دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک
دورهٔ چهارم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۳۹۷)
مقالهٔ پژوهشی

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

یاسر اهلی[۱]، مرتضی بختیاری[۲*]، مسیح مر[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی رودخانه، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر yaser.ahli@gmail.com
[۲*] نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر mortezabakhtiari@yahoo.com
[۳] مربی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر masih.moore@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۱۹ **تاریخ پذیرش:** ۹۸/۵/۱۲

چکیده

به‌منظور 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 محدودهٔ رودخانه جریان‌های ثانویه درگیرشده و به‌تبع 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؛ درنهایت در یک‌سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی منتقل می‌شود. در خصوص توزیع تنش برشی نتایج به‌دست‌آمده 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 درجهٔ ملایم

۱. مقدمه

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 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

است. الگوی غالب برای شکل رودخانه در پلان پیچان‌رودی است، به خاطر حرکت پیچان‌رودها به پایین‌دست 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 واردشدن جریان در قوس رودخانه توزیع سرعت آن تغییر می‌کند، توزیع قائم سرعت در رودخانه‌های مستقیم در جریان دائم از قانون لگاریتمی به‌خوبی 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 باتوجه به هندسهٔ پیچان‌رود و شرایط جریان ارائه شده‌است. تاکنون، در زمینهٔ الگوی جریان در قوس‌ها مطالعات زیادی به‌صورت 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 فلوئنت به تحلیل جریان و انتقال رسوب در یک کانال خمیده مئاندری پرداختند. آن‌ها با به‌کارگیری روش لاگرانژی توانستند به تحلیل مسیر حرکت ذرات نحوهٔ ترسیب[1] آن‌ها برحسب اندازهٔ دانه‌ها بپردازند [۱]. رایت، هنربخش و تورن با به‌کارگیری مدل عددی سه‌بعدی سیم و مدل عددی دوبعدی ریپا به بررسی هیدرودینامیکی جریان در یک کانال آزمایشگاهی و فرسایش جداره‌ها در یک رودخانهٔ 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 شیوهٔ پخش ماده رنگی در یک کانال آزمایشگاهی مئاندری پرداختند. این محققان هدف اصلی کار خود را نیاز مدل‌های عددی به صحت‌سنجی آن‌ها در برابر داده‌های متنوع آزمایشگاهی، میدانی و بررسی دقت عملکرد و کارایی آن‌ها در موقعیت‌های گوناگون، عنوان کرده‌اند [۲].

دوان[2] و همکاران، با استفاده از یک سرعت‌سنج، داده‌های سه بعدی سرعت را در یک کانال مستقیم با حضور یک آب‌شکن مستطیلی به‌دست 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 نشان‌دهندهٔ افزایش مؤلفهٔ طولی، عرضی و کاهش مؤلفهٔ 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 درجهٔ ملایم پرداختند و با تحلیل داده‌های سرعت سه‌بعدی 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 پایین‌دست آب‌شکن ظاهر می‌شود. همچنین افزایش طول بال آب‌شکن‌ها سبب افزایش طول ناحیهٔ جدایی جریان و افزایش اندازه گردابه‌های ایجاد شده می‌شود [۴].

ناجی ابهری و همکاران، الگوی جریان در یک قوس ۹۰ درجهٔ با بستر صلب را بررسی نموده و خصوصیات جریان از جمله نحوهٔ تأثیر جریان ثانویه بر توزیع سرعت، مسیر حداکثر سرعت و غیره را مورد مطالعه قرار دادند. برپایهٔ 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 منطقهٔ بیشینه تنش در قسمت خروجی قوس و دیوارهٔ خارجی آن اتفاق می‌افتد [۷].

فان- دن هیور[3]، با انجام یک تحقیق آزمایشگاهی و استفاده از مدل دوبعدی سی. سی. اچ. ای دوبعدی به بررسی فرسایش، رسوب‌گذاری و هیدرولیک جریان در مدل آزمایشگاهی ساخته شده از رودخانه‌های مئاندری معمول[4] در

آفریقای جنوبی پرداخت. طول، فاصله و زاویهٔ قرارگیری آب‌شکن‌ها متغیرهای مورد مطالعهٔ وی بودند. از نتایج این تحقیق می‌توان به گزارش ایجاد یک ناحیهٔ کم سرعت بین آب‌شکن‌ها اشاره کرد که رسوب‌گذاری در این ناحیه صورت می‌گیرد. با افزایش فاصلهٔ آب‌شکن‌ها از یکدیگر سرعت بین آن‌ها افزایش می‌یابد که خود باعث تغییر در الگوی رسوب‌گذاری بین آب‌شکن‌ها می‌شود. همچنین با مقایسهٔ داده‌های آزمایشگاهی با خروجی مدل مزبور به این نتیجه رسید که مدل دوبعدی یادشده 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، مطالعهٔ 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 درجهٔ 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، زاویهٔ قرارگیری متفاوت ۹۰ درجهٔ (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.

جدول ۱. الگوی انجام مدل‌سازی تحقیق حاضر

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

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. جدارهٔ 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 به‌ترتیب 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.

شکل ۱. فلوم قوسی مورد استفاده برای مدل‌سازی‌ها، دانشگاه شهید چمران اهواز

نرم افزار انسیس

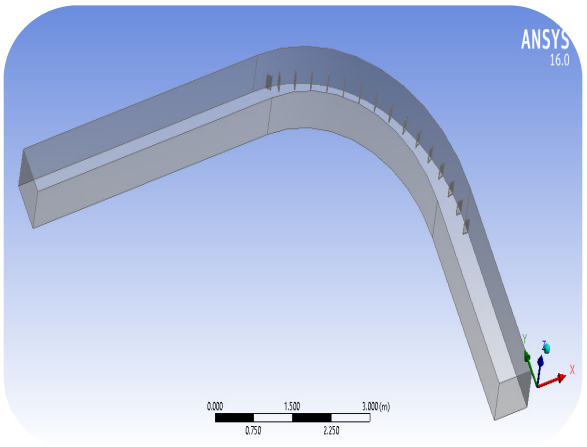
این نرم‌افزار یکی از نرم‌افزارهای بسیار قدیمی در تحلیل‌های دینامیک محاسباتی است که به دلیل توانمندی‌های بالا و قابلیت کاربری آسان، کاربران بسیاری دارد و از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی و تحلیل در آن استفاده می‌شود. روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی برای حل مسائل فیزیکی است که با معادله‌های دیفرانسیل توصیف می‌شوند. از میان نرم‌افزارهای با قابلیت مشابه می‌توان از آباکوس و استار سی سی‌ام پلاس یاد کرد که در نرم افزار آباکوس روش حل مانند نرم افزار انسیس روش اجزاء محدود و در نرم افزار استار سی سی‌ام پلاس روش حل حجم محدود است.

