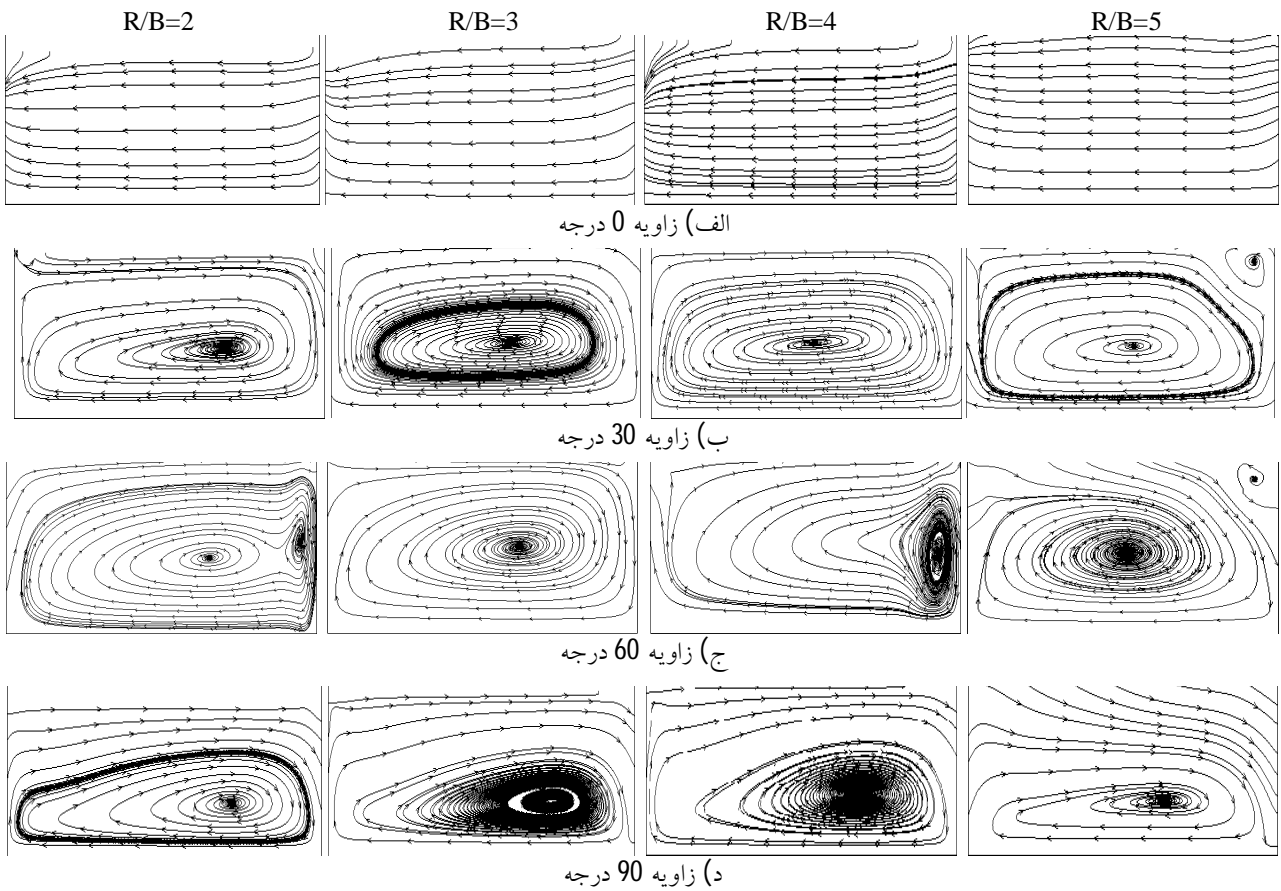
شکل 6 مقایسه سرعت‌های طولی در عرض به ازای R/B های مختلف در زوایای 20، 45 و 70 درجه در عمق‌های الف) 0/5، ب) 6 و ج)

