

بررسی عددی توزیع سرعت متوسط و تنش برشی حول آبشکن‌های واقع در قوس ۹۰ درجه ملایم به منظور محافظت از سواحل

یاسر اهلی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، مسیح مر^۳

yaser.ahli@gmail.com

mortezaabakhtiari@yahoo.com

masih.moore@yahoo.com

^۱ کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

^۳ مربی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

تاریخ پذیرش: ۹۸/۵/۱۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۱۹

چکیده

به منظور محافظت سواحل و جلوگیری از فرسایش سازه از آبشکن استفاده می‌شود. اهمیت این سازه‌ها در قوس خارجی رودخانه‌ها نمود بیشتری پیدا می‌کند، چرا که در این محدوده رودخانه جریان‌های ثانویه درگیر شده و به تبع آن ساحل فرسایش پیدا می‌کند. هدف از تحقیق حاضر بررسی عددی توزیع سرعت متوسط و تنش برشی در شرایط حضور آبشکن در قوس ملایم ۹۰ درجه است. در این تحقیق دو طول آبشکن معادل ۱۵ و ۲۵ درصد عرض کانال آزمایشگاهی، دو فاصله قرارگیری معادل ۳ و ۷ برابر طول آبشکن، در دو عمق ۳ و ۹ سانتی‌متر از بستر در یک فلوم با نسبت $R/B = 4$ ، عرض ۰/۷ متر و عمق آب ۰/۱۲ متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که حضور آبشکن‌ها در قوس، موجب تمایل حداکثر سرعت متوسط به سمت قوس داخلی در بخش ورودی قوس به سمت میانه کانال منحرف می‌شود؛ در نهایت در یک سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی منتقل می‌شود. در خصوص توزیع تنش برشی نتایج به دست آمده مشابه الگوی توزیع سرعت متوسط بوده و بررسی‌ها نشان می‌دهد؛ هندسه و قرارگیری آبشکن‌ها تأثیر چندانی در موقعیت حداکثر تنش برشی نداشته است.

واژه‌های کلیدی: آبشکن، توزیع سرعت، توزیع تنش برشی، جریان ثانویه، قوس ۹۰ درجه ملایم

۱. مقدمه

است. هرگاه بشر توانسته رودخانه را در خدمت خود قرار دهد، احساس رضایت و خوشحالی کرده، اما در زمانی که این کار عملی نبوده در اثر نیروی مخرب رودخانه، خسارت‌هایی را متحمل شده و احساس نارضایتی نموده

رودخانه یکی از سیستم‌های طبیعی است که از دیرباز، ارتباط تنگاتنگی با زندگی بشر داشته است. از زمان‌های قدیم محل سکونت و فعالیت‌های بشر در اطراف رودخانه‌ها متمرکز بوده

عملکرد و کارایی آن‌ها در موقعیت‌های گوناگون، عنوان کرده‌اند [۲].

دوان^۲ و همکاران، با استفاده از یک سرعت‌سنج، داده‌های سه بعدی سرعت را در یک کانال مستقیم با حضور یک آب‌شکن مستطیلی به دست آورده و در دو میدان جریان کف صاف و کف با چاله آبشستگی تفاوت در سرعت متوسط و شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدزی را مورد بررسی قرار دادند. این تحقیقات نشان‌دهنده افزایش مؤلفه طولی، عرضی و کاهش مؤلفه عمودی سرعت بعد از تشکیل چاله آبشستگی است، همچنین تنش برشی بستر در اطراف آب‌شکن ۶ تا ۸ مرتبه بزرگ‌تر از تنش برشی بالادست گزارش شده است [۳].

قدسیان و واقفی، با تغییر طول و طول بال آب‌شکن و عدد فرود جریان به بررسی میدان جریان و آبشستگی اطراف آب‌شکن‌های تی شکل در یک قوس ۹۰ درجه ملایم پرداختند و با تحلیل داده‌های سرعت سه بعدی حاصل از آزمایش‌ها نتیجه گرفتند که با قرار دهی آب‌شکن در موقعیت‌های مختلف یک گردابه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در بالادست و یک گردابه در خلاف جهت عقربه‌ها در پایین دست آب‌شکن ظاهر می‌شود. همچنین افزایش طول بال آب‌شکن‌ها سبب افزایش طول ناحیه جدایی جریان و افزایش اندازه گردابه‌های ایجاد شده می‌شود [۴].

ناجی ابهری و همکاران، الگوی جریان در یک قوس ۹۰ درجه با بستر صلب را بررسی نموده و خصوصیات جریان از جمله نحوه تأثیر جریان ثانویه بر توزیع سرعت، مسیر حداکثر سرعت و غیره را مورد مطالعه قرار دادند. برپایه تحقیقات واشنی و گرید، وقتی نسبت شعاع به عرض فلوم در یک قوس بیش از ۳/۵ باشد، توزیع تنش برشی در مقطع ورودی قوس تقریباً یکنواخت بوده و منطقه بیشینه تنش در قسمت خروجی قوس و دیواره خارجی آن اتفاق می‌افتد [۷].

فان-دن هیور^۳، با انجام یک تحقیق آزمایشگاهی و استفاده از مدل دوبعدی سی. سی. ایچ. ای دوبعدی به بررسی فرسایش، رسوب‌گذاری و هیدرولیک جریان در مدل آزمایشگاهی ساخته شده از رودخانه‌های مائندری معمول^۴ در

است. الگوی غالب برای شکل رودخانه در پلان پیچان‌رودی است، به خاطر حرکت پیچان‌رودها به پایین دست و ناپایداری آن خاک‌های باارزش کناره‌ها شسته شده و از بین می‌روند. علت اصلی این ناپایداری توزیع نامتقارن سرعت در عرض و طول رودخانه است. علاوه بر آن تراز سطح آب در قسمت قوس خارجی بالاتر از قوس داخلی قرار می‌گیرد و این امر غرقابی شدن سیلاب دشت‌ها که نقاط تمرکز جمعیت، صنعت و تجارت است را تشدید می‌کند. با وارد شدن جریان در قوس رودخانه توزیع سرعت آن تغییر می‌کند، توزیع قائم سرعت در رودخانه‌های مستقیم در جریان دائم از قانون لگاریتمی به خوبی پیروی نموده ولی در قوس رودخانه‌ها توزیع سرعت لگاریتمی نیست. اضافه افت اصطکاکی در قوس رودخانه‌ها به دلیل جریان‌های ثانویه است و روش‌های مختلفی برای تعیین آن با توجه به هندسه پیچان‌رود و شرایط جریان ارائه شده است. تاکنون، در زمینه الگوی جریان در قوس‌ها مطالعات زیادی به صورت آزمایشگاهی یا عددی انجام شده است که در این بخش به مهم‌ترین و جدیدترین آن‌ها اشاره می‌کنیم.

شمس و همکاران، با استفاده از مدل عددی فلونت به تحلیل جریان و انتقال رسوب در یک کانال خمیده مائندری پرداختند. آن‌ها با به کارگیری روش لاگرانژی توانستند به تحلیل مسیر حرکت ذرات نحوه ترسیب^۱ آن‌ها بر حسب اندازه دانه‌ها پردازند [۱]. رایست، هنربخش و تورن با به کارگیری مدل عددی سه بعدی سیم و مدل عددی دوبعدی ریپا به بررسی هیدرودینامیکی جریان در یک کانال آزمایشگاهی و فرسایش جداره‌ها در یک رودخانه طبیعی پرداختند و نشان دادند که نوع این دو مدل از توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی میدان جریان در کانال خمیده برخوردار است [۲].

ویلسون و همکاران، نیز با استفاده از مدل عددی سیم به بررسی الگوی جریان و شیوه پخش ماده رنگی در یک کانال آزمایشگاهی مائندری پرداختند. این محققان هدف اصلی کار خود را نیاز مدل‌های عددی به صحت‌سنجی آن‌ها در برابر داده‌های متنوع آزمایشگاهی، میدانی و بررسی دقت

جدول ۱. الگوی انجام مدل‌سازی تحقیق حاضر

تعداد حالت‌ها	پارامتر
۲	دبی
۲	طول
۱	زاویه
۲	فاصله
۲	فاصله از کف

به‌منظور صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل تهیه شده از داده‌های برداشت شده سه‌بعدی سرعت که روی یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه سازه‌های آبی دانشگاه شهیدچمران اهواز توسط بختیاری و همکاران انجام شده است، استفاده شد. در جدول (۲) الگوی آزمایش‌های انجام شده در قالب تحقیق آزمایشگاهی یاد شده ارائه شده است.