- ✓ بخش‌های مختلف نرم‌افزار انسیس عبارتند از:
- ✓ هندسه: در این قسمت با ابزارهای موجود، هندسه کانال طراحی و هندسه مورد نظر قبل از مش‌بندی، در محیط ماژول طراحی از لحاظ داشتن نقص‌های احتمالی و کیفیت طراحی، کنترل شد. سپس هندسه ایجاد شده در قسمت مش، مش‌بندی شده و کیفیت مش‌بندی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه گزارش کنترل کیفیت هندسه و مش‌بندی آورده شده است.
- ✓ برپایی مدل: در این قسمت مشخصات جریان، شرایط مرزی، به نرم‌افزار معرفی شد.
- ✓ حل: در این قسمت بعد از بازبینی اطلاعات وارد شده، نرم‌افزار اجرا می‌شود.
- ✓ خروجی: در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل، برای بحث و نتیجه‌گیری قابل مشاهده است.

۲-۱. شبیه‌سازی

۲-۱-۱. ایجاد هندسه و شبکه‌بندی میدان حل

برای مدل‌سازی هندسهٔ کانال مورد نظر، با استفاده از دو نرم افزار اتوکد و سالیدورک رسم و در شکل (۲) نشان داده شده است. بعد از ایجاد هندسه مدل، در سیستم هندسه، نرم‌افزار انسیس، امکان کنترل کیفیت هندسه ایجاده شده را به کاربر می‌دهد و اشکالات احتمالی موجود در هندسه ایجاده شده را فهرست کرده و به کاربر نشان می‌دهد تا وی آن‌ها را قبل از وارد شدن به مرحلهٔ تحلیل، اصلاح نماید. با انتخاب کل هندسه، اشکال و ایرادی برای هندسه ایجاد شده وجود نداشت و هندسه مدل برای انجام بقیهٔ مراحل تحلیل به سیستم مش انتقال داده شد.



شکل ۲. هندسه ایجاد شده در نرم افزار اتوکد و سالیدورک

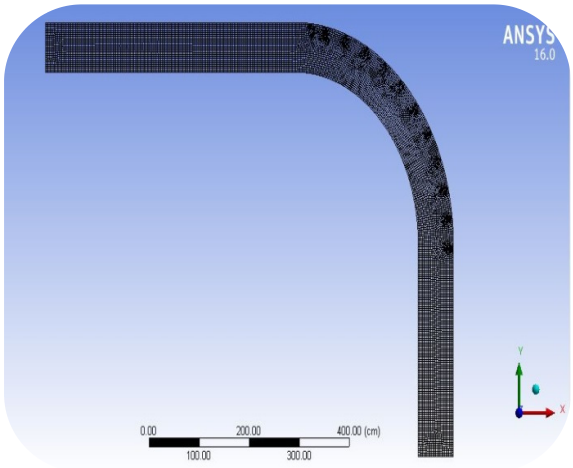
۲-۱-۲. شبکه‌بندی

مش‌بندی محدودهٔ جریان، دقت حل مسئله به تعداد سلول‌های موجود در شبکه بستگی دارد و اصولاً شبکه‌های غیریکنواخت، با تعداد سلول‌های مختلف در قسمت‌های مختلف بدنه بسته به موقعیت آن، در حل یک مسئله قابلیت بیشتری دارند. البته باید درنظر داشت که ایجاد چنین شبکه‌ای به عوامل مختلفی ازجمله نوع مدل اغتشاشی، شکل ظاهری

مدل مانند مقطع عرضی، نوع مسئلهٔ 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 محدودهٔ 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 به‌ترتیب 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

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، مقادیر میانگین، حداقل، حداکثر به‌ترتیب 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 دهندهٔ 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 (۱ >۰/۲۶، ۰/۳۵، ۰/۳۹=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 خواهدشد.

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 درنظر گرفته شد، عمق جریان در قالب فشار هیدرواستاتیک به این مقطع اعمال شده است.

۲- ۲- ۳. شرایط مرزی جداره‌های کانال

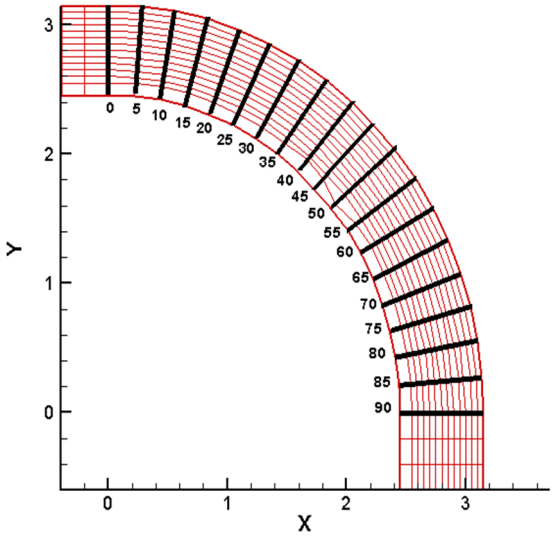
شرط مرزی دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با جامد به کار می‌رود در مسئله موردنظر، جداره‌ها شامل کف و دو دیوارهٔ کانال است. برای صحت‌سنجی براساس مدل آزمایشگاهی موجود، مسطح در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۴. شرایط مرزی سطح آزاد

جریان با سطح آزاد به یک حالت جریان چند فازی 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

را به دلیل وجود دو فاز آب‌وهوا در سطح مشترک این دو نوع سیال در نظر می‌گیرد.

