

## بررسی عددی تأثیر شعاع انحنای قوس بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب

محمد واقفی\*<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲</sup>، بهنام سلیمانی<sup>۳</sup>، مریم اکبری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۱۴

### چکیده

بطور کلی، آبشکنها برای حفاظت از سواحل رودخانه‌ها به کار می‌روند. این سازه‌ها نیز اجرای اهداف مهمی مانند حفاظت از سواحل رودخانه‌ها، تغییرات خط القعر آنها، رسوبگذاری و فرسایش در طول رودخانه‌ها، مسائل زیست‌محیطی و غیره را بر عهده دارند. در این تحقیق به بررسی الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب در شرایط تغییر شعاع انحنای قوس و هندسه‌ی ثابت آبشکن ( $l/L=1$ ) و بدهی ثابت ۲۵ لیتر بر ثانیه در موقعیت ۴۵ درجه پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شعاع انحنای قوس، ابعاد گردابه در پایین دست آبشکن کاهش می‌یابند؛ بطوری که با افزایش شعاع مرکزی قوس به ۳ برابر عرض نهر، طول گردابه به اندازه‌ی ۳ برابر طول آبشکن و عرض گردابه به میزان برابر با ۰/۹ برابر طول آبشکن، کاهش می‌یابد. بحث پیرامون نقش شعاع انحنای قوس و تجزیه و تحلیل نتایج از موارد مطرح شده در این تحقیق می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آبشکن T شکل، الگوی جریان، شعاع انحنای قوس ۹۰ درجه، FLOW-3D

<sup>۱</sup> - استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

<sup>۲</sup> - استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۳</sup> - فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر

<sup>۴</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

\* - نویسنده مسوول مقاله: vaghefi@pgu.ac.ir

## مقدمه

یکی از روشهای متداول ساماندهی رودخانه و مهار کردن فرسایش کناره ی آن، استفاده از آبشکنها می باشد. ساختن آبشکنها باعث تغییر الگوی جریان در مقطع رودخانه و موجب انحراف خطوط جریان از دیواره های فرسایش پذیر به میانه ی رودخانه می شود؛ همچنین، آبشکنها با کاهش سرعت جریان، از شدت برخورد آن با دیوارها کاسته، و قابلیت رسوبگذاری جریان را افزایش می دهند. در قوس رودخانه ها، به دلیل اندرکنش بین جریانهای ثانویه و عدم یکنواختی نیمرخ سرعت در عمق، الگوی جریان به نام حلزونی تشکیل می شود. این الگو باعث ایجاد آشفتگی شدید در جریان می گردد. پیچیدگی الگوی جریان در قوس، همراه با پیچیدگی الگوی جریان پیرامون آبشکن، شرایط الگوی جریان پیرامون آبشکن را در قوس دو چندان پیچیده می سازد، زیرا که وجود جریانهای حلزونی در قوس در ترکیب با گردابه های تشکیل شده در بالادست و پایین دست آبشکن، تحلیل الگوی جریان را دشوار می سازد. با توجه به اثرات مهم و تعیین کننده ی آبشکن بر الگوی جریان، لزوم بررسی شبیه عددی الگوی جریان در اطراف آبشکنها در مسیر قوسی شکل آشکار می گردد. در این راستا، محققان زیادی در چند دهه ی گذشته به بررسی تأثیر عواملی پرشمار بر این سازه پرداخته اند، که بیشتر آنها در آزمایشگاه انجام گرفته است. خلاصه ای از مطالعات صورت گرفته در زمینه الگوی جریان و آبشستگی در رودخانه ها به صورت زیر می باشد:

احمد (۱۹۵۳، ۱۹۵۱)، به بررسی الگوی جریان و آبشستگی در اطراف آبشکنهای منفرد پرداخت. او برای این منظور آبشکنهایی تحت زوایای مختلف از ۳۰ تا ۱۵۰ درجه نسبت به بالادست در نهر پایه دار مستقیم قرار داد و مشاهده نمود که با افزایش زاویه ی ذکر شده از ۹۰ درجه سرعت نسبی جریان کاهش می یابد. گیل (۱۹۷۲)، در تحقیقی آزمایشگاهی نشان داد که طول حفاظت شده، یا فاصله ی بین آبشکنها، وابستگی زیادی به شعاع انحنای داشته، در مسیره های تقریباً مستقیم، فاصله ی بین آبشکنها در حدود ۵ برابر طول آبشکن می باشد، در حالی که در قوسها حدود یک تا دو برابر طول آبشکن خواهد

بود. راجراتنام و ناواچوکرا (۱۹۸۳)، تنشهای برشی بستر را در اطراف آبشکنها به صورت آزمایشگاهی، و با استفاده از لوله های پرستون و پیتو برای درصدهای تنگ شدگی (۸ و ۱۶ درصد) و اعداد فرود مختلف اندازه گیری گرفتند. نتایج آزمایشهای آنها بیانگر افزایش قابل توجه تنش برشی بستر در نزدیک دماغه ی پایین دست، و در همسایگی نزدیک آبشکن بود. تینگسانچالی و ماهسواران (۱۹۹۰)، الگوی جریان و تنش برشی پیرامون آبشکن را در کانال مستقیم و با بستری صلب به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای ارزیابی صحت نتایج، اطلاعات خروجی از نرم افزار خود را با داده های آزمایشگاهی راجاراتنا و ناواچوکرا مقایسه کردند چن و ایکدا (۱۹۹۷)، تحقیقی در خصوص ناحیه ی چرخشی ایجاد شده به وسیله ی توده های رسوبی انباشته شده ماسه ای در امتداد رودخانه کلرادو انجام دادند. آنها بیان کردند که میدان جریان در اطراف آبشکن به چهار ناحیه ی اصلی تقسیم می شود. یوجتوال و همکاران (۲۰۰۱)، آزمایشهایی را با توجه به اثر هندسه بر میدان جریان در اطراف آبشکنها به منظور بررسی تعداد و کیفیت گردابه ها انجام دادند. در این مطالعه نشان داده شده است که نسبت طول به عرض میدان جریان، تأثیری مستقیم بر شکل گیری و ابعاد گردابه ها خواهد داشت. بارباحیوا و دی (۲۰۰۳)، در تحقیقی آزمایشگاهی، به بررسی الگوی جریان پیرامون سه مقطع متفاوت آبشکن پرداختند. دستاورد تحقیقات آنها بیانگر پیدایش یک جریان چرخشی قائم کاملاً مشخص در اطراف آبشکن بود. آنها مشاهده نمودند که این گردابه در بالادست سازه دارای قدرتی بسیار بالا بوده، و همچنین، قدرت این گردابه ها با جلوگیری از رفتن جریان به سمت پایین دست، کاهش می یابد. اتما و مستو (۲۰۰۴) آزمایشهایی را در یک نهر با بستر صلب به منظور تعیین اثر آبشکن مستقیم بر الگوی جریان و تعیین نواحی جدا شدگی در بالادست و پایین دست آن انجام دادند. گیری و همکاران (۲۰۰۴)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی شبیه سازی جریان و آشفتگی در نهر پایه داری شبیه به پیچان رودها با وجود آبشکنهای غیر مستغرق پرداختند. ایشان سرعت جریان را با تغییر دادن موقعیت آبشکنها تعیین کرده، و