جدول ۲. الگوی انجام آزمایش‌های بخش صحت‌سنجی

حالت	زاویه	طول	فاصله طولی	دبی	عمق جریان
۱	۹۰	۱۰/۵	۳	۳۰	۱۲
۲	۹۰	۱۴	۳	۳۰	۱۲
۳	۹۰	۱۷/۵	۳	۳۰	۱۲
۴	۹۰	۱۰/۵	۷	۳۰	۱۲
۵	۶۰	۱۷/۵	۳	۳۰	۱۲
۶	۱۲۰	۱۰/۵	۳	۳۰	۱۲

فلوم آزمایشگاهی مورد نظر برای مدل‌سازی عددی همان فلوم آزمایشگاهی تحقیق بختیاری و همکاران بوده است. فلوم یاد شده با قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض فلوم ۴ و مقطع عرضی مستطیلی استفاده شد. جداره کانال از جنس پلکسی گلاس و کف گالوانیزه است. عرض فلوم ۰/۷ متر، شعاع خارجی قوس ۳/۱۵ متر و طول راستای مستقیم کانال در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۵ و ۳ متر است. با توجه به نسبت بدون بعد شعاع متوسط قوس به عرض کانال (R/B) که برابر ۴ است، قوس جزء قوس‌های ملایم محسوب می‌شود. در شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر از نرم‌افزار انسیس استفاده شده است که در این بخش به‌طور مختصر آن معرفی می‌شود.

آفریقای جنوبی پرداخت. طول، فاصله و زاویه قرارگیری آبشکن‌ها متغیرهای مورد مطالعه وی بودند. از نتایج این تحقیق می‌توان به گزارش ایجاد یک ناحیه کم سرعت بین آبشکن‌ها اشاره کرد که رسوب‌گذاری در این ناحیه صورت می‌گیرد. با افزایش فاصله آبشکن‌ها از یکدیگر سرعت بین آن‌ها افزایش می‌یابد که خود باعث تغییر در الگوی رسوب‌گذاری بین آبشکن‌ها می‌شود. همچنین با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با خروجی مدل مزبور به این نتیجه رسید که مدل دوبعدی یاد شده در به تصویر کشیدن برخی خصوصیات جریان مانند توزیع سرعت متوسط و جریان‌های گردابی بین آبشکن‌ها موفق عمل نموده، اما نتوانسته است جریان‌های ثانویه را که در اثر ورود جریان به قوس ایجاد می‌شوند را خوب به تصویر بکشد [۵].

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد در خصوص وضعیت الگوی جریان در قوس‌ها و اطراف سری آبشکن‌ها تاکنون تحقیقات عددی زیادی صورت نگرفته است، مطالعه حاضر به بررسی عددی الگوی جریان و تنش برشی در قوس به همراه سری آبشکن‌ها در شرایط هندسه‌های مختلف پرداخته است.

۲. مواد و روش‌ها

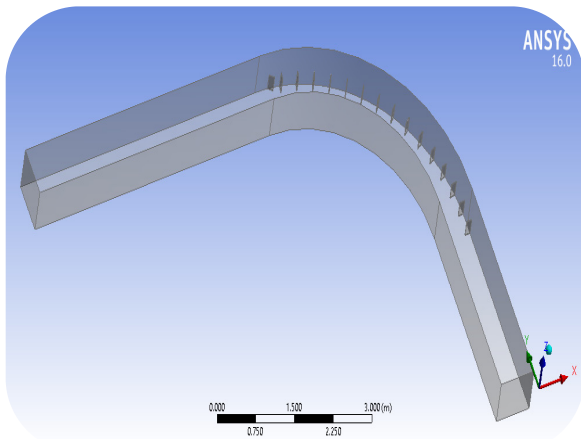
همان‌طور که گفته شد، هدف از این تحقیق بررسی الگوی پارامترهای هیدرولیکی جریان از جمله توزیع سرعت متوسط و تنش برشی در قوس ۹۰ درجه ملایم در شرایط هندسه و شرایط هیدرولیکی متفاوت است. مدل‌سازی‌های مختلفی برای این سناریو انجام گرفت که در قالب دو طول آبشکن ۱۵ و ۲۵ درصد عرض کانال، زاویه قرارگیری متفاوت ۹۰ درجه (عمود) دو فاصله طولی میان آبشکن‌ها و در دو عمق ۳ و ۹ سانتی‌متر و برای ۲ دبی به مقادیر ۲۵ و ۳۸ لیتر در ثانیه صورت گرفت. در جدول (۱) الگوی مدل‌های تهیه شده ارائه شده است.

- ✓ حل: در این قسمت بعد از بازبینی اطلاعات وارد شده، نرم افزار اجرا می شود.
- ✓ خروجی: در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل، برای بحث و نتیجه گیری قابل مشاهده است.

۲-۱. شبیه سازی

۲-۱-۱. ایجاد هندسه و شبکه بندی میدان حل

برای مدل سازی هندسه کانال مورد نظر، با استفاده از دو نرم افزار اتو کد و سالی دورک رسم و در شکل (۲) نشان داده شده است. بعد از ایجاد هندسه مدل، در سیستم هندسه، نرم افزار انسیس، امکان کنترل کیفیت هندسه ایجاد شده را به کاربر می دهد و اشکالات احتمالی موجود در هندسه ایجاد شده را فهرست کرده و به کاربر نشان می دهد تا وی آن ها را قبل از وارد شدن به مرحله تحلیل، اصلاح نماید. با انتخاب کل هندسه، اشکال و ایرادی برای هندسه ایجاد شده وجود نداشت و هندسه مدل برای انجام بقیه مراحل تحلیل به سیستم مش انتقال داده شد.



شکل ۲. هندسه ایجاد شده در نرم افزار اتو کد و سالی دورک

۲-۱-۲. شبکه بندی

مش بندی محدود جریان، دقت حل مسئله به تعداد سلول های موجود در شبکه بستگی دارد و اصولاً شبکه های غیر یکنواخت، با تعداد سلول های مختلف در قسمت های مختلف بدنه بسته به موقعیت آن، در حل یک مسئله قابلیت بیشتری دارند. البته باید در نظر داشت که ایجاد چنین شبکه ای به عوامل مختلفی از جمله نوع مدل اغتشاشی، شکل ظاهری



شکل ۱. فلوم قوسی مورد استفاده برای مدل سازی ها، دانشگاه شهید چمران اهواز

نرم افزار انسیس

این نرم افزار یکی از نرم افزارهای بسیار قدیمی در تحلیل های دینامیک محاسباتی است که به دلیل توانمندی های بالا و قابلیت کاربری آسان، کاربران بسیاری دارد و از روش اجزاء محدود برای مدل سازی و تحلیل در آن استفاده می شود. روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی برای حل مسائل فیزیکی است که با معادله های دیفرانسیل توصیف می شوند. از میان نرم افزارهای با قابلیت مشابه می توان از آباکوس و استار سی سی ام پلاس یاد کرد که در نرم افزار آباکوس روش حل مانند نرم افزار انسیس روش اجزاء محدود و در نرم افزار استار سی سی ام پلاس روش حل حجم محدود است.

- ✓ بخش های مختلف نرم افزار انسیس عبارتند از:
- ✓ هندسه: در این قسمت با ابزارهای موجود، هندسه کانال طراحی و هندسه مورد نظر قبل از مش بندی، در محیط ماژول طراحی از لحاظ داشتن نقص های احتمالی و کیفیت طراحی، کنترل شد. سپس هندسه ایجاد شده در قسمت مش، مش بندی شده و کیفیت مش بندی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه گزارش کنترل کیفیت هندسه و مش بندی آورده شده است.
- ✓ برپایی مدل: در این قسمت مشخصات جریان، شرایط مرزی، به نرم افزار معرفی شد.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، مقادیر میانگین، حداقل، حداکثر به ترتیب برابر ۰/۹۹۱۱۹، ۰/۹۳۰۳۲ و ۰/۴۳۳۱۱ است. برای یک شبکه‌بندی با کیفیت عالی، مقدار میانگین باید برابر یک باشد و هر قدر این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کیفیت مناسب شبکه‌بندی است، شکل (۳).

۲-۲. شرایط مرزی

۲-۲-۱. شرایط مرزی در ورودی کانال

با توجه به این که جریان در مدل مورد نظر در هر سه حالت برای دبی‌های ۲۵، ۳۴٫۴ و ۳۸ سانتی‌متر مکعب زیر بحرانی ($1 < 0/26 < 0/35 < 0/39$ عدد فرود) است؛ بنابراین، با توجه به نکته‌های یاد شده در بالا، محاسبه عمق جریان در ورودی به نرم‌افزار واگذار شده و از شرط مرزی مقدار مشخص برای سرعت در این مقطع استفاده شده است، این شرط مرزی برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جریان‌های تراکم‌پذیر استفاده از این شرط مرزی به نتیجه‌های غیرفیزیکی منتهی خواهد شد.

۲-۲-۲. شرایط مرزی در خروجی کانال

پس از انتخاب شرط مرزی سرعت در ورودی و با توجه به زیربحرانی بودن جریان، شرط مرزی که برای خروجی کانال در نظر گرفته شد، عمق جریان در قالب فشار هیدرواستاتیک به این مقطع اعمال شده است.