همان‌طور که پیش از این بیان شد؛ به‌منظور 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 بازکردن دریچهٔ کشویی پایین‌دست سطح آب موردنظر تنظیم شد، پس از کنترل سطح آب با دستگاه عمق‌سنج دیجیتال و اطمینان از حصول عمق موردنظر دریچهٔ 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 به‌صورت 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 به‌دست‌آمده با روابط مثلثاتی مربوطه به مختصات دکارتی تبدیل شدند. برای یافتن الگوی جریان نیاز به انتخاب مقاطعی 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 مقاطع 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 به‌منظور بررسی جامع‌تری 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.



شکل ۴. طرح شماتیک از مقاطع مختلف طول کانال

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

$$\overline{V_r} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \qquad (۱)$$

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

$$i = \frac{\int v^2 dA}{\int u^2 dA} \qquad (۲)$$

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

برای محاسبهٔ تنش برشی از روابط زیر استفاده شده است.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2}\bar{U}\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \qquad (۳)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2}\bar{V}\sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \qquad (۴)$$

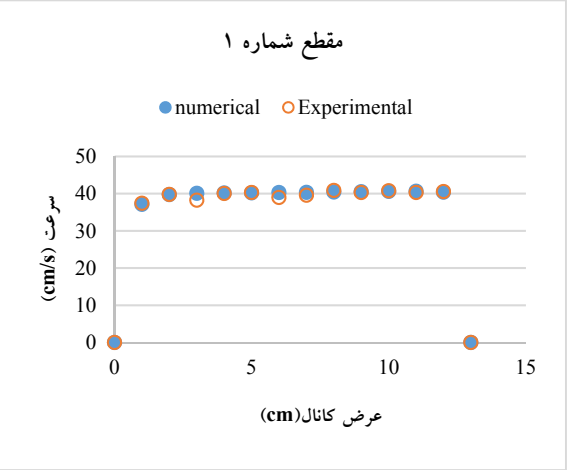
$$\tau_b = \sqrt{{\tau_{bx}}^2 + {\tau_{by}}^2} \qquad (۵)$$

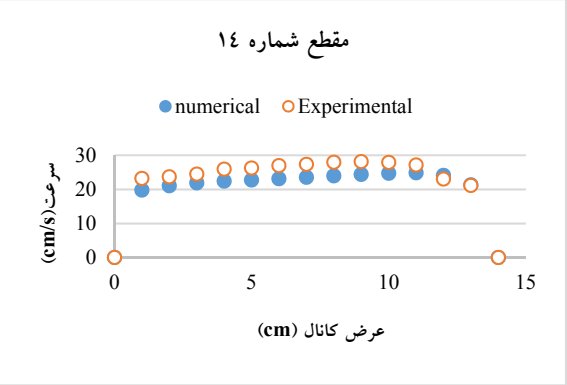
که در آن $\overline{U}$ و $\overline{V}$ به‌ترتیب متوسط سرعت در جهت‌های x و y (متر بر ثانیه)، τ_{bx} و τ_{by} به‌ترتیب تنش برشی بستر در جهات x و y (نیوتن بر مترمربع) و ρ و g به‌ترتیب دانسیته سیال و ضریب گرانش و c ضریب شزی است.

۳. نتایج و بحث

۳ -۱. صحت‌سنجی مدل عددی

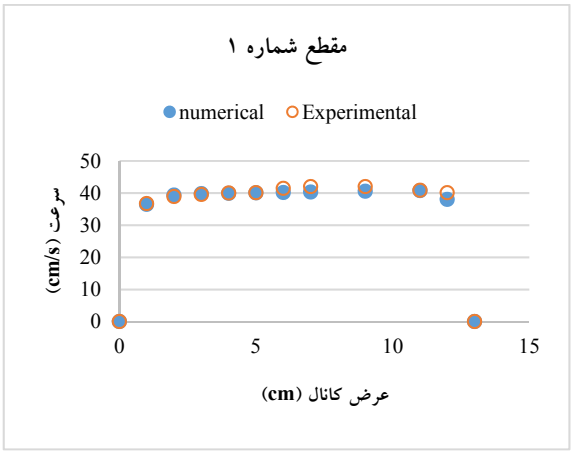
به‌منظور انجام صحت‌سنجی مدل عددی تهیه‌شده مطابق جدول (۲)، اقدام به تهیه شش مدل عددی شد، سپس نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحقیق آزمایشگاهی مقایسه شد. شکل‌های (۵) و (۶) مقایسهٔ میان مدل عددی و مدل آزمایشگاهی تهیه‌شده در برخی مقاطع عرضی را نشان می‌دهد.

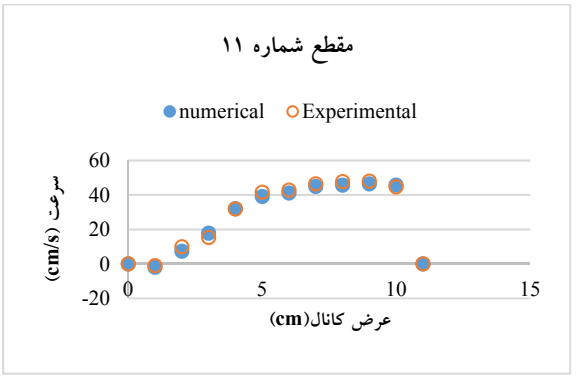




شکل ۵. مقایسه مقادیر سرعت در حالت مدل عددی و تحقیق آزمایشگاهی در شرایط بدون حضور آب‌شکن

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





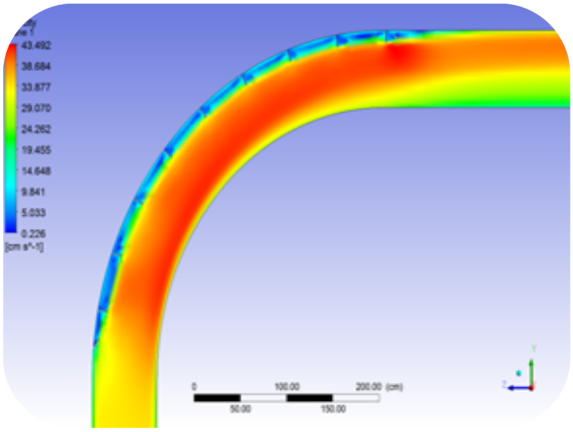
شکل ۶. مقایسه مقادیر سرعت در حالت مدل عددی و تحقیق آزمایشگاهی در شرایط حضور آب‌شکن $\alpha = 90^{\circ}, \lambda = 3, b = 14Cm$