9 سانتی متری

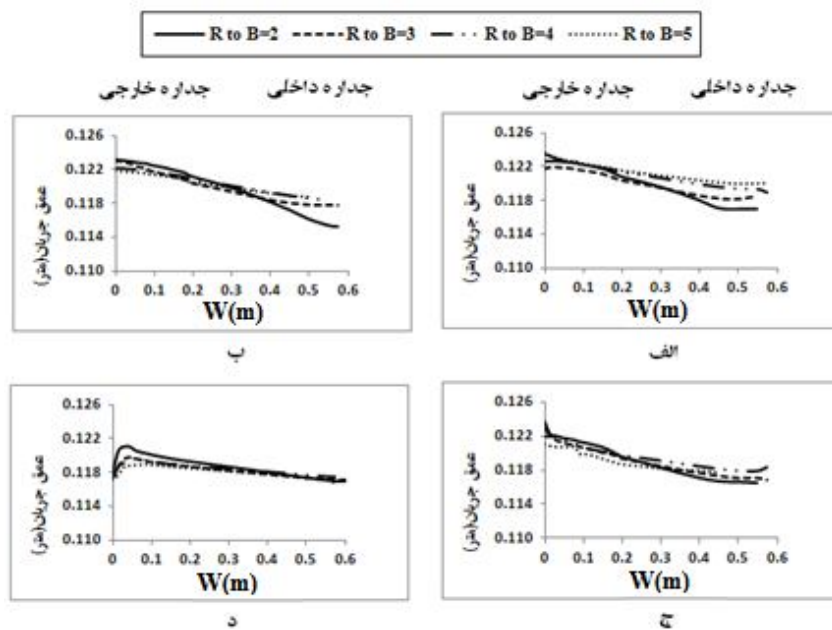
زاویه 30 درجه است. در حالت نسبت شعاع به عرض برابر با 2، مرکز جریان ثانویه در محدوده میانی کانال و متمایل به سمت جداره داخلی است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در این حالت جریان چرخشی دیگری در داخل جریان ثانویه اصلی و در نزدیکی جداره داخلی تشکیل شده است. در حالت نسبت شعاع به عرض برابر با 4، مرکز جریان ثانویه کاملاً در نزدیکی جداره داخلی قرار گرفته و الگوی چرخش آن کاملاً غیر متقارن شده است. بر اساس شکل 7-د در انتهای قوس (زاویه 90 درجه) جریان‌های ثانویه که انتظار بر این است پس از این به سمت خروجی قوس از قدرت آنها کاسته شود، همچنان حضور دارند. در این قسمت الگوی چرخش آنها کاملاً غیرمتقارن است.

شکل 8، پروفیل سطح آب در جهت عرضی برای نسبت شعاع به عرض‌های مختلف در زاویه‌های 20، 45، 70 و 90 درجه را نشان می‌دهد. با ورود جریان به قوس، به علت ایجاد نیروی گریز از مرکز، سطح آب در جدار خارجی بالاتر می‌رود و در جداره داخلی پایین می‌آید. همان‌طور که در پروفیل‌های سطح آزاد مشاهده می‌شود، ارتفاع سطح آزاد در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی است و با تغییر نسبت شعاع انحنا به عرض از قوس تند (نسبت 2) به سمت قوس ملایم (نسبت 5) این شیب کاهش می‌یابد. طبق نتایج بدست آمده از شکل 8 بنظر می‌رسد، جریان در قوس تند طول کمتری را طی کرده، تغییرات آن بیشتر بوده و در ناحیه کوچک‌تری اتفاق می‌افتد. اما با ملایم شدن قوس، جریان برای عبور طول قوس بیشتری را در اختیار داشته و تغییرات تدریجی‌تر می‌شود در نتیجه شیب سطح آزاد ملایم‌تر می‌شود، زیرا با توجه به اینکه در قوس تند شعاع انحنا کوچکتر و لذا مؤلفه شتاب مماسی در قوس یعنی v^2/r که با شعاع نسبت عکس دارد بزرگتر شده و لذا نیروی گریز از مرکز یعنی mv^2/r بیشتر و تغییرات سطح آزاد بیشتر می‌شود.

در ادامه اثر نسبت‌های مختلف شعاع به عرض قوس، بر الگوی جریان ثانویه در مقاطع مختلف عرضی بررسی می‌شود. در شکل 7 الگوی جریان ثانویه با استفاده از خطوط جریان در زاویه‌های 0، 30، 60 و 90 درجه و برای نسبت‌های مختلف شعاع به عرض قوس نشان داده شده‌اند. این شکل در مقطع ورودی قوس یعنی زاویه 0 درجه (شکل 7-الف)، یک جریان شعاعی (عرضی) یک سویه به سمت قوس خارجی را برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در ورودی قوس با افزایش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس خارجی، روند مثبت شدن گرادیان فشار طولی و با کاهش سطح آب در جهت طولی در نزدیکی قوس داخلی، روند منفی شدن گرادیان فشار طولی اتفاق می‌افتد. با توجه به وقوع این فرایندها و همچنین به منظور حفظ پیوستگی، این جریان یک سویه در راستای عرضی شکل می‌گیرد. با پیش‌روی در طول قوس، نیروی گریز از مرکز قدرت بیشتری پیدا می‌کند و به دلیل عدم تعادل آن با نیروی ناشی از گرادیان فشار جانبی، جریان‌های ثانویه بطور کامل تشکیل می‌شوند. الگوی خطوط جریان در شکل (7-ب) تشکیل جریان‌های ثانویه در زاویه 30 درجه از قوس را برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض بخوبی نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، محل مرکز جریان ثانویه در حالت نسبت شعاع به عرض برابر با 2 (قوس تند) متمایل به جداره خارجی است. با افزایش نسبت شعاع انحنا به عرض و ملایم‌تر شدن قوس، مرکز جریان ثانویه به سمت وسط کانال متمایل می‌شود. در ملایم‌ترین قوس (نسبت شعاع به عرض برابر با 5)، جریان چرخشی دیگری با جهت چرخش خلاف جریان ثانویه اصلی و با ابعاد بسیار کوچکتر از آن نیز تشکیل می‌شود. در زاویه 60 درجه (شکل 7-ج)، برای نسبت‌های شعاع به عرض 3 و 5 وضعیت چرخش نسبتاً مشابه



