

## شبیه سازی عددی الگوی جریان بر میزان توسعه یافتگی نهر قوسی با استفاده از شبیه Delft-3D

محمد رضا پیرستانی<sup>1</sup>، سید علی سادات موسوی اناری<sup>2\*</sup>، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 90/7/15 تاریخ پذیرش: 91/1/25

### چکیده

جریان در خم رودخانه کاملاً سه بعدی، پیچیده و وابسته به نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض رودخانه می باشد. مطالعات انجام شده در مورد نهرهای قوسی با توسعه یافتگی مختلف رفتار متفاوتی را در الگوی جریان نشان می دهند. بدین منظور، با اجرای شبیه سه بعدی به وسیله ی برنامه ی عددی *Delft-3D*، دو نهر قوسی 90 درجه با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض  $(R/B)$  4 و 3 جهت شبیه سازی انتخاب گردیدند. دیواره های نهر صلب با بستر زبر غیر قابل فرسایش، و  $d50$  برابر با 1.28 میلیمتر در نظر گرفته شد. شبیه اغتشاشی  $K - e$  جهت تخمین الگوی جریان غالب سه بعدی در قوس انتخاب گردید. خروجی های شبیه شامل الگوی جریان در ترازهای مختلف، بزرگی سرعت، نیمرخ سرعت عرضی و طولی، قدرت جریان ثانویه و تنش برشی بستر می باشند. به منظور صحت سنجی نتایج از شبیه آزمایشگاهی با شرایط مشابه استفاده شده که در مقایسه با نتایج عددی تطابق خوبی را نشان می دهند. خروجیهای شبیه نشان می دهند که هر چه نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض قوس کمتر باشد، به عبارتی قوس دارای توسعه یافتگی کمتری باشد، قدرت جریان ثانویه بیشتر شده و خطوط جریان طولی نیز اثرات شدیدتری را بر الگوی جریان خواهند گذاشت. همچنین، با افزایش نسبت توسعه یافتگی قوس، بزرگی سرعت در مجاورت جداره ها افزایش می یابد، ولی از زاویه ی برخورد خطوط جریان به جداره ی خارجی قوس، که یکی از عوامل اصلی جدایی ذرات رسوبی از دیواره ها و فرسایش می باشد، کاسته می شود.

واژه های کلیدی: الگوی جریان، نسبت توسعه یافتگی، نیمرخ سرعت، قدرت جریان ثانویه، تنش برشی.

<sup>1</sup> - استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب - گروه مهندسی عمران

<sup>2</sup> - کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب - نویسنده مسئول

<sup>3</sup> - استاد دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

\* - نویسنده مسئول: [ali\\_sadat209@yahoo.com](mailto:ali_sadat209@yahoo.com)

**مقدمه**

جریانهای رودخانه به ندرت مسیر مستقیم را می پیمایند و از مبدا تا مقصد مسیرهای قوسی یا پیچانرودی را دنبال می کنند. به دلیل حرکت‌های پیچانرودی به سمت پایین دست، و ناپایداری جداره های خارجی، مصالح خاکی دارای ارزش که در سواحل رودخانه قرار گرفته اند شسته شده و جا به جا می شوند. یکی از دلایل ناپایداری مذکور، توزیع نامتقارن سرعت در لایه های مختلف عرضی و طولی رودخانه می باشد. علاوه بر آن، تراز سطح آب در قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می گیرد، و به همین دلیل، با وارد شدن جریان در قوس رودخانه توزیع سرعت آن هم عوض می شود. اضافه افت اصطکاکی در قوس رودخانه ها ناشی از اثر جریانهای ثانویه می باشد، و روشهای مختلفی جهت تعیین آن با توجه به توسعه یافتگی قوس و شرایط جریان ارائه شده اند. در قوس رودخانه ها معمولاً یافتن محل مناسب آبیگرها، تثبیت کناره ها با آبشکن، یا انحراف جریان رود از جهت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و این مسائل به ضعف و قوت جریانهای ثانویه، خیزاب، توزیع سرعت، پستی و بلندی بستر و مشخصات هندسی پیچانرود بستگی دارد. از این جهت شناختن رفتار جریان در مسیر رودخانه، بخصوص در خم رودخانه ها، از جمله مسائل مورد توجه می باشد.

پژوهشهای تجربی زیادی از چند دهه پیش در مورد الگوی جریان در قوسها انجام شده اند. بیشتر نتایج حاصله از این تحقیقات بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی بوده، و معهود مواردی بر مبنای نتایج صحرایی می‌باشند. برداشت نتایج حاصل از فعالیت آزمایشگاهی و صحرایی، به دلیل اثر فراسنجهای پیش‌بینی نشده بر روند آزمایشها، با دشواری همراه خواهد بود. به همین منظور، ارائه ی شبیه های عددی صحیح می‌تواند به محققان در این زمینه کمک بزرگی در صرفه‌جویی وقت و هزینه نماید.

از پیشگامان مطالعه در مورد الگوی جریان و قدرت جریان ثانویه در مسیرهای قوسی می‌توان از شکری (1950) نام برد، نامبرده شبیه آزمایشگاهی خود را برای قوس دارای زاویه مرکزی 45 تا 180 ارائه نموده که وقوع حداکثر سرعت متوسط‌گیری شده در عمق برای نیمه ی اول قوس متمایل به جداره داخلی بوده و به‌تدریج در نیمه ی دوم به سمت جداره خارجی متمایل می گردد. شکری در این خصوص، رابطه‌ای را برای محاسبه ی قدرت جریان ثانویه ارائه نموده است. چودری و نارسیمهای (1977) با تحقیقاتی در مورد تنش برشی در قوس بیان می‌کنند: زمانی که نسبت شعاع قوس مرکزی به عرض رودخانه در ورودی به قوس بزرگتر از 3 باشد، حداکثر تنش برشی در قسمت خروجی قوس و مجاور دیواره خارجی رخ داده و برای نسبت کمتر از 3 در شروع قوس، مجاور جداره ی داخلی و در انتهای قوس نزدیک دیواره خارجی ایجاد می-

قدرت جریان ثانویه در قوسهای با توسعه یافتگی کمتر، بیشتر از قوسهای دارای توسعه یافتگی بیشتر است. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش ارائه‌ی برنامه‌هایی برای شبیه‌سازی جهت مقایسه بزرگیهای سرعت، نیم-رخهای سرعت عرضی، طولی، قدرت جریان ثانویه و تنش برشی کف در قوسها با دو نوع توسعه یافتگی مختلف می-باشد، تا معلوم شود توسعه یافتگی در قوس یک رودخانه چه تغییراتی در جریانات مخرب کف و دیواره‌ها خواهد داشت.

### معادلات حاکم بر جریان

در شبیه‌سازی عددی، شناختن معادلات حاکم و تنظیم فراسنجه‌ها نقش با اهمیتی در پی بردن به صحت نتایج حاصله از شبیه‌سازی دارند. برنامه‌ی عددی *Delft 3D* با حل همزمان سه معادله پیوستگی، ناویر استوکس و انتقال، سعی در حل محیطهای پیوسته سیال می‌نماید. در حل معادلات فوق نیاز به تعیین مقادیر تنش برشی بستر، تنشهای برشی در مرزهای بسته، ضریب زبری و شبیه‌های بسته اغتشاشی می‌باشد.