۲-۲-۳. شرایط مرزی جداره‌های کانال

شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با جامد به کار می‌رود در مسئله موردنظر، جداره‌ها شامل کف و دو دیواره کانال است. برای صحت‌سنجی براساس مدل آزمایشگاهی موجود، مسطح در نظر گرفته می‌شود.

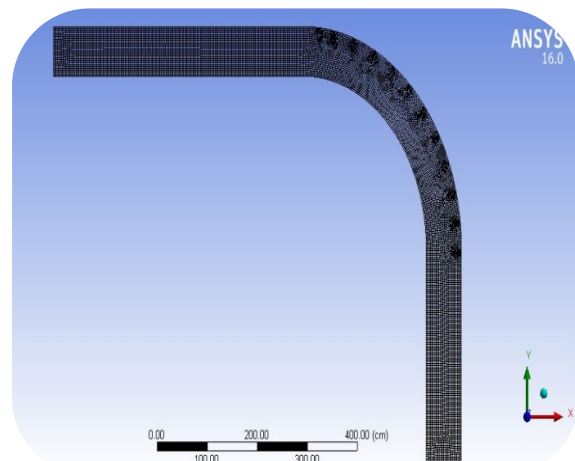
۲-۲-۴. شرایط مرزی سطح آزاد

جریان با سطح آزاد به یک حالت جریان چند فاز از اطلاق می‌شود که فازها به کمک یک سطح مشترک مشخص از هم جدا می‌شوند. در این نرم‌افزار برای سطح آزاد جریان از شرط مرزی آزاد استفاده می‌شود. نرم‌افزار انسیس شرط بازشدگی

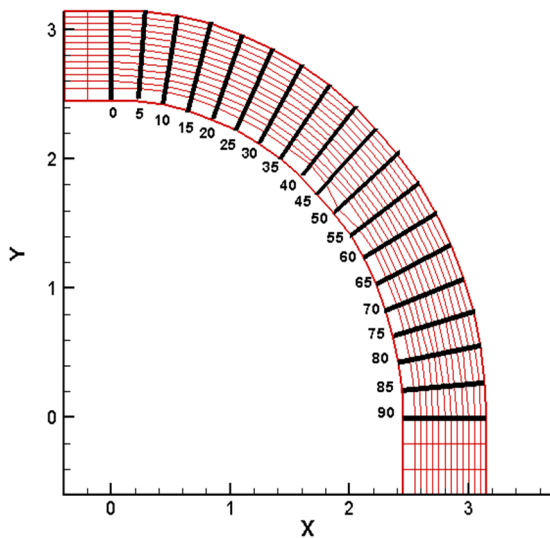
مدل مانند مقطع عرضی، نوع مسئله مورد بررسی و مواردی از این قبیل بستگی دارد. رفع خطاهای موجود در حل مسئله با تغییر در شبکه و بهینه نمودن آن صورت می‌پذیرد و در بیشتر موارد تغییر شبکه شامل ریزتر نمودن آن در قسمت‌های مورد نیاز است تا جایی که نتایج حاصل مستقل از ابعاد سلول‌های موجود در شبکه شوند و نتایج کلیدی تغییر نکنند. این امر با سعی و خطا و تکرار حل در دفعات مکرر با شبکه‌بندی‌های متفاوت حاصل می‌شود. در این مطالعه برای شبکه‌بندی محدوده جریان نیز از قسمت مش در نرم‌افزار انسیس بهره گرفته شد. برای مش‌بندی در قسمت‌های مستقیم کانال که اهمیت کمتری نسبت به قوس کانال دارد از شبکه‌بندی درشت‌تر به اندازه ۵ سانتی‌متر و برای داخل قوس سه سانتی‌متر و برای اطراف آب‌شکن یک سانتی‌متر استفاده شد. تعداد گره‌ها و المان‌های موجود در کل حجم به ترتیب ۵۴۸۷۲۶ و ۳۱۴۰۹۸۹ عدد است.

۲-۱-۳. کنترل کیفیت شبکه‌بندی مدل

برای کنترل شبکه‌بندی در نرم‌افزار انسیس از سیستم مستقل شبکه استفاده می‌شود. برای این کار از قسمت اجزاء سیستم نرم‌افزار انسیس یک سیستم شبکه، به محیط نرم‌افزار، فراخوانده شد. بعد از انتقال هندسه مدل به سیستم شبکه، شبکه‌بندی مدل انجام شد و کیفیت شبکه‌بندی کنترل شد. نتایج آمار شبکه‌بندی با استفاده از قسمت آمار قابل مشاهده است. از این گزینه برای مشاهده و ارزیابی کیفیت شبکه‌بندی استفاده می‌شود.



شکل ۳. مش بندی هندسه کانال



شکل ۴. طرح شماتیک از مقاطع مختلف طول کانال

برای محاسبه سرعت متوسط با استفاده از داده‌های سه بعدی سرعت از رابطه ۱ استفاده شده است که در آن u ، v و w مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت هستند.

$$\bar{V}_r = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1)$$

برای بررسی تغییرات جریان ثانویه در طول کانال از رابطه (۲) استفاده شد.

$$i = \frac{\int v^2 dA}{\int u^2 dA} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، i قدرت جریان ثانویه در هر مقطع و dA سطح مقطع سلول‌های موجود در آن مقطع است [۸]. در واقع در رابطه بالا قدرت جریان ثانویه که از اندرکنش مونتوم طولی جریان با جریان ثانویه عرضی شکل می‌گیرد، به عنوان معیاری برای رشد و توسعه جریان ثانویه در طول کانال در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه تنش برشی از روابط زیر استفاده شده است.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{U} \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \quad (3)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{V} \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \quad (4)$$

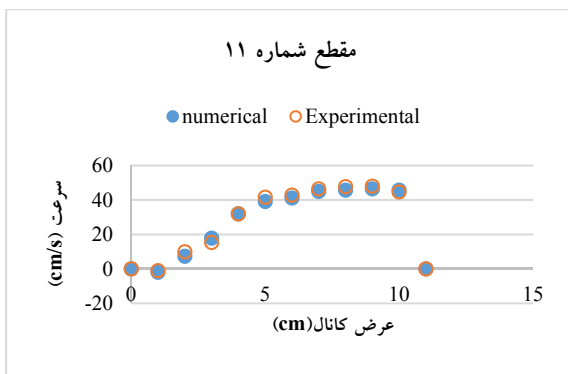
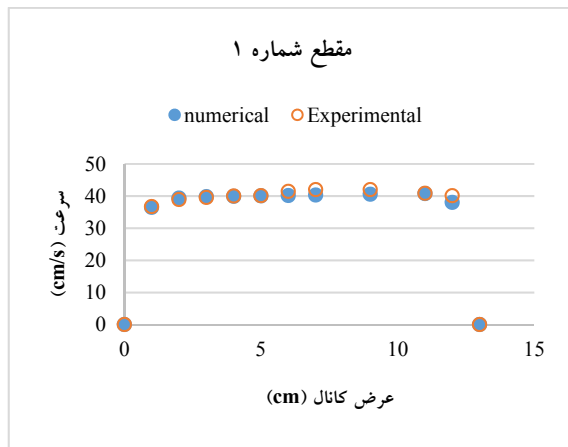
$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad (5)$$

که در آن \bar{U} و \bar{V} به ترتیب متوسط سرعت در جهت‌های x و y (متر بر ثانیه)، τ_{bx} و τ_{by} به ترتیب تنش برشی بستر در جهت x و y (نیوتن بر مترمربع) و ρ و g به ترتیب دانسیته سیال و ضریب گرانش و c ضریب شزی است.

را به دلیل وجود دو فاز آب و هوا در سطح مشترک این دو نوع سیال در نظر می‌گیرد.

همان‌طور که پیش از این بیان شد؛ به منظور انجام کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل از تحقیق آزمایشگاهی بختیاری و همکاران [۸] استفاده شده است. در این بخش شرح مختصری از داده‌برداری صورت گرفته در تحقیق بیان می‌شود. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت بوده است که ابتدا با باز نمودن شیر ورودی آب وارد فلوم شده تا سطح آب درون فلوم افزایش یابد، سپس با باز کردن دریچه کشویی پایین دست سطح آب موردنظر تنظیم شد، پس از کنترل سطح آب با دستگاه عمق‌سنج دیجیتال و اطمینان از حصول عمق موردنظر دریچه ثابت نگه داشته می‌شد. هم‌زمان با یک دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک دبی عبوری کنترل می‌شد. در این مطالعه در تمام آزمایش‌ها عمق جریان برابر ۱۲ سانتی‌متر بوده و تراز سطح آب، همچنین میزان دبی ورودی به صورت پیوسته در تمام طول آزمایش کنترل می‌شد. سرعت‌ها در اطراف آب‌شکن‌ها و مقاطع عرضی معین با دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس برداشت شد. زمان نمونه‌برداری بسته به موقعیت نقاط متفاوت بوده و نمونه‌برداری با فرکانس ۲۰ مگاهرتز صورت گرفته است. برداشت داده‌ها در قوس با مختصات قطبی انجام گرفت و داده‌های به دست آمده با روابط مثلثاتی مربوطه به مختصات دکارتی تبدیل شدند. برای یافتن الگوی جریان نیاز به انتخاب مقطعی مختلف از طول کانال است که بتواند شاخصه‌های جریان را در حالت‌های مختلف نشان دهد. بدین منظور در طول کانال از ۲۴ مقطع طولی ثابت و تعداد زیادی مقطع که با توجه به هر آزمایش و محل قرارگیری آب‌شکن‌ها موقعیتشان متفاوت بود، استفاده شد. هر مقطع به ۱۵ نقطه عرضی با فاصله‌های ۲/۵ سانتی‌متر از دیواره‌ها در ابتدا و انتها و ۵ سانتی‌متر از یکدیگر تقسیم شد. همچنین به منظور بررسی جامع تری از الگوی جریان، سرعت‌ها در دو عمق ۳ و ۹ سانتی‌متر از کف اندازه‌گیری شد. در شکل ۴ نمایی از وضعیت مقاطع یادشده ارائه شده است.