۳-۲. اثر آب‌شکن‌ها بر الگوی توزیع سرعت متوسط

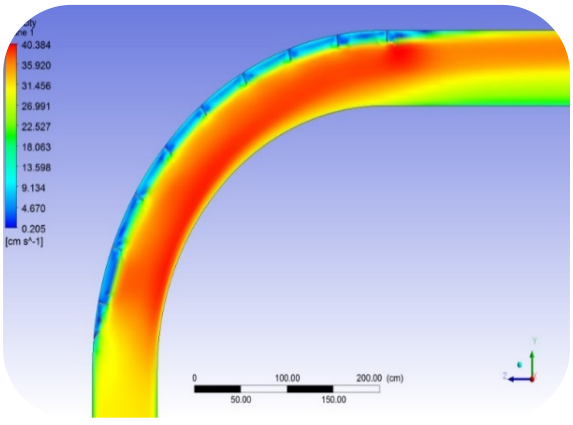
بعد از استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت و محاسبه سرعت‌های متوسط نقطه‌ای، الگوی توزیع سرعت برای لایه‌های عمقی مختلف ترسیم شد که نتایج حاصله در دو صفحه نزدیک به کف با فاصله ۳ سانتی‌متر از کف و صفحه نزدیک به سطح آب با فاصله ۹ سانتی‌متر از کف در شرایط دبی‌های مختلف و هندسه‌های مختلف آب‌شکن ارائه شده است.

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 صفحهٔ نزدیک به بستر سرعت دارای توزیع تقریباً یکنواختی در طول کانال است. در شروع قوس در دیواره داخلی سرعت افزایش

یافته و ناحیه پرسرعت در مجاورت دیوارهٔ 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 دیوارهٔ خارجی متمایل می‌شوند، همان‌طور که بیشینهٔ سرعت در قوس، در یک‌سوم انتهایی و در مجاورت دیوارهٔ خارجی آن مشاهده می‌شود. در یک‌سوم ابتدایی قوس سرعت‌های حداکثر از دیواره خارجی قوس فاصله داشته است.



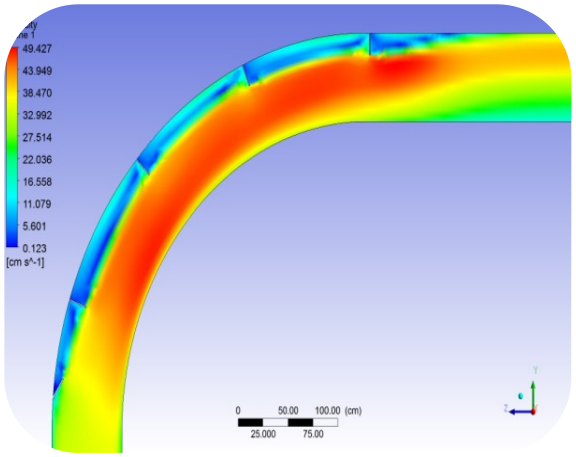
(الف)



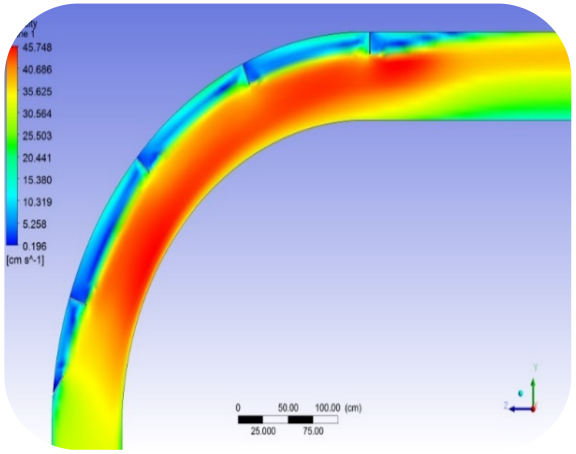
(ب)

شکل ۷. الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به‌کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 25\ lit/s, \lambda = 3, b = 17.5Cm$ (الف) ۳ و (ب) ۹ سانتی‌متر از کف

بررسی نتایج نشان می‌دهد، در این شکل تمرکز نواحی با حداکثر سرعت در پایین‌دست قوس در مجاورت دیوارهٔ خارجی قوس است که نشان می‌دهد که محافظت از قوس باید تا پس از قوس ادامه یابد درحالی‌که 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 به‌کارگیری 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 دیوارهٔ خارجی به سمت دیوارهٔ داخلی در ابتدای قوس و میانهٔ کانال در ادامه مسیر می‌شود.



(الف)

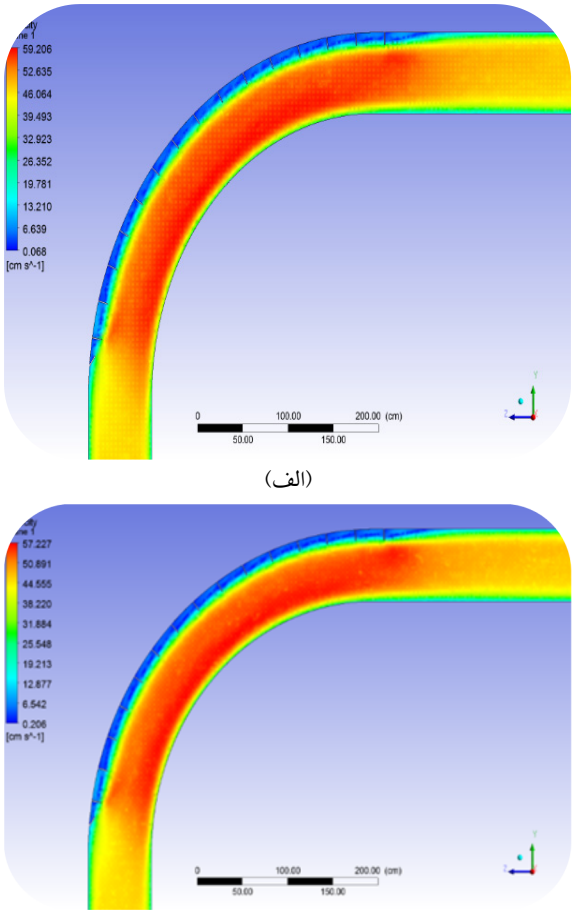


(ب)

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

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

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 موردبررسی قرارگرفته است.