تنش برشی بستر در حالت سه بعدی،  $\tau_{b3D}$ ، طبق

معادله‌ی 1 به دست خواهد آمد:

$$\tau_{b3D} = \frac{\rho_0 \times g \times u_b \times |u_b|}{C_{3D}^2} \quad 1$$

شود. رودی و همکاران (1978) با شبیه‌سازی جریان در قوس 180 درجه با نسبت شعاع قوس مرکزی به عرض رودخانه کمتر از 3 بیان نمودند که شیب فشار طولی بر تغییرات الگوی جریان بسیار اثر دارد. انور در سال (1986) نیز با اندازه‌گیری سه بعدی سرعت در قوس رودخانه‌های کوچک با شعاع داخلی 19 متر انجام داده است. هدف او از این آزمایشها به دست آوردن ساختار آشفتگی و تنشهای برشی، بهنجار و توزیع سرعتهای طولی و عرضی در قوس رودخانه‌ها بوده است. نامبرده نتیجه گرفت که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی نداشته، ولی در خروجی اثرات الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌مانند. لین و همکاران (1999) با استفاده از شبیه‌دو بعدی الگوی جریان در عمق متوسط قوس 90 درجه نشان دادند که اندازه‌ی مؤلفه سرعت در نزدیکی جداره‌ی خارجی در طول نهر با افزایش همراه بوده، که دلیل آن خاصیت انتقال اندازه‌ی حرکت طولی به وسیله‌ی جریان ثانویه، و اندازه‌ی سرعت در طول جداره خارجی بیشتر از جداره داخلی می-باشد. در ایران تحقیقاتی در مورد نهرهای قوسی صورت گرفته که از آن جمله صفرزاده (1382)، فرقانی (1386) بوده، و فضلی (1387) برای الگوی جریان در قوس 90 درجه با توسعه یافتگیهای مختلف به صورت آزمایشگاهی مطالعاتی را انجام داده است. نامبرده بیان نمود که مؤلفه‌ی عرضی سرعت با طول قوس مرکزی نسبت معکوس داشته و

که  $X$  یا  $x$  و  $h$  یا  $y$  راستای تعیین شده در بستر منطبق بر محور مختصات کارتیزین بوده و  $u_*$  بر حسب  $(m/s)$  سرعت برشی در دیواره ها می باشد و به وسیله ی قانون لگاریتمی دیواره ها تعیین می شود .

در برنامه ی *Delft 3D* چهار شبیه بسته اغتشاشی به عنوان پیش فرض تعیین شده که عبارتند از:  $K - e$  ،  $K - l$  ، جبری و ثابت. از نظر صحت نتایج و پیچیدگی، معادله ی  $K - e$  بهترین تطابق را با واقعیت داشته که در معادله ی 5 شبیه بسته ی اغتشاشی مرتبط با آن ارائه شده است:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial K}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial K}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial K}{\partial \sigma} = 5$$

$$\frac{1}{(d+\zeta)^2} \times \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left( v_{mol} + \frac{v_{3D}}{\sigma} \right) \frac{\partial K}{\partial \sigma} \right] + P_K + B_K - \varepsilon$$

که  $P_k$  بر حسب  $(m^2s^{-3})$  جمله ی حاصل از کارمایه ی جنبشی اغتشاش ،  $B_k$  بر حسب  $(m^2s^{-3})$  جمله ی شار شناوری برای کارمایه ی جنبشی اغتشاش، و  $e$  بر حسب  $(m^2s^{-3})$  اتلاف کارمایه می باشد.

### مشخصات شبیه تهیه شده در Delft 3D

برای دستیابی به نتایج حاصل از اثر توسعه یافتگی قوسها بر الگوی جریان، دو نوع قوس با نسبت شعاع قوس مرکزی به عرضهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند، که در شکل 1 قوس با نسبت توسعه یافتگی 4 در سمت راست، و قوس با نسبت توسعه یافتگی 3 در سمت چپ مشاهده می

که  $|\mathbf{u}_b^{\mathbf{r}}|$  اندازه ی سرعت افقی در لایه ی اول بالای بستر  $(m/s)$  ،  $\mathbf{u}_b^{\mathbf{r}}$  مقدار صحیح افقی سرعت در اولین لایه ی بالای بستر  $(m/s)$  ،  $C_{3D}$  ضریب زبری سزی در حالت سه بعدی  $(m^{0.5}s^{-1})$  ،  $g$  شتاب ثقل  $(ms^{-2})$  و  $R_o$  بر حسب  $(kgm^{-3})$  چگالی سیال می باشد .

به منظور محاسبه ی تنش برشی بستر در حالت سه بعدی مقدار ضریب زبری سه بعدی مورد نیاز است که بر اساس معادله ی 2 به دست می آید:

$$C_{3D} = \frac{\sqrt{g}}{K} \times \ln \left( 1 + \frac{\Delta Z_b}{2Z_o} \right) \quad 2$$

که در آن  $Z_o$  طول زبری بستر  $(m)$  ،  $Z_b$  ضخامت لایه ی بستر  $(m)$  و  $K$  ثابت ون کارمن می باشد . برای محاسبه ی  $Z_o$  می توان از معادله ی 3 استفاده کرد که به وسیله ی محققان دانشگاه دلفت ارائه شده است:

$$Z_o = \frac{K_s}{30} \quad 3$$

که در رابطه ی فوق  $K_s$  ضریب زبری نیکورادس بر حسب  $(m)$  بوده، و برای بستر انتقالی رسوبات به میزان کم مقدار 0/15 متر، و برای سطوح خیلی صاف در حد 0/01 می باشد . محاسبه ی تنش برشی در مرزهای بسته شبیه، که تنش برشی مماسی هم نامیده می شود ،  $\tau_{xt}$  ، در دیواره ها طبق معادله ی 4 به دست می آید:

$$\tau_{\eta\xi} = \tau_{\xi\eta} = \rho_o \times u_*^2 \quad 4$$

به هم، و کیفیت چیدمان سلولها در کنار هم، و همچنین نسبت  $\Delta x$  به  $\Delta y$  در هر سلول بیان شده است که در ساختن شبیه بسیار اهمیت خواهند داشت. در ضمن، تعداد سلولهای بیان شده در جدول فوق مربوط به شبکه بندی یک لایه است.

در جدول 2 مقادیر مربوط به اجرای شبیه سازی مانند:

بده، زبری کف، سرعت و ... آورده شده اند.

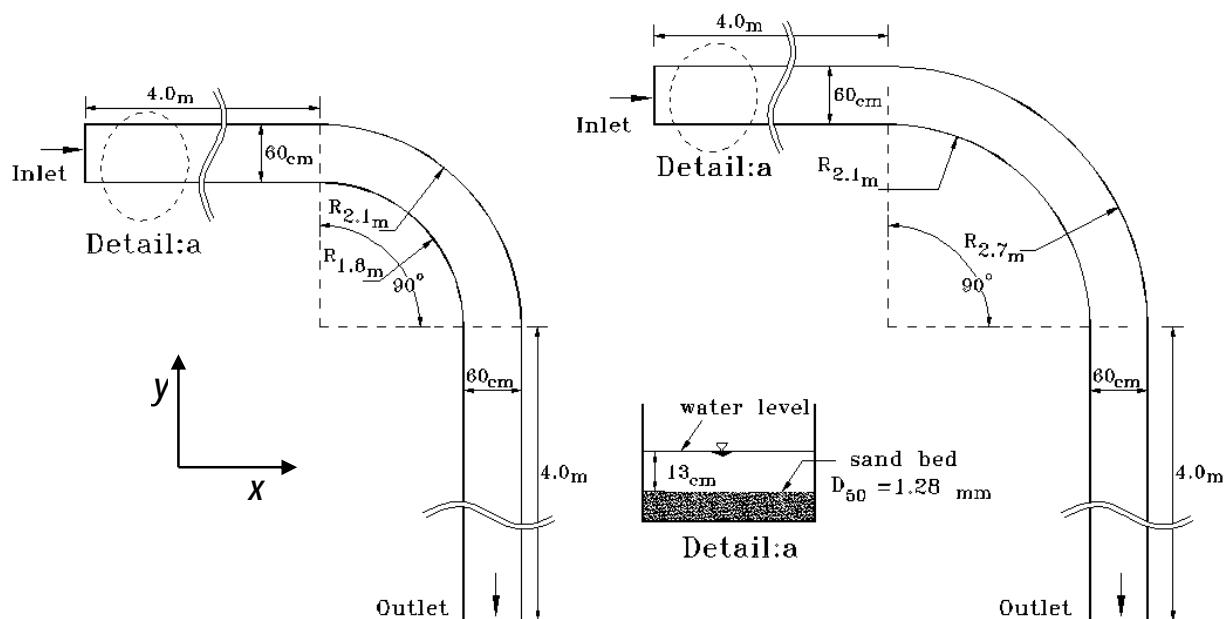
شود. در جدول 1 مشخصات مربوط به شبکه بندی ارائه گردیده که در چهار دسته تقسیم بندی شده است. حالت‌های 1 و 2 مربوط به شبکه بندی ریز و درشت برای قوس با نسبت شعاع انحناء به عرض 4، و همچنین حالت‌های 3 و 4 برای قوس 3 می باشد. تمام شبیه سازیها به صورت سه بعدی و در 16 لایه انجام شده اند. در بخش خصوصیات شبکه بندی مواردی مانند متعامد بودن اضلاع سلولها نسبت

جدول 1. مشخصات شبکه بندی انتخاب شده در ساختن شبیه ها .