آب‌شکن، α زاویه قرارگیری آب‌شکن و B عرض فلوم آزمایشگاهی است.



شکل ۶. مقایسه مقادیر سرعت در حالت مدل عددی و تحقیق آزمایشگاهی در شرایط حضور آب‌شکن $\alpha = 90^\circ, \lambda = 3, b = 14\text{cm}$

۳-۲. اثر آب‌شکن‌ها بر الگوی توزیع سرعت متوسط

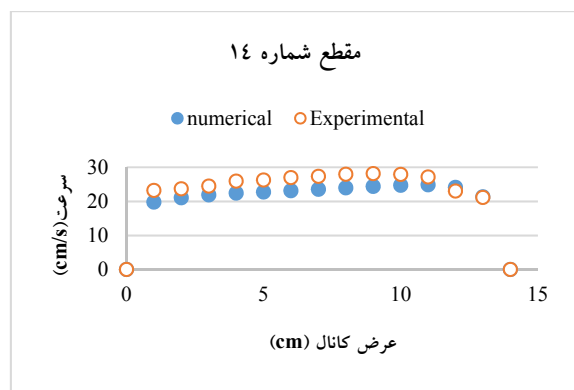
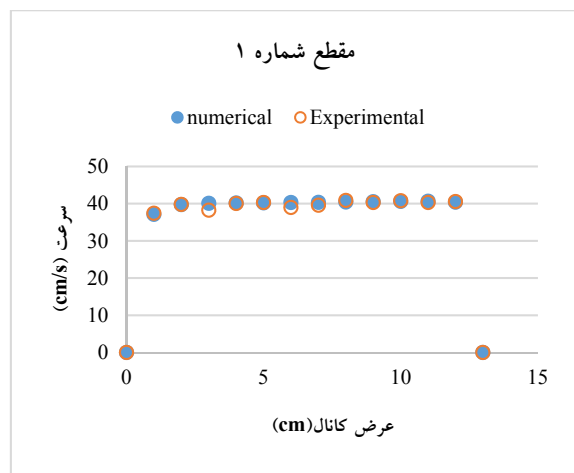
بعد از استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت و محاسبه سرعت‌های متوسط نقطه‌ای، الگوی توزیع سرعت برای لایه‌های عمقی مختلف ترسیم شد که نتایج حاصله در دو صفحه نزدیک به کف با فاصله ۳ سانتی‌متر از کف و صفحه نزدیک به سطح آب با فاصله ۹ سانتی‌متر از کف در شرایط دبی‌های مختلف و هندسه‌های مختلف آب‌شکن ارائه شده است.

شکل ۷ الگوی توزیع سرعت متوسط را در پلان برای قوس در شرایط آب‌شکن‌هایی به طول ۲۵ درصد عرض کانال دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و فاصله طولی ۳ برابر طول آب‌شکن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، در صفحه نزدیک به بستر سرعت دارای توزیع تقریباً یکنواختی در طول کانال است. در شروع قوس در دیواره داخلی سرعت افزایش

۳. نتایج و بحث

۳-۱. صحت‌سنجی مدل عددی

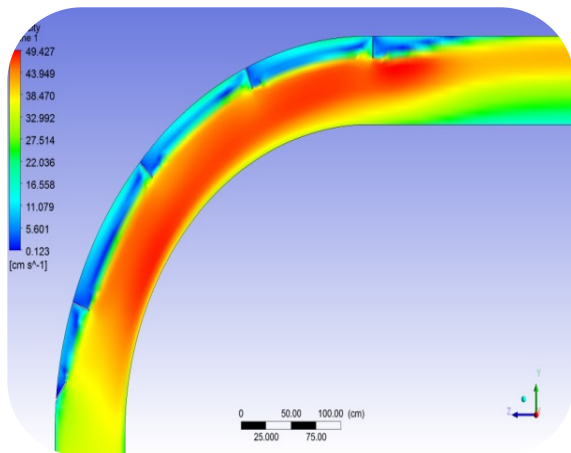
به منظور انجام صحت‌سنجی مدل عددی تهیه شده مطابق جدول (۲)، اقدام به تهیه شش مدل عددی شد، سپس نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق آزمایشگاهی مقایسه شد. شکل‌های (۵) و (۶) مقایسه میان مدل عددی و مدل آزمایشگاهی تهیه شده در برخی مقاطع عرضی را نشان می‌دهد.



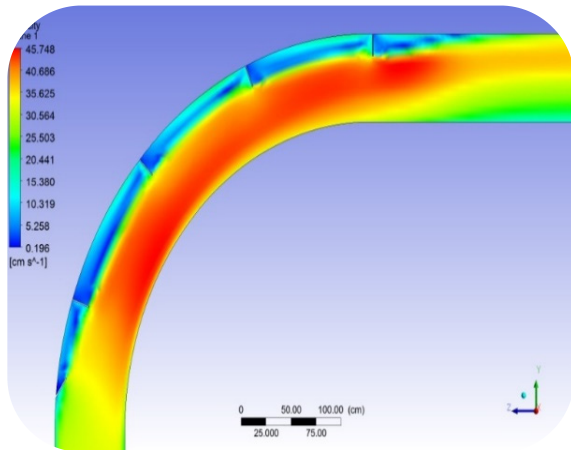
شکل ۵. مقایسه مقادیر سرعت در حالت مدل عددی و تحقیق آزمایشگاهی در شرایط بدون حضور آب‌شکن

نتایج حاصل مقایسه میان داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد، مطابقت خوبی بین داده‌های مورد مقایسه وجود دارد. بررسی‌های کمی نشان می‌دهد درصد اختلاف میان این داده‌ها در طیف زیادی از داده کمتر از ۵ درصد بوده است ولی حد مجاز تا اختلاف حدود ۱۰ درصد بر اساس سطح معنی‌دار اختلاف‌ها در نظر گرفته شده است. در شکل‌های بالا b طول آب‌شکن و λ نسبت فاصله به طول

باید تا پس از قوس ادامه یابد درحالی که یکی از نقایصی که اغلب در طراحی آب‌شکن‌ها در قوس وجود دارد، محافظت از قوس بیرونی تنها در محدوده قوس است. شکل ۸ توزیع سرعت را در دو صفحه در حالت به کارگیری آب‌شکن‌هایی به طول ۲۵ درصد عرض کانال دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و فاصله طولی ۷ برابر طول آب‌شکن نشان می‌دهد، مطابق شکل سرعت در مجاورت قوس خارجی کاهش یافته و حضور آب‌شکن‌ها موجب انتقال ناحیه پرسرعت از دیواره خارجی به سمت دیواره داخلی در ابتدای قوس و میانه کانال در ادامه مسیر می‌شود.



(الف)

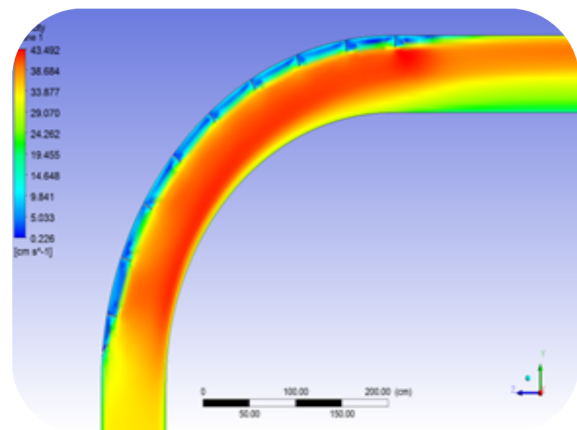


(ب)

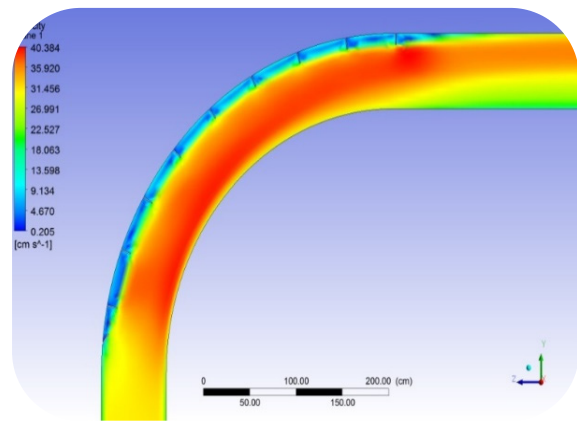
شکل ۸ الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 25 \text{ lit/s}$, $\lambda = 7$, $b = 17.5 \text{ cm}$ (الف) و ۳ (ب) و ۹ سانتی‌متر از کف

بررسی نتایج نشان می‌دهد مشابه حالت قبل، در یک‌سوم انتهای قوس نیز حداکثر سرعت به سمت قوس خارجی منتقل می‌شود.