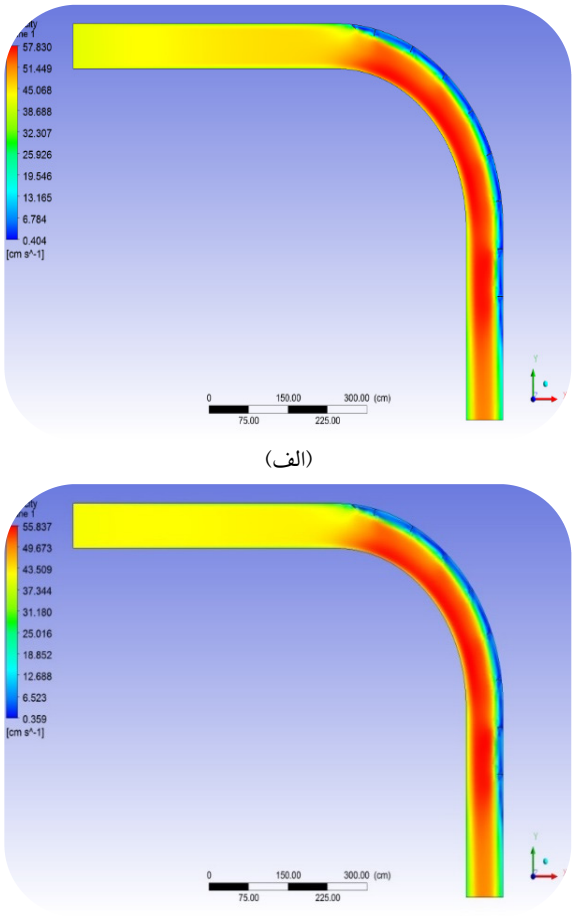
(الف)

(ب)

شکل ۹. الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت به‌کارگیری آب‌شکن‌های قائم در شرایط $Q = 34.4\ ^{lit}/_{s}, \lambda = 3, b = 10.5Cm$ 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.

مقایسهٔ حالت‌های موردبررسی 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 ناحیهٔ با سرعت کم به‌طور کامل حاکم شده اما با افزایش فاصله بین آب‌شکن‌ها ناحیه‌ای با 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)

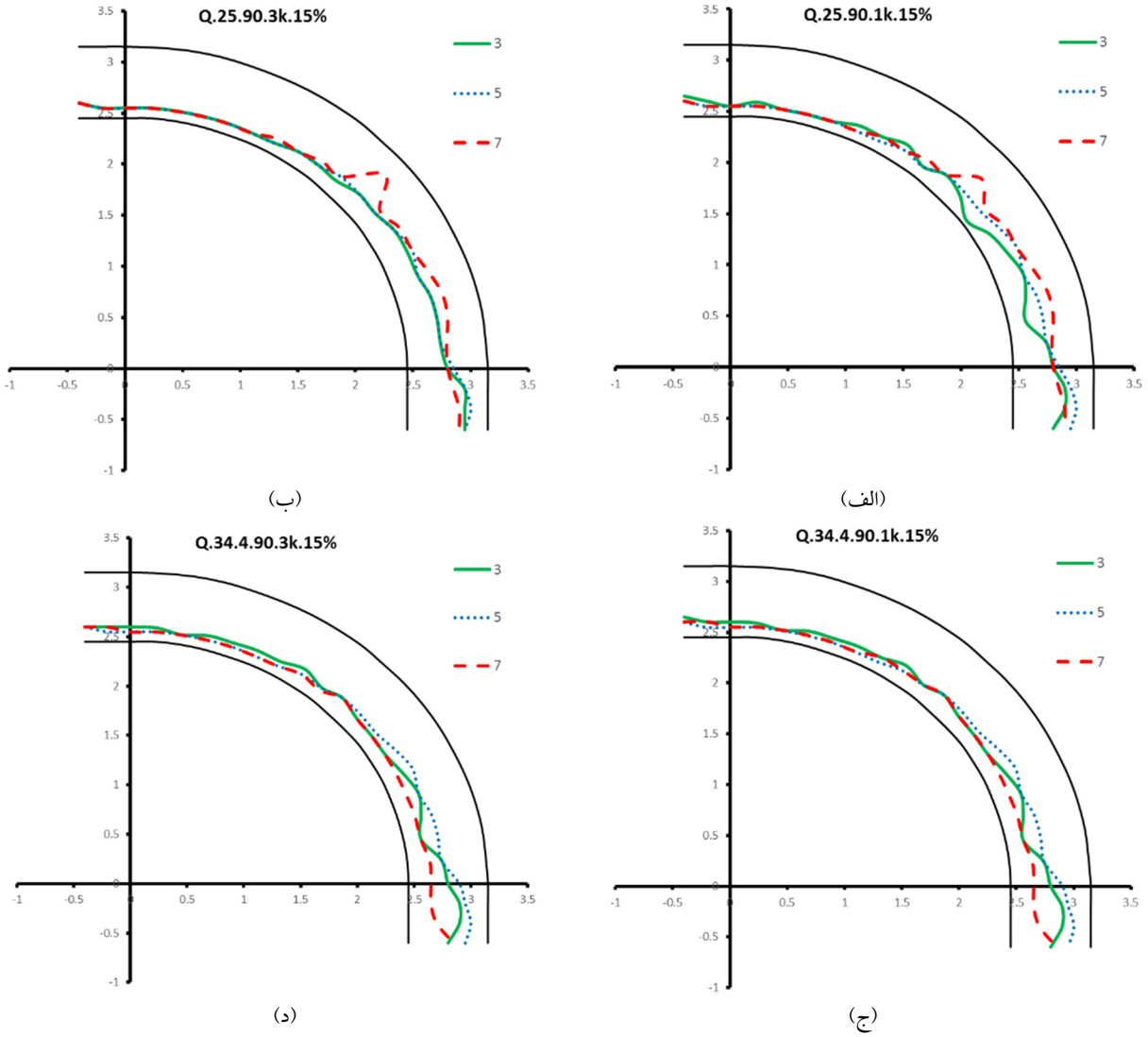
(ب)