نوع شبکه بندی	تعداد سلول های شبکه بندی	تعداد نقاط گرهی		شبکه بندی در راستای عمودی	خصوصیات شبکه بندی		
		راستای $M$	راستای $N$		Orthogonality	Resolution	Aspect Ratio
Case1	12360	413	31	16	0/005	0/02 – 0/03	1- 2/51
Case2	5184	217	25	16	0/003	0/03 – 0/04	1 – 2/39
Case3	9150	306	31	16	0/0052	0/02 – 0/03	1 – 2/53
Case4	4656	195	25	16	0/004	0/03 – 0/04	1 – 2/41

جدول 2. مشخصات مربوط به تنظیمهای هیدرولیکی شبیه .

واحد	مقادیر آزمایشگاهی	فراسنجهای موثر
mm	1/28	قطر متوسط مصالح (D50)
m3/s	0/025	بده در مقطع ورودی
m	0/13	سطح تراز آب در خروجی
m	0/6	پهنای نهر
m/s	0/32	سرعت متوسط در مقطع عرضی
---	0/3	عدد فرود در بالادست



شکل 1. مشخصات فیزیکی شبیه برای قوس با نسبت توسعه یافتگی 4 و 3.

مشابه آزمایشگاهی انجام شده به وسیله ی فرقانی (1386) مقایسه گردیده اند. سه نوع شبکه بندی با حداقل ابعاد نشان داده شده در شکل 2 به منظور شبیه سازی جریان در نهرهای قوسی انتخاب، و بعد از شبیه سازی بزرگی سرعت به دست آمده در ورودی قوس مجاور جداره های داخلی و خارجی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده اند. بررسیها نشان می دهند که دو شبکه بندی به ابعاد  $0.02 \times 0.02$  متر با  $0.01 \times 0.01$  متر در نقشه ی مسطحه مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی مشابه داشته اند که به منظور کاهش زمان محاسباتی از شبکه بندی  $0.02 \times 0.02$  متر برای کلیه ی شبیه سازیها استفاده شده است.

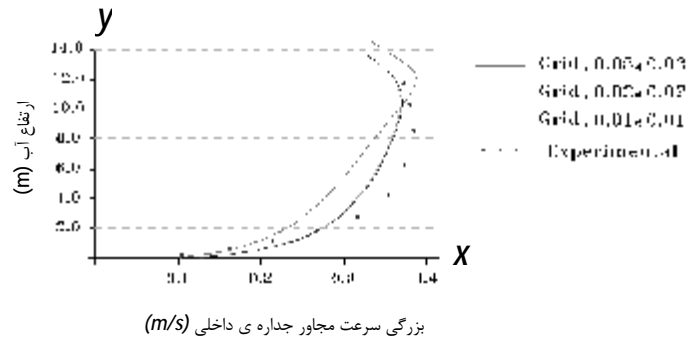
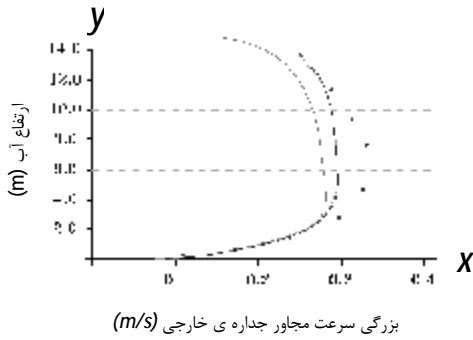
در انتهای صحت سنجی، خطوط جریان حاصله در قوس 3 با نتایج آزمایشگاهی مطابق دو شکل 3 و 4 مقایسه

### صحت سنجی نتایج

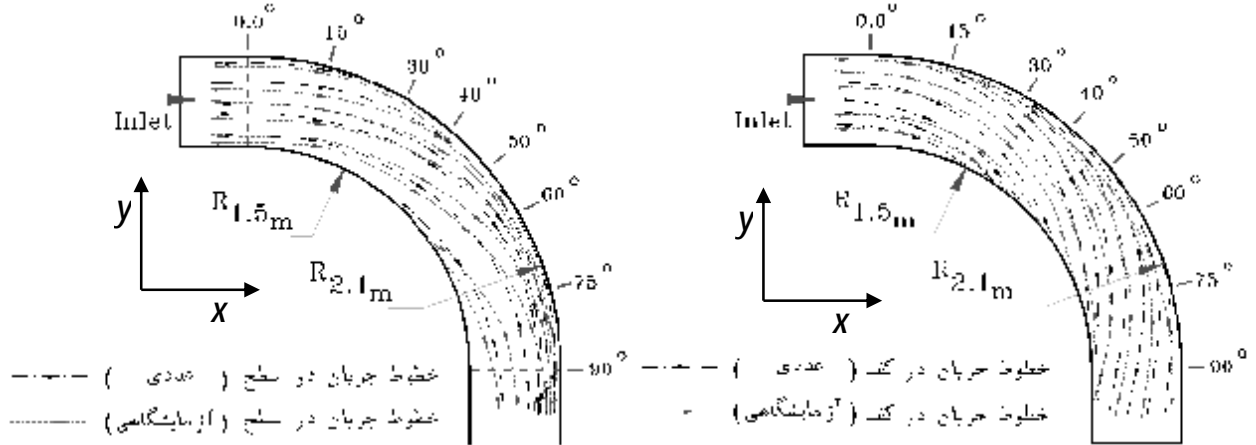
انتخاب درست ابعاد سلولهای شبکه بندی، مقدار زبری کف، گرانیروی گردابی افقی و عمودی و سطح آب یکی از مهمترین بخش از مراحل شبیه سازی می باشند. هر چه ابعاد شبکه بندی در محدوده های اغتشاشی جریان با شدت زیاد کوچکتر باشد، میزان خطای محاسباتی کاهش می یابد. برای مثال، اطراف موانع هیدرولیکی یا زوایای شدید جداره ها را می توان عنوان نمود. از طرفی، اگر ابعاد مذکور از مقدار لازم کوچکتر باشند، موجب افزایش هزینه محاسبات می شود؛ لذا، چند شبکه بندی با ابعاد مختلف انتخاب و خروجیهای شبیه با مشاهده های آزمایشگاهی مقایسه شده، و شبکه بندی بهینه از این طریق به دست می آید. بدین منظور، نتایج حاصله از شبیه عددی با نتایج

شده، در سطح امتداد خطوط جریان عکس کف بوده، و حرکت خطوط به سمت دیواره خارجی می باشد.

شده اند. روند کلی تغییرات انطباق قابل قبولی با هم داشته بطوری که در کف خطوط جریان با پیشروی در قوس از دیواره خارجی فاصله گرفته، به دیواره ی داخلی متمایل



شکل 2. بزرگی سرعت در ورودی قوس .



شکل 4. خطوط جریان در قوس 3.

شکل 3. خطوط جریان در قوس 3.

## تجزیه و تحلیل نتایج

در شکل 5، از راست به چپ، تغییرات بزرگی سرعت در مسیر مستقیم تا شروع قوس با نسبت توسعه یافتگی 4 و 3 دیده می شود. این نکته قابل ذکر است که بزرگی سرعتها در شروع قوس 4 بیشتر از قوس 3 بوده، زیرا نیروی گریز از مرکز با شعاع مرکزی قوس رابطه مستقیم داشته، و هر چه شعاع مرکزی بیشتر باشد، نیروی ایجاد شده بزرگتر و در نتیجه سرعت بیشتر خواهد بود. در ضمن، در مقطع عرضی جریانهای در تراز مبنای کف از ناحیه با فشار بالا، جداره ی خارجی، به سمت ناحیه با فشار کم، جداره ی داخلی، حرکت کرده که در سطح آب عکس این عمل اتفاق می افتد.

در ادامه، بزرگی سرعت برای شروع تا انتهای قوس در عمق متوسط محاسبه گردیده، که در مجاورت جداره ی داخلی از شروع قوس تا انتهای آن بررسی شده است. در قوس با نسبت توسعه یافتگی 3، مقدار سرعت متوسط عمق در شروع قوس 0/3 متر بر ثانیه بوده، و تا انتهای قوس به مقدار 0/227 متر بر ثانیه کاهش می یابد. در قوس 4 از مقدار 0/308 متر بر ثانیه در شروع قوس تا مقدار 0/245 متر بر ثانیه در انتهای قوس کاهش یافته، که شیب کاهش بزرگی سرعت در عمق متوسط در قوس 3 بیشتر از قوس 4 بوده، که یکی از دلایل آن طول پیمایش بیشتر برای قوس 4 نسبت به قوس 3 می باشد. مقادیر تغییر بزرگی سرعت در عمق متوسط در مجاور جداره ی داخلی برای دو قوس در جدول (3)، و بزرگی سرعت در مجاور جداره ی خارجی

در این پژوهش بزرگی سرعت در امتداد قوس با نسبت شعاع قوس مرکزی به عرض مختلف با هم مقایسه شده اند، سپس بطور جداگانه تغییرات سرعتهای طولی و عرضی در قوسها بررسی گردیده اند تا عوامل تاثیر گذار بر روند تغییرات بزرگی سرعت تعیین شوند. در انتها، ارتباط فراسنجهای فوق با قدرت جریان ثانویه بیان شده و تنش برشی به عنوان یک عامل وابسته به تغییرات سرعت در طول قوس ارائه شده است، که می توان حرکت ذرات رسوبی و مناطق رسوبگذار و محل آبشستگی را پیش بینی کرد.

## روند تغییرات بزرگی سرعت در قوس با توسعه یافتگی

### مختلف

در ورودی قوس، بزرگی سرعت در مجاور جداره ی داخلی به مقدار حداکثر خود رسیده، که دلیل این پدیده پیدایش نیروی گریز از مرکز در ابتدای قوس بوده که باعث افزایش سطح سیال در قوس خارجی و کاهش آن در جداره ی داخلی قوس گردیده است. افزایش سطح سیال در قوس خارجی موجب افزایش شیب فشار و کاهش شیب سرعت نسبت به مسیر مستقیم بالادست خود شده و کاهش سطح آب در قوس داخلی موجب کاهش شیب فشار و افزایش شیب سرعت نسبت به مسیر مستقیم بالادست خود می شود.



نشان می دهد، در حالی که در کف عکس این وضعیت صادق می باشد.

شکل 7 چنین مواردی را برای قوس 3 نشان می دهد، ولی نکته‌ی مهم در این دو شکل این جاست که زاویه ی برخورد خطوط جریان در کف با دیواره‌ی خارجی در قوس 3 بیشتر از قوس 4 می باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در بالا، بزرگی سرعت در مجاور جداره‌ی قوس 3 کمتر از قوس 4 بوده، ولی به علت زاویه ی برخورد شدید تر قوس 3 نسبت به 4 می توان حالت بحرانیتری را از نظر فرسایش دیواره برای قوس 3 انتظار داشت .

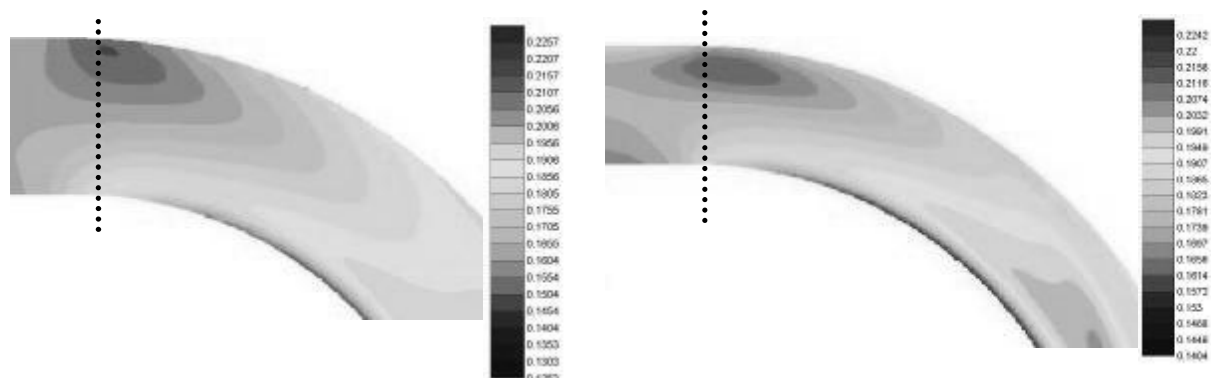
در جدول (4) آورده شده اند. در آن ناحیه سرعتها از ابتدای قوس روند افزایشی داشته، که افزایش شیب بزرگی سرعت در قوس 4 بیشتر از 3 می باشد. این مطلب نشان می دهد که بزرگی سرعت اثرات مخربتری در قوس با توسعه یافتگی 4 نسبت به قوس 3 دارد. در طبیعت، اگر سواحل قوس رودخانه ها در برابر این چنین جریانهایی حفاظت نگردند، با گذشت زمان از نسبت توسعه یافتگی قوس کاسته می شود . در شکل 6 بزرگی سرعت و خطوط جریان در سطح و کف برای قوس با نسبت توسعه یافتگی 4 قابل مشاهده است؛ در سطح انتقال خطوط از مجاور جداره ی داخلی در شروع قوس به سمت جداره ی خارجی در انتهای قوس را

جدول 3. سرعت در متوسط عمق در مجاورت جداره ی داخلی .

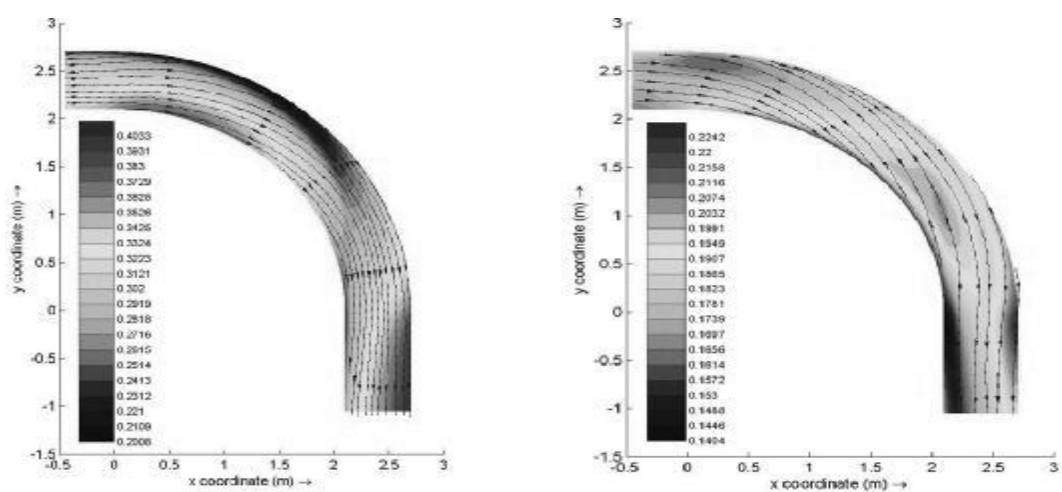
طول قوس بر حسب درجه	0/00	15	30	40	50	60	75	90
بزرگی سرعت در قوس 3 (m/s)	0/300	0/307	0/285	0/271	0/261	0/256	0/249	0/227
بزرگی سرعت در قوس 4 (m/s)	0/308	0/309	0/289	0/280	0/274	0/270	0/263	0/245

جدول 4. سرعت در متوسط عمق در مجاور جداره ی خارجی .