یافته و ناحیه پرسرعت در مجاورت دیواره داخلی و ناحیه کم‌سرعت در مجاورت دیواره خارجی به وجود می‌آید، اما با پیشروی در قوس سرعت‌ها در دیواره‌های داخلی و خارجی به یکدیگر نزدیک می‌شود. در عمق دوم و در ابتدای قوس نواحی پرسرعت در مجاورت دیواره داخلی هستند، ولی با نزدیک شدن به انتهای قوس و بعد از زاویه حدود ۴۰ درجه به سمت دیواره خارجی متمایل می‌شوند، همان‌طور که بیشینه سرعت در قوس، در یک‌سوم انتهایی و در مجاورت دیواره خارجی آن مشاهده می‌شود. در یک‌سوم ابتدایی قوس سرعت‌های حداکثر از دیواره خارجی قوس فاصله داشته است.



(الف)

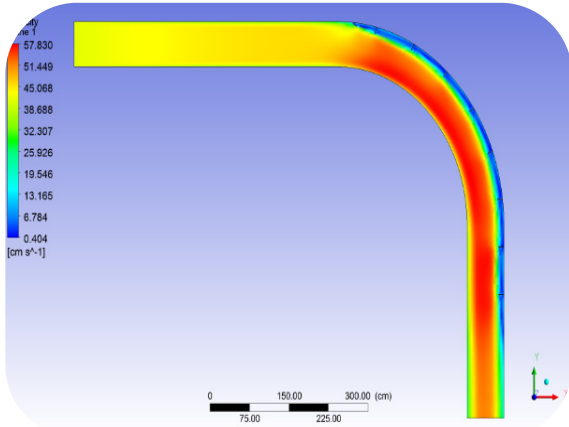


(ب)

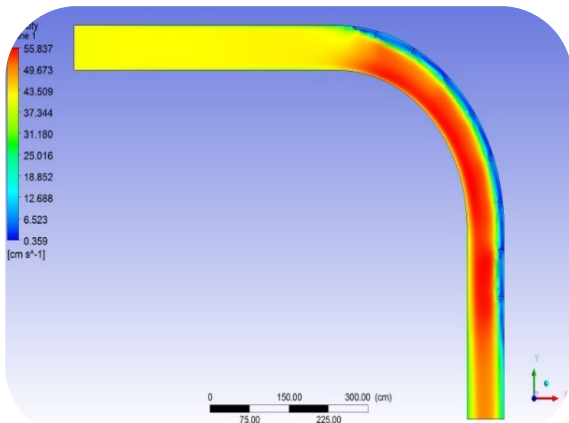
شکل ۷ الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 25 \text{ lit/s}$, $\lambda = 3$, $b = 17.5 \text{ cm}$ (الف) و ۳ (ب) و ۹ سانتی‌متر از کف

بررسی نتایج نشان می‌دهد، در این شکل تمرکز نواحی حداکثر سرعت در پایین دست قوس در مجاورت دیواره خارجی قوس است که نشان می‌دهد که محافظت از قوس

سرعت بیشتر به وجود آمده است. این موضوع می‌تواند به ناپایداری سازه آب‌شکن‌ها منجر شود. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول آب‌شکن‌ها و کاهش بیشتر سطح مقطع عبور جریان، سرعت‌ها در این حالت هم نسبت به حالت قبل افزایش یافته است.



(الف)



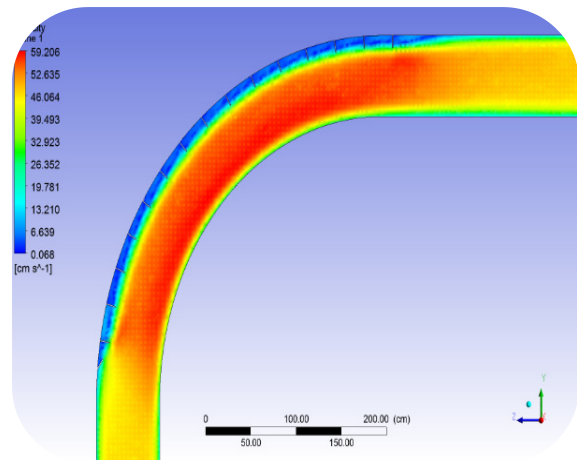
(ب)

شکل ۱۰. الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 34.4 \text{ lit/s}, \lambda = 7, b = 10.5 \text{ cm}$ در دو صفحه با فاصله (الف) ۳ و (ب) ۹ سانتی‌متر از بستر

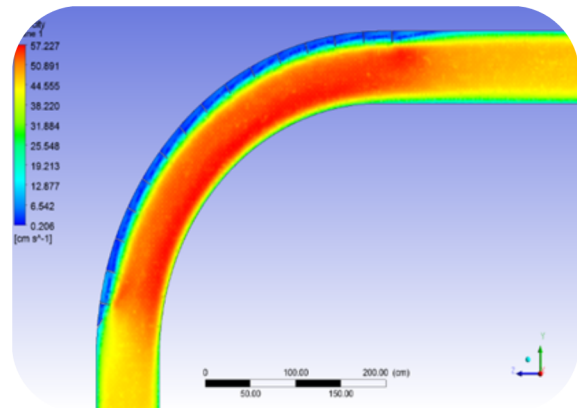
۳-۳. اثر آب‌شکن‌ها بر موقعیت سرعت بیشینه

به منظور بررسی تأثیر آب‌شکن‌ها بر موقعیت سرعت بیشینه ابتدا مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت استخراج شد، سپس با محاسبه سرعت متوسط موقعیت بیشینه سرعت متوسط در دو صفحه نزدیک به بستر با فاصله ۳ سانتی‌متر و صفحه نزدیک به سطح آب با فاصله ۹ سانتی‌متر از بستر ترسیم شد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، بعد از ورود جریان به قوس و تا زاویه حدود ۳۱ درجه سرعت بیشینه نزدیک به دیواره

توزیع سرعت در دو صفحه نزدیک بستر و نزدیک به سطح آب برای حالت قرارگیری آب‌شکن با طول ۱۵ درصد عرض کانال در شکل‌های ۹ و ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است.



(الف)



(ب)

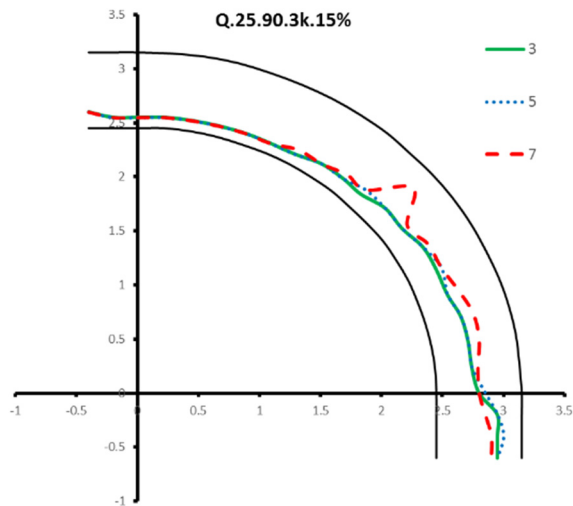
شکل ۹. الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 34.4 \text{ lit/s}, \lambda = 3, b = 10.5 \text{ cm}$ در دو صفحه با فاصله (الف) ۳ و (ب) ۹ سانتی‌متر از بستر

در این حالت‌ها نیز بردارهای حداکثر سرعت از مجاورت ساحل بیرونی قوس منحرف شده و مانع از برخورد این بردارها با جداره بیرونی قوس شده‌اند. ناحیه با سرعت‌های حداکثر در یک‌سوم انتهایی قوس و در مجاورت ساحل داخلی اتفاق افتاده است.