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

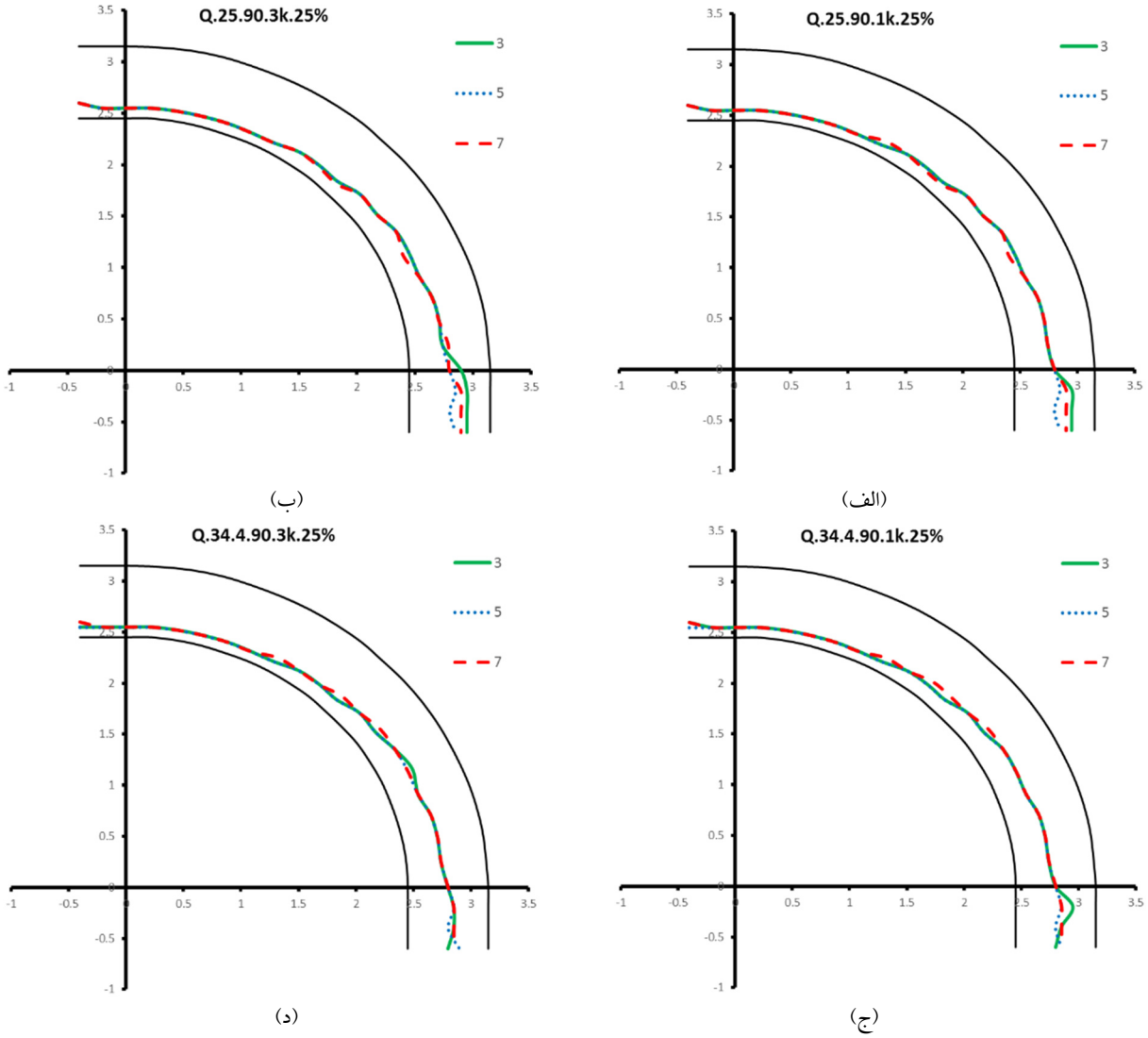
۳-۳. اثر آب‌شکن‌ها بر موقعیت سرعت بیشینه

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

داخلی قوس است و بعد از این ناحیه به‌تدریج از دیواره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانهٔ کانال، سپس به‌طرف دیواره خارجی حرکت می‌کند و در انتهای قوس و ابتدای قسمت مستقیم پایین‌دست موقعیت سرعت بیشینه به دیواره خارجی قوس متمایل می‌شود. لازم به یادآوری است نتیجه به‌دست‌آمده 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 زاویهٔ ۳۰ درجه نزدیک به دیواره داخلی هستند و بعد از آن به سمت دیوارهٔ خارجی قوس متمایل می‌شوند.



شکل ۱۱. موقعیت سرعت بیشینه در حالت به‌کارگیری 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 به‌کارگیری 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

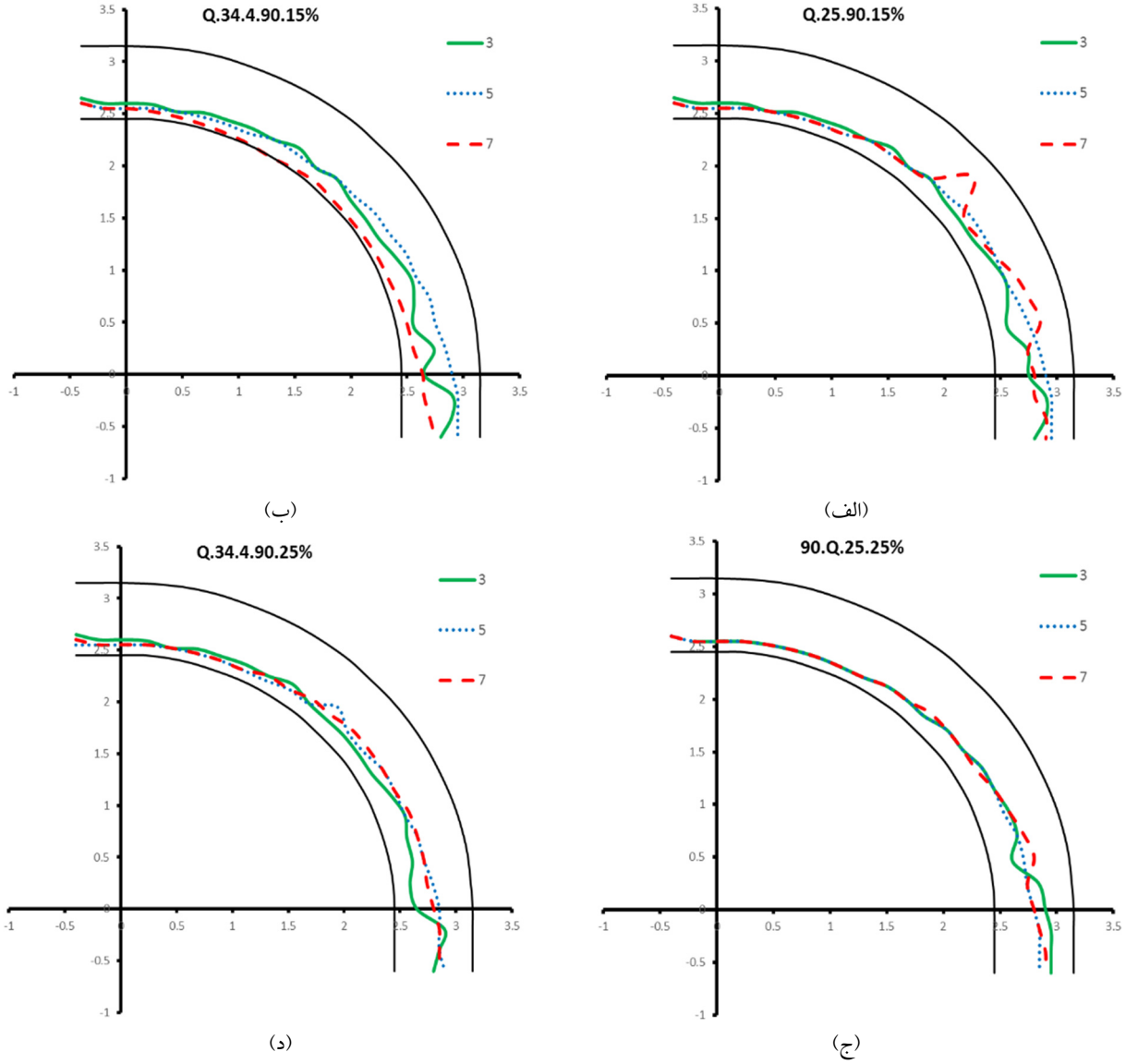
بررسی نتایج نشان می‌دهد؛ برای آب‌شکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال، برای همهٔ فواصل میان آب‌شکن‌ها با ورود جریان به قوس موقعیت سرعت بیشینه به نزدیکی دیوارهٔ داخلی منتقل می‌شود و تا زاویهٔ ۴۰ درجه در این ناحیه قرار دارد؛ اما بعد از زاویهٔ ۴۰ درجه قوس محل اتفاق سرعت بیشینه شروع به حرکت به‌طرف میانه کانال کرده و تا انتهای قوس و مسیر مستقیم پایین‌دست در میانه کانال قرار دارد. نکته قابل‌توجه در این بخش این است که در فاصلهٔ ۷ برابر طول آب‌شکن، با افزایش دبی از میانه کانال به سمت انتهای کانال موقعیت بیشترین میزان سرعت متوسط به قوس داخلی متمایل‌تر است.

با حضور آب‌شکن‌هایی با طول معادل ۲۵ درصد عرض کانال موقعیت سرعت بیشینه نسبت به الگوی رخ‌داده 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 موردمطالعه 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.

۳ -۴. اثر آب‌شکن‌ها 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 آب‌شکن‌ها بر موقعیت بیشینه تنش برشی پرداخته شده است.

شکل ۱۳ نشان‌دهندهٔ موقعیت بیشینه تنش برشی در هر مقاطع مختلف قوس است. بررسی صورت‌گرفته برای دو طول آب‌شکن معادل ۱۵ و ۲۵ درصد عرض کانال و در دو دبی ۲۵ و ۳۴/۴ لیتر در ثانیه انجام شده است.



شکل ۱۳. تغییرات بیشینهٔ تنش برشی بی‌بعد شده در طول قوس کانال با و بدون حضور آب‌شکن‌ها

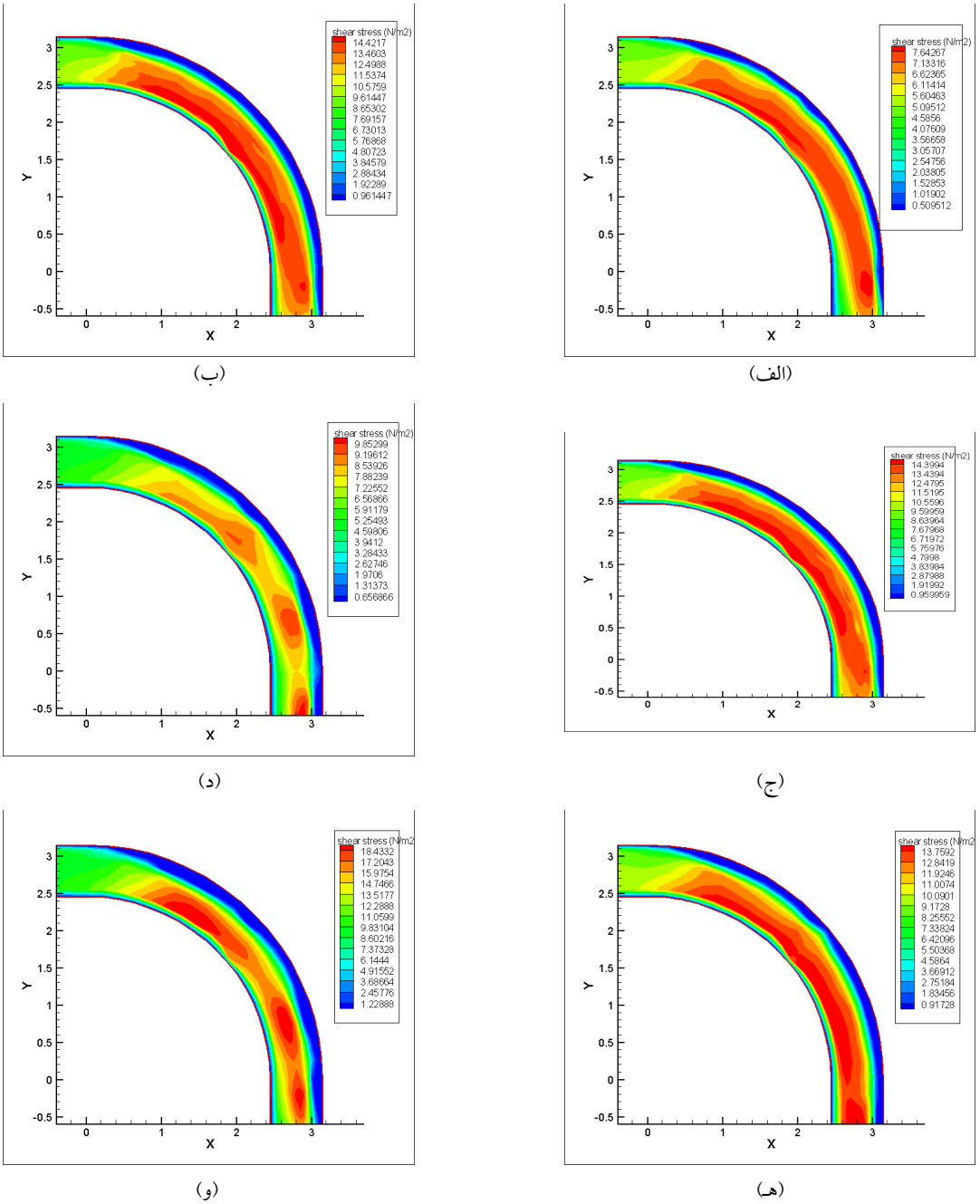
بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد، در شرایط حضور آب‌شکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال، در ابتدای ورود به قوس به سمت قوس داخلی بیشتر متمایل است؛ به‌تدریج به سمت میانه کانال منحرف شده، سپس در یک‌سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی متمایل می‌شود.

همچنین با افزایش طول آب‌شکن 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 آب‌شکن بیشترین میزان تنش برشی را همواره به میانه متمایل‌تر نموده است. در

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 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.



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، (هـ) 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

بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد افزایش در فاصلهٔ قرارگیری میان آب‌شکن‌ها موجب عدم یکنواختی توزیع تنش برشی می‌شود. روند کلی الگوی تنش برشی تقریباً مشابه الگوی رخ‌داده 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 به‌تدریج حداکثر تنش برشی به میانه کانال منحرف می‌شود؛ سپس در قسمت یک‌سوم انتهایی قوس به سمت قوس خارجی منحرف می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد در همهٔ شرایط موردبررسی با افزایش دبی جریان از ۲۵ لیتر در ثانیه به ۳۴/۴ لیتر در ثانیه، بیشترین میزان تنش برشی به سمت قوس داخلی متمایل می‌شود. مهم‌ترین اثر قرار دادن آب‌شکن‌ها در قوس، انتقال ناحیه پرتنش که سبب تخریب دیواره‌ها می‌شود از دیواره خارجی قوس به میانه کانال و دیواره داخلی است که علت این مسئله برخورد جریان با آب‌شکن‌ها و انحراف آن به سمت دیوارهٔ داخلی و ایجاد آشفتگی در محل دیوارهٔ داخلی است که سبب افزایش تنش برشی می‌شود؛ اما نواحی با تنش برشی کم در بین آب‌شکن‌ها وجود دارد که این موقعیت‌ها محل‌های مستعد برای رسوب‌گذاری است.

٤. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که پیش‌ازاین بیان شد؛ هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر آب‌شکن‌ها بر الگوی جریان در شرایط قوس ملایم ۹۰ درجه با استفاده از مدل عددی انسیس است. بدین منظور اقدام به تعریف الگوی مدل‌سازی برای اجرای مدل شد. جهت کالیبراسیون مدل از داده‌های آزمایشگاهی بختیاری و همکاران استفاده شد. سپس اقدام به مدل‌سازی شد. پس از استخراج داده‌های 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 می‌دهد در کلیه شرایط قرارگیری آب‌شکن‌ها، در ابتدای قوس حداکثر سرعت در سمت قوس داخلی رخ می‌دهد؛ سپس به سمت میانه کانال منحرف می‌شود. در ادامه و در یک‌سوم انتهایی قوس حداکثر سرعت به سمت قوس خارجی منحرف می‌شود.

همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد، افزایش طول آب‌شکن‌ها موجب افزایش حداکثر سرعت در کانال می‌شود.

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

در خصوص وضعیت تنش برشی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد وضعیت رخ‌داده برای الگوی تنش برشی مشابه الگوی سرعت متوسط است. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش طول آب‌شکن‌ها خود باعث افزایش میزان تنش برشی حداکثر شده و افزایش در فاصله میان آب‌شکن‌ها نیز موجب ایجاد ناحیه با تنش برشی بیشتر نسبت به فواصل کمتر می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد تغییر در هندسه آب‌شکن‌ها تأثیر زیادی بر موقعیت تنش برشی حداکثر ندارد و بیشترین میزان تنش برشی در زاویهٔ حدود ۸۰ درجه رخ می‌دهد. نتایج حاصل از تحقیق حاضر با مطالعه‌ای که توسط قدسیان و همکاران صورت گرفته‌است؛ مطابقت دارد این نتیجه مشترک بدین‌صورت است که قرار دادن آب‌شکن در قوس خارجی سبب دور شدن سرعت بیشینه از دیواره خارجی قوس می‌شود.

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.

[۴] قدسیان مسعود. بررسی آبشستگی، رسوب‌گذاری 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. مطالعهٔ 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. [رسالهٔ دکترا]. اهواز: دانشگاه شهید چمران اهواز؛۱۳۹۱.

پی‌نوشت

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