پستی و بلندی پایین‌دست بستر قوس ۹۰ درجه پرداختند. در این آزمایش‌ها، تأثیر فراسنج‌های طول آبشکن، موقعیت قرارگیری آن در قوس، و همچنین عدد فرود جریان بر تغییرات پستی و بلندی بستر در پایین‌دست آبشکن، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده‌ی وجود دو چاله‌ی آبشستگی در طول قوس است، که یک چاله در دماغه‌ی آبشکن و دیگری در پایین‌دست آن، شکل می‌گیرد. واقفی و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی تأثیر شعاع انحنایی نسبی قوس بر نحوه‌ی رفتار جریان، و الگوی شکل گرفته پیرامون آبشکن T شکل مستقر در موقعیت ۴۵ درجه در یک قوس ۹۰ درجه، برای سه قوس با شعاع انحنایی نسبی ۲، ۳ و  $R/B=4$ ، که در دامنه‌ی از قوس‌های ملایم و تند قرار می‌گیرند، اقدام نمودند. واقفی و همکاران (۲۰۱۲)، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل در نهر قوسی پرداخته و نتیجه گرفتند که با افزایش شعاع انحنای، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین، محل حداکثر عمق آبشستگی در فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ درصد طول آبشکن در بالادست آن می‌باشد.

به‌رغم مطالعات فراوان انجام شده جهت درک هیدرولیک جریان در قوس رودخانه‌ها، تاکنون مطالعه‌ی در زمینه‌ی اثر شعاع انحنایی قوس بر الگوی جریان به‌صورت عددی صورت نگرفته است. بدین منظور، در این تحقیق به بررسی تأثیر شعاع انحنایی قوس بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. همچنین، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی نیز با نتایج آزمایشگاهی در شرایط مشابه مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

## مواد و روشها

### معرفی شبیه عددی FLOW-3D و معادلات حاکم

نرم افزار FLOW-3D، یک شبیه مناسب برای مسائل پیچیده‌ی سیالات می‌باشد. این نرم‌افزار برای کمک به تحقیق در زمینه‌ی رفتار پویایی مایعات و گازها در موارد وسیع برای مسائل یک تا سه بعدی طراحی شده است. این نرم‌افزار بر اساس قوانین بنیادی جرم اندازه‌ی

میدان گردابه‌ها و شدت آشفتگی را به صورت دو بعدی اندازه گرفتند. مک‌کوی و همکاران (۲۰۰۵)، با بررسی عددی میدان جریان در یک نهر مستقیم اطراف آبشکن مستقیم بیان داشتند که از ویژگیهای جریان، جدایی‌های بزرگ، شیب فشارهای مخالف و ایجاد گردابه‌های ناپایدار می‌باشد. فضلی و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون یک آبشکن تیغه‌ای مستقر در قوس ۹۰ درجه، که در موقعیتهای مختلف در قوس قرار گرفته بود، پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش موقعیت استقرار آبشکن در طول قوس، طول ناحیه‌ی جدایی افزایش یافته، در حالی که طول ناحیه‌ی بازگشتی کاهش می‌یابد. قدسیان و واقفی (۲۰۰۹)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات عدد فرود و طول بال و جان آبشکن T شکل مستقر در موقعیت ۷۵ درجه بر الگوی جریان واقع در قوس ۹۰ درجه پرداختند. ایشان نشان دادند که با افزایش طولی آبشکن، طول ناحیه جدایی و گردابه شکل گرفته در این ناحیه افزایش می‌یابد. واقفی و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول آبشکن T شکل بر میزان آبشستگی در قوس ۹۰ درجه اقدام نموده و نشان دادند که با افزایش طول آبشکن، حداکثر عمق آبشستگی، و همچنین ابعاد و شمار حفره‌ی آبشستگی، افزایش می‌یابد. موسوی نایینی و همکاران (۲۰۱۰)، به اندازه‌گیری سرعت سه بعدی جریان با استفاده از ADV، و بررسی اثر موقعیت آبشکن T شکل (در موقعیتهای مختلف ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه) بر مقدار گردابه‌گونی در نهر قوسی پرداختند. ابهری و همکاران (۲۰۱۰)، مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان را پیرامون آبشکن در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب در شرایط تغییر موقعیت آبشکن در طولی نهر، و هندسه‌ی ثابت آبشکن انجام دادند. آنها مشاهده کردند که خطوط جریان در تراز نزدیک بستر به سمت جداره‌ی داخلی، و در تراز نزدیک سطح آب به سمت جداره‌ی خارجی متمایل می‌شوند. همچنین، محل وقوع حداکثر سرعت طولی در ابتدای قوس، در نیمه‌ی داخلی مقطع، سپس به سمت دیواره‌ی خارجی نهر جابه‌جا می‌شود. واقفی و قدسیان (۱۳۸۹)، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر استقرار آبشکن T شکل بر

ضریب نفوذ به صورت  $V_F = C_F u$  است که  $C_F$  یک عدد ثابت می‌باشد. شکل  $F$  وابسته به نوع مسأله‌ای است که شبیه‌سازی می‌شود. مسائل غیر قابل تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد یا دو سیال با سطح شبکه‌ترک هستند. برای سیال یک حالتی،  $F$  تابع حجم سیال بوده و بیانگر حجم اشغال شده به وسیله‌ی سیال می‌باشد؛ بنابراین،  $F=1$  نشانگر وجود سیال و  $F=0$  نشانگر وجود حباب و حفره است (باباعلی و همکاران، ۱۳۸۷؛ شاملو و جعفری، ۱۳۸۷).

شبکه‌بندی، شرایط مرزی و شرایط اولیه در نظر گرفته در این شبیه‌سازی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

#### • شبکه‌بندی

برای این که بتوان به راحتی سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی را برای هر نقطه از جریان تعیین کرد، از یک شبکه‌بندی به تعداد ۴۲ مقطع در طول، ۷۲ مقطع در عرض و ۶۰ مقطع در ارتفاع استفاده شده است. به دلیل وجود جریان در قوس ۹۰ درجه، برای شبیه‌سازی جریان از شبکه‌بندی قطبی استفاده شده است که با توجه به شرایط مسأله، نسبت به شبکه‌بندی کارتزین بسیار مناسبتر می‌باشد. شکل ۲-۲، طرح‌واره‌ای از شبکه‌بندی تولید شده در قوس ۹۰ درجه را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با نزدیک شدن به آبشکن، از شبکه‌های ریزتر، به دلیل افزایش شیب، استفاده شده است تا با جزئیات بیشتر بتوان به بررسی شرایط جریان پیرامون آبشکن پرداخت.

#### • شرایط مرزی

در جهات مختلف دستگاه مختصات، شرایط مرزی به صورت زیر تعریف شده است:

X Direction: wall-wall

Y Direction: outflow-volume flow rate

Z Direction: wall-symmetry

این شرایط مرزی پس از بررسی‌های انجام گرفته، و با توجه به این که مختصات قطبی می‌باشند، به این صورت انتخاب شده و برای حالت کارتزین صادق نمی‌باشند. همان‌طور که مشخص است، شرایط مرزی در جهت  $X$ ، به دلیل این که مربوط به دیواره‌های نهر می‌باشد، از نوع wall انتخاب شده است. شرایط مرزی

حرکت، بقای انرژی پایه‌گذاری شده است. نرم‌افزار Flow-3D، یک شبکه‌ی آسان را از اجزای مستطیلی به کار می‌گیرد که محیط جریان را به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم کرده، و برای هر سلول مقادیرهای میانگین کمیت‌های وابسته را محاسبه می‌کند. این شبکه دارای مزایای زیادی، از جمله تولید آسان، منظم و نیاز به ذخیره‌ی حافظه‌ی کم می‌باشد. پایه‌ی معادلات حرکت در این نرم‌افزار بر اساس روش تفاضل محدود می‌باشد. بر این اساس، نرم‌افزار از روش‌های دقت مرتبه‌ی اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد.

به‌منظور تهیه‌ی هندسه میدان جریان برای شبیه‌سازی قوس ۹۰ درجه و آبشکن مورد استفاده، از نرم‌افزار Autocad استفاده شده است. پس از آماده‌سازی STL های مورد نظر از نهر و آبشکن، هندسه‌ی مورد نظر در نرم‌افزار Flow-3D تهیه می‌شود.

برای تحلیل شبیه نیز از روش Explicit و شبیه آشفتگی RNG K-ε استفاده شده است. در این نرم‌افزار دو روش عددی برای شبیه‌سازی سطوح به‌کار می‌رود: ۱- روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۲- روش کسر مساحت - حجم مانع (FAVOR): این روش برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزها کاربرد دارد (2008, Flow Science Inc).

از آن‌جا که این نرم‌افزار برای شبیه کردن سطح آزاد از روش VOF استفاده می‌کند، احتیاج به تعریف تابع حجم ( $F$ ) دارد، که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

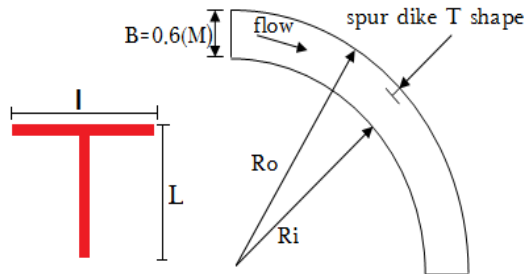
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial (FA_x u)}{\partial x} + R \frac{\partial (FA_y v)}{\partial y} + \frac{\partial (FA_z w)}{\partial z} + \zeta \frac{FA_x u}{x} \right] \quad (1)$$

$$FDIF = \frac{1}{V_F}$$

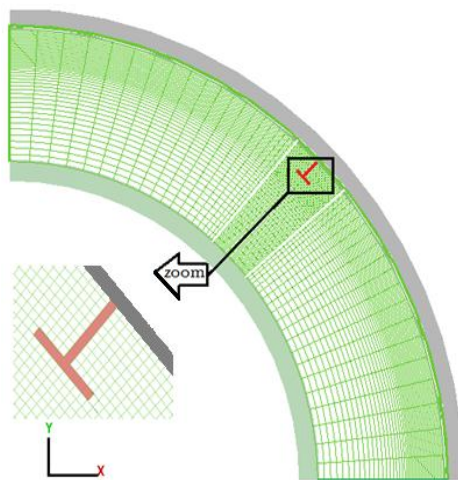
$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} (DFA_x \frac{\partial F}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y} (DFA_y \frac{\partial F}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (DFA_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \zeta \frac{DFA_x F}{x} \right\} \quad (2)$$

که در آن  $V_F$  کسر حجم باز به جریان، و  $\rho$  چگالی حجم سیال است. مؤلفه‌های سرعت ( $u, v, w$ ) در جهات  $(x, y, z)$  می‌باشند.  $A_x$  سطح جریان در جهت  $x$  است.  $A_y$  و  $A_z$  بطور مشابه در جهت  $y$  و  $z$  می‌باشند.

مشخصات نهر آزمایشگاهی و آبشکن مورد استفاده به صورت طرح‌واره‌ای نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر افقی و هندسه‌ی قوس و آبشکن مورد نظر.



شکل ۲- طرح‌واره‌ای از شبکه‌بندی تولید شده

### صحت‌سنجی

جهت اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، این نتایج با دستاوردهای آزمایشگاهی در شرایط یکسان مقایسه، و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای صحت‌سنجی نتایج عددی از شبیه‌سازی آزمایشگاهی واقعی و همکاران (۱۳۸۸) که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام گردیده، استفاده شده است. در شکل (۳)، مقایسه‌ی مؤلفه طولی سرعت در شبیه‌های عددی و آزمایشگاهی در مقطعی به فاصله ۳۵ درصد عرض نهر در بالادست آبشکن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، سرعت در بستر نسبت به سطح نهر کمتر است، اما با فاصله گرفتن از قوس داخلی این سرعت در بستر و سطح تقریباً هم اندازه می‌شود. مطابق آنچه در

ورودی نهر و خروجی آن نیز در جهت  $Y$  مشخص شده‌اند. در جهت  $Z$  نیز شرایط مرزی کف و سطح آب اعمال به شبیه مورد مطالعه اعمال شده است.

### • شرایط اولیه

شرایط اولیه در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی، بدهی جریان و ارتفاع آب در ابتدای ورودی قوس ۹۰ درجه (بالادست) هستند که به ترتیب برابر با ۲۵lit/s و ۱۲cm می‌باشند.

شرایط مرزی (دیواره، فشار، سطح آزاد و ...) و نوع شبکه‌بندی‌های مختلف (کارتزین-قطبی، و همچنین انتخاب تعداد شبکه‌ها در جهات و قسمت‌های مختلف قوس)، از فراسنجهای بسیار مؤثر بر پایداری و تحلیل جریان، و همچنین تعیین اتمام زمان شبیه‌سازی جریان به‌وسیله‌ی نرم‌افزار می‌باشد. پس از بررسی‌های فراوان در زمینه‌ی تأثیر این فراسنجهای، شبکه‌بندی ارائه گردیده در شکل ۲ و شرایط مرزی ذکر شده در بالا، به عنوان حالت بهینه برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور بررسی اثر شعاع انحنا بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه، به دیواره‌های شبیه‌سازی چهار قوس که با شعاع انحنایی (R) ۲، ۳، ۴ و ۵ برابر عرض نهر می‌باشند، پرداخته شده است.

### معرفی شبیه آزمایشگاهی

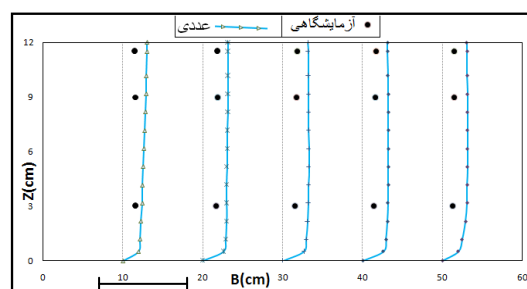
نهر مورد استفاده در این آزمایش، یک نهر قوسی با زاویه‌ی مرکزی ۹۰ درجه می‌باشد. ارتفاع دیواره‌های داخلی و خارجی نهر ۳۰ سانتی‌متر، عرض نهر ۶۰ سانتی‌متر (B)، ضخامت دیواره‌های نهر ۱۰ سانتی‌متر، شعاع داخلی قوس ۲۱۰ سانتی‌متر و شعاع خارجی آن ۲۷۰ سانتی‌متر می‌باشد. بدهی جریان (Q) در تمامی شبیه‌ها ثابت و برابر با ۲۵ لیتر بر ثانیه است. عمق جریان (Z) برابر با ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. آبشکن مورد استفاده در این آزمایش T شکل است؛ طول جان (L) آن ۹ سانتی‌متر، طول بال (l) آن نیز ۹ سانتی‌متر، ارتفاع آن ۲۵ سانتی‌متر بوده و موقعیت استقرار آبشکن در زاویه‌ی ۴۵ درجه به صورت قائم و غیر مستغرق در قوس خارجی می‌باشد. در شکل (۱)،

می‌شود. با افزایش شعاع مرکزی قوس به میزان سه برابر عرض نهر، طول گردابه به میزان ۶۵ درصد طول آبشکن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۴-ج)، مشاهده می‌گردد، در قوس توسعه یافته ( $R=4B$ )، دو سلول چرخشی به دلیل تأثیر آبشکن در نزدیک شدن سرعت حداکثر به سمت ساحل داخلی، به یکدیگر نزدیک شده و به سمت ساحل داخلی متمایل شده‌اند.

از آن‌جا که احداث آبشکن باعث تنگ شدن مسیر جریان، به دنبال آن افزایش سرعت در مقطع تنگ شده می‌گردد، در نتیجه الگوی جریان بطور قابل ملاحظه‌ای متاثر از حضور آبشکن خواهد بود. شکل (۵) نمونه‌ای از خطوط جریان در بالادست و پایین‌دست آبشکن در تراز ۵۰ درصد عمق جریان در قوس با شعاع انحنایی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در بالادست و پایین‌دست آبشکن گردابه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت تشکیل می‌شود. ابعاد این گردابه با تغییر شعاع انحنای دستخوش تغییراتی اساسی می‌گردند. در بالادست آبشکن، با افزایش شعاع انحنایی قوس، طول و عرض گردابه افزایش می‌یابد. در پایین‌دست، با افزایش شعاع انحنای قوس، طول و عرض گردابه کاهش می‌یابد. در قوس تند، نقطه‌ی شروع ناحیه‌ی جدایی جریان به فاصله‌ی  $1/6$  برابر طول آبشکن در بالادست می‌باشد. در قوس با شعاع انحنایی  $R=5B$ ، نقطه‌ی شروع جدایی جریان به فاصله‌ی  $0/55$  برابر طول آبشکن در بالادست است؛ بنابراین، با افزایش شعاع مرکزی قوس به میزان سه برابر عرض نهر، نقطه‌ی شروع جدایی جریان در بالادست به میزان  $1/1$  طول آبشکن به آبشکن نزدیکتر می‌شود.

شکل (۶) نیمرخ سه بعدی سرعت را در مقطعی به فاصله‌ی معادل طول آبشکن در بالادست آبشکن نشان می‌دهد. چنانچه در شکل (۶-الف) مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به قوس خارجی، مؤلفه‌ی طولی سرعت در بالادست آبشکن دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای می‌گردد. مقادیر سرعت در سطح آب مثبت است، که این موضوع نشان دهنده‌ی حرکت خطوط جریان به سمت آبشکن می‌باشد. در فاصله‌ی ۱۵ درصدی عرض نهر از ساحل خارجی در بالادست آبشکن، و در لایه‌های نزدیک بستر

شکل (۳) نشان داده شده است، نتایج آزمایشگاهی و عددی از انطباق بسیار خوبی برخوردار می‌باشند.



شکل ۳- مقایسه‌ی شبیه عددی با نمونه‌ی آزمایشگاهی مؤلفه طولی سرعت در مقطعی به فاصله‌ی معادل ۳۵ درصد عرض نهر در بالادست آبشکن در قوس توسعه یافته ( $R=4B$ ).  $100 \text{ cm/s}$

## نتایج و بحث

به منظور تعیین تأثیر شعاع انحنای بر الگوی جریان پیرامون آبشکن سرسپری در قوس ۹۰ درجه، الگوی جریان در مقاطع طولی، عرضی و تصویر افقی بررسی گردیده و نتایج زیر حاصل شده‌اند:

شکل (۴)، نمونه‌ای از الگوی جریان عرضی و بردارهای سرعت در مقطعی را به فاصله‌ی  $0/75$  طول آن و در بالادست آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه از قوس با  $R/B$  های مختلف را نشان می‌دهد. در هر مقطع، بردارهای نشان‌دهنده‌ی مؤلفه‌های  $v$  و  $w$ ، به ترتیب سرعت در جهت عرضی و قائم می‌باشند. با مقایسه‌ی شکلها مشاهده می‌گردد که با تغییر شعاع انحنای قوس، با وجود آبشکن T شکل در موقعیت ۴۵ درجه، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در الگوی جریان حاکم بر بردارهای سرعت در مقطع عرضی ایجاد خواهد شد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، جهت جریانهای عرضی در بالادست به سمت دیوار داخلی می‌باشد. در قوس تند و ملایم، گردابه در فاصله‌ی ۱۰ درصد عرض نهر از ساحل خارجی در تراز نزدیک کف تشکیل می‌شود. در نزدیک ساحل داخلی در هر چهار قوس گردابه مشاهده می‌گردد، که ابعاد این گردابه‌ها با افزایش شعاع انحنایی قوس کاهش می‌یابد، به طوری که در قوس تند این گردابه به طول  $1/3$  برابر طول آبشکن، و به فاصله‌ی ۲۰ درصد عرض نهر از ساحل داخلی و در تراز ۶۰ درصد عمق جریان از کف تشکیل

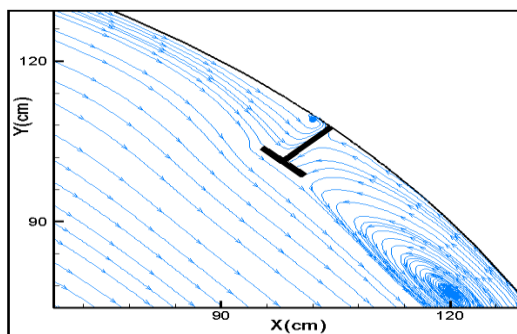
می‌شوند. جریانهای طولی رو به پایین و بالا در مقاطع طولی، نقش موثری را در چرخه‌ی جریان ثانویه، و در نتیجه جریان حلزونی، دارند. در قوس تند در بالادست، به فاصله‌ی ۱/۱۵ برابر طول آبشکن از آبشکن، گردابه‌هایی در تراز ۲۰ و ۸۵ درصد عمق جریان از کف تشکیل می‌شوند. در پایین‌دست آبشکن، در قوس تند، برگشت جریان به فاصله‌ی ۷/۲ برابر طول آبشکن رخ می‌دهد، که این جریان با برخورد به آبشکن گردابه‌ای در جهت گردش عقربه‌های ساعت در تراز ۷۰ درصد عمق جریان از کف در پشت آبشکن تشکیل می‌گردد (مطابق شکل-۷-الف). در قوس با شعاع انحنایی  $R=3B$ ، برگشت جریان به فاصله‌ی ۴/۹ برابر طول آبشکن در پایین‌دست رخ می‌دهد (مطابق شکل-۷-ب). با افزایش شعاع انحنا از طول برگشت جریان در پایین‌دست کاسته می‌شود. در قوس توسعه یافته ( $R=5B$ )، در پایین‌دست گردابه‌ای به طول ۴ برابر طول آبشکن، و به عرض معادل ۹۰ درصد عمق جریان در پشت آبشکن، و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت تشکیل می‌شود.

در شکل (۸) نمونه‌ای از نیمرخ برآیند سرعت در تصویر افقی در صفحه‌ی نزدیک سطح آزاد برای آبشکن مستقر در قوس با شعاع انحنای مختلف نشان داده شده است. بررسی تغییرات سرعت در شکل (۸) نشان می‌دهد که در مقاطع ابتدایی قوس، موقعیت حداکثر سرعت به نزدیک ساحل خارجی کشیده می‌شود، که این پدیده با افزایش شعاع انحنای قوس محسوس‌تر می‌شود. وجود آبشکن در قوس باعث انحراف موقعیت حداکثر سرعت طولی از جداره‌ی خارجی به سمت قوس داخلی می‌گردد. در پایین‌دست آبشکن، و در نزدیک دیواره‌ی خارجی، مقادیر برآیند سرعت کاهش می‌یابند، و چنانچه مشاهده می‌شود، مقادیر مؤلفه برآیند سرعت در ساحل داخلی با افزایش شعاع انحنا افزایش می‌یابد. در قوس با شعاع انحنای  $R=3B$  (مطابق شکل-۸-ب)، در پایین‌دست آبشکن و در نزدیک دیواره‌ی خارجی مقادیر برآیند سرعت، منفی می‌باشند که با حرکت جریان به سوی انتهای قوس تغییر علامت داده و مثبت می‌شود. تغییر علامت و کاهش سرعت در پایین‌دست در نزدیک ساحل

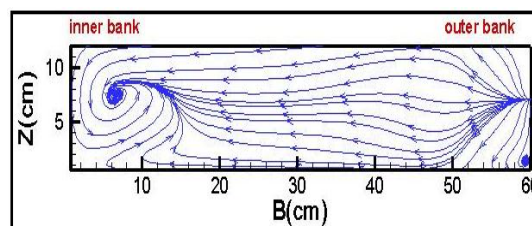
مقادیر مؤلفه طولی سرعت منفی بوده، که با حرکت به سمت سطح آب مقادیر تغییر علامت داده و مثبت می‌شوند. در قوس تند مشاهده می‌شود که در بالادست و در نزدیک ساحل خارجی مقادیر مؤلفه‌ی طولی سرعت در نزدیک بستر منفی می‌باشند که با حرکت جریان به سمت سطح آب مثبت گردیده و در نزدیک سطح آب دوباره منفی می‌شوند. دلیل این امر وقوع گردابه و جریانهای چرخشی در پشت آبشکن می‌باشد. با افزایش شعاع انحنای قوس، مؤلفه‌ی طولی سرعت فزونی می‌یابد. شکل (۶-ب) مؤلفه‌ی عرضی سرعت را در بالادست آبشکن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در لایه‌های نزدیک سطح جهت جریان به سمت قوس داخلی بوده و در لایه‌های میانی در نزدیک قوس داخلی جهت جریان به سمت ساحل خارجی می‌باشد. در محدوده‌ی بین بال و ساحل خارجی، با افزایش شعاع انحنا مقادیر مؤلفه‌ی عرضی سرعت افزایش می‌یابد. شکل (۶-ج) مؤلفه‌ی عمقی سرعت را در بالادست آبشکن نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در میانه‌ی نهر و ساحل داخلی جریانهای بالارونده حاکم است. با افزایش شعاع انحنای قوس، مقادیر مؤلفه‌ی عمقی سرعت افزایش می‌یابد؛ همچنین، در نزدیک ساحل خارجی جریانهای پایین رونده حاکمند.

در شکل (۷) نحوه‌ی تغییرات جریان در مقطع طولی و در فاصله‌ی ۵ درصدی عرض نهر از ساحل خارجی در طول قوس تند ( $R=2B$ )، قوس با شعاع انحنایی  $R=3B$  توسعه یافته ( $R=4B$ )، و قوس با شعاع انحنایی  $R=5B$  برای آبشکن منفرد در موقعیت ۴۵ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در قوس تند (مطابق شکل-۷-الف) و در بالادست آبشکن، از ترکیب جریانهای طولی و عرضی، گردابه تشکیل می‌شود. در پایین‌دست آبشکن، از ترکیب جریانهای بازگشتی با جریانهای عرضی، گردابه‌هایی شکل می‌گیرند، که ابعاد آنها با افزایش شعاع انحنای قوس فزونی می‌یابد. در قوس تند (مطابق شکل-۷-ب)، و در پایین‌دست آبشکن، جریانهای طولی رو به پایین مشاهده می‌گردند و در قوسهای متوسط و توسعه یافته، در پایین‌دست آبشکن، جریانهای طولی رو به بالا دیده

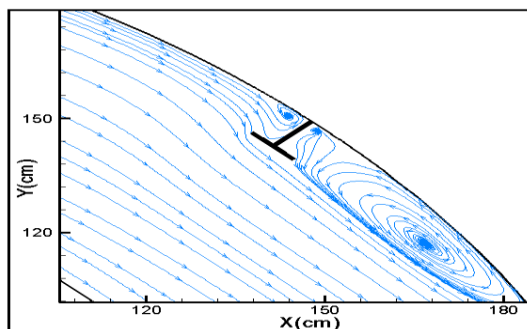
داخلی باعث تشکیل گردابه و ایجاد جریانهای چرخشی در این ناحیه می‌گردد.



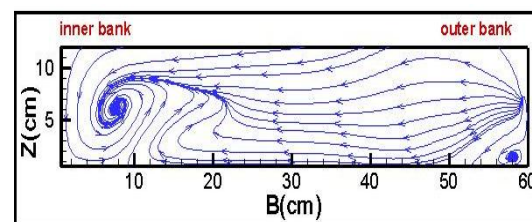
(الف)



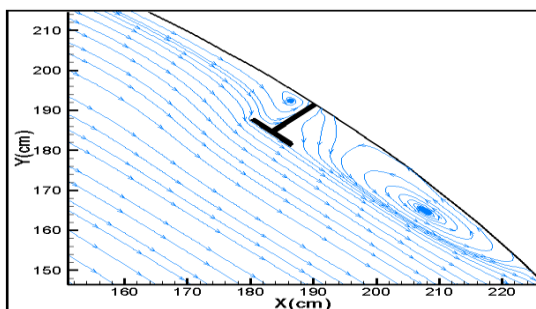
(الف)



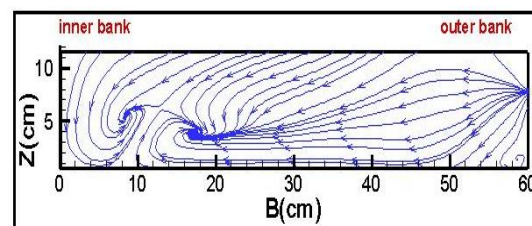
(ب)



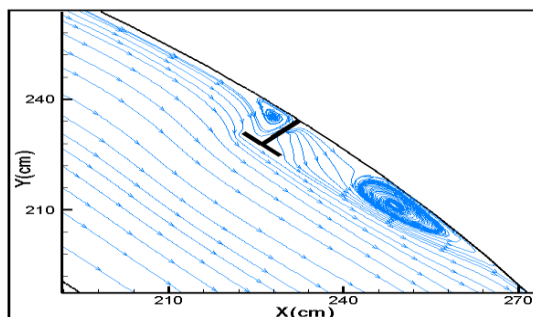
(ب)



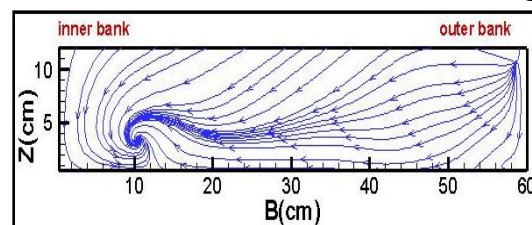
(ج)



(ج)



(د)

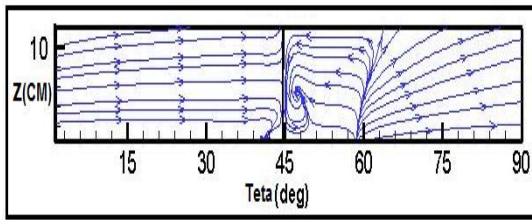


(د)

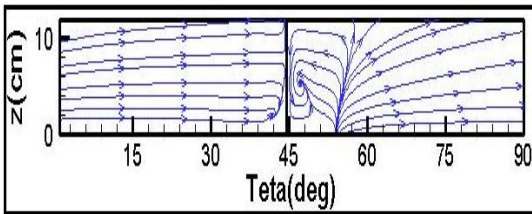
شکل ۴- نمونه‌ای از الگوی جریان عرضی و بردارهای سرعت در مقطعی به فاصله‌ی ۰/۷۵ طول آبشکن در بالادست آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه از قوس انحنای  $R=3B$  (الف) تند  $(R=2B)$ ، (ب) قوس با شعاع انحنای  $R=3B$ ، (ج) توسعه یافته  $R=4B$  و (د)  $R=5B$ .

شکل ۵- نمونه‌ای از خطوط جریان و بردارهای سرعت در تراز معادل ۵۰ درصد عمق جریان از بستر اولیه در بالادست و پایین‌دست آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه از قوس (الف) تند  $(R=2B)$ ، (ب) قوس با شعاع انحنای  $R=3B$ ، (ج) توسعه یافته  $R=4B$  و (د) قوس با شعاع انحنای  $R=5B$ .

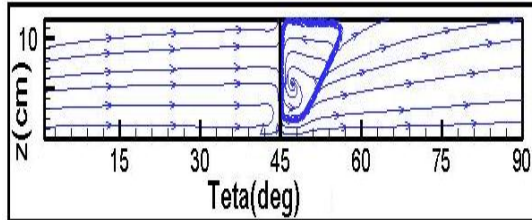




(ب)

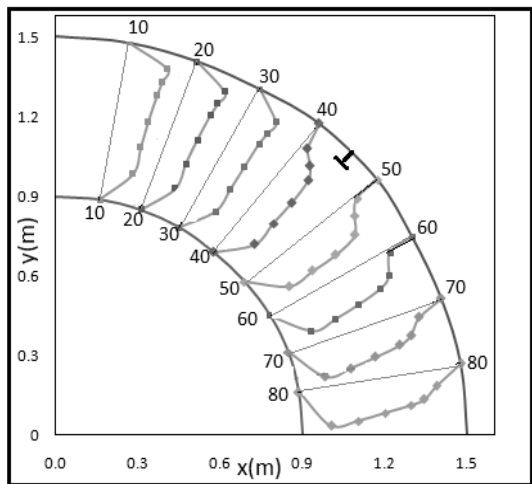


(ج)

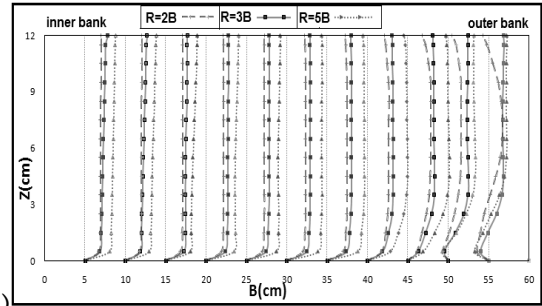


(د)

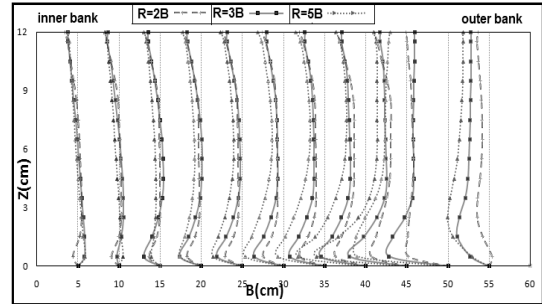
شکل ۷- نمونه‌ای از مقاطع طولی سرعت به فاصله‌ی ۵ درصد عرض نهر از ساحل خارجی برای آبشکن منفرد مستقر در قوس (الف) تند، (ب) در قوس با شعاع انحنای  $R=3B$ ، (ج) توسعه یافته، (د)  $R=5B$ .



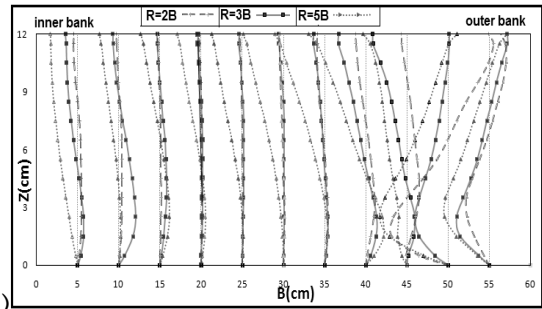
(الف)



(الف)

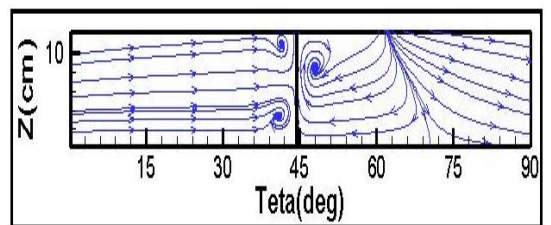


(ب)



(ج)

شکل ۶- نیمرخ سه بعدی سرعت به فاصله‌ی معادل طول آبشکن در بالادست آبشکن مستقر در موقعیت ۴۵ درجه در قوس با شعاع انحنای مختلف  
 (الف) طولی 100 cm/s  
 (ب) عرضی 30 cm/s  
 (ج) عمقی 10 cm/s



(الف)

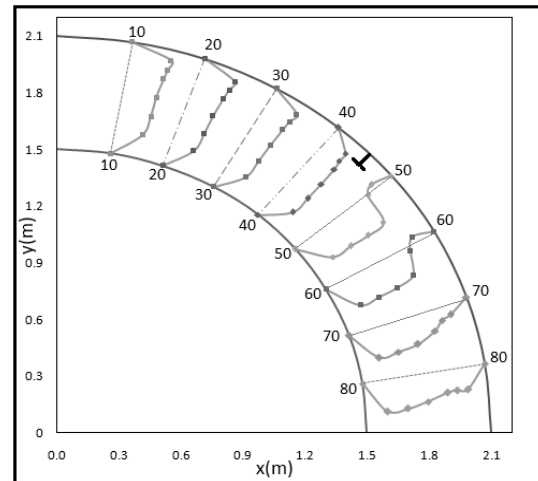
در طول نهر افزایش یافته، و از ابعاد گردابه‌های تشکیل شده در پایین دست آبشکن کاسته می‌شود. همچنین، در تراز ۵ درصدی عمق جریان از کف، با افزایش شعاع مرکزی قوس به میزان سه برابر عرض نهر، طول گردابه به میزان ۳ برابر طول آبشکن و عرض گردابه به میزان ۰/۹ طول آبشکن کاهش می‌یابد.

با بررسی خطوط جریان در بالادست و پایین دست آبشکن در تراز میانی نهر، مشاهده شد که در قوس تند، نقطه‌ی شروع جدایی جریان به فاصله ۱/۶۵ برابر طول آبشکن از آبشکن در بالادست است، اما در قوس با شعاع انحنایی  $R=5B$ ، نقطه‌ی شروع جدایی جریان به فاصله ۰/۵۵ طول آبشکن از آبشکن در بالادست می‌باشد. همچنین، گردابه‌های افقی با جهت خلاف عقربه‌های ساعت در بالادست و پایین دست آبشکن در تراز میانی نهر مشاهده می‌شود.

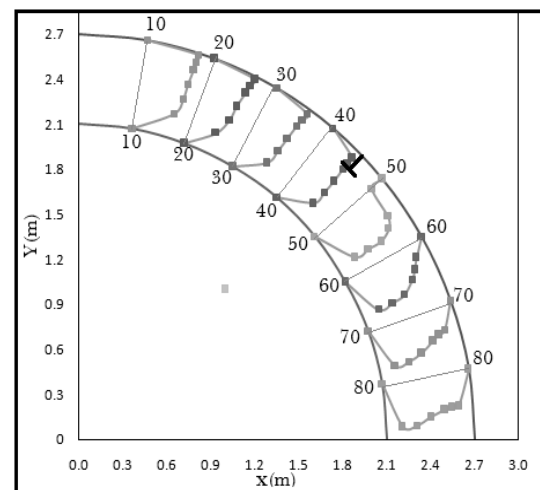
### منابع

۱. باباعلی، ح.ر.، ا. شمسایی، و ع. خدابخشی. ۱۳۸۷. معرفی نرم‌افزار Flow-3D و مدل‌سازی جریان آزاد و مستغرق درون پارشال فلوم. چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه سمنان.
۲. شاملو، ح.، و پ. جعفری. ۱۳۸۷. بررسی اثر زبری کف در الگوی جریان اطراف پایه‌های پل به کمک نرم‌افزار Flow-3D. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
۳. واقفی، م.، و م. قدسیان. ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استقرار آبشکن T شکل بر توپوگرافی پایین دست بستر قوس ۹۰ درجه. نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی شبکه‌هد. ۲۲: ۱۱۳-۱۲۸.
۴. واقفی، م.، م. قدسیان، و س.ع.ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک علوم کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه گرگان. ۱۶: ۱۰۵-۱۲۹.
۵. واقفی، م.، س.ع. موسوی نائینی، و م. قدسیان. ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شعاع انحنایی قوس بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه. مجله آب و فاضلاب. ۱: ۱۶-۲۳.

6. Abhari, M. N., M. Ghodsian, M. Vaghefi, and N. Panahpur. 2010. Experimental



(ب)



(ج)

شکل ۸- نمونه‌ای از نیمرخ سرعت برابند در صفحه‌ی نزدیک سطح آب (۹۵ درصد عمق جریان از کف) برای آبشکن مستقر در (الف) قوس تند ( $R=2B$ )،  $50 \text{ cm/s}$  (ب) قوس با شعاع انحنایی  $R=3B$ ،  $60 \text{ cm/s}$  (ج) قوس توسعه یافته ( $R=4B$ )،  $70 \text{ cm/s}$ .

### نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر شعاع انحنایی قوس بر میدان جریان پیرامون آبشکن T شکل غیرمستغرق و مستقر در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. همچنین، نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده و انطباق مناسب آنها نشان داده شده است.

بررسی‌های انجام شده حاکی از آنند که با افزایش شعاع انحنایی قوس، مؤلفه طولی، عرضی و عمقی سرعت

- with spurs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 15: 301-309.
17. McCoy, A., G. Constantinescu, and L. Weber. 2005. Coherent structures in a channel with groyne fields: A numerical investigation using LES. *Impacts of Global Climate Change*. 1-12.
  18. Mousavi Naeini, S. A., M. Vaghefi, and M. Ghodsian. 2010. Secondary currents in bend channel with T Shape spur dike. 5th conf. Civil Eng. Mashhad University.
  19. Rajaratnam, N., and B. A. Nwachukwu. 1983a. Erosion near groyne structures. *J. Hydraul. Res. IAHR*. 21: 227-287.
  20. Rajaratnam, N., and B. A. Nwachukwu. 1983. Flow near groyne-like structures. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 109: 463-480.
  21. Tingsanchali, T., and S. Maheswaran. 1990. 2-D depth-averaged flow computation near groin. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 116: 71-86.
  22. Uijtewaal, W. S. J., D. Lehmann, and A. V. Mazijk. 2001. Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments. *J. Hydraul. Eng.* 127: 928-936.
  23. Vaghefi, M., M. Ghodsian, and S. A. A. Salehi. 2009. Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90° channel bend. *Arabian J. Sci. Tech.* 34: 337-348.
  24. Vaghefi, M., M. Ghodsian, and S. A. A. Salehi. 2012. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend. *J. Hydraul. Eng.* 138: 471-474.
  - and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow Measurement and Instrumentation*. 21: 292-298.
  7. Ahmad, M. 1951. Spacing and protection of spurs for bank protection. *Civil Eng. Public. Rev.* 46: 3-7.
  8. Ahmad, M. 1953. Experiments on design and behavior of spur dikes. *Proc. Cong. IAHR*: 145-159.
  9. Barbhuiya, A., and S. Dey. 2003. Vortex flow field in a scour hole around abutments. *Int. J. Sed. Res.* 18: 310-325.
  10. Chen, Y., and S. Ikeda. 1997. Horizontal separation flow in shallow open channel with spur dike. *J. Sci. Hydraul. Eng.* 15: 15-30.
  11. Ettema, R., and M. Muste. 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 130: 635-646.
  12. Fazli, M., M. Ghodsian, and S. A. A. Salehi. 2008. Scour and flow field around a spur dike in 90° Bend. *Int. J. Sed. Res.* 23: 56-68.
  13. Flow Science, Inc. 2008. FLOW-3D User's Manual. Flow Science, Inc., 9.3 editions.
  14. Ghodsian, M., and M. Vaghefi. 2009. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T shape spur dike in a 90° bend. *Int. J. Sed. Res.* 24:145-158.
  15. Gill, M. A. 1972. Erosion of sand beds around spur dikes. *J. Hydraul. Div. ASCE*. 98: 91-98.
  16. Giri, S., Y. Shimizu, and B. Surajata. 2004. Laboratory measurement and numerical simulation of flow and turbulence in a meandering-like flume