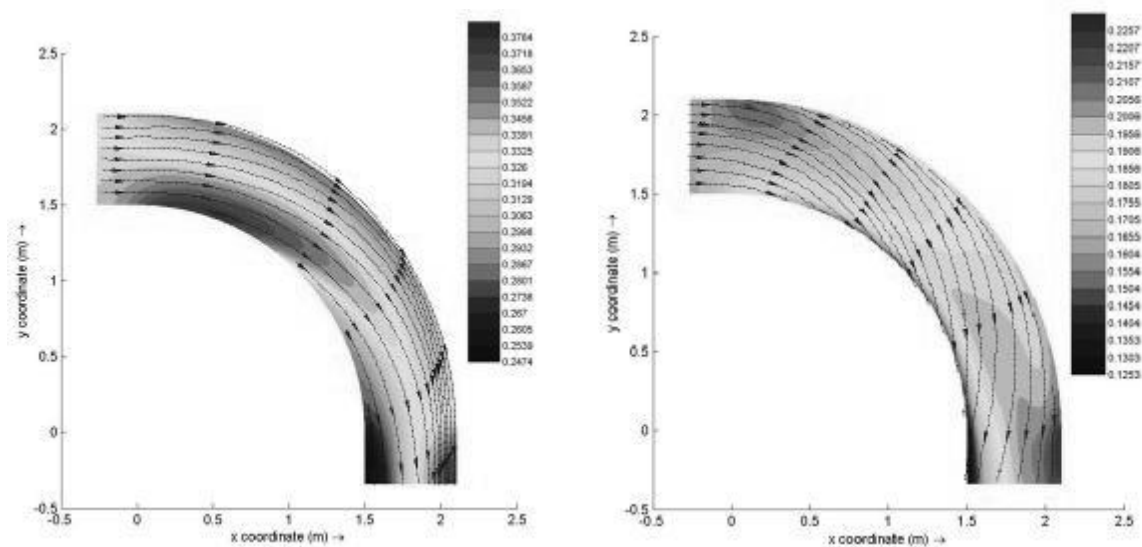
طول قوس بر حسب درجه	0/00	15	30	40	50	60	75	90
بزرگی سرعت در قوس 3 (m/s)	0/274	0/271	0/280	0/285	0/289	0/294	0/303	0/325
بزرگی سرعت در قوس 4 (m/s)	0/263	0/256	0/261	0/268	0/283	0/298	0/317	0/339



شکل 5. بزرگی سرعت در مسیر مستقیم و شروع قوس .



شکل 6. بزرگی سرعت و خطوط جریان در مجاورت لایه ی سطح و کف در قوس 4 .



شکل 7. بزرگی سرعت و خطوط جریان در مجاورت لایه‌ی سطح و کف در قوس 3.

دیواره‌ی داخلی و خارجی برای کف و سطح در نظر گرفته شده است. در شکل 9 تا شکل 12 می‌توان سرعت طولی را در مجاور جداره‌ها مشاهده کرد. در دو قوس 4 و 3 تغییرات سرعت طولی در سطح و کف زیاد نبوده و روند آن در دو قوس مشابه هم بوده که فقط لایه‌ی مجاور سطح قابل بحث خواهد بود.

در قوس 4 و مجاور جداره‌ی خارجی و بخش مربوط به سطح، سرعت در فاصله 1/7 متری یا حدود 35 درجه از شروع قوس به مقدار کمینه خود رسیده که به تدریج رو به افزایش خواهد بود. در صورتی که برای قوس 3 در فاصله‌ی 1/6 متری یا 50 درجه از شروع قوس به مقدار کمینه خود می‌رسد. شیبهای کاهشی و افزایشی سرعتهای طولی در قوس 4 شدیدتر از قوس 3 می‌باشند. این مطلب نشان

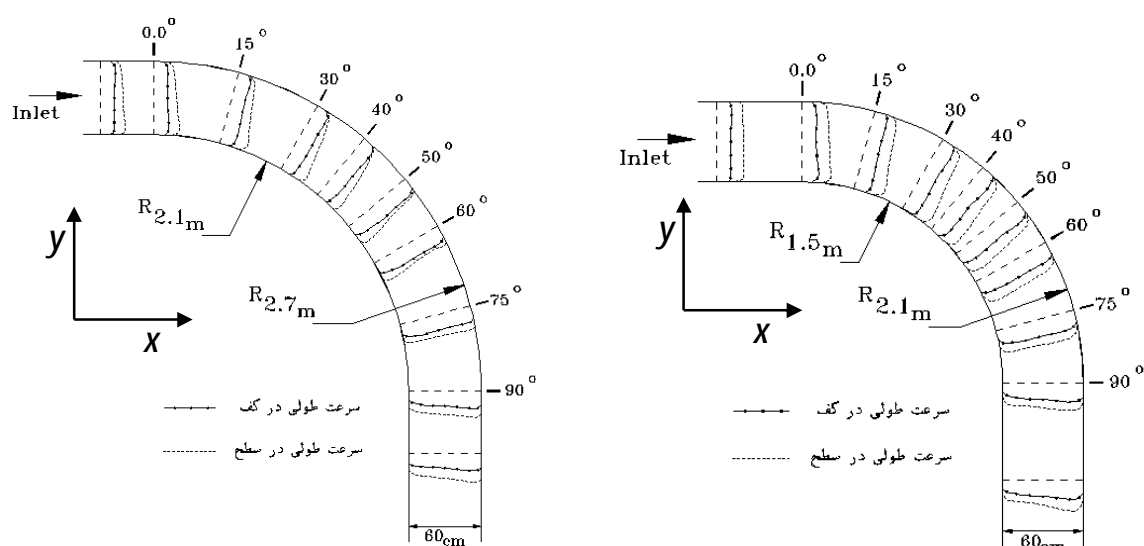
### روند تغییرات سرعت طولی در قوس با توسعه یافتگی متفاوت

با تجزیه‌ی بزرگی سرعت مشخص می‌شود که اثر گذارترین مؤلفه، از نظر مقدار بر الگوی جریان، مؤلفه‌ی طولی می‌باشد، بنابراین، مقدار مزبور در شروع قوس و مجاور جداره‌ی داخلی بیشینه شده و در مقطع خروجی در مجاور جداره‌ی خارجی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این روند با تغییرات بزرگی سرعت در بخشهای قبلی انطباق دارد. روند تقریبی این تغییرات در شکل 8 ارائه شده که از سمت راست به چپ به ترتیب نیمرخ سرعت طولی در کف و سطح برای قوس 3 و 4 نمایش داده شده‌اند.

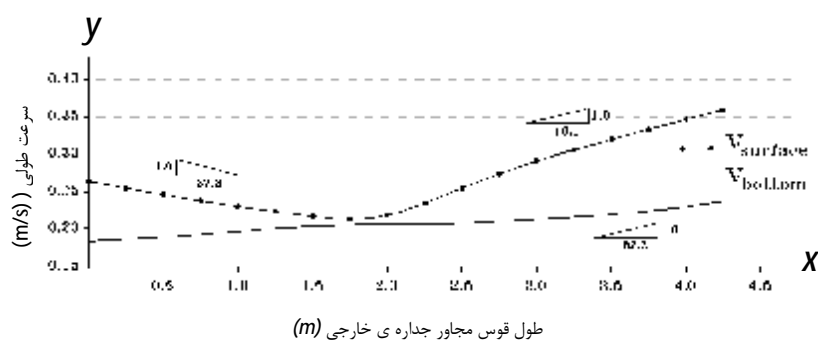
همان‌طور که در شکل 8 مشخص است، تغییرات در میانه‌ی نهر شدید نیست؛ بنابراین، دوناخیه در مجاور

این موضوع تأیید خواهد شد. با مقایسه ی خطوط جریان برخورد با دیواره خارجی با نیمرخ سرعت طولی ملاحظه می شود که در قوس 3 محل افزایش سرعت طولی نسبت به قوس 4، موقعیت برخورد جریانها با دیواره می باشد.

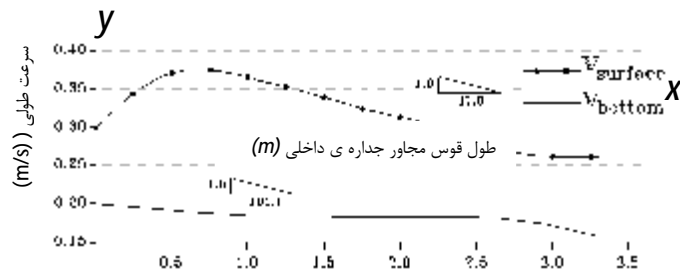
می دهد که ناحیه ی سرعتهای طولی در میانه ی قوس و مجاور جداره ی خارجی در قوس 3 بیشتر از 4 بوده، در نتیجه صدمات جداره ای در مجاورت سطح در این ناحیه از قوس 3 بیشتر از 4 خواهد بود. هر چه توسعه یافتگی قوس کمتر باشد، جریان طولی قدرت بیشتری پیدا کرده، و در مقایسه سرعت طولی در مجاور جداره ی خارجی دو قوس



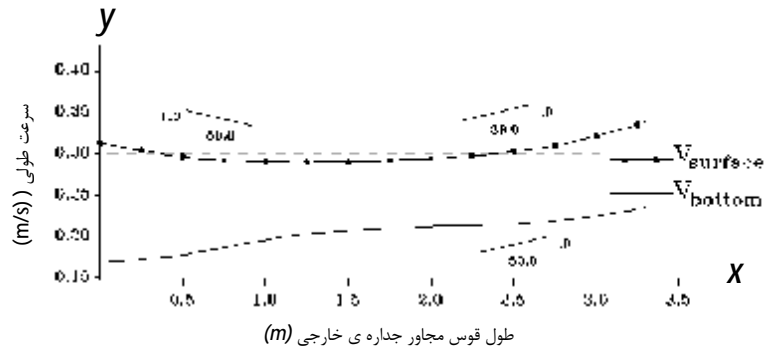
شکل 8. نیمرخ سرعت طولی در مجاور لایه ی کف و سطح. به ترتیب از چپ به راست قوس 3 و 4.



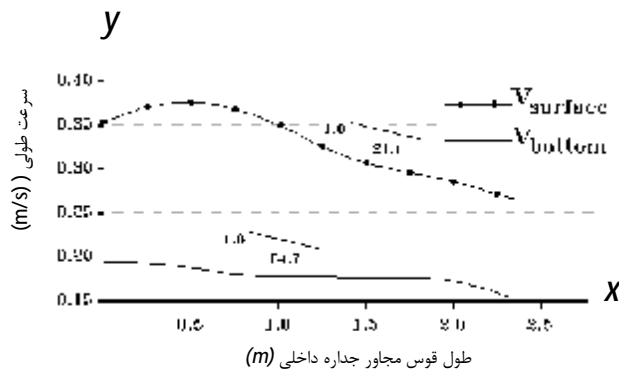
شکل 9. سرعت طولی مجاور جداره ی خارجی در قوس 4.



شکل 10. سرعت طولی مجاور جداره‌ی داخلی در قوس 4.



شکل 11. سرعت طولی مجاور جداره‌ی خارجی در قوس 3.



شکل 12. سرعت طولی مجاور جداره‌ی داخلی در قوس 3.

### روند تغییرات سرعت عرضی در قوس با توسعه یافتگی

#### متفاوت

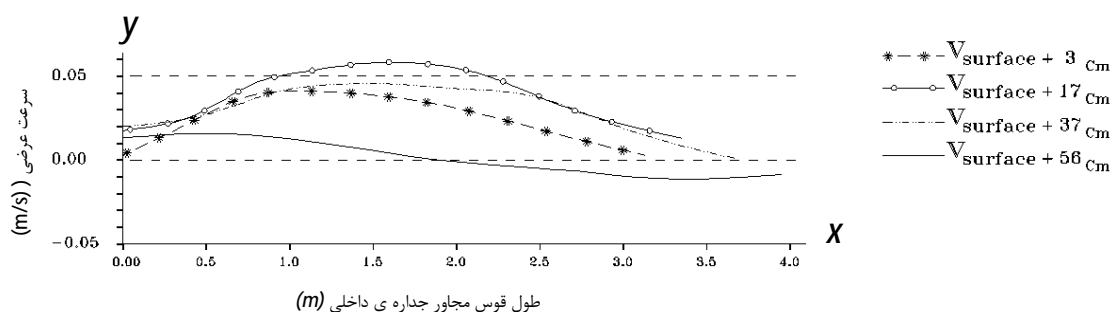
در این بخش علاوه بر تغییرات سرعت جریان عرضی از دید دیگری به قدرت جریان ثانویه پرداخته شده است. به علت اهمیت نقش سرعت عرضی در جابه‌جایی نقاط پر سرعت، چهار موقعیت به ترتیب 3، 17، 37 و 56 سانتی

متری از مجاورت جداره‌ی داخلی به منظور بررسی تغییرات سرعت عرضی در طول قوس انتخاب شده‌اند. در شکل 13 جریانهای عرضی در مجاور لایه‌ی سطح، و برای قوس با نسبت توسعه یافتگی 3 نشان داده شده است. در مجاورت دیواره‌ها کمترین سرعت عرضی وجود داشته و در میانه‌ی نهر، که در سرعت عرضی تعیین کننده می‌باشد، سرعت عرضی به بیشترین مقدار خود خواهد رسید. مقدار سرعت

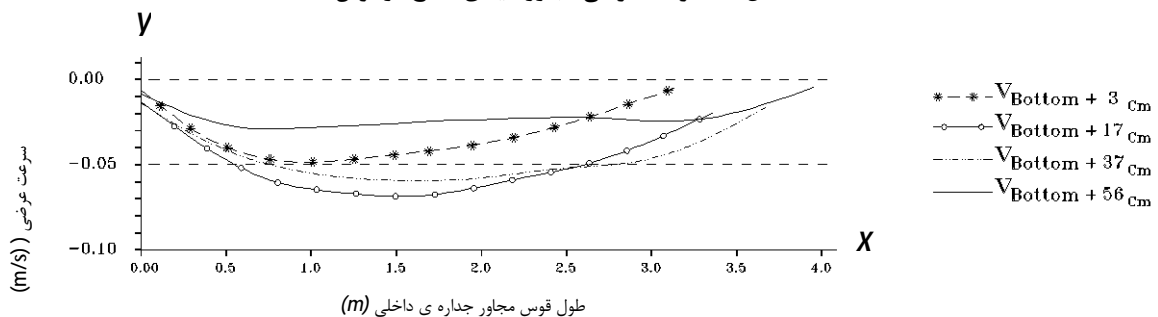
قوس 4 می باشد. به عبارتی، قدرت جریان ثانویه در قوس 3 بیشتر از قوس 4 است. در قوس 4 بعد از طی مسافتی تغییر علامت در راستای سرعت عرضی وجود خواهد داشت، و این اتفاق فقط در بخشی از قوس 3، و آن هم مجاور جداره ی خارجی، رخ داده است؛ به عبارت دیگر، هرچه قوس توسعه یافتگی بیشتری داشته باشد، مقدار سرعت عرضی در آن کاهش یافته که یک روش برای کاهش سرعت عرضی تغییر علامت آن است، زیرا برای تغییر علامت باید از مقدار صفر عبور کند. در قوس 4 یک محدوده از قوس دارای سرعت عرضی نزدیک صفر خواهد شد که این مطلب در قوس 3 دیده نمی شود.

