تعیین شدت آشفتگی در کانال قوسی ۱۸۰ درجه تند با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی

تاریخ دریافت: ۱۱۳۹۴/۰۳/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱

محمد واقفی[۱]، مریم اکبری[۲]

چکیده

آشفتگی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های الگوی جریان در قوس است که بسیاری از فرآیندهای رودخانه مانند فرسایش، انتقال رسوب، مورفولوژی بستر و شکل کانال‌های طبیعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به منظور تعیین شدت آشفتگی در کانال‌های قوسی، در این مقاله با استفاده از سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino به برداشت مولفه‌های سرعت جریان در مقاطع مختلف کانال قوسی ۱۸۰ درجه تند (نسبت شعاع مرکزی به عرض کانال برابر با ۲، با بستر صلب و تامین زبری) واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خلیج فارس پرداخته شده است. در این مقاله، شدت‌های آشفتگی جریان به صورت RMS در راستاها و اعماق مختلف محاسبه، مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحقیق بیانگر این است که در لایه نزدیک به بستر، بیشینه شدت آشفتگی عرضی و عمقی جریان به ترتیب برابر با ۷۰ و ۲۵ درصد بیشینه شدت آشفتگی در راستای طولی می‌باشد. علاوه بر این، شدت آشفتگی در اعماق مختلف نیز مقایسه شد که نشان دهنده‌ی کاهش ۲۵ درصدی شدت آشفتگی طولی با افزایش عمق جریان از کف کانال به سمت سطح آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جریان آشفته، سرعت‌های سه‌بعدی، شدت آشفتگی، قوس ۱۸۰ درجه تند، Vectrino.

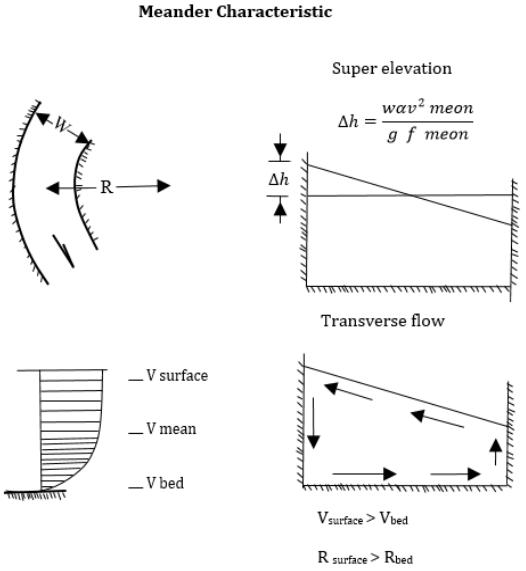
[۱] استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. ۰۷۷-۳۱۲۲۲۴۰۱، vaghefi@pgu.ac.ir (مسئول مکاتبه)

[۲] کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران، ۰۷۷-۳۳۵۵۶۴۷۸، m.akbari@pgu.ac.ir

مقدمه

تأثیر متقابل شدت جریان آب، مقدار و خصوصیات رسوب موجود در آن و ترکیب مواد بستر، خصوصیات هندسی خاصی به هر رودخانه می‌دهد؛ نظیر پیچان‌رود، مستقیم، شریانی. یا باعث تغییر شکل بستر رودخانه می‌شود؛ مانند ناهمواری‌های کوچک در کف، تل ماسه، برآمدگی و تشکیل جزایر رسوبی. بحث مئاندری شدن رودخانه‌ها یکی از موارد مطرح در تحقیقات چه در زمان گذشته و چه در زمان حال بوده است. در طبیعت هیچ رودخانه مستقیمی از لحاظ هندسی یافت نمی‌شود و تحت شرایط طبیعی، رودخانه‌ها به ندرت دارای خطوط کناری مستقیم‌الخط در پلان هستند. ویژگی‌های جریان و توپوگرافی بستر در محل خم رودخانه‌ها به قدری پیچیده می‌باشد که شناخت کامل آن تا به حال به طور کامل میسر نشده است (صفرزاده و همکاران، ۱۳۸۹). در اثر اندرکنش بین جریان‌های ثانویه و عدم یکنواختی پروفیل سرعت غیریکنواخت در عمق، الگوی جریانی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که وجود این جریان، باعث ایجاد آشفتگی شدید جریان می‌شود. در اثر این پدیده الگوی پروفیل سرعت در جهت عرضی دچار تغییر زیادی نسبت به حالت مستقیم می‌شود (واقفی و همکاران، ۱۳۸۷). این جریان، تأثیر زیادی بر مورفولوژی خم‌های آبرفتی در رودخانه دارد؛ به طوری که سرعت بالای جریان در قوس بیرونی خم باعث حمله شدید به بستر رودخانه و کناره و در نتیجه تخریب آن می‌شود. این پدیده‌ها ارتباط مستقیمی با آشفتگی جریان دارند و خم رودخانه‌ها که دارای الگوی جریان آشفته و کاملا سه‌بعدی است، بازه‌ی مهمی برای مطالعه این پدیده می‌باشد (صفرزاده و همکاران، ۱۳۸۹ و موسوی نائینی و همکاران، ۱۳۹۱).

در شکل (۱)، به صورت شماتیک جزئیات جریان در محل خم رودخانه‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بر اثر جریان ثانویه در محل قوس، جریان در قسمت بالایی رودخانه به سمت بیرون رانده شده و در قسمت‌های نزدیک به کف نیز به سمت قوس داخلی متمایل می‌شود (Shukry, 1950). به همین علت جریان‌های ثانویه موجود در قوس رودخانه‌ها را جریان ثانویه ناشی از فشار نیز می‌نامند و این جریان‌ها به عنوان جریان‌های ثانویه نوع اول شناخته می‌شوند (Prantdel, 1952).



شکل (۱): جزئیات جریان در محل خم رودخانه‌ها (Shukry, 1950).

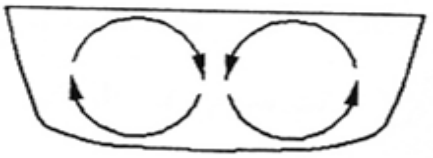
Prandtl (1952) به معرفی جریان‌های ثانویه پرداخت و این جریان‌ها را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

۱) جریان‌های ثانویه ناشی از فشار (جریان ثانویه نوع اول): جریان‌های موجود در مسیرهای قوسی می‌باشد که سبب توزیع سرعت‌های متفاوت در مقاطع عرضی مختلف می‌شود.

۲) جریان‌های ثانویه ناشی از آشفتگی (جریان ثانویه نوع دوم): این نوع جریان‌ها به دلیل عدم تقارن تنش‌های برشی آشفتگی در مسیرهای مستقیم رخ می‌دهد (به عنوان مثال در مقاطع غیر دایروی).

در رودخانه‌های با مسیر مستقیم، ذرات کوچک شناور در سطح آب تمایل دارند که به سمت قسمت مرکزی مقطع بروند که این پدیده دلیلی بر وجود

جریان‌های عرضی می‌باشد. الگوی جریان ثانویه در کانال مستقیم به صورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): الگوی جریان ثانویه در کانال مستقیم (Prandtl, 1950).