شکل 7 نمایش الگوی جریان ثانویه در قوس 90 درجه با نسبت شعاع به عرض های مختلف (جداره های سمت راست جداره داخلی و جداره های سمت چپ جداره خارجی می باشند)



شکل 8 پروفیل سطح آب در جهت عرضی برای نسبت شعاع به عرض های مختلف در زوایای (الف) 20 درجه، (ب) 45 درجه، (ج) 70 درجه و (د) 90 درجه

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر نسبت شعاع انحنا به عرض‌های مختلف بر الگوی جریان واقع در قوس 90 درجه با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D بررسی شده است. از جمله نتایج به دست آمده می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

- بر اساس نتایج بدست آمده در خصوص سرعت طولی جریان، در ابتدای قوس بطور کلی برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض، سرعت بیشینه در نزدیکی جداره داخلی رخ می‌دهد. به سمت انتهای قوس، برای حالت نسبت شعاع به عرض برابر 2 (تندترین قوس)، سرعت بیشینه در مقطع همچنان در نواحی نزدیک جداره داخلی اتفاق افتاده، اما برای سایر نسبت‌های شعاع به عرض محل وقوع سرعت بیشینه به نواحی نزدیک جداره خارجی منتقل می‌شود.

- در مقطع ورودی قوس یعنی زاویه 0 درجه یک جریان عرضی یک سویه به سمت قوس خارجی برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض ایجاد می‌شود. به نظر می‌رسد دلیل وقوع این فرایند، ایجاد تغییرات در گرادیان فشار و همچنین به منظور حفظ پیوستگی است. با پیش‌روی در طول قوس، جریان‌های ثانویه بطور کامل تشکیل می‌شوند. در ملایم‌ترین قوس (نسبت شعاع به عرض برابر با 5)، جریان چرخشی دیگری با جهت چرخش خلاف جریان ثانویه اصلی و با ابعاد بسیار کوچک‌تر از آن نیز تشکیل می‌شود.

- در خصوص سطح آزاد در طول قوس با کاهش نسبت شعاع به عرض (تندتر شدن قوس) شیب جانبی افزایش می‌یابد. همچنین در ابتدای قوس در نزدیکی جداره داخلی، عمق جریان برای تمام نسبت‌های شعاع به عرض با شیب‌های مختلف کاهش می‌یابد. این شیب در قوس با نسبت شعاع به عرض 2 (تندترین قوس) بیشترین مقدار و برای قوس با نسبت شعاع به عرض 5 (ملایم-

ترین قوس) کمترین مقدار را داراست.

5- فهرست علائم

B	عرض کانال
m	جرم
k	آشفته‌گی انرژی جنبشی
R	شعاع انحنا قوس
R_i	شعاع انحنا داخلی کانال
R_o	شعاع انحنا خارجی کانال
U	سرعت طولی
z	عمق آب در کانال
v^2/r	مؤلفه شتاب مماسی در قوس
ε	نرخ استهلاک انرژی

6- منابع

واقفی، م.، قدسیان، م.، و صالحی نیشابوری، ع.ا. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آب شستگی در قوس 90 درجه"، مجله علمی پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره سوم، شماره 3، ص.ص. 41-57.

واقفی، م.، قدسیان، م.، و صالحی نیشابوری، ع.ا. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی پیرامون آب شکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه"، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد شانزدهم، شماره دوم، ص.ص. 105-129.

Blanckaert H.J, de Vriend (2004). "Secondary flow in sharp open-channel bends " Journal of Fluid Mechanics. Vol. 498, pp. 353-380.

Booij R. (2002). "Modeling of the secondary flow structure in river bends", Bousmar, Zech, Editors. River Flow. Lisse: Swets & Zeitlinger.

FLOW-3D Version 9.3 User Manual (2008). Flow Science, Inc.

Lien, H.C., Hsieh, T., Y., Yong, J.C. and Yeh, K.C. (1999). "Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model" J. Hyd. Eng., ASCE, 125(10), pp. 1097-1108.

Naji Abhari M., Ghodsian M., Vaghefi M. and Panahpur N. (2010). "Experimental and numerical

Rodi W. and Leschziner A. (1978). "Calculation of strongly curved open channel flow", Journal of the Hydraulic Division, 105(HY10), pp. 1297-1314.

Shukry, A. (1950). "Flow around bends in an open flume", Transactions, ASCE. 115, pp. 751-779.

simulation of flow in a 90° bend", Flow Measurement and Instrumentation 21, pp. 292-298.

Ghodsian M. and Vaghefi M. (2009). "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend", International Journal of Sediment Research, Vol. 24, No. 2, pp. 145-158.