

بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آبشکن‌های سری سرسپری جاذب در مسیر مستقیم

مهدی حسینی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

محمد واقفی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس

مسعود قدسیان (استاد)

دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (۱۳-۲)
دوری ۲ - ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۱۳-۲۰

در نوشتار حاضر به بررسی الگوی جریان پیرامون آبشکن‌های سری سرسپری غیرمستغرق جاذب در مسیر مستقیم پرداخته و نتایج تحلیل الگوی جریان نشان داده است که استقرار آبشکن‌ها باعث جدایی جریان و در نتیجه افزایش سرعت‌های عرضی و عمقی در بالادست آن‌ها می‌شود و همچنین به دلیل تنگ‌شدگی ناشی از احداث آبشکن‌ها، سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن‌ها تا ساحل مقابل افزایش می‌یابد. پیشینه‌ی سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن اول حدوداً ۲ و ۱٫۶ برابر جلوی بال آبشکن‌های دوم و سوم است. بررسی پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی در الگوی جریان نشان می‌دهد که در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول، بیشترین مقدار را دارد و در لایه‌ی برشی جلو بال آبشکن‌ها افزایش یافته است. بررسی تنش‌های رینولدز حاکی از آن است که پیشینه‌ی مؤلفه‌ی $-\rho u'v'$ به ترتیب حدوداً ۵ و ۶ برابر مؤلفه‌های $-\rho u'w'$ و $-\rho v'w'$ است و پیشینه‌ی مقادیر آن‌ها در پایین دست آبشکن‌ها و در جلوی بال رخ داده است.

واژگان کلیدی: الگوی جریان، آبشکن‌های سری سرسپری، پارامترهای آشفتگی، تنش برشی بستر، مسیر مستقیم.

۱. مقدمه

در سال ۱۹۹۷، نیز یک مدل ریاضی دوبعدی برای بررسی آثار آبشکن‌ها در مورفولوژی رودخانه‌ی نیل تبیین و از طول‌ها و فواصل مختلف آبشکن‌ها استفاده شده است تا تأثیر آن‌ها در تراز سطح آب و مؤلفه‌های سرعت ارزیابی شود.^[۱] همچنین در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ در بررسی الگوی جریان پیرامون آبشکن مستقر در کانال مستقیم در دو حالت استقراری کم و زیاد مشاهده شده است که در حالت استقراری زیاد، در بالادست آبشکن و در لایه‌های نزدیک به بستر، گردابه‌هایی عمود بر جریان و به سمت بالای آبشکن تشکیل شده است. در پایین دست آبشکن نیز جریان حالت ریزشی داشته است، در حالی که لایه‌های دیگر به صورت طولی و با سرعت‌های متفاوت به سمت پایین دست حرکت کرده‌اند. در حالی که در حالت استقراری کم، لایه‌های نزدیک بستر از کنار آبشکن و با سرعت زیاد به سمت پایین دست حرکت کرده و هیچ گردابه‌ی در بالادست آبشکن مشاهده نشده است.^[۲] در سال ۲۰۰۴، نیز الگوی جریان اطراف تکیه‌گاه کوتاه در مسیر مستقیم و در دو حالت بستر تخت و تعادل یافته بررسی و نتیجه‌گیری شده است که انرژی جنبشی آشفتگی در حالت بستر تعادل یافته بیشتر از حالت بستر تخت است و

آبشکن^۱ یکی از سازه‌های مهم مهندسی است که جهت حفاظت از ساحل رودخانه معمولاً به صورت سری بیشترین کاربرد را دارد. این سازه با دور کردن جریان از ساحل رودخانه، باعث جلوگیری از فرسایش دیواره‌ی رودخانه می‌شود. از سویی دیگر، کناره‌ی رودخانه به تدریج با ته‌نشست رسوبات و با استقرار تدریجی پوشش گیاهی در درازمدت تثبیت می‌شود. از طرف دیگر، وجود آبشکن الگوی جریان اطراف آن را تغییر می‌دهد و باعث ایجاد حفره‌های آب‌شستگی^۲ می‌شود. در سال ۱۹۸۳، در بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن‌های سری تیغه‌یی، شش نوع الگوی جریان چرخشی بین آبشکن‌ها تشخیص داده شده است.^[۱] همچنین در همان سال به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن تیغه‌یی در مسیر مستقیم پرداخته شده و این نتیجه به دست آمده است که پیشینه‌ی تنش برشی بستر، ۳ تا ۵ برابر تنش برشی بالادست آبشکن است و در نوک بالادست آبشکن رخ می‌دهد.^[۲]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۲۰.