Townsend (1956) اولین کسی بود که علت تشکیل جریان‌های ثانویه را به صورت تئوریک توضیح داد. همچنین نشان داد که جریان ثانویه برای یک لایه مرزی وقتی رخ می دهد که تنش های نرمال رینولدز در جهات عرضی صفر نباشند. Ippen & Drinker (1962) با تزریق ماده رنگی به جریان موجود در خم، مشاهده نمود که رشته‌های رنگی نازک در بستر کانال به طرف قوس داخلی جابه‌جا می‌شوند در حالی که پلوم رنگی در سطح آب تمایل به ساحل خارجی دارد. وی این پدیده را تاثیر مستقیم اصطکاک دیواره‌ها بر کل میدان جریان عنوان کرد. Nouh & Townsend (1979) به بررسی تاثیر جریان ثانویه بر توزیع تنش برشی بستر و طول تاثیر آن از روی نحوه تغییرات تنش برشی پرداختند. ایشان به نتیجه رسیدند که تاثیرات جریان ثانویه تولید شده بعد از خروج از قوس، نه تنها از بین نمی‌رود بلکه تا فاصله ای در بازه مستقیم پایین دست امتداد می‌یابد. Lien et al. (1999) با استفاده از مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان در دو قوس ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه را بررسی کردند. تاثیر جریان ثانویه در این مدل از طریق محاسبه تانسور انتشار تنش در نظر گرفته شده است. علاوه بر تنش‌های انتشار، نیروهای مهم موجود در طول کانال‌ها نیز مقایسه شده که نشان می‌دهد، جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه قوی تر از قوس ۹۰ درجه می‌باشد. Czernuszenko & Rylov (2002) به بررسی عددی مکانیزم جریان ثانویه در کانال باز مستقیم پرداختند. آن‌ها از یک مدل ساده برای نشان دادن وجود جریان‌های ثانویه ناشی از تنش برشی استفاده کردند و از ایده بوزینسک در مورد لزجت گردابه‌ای برای تعیین تنش‌های آشفتگی بهره گرفتند. Blanckaert & Graf (2004) به مطالعه باز توزیع سرعت، تنش برشی مرزی، شکل و خصوصیات توپوگرافی بستر در کانال‌های قوسی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن یک ناحیه مرکزی به عنوان یک سلول که می‌تواند دارای چرخش نیز باشد و یک مدل شبه سه‌بعدی، به تعیین دینامیک ریخت شناسی بستر در کانال‌های قوسی پرداختند.

Wang & Cheng (2005) در شرایط حضور نوارهای زبر و صاف در امتداد طولی کانال به بررسی تغییرات در توزیع سرعت طولی کانال و تنش‌های رینولدز به واسطه وجود جریان ثانویه پرداختند. ایشان در ادامه بیان داشتند که کمیت‌های جریان می‌توانند خطی گردند، به نحوی که کلیه این کمیت‌ها به دو مولفه متوسط پایه جریان و نوسانات ایجاد شده توسط زبری بستر تقسیم گردند و بر این اساس روابطی را برای سرعت و تنش‌های رینولدز تحت اثر جریانات ثانویه ارائه نمودند. Blanckaert & De Vriend (2005) به بررسی مشخصات جریان آشفته در یک کانال قوسی با زاویه مرکزی ۱۲۰ درجه پرداختند. آن‌ها برای برداشت داده‌های سرعت جریان از سرعت‌سنج ADVP استفاده کردند و پارامترهای انرژی جنبشی و تنش برشی را محاسبه نمودند. Rodriguez & Garcia (2008) با استفاده از یک سرعت‌سنج صوتی کوچک مقیاس به بررسی سلول‌های جریان ثانویه، خصوصیات آشفتگی جریان و تغییرات عرضی جریان در یک کانال مستقیم پرداختند و نشان دادند که توزیع سرعت طولی، شامل چند هسته منظم سرعت بالای جریان می‌باشد. Abad et al. (2009) به مطالعه الگوی جریان متوسط و آشفته در کانال مئاندری کیونوشیتا با بستر صلب پرداختند و پارامترهایی همچون تنش رینولدزی

و انرژی جنبشی آشفتگی را در مقاطع عرضی این کانال محاسبه نمودند. آزمایشات آن‌ها نشان داد که با رسیدن به راس قوس، هسته سرعت بیشینه جریان به سمت دیواره داخلی کانال متمایل می‌شود. واقفی و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی در قوس ۹۰ درجه ملایم پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر تشکیل گردابه ثانویه با جهتی مخالف با گردابه اصلی در مقطع عرضی ۴۵ درجه در نزدیکی دیواره خارجی می‌باشد. Belcher & Fox (2009) با استفاده از دستگاه PIV به بررسی اثر زبری بر تغییرات جریان آشفته با توجه به ساختارهای بزرگ مقیاس پرداختند. آن‌ها در تحقیقات خود علاوه بر مشاهده پدیده عمق گرفتگی سرعت، وجود ناحیه میانی در نزدیکی مرکز کانال را نیز مشاهده نمودند. کرباسی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان سه بعدی بر روی کلاسترها پرداختند و مشاهده نمودند که وجود کلاسترها سبب انتقال مقادیر بیشینه RMS و تنش برشی رینولدزی به اعماق بالاتر می‌شود. مظفری و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی روش‌های مختلف برای تعیین تنش برشی بستر بر مبنای جریان آشفته در یک کانال قوسی با زاویه ۱۹۳ درجه و بستر تعادل یافته و با استفاده از دستگاه ADVP پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر این است که به دلیل آشفتگی جریان، الگوی تنش رینولدزی نظم مشخصی را در طول قوس نشان نمی‌دهد. Vaghefi et al. (2014) به مطالعه آزمایشگاهی تنش برشی بستر با استفاده از روش عمق متوسط در قوس ۱۸۰ درجه تند پرداختند. آن‌ها برای اندازه‌گیری سرعت جریان، از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی Vectrino استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر افزایش تنش برشی بستر در ورودی قوس و در نزدیکی دیواره داخلی کانال در مقطع عرضی ۴۰ درجه می‌باشد. Vaghefi et al. (2015) مولفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان و همچنین نحوه توزیع انرژی جنبشی و حاصلضرب نوسانات سرعت در طول قوس ۱۸۰ درجه تند را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که سرعت طولی جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به نزدیکی کف کانال ۶۰ درصد افزایش یافته و بیشترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی نیز در مقطع عرضی ۸۵ درجه می‌باشد. آن‌ها همچنین به بررسی الگوی جریان آشفته با محاسبه تنش های برشی بستر با استفاده از روش های مختلف رینولدزی، انرژی جنبشی و انرژی جنبشی اصلاح شده نیز پرداخته و در مورد تاثیر قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی بر تغییرات تنش برشی به بحث پرداختند.

همانطور که اشاره شد، تاکنون در مورد الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه تند مطالعه زیادی صورت نگرفته و مطالعات اندک صورت گرفته نیز اکثرا به صورت عددی بوده و در صورت آزمایشگاهی بودن به بحث الگوی جریان متوسط و موضوع آبشستگی محدود شده‌اند. در این مقاله، در ادامه مطالعاتی که تاکنون نویسندگان مقاله در زمینه الگوی جریان متوسط و آشفته در قوس ۱۸۰ درجه تند انجام داده‌اند، به محاسبه شدت آشفتگی جریان در اعماق و راستاهای مختلف قوس ۱۸۰ درجه تند پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی

برای انجام تحقیق موردنظر، یک کانال قوسی با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، به عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۷ متر با جداره‌های شیشه‌ای و حفاظ‌های فولادی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خلیج فارس طراحی و ساخته شد. در شکل (۳)، نمایی از کانال موردنظر در آزمایشگاه به تفکیک اجزای تشکیل دهنده آن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، کانال موردنظر دارای قوس مرکزی ۱۸۰ درجه بوده و از یک مسیر مستقیم در بالادست به طول ۶/۵ متر و همچنین از مسیر مستقیمی در پایین‌دست به طول ۵/۱ متر تشکیل شده است. مطابق شکل، این دو مسیر

مستقیم توسط قوس ۱۸۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۵ متر به هم متصل شده‌اند. با توجه به اینکه عرض کانال ۱ متر می‌باشد، پس می‌توان نتیجه گرفت که این کانال، دارای یک قوس تند می‌باشد (Leschziner & Rodi, 1979). در جدول (۱)، به طور خلاصه مشخصات هندسی این کانال ارائه شده است.