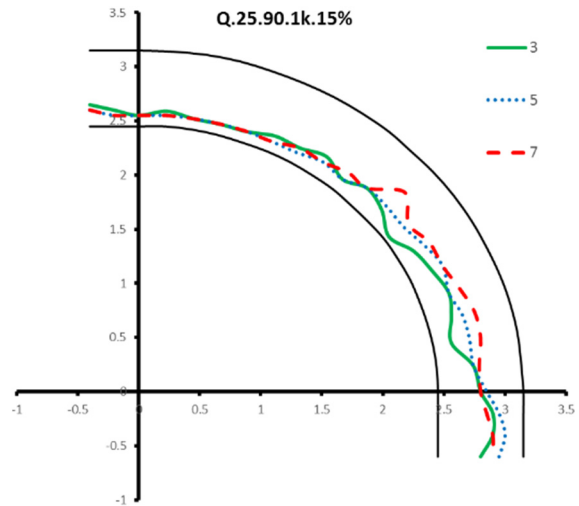
مقایسه حالت‌های مورد بررسی نشان می‌دهد، توزیع سرعت در ابتدا و میانه کانال وضعیت مشابهی با یکدیگر داشته است؛ اما تفاوت در توزیع سرعت بین آب‌شکن‌هاست، در حالت فاصله کم بین آب‌شکن‌ها ناحیه با سرعت کم به‌طور کامل حاکم شده اما با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها ناحیه‌ای با

به دست آمده با نتیجه تحقیق ناجی ابهری و همکاران در سال ۲۰۱۰ مطابقت دارد. آن‌ها در تحقیقی که روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه انجام دادند نتیجه گرفتند که سرعت‌های بیشینه تا زاویه ۳۰ درجه نزدیک به دیواره داخلی هستند و بعد از آن به سمت دیواره خارجی قوس متمایل می‌شوند.

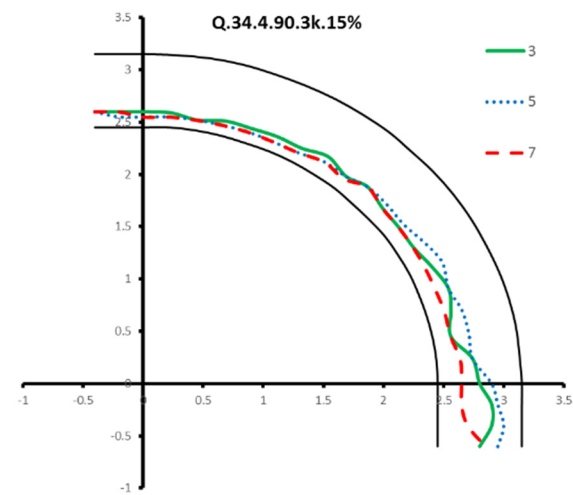
داخلی قوس است و بعد از این ناحیه به تدریج از دیواره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه کانال، سپس به طرف دیواره خارجی حرکت می‌کند و در انتهای قوس و ابتدای قسمت مستقیم پایین دست موقعیت سرعت بیشینه به دیواره خارجی قوس متمایل می‌شود. لازم به یادآوری است نتیجه



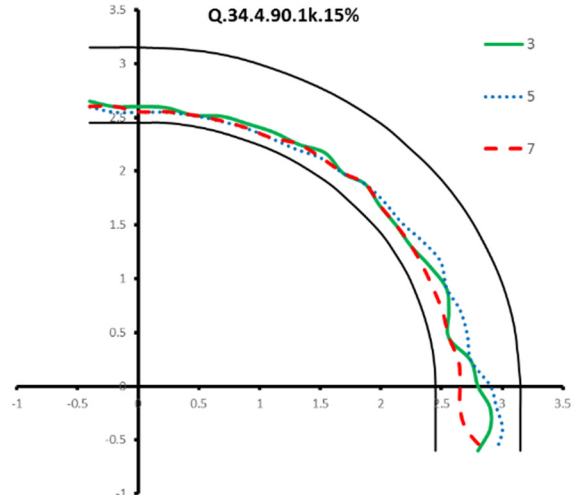
(ب)



(ف)

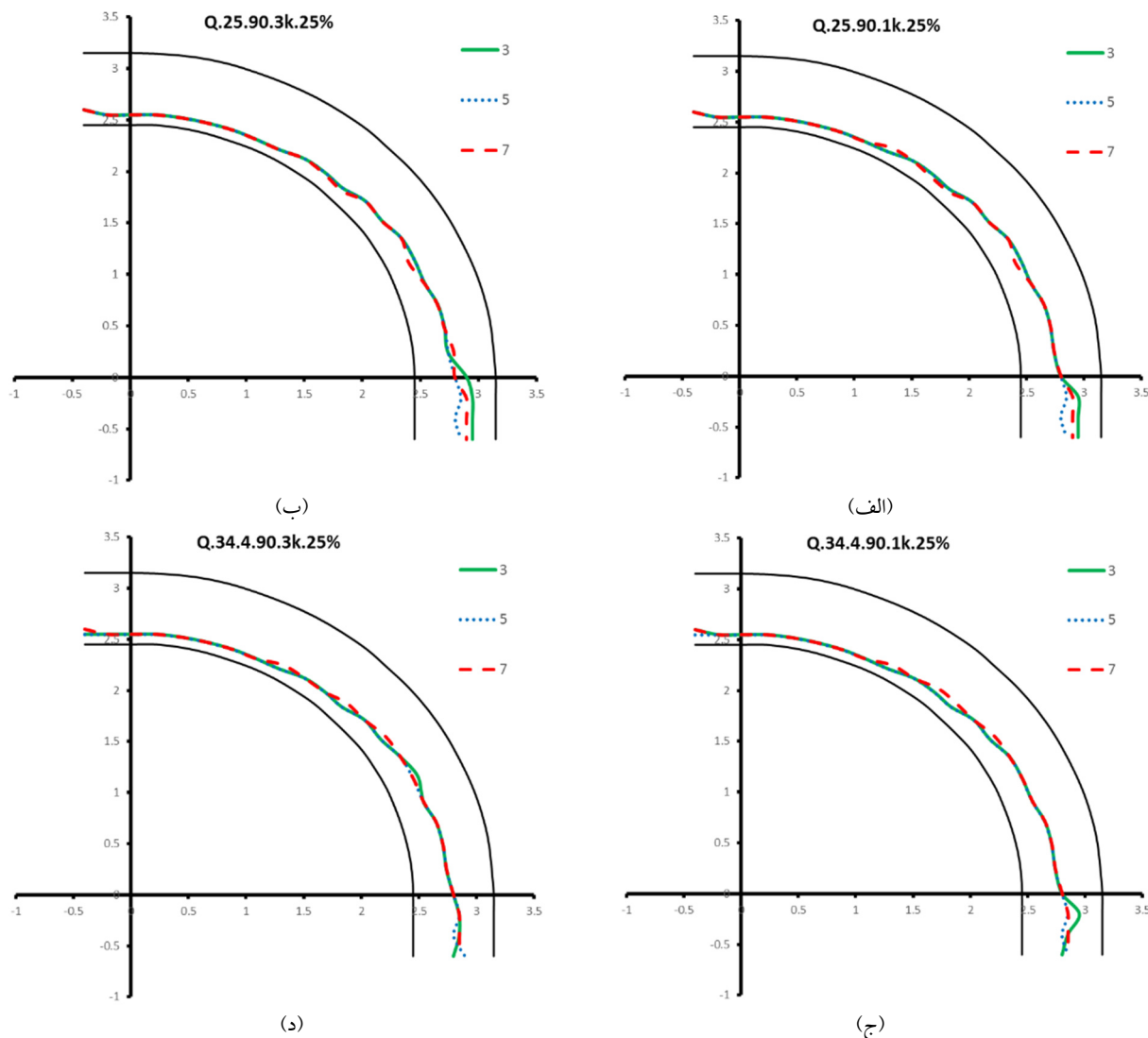


(د)



(ج)

شکل ۱۱. موقعیت سرعت بیشینه در حالت به کارگیری آب‌شکن‌هایی به طول ۱۵ درصد (الف) دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و عمق ۳ سانتی‌متر از بستر، (ب) دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و عمق ۹ سانتی‌متر از بستر، (ج) دبی ۳۴ لیتر در ثانیه و عمق ۳ سانتی‌متر از بستر و (د) دبی ۳۴ لیتر در ثانیه و عمق ۹ سانتی‌متر از بستر



شکل ۱۲. موقعیت سرعت بیشینه در حالت به کارگیری آب‌شکن‌هایی به طول ۲۵ درصد. (الف) دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و عمق ۳ سانتی‌متر از بستر، (ب) دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و عمق ۹ سانتی‌متر از بستر، (ج) دبی ۳۴ لیتر در ثانیه و عمق ۳ سانتی‌متر از بستر و (د) دبی ۳۴ لیتر در ثانیه و عمق ۹ سانتی‌متر از بستر