عرضی در مجاور جداره ی خارجی کمتر از جداره ی داخلی می باشد.

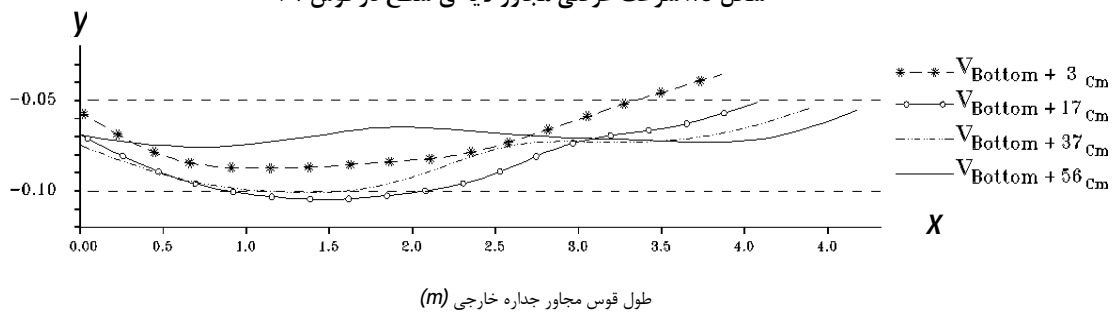
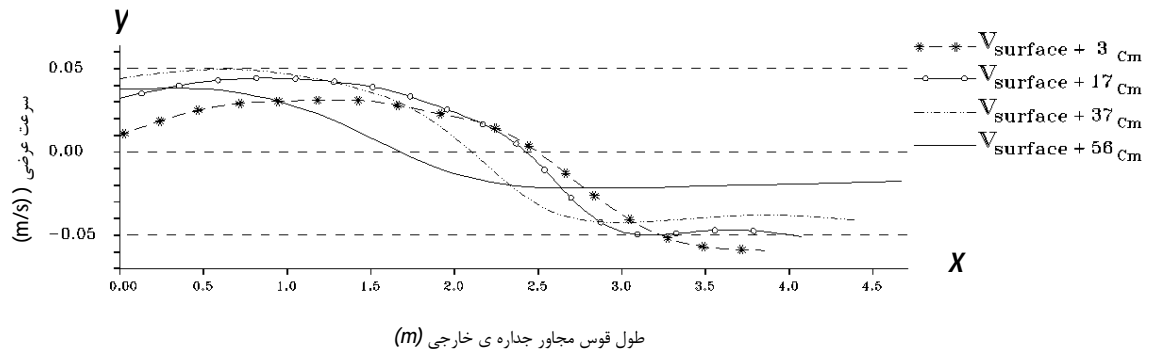
شکل 14 مربوط به مقدار سرعت عرضی در کف برای قوس 3 بوده که از نظر مقدار منفی سرعت عرضی، میانه ی نهر نسبت به جداره ها بیشتر، و مقدار کمینه ی آن در محدوده 40 تا 60 درجه خواهد بود. هر چه سرعت عرضی در کف و سطح اختلاف بیشتری نسبت به هم داشته باشند باعث قدرت بیشتر جریان ثانویه ایجاد گردیده در مقطع عرضی شده که اثرات مخربتری را بر جای خواهد گذاشت. در شکل های 15 و 16 به ترتیب سرعت عرضی در سطح و کف برای قوس 4 بررسی شده اند. با مقایسه ی بیشینه ی مقدار سرعت عرضی با کمینه ی آن در قوس 4 و 3 مشخص خواهد شد که این اختلاف در قوس 3 بیشتر از



شکل 13. سرعت عرضی مجاور لایه ی سطح در قوس 3.



شکل 14. سرعت عرضی مجاور لایه ی کف در قوس 3.

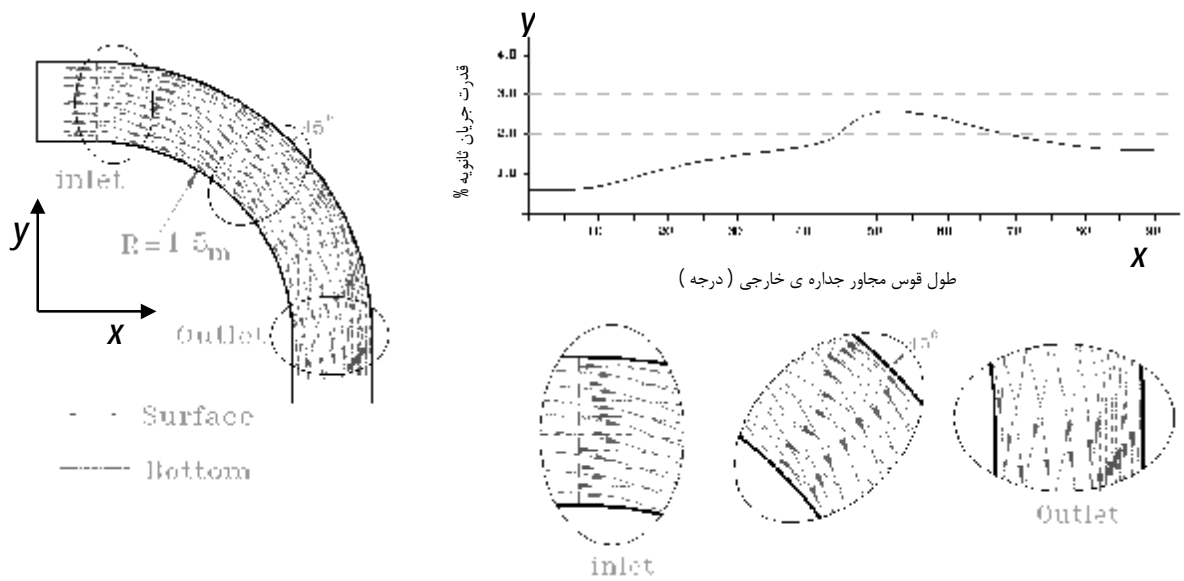


سرعت‌های عرضی در آن نقطه دارای مقدار بیشتری بوده و در نتیجه باعث شکل دهی قدرت جریان ثانویه بیشتر در آن نقطه می شود.

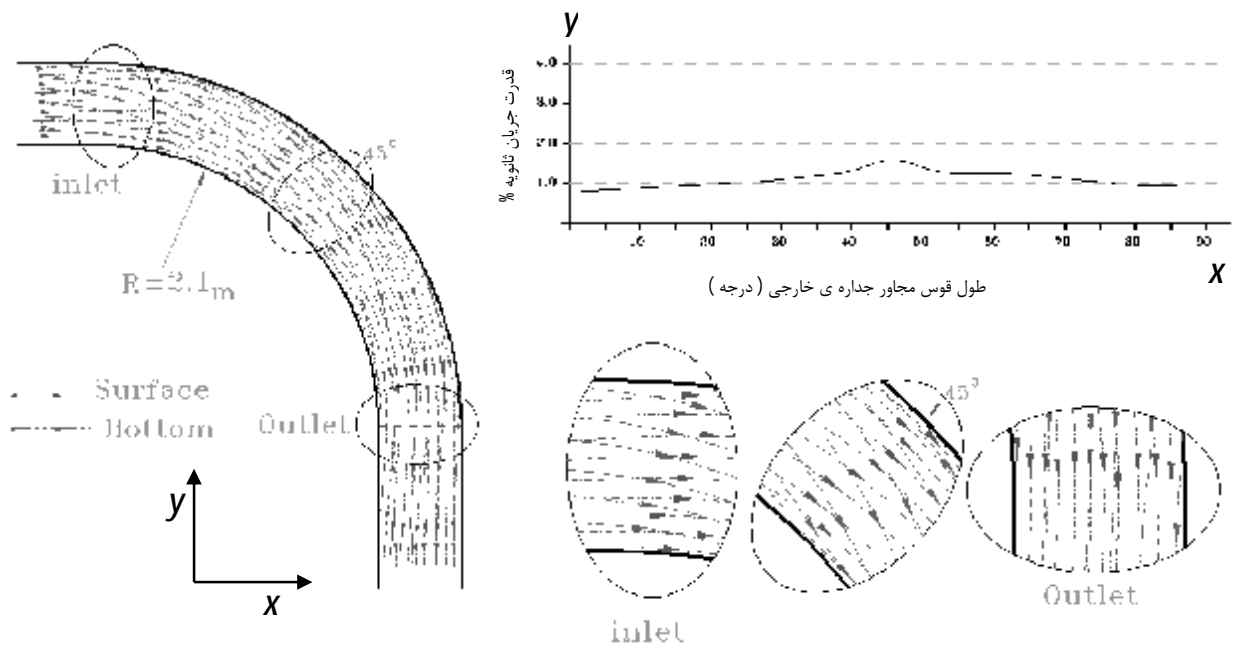
اختلاف زاویه ی بین خطوط سطح و کف ، مخصوصاً در میانه ی نهر ، در قوس 3 بیشتر از قوس 4 بوده، در نتیجه قدرت جریان ثانویه دارای مقدار بیشتری خواهد بود. در کل، هر چه مقدار شعاع انحناء به عرض نهر کاهش یابد، قدرت جریان ثانویه با افزایش همراه خواهد بود.

### قدرت جریان ثانویه

در این بخش طبق رابطه ی ارائه شده به وسیله ی شکری قدرت جریان ثانویه محاسبه گردیده و نتایج با مطالب ارائه شده در بخش قبل، و همچنین اختلاف زاویه بین خطوط جریان در لایه های مجاور سطح و کف سنجیده شده است . همان طور که در شکل‌های 17 و 18 به ترتیب مربوط به قوس 3 و 4 ملاحظه می شود، هر چه زاویه ی خطوط جریان در کف و سطح نسبت به هم بیشتر باشد،



شکل 17. قدرت جریان ثانویه در قوس 3.



شکل 18. قدرت جریان ثانویه در قوس 4.



## روند تغییرات تنش برشی کف در قوس با نسبت

### توسعه یافتگی متفاوت

به منظور بررسی دقیق تنش برشی در کف سه ناحیه و به ترتیب در مجاورت جداره ی داخلی، میانه ی قوس و مجاورت جداره ی خارجی انتخاب شده اند. تنشهای برشی به دست آمده در سه موقعیت فوق در دو قوس با هم مقایسه خواهند شد. در هر سه حالت تنش برشی کف در قوس 3 کمتر از قوس 4 بوده، در نتیجه تنش برشی در کف نهر با افزایش توسعه یافتگی در معرض فرسایش بیشتری قرار خواهد گرفت. این مطلب بیان می‌کند که با افزایش توسعه یافتگی، جریانهای پر سرعت به کف نزدیکتر شده که اثرات مخربتری را نشان می‌دهند.

در مجاورت جداره ی داخلی، روند تنش برشی از ابتدای قوس به سمت انتهای آن کاهش یافته که با دور شدن از جداره ی داخلی به سمت جداره ی خارجی روند تنش برشی از ابتدای قوس به سمت انتهای آن افزایش خواهد بود. دلیل آن انتقال خطوط پر سرعت از مجاورت جداره ی داخلی به سمت جداره ی خارجی در انتهای قوس می‌باشد.

### نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از تغییرات سرعت، الگوی جریان، قدرت جریان ثانویه و تنش برشی نشان می‌دهد که هر چه توسعه یافتگی قوس بیشتر باشد، بزرگی سرعت در مجاورت جداره ها افزایش یافته ولی از

میزان برخورد خطوط جریان در قوس کاسته می‌شود؛ بنابراین، قوسها با نسبت توسعه یافتگی کمتر در معرض فرسایش جداره ی بیشتری قرار خواهند گرفت.

در ضمن شیب تغییرات بزرگی سرعت در عمق متوسط با کاهش نسبت توسعه یافتگی افزایش می‌یابد؛ به عبارتی، افت بزرگی سرعت با کاهش نسبت توسعه یافتگی بیشتر می‌شود. یکی از دلایل آن طول پیمایش بیشتر در قوس با توسعه یافتگی بیشتر می‌باشد.

بررسی سرعت طولی نشان می‌دهد که در ناحیه ی میانه ی رأس قوس و مجاورت جداره ی خارجی قوس با کاهش نسبت توسعه یافتگی افزایش می‌یابد، و در نتیجه، صدمات جداره ای در مجاورت سطح در این ناحیه از قوس با کاهش توسعه یافتگی بیشتر می‌شود.

از طرف دیگر، با افزایش توسعه یافتگی قوس، مقدار سرعت عرضی در آن کاهش یافته در نتیجه از قدرت جریان ثانویه کاسته می‌شود. با این وجود، افزایش توسعه یافتگی از شدت تأثیر جریان طولی کاسته، و بر اثر پذیری قدرت جریان ثانویه در جابجایی خطوط جریان می‌افزاید.

بدین ترتیب، هر چه زاویه ی خطوط جریان در کف و سطح نسبت به هم بیشتر باشد، سرعتهای عرضی در آن منطقه دارای مقادیر بیشتری بوده، و در نتیجه باعث افزایش قدرت جریان ثانویه خواهد شد.

با افزایش توسعه یافتگی قوس، هسته جریانهای پرسرعت به کف نزدیکتر شده، در نتیجه تنشهای برشی در

- 3- فضلی ، م . 1387 . مطالعه آزمایشگاهی آبستگي در اطراف آبشكن کوتاه در قوس ، رساله دکتری رشته مهندسی عمران – هیدرولیک ، دانشکده فنی مهندسی ، دانشگاه تربیت مدرس .
- 4-Choudrury, U.K, and Narasimhan, S. 1977. “Flow in 180° Open Channel Rigid Boundary Bends”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 103(6), pp.651-657
- 5- Lien , H.C et al . 1999. ”Bend Flow Simulation Using 2D Depth-Averaged Model “ Journal of Hydraulic Engineering . ASCE .125(10)
- 6- Rodi W. and Michael A.Leschziner .1978. “Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow”. Journal of Hydraulic Division, Vol. 105, No. HY10.
- 7- Anvar , H. 1986 . “ Turbulent Structure in a River Bend ”. Journal of Hydraulic Engineering . ASCE. 112 ( 8 )
- 8- Shukry , A. 1950 . “ Flow Around Bends in an Open Flume “ paper No. 2411 . American Society of Civil Engineers.

مجاورت لایه‌ی کف افزایش خواهد یافت؛ این امر سبب فرسایش پذیری بیشتر در کف قوس می گردد.

به منظور مطالعه ی الگوی جریان ، با پیمایش به سمت میانه‌ی قوس و حدود زاویه ی 40 درجه، بزرگی سرعت عرضی در کف افزایش یافته که قدرت یافتن جریان ثانویه را توجیه می کند. نرخ افزایش بزرگی سرعت عرضی با نسبت توسعه یافتگی رابطه ای معکوس دارد. این مطلب بیان می دارد که قدرت جریان ثانویه با افزایش نسبت توسعه یافتگی نسبت عکس خواهد داشت .

## منابع

- 1- صفرزاده ، الف . 1382. شبیه سازی عددی جریان ثانویه در قوس رودخانه . سمینار کارشناسی ارشد هیدرولیک ، دانشکده فنی مهندسی ، دانشگاه تربیت مدرس .
- 2- فرقانی ، م.ج ، 1386 . بررسی الگوی جریان حول آبشکن ها در قوس 90 درجه در بستر تغییر شکل یافته ، پایان نامه کارشناسی ارشد هیدرولیک ، دانشکده فنی مهندسی ، دانشگاه تربیت مدرس .