برای تامین آب موردنیاز در این کانال قوسی، از مخازن تحتانی با ظرفیت ۳۰ مترمکعب استفاده شده است. دبی پمپ مورد استفاده، ۹۵ لیتر بر ثانیه و در حین انجام آزمایش ثابت بوده است. عمق آب نیز ثابت و برابر با ۲۰ سانتی‌متر در مسیر مستقیم بالادست و قبل از ورود به قوس بوده که با استفاده از دریچه پروانه‌ای که در انتهای مسیر پایین‌دست می‌باشد، این عمق برای انجام این آزمایشات تنظیم شده است. در جدول(۲)، به شرایط هیدرولیکی حاکم بر آزمایشات در حین برداشت داده‌های سه‌بعدی سرعت جریان اشاره شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رژیم جریان در قوس ۱۸۰ درجه تند کاملا آشفته و زیر بحرانی می باشد (Re>2000, Fr<1).

با وجود بستر صلب برای انجام آزمایشات الگوی جریان، کف کانال از مصالح با دانه‌بندی یکنواخت پوشانده شده است. مصالح بستر از ماسه طبیعی رودخانه‌ای و با قطر میانگین ۱ میلی‌متر برای ایجاد زبری مناسب در کف انتخاب شده است.

دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino و نرم‌افزارهای مربوط به آن

به منظور اندازه گیری مولفه های سرعت و تعیین الگوی سه بعدی جریان از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی Vectrino که یکی از پیشرفته ترین انواع سرعت‌سنج‌های ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) می‌باشد، استفاده شده است. عملکرد دستگاه بر اساس ارسال یک موج صوتی با فرکانس معلوم و دریافت بازتاب آن از جریان و تشخیص سرعت جریان از میزان تغییر در فرکانس اولیه می‌باشد. در واقع این سرعت سنج از یک قسمت ارسال صوت و از چهار دریافت کننده آن استفاده می‌کند. صوت از طریق قسمت مرکزی probe فرستاده شده و توسط چهار شاخک (Beam) دریافت می شود. با توجه به میزان تغییر در فرکانس موج ارسالی، این دستگاه سرعت ذره را محاسبه می کند. این دستگاه، بر اساس نحوه استقرار probe آن، یعنی قسمتی که شاخک‌های مربوط به دریافت سیگنال‌های بازگشتی ناشی از برخورد به ذره معلق در آب به آن متصل است، در داخل سیال به دو نوع side looking و down looking تقسیم می‌شود که برای اندازه‌گیری در قسمت‌های مختلف میدان به کار می‌رود. برای اندازه‌گیری سرعت جریان در نواحی نزدیک به دیواره‌های کانال و سطح آب از side looking و در بقیه حالات از down looking استفاده می‌شود. محدوده سرعت در این دستگاه از 0.01± تا 7± متر بر ثانیه توسط کاربر قابل تنظیم بوده و دقت آن 0.5%± مقدار اندازه‌گیری شده (1 mm/s±) می‌باشد (Nortek, 2009). برای انجام این آزمایشات، فرکانس ۲۵ هرتز و زمان ۱ دقیقه در نظر گرفته شده است. بنابراین این دستگاه می‌تواند در هر ثانیه تا سقف ۱۵۰۰ داده سرعت جریان و در سه جهت را برداشت نماید. اطلاعات مربوط به داده‌های اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف، با استفاده از نرم‌افزار Vectrino ثبت شده و به فرمت adv ذخیره می‌شود. سپس این داده‌ها برای استفاده در نرم‌افزار Explorer V، به فرمت vno تبدیل شده و پس از تجزیه و تحلیل و میانگین‌گیری سرعت‌ها به فرمت قابل استفاده در excel تبدیل می‌شوند. در شکل (۴)، نحوه استقرار دستگاه سرعت سنج در قوس ۱۸۰ درجه و نرم‌افزار مربوط به آن برای ذخیره‌سازی داده‌ها و همچنین دو probe مختلف دستگاه سرعت‌سنج نشان داده شده است.

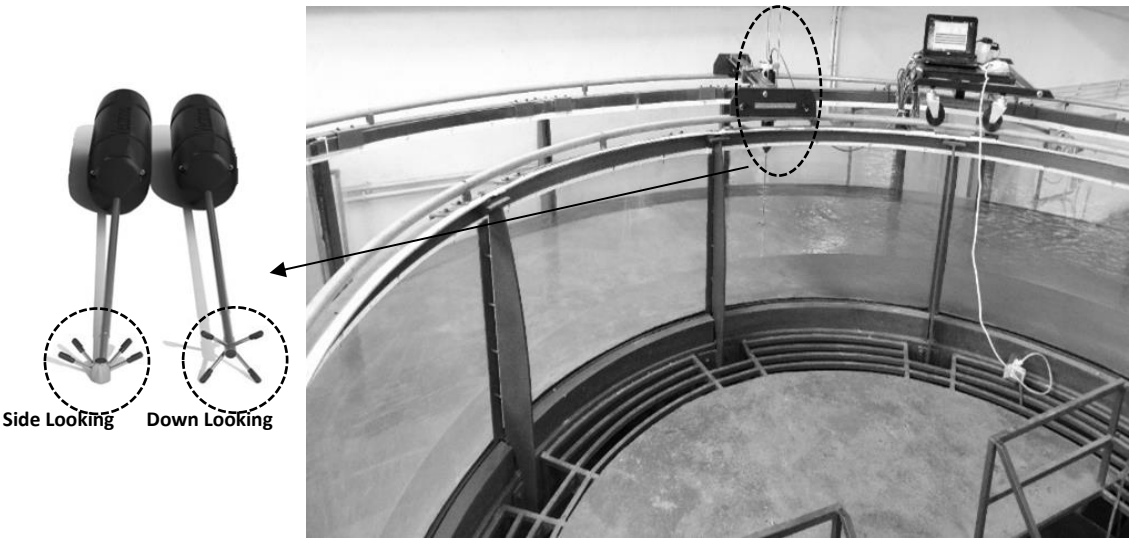
شکل (۳): نمایی از موقعیت کانال در آزمایشگاه و اجزای تشکیل‌دهنده آن

جدول (۱): مشخصات کلی کانال طراحی شده برای انجام آزمایشات

عرض کانال	ارتفاع کانال	طول مفید کانال	زاویه مرکزی قوس	شعاع انحنا مرکزی قوس	وضعیت ورودی	جنس جداره‌ها
۱ متر	۷۰ سانتی‌متر	۱۹/۵ متر	۱۸۰ درجه	۲ متر	استفاده از یک مخزن بالادست، برای ورود ملایم جریان از مخزن به کانال	جداره‌های کانال از جنس شیشه بوده و جهت تامین پایداری جداره‌های شیشه‌ای از قاب‌های فولادی استفاده شده است.

جدول (۲): شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان در آزمایشات الگوی جریان

عمق آب در مسیر مستقیم بالادست (قبل از ورود به قوس)	دبی جریان	عدد فرود	عدد رینولدز
۲۰ سانتی‌متر	۹۵ لیتر بر ثانیه	۰/۳۴	۱۱۹۰۰۰



شکل (۴): نحوه استقرار دستگاه سرعت‌سنج Vectrino در قوس ۱۸۰ درجه تند و نمایش probe های down looking و side looking

مش‌بندی و نحوه تبدیل داده‌های سرعت‌سنج

به منظور انجام آزمایشات مربوط به الگوی جریان در قوس، برای اندازه‌گیری سرعت جریان از ۲۳ مقطع از ابتدا تا انتهای قوس که هر مقطع نیز شامل ۱۲ نقطه عرضی می‌باشد، برای ۶ لایه عمقی متفاوت استفاده شده است. در شکل (۵)، نمایی از مش‌بندی کانال برای تعیین موقعیت نقاط برداشت شده در طول قوس، عرض و عمق آن نشان داده شده است.

با توجه به اینکه مختصات نقاط و سرعت‌های برداشت شده در حین آزمایشات، بر اساس سیستم مختصات قطبی بوده که به صورت مولفه‌های شعاعی، مماسی و قائم هستند، به منظور ترسیم داده‌ها در نرم‌افزار Tecplot نیاز است که مولفه‌های موقعیت و سرعت داده‌های مذکور از مختصات قطبی به مختصات کارتزین تبدیل شوند. با استفاده از روابط زیر می‌توان این تبدیل مختصات را انجام داد. مطابق شکل‌های (۶) و (۷) و با استفاده از روابط (۱) تا (۵) مولفه‌های سرعت جریان و مختصات نقاط تبدیل می‌شوند:

$$U = U_\theta(Sin(\theta)) - U_r(Cos(\theta)) \quad (۱)$$

$$V = U_r(Sin(\theta)) + U_\theta(Cos(\theta)) \quad (۲)$$

$$W = U_z \quad (۳)$$

$$X = -R(Cos(\theta)) \quad (۴)$$

$$Y = R(Sin(\theta)) \quad (۵)$$

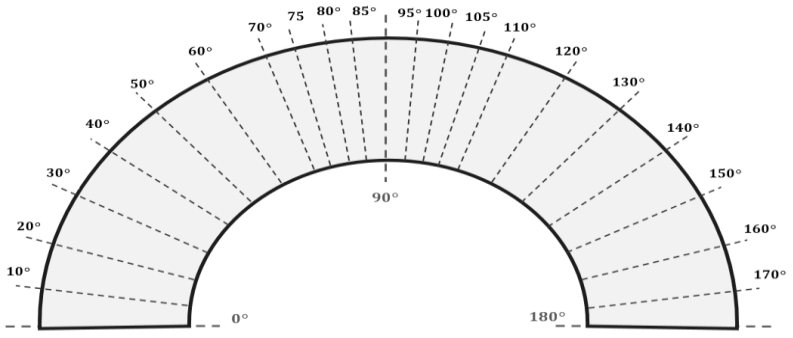
که در این روابط:

U, V, W: مولفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان در مختصات کارتزین

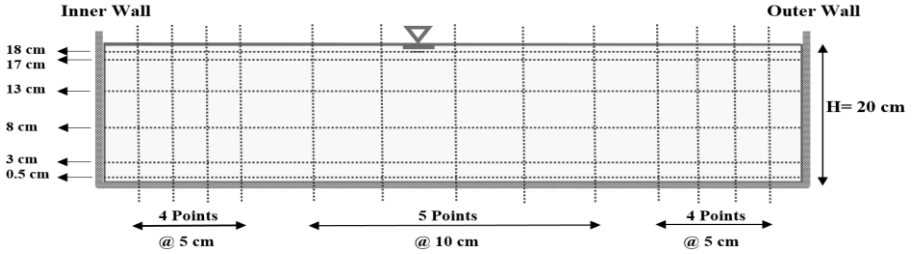
U_r, U_Θ, Uz: مولفه‌های شعاعی، مماسی و عمقی جریان در مختصات قطبی

X و Y: موقعیت نقاط موردنظر در سیستم مختصات کارتزین

R و Θ: زاویه و شعاع نقطه مورد نظر در سیستم مختصات قطبی می‌باشد.

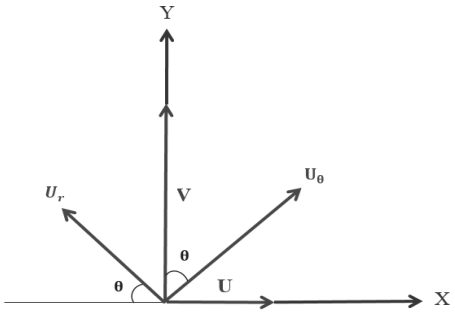


(الف)

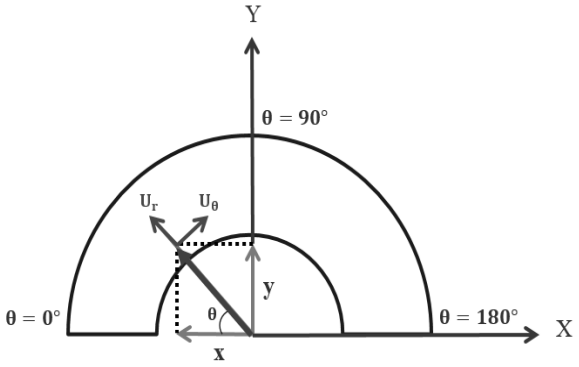


(ب)

شکل (۵): مش‌بندی کانال برای تعیین موقعیت نقاط برداشت شده در: الف) طول و ب) عرض کانال در قوس ۱۸۰ درجه تند



شکل (۶): نحوه تبدیل مولفه‌های سرعت جریان



شکل (۷): نحوه تبدیل مولفه‌های مختصات نقاط

نتایج و بحث

وسعت بی نظمی‌ها در جریان‌های آشفته چنان زیاد است که به هر اندازه هم سعی در تکرار شرایط مرزی برای یک جریان مورد نظر شود، باز جزئیات جریان هرگز تکرار نخواهد شد. با اینکه جزئیات آشفتگی را نمی‌توان بر حسب زمان و مکان دقیقا پیش‌بینی نمود، ولی پدیده آشفتگی را می‌توان از طریق عوارض و مشخصه های آن شناخت و در قالب همین مشخصه ها توصیف نمود. جهت بررسی ساختار آشفتگی در طول قوس، بررسی پارامتر "شدت آشفتگی جریان" ضروری می‌باشد.

با توجه به اینکه سرعت متوسط، سرعت نوسانی و پارامتر آشفتگی جریان با استفاده از سرعت‌های لحظه‌ای به دست می‌آیند، لذا در ادامه به روابط موجود بین این کمیت‌ها پرداخته می شود. با توجه به شکل (۸)، در صورتی که در یک نقطه مشخص از میدان جریان آشفته، تغییرات زمانی کمیتی نظیر مولفه‌های سرعت ثبت شوند، می‌توان برای سری مزبور مقادیر متوسط زمانی (U_i, V_i, W_i) و مقادیر لحظه‌ای (u_i, v_i, w_i) را تعریف نمود.

بنابراین سرعت‌های نوسانی ($u`_i$, $v`_i$, $w`_i$) با استفاده از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$u_i = U_i + u'_i \quad (۶)$$

$$v_i = V_i + v'_i \quad (۷)$$

$$w_i = W_i + w'_i \quad (۸)$$

$$U_i = \frac{1}{T}\int_0^T u_i dt \quad (۹)$$

$$V_i = \frac{1}{T}\int_0^T v_i dt \quad (۱۰)$$

$$W_i = \frac{1}{T}\int_0^T w_i dt \quad (۱۱)$$

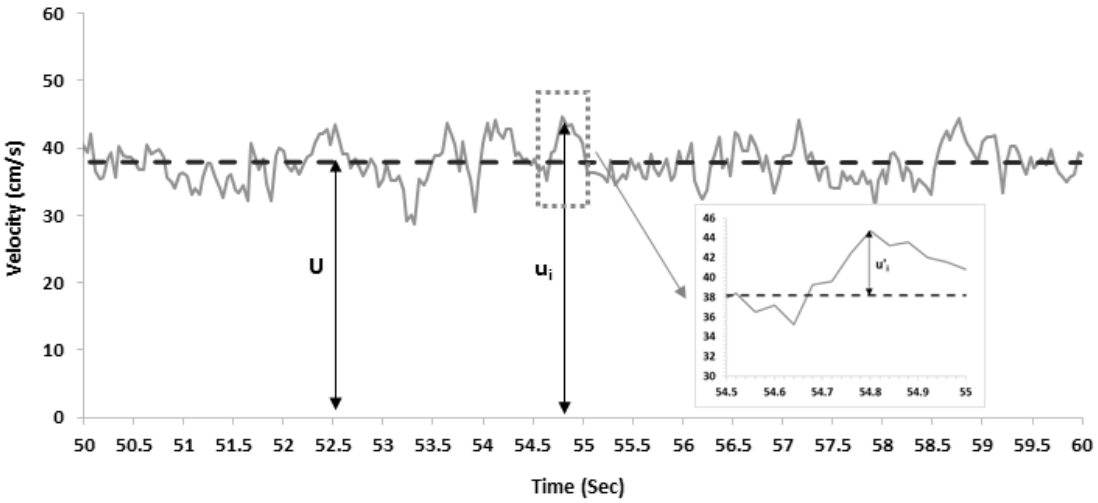
که در آن T به اندازه کافی بزرگ انتخاب می‌شود. با استفاده از سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سرعت سنج Vectrino می‌توان کمیت شدت آشفتگی جریان را محاسبه نمود.