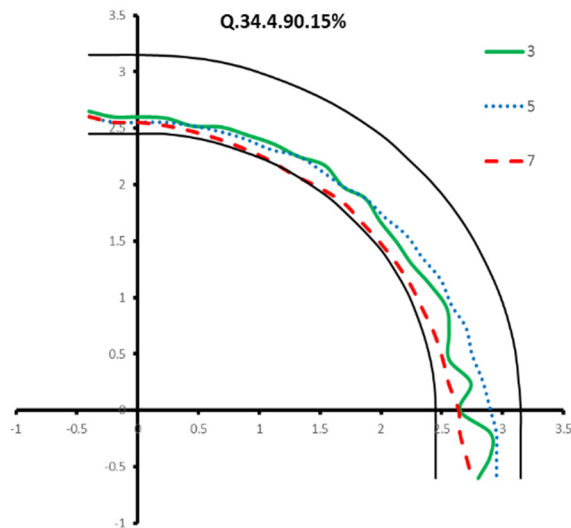
با حضور آب‌شکن‌هایی با طول معادل ۲۵ درصد عرض کانال موقعیت سرعت بیشینه نسبت به الگوی رخ داده برای حالت قبل چندان تغییری ندارد. یعنی در مرحله ورود به قوس حداکثر سرعت متمایل به قوس داخلی، سپس به میانه و در انتهای کانال به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود. لازم به بیان است در هر دو عمق مورد مطالعه همین روند تکرار می‌شود و برخلاف حالت قبلی تغییر در فاصله میان آب‌شکن‌ها هیچ‌گونه تغییری ایجاد نکرده است. لازم به یادآوری است در نمودارهای فوق اعداد ۳، ۵ و ۷ نسبت فاصله قرارگیری به طول آب‌شکن است. همچنین واحدهای محورهای افقی و عمودی متر است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد؛ برای آب‌شکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال، برای همه فواصل میان آب‌شکن‌ها با ورود جریان به قوس موقعیت سرعت بیشینه به نزدیکی دیواره داخلی منتقل می‌شود و تا زاویه ۴۰ درجه در این ناحیه قرار دارد؛ اما بعد از زاویه ۴۰ درجه قوس محل اتفاق سرعت بیشینه شروع به حرکت به طرف میانه کانال کرده و تا انتهای قوس و مسیر مستقیم پایین دست در میانه کانال قرار دارد. نکته قابل توجه در این بخش این است که در فاصله ۷ برابر طول آب‌شکن، با افزایش دبی از میانه کانال به سمت انتهای کانال موقعیت بیشترین میزان سرعت متوسط به قوس داخلی متمایل تر است.

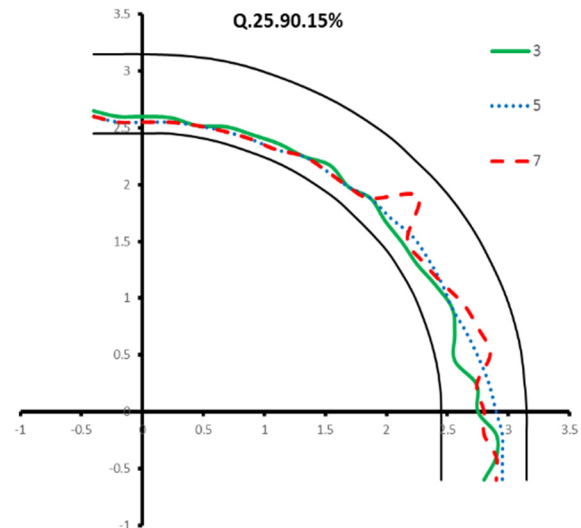
شکل ۱۳ نشان دهنده موقعیت بیشینه تنش برشی در هر مقطع مختلف قوس است. بررسی صورت گرفته برای دو طول آب شکن معادل ۱۵ و ۲۵ درصد عرض کانال و در دو دبی ۲۵ و ۳۴/۴ لیتر در ثانیه انجام شده است.

۳-۴. اثر آب شکن‌ها بر بیشینه تنش برشی

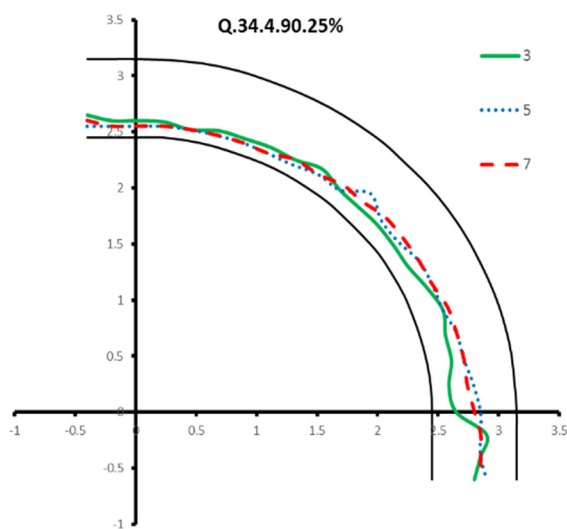
نظر به این که بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات پیشین نشان می‌دهد، جریان ثانویه در قوس موجب وقوع نیروی برشی بزرگی در قوس نسبت به مسیرهای مستقیم می‌شود؛ در این بخش به بررسی تأثیر آب شکن‌ها بر موقعیت بیشینه تنش برشی پرداخته شده است.



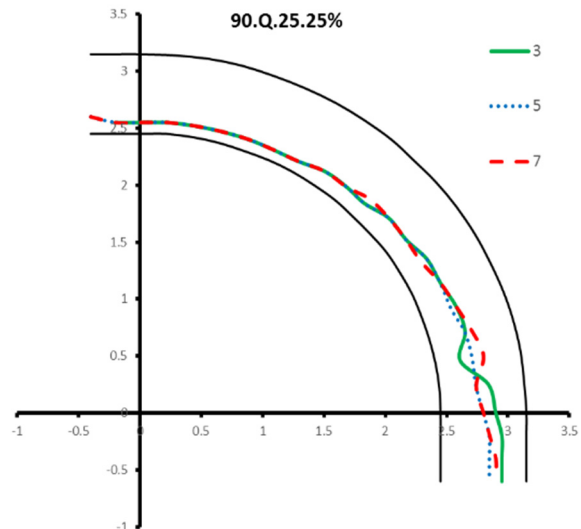
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳. تغییرات بیشینه تنش برشی بی‌بعد شده در طول قوس کانال با و بدون حضور آب شکن‌ها

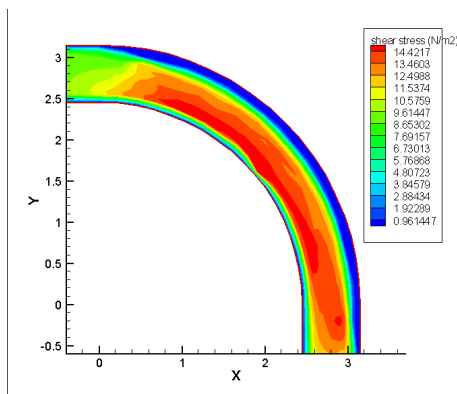
همچنین با افزایش طول آب شکن به میزان ۲۵ درصد عرض کانال، نیز همین روند مشاهده می‌شود با این تفاوت که در شرایط طول کمتر این روند در هر سه بخش کانال متمایل به قوس داخلی است و افزایش در طول آب شکن بیشترین میزان تنش برشی را همواره به میانه متمایل تر نموده است.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در شرایط حضور آب شکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال، در ابتدای ورود به قوس به سمت قوس داخلی بیشتر متمایل است؛ به تدریج به سمت میانه کانال منحرف شده، سپس در یک سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود.

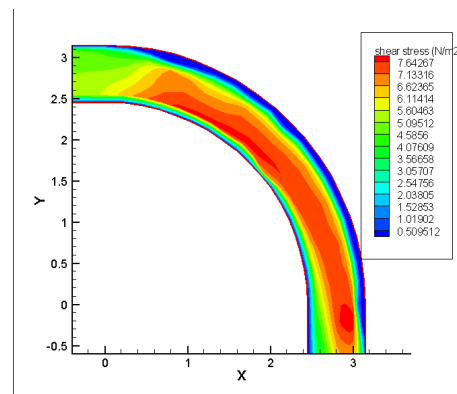
قوس رودخانه‌ها آسیب‌پذیرترین مناطق در مقابل فرسایش بستر و نواحی با تنش برشی کم مناسب‌ترین مناطق برای رسوب‌گذاری هستند؛ بنابراین، در این بخش به بررسی الگوی توزیع تنش برشی متوسط پرداخته شده است.

نمودارهای بالا اعداد ۳، ۵ و ۷ نسبت فاصله قرارگیری به طول آبشکن است. همچنین واحدهای محورهای افقی و عمودی متر است.

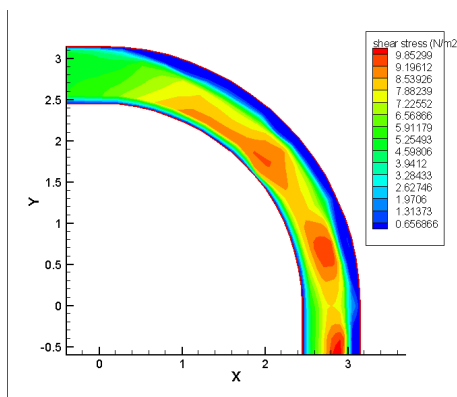
۳-۵. تأثیر آبشکن‌ها بر الگوی توزیع تنش برشی در کانال با توجه به این که محدوده‌های دارای بیشترین تنش برشی در



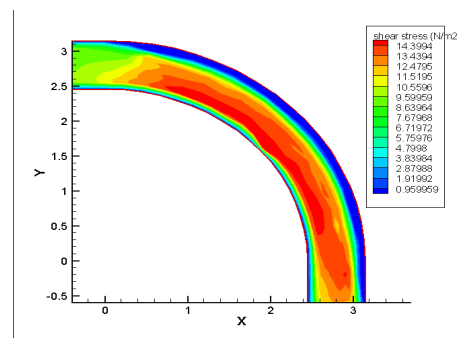
(ب)



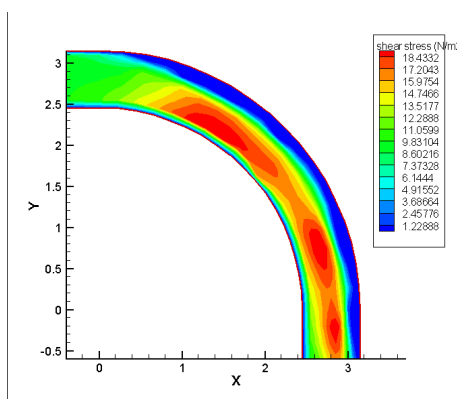
(الف)



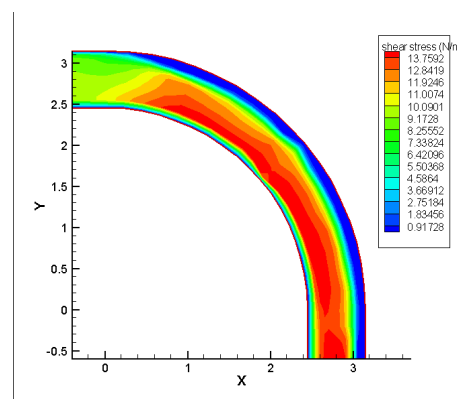
(د)



(ج)



(ز)



(ه)

شکل ۱۴. توزیع تنش برشی بستر با به‌کارگیری آبشکن‌هایی با شرایط (الف) طول ۲۵٪ عرض کانال، دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و فاصله ۳ برابر طول آبشکن (ب) طول ۱۵٪ عرض کانال، دبی ۳۴/۴ لیتر در ثانیه و فاصله ۳ برابر طول آبشکن، (ج) طول ۲۵٪ عرض کانال، دبی ۳۴/۴ لیتر در ثانیه و فاصله ۳ برابر طول آبشکن، (د) طول ۲۵٪ عرض کانال، دبی ۲۵ لیتر در ثانیه و فاصله ۷ برابر طول آبشکن، (ه) طول ۱۵٪ عرض کانال، دبی ۳۴/۴ لیتر در ثانیه و فاصله ۷ برابر طول آبشکن و (ز) طول ۲۵٪ عرض کانال، دبی ۳۴/۴ لیتر در ثانیه و فاصله ۷ برابر طول آبشکن

میانه کانال منحرف می شود. در ادامه و در یک سوم انتهایی قوس حداکثر سرعت به سمت قوس خارجی منحرف می شود.

همچنین بررسی نتایج نشان می دهد، افزایش طول آب شکن ها موجب افزایش حداکثر سرعت در کانال می شود.

حضور سری آب شکن ها در قوس سبب کاهش چشمگیر قدرت جریان ثانویه از محل نصب آب شکن ها تا انتهای قوس نسبت به حالت بدون حفاظت شده، همچنین افزایش طول آب شکن ها نیز خود سبب کاهش بیشتر قدرت جریان ثانویه در طول قوس شده است.

در خصوص وضعیت تنش برشی نتایج به دست آمده نشان می دهد وضعیت رخ داده برای الگوی تنش برشی مشابه الگوی سرعت متوسط است. همچنین نتایج نشان می دهد افزایش طول آب شکن ها باعث افزایش میزان تنش برشی حداکثر شده و افزایش در فاصله میان آب شکن ها نیز موجب ایجاد ناحیه با تنش برشی بیشتر نسبت به فواصل کمتر می شود. بررسی نتایج نشان می دهد تغییر در هندسه آب شکن ها تأثیر زیادی بر موقعیت تنش برشی حداکثر ندارد و بیشترین میزان تنش برشی در زاویه حدود ۸۰ درجه رخ می دهد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مطالعه ای که توسط قدسیان و همکاران صورت گرفته است؛ مطابقت دارد این نتیجه مشترک بدین صورت است که قرار دادن آب شکن در قوس خارجی سبب دور شدن سرعت بیشینه از دیواره خارجی قوس می شود.

منابع

- [1] Shams M, Ahmadi G, Smith DH. Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers. *Advances in water resources*. 2002 Jun 1;25(6):689-99.
- [2] Wilson CA, Boxall JB, Guymer I, Olsen NR. Validation of a three-dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003 Oct;129(10):758-68.
- [3] Duan JG, He L, Fu X, Wang Q. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. *Advances in Water Resources*. 2009 Dec 1;32(12):1717-25.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد افزایش در فاصله قرارگیری میان آب شکن ها موجب عدم یکنواختی توزیع تنش برشی می شود. روند کلی الگوی تنش برشی تقریباً مشابه الگوی رخ داده بر توزیع سرعت متوسط است، بدین صورت که در ابتدای ورود جریان به قوس بیشترین میزان تنش برشی به سمت قوس داخلی، سپس از زاویه ۳۰ درجه به تدریج حداکثر تنش برشی به میانه کانال منحرف می شود؛ سپس در قسمت یک سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی منحرف می شود. همچنین بررسی ها نشان می دهد در همه شرایط مورد بررسی با افزایش دبی جریان از ۲۵ لیتر در ثانیه به ۳۴/۴ لیتر در ثانیه، بیشترین میزان تنش برشی به سمت قوس داخلی متمایل می شود. مهم ترین اثر قرار دادن آب شکن ها در قوس، انتقال ناحیه پرتنش که سبب تخریب دیواره ها می شود از دیواره خارجی قوس به میانه کانال و دیواره داخلی است که علت این مسئله برخورد جریان با آب شکن ها و انحراف آن به سمت دیواره داخلی و ایجاد آشفتگی در محل دیواره داخلی است که سبب افزایش تنش برشی می شود؛ اما نواحی با تنش برشی کم در بین آب شکن ها وجود دارد که این موقعیت ها محل های مستعد برای رسوب گذاری است.

۴. نتیجه گیری

همان گونه که پیش از این بیان شد؛ هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر آب شکن ها بر الگوی جریان در شرایط قوس ملایم ۹۰ درجه با استفاده از مدل عددی انسیس است. بدین منظور اقدام به تعریف الگوی مدل سازی برای اجرای مدل شد. جهت کالیبراسیون مدل از داده های آزمایشگاهی بختیاری و همکاران استفاده شد. سپس اقدام به مدل سازی شد. پس از استخراج داده های سرعت در سه بعد، سرعت متوسط، الگوی توزیع سرعت متوسط، موقعیت بیشینه سرعت متوسط در مقاطع مختلف کانال، الگوی توزیع تنش برشی متوسط و موقعیت حداکثر تنش برشی متوسط استخراج و ترسیم شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد در کلیه شرایط قرارگیری آب شکن ها، در ابتدای قوس حداکثر سرعت در سمت قوس داخلی رخ می دهد؛ سپس به سمت

[۴] قدسیان مسعود، بررسی آبشستگی، رسوب گذاری و الگوی جریان اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه. شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران؛ ۱۳۸۸.

[۵] قدسیان مسعود، واقفی محمد، پناه‌پور نیما. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان دوبعدی اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳۸۷؛ ۱۵(۴): ۲۶۹-۲۸۲.

[۶] واقفی محمد، قدسیان مسعود. مطالعه آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و مقدار ورتیسیتی در قوس ۹۰ درجه با آبشکن T شکل منفرد. نشریه مهندسی عمران. ۱۳۸۹؛ ۲۱(۲): ۱۱۲-۱۳۰.

[7] Naji Abhari M, Ghodsian M, Vaghefi M, Panahpur N. Experimental and numerical simulation of flow in a 90 degrees bend. Flow Measurement and Instrumentation. 2010; 21: 292-8.

[۸] بختیاری مرتضی. بررسی تأثیر پارامترهای هندسی آبشکن و عمق کارگذاری ریپرپ برای محافظت از آبشکن در قوس ۹۰ درجه. [رساله دکترا]. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز؛ ۱۳۹۱.

پی‌نوشت

1. Deposition
2. Duan et al
3. Van den Heever
4. Typical Sinusoidal South African Rivers