

مطالعه عددی آبشستگی و الگوی جریان در نهر قوسی ۹۰ درجه با وجود آبشکن T شکل با تغییر در شعاع انحنای قوس

محمد واقفی^{۱*}، پریسا رادان^۲

چکیده

آبشکنها سازه‌هایی می‌باشند که بطور عرضی در کرانه‌ی رودخانه به منظور حفاظت ساحل خارجی در مسیرهای مستقیم و قوسی استفاده می‌شوند. با استفاده از آبشکنها می‌توان به حفاظت از سواحل خارجی رودخانه‌ها، و انحراف سرعت‌های بیشینه از ناحیه‌ی قرارگیری آبشکن پرداخت. علاوه بر ویژگیهای آبشکن، ویژگیهای هندسی نهر مورد مطالعه نیز بر الگوی جریان و آبشستگی بستر تأثیر گذار می‌باشند که موضوع مورد مطالعه در این تحقیق است. در این مطالعه به بررسی آبشستگی و الگوی جریان در نهر قوسی شکل با تغییر در نسبت شعاع میانگین قوس به عرض نهر (BR_c) از ۲ تا ۵، که در محدوده‌ی قوسها از ملایم تا تند می‌باشد، پرداخته شده است. در این مطالعه از SSIM-1، که یکی از نرم افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی مهندسی آب و رسوب می‌باشد، بهره گرفته شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت شعاع قوس به عرض نهر عمق بیشینه‌ی چاله‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. خطوط جریان در نیمرخ‌های طولی و عرضی بررسی گردیده و نیمرخ‌های بی بعد بستر در مقطع افقی و نیمرخ‌های طولی و عرضی بستر با نتایج آزمایشگاهی واقفی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان دادند که تطابق خوبی بین نمونه‌ی آزمایشگاهی واقفی و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار SSIM وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی آبشستگی، الگوی جریان، آبشکن T شکل، شعاع انحنای قوس، نرم افزار SSIM.

^۱ - استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

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

مقدمه

آبشکن سازه ای صلب است که از ساحل دریا؛ و رودخانه ها در جهت عرضی ساخته می شود. این نوع از سازه الگوی جریان را بر هم زده و حرکت رسوبات را محدود می کند. آبشکنها در رودخانه ها از فرسایش جلوگیری کرد، و در دریا، شرایط مناسبی را برای کشتیرانی ایجاد می کنند. آبشکنها عموماً از سنگ، چوب و سایر مصالح ساخته شده و خط ساحلی مصنوعی را ایجاد می کنند. مطالعات صورت گرفته خصوصاً در مسیرهای قوسی، تصویر بهتری را از نحوه ساماندهی رودخانه ها ارائه می دهند. واقفی و همکاران (۱۳۸۸) تغییرات زمانی ابعاد چاله آبشستگی و پستی و بلندی بستر پیرامون آبشکن T شکل را مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین دست قوس باعث افزایش ابعاد چاله آبشستگی می گردد. تقیان و همکاران (۱۳۹۰) به واسنجی دریاچه های آبگیر قطاعی مستغرق با استفاده از بهینه سازی غیر خطی پرداختند. محاسبات آنها نشان دادند که معادله ای اندازه ی حرکت همواره عمق استغراق را کمتر از میزان واقعی برآورد می نماید. قمشی و همکاران (۱۳۹۱) به پیش بینی روند رسوبگذاری در مخزن سد جیرفت با استفاده از شبیه GSTAR3 پرداختند. بعد از واسنجی شبیه به کمک داده های آبنگاری مخزن سد جیرفت نحوه ی رسوبگذاری در مقطع طولی و عرضی ترسیم گردید. بشاورد و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی فراسنجهای مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریانهای غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت برشی و غلظت جریان ورودی، ضریب حمل رسوب بدنه افزایش می یابد؛ ایشان روابطی را برای ظرفیت حمل رسوب بدنه پیشنهاد کردند. عباسی و ملک نژاد یزدی (۱۳۹۱) به مطالعه ی آزمایشگاهی تأثیر طول و هندسه گروه آبشکنها بر آبشستگی اطراف آنها در مسیر مستقیم پرداخته و دریافتند که آبشکن T، شکل به لحاظ داشتن عمق آبشستگی کمتر دماغه، بر آبشکن مستقیم ارجحیت دارد. ترکمانزاد و همکاران (۱۳۹۳) پیشروی جریان گل

آلود را در مخزن سد سفیدرود و میزان تأثیر دریاچه های تحتانی سد را بر تخلیه جریان گل آلود در نمایشنامه های مختلف با استفاده از شبیه Mike3 مورد ارزیابی قرار دادند. میودوزوفسکی و ماینو (۲۰۰۵) به تحلیل سه بعدی جریان در اطراف آبشکن نفوذپذیر با استفاده از شبیه VOF پرداختند. آنها دریافتند که با بهینه سازی شبیه و کاهش سرعت، محاسبات بسیار خوبی برای طراحی سازه های هیدرولیکی ایجاد می شود. آتیا و ال سعید (۲۰۰۶) به عملکرد هیدرولیکی تغییر زاویه آبشکن تیغه ای در نهر روباز پرداختند. عزالدین و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آبشستگی موضعی پیرامون آبشکنها پرداخته و معادلات مختلفی را جهت محاسبه ی طول و ارتفاع آبشستگی به دست آمد. چوی و اوه (۲۰۰۴) به شبیه سازی معادلات آب کم عمق برای ماندسازی عددی جریان در اطراف آبشکن پرداختند. مطالعات آنها نشان دادند که سرعت جریان اطراف آبشکن به درستی افزایش می یابد. مسجدی و همکاران (۲۰۱۰) به مطالعه آزمایشگاهی عمق آبشستگی در اطراف آبشکن T شکل در یک نهر قوسی ۱۸۰ درجه پرداختند. مطالعات آنها نشان دادند که با افزایش عدد فرود و طول آبشکن، عمق آبشستگی بیشینه افزایش می یابد. ناجی و همکاران (۲۰۱۰) به مطالعه ی عددی و آزمایشگاهی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداختند. آنها در این تحقیق از نرم افزار SSIIM، مدل عددی K-ε جهت مطالعه عددی استفاده کردند. آنها دریافتند که برنامه ی SSIIM-1 قادر به شبیه سازی دقیق الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه است. واقفی و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه ی آزمایشگاهی آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه پرداختند. ایشان در این تحقیق مطالعه هندسه ی چاله آبشستگی و نیز پستی و بلندی بستر حول آبشکن غیر مستغرق را مطالعه کردند. متین فرد و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی تغییر شرایط هیدرولیکی در اطراف گروه آبشکن L شکل و نفوذ پذیر در مسیر قوسی شکل پرداخته و دریافتند که مقادیر بیشینه ی سرعت و آبشستگی در مجاورت آبشکن از زاویه ی ۳۰ درجه تا آبشکن در زاویه ۹۰ درجه کاهش می یابد. دیوفرن و

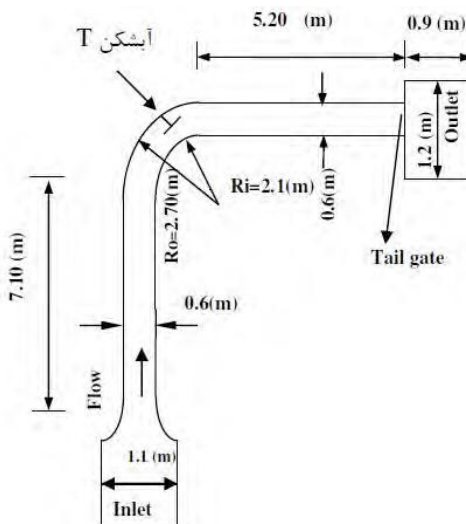
توجه به تغییر در نسبت شعاع انحنا به عرض نهر پرداخته می‌شود. نمونه‌ی مورد مطالعه یک نهر قوسی با مقطع مستطیلی با زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به جریان و با شعاع انحنا‌ی میانگین ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴ و ۳/۰ متر و نسبت BR_c (شعاع انحنا به عرض نهر) ۲، ۳، ۴ و ۵ می‌باشد، عرض نهر ۰/۶ متر است. در بالادست نهر یک بخش مستقیم به طول ۷/۱ متر و در پایین دست آن قسمت مستقیم دیگری به طول ۵/۲ متر قرار دارد؛ برای در نظر گرفتن همزمان الگوی جریان و رسوب کف نهر از موادی به ضخامت ۳۵ سانتی متر پوشیده شده است که قطر متوسط ذرات آنها ۱/۲۸ میلی متر می‌باشد. بدهی جریان، ثابت و برابر با ۲۵ لیتر بر ثانیه است. آبشکن مورد استفاده در این تحقیق دارای مقطع افقی T شکل، طول جان و بال ۹ و ضخامت ۱ سانتی متر می‌باشد که در موقعیت ۴۵ درجه و ساحل خارجی قوس ۹۰ درجه نصب گردیده است. در شکل ۱ نمایش طرح واره نهر مورد مطالعه نشان داده شده است. در این مطالعه جهت صحت سنجی نتایج از نمونه‌ی آزمایشگاهی واقفی در حالت $B=4R_c$ و در حالت قرارگیری آبشکن به صورت عمودی استفاده شده است.

وزکویز (۲۰۱۴) به بررسی تأثیرات هیدرولیکی نواقص هندسی نهرهای ونتوری را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات انجام شده در گذشته کمک به درک ویژگیهای جریان و رسوب در صورت حضور و عدم حضور آبشکن نموده و راه را برای انجام تحقیقات بیشتر با در نظر گرفتن فراسنجهای مؤثر دیگر بر ویژگیهای جریان و رسوب هموار کرده اند. از آن که آبشستگی در مسیره‌های قوسی شکل بیش از مسیره‌های مستقیم بوده، و نظر به وجود شعاعهای انحنا‌ی مختلف مسیره‌های قوسی شکل در طبیعت، و دشواری های موجود در مطالعات آزمایشگاهی، هدف مطالعه بررسی تغییرات آبشستگی بستر و الگوی جریان در نتیجه‌ی تغییر در شعاع انحنا‌ی نهر تحت تأثیر آبشکن، بدون در نظر گرفتن تغییر در ویژگیهای آبشکن با استفاده از شبیه سازی عددی می‌باشد.

مواد و روش ها

معرفی شبیه مورد مطالعه

با توجه به شکلهای مختلف رودخانه ها در طبیعت، در این تحقیق به بررسی روند تغییرات بستر و خطوط جریان پیرامون آبشکن سر سپری مستقر در قوس ۹۰ درجه با



شکل ۱- نمایش طرح واره نهر مورد مطالعه

بار ذرات معلق از رابطه‌ی ون راین^۳ استفاده می‌کند. در رابطه‌ی (۳)، d قطر ذرات، a ارتفاع سطح مبنا که برابر با ارتفاع زبری معادل در نظر گرفته می‌شود، τ تنش برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی بستر برای حرکت ذرات رسوب بر اساس نمودار شیلدز، ρ_w و ρ_s به ترتیب چگالی آب و رسوب، v گرانش روی آب و g نیز شتاب گرانش می‌باشد:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_T \frac{\partial c}{\partial x_j}) \quad (۱)$$

$$\Gamma_T = \frac{V_T}{Sc} \quad (۲)$$

$$c_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{a \left[\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (۳)$$

شبیه عددی SSIIM برای به دست آوردن سرعت جریان آب، معادلات ناویر-استوکس^۴ را در مورد یک شبکه سه بعدی غیر متعامد با استفاده از شبیه آشفنگی $K-\varepsilon$ حل می‌کند. معادله‌ی ناویر-استوکس برای یک جریان غیر قابل تراکم و با چگالی ثابت به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{U_i U_j}) \quad (۴)$$

که در آن اولین عبارت سمت چپ، عبارت گذرا و وابسته به زمان، عبارت بعدی، عبارت قابل انتقال، اولین عبارت سمت راست، عبارت فشار و آخرین عبارت، عبارت تنشهای رینولدز می‌باشد. همچنین، این شبیه عددی از روش حجم معیار همراه با الگوریتم قاعده‌ی توانی یا الگوریتم مرتبه‌ی دوم برای گسسته سازی معادلات استفاده کرده و برای جفت فشار و سرعت از روش سیمپل^۵ بهره برده، سپس از روش حل ضمنی برای تولید کردن میدان سرعت در هندسه‌ی شبیه استفاده می‌کند.

آشنایی با نرم افزار SSIIM و معادلات حاکم بر آن

در این مطالعه جهت شبیه سازی الگوی جریان و رسوب از نرم افزار SSIIM^۱ استفاده شده است. نرم‌افزار SSIIM در سال ۱۹۹۰-۱۹۹۱ توسط اولسن (۲۰۱۱) برای استفاده در رشته‌های رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک و مهندسی رسوب توسعه یافت. در ابتدا انگیزه‌ی اصلی برای ساختن این برنامه، شبیه سازی جابجایی رسوب در رودخانه‌ها و نهرهایی با هندسه‌ی ساده و کلی بود، ولی بعداً این برنامه برای شبیه سازی مباحث دیگر مهندسی هیدرولیک مثل، شبیه سازی سرریز، افت بار آبی در تونل‌ها، روابط عمق بده در رودخانه‌ها و اندازه گیری تیرگی و کدورت جریان نیز مورد استفاده قرار گرفت. مزیت اصلی SSIIM در مقایسه با دیگر برنامه‌های CFD، قابلیت شبیه سازی انتقال رسوب در نهرهای با هندسه‌ی پیچیده، و با بستر متحرک، دارای اندازه‌های مختلف رسوب و با در نظر گرفتن بار بستر و بار معلق، شکل‌های مختلف بستر و تاثیر شیب بستر می‌باشد. در نرم افزار SSIIM جهت حل میدان جریان از معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود. از شبیه $k-\varepsilon$ برای محاسبه‌ی تنش برشی آشفته بهره مندی می‌گردد. این نرم افزار محاسبات انتقال رسوب را بر اساس اندازه‌ی ذرات انجام می‌دهد. انتقال رسوب به دو بخش بار بستر و ذرات معلق تقسیم می‌شود. شبیه عددی SSIIM برای محاسبه انتقال رسوب ابتدا با حل معادله‌ی پخش-انتقال، غلظت رسوب را در فاصله‌ی بین سطح آب تا سطح مبنا محاسبه می‌کند، که ارتفاع سطح مبنا را نیز برابر با ارتفاع زبری معادل فرض می‌نماید. معادله‌ی پخش-انتقال نیز برای میزان رسوبها به صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌گردد، که در آن C میزان رسوبها، w سرعت سقوط ذرات و Γ_T ضریب پخش می‌باشند که با استفاده از شبیه $k-\varepsilon$ به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌گردد، که در آن Sc عدد اشمیت است که پیش‌فرض آن در شبیه عددی SSIIM برابر با ۱ بوده، و U_i نیز گرانش روی گردابه‌ای است. نرم‌افزار SSIIM برای محاسبه‌ی

³⁻ Van Rijn

⁴⁻ Navier-stoks

⁵⁻ Simple

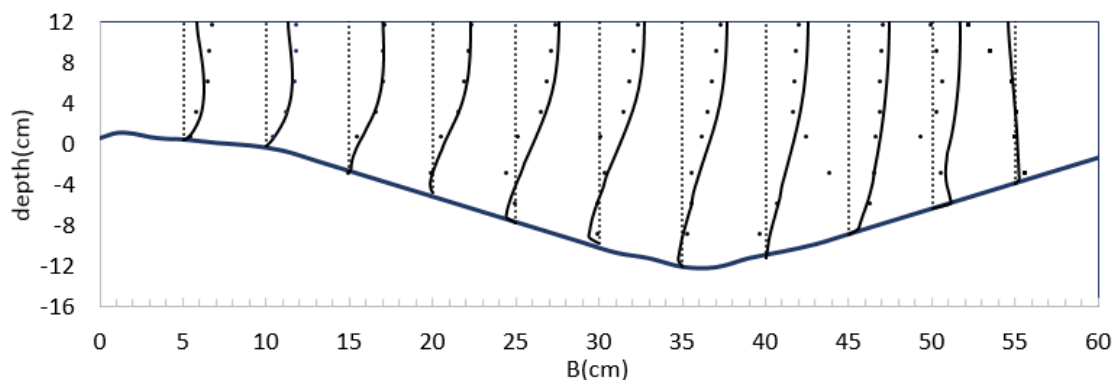
¹⁻ Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option

²⁻ Computational Fluid Dynamics

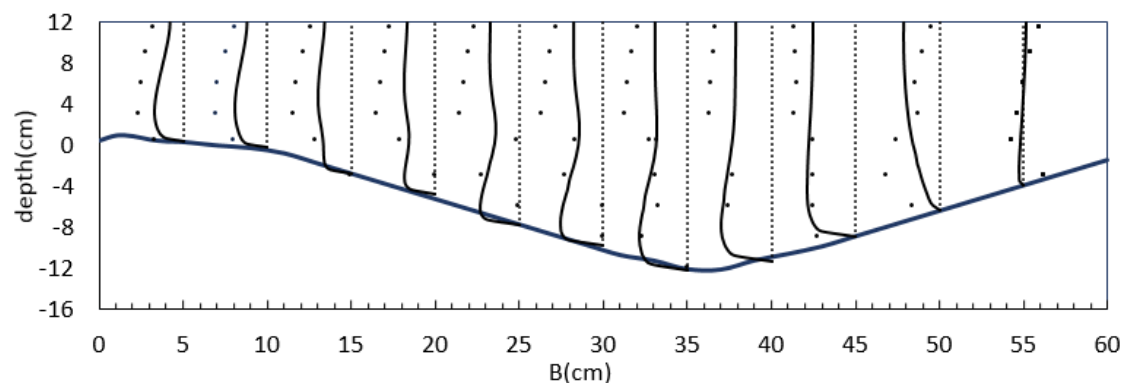
صحت سنجی الگوی جریان

به دلیل تفاوت در شرایط مرزی شبیه‌های عددی و نمونه آزمایشگاهی، ساده‌سازیهای معادلات در شبیه‌سازی عددی، خطاهای انسانی در برداشت مقطع عرضی در آزمایشگاه، و عدم حساسیت مورد نیاز دستگاه‌های آزمایشگاهی، بویژه در اندازه‌گیری سرعتها در مجاورت بال و جان آبشکن می‌باشد.

در شکل ۲ به بررسی مقادیر سرعتهای طولی و عرضی برای داده‌های عددی و آزمایشگاهی در مقطع ۴۶/۵ درجه و در پایین دست آبشکن در حالت $B=4R_C$ پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر سرعتهای عددی و آزمایشگاهی تا درصد قابل قبولی بر هم منطبق می‌باشند. عدم انطباق کامل داده‌ها تا حدی



(الف)



(ب)

شکل ۲- مقادیر سرعت در جهت (الف) طولی و ۵۰ cm/s و (ب) عرضی در مقطع عرضی ۴۶/۵ درجه برای داده‌های عددی و آزمایشگاهی

شکلهای ۲- الف تا ۲- ت پستی و بلندی بی بعد بستر با تغییر نسبت شعاع میانگین قوس به عرض نهر (B/R_C) برابر با ۲ تا ۵ نشان داده شده است. در این شکل‌های مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای قوس آبشستگی بیشینه افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به دلیل تغییر در موقعیت سرعتهای بیشینه دانست. در قوسهای ملایم ($B > 3R_C$)، بعد از میانه قوس سرعتهای بیشینه به سمت قوس خارجی منتقل می‌گردد.

نتایج و بحث

استفاده از آبشکنها و تغییر در ویژگیهای هندسی نهر به صورت همزمان الگوی پیچیده جریان در آن را به همراه دارد. در شکل ۳ نیمرخ بی بعد بستر در مقطع افقی نهر در شعاع‌های مختلف انحنا نشان داده شده است. در این شکل‌های، X و Y مختصات کارترین و R_C ، ds و h به ترتیب عرض میانگین نهر، تغییرات پستی و بلندی بستر و ارتفاع جریان در ورودی نهر می‌باشند. در

در حالت $B=5R_c$ به فاصله‌ی ۱۶ سانتی متری از ساحل داخلی آغاز می‌شود؛ این پدیده در حالیست که در سایر حالات از مجاورت چاله آبشستگی شروع می‌گردد. در پایین دست آبشکن نیز تفاوت آبشستگی میان حالت‌های BR_c برابر با ۵ و ۴، هفت برابر تفاوت آبشستگی در نزدیکی انتهای قوس مقادیر آبشستگی در حالت BR_c برابر با ۴ و ۵ مقدار ناچیزی می‌باشد. در شکل ۴- ب مشاهده می‌شود که تفاوت آبشستگی در حالت شعاعهای انحنای متفاوت بیشتر در میانه‌ی نهر رخ می‌دهد، زیرا در آن جا تأثیر شعاع انحنا نهر کاهش یافته و تأثیر آبشکن در آبشستگی در نهر آشکار می‌گردد. در این مقطع، آبشستگی در میانه‌ی نهر در حالت‌های BR_c برابر با ۲ تا ۴ افزایش، و در حالت $B=5R_c$ کاهش می‌یابد. همچنین، در تمامی حالات، به استثنای $B=2R_c$ در انتهای قوس نیز آبشستگی وجود دارد، مقدار عمده‌ی آبشستگی از مجاورت چاله‌ی آبشستگی آغاز می‌شود. در شکل (۴- ج)، که نیمرخ بستر در مجاورت ساحل داخلی و به فاصله ۹۵ درصد عرض نهر از ساحل خارجی نشان داده شده است، مشاهده می‌گردد که در ورودی قوس فقط در $B=5R_c$ آبشستگی در بالادست آن وجود دارد، و به دنبال آن پشته‌ی رسوبی در بالادست قوس با ارتفاع بیشتری نسبت به پشته‌ی رسوبی در پایین دست آبشکن تشکیل می‌شود. این در حالی است که در سایر شعاعهای انحنا، پشته‌ی رسوبی در انتهای قوس ارتفاع بیشتری دارد. در $B=2R_c$ نیز آبشستگی در فواصل ۲/۷ تا ۹/۴ برابر طول بال از موقعیت آبشکن، به دلیل وجود پشته‌ی رسوبی به موازات ساحل داخلی در میانه‌ی قوس، و ریزش جریان از روی آن، که پیش از این توضیح داده شد، ایجاد می‌گردد. با مقایسه نیمرخ‌های طولی در حالت $B=4R_c$ برای داده‌های عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که در مقاطع مختلف، نیمرخ‌های طولی در حالت عددی و آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار می‌باشند.

در شکل ۵ نیمرخ عرضی بستر در فواصل مختلف از موقعیت آبشکن نشان داده شده است. در شکل‌های ۵- الف و ۵- ب نیمرخ عرضی بستر در مقاطع به فاصله‌ی

این امر باعث افزایش میزان تنش برشی در مقاطع بعد از میانه قوس خواهد شد. چرا که این قسمت از قوس در محدوده ناحیه سرعت‌های بیشینه قرار می‌گیرد، لذا، برای قوسهای ملایم تنش برشی در نواحی انتهایی قوس نزدیک به قوس خارجی بیشتر خواهد بود. اما در قوسهای تند ($B < 3R_c$) به دلیل این محدوده سرعت‌های بیشینه در تمامی طول قوس در نزدیکی قوس داخلی می‌باشد، مقدار تنش برشی در قوس با شعاع انحنای نسبی ۲ نسبت به سایر حالات کمتر است (شریعت زاده ۱۳۹۰). در تمامی شکل‌های مشاهده می‌شود که آبشستگی بیشینه در بالادست آبشکن و در مجاورت آن قرار داشته است که سبب کاهش آبشستگی در کل طول نهر می‌شود. همچنین، تشکیل پشته‌ی رسوبی در مجاورت ساحل داخلی در تمامی نسبت‌های شعاع به عرض نهر در مجاورت ساحل داخلی ولی با ابعاد متفاوت مشاهده می‌شود. در این شکل‌های مشاهده می‌شود پشته‌ی رسوبی که در میانه‌ی نهر تشکیل می‌شود (نمونه ای از آن در شکل ۳- الف نشان داده شده است). با افزایش شعاع، انحنا به سمت قوس داخلی متمایل می‌گردد، به گونه‌ای، که در حالت $B=2R_c$ در میانه‌ی نهر و در حالت $B=5R_c$ به مجاورت ساحل داخلی منتقل شده، در کنار پشته‌ی رسوبی اصلی تشکیل شده، و سبب افزایش ابعاد آن می‌گردد. در حالت $B=2R_c$ به موازات رسوبگذاری در میانه نهر، آبشستگی مشاهده می‌گردد که به دلیل ریزش جریان از روی پشته‌ی رسوبی می‌باشد (شکل ۳- الف). همچنین، آبشستگی پایین دست آبشکن در حالت $B=2R_c$ از سایر حالات مقدار کمتری دارد.

شکل ۴ نیمرخ طولی بستر را در فواصل مختلف از ساحل خارجی، و برای نسبت‌های مختلف شعاع انحنا، را نشان می‌دهد. در این شکل ds و h به ترتیب تغییرات نیمرخ‌های طولی بستر و ارتفاع جریان در مسیر مستقیم ورودی نهر و θ زاویه قوس برحسب درجه می‌باشند. در شکل ۴- الف، که نیمرخ طولی بستر در مجاورت ساحل خارجی و به فاصله ۵ درصد عرض نهر از ساحل خارجی می‌باشد مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنای نهر آبشستگی افزایش می‌یابد، که نرخ تغییرات از $BR_c/2$ تا ۴ بیش از ۴ تا ۵ است. آبشستگی در بالادست آبشکن

و e به ترتیب ارتفاع پشته رسوبی و عمق چاله آبشستگی می‌باشند. در شکل ۷-الف و ۷-ب تغییرات این ابعاد به صورت بی بعد با ارتفاع جریان در ورودی قوس نسبت به تغییر در شعاع انحنای نسبی نهر نشان داده شده‌اند. در این شکل‌های مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع انحنا بیشینه، عمق چاله آبشستگی، که با اعداد منفی نشان داده شده است، روند افزایشی داشته و از نسبت تقریباً یکسانی پیروی می‌کند، که مقادیر آن بین $0/9$ تا $1/425$ - برابر ارتفاع جریان در ورودی نهر می‌باشد، که به ترتیب مربوط به شعاع انحنای نسبی ۲ و ۵ است. همچنین، بیشینه‌ی ارتفاع پشته رسوبی با افزایش شعاع انحنای نهر تا $B=4R_c$ روند افزایشی دارد، که به دلیل افزایش آبشستگی روند قابل قبولی بوده، و مقادیر آن بین $0/5$ تا $0/7$ برابر ارتفاع جریان در ورودی نهر است.

تشکیل دو نوع گردابه در طول قوس ۹۰ درجه مشاهده می‌شود. با حرکت جریان به درون قوس نهر جریان ثانویه پدیدار می‌گردد، که از اندر کنش مؤلفه‌های شعاعی و عمقی سرعت ایجاد می‌گردد که سبب تشکیل نوع اول گردابه می‌شود. شکل دوم گردابه موسوم به گردابه‌ی نعل اسبی است که در مقطع عرضی پایین دست آبشکن و در خلاف جهت گردابه جریان ثانویه مشاهده می‌شود. در شکل ۸ نمونه‌ای از تشکیل گردابه‌های جریان ثانویه و نعل اسبی در مقاطع عرضی در حالت‌های BR_c برابر با ۳ و ۴ به ترتیب با اعداد ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. در شکل ۹ خطوط جریان در مقاطع عرضی به فاصله $0/5$ برابر طول بال از موقعیت آبشکن با تغییر در شعاع انحنا ارائه گردیده‌اند. با بررسی خطوط جریان در طول قوس در حالت $B=2R_c$ مشاهده می‌شود که در ابتدا جریان ثانویه اصلی در جهت ساعت گرد در میانه نهر تشکیل می‌شود. سپس به کناره ساحل داخلی منتقل می‌گردد. با نزدیک شدن به آبشکن در مقطع به فاصله‌ی $1/5$ برابر طول بال از موقعیت آبشکن، جریان ثانویه دیگری هم جهت با جریان ثانویه ابتدایی تشکیل می‌شود. در این مقطع، در فاصله میانی مقطع عرضی، به دلیل تشکیل گردابه‌هایی با محور افقی به موازات یکدیگر، سرعت عمقی تقریباً به صفر می‌رسد، که در شکل ۹-الف در عرض میانی نهر نشان داده شده است. در مجاورت بال

$0/5$ برابر طول بال از بالادست و پایین دست آبشکن با افزایش شعاع انحنا آبشستگی بستر افزایش می‌یابد، که در شکل ۵-د در فاصله‌ی ۱۲ برابر طول بال از موقعیت آبشکن و در پایین دست آن نیز این روند قابل مشاهده است. در مجاورت بال آبشکن روند مشابهی برای تمام حالات مشاهده می‌شود. در این شکل‌های آبشستگی از فاصله‌ی یک دوازدهم عرض نهر از ساحل داخلی آغاز گردیده، و در حالت $B=2R_c$ ، دو چاله‌ی آبشستگی به موازات یکدیگر تشکیل می‌شوند، و به دلیل آبشستگی کمتر، روند غیر یکنواخت‌تری را نسبت به سایر حالات دارند. کاهش آبشستگی در پایین دست آبشکن نسبت به بالادست آن به دلیل وجود آبشکن در تمامی حالات قابل مشاهده است. همچنین، بیشینه عمق چاله آبشستگی در مقاطع به فاصله $0/5$ برابر طول بال از بالادست و پایین دست آبشکن در حالت $B=5R_c$ نسبت به سایر حالات بیشتر است که با کاهش شعاع انحنا از مقدار آن کاسته می‌شود. در شکل ۵-ج مشاهده می‌شود در مقطع به فاصله ۱۰ برابر طول بال از بالادست آبشکن در حالت‌های BR_c برابر ۲، ۳، ۴ آبشستگی مقدار زیادی ندارد و می‌توان گفت این مقطع تحت تأثیر آبشستگی ناشی از آبشکن نمی‌باشد. در حالی که آبشستگی بیشتری در $B=5R_c$ و به دنبال آن تشکیل پشته رسوبی با ارتفاع بیشتری در مجاورت ساحل داخلی مشاهده می‌شود. در شکل ۵-د در تمامی حالات در مجاورت ساحل داخلی رسوبگذاری مشاهده می‌شود. ابعاد پشته‌ی رسوبی در حالت $B=2R_c$ به دلیل آبشستگی بیشتر در این مقطع، بیش از سایر حالات است. در این شکل‌های مشاهده می‌شود که در این مقطع مزبور با کاهش شعاع انحنا آبشستگی در مجاورت ساحل داخلی افزایش می‌یابد، زیرا اولاً، با افزایش شعاع انحنا آبشستگی فزونی می‌گیرد، در نتیجه رسوبگذاری در مجاورت ساحل داخلی افزایش یافته و از توان آبشستگی در مجاورت ساحل داخلی و در پایین دست قوس می‌کاهد، و ثانیاً با کاهش شعاع انحنای قوس، مؤلفه‌ی بیشینه سرعت در پایین دست قوس به سمت ساحل داخلی متمایل می‌شود.

در شکل ۶ ژرفای چاله آبشستگی و پشته‌ی رسوبی به صورت طرح واره نشان داده شده است. در این شکل a

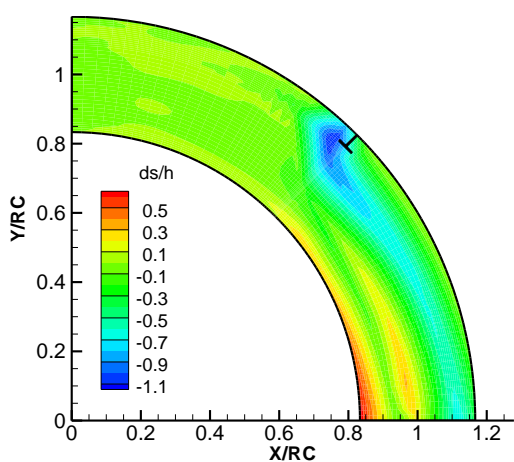
دست آبشکن و در جهت پادساعت گرد در مجاورت ساحل خارجی تشکیل می شود. در انتهای قوس، جریان ثانویه اصلی به فاصله یک سوم عرض نهر از ساحل خارجی متمایل گردیده و جریان ثانویه دیگری هم جهت با آن در مجاورت ساحل داخلی در جهت افزایش آبشستگی در این ناحیه ایجاد می شود. با افزایش مقدار B/R_c به ۵ نیز گردابه در جهت ساعت گرد در مجاورت ساحل داخلی تشکیل گشته و با نزدیک شدن به آبشکن به میانه نهر متمایل می گردد و از فشردگی خطوط جریان در اطراف آن کاسته می شود. در مجاورت آبشکن در بالادست و پایین دست آن یک گردابه اصلی جریان ثانویه در حد فاصل بال آبشکن و ساحل داخلی تشکیل شده و جریان پایین رونده در مجاورت ساحل خارجی تشکیل می گردد که در پایین دست آبشکن جریان نعل اسبی به موازات و در خلاف جهت این گردابه شکل گرفته و فشردگی خطوط جریان در اطراف گردابه موسوم به جریان ثانویه افزایش می یابد. با حرکت به سمت پایین دست قوس همچنان یک گردابه وجود دارد، که به تدریج از فشردگی خطوط جریان در اطراف آن کاسته شده که از میانه نهر به ساحل خارجی منتقل می شود.

در بررسی مقاطع طولی مختلف از قوس، و فواصل مختلف از ساحل خارجی، روند کلی جریان تا حدودی یکسان و تفاوت در جزئیات ویژگیهای جریان می باشد که ناشی از تفاوت در شکل هندسی نهر است. در شکل ۱۰ خطوط جریان در مقاطع طولی به فاصله ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد طول جان از ساحل خارجی (در مقطع بال آبشکن) در حالت های شعاع انحنای مختلف نهر نشان داده شده اند. با بررسی خطوط جریان در حالت $B=2R_c$ در مقطع به فاصله نصف طول جان آبشکن از ساحل خارجی جریان پایین رونده و نعل اسبی همزمان در بالادست آبشکن، به دلیل وجود شیبهای فشار مشاهده می شود که جریان نعل اسبی متأثر از وجود چاله آبشستگی است که این جریان در شکل ۱۰- الف در بالادست آبشکن نشان داده شده است. در این مقطع طول جدایی جریان ناشی از گردابه های با محور افقی در پایین دست آبشکن $2/73$ برابر طول بال آبشکن می باشد. در مقطع طولی گذرنده از بال آبشکن نیز به غیر از

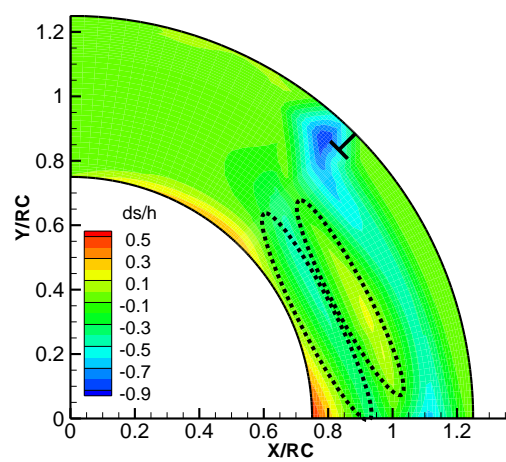
آبشکن روند مشابهی با بالادست آبشکن مشاهده می شود. تشکیل گردابه در بالادست و پایین دست آبشکن در فاصله میانی بال و ساحل خارجی مشاهده نمی گردد، و فقط جریان پایین رونده در مجاورت ساحل داخلی دیده می شود که در شکل ۹- الف، که مربوط به مقطع عرضی به فاصله ۵۰ درصد طول بال از موقعیت آبشکن و در حالت $B=2R_c$ می باشد، نمونه ای از آن نشان داده شده است. این روند تا پایین دست آبشکن ادامه دارد، با این تفاوت که در نزدیکی انتهای قوس، جریان ثانویه در مجاورت ساحل داخلی ابعاد کوچکتری می یابد. همچنین، در مقاطع پایین دست آبشکن تشکیل جریان نعل اسبی از نزدیکی بستر آغاز گردیده و به سطح آب منتقل می شود. تشکیل این جریان از مجاورت بستر در شکل ۹- ج نشان داده شده است. در حالت $B=3R_c$ گردابه جریان ثانویه در ابتدا در مجاورت ساحل داخلی تشکیل می شود سپس دو گردابه در جهت ساعت تشکیل می گردد که با نزدیک شدن به آبشکن کل مقطع فقط تحت تأثیر یک گردابه بوده، و جریان پایین رونده در مجاورت ساحل خارجی تشکیل می شود. در پایین دست و در مجاورت آبشکن تشکیل یک گردابه جریان نعل اسبی در پایین دست آبشکن و در مجاورت ساحل خارجی و سطح آب ایجاد می گردد، این در حالی است که گردابه اصلی جریان ثانویه تمام عمق آب را در بر گرفته است. تا مقطع به فاصله ۹/۵ برابر طول بال از موقعیت آبشکن، فقط گردابه اصلی جریان ثانویه وجود دارد، سپس به موازات آبشستگی پایین دست آبشکن و قوس داخلی در میانه ی نهر که پیش از این توضیح داده شد؛ چاله آبشستگی دیگری تشکیل می شود، که در این محل گردابه دیگری در مجاورت ساحل داخلی و در جهت افزایش آبشستگی ایجاد می گردد. در حالت $B=4R_c$ با حرکت جریان به درون قوس نهر جریان ثانویه پدیدار می گردد. جریان ثانویه از مجاورت ساحل خارجی در بالادست قوس به میانه نهر متمایل شده و با حرکت به پایین دست آبشکن به تدریج خطوط جریان اطراف آن فشرده تر گشته و ارتفاع کامل جریان را در بر می گیرد. با عبور از آبشکن علاوه بر جریان ثانویه اصلی، گردابه ی نعل اسبی در پایین

قدرت جریان در مقاطع عرضی مختلف و تا حدودی جهت گیری آنها می باشد. در $B=3R_c$ در فاصله‌ی نصف طول جان از ساحل خارجی از فشردگی خطوط جریان در زیر سطح آب نسبت به $B=2R_c$ کاسته شده و طول ناحیه جدایی جریان نسبت به $B=2R_c$ کاهش می یابد. در مقطع $B=4R_c$ نیز همچنان از فشردگی خطوط جریان در گردابه‌ی پایین دست آبشکن و طول ناحیه‌ی جدایی کاسته می شود، این در حالی است که در این شعاع انحنا در مقطع میانی عرض نهر همچنان جریان نعل اسبی دیده می شود. در حالی که در $B=5R_c$ وجود این جریان در مقطع میانی نهر مشاهده نمی گردد. همان طور که پیش از این توضیح داده شد با افزایش شعاع انحنا طول ناحیه جدایی ناشی از تشکیل گردابه ها با محور افقی در پایین دست آبشکن تغییر می یابد که این امر به دلیل تغییر در شعاع انحنای قوس می باشد. در شکل ۱۱ مشاهده می شود که با افزایش شعاع انحنای قوس، طول ناحیه‌ی جدایی در پایین دست آبشکن کاهش می یابد که مقادیر آن بین 0.17 تا 0.3 برابر طول بال آبشکن می باشد.

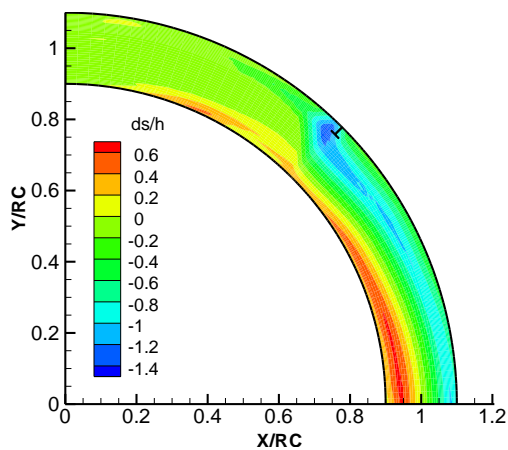
جریان نعل اسبی در بالادست آبشکن پدیده دیگری مشاهده نمی شود، و در پایین دست آبشکن، جریان با عبور از بال آبشکن بدون چرخش به سمت بالادست، در جهت پایین دست نهر حرکت می کند. با عبور از آبشکن جریان نعل اسبی به دلیل جریان جدا شده در بالادست آبشکن، تا پایین دست آبشکن ادامه پیدا کرده و به سرعت بخشی از آشفتگیهای کلی جریان می شود. در مقطع به فاصله‌ی نصف عرض نهر از ساحل خارجی، اثری از جریان نعل اسبی مشاهده نگشته و جریانهای متمایل به سطح جریان در نزدیکی بستر و در پایین دست آبشکن ایجاد می شود؛ این جریانها متأثر از حضور جریان نعل اسبی در مقاطع طولی نزدیکتر به آبشکن می باشد، که با نزدیک شدن به ساحل داخلی و از بین رفتن جریان نعل اسبی شکل می گیرند. در مجاورت ساحل داخلی، با حرکت به سمت پایین دست قوس توزیع جریانهای بالارونده در پایین دست آبشکن افزایش می یابد، به گونه‌ای که این جریانها از بالادست آبشکن آغاز شده و تا انتهای قوس کل ارتفاع جریان را در بر می گیرند. در سایر خطوط جریان در مقاطع طولی با تغییر در شعاع انحنا روند مشابهی مشاهده می شود، و بیشتر تغییرات در



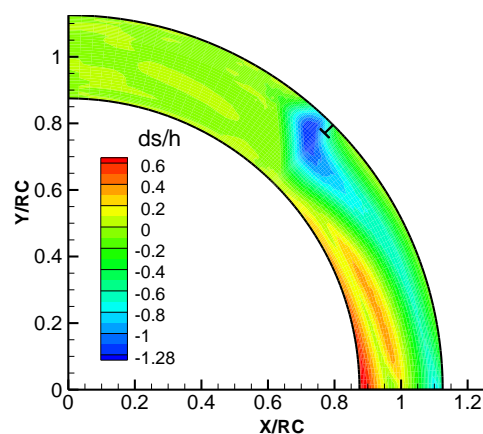
(ب)



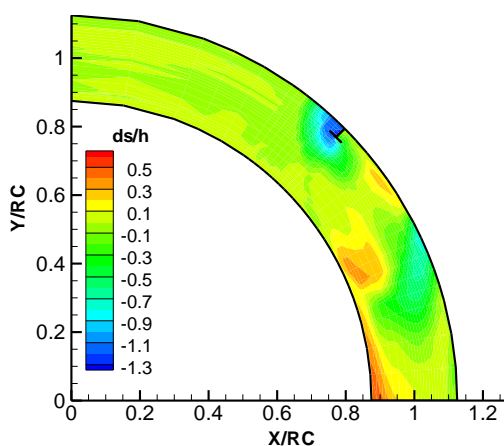
(الف)



(ت)

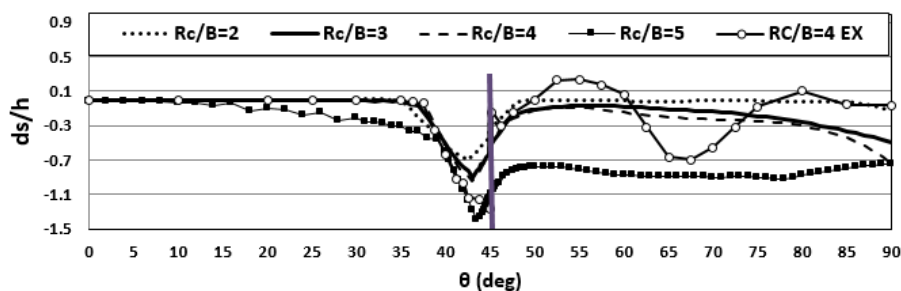


(پ)

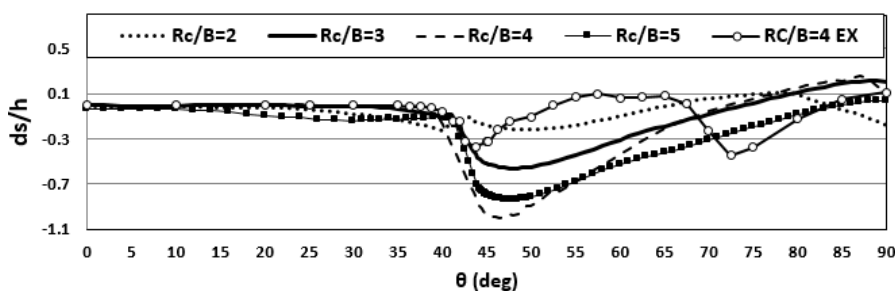


(ج)

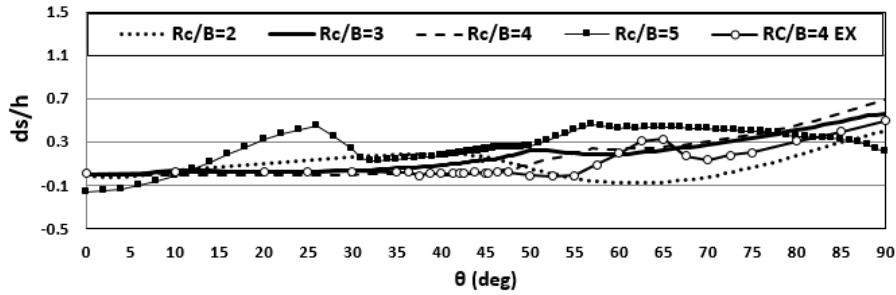
شکل ۳- نیمرخ بی بعد بستر با تغییر شعاع انحنای قوس در حالت های R_c/B برابر با (الف) ۲، (ب) ۳، (پ) ۴، (ت) ۵ عددی و (ج) در حالت آزمایشگاهی.



(الف)

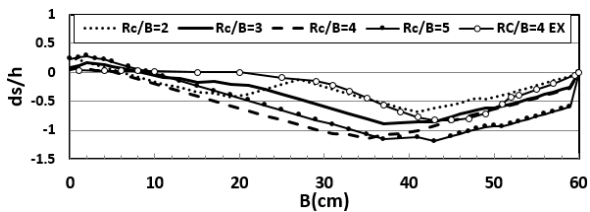


(ب)

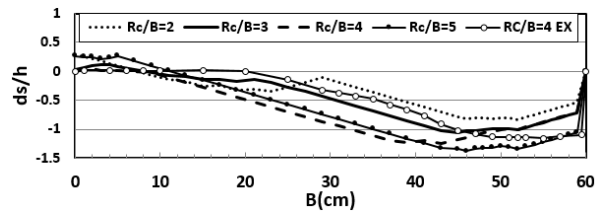


(ج)

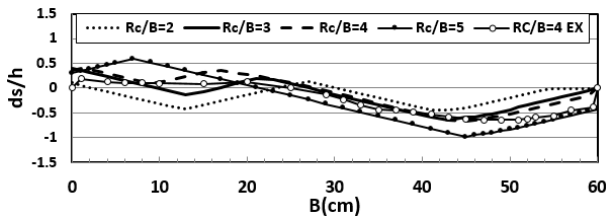
شکل ۴ - نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی نهر تحت تأثیر آبشکن در مقطع به فاصله (الف) ۵ و (ب) ۵۰ و (ج) ۹۵ درصد عرض نهر از ساحل خارجی



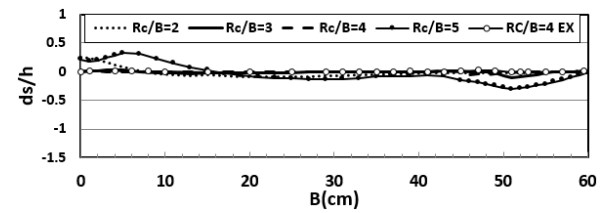
(ب)



(الف)

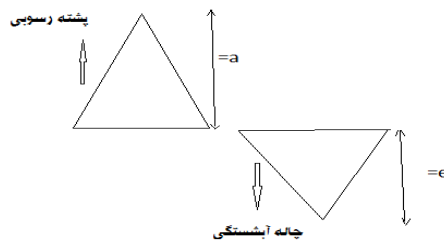


(د)

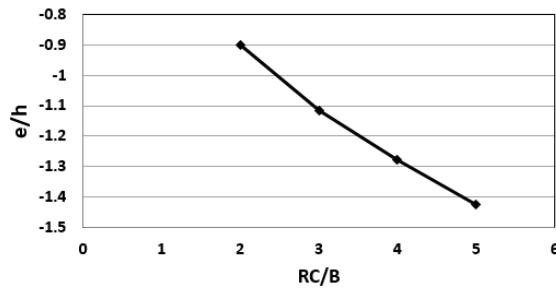


(ج)

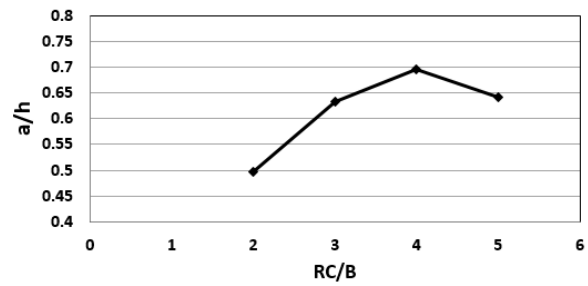
شکل ۵ - نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی نهر در مقطع به فاصله ۰/۵ برابر طول بال در (الف) بالادست و (ب) پایین دست و مقطع عرضی در (ج) به فاصله ۱۰ برابر طول بال در بالادست و (د) ۱۲ برابر طول بال در پایین دست آبشکن



شکل ۶ - نمایش طرح واره از عمق چاله آبستنگی و ارتفاع بیشینه پشته رسوبی

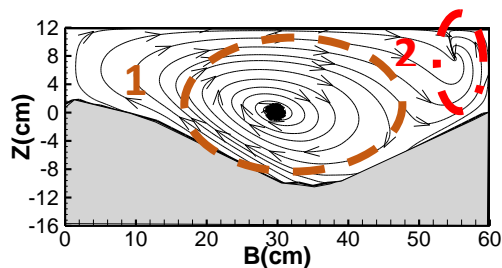


(ب)

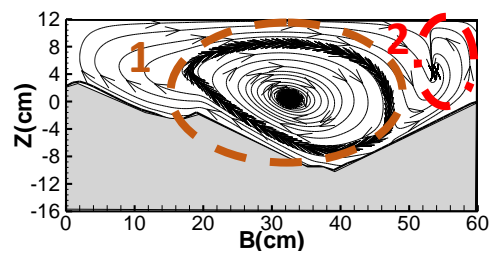


(الف)

شکل ۷- مقادیری بعد بیشینه (الف) ارتفاع پشته رسوبی، (ب) عمق چاله آبشستگی با ارتفاع جریان در ورودی نهر



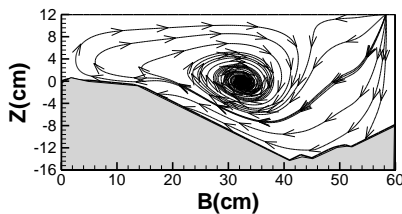
(ب)



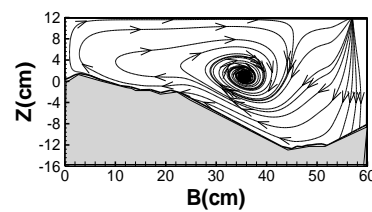
(الف)

شکل ۸- بررسی گردابه های جریان ثانویه و نعل اسبی در مقطع عرضی ۵۰ درجه در پایین دست آبشکن در حالت (الف)

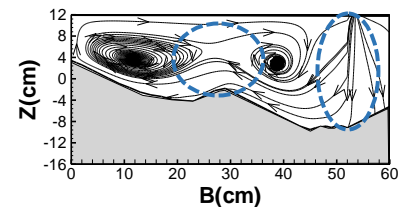
BR_C برابر ۳ (ب) BR_C برابر ۴



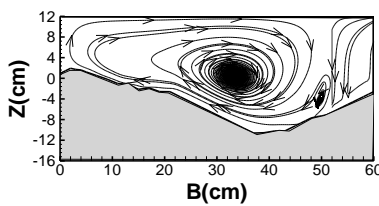
(پ)



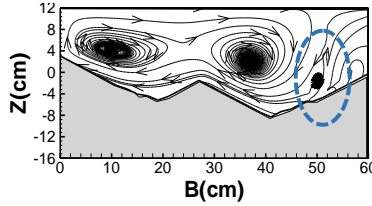
(ب)



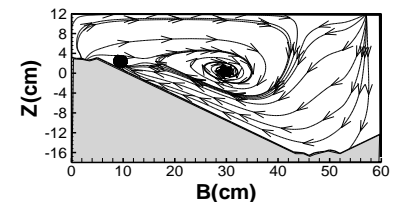
(الف)



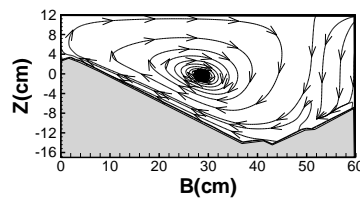
(ج)



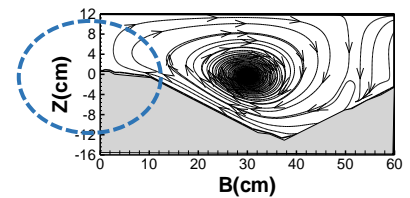
(ج)



(ت)



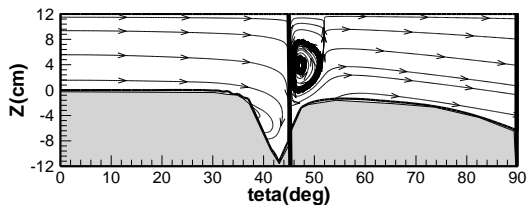
(خ)



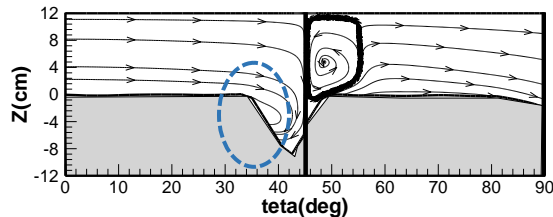
(ح)

شکل ۹- خطوط جریان در مقطع عرضی به فاصله ۵۰ درصد طول بال در بالادست آبشکن در حالت های BR_C برابر (الف) ۲،

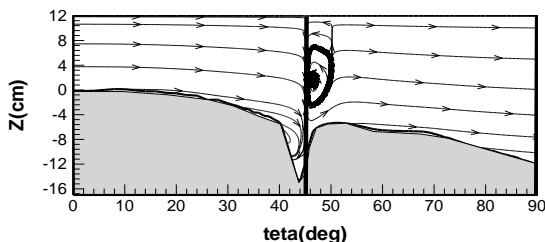
(ب) ۳، (پ) ۴ و (ت) ۵ و در پایین دست آبشکن در حالت های BR_C برابر (ج) ۲، (چ) ۳، (ح) ۴ و (خ) ۵



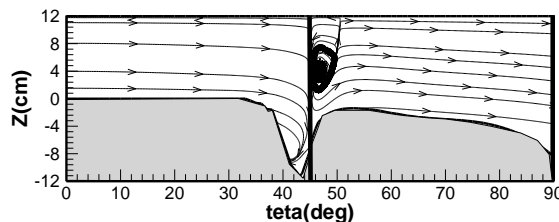
(ب)



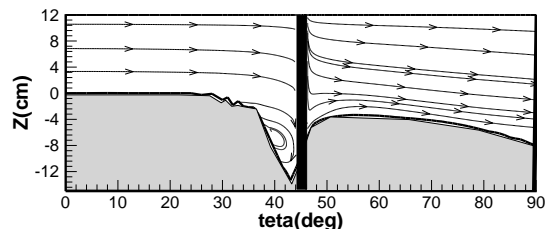
(الف)



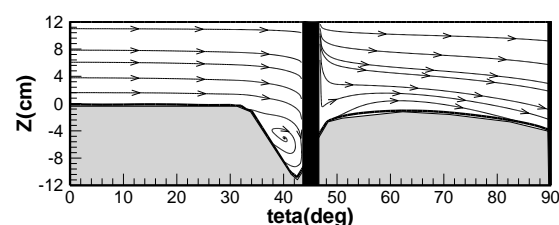
(ت)



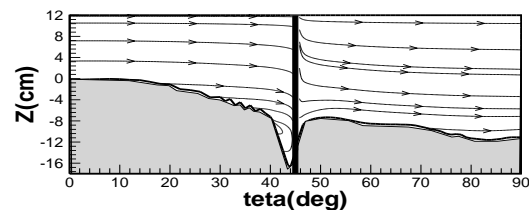
(پ)



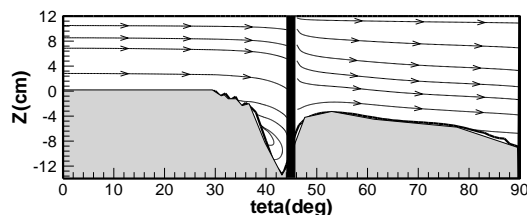
(ج)



(ج)

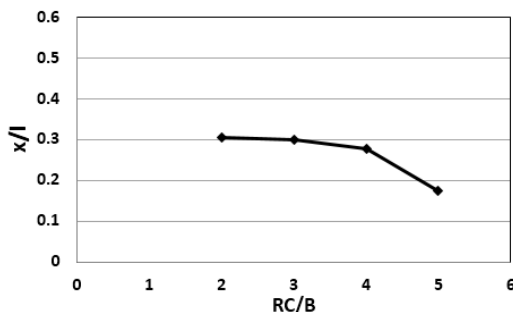


(خ)



(ح)

شکل ۱۰- خطوط جریان در مقطع طولی به فاصله ۵۰ درصد طول جان از ساحل خارجی در حالت های BR_c برابر (الف) ۲، (ب) ۳، (پ) ۴ و (ت) ۵ و ۱۰۰ درصد طول جان از ساحل خارجی در حالت های BR_c برابر (ج) ۲، (چ) ۳، (ح) ۴ و (خ) ۵



شکل ۱۱- تغییرات طول ناحیه جدایی پایین دست آبشکن در مقطع طولی به فاصله ۵۰ درصد طول جان از ساحل خارجی بی بعد شده با طول بال آبشکن

Reference

۱. اقبالی، بشاورد، ح.، م.، قمشی، م.، منصوری هفشجانی، ۱۳۹۱. بررسی فراسنجهای مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریان های غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل، مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵، (۲): ۳۳-۴۰.
۲. ترکمانزاد، ن.، ب.، محمد نژاد، ج. بهمنش، ۱۳۹۳. تأثیر بازشدگی دریچه‌های تخلیه تحتانی سد بر خروج جریان گل‌آلود (مطالعه موردی: سد سفیدرود)، دوره ۴۴.۱، (۷۴): صفحه ۲۵-۴۰.
۳. تقیان، م.، م.، و.، سامانی، ر. بیلندی، ۱۳۹۰. واسنجی دریچه‌های آبگیر قطاعی مستغرق با استفاده از بهینه سازی غیرخطی. مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، ۳۴، (۲): ۱-۱۰.
۴. شریعت زاده، ی.، م.، خسروی مشیزی، م.، قدسیان، م.، واقفی. ۱۳۹۰. بررسی زاویه قرارگیری اثر زاویه قرارگیری آبشکن T شکل مستغرق نسبت به ساحل بر پستی و بلندی بستر در قوس ۹۰ درجه، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
۵. قمشی، م.، م.، و.، جهانشاهی، م. زایری، ۱۳۹۱. پیش بینی روند رسوب گذاری در مخزن سد جیرف با استفاده از نمونه GSTAR، مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵، (۳): ۱-۱۰.
۶. موسوی نائینی، س.ع.، م.، واقفی، م. قدسیان، ۱۳۸۸. تأثیر شعاع انحناء نسبی قوس ۹۰ درجه با بستر تخت بر تغییرات تنش برشی پیرامون آبشکن، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.
۷. اقبالی، پ.، ر.، دانشفرز، س. م.، ثاقبیان، ۱۳۹۲. شبیه سازی روند توسعه زمانی ابعاد حفره آبستنگی اطراف آبشکن بالدار با استفاده از برنامه ریزی بیان ژنی، نشریه دانش آب و خاک، ۲۳، (۱): ۱۷۷ تا ۱۸۸.

نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی الگوی جریان و آبستنگی بستر متحرک تحت تأثیر جریان با بدهی ثابت و آبشکن سرسپری با تغییر در شعاع انحنای نهر با شبیه سازی عددی پرداخته شده است که خلاصه نتایج به شرح زیر می باشد.

در تمامی شکلها مشاهده می شود که آبستنگی بیشینه در بالادست آبشکن و در مجاورت آن قرار داشته، که سبب کاهش آبستنگی در کل طول نهر می گردد. تشکیل پشته‌ی رسوبی در مجاورت ساحل داخلی در تمامی نسبتهای شعاع به عرض نهر در مجاورت ساحل داخلی با تفاوت در بعد عرضی پشته مشاهده می شود. با افزایش شعاع انحنای بیشینه عمق چاله آبستنگی روند افزایشی داشته و از نسبت تقریباً یکسانی پیروی می کند، که مقادیر آن بین ۰/۹- تا ۱/۴۲۵- برابر ارتفاع جریان در ورودی نهر می باشد، که به ترتیب مربوط به BR_c برابر ۲ و ۵ است. همچنین، بیشینه‌ی ارتفاع پشته‌ی رسوبی با افزایش شعاع انحنای نهر تا $B=4R_c$ روند افزایشی دارد، که به دلیل افزایش آبستنگی روند قابل قبولی می- بوده و مقادیر آن بین ۰/۵ تا ۰/۷ برابر ارتفاع جریان در ورودی نهر می باشد. در مقاطع عرضی قوس تشکیل دو نوع گردابه جریان ثانویه و نعل اسبی مشاهده می شود، که گردابه‌ی نوع اول در تمام طول قوس وجود دارد و نوع دوم در پایین دست آبشکن از نزدیکی بستر آغاز گردیده و به سطح جریان منتقل می شود. همچنین، با افزایش شعاع انحنای قوس، طول ناحیه جدایی ناشی از گردابه های با محور افقی کاهش می یابد که مقادیر آن بین ۰/۱۷ تا ۰/۳ برابر طول بال آبشکن می باشد.

با مقایسه داده های عددی و نتایج آزمایشگاهی و همچنین دقت در شکلهای مشاهده می شود که برنامه‌ی نمونه K-ε توانایی خوبی در شبیه سازی عددی جهت بررسی آبستنگی بستر نهر، و الگوی جریان، خصوصاً پیش بینی نواحی بیشینه‌ی آبستنگی دارد.

- Experimental study on scour depth in around a T-shape Spur dike in a 180 degree bend. *World Appl. Sci.* 10: 1146-1152.
16. Mioduszewski, T., and SH., Maeno, 2005. Three dimensional analysis of flow around a porous spur dike. *Appl. Mech.* 8.
17. Matinfard, A., M., Heidarnejad, and J., Ahadian, 2007. Effect of changes in the hydraulic conditions on the velocity distribution around a L-shaped spur dike at the river bend using Flow-3D model. *Tech. Appl. Sci.* 3: 1862-1868.
18. Naji Abhari, M., M., Ghodsian, M., Vaghefi, and N., Panahpur. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow Measurement and Instrumentation*, 21: 292-298.
19. Olsen, N. R. B. 2011. A Three dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multiblock option. Department of hydraulic an Environmental Engineering. the Norwegian University of Science and Technology.
20. Vaghefi, M., M., Ghodsian, and S. A. A., Salehi Neyshabouri, 2012. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend. *J. Hydraul. Eng.* 138: 471-474.
۸. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور ۱۳۸۸. راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای، نشریه شماره ۵۱۶.
۹. واقفی، م.، م.، قدسیان، س.ع.ا. صالحی نیشابوری، ۱۳۸۸. بررسی تغییرات زمانی آبشستگی اطراف آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه، مجله علمی و پژوهشی حفاظت آب و خاک، دانشگاه گرگان، ۱۶، (۱): ۷۹ تا ۱۰۵.
۱۰. عباسی، ع.ا.، م. ملک نژاد یزدی، ۱۳۹۱. مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مشخصات هندسی آبشکن های نفوذپذیر مستقیم و T شکل بر آبشستگی اطراف آن ها، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۲(۸): ۹۵ تا ۱۰۷.
11. Attia, K., and G., El saied, 2006. The hydraulic performance of oriented spur dike implementation in open channel, Tenth International Water Technology Conference, IWTC, 10: 281-298.
12. Choi, S., and D., Oh, 2004. Finite element modeling of shallow water equations for numerical simulation of flows near spur-dike, *Hydro sci. Eng.* Volume VI.
13. Dufresne, M., and J., Vazquez, 2014. Hydraulic influence of geometrical defects in Venturi flumes. *Appl. Water Wastewater* 1: 38-42.
14. Ezzeldin, M. M., T. A., Saafan, O. S., Raghe, and L. M., Nejm, 2007. Local scour around spur dikes, Eleventh International Water Technology Conference. IWTC11: 779-795.
15. Masjedi, A., V., Dehkordi, M., Alinejad, and A., Taaedi, 2010.