شدت‌های آشفتگی جریان در سه جهت طولی، قائم و عرضی به ترتیب به صورت $\sqrt{\overline{u'^2}}$، $\sqrt{\overline{v'^2}}$ و $\sqrt{\overline{w'^2}}$ بیان می‌شوند. این شدت‌های آشفتگی به صورت RMS به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$u'_{rms} = u^+ = [\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(u_i - U_i)^2]^{0.5} \quad (۱۲)$$

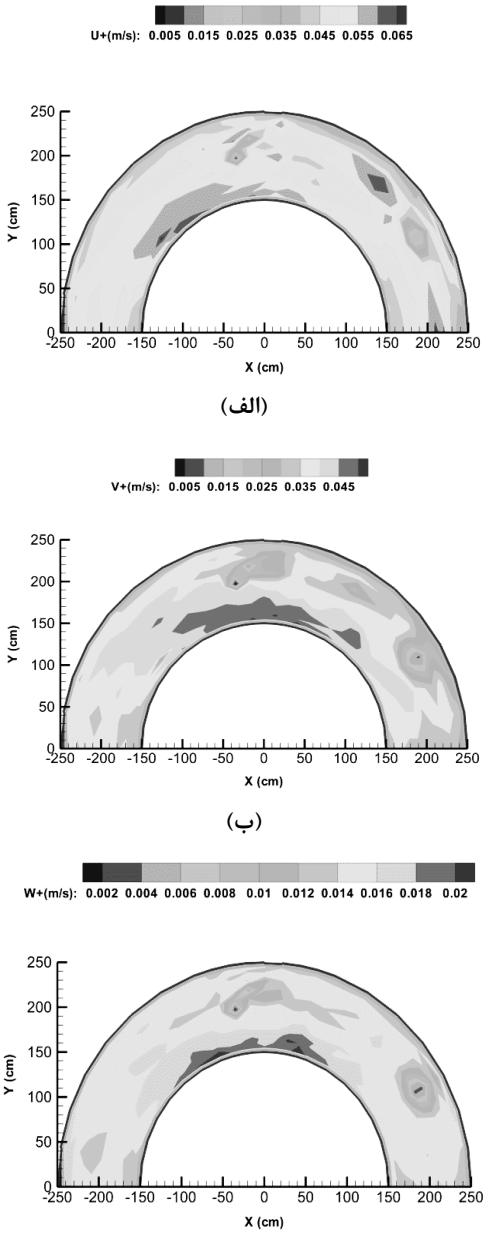
$$v'_{rms} = v^+ = [\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(v_i - V_i)^2]^{0.5} \quad (۱۳)$$

$$w'_{rms} = w^+ = [\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(w_i - W_i)^2]^{0.5} \quad (۱۴)$$



شکل (۸): سری زمانی یک مولفه سرعت در جریان آشفته و تعریف مقادیر لحظه‌ای و متوسط زمانی آن.

از آن جایی که بررسی آشفتگی جریان در لایه‌های نزدیک به بستر در کانال‌های روباز به دلیل ایجاد تنش‌های برشی بیشینه بستر و بحث آبشستگی کف، اهمیت زیادی دارد، در شکل (۹) مقادیر شدت آشفتگی u^+، v^+ و w^+ در جهت‌های طولی، عرضی و عمقی در فاصله ۵ درصدی عمق جریان از کف در طول قوس ۱۸۰ درجه تند نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار شدت آشفتگی برای هر سه مولفه سرعت جریان در نزدیکی دیواره داخلی و در محدوده راس قوس می‌باشد. با توجه به شکل (۹-الف)، مشاهده می‌شود که محدوده بیشینه شدت آشفتگی جریان در راستای طولی به صورت عمده در نزدیکی دیواره داخلی و در محدوده زوایای ۳۰ تا ۱۱۰ درجه گسترده شده است. در حالی که به جز این ناحیه که در نزدیکی دیواره داخلی می‌باشد، وجود دو ناحیه با شدت آشفتگی بالا یکی در محدوده زوایای ۱۲۰ تا ۱۴۰ درجه و دیگری نیز در خروجی قوس و نزدیک به دیواره خارجی مشاهده می‌شود. مقایسه شکل‌های (۹-ب) و (۹-ج)، بیانگر این است که محدوده بیشینه شدت آشفتگی عرضی و عمقی فقط در نواحی نزدیک به راس قوس و در مجاورت دیواره داخلی کانال متمرکز شده و بر خلاف شکل (۹-الف)، افزایش شدت آشفتگی در خروجی قوس وجود ندارد.

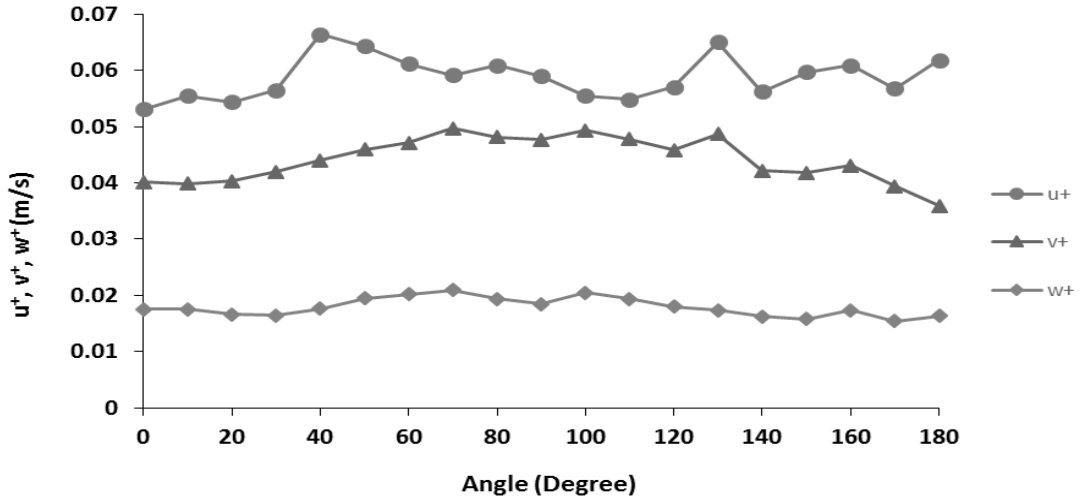


شکل (۹): توزیع شدت‌های آشفتگی جریان در قوس ۱۸۰ درجه تند در عمقی معادل با ۵ درصد عمق جریان از کف و در جهت‌های: الف) طولی u^+، ب) عرضی v^+ و ج) عمقی w^+

به منظور مقایسه بهتر و دقیق‌تر مقادیر بیشینه شدت آشفتگی جریان در راستاهای مختلف، مقادیر بیشینه u^+، v^+ و w^+ در مقاطع مختلف عرضی در طول قوس ۱۸۰ درجه تند در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار آشفتگی جریان در جهت طولی و کمترین مقدار آن مربوط به راستای عمقی جریان می باشد؛ به گونه ای که می توان گفت به طور متوسط، مقادیر بیشینه شدت آشفتگی در راستای عرضی و عمقی به ترتیب برابر با ۷۰ و ۲۵ درصد

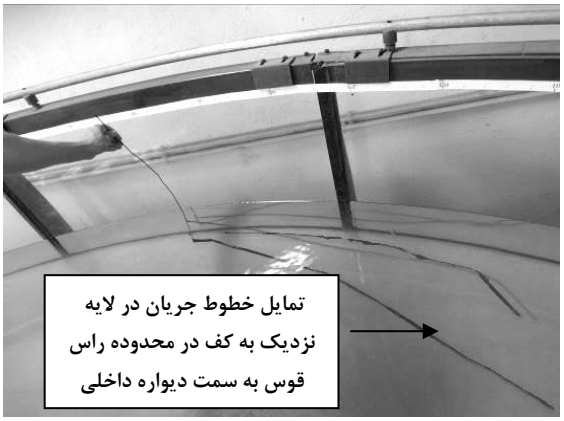
بیشینه شدت آشفتگی طولی می‌باشند. نکته مهم دیگری که در ارتباط با شکل های (۹) و (۱۰) قابل توجه است، محل وقوع بیشینه شدت آشفتگی می‌باشد. با توجه به این شکل‌ها، بیشینه شدت آشفتگی جریان در راستای طولی، در نواحی ورودی قوس و در مقطع عرضی ۴۰ درجه به وقوع پیوسته در حالی که بیشینه شدت آشفتگی در دو راستای دیگر به نواحی نزدیک به راس قوس و زاویه ۷۰ درجه انتقال یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان به تاثیر چشمگیر گرادیان‌های طولی فشار در ورودی قوس و افزایش سرعت جریان و تمایل خطوط جریان به سمت دیواره داخلی کانال در لایه نزدیک به راس قوس بیان کرد. در حالی که سرعت های عرضی و عمقی جریان که مبین جریان‌های ثانویه می‌باشند، در محدوده راس قوس افزایش یافته و همین موضوع سبب انتقال بیشینه شدت آشفتگی جریان از زاویه ۴۰ درجه (در نزدیکی ورودی قوس که گردایان‌های فشار بر جریان‌های ثانویه غالب هستند) به زاویه ۷۰ درجه (مکانی که تاثیر قدرت جریان ثانویه چشمگیر می‌باشد) شده است. در مورد وجه اشتراک توزیع شدت آشفتگی جریان در هر سه راستا، می‌توان به مکان وقوع بیشینه آن‌ها در نزدیکی دیواره داخلی کانال اشاره نمود. چرا که در لایه نزدیک به کف، به دلیل این که در کل مسیر قوسی گرادیان‌های فشار بر جریان‌های ثانویه غالب می‌باشند، همواره تمایل خطوط جریان به سمت دیواره داخلی می‌باشد که این موضوع به خوبی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل، به عنوان نمونه الگوی کیفی جریان با استفاده از روبان‌های رنگی در لایه‌های عمقی متفاوت (سه لایه عمقی نزدیک به بستر، لایه میانی و لایه نزدیک به سطح آب) در طول کانال قوسی ۱۸۰ درجه تند و برای مقاطع عرضی مختلف نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود، خطوط جریان در اعماق مختلف جریان در نزدیکی دیواره داخلی کانال در محدوده ورودی قوس به سمت دیواره داخلی قوس متمایل بوده که این موضوع به دلیل شدید بودن گردایان‌های فشار طولی در ورودی قوس تند می‌باشد. در حالی که مطابق شکل (۱۱-ب) در وسط عرض کانال و در زاویه ۴۰ درجه با افزایش عمق جریان خطوط جریان در ترازهای بالایی تمایلی به سمت دیواره داخلی کانال نداشته و فقط در لایه نزدیک به کف خطوط جریان به سمت دیواره داخلی انحراف می‌یابند.



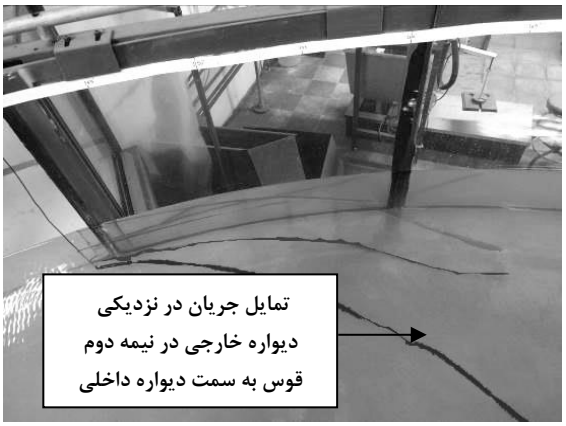
شکل (۱۰): توزیع مقادیر بیشینه شدت‌های آشفتگی جریان در جهت های طولی، عرضی و عمقی

(الف)

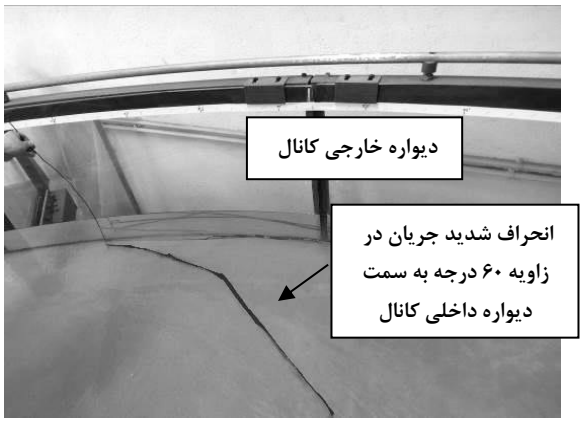


(د)

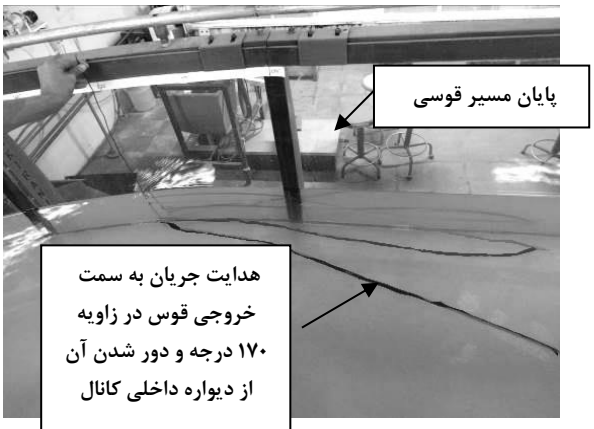
(ب)



(ه)



(ج)



(و)

شکل (۱۱): نمایش الگوی کیفی جریان با استفاده از روبان‌های رنگی در مقاطع مختلف عرضی قوس ۱۸۰ درجه تند: الف) ۲۰، ب) ۴۰، ج) ۶۰، د) ۹۰، ه) ۱۲۰ و) ۱۷۰ درجه

در شکل‌های (۱۱-ج) تا (۱۱-و)، خطوط جریان در نزدیکی دیواره خارجی کانال در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۷۰ درجه نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱-ج) تمایل شدید خطوط جریان در زاویه ۶۰ درجه به سمت دیواره داخلی کانال به وضوح مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است، شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-ج) نسبت به سایر شکل‌ها، میزان انحراف بیشتری را به سمت دیواره داخلی نشان می‌دهند. با توجه شکل (۹-الف) می‌توان محدوده بیشینه شدت آشفتگی را به میزان تمایل شدید خطوط به سمت قوس داخلی در شکل‌های (۱۱-ب) و (۱۱-ج) مربوط دانست. این موضوع در محدوده راس قوس (مطابق شکل (۱۱-د)) و همچنین در نیمه دوم قوس (مطابق شکل (۱۱-ه)) نیز با شدت کمتر برقرار می باشد. در نهایت در خروجی قوس از تمایل خطوط به سمت دیواره داخلی کاسته شده و مسیر جریان به سمت خروجی قوس ادامه می‌یابد (مطابق شکل (۱۱-و)).

به طور کلی می‌توان گفت که در تمامی این شکل‌ها، روبان تیره رنگ مربوط به لایه نزدیک به کف بوده که در تمامی طول مسیر قوسی تمایل خطوط جریان به سمت دیواره داخلی کانال را نشان می‌دهد که این موضوع بیانگر حاکم بودن گردابان فشار طولی بر جریان‌های ثانویه در لایه نزدیک به کف در قوس ۱۸۰ درجه تند بوده و همین عامل سبب افزایش و در واقع تمرکز شدت آشفتگی جریان در محدوده دیواره داخلی قوس شده است.

مقایسه و بررسی شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) بیانگر این است که محدوده‌هایی از مسیر قوسی با شدت آشفتگی بالا، به عنوان مکان‌های مستعدی برای افزایش وقوع تنش برشی بستر و در نتیجه وقوع پدیده آبشستگی (با در نظر گرفتن فرض بستر متحرک برای کف کانال) می‌باشند. نتایج مطالعات Veghefi et al. (2014) در مورد تنش برشی بستر در قوس ۱۸۰ درجه تند با استفاده از روش عمق متوسط نیز بیانگر وقوع بیشینه مقادیر تنش در زاویه ۴۰ درجه می‌باشد که با نتایج به دست آمده در این تحقیق (شکل های (۹-الف) و (۹-ب)) همخوانی دارد؛ به این دلیل که در روش عمق متوسط فقط مولفه‌های سرعت طولی و عرضی جریان دخیل بوده و اثری از مولفه عمقی سرعت جریان وجود ندارد. اما از آنجایی که مولفه‌های عرضی و عمقی سرعت جریان بیانگر وجود جریان‌های ثانویه در قوس می‌باشند بهتر است که تاثیر این دو مولفه برای پیش‌بینی توپوگرافی بستر در نظر گرفته شود. همان‌طور که در شکل‌های (۹-ب) و (۹-ج) مشخص می‌باشد، بیشینه شدت آشفتگی جریان در راستاهای عرضی و عمقی در زاویه ۷۰ درجه بوده که این موضوع نشان‌دهنده افزایش قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی در نزدیکی راس قوس می‌باشد (Veghefi et al. (2015)). با توجه به اینکه افزایش این دو پارامتر، افزایش تنش برشی بستر و در پی آن ایجاد چاله‌های آبشستگی را به همراه دارد، نکات زیر برای پیش‌بینی تغییرات توپوگرافی بستر در این قوس قابل توجه می‌باشد:

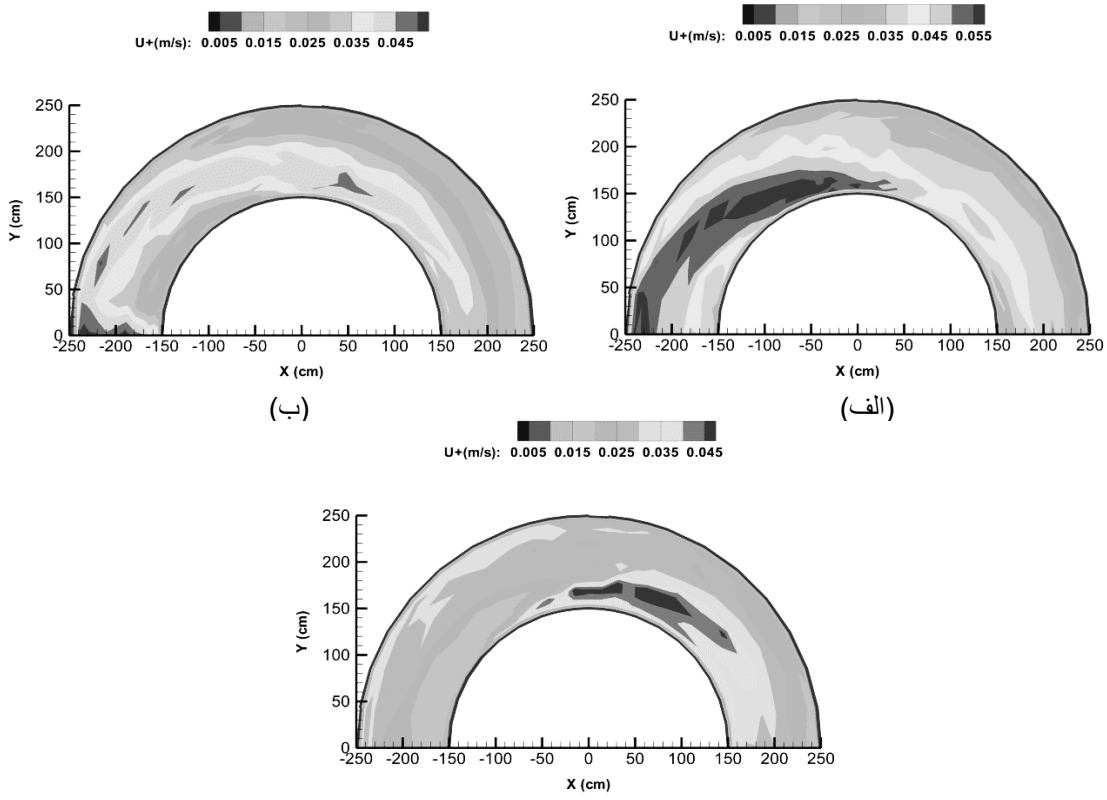
۱- شروع پدیده آبشستگی از نیمه اول قوس و حدودا از زاویه ۵۰ درجه و در مجاورت دیواره داخلی کانال می‌باشد.

۲- حرکت رسوبات در مناطقی که بیشینه شدت آشفتگی وجود دارد (یعنی محدوده مقطع عرضی ۷۰ درجه) آغاز می‌شود.

۳- در نیمه دوم قوس و پس از عبور از زاویه ۱۳۰ درجه، کاهش مقادیر شدت آشفتگی جریان سبب کاهش میزان آبشستگی در مسیر قوسی می‌شود.

از آن جایی که شدت آشفتگی جریان در راستای طولی از دو راستای دیگر قوی‌تر می‌باشد، در شکل ۱۲ به بررسی توزیع شدت آشفتگی طولی جریان در سه لایه عمقی مختلف (در فواصل ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد عمق جریان از کف) و مقایسه آن با شکل (۹-الف) (لایه عمقی معادل با ۵ درصد عمق جریان از کف) پرداخته شده است.

مقایسه توزیع شدت آشفتگی جریان در ترازهای عمقی مختلف، بیانگر این است که با افزایش عمق جریان از کف، به تدریج از شدت آشفتگی جریان در طول مسیر قوسی کاسته شده است. علاوه بر این، بررسی شکل‌های (۱۲-الف)، (۱۲-ب) و (۱۲-ج) توزیع بسیار متفاوتی از الگوی آشفتگی در عمق را نسبت به توزیع آشفتگی جریان در لایه نزدیک به کف نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۲-الف) و مقایسه آن با شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود که در عمقی معادل ۲۰ درصد عمق جریان از کف، محدوده بیشینه شدت آشفتگی جریان در نیمه اول قوس گسترده‌تر شده و توزیع آن (بر خلاف لایه پایینی) از روند منظم‌تری در طول قوس برخوردار می‌باشد. با وجود اینکه شدت آشفتگی بیشینه در این لایه عمقی نسبت به لایه پایینی کمتر می‌باشد، اما در این تراز عمقی در بدو ورود جریان به قوس شاهد افزایش چشم‌گیر شدت آشفتگی در نزدیکی دیواره خارجی قوس بوده و در ادامه مسیر نیز تمایل آن به سمت وسط عرض کانال و در نهایت مجاورت دیواره داخلی کانال در محدوده راس قوس می‌باشد. با افزایش عمق جریان و بررسی توزیع آشفتگی در عمق میانی کانال (مطابق شکل (۱۲-ب)) روند نسبتا مشابهی از توزیع شدت آشفتگی جریان اما با مقادیر بیشینه کمتر (در مقایسه با شکل (۱۲-الف)) مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق جریان از لایه نزدیک به کف تا عمق میانی کانال، به تدریج ناحیه بیشینه جریان از نزدیکی دیواره داخلی کانال فاصله گرفته که دلیل این موضوع کاهش گرادیان فشار طولی جریان با افزایش عمق جریان می‌باشد.



شکل (۱۲): توزیع شدت آشفتگی جریان طولی در طول قوس ۱۸۰ درجه تند و در اعماق مختلف: الف) ۲۰، ب) ۵۰ و ج) ۸۰ درصد عمق جریان از کف

بررسی توزیع شدت آشفتگی جریان در لایه بالایی عمق جریان نشان دهنده الگوی متفاوتی از توزیع آشفتگی در نزدیکی دیواره داخلی کانال می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۲-ج) مشخص است، محدوده بیشینه آشفتگی جریان از نیمه اول قوس به نیمه دوم قوس منتقل شده و افزایش شدت آشفتگی جریان از راس قوس تا زاویه ۱۴۰ درجه گسترش یافته است. به طور کلی مقایسه توزیع بیشینه شدت آشفتگی جریان در اعماق مختلف بیانگر کاهش ۲۵ درصدی بیشینه شدت آشفتگی در لایه بالایی نسبت به لایه پایینی می‌باشد. ضمن اینکه با افزایش عمق جریان و در نتیجه افزایش قدرت جریان‌های ثانویه، محدوده بیشینه شدت آشفتگی در وسط عمق جریان از دیواره داخلی فاصله گرفته و در لایه بالایی نیز به نیمه دوم قوس منتقل شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تاکنون الگوی جریان آشفته در کانال‌های قوسی شکل، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، در این مقاله به تعیین شدت آشفتگی جریان در کانال قوسی ۱۸۰ درجه تند (R/B=2) با استفاده از سرعت‌سنج Vectrino در شرایط بستر صلب پرداخته شده است. بدین منظور شدت آشفتگی جریان به صورت RMS در لایه نزدیک به کف در جهت‌های طولی، عرضی و عمقی مقایسه شده و در اعماق مختلف نیز به بررسی توزیع آشفتگی جریان در طول مسیر قوسی پرداخته شده است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

- بیشینه شدت آشفتگی جریان در راستای طولی، در نواحی ورودی قوس و در مقطع عرضی ۴۰ درجه به وقوع پیوسته در حالی‌که بیشینه شدت آشفتگی در دو راستای دیگر به نواحی نزدیک به راس قوس و زاویه ۷۰ درجه انتقال یافته است.
- در لایه نزدیک به بستر، به طور متوسط مقادیر بیشینه شدت آشفتگی در راستای عرضی و عمقی به ترتیب برابر با ۷۰ و ۲۵ درصد بیشینه شدت آشفتگی طولی می‌باشند.
- در لایه عمقی معادل با ۲۰ درصد عمق جریان از کف، ناحیه بیشینه شدت آشفتگی به محض ورود به قوس شکل گرفته و در نیمه اول قوس گسترده شده است.
- با افزایش عمق جریان از کف (از فاصله ۵ درصدی عمق جریان از کف به فاصله ۸۰ درصدی آن) بیشینه شدت آشفتگی جریان ۲۵ درصد کاهش یافته است.

منابع

صفرزاده گندشمین، ا.، س. ع. ا. صالحی نیشابوری، ا. ر. زراتی و م. قدسیان. ۱۳۸۹. مطالعه توزیع تنش برشی جداره در جریان یکنواخت کانال با استفاده از ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی. مجله هیدرولیک، سال پنجم، شماره ۱، ص ۵۱-۷۰.

کرباسی، م.، م. ح. امید و ج. فرهودی. ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی مشخصات سه‌بعدی جریان بر روی کلاسترها. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال دوم، شماره ۵، ص ۷۵-۸۵.

موسوی نائینی، س. ع.، م. واقفی و م. قدسیان. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی تاثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان پیرامون آبشکن تی شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب. مجله آب و فاضلاب، سال بیست و سوم، شماره ۱، ص ۱۵-۲۳.

واقفی، م.، م. قدسیان و س. ع. ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۷. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه‌بعدی و آبشستگی در قوس ۹۰ درجه. مجله هیدرولیک، سال سوم، شماره ۳، ص ۴۱-۵۷.

مظفری، ج.، ا. امیری تکلدانی و م. خادمی. ۱۳۹۰. ارزیابی روش های مختلف تعیین تنش برشی بستر در پیچ تند کانال با توپوگرافی بستر توسعه یافته. مجله هیدرولیک، سال ششم، شماره ۱، ص ۱-۱۷.

Belcher, B. J. and J. F. Fox. 2009. Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed. Journal of Hydraulic Research, 47(5): 685-688.

Blanckaert, K. and W. H. Graf. 2004. Momentum transport in sharp open-channel bends. Journal of Hydraulic Engineering, 130(3): 186-198.

Blanckaert, K. and H. J. De Vriend. 2005. Turbulence characteristics in sharp open-channel bends. Physics of Fluids, 17(5): 055102-1-055102-15.

Czernuszenko, W. and A. Rylov. 2002. Modeling of three-dimensional velocity field in open channel flows. Journal of Hydraulic Research, 40(2): 135-143.

Ippen, A. T. and P. A. Drinker. 1962. Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels. Journal of the Hydraulics Division, 87(6): 143-179.

Leschziner, M. A. and W. Rodi. 1979. Calculation of strongly curved open channel flow. Journal of Hydraulic Division, 105(10): 1297-1314.

Lien, H. C., T. Y. Hsieh, J. C. Yang and K. C. Yeh. 1999. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model. Journal of Hydraulic Engineering, 125(10): 1097-1108.

Nortek, A. S. 2009. Vectrino velocimeter user guide. Nortek AS, Vangkroken, Norway.

Nouh, M. and R. D. Townsend. 1979. Shear-stress distribution in stable channel bends. Journal of the Hydraulics Division, 105(10): 1233-1245.

Prandtl, L. 1963. The essentials of fluid dynamics. Blackie & So, London, United Kingdom.

Rodríguez, J. F. and M. H. García. 2008. Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed. Journal of Hydraulic Research, 46, (4): 454-465.

Rozovskii, I. L. 1957. Flow of water in bends of open channels. Published by the academy of Sci. Ukrainian SSR, Kiev.

Shukry, A. 1950. Flow around bends in stable channels. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 115(1): 751-779.

Townsend, A. A. 1956. The structure of turbulent shear flow. Cambridge university press, London, United Kingdom.

Vaghefi, M., M. Akbari and A.R. Fiouz. 2014. Experimental investigation on bed shear stress distribution in a 180 degree sharp bend by using Depth-Averaged method. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 3(5): 675-679.

Vaghefi, M., M. Akbari and A.R. Fiouz. 2015. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress. KSCE Journal of Civil Engineering, 0(0): 1-12 (Published Online).

Vaghefi, M., M. Akbari and A.R. Fiouz. 2015. Experimental Investigation of the Three-dimensional Flow Velocity Components in a 180 Degree Sharp Bend. World Applied Programming, 5(9): 125-131.

Vaghefi, M., M. Akbari and A.R. Fiouz. 2015. Experimental study of turbulence kinetic energy and velocity fluctuation distributions in a 180 degree sharp bend. 10th International Congress on Civil Engineering, Tabriz, Iran.

Wang, Z. Q. and N. S. Cheng. 2005. Secondary flows over artificial bed strips. Advances in Water Resources, 28(5): 441-450.

Determining Turbulence Intensity in a 180 Degree Sharp Bend Channel Using Experimental Data

Mohammad Vaghefi[1], Maryam Akbari[2]

Abstract

Turbulence is one of the most important features of the flow pattern in a bend which influences a lot of processes occurred in rivers including erosion, sediment transport, bed morphology, and shape of natural channels. In this study, in order to determine the turbulence intensity through bend channels, the flow velocity components at different sections of the 180 degree sharp bend channel (the ratio of central radius to the channel width equals 2, with rigid bed and roughness provided) were collected using Vectrino 3D velocimeter in the hydraulic laboratory of Persian Gulf University. In this paper, the turbulence intensities were measured, compared and analyzed in RMS form in various depths and directions. The results of the experiment indicates that the maximum turbulence intensity along width and depth at the layer near the bed were 70 and 25% of the maximum turbulence intensity along the length, respectively. Moreover, the turbulence intensities were compared at various depths and the results demonstrated a 25% decrease in the longitudinal turbulence intensity upon distancing from the bed to the water surface.

Keywords: Turbulent Flow, 3D Velocities, Turbulence Intensity, 180 Degree Sharp Bend, Vectrino

[1] Assistant Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; vaghefi@pgu.ac.ir

[2] M.Sc. Graduated Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran; m.akbari@pgu.ac.ir