mehdi.hosseini@modares.ac.ir
vaghefi@pgu.ac.ir
ghods@modares.ac.ir

تنش برشی بیشینه حدود $3/2$ برابر تنش برشی در بالادست تکیه‌گاه است.^[۶] همچنین در سال 2005 ، در بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن تیغه‌بی در مسیر مستقیم و در دو حالت مستغرق و غیرمستغرق نتیجه گرفته شده است که آشفتگی در حالت غیرمستغرق بیشتر از مستغرق است.^[۷] در سال 2008 ، نیز به صورت عددی و آزمایشگاهی به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن دوزنقه‌بی مستغرق در مسیر مستقیم در دو حالت بستر صلب و تغییر یافته پرداخته شده و نتایج عددی تطابق مناسبی در ناحیه بالادست آبشکن با نتایج آزمایشگاهی داشته و تنش‌های برشی بیشینه در ناحیه پایین دست آبشکن مشاهده شده است.^[۸] در سال 2009 ، در بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات عدد فرود و طول بال و جان آبشکن T شکل مستقر در موقعیت 75 درجه در الگوی جریان واقع در قوس 90 درجه نشان داده شده است که با افزایش طول آبشکن، طول ناحیه جدایی و گردابه‌ی شکل گرفته در ناحیه مذکور افزایش می‌یابد.^[۹] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن منفرد، عمودی و تیغه‌بی در مسیر مستقیم پرداخته شده و با اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی، با استفاده از دستگاه ADV پارامترهای تنش‌های رینولدز و تنش برشی بستر در اطراف آبشکن تعیین شده و با محاسبه تنش برشی بستر به روش تنش‌های رینولدز نتیجه گرفته شده است که تنش برشی بستر در اطراف آبشکن، 2 تا 3 برابر تنش برشی جریان ورودی است.^[۱۰]

در سال 2010 ، نیز در بررسی الگوی جریان اطراف سری آبشکن‌های تیغه‌بی در مسیر مستقیم و با اندازه‌گیری سرعت‌های سه بعدی در حالت بستر صلب و تغییر پارامترهای دبی و زاویه‌ی اتصال آبشکن نسبت به ساحل، مقادیر تنش برشی و تنش‌های رینولدز به منظور تعیین محل بیشینه عمق آبشستگی محاسبه شده است.^[۱۱] در سال 2011 ، نیز در بررسی تأثیر پارامترهای اثر موقعیت آبشکن عدد فرود و طول بال آبشکن L شکل در قوس 180 درجه‌ی ملایم در شرایط آب زلال، نتایج نشان داده است که کمینه مقدار عمق آبشستگی در زاویه 30 درجه و بیشینه آن در زاویه 75 درجه اتفاق می‌افتد.^[۱۲] همچنین در سال 2012 ، در مطالعه‌ی شدت پخش جریان متلاطم حول آبشکن‌های با ساختار متفاوت نتیجه گرفته شده است که شدت تلاطم حول آبشکن‌های قوسی و بادبزی نسبتاً کمتر از آبشکن‌های با ساختار کج و چوگانی است و بیشترین شدت تلاطم حول آبشکن دوزنقه‌بی اتفاق می‌افتد و نهایتاً روشی عملی برای انتخاب ساختار آبشکن پیشنهاد شده است.^[۱۳] در پژوهش دیگری در همان سال، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی آبشستگی حول آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه تحت تأثیر پارامترهایی مانند: طول جان، طول بال و موقعیت آبشکن در قوس و نیز شعاع انحنای قوس پرداخته شده و نتایج به دست آمده بیانگر این مطلب بوده است که افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییرات موقعیت آبشکن به سمت پایین دست قوس باعث افزایش ابعاد چاله‌ی آبشستگی می‌شود و معادلات جدیدی برای محاسبه پارامترهای چاله آبشستگی ارائه شده است.^[۱۴]

همچنین در سال 2013 ، نتایج مطالعه‌ی آزمایشگاهی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های سری L شکل در شرایط آب زلال در مسیر مستقیم و مقایسه‌ی آن با آبشکن مستقیم نشان داده است که میزان آبشستگی در اطراف آبشکن L شکل کمتر از آبشکن مستقیم است.^[۱۵] در سال 2014 ، نیز در مطالعه‌ی آزمایشگاهی تنش برشی بستر با استفاده از روش عمق متوسط در قوس 180 درجه‌ی تند (با نسبت شعاع انحنای به عرض کانال برابر با 2) نتایج نشان داده است که افزایش تنش برشی بستر در ورودی قوس و در نزدیکی دیواره داخلی

کانال در مقطع عرضی 40 درجه است.^[۱۶] همچنین در سال 2015 ، در بررسی آزمایشگاهی مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان و نیز محاسبه‌ی قدرت جریان ثانویه، تنش برشی رینولدزی و ویسکوزیته در کانال قوسی با زاویه‌ی مرکزی 180 درجه، نتایج نشان داده است که در طول قوس 180 درجه‌ی تند، به طور متوسط سرعت جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به نزدیکی کف کانال 60% افزایش یافته و مقادیر بیشینه‌ی سرعت‌های عرضی و عمقی در مقاطع عرضی به ترتیب $35-70$ درصد و $9-14$ درصد سرعت‌های طولی جریان و نیز بیشینه‌ی قدرت جریان ثانویه در محدوده‌ی رأس قوس و در زاویه‌ی 85 درجه است.^[۱۷]

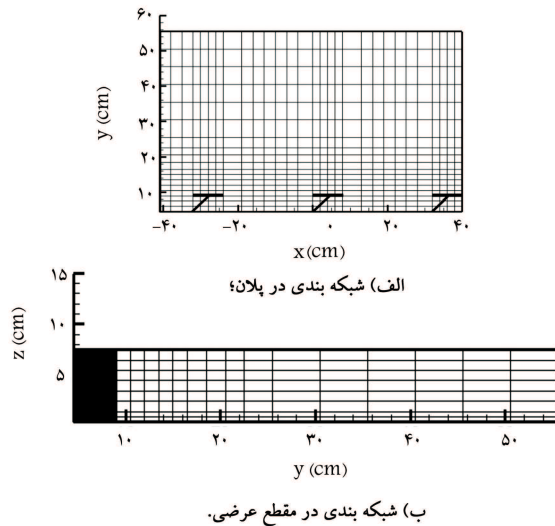
در سال 1388 ، نیز به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن T شکل در دو حالت بستر تخت و تغییر یافته و تحت تأثیر پارامترهایی نظیر موقعیت استقرار و شعاع انحنای پرداخته شده است.^[۱۸] همچنین در سال 1389 در بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن با شکل‌های مختلف دماغه از جمله T شکل در حالت بدون رسوب، این نتیجه به دست آمده است که افزودن باله به آبشکن مستقیم ضمن کنترل شکل‌گیری گردابه‌ی نعل اسبی و حتی حذف نسبی آن، ضمن حفاظت سازه‌ی آبشکن در مقابل جریان پرسرعت، توزیع تنش برشی بستر تحت تأثیر قرار گرفته است.^[۱۹] در بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن T شکل مستغرق در قوس 90 درجه در سال 1390 ، این نتایج به دست آمده است که افزایش درصد استغراق و کاهش شعاع انحناء باعث کاهش ابعاد گردابه‌ی پادساعت‌گرد جریان پایین رونده و طول ناحیه‌ی بازگشتی جریان در بالادست آبشکن و افزایش جریان بالارونده می‌شود.^[۲۰] همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی و الگوی جریان اطراف آبشکن منفرد سرسپری جاذب و دافع در مسیر مستقیم پرداخته شده و اثر استغراق، زاویه‌ی قرارگیری آبشکن، قطر مصالح و U/U_c در ابعاد چاله‌ی آبشستگی بررسی شده است.^[۲۱]

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد الگوی جریان اطراف آبشکن‌ها، تا کنون مطالعه‌ی در مورد الگوی جریان اطراف آبشکن‌های سری سرسپری در مسیر مستقیم انجام نشده است. لذا در نوشتار حاضر، به بررسی الگوی جریان متوسط و آشفته‌ی اطراف آبشکن‌های سری سه تایی سرسپری جاذب در مسیر مستقیم در حالت بستر تخت پرداخته شده است.

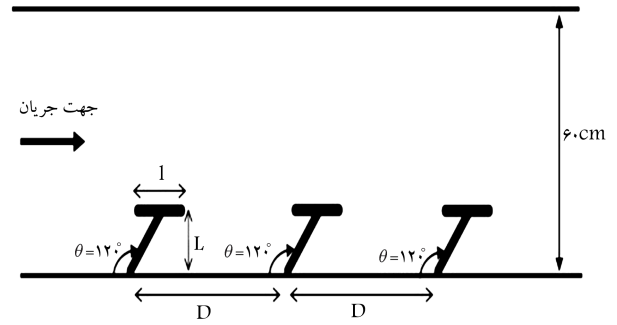
۲. مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از کانال واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. طول مستقیم کانال موردنظر 7 متر، عرض آن 60 سانتی‌متر، ارتفاع حدودی آن 65 سانتی‌متر و شیب کف بستر $0/01$ و همچنین ارتفاع کانال از کف آزمایشگاه $1/5$ متر بوده است. در آزمایش‌ها از رسوبات یکنواخت ($\sigma_g = \left(\frac{d_{\Delta s}}{d_p}\right)^{0/5} = 1/3$) استفاده شده است. در نوشتار حاضر، σ_g انحراف از معیار دانه‌ها و $d_{\Delta 4}$ و $d_{\Delta 6}$ قطرهایی هستند که به ترتیب 84% و 16% مصالح از آن ریزترند (با استفاده از الک‌های شماره 12 و 118).

مصالح بستر، ماسه‌ی طبیعی رودخانه‌یی با قطر $1/28$ میلی‌متر بوده است. آبشکن‌ها با استفاده از صفحات مستطیلی از جنس پلکسی گلاس با لبه‌های گرد، ضخامت 1 سانتی‌متر، ارتفاع از سطح بستر 20 سانتی‌متر، طول قائم جان



شکل ۲. نمایی از شبکه بندی نقاط در برداشت الگوی جریان.



شکل ۱. شکل شماتیک از آبشکن‌ها در کانال.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی جریان یکنواخت در بالادست.

Re	Fr	H (cm)	B (cm)	V (m/s)	Q (lit/s)
۲۹۶۰۷٫۵	۰٫۳	۱۲٫۸	۶۰	۰٫۳۳	۲۵

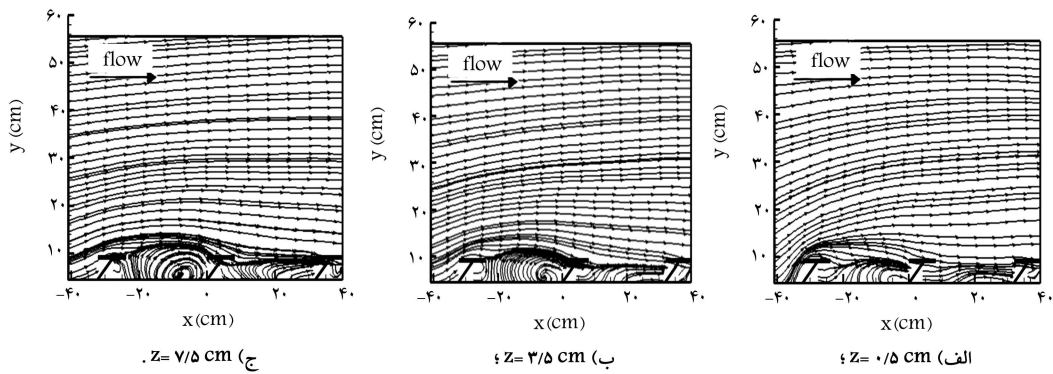
۳. نتایج و مشاهدات

۳.۱. بررسی الگوی جریان

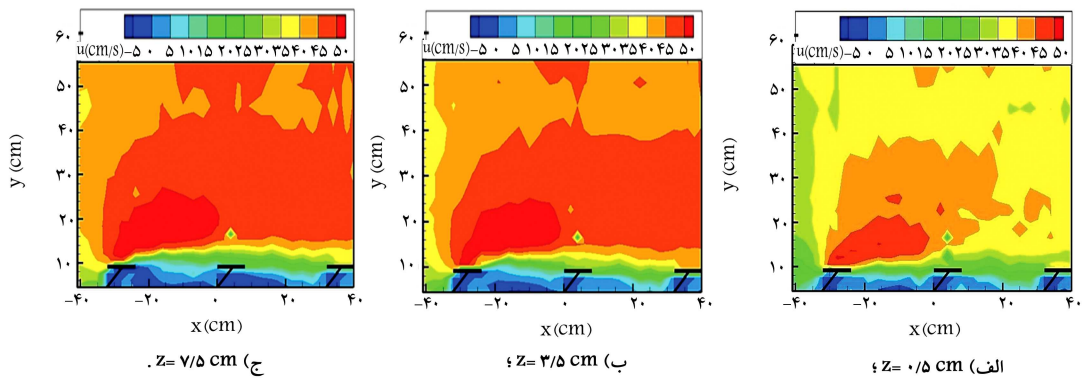
در شکل ۳، نمونه‌یی از خطوط جریان اطراف آبشکن‌ها مشاهده می‌شود که در آن x بعد طولی، y بعد عرضی و z بعد عمقی جریان است. مطابق شکل مذکور، در محدوده‌ی بالادست آبشکن اول، ناحیه‌ی جدایی جریان به علت وجود آبشکن در مقابل جریان و به دنبال آن کاهش سرعت جریان در بلافاصله بالادست آبشکن اول و افزایش سرعت در جلوی بال آبشکن اول در نتیجه‌ی ایجاد گردابان فشار عرضی وجود دارد. لایه‌ی برشی نیز به دلیل اختلاف سرعت بین جریان اصلی کانال و ناحیه‌ی جریان اطراف آبشکن‌ها که سرعت کمتر نسبت به جریان اصلی کانال دارند، تشکیل شده است. با حرکت از تراز ۰٫۷۵ سانتی‌متری تا ۷٫۵ سانتی‌متری از بستر، کاهش عرض ناحیه‌ی جریان جدا شده مشاهده می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان به کاهش فشار با افزایش تراز جریان و هماهنگ‌تر شدن جریان آب در اطراف آبشکن‌ها با جریان اصلی کانال، ربط داد. بین آبشکن اول و دوم، گردابه‌ی افقی ساعت‌گرد در اثر جریان بازگشتی مشاهده می‌شود. این گردابه‌ی تشکیل شده نظیر دیواره‌یی عمل می‌کند که مانع ورود جریان اصلی کانال به داخل محدوده‌ی بین آبشکن‌ها می‌شود و جهت خطوط جریان در محدوده‌ی بین دو آبشکن، از سمت آبشکن دوم به سمت آبشکن اول است. همچنین با افزایش تراز جریان از بستر، مرکز گردابه از سمت آبشکن دوم به سمت آبشکن اول منتقل می‌شود.

در حالت کلی می‌توان گفت الگوی جریان بین دو آبشکن به این شکل است که جریان اصلی ورودی از بالادست و از محدوده‌ی تأثیر آبشکن منحرف می‌شود و به محدوده‌ی آن‌ها وارد نمی‌شود و فقط یک جریان چرخشی در بین دو آبشکن پدید می‌آید و از لایه‌های نزدیک بستر از محدوده‌ی بین دو آبشکن خارج می‌شود. بین آبشکن دوم و سوم، یک گردابه‌ی رو به بالا در بالادست آبشکن سوم و در لایه‌های میانی و بالاتر در بازگشت به سمت آبشکن دوم به صورت گردابه‌یی افقی، یک جریان چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت ایجاد می‌کند. ابعاد گردابه‌ی افقی ساعت‌گرد بین آبشکن اول و دوم بزرگ‌تر از گردابه‌ی افقی ساعت‌گرد شکل گرفته بین آبشکن دوم و سوم است و همچنین ابعاد گردابه‌ی حاصل از جریان

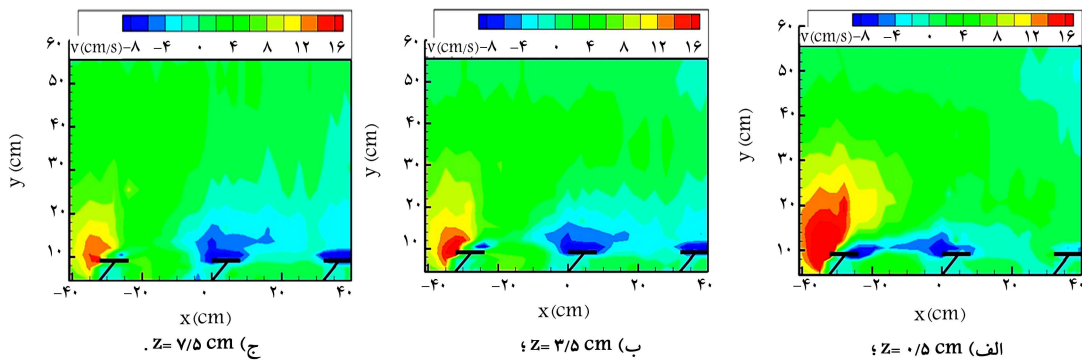
و بال آبشکن ۹ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه برش لیزری ساخته شده‌اند. شکل ۱، نمایی شماتیک از آبشکن‌های مورد استفاده و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها در کانال موردنظر را نشان می‌دهد که آبشکن‌ها با فاصله‌ی ۳٫۵ برابر ارتفاع قائم جان آن‌ها ($D = 3.5L$) از هم قرار گرفته‌اند. تراز سطح آب با استفاده از دستگاه Point gage با دقت ۰٫۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. برای کنترل ارتفاع جریان از یک دریچه‌ی قطاعی در انتهای کانال و برای تعیین مقدار دبی عبوری از کانال از یک سرریز مثلثی شکل لیه‌تیز با زاویه‌ی داخلی ۹۰ درجه از جنس فلز در انتهای حوضچه‌ی پایین‌دست استفاده شده است. ارتفاع جریان با توجه به دبی جریان طوری تنظیم شده است که شرایط آستانه‌ی حرکت مصالح ($U/U_c = 0.98$) حاکم باشد. برای انجام آزمایش الگوی جریان، ابتدا آبشکن‌های موردنظر نصب و به دنبال آن مصالح بستر کانال تسطیح شده است. سپس سطح بستر، با پاشیدن دوغاب سیمان توسط کمپرسور هوا به طوری که زبری بستر حفظ شود، تثبیت شده است. بعد از این عمل، پمپ روشن و شیر بالادست کمی باز شده است تا کانال به‌طور آرام پر آب و از دریچه‌ی پایین‌دست سرریز شود. سپس با باز کردن بیشتر شیر بالادست، دبی جریان به‌طور آرام زیاد شده است تا تراز ارتفاعی معادل دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه در بالادست سرریز مثلثی مشاهده شود. عمق سنج نقطه‌یی در بالادست کانال در ارتفاع معادل عمق جریان تنظیم و سپس دریچه‌ی کانال آنقدر پایین آورده شده است تا نوک میله‌ی عمق‌سنج نقطه‌یی بر سطح آب مماس شود. بعد از مماس شدن نوک میله‌ی عمق‌سنج نقطه‌یی با سطح آب عمق جریان نیز تنظیم شده است. زمان شروع آزمایش نیز زمانی بوده است که عمق جریان تنظیم شود. سرعت‌های سه‌بعدی با استفاده از دستگاه Vectrino⁺ با بسامد ۱۰۰ HZ و زمان برداشت ۳ دقیقه در کلیه‌ی نقاط شبکه‌بندی بستر شامل ۳۰ مقطع عرضی، ۱۹ مقطع طولی و ۹ مقطع عمقی (شکل ۲) اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱، مشخصات هیدرولیکی جریان یکنواخت بالادست ارائه شده است، که در آن: H : عمق جریان، Q : دبی جریان، B : عرض کانال، Re : عدد رینولدز بر حسب شعاع هیدرولیکی جریان ورودی (R) و برآیند سرعت متوسط جریان ورودی (V) و Fr : عدد فرود جریان ورودی است.



شکل ۳. نمونه‌یی از خطوط جریان با فواصل از بستر.



شکل ۴. کانتورهای مؤلفه‌ی طولی سرعت u از بستر.



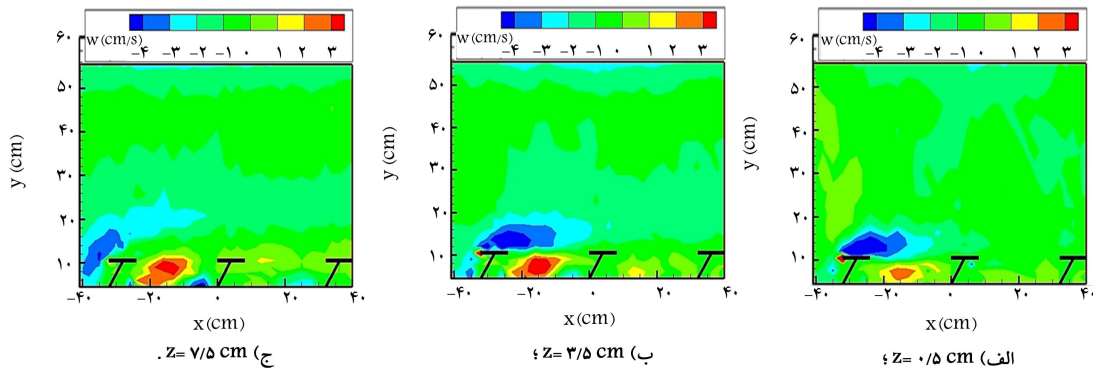
شکل ۵. کانتورهای مؤلفه‌ی عرضی سرعت v از بستر.

نسبت به تراز میانی و تراز نزدیک سطح آب کمتر مشاهده می‌شود. همچنین در محدوده‌ی جلو و نزدیک بال آبشکن‌ها در هر تراز جریان مشاهده می‌شود که مقدار سرعت‌های طولی جریان برای آبشکن اول بیشتر از آبشکن دوم و سوم است، در حالی که برای آبشکن سوم بیشتر از آبشکن دوم است؛ به طوری که می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بیشینه‌ی سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن اول حدوداً ۲ و ۱٫۶ برابر جلوی بال آبشکن‌های دوم و سوم است. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود که انتقال رسوبات به پایین دست در بالادست آبشکن اول بیشتر از بالادست آبشکن دوم و سوم و همچنین فرسایش بستر در بالادست آبشکن سوم بیشتر از بالادست آبشکن دوم باشد. در شکل ۵، نمونه‌یی از کانتورهای مؤلفه‌ی عرضی سرعت v در ترازهای عمقی مختلف ارائه شده است. سرعت جریان عرضی به سمت ساحل مجاور منفی و به سمت ساحل مقابل مثبت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۵الف

بازگشتی بین آبشکن‌ها با افزایش تراز جریان به دلیل کاهش فشار افزایش یافته است.

۲.۳. بررسی نوسانات مؤلفه‌های سه بعدی سرعت

در شکل ۴، نمونه‌یی از کانتورهای مؤلفه‌ی طولی سرعت u در ترازهای عمقی مختلف ارائه شده است. سرعت جریان در جهت جریان اصلی مثبت و در جهت خلاف جریان اصلی منفی در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل مذکور، به دلیل تنگ‌شدگی ناشی از احداث آبشکن‌ها، سرعت جریان در جلوی آبشکن‌ها در تمام ترازهای عمقی نسبت به نواحی دیگر بیشتر است. بیشترین مقدار مؤلفه‌ی طولی سرعت در یک ناحیه‌ی تقریباً بیضی شکل در جلوی بال آبشکن اول تا نزدیک لبه‌ی بال بالادست آبشکن دوم شکل گرفته است. میزان سرعت طولی جریان در جلوی بال آبشکن‌ها در تراز نزدیک بستر



شکل ۶. کانتورهای مؤلفه‌ی قائم سرعت w از بستر.

با آشفتگی را نشان می‌دهد (روابط ۱ الی ۴):

$$TKE = \rho/2 (\overline{u_i'^2} + \overline{v_i'^2} + \overline{w_i'^2}) \quad (۱)$$

$$u_i' = u_i - \bar{u} \quad (۲)$$

$$v_i' = v_i - \bar{v} \quad (۳)$$

$$w_i' = w_i - \bar{w} \quad (۴)$$

که در آن ها، u_i ، v_i و w_i سرعت لحظه‌یی برداشت شده در ۳ راستای طول، عرض و ارتفاع کانال و \bar{u} ، \bar{v} و \bar{w} سرعت‌های متوسط زمانی در ۳ راستای طول، عرض و ارتفاع کانال هستند که از روابط ۵ الی ۷ قابل محاسبه هستند:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt \quad (۵)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v_i dt \quad (۶)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T w_i dt \quad (۷)$$

که در آن ها، T به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب می‌شود.

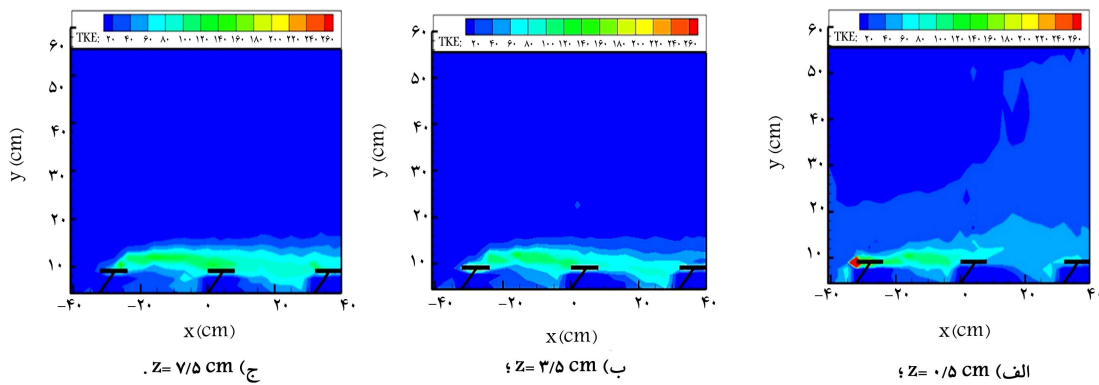
در شکل ۷، نمونه‌یی از کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در ترازهای عمقی مختلف ارائه شده است. انرژی جنبشی آشفتگی، نقش مهمی در انتقال رسوبات بستر به سمت پایین دست دارد، به طوری که انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تشکیل گردابه‌های آشفتگی است که در کل عمق جریان گسترش یافته‌اند. گردابه‌های مزبور به واسطه‌ی قدرت چرخشی بالای لحظه‌یی، تنش‌های شدیدی بر ذرات رسوب بستر وارد می‌کنند و باعث جابه‌جایی آن‌ها می‌شوند. مطابق شکل مذکور، انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایه‌ی برشی افزایش پیدا کرده است، به طوری که در لبه‌ی بال بالادست آب‌شکن اول در تراز نزدیک بستر (شکل ۷ الف)، بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفتگی مشاهده می‌شود. در ناحیه‌ی جدایی جریان و جلوی بال آب‌شکن‌ها، مقدار انرژی جنبشی آشفتگی بیشتر از دیگر نواحی است و با افزایش تراز جریان و کاهش فشار بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفتگی در لبه‌ی بال بالادست آب‌شکن اول و در ناحیه‌ی جلوی بال آب‌شکن‌ها کاهش پیدا کرده است. مقدار این پارامتر در ناحیه‌ی جلوی بال آب‌شکن‌ها تا حدودی به سمت ساحل مقابل بین آب‌شکن‌های اول و دوم بیشتر از ناحیه‌ی بین آب‌شکن‌های دوم و سوم بوده است. انتقال بیشتر رسوبات

مشاهده می‌شود، در لبه‌ی بال بالادست آب‌شکن اول در ناحیه‌ی جدایی جریان به علت انسداد شدید جریان طولی و فشار بیشتر نسبت به ترازهای بالاتر جریان، جریان عرضی مثبت شدیدی شروع و تقریباً تا وسط کانال گسترش پیدا کرده است که با افزایش تراز جریان و کاهش فشار از شدت آن کاسته شده است. در لبه‌ی بال پایین دست آب‌شکن اول، بین آب‌شکن‌ها و جلوی بال آب‌شکن دوم جریان عرضی منفی به دلیل گردان فشار عرضی و شکل‌گیری جریان بازگشتی مشاهده می‌شود که با افزایش تراز جریان از شدت این جریان کاسته می‌شود. در حالی که در جلوی بال آب‌شکن سوم جریان عرضی منفی مشاهده می‌شود، ولی با افزایش تراز جریان بر شدت آن افزوده شده است. در هر سه تراز جریان مشاهده می‌شود که جریان عرضی مثبت در ناحیه‌ی بین آب‌شکن اول و دوم بیشتر از ناحیه‌ی بین آب‌شکن دوم و سوم است. در شکل ۶، کانتورهای مؤلفه‌ی قائم سرعت w در ترازهای عمقی مختلف ارائه

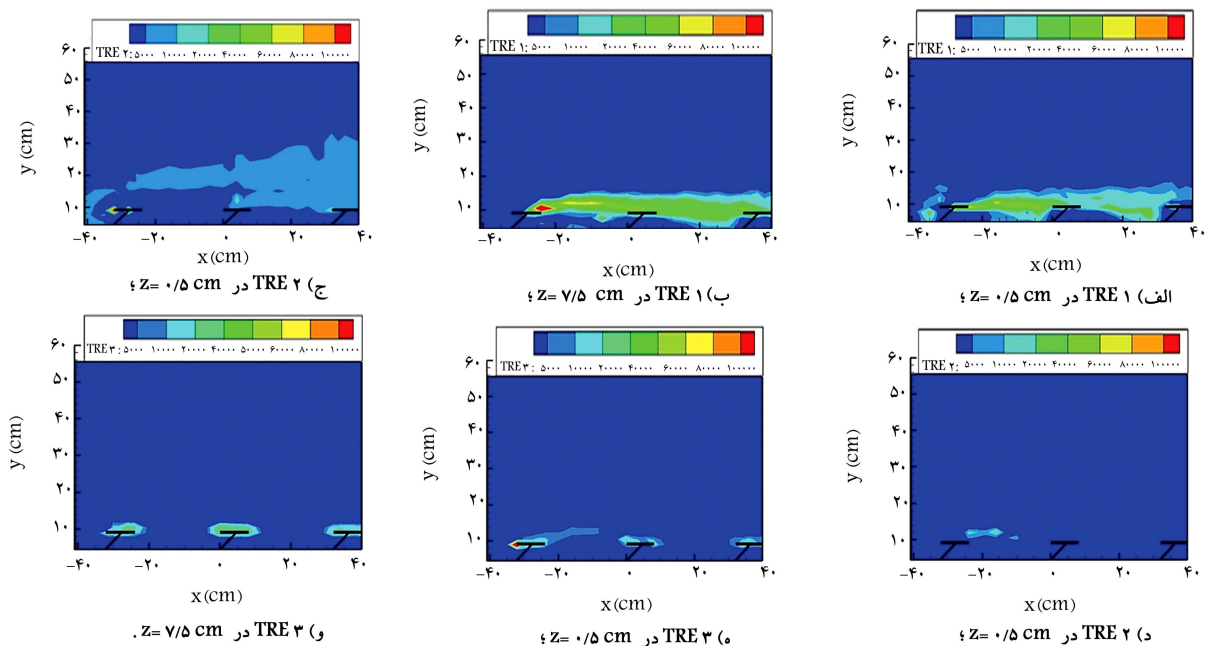
شده است. سرعت جریان عمقی به سمت پایین (جریان پایین‌رونده) منفی و به سمت بالا (جریان بالا‌رونده) مثبت در نظر گرفته شده است. در لبه‌ی بال بالادست آب‌شکن اول، سرعت‌های عمقی مثبت شدیدی وجود دارد، که با افزایش تراز جریان از شدت آن کاسته شده است. در ناحیه‌ی بالادست آب‌شکن اول، سرعت‌های عمقی منفی مشاهده می‌شود؛ که با افزایش تراز جریان میزان، این سرعت‌ها افزایش یافته است و جلوی بال آب‌شکن اول، سرعت‌های عمقی منفی مشاهده می‌شود که با افزایش تراز جریان از میزان آن‌ها کاسته شده است. وقوع جریان قائم مثبت و منفی در محدوده‌ی اطراف دماغه‌ی آب‌شکن اول، حاکی از وجود گردابه‌ی نعل اسبی است که در محل دماغه‌ی بالادست آب‌شکن بیشترین مقدار را دارد. مقایسه‌ی توزیع مؤلفه‌ی قائم سرعت در صفحه‌ی نزدیک بستر و صفحه‌ی نزدیک سطح آب نشان می‌دهد که در صفحات فوقانی و در محدوده‌ی دماغه‌ی آب‌شکن مؤلفه‌ی قائم سرعت رو به پایین بوده و جریان چرخشی خاصی مشاهده نشده است. لذا گردابه‌ی نعل اسبی محدود به نواحی نزدیک بستر است. جریان قائم مثبت و منفی در محدوده‌ی اطراف دماغه‌ی آب‌شکن دوم و سوم مشاهده نمی‌شود، بنابراین برای آب‌شکن دوم و سوم، گردابه‌ی نعل اسبی تشکیل نمی‌شود. با توجه به تغییرات مؤلفه‌ی عمقی سرعت که شرح داده شده است، پیش‌بینی می‌شود که دلیل بیشتر بودن سرعت جریان پایین‌رونده و وجود گردابه‌ی نعل اسبی در دماغه‌ی بالادست آب‌شکن اول، میزان آب‌شستگی در بالادست و جلوی بال آب‌شکن اول بیشتر از بالادست و جلوی بال آب‌شکن‌های دوم و سوم و همچنین بیشتر از ناحیه‌ی بین آب‌شکن‌ها باشد.

۳.۳. بررسی انرژی جنبشی آشفتگی

انرژی جنبشی آشفتگی TKE ، میزان انرژی جنبشی ناشی از نوسانات سرعت



شکل ۷. کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی از بستر.



شکل ۸. تنش‌های رینولدز از بستر.

مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' v_i'}$ ، بیشترین مقدار را نسبت به مؤلفه‌های دیگر تنش‌های رینولدز دارد. مقادیر مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' v_i'}$ تنش رینولدز در تراز نزدیک بستر، کمتر از تراز نزدیک سطح آب مشاهده می‌شود. مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' w_i'}$ نیز کمترین مقدار را نسبت به مؤلفه‌ی دیگر دارد. در سال ۲۰۱۰، در الگوی جریان اطراف پایه‌ی پل پیچیده در مسیر مستقیم، این نتیجه به دست آمده است که مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' w_i'}$ ، کمترین مقدار را نسبت به دیگر تنش‌های رینولدز داشته است.^[۲۳] مؤلفه‌ی $-\overline{\rho v_i' w_i'}$ در تراز نزدیک بستر (شکل ۸ه) و در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول بیشترین مقدار نسبت به دیگر مؤلفه‌های تنش رینولدز را دارد. همچنین این مؤلفه‌ی تنش رینولدز در هر دو تراز نزدیک بستر و سطح آب در جلوی بال آبشکن‌ها، بیشترین مقدار را نسبت به دیگر نواحی دارد.

۵.۳. بررسی تنش برشی بستر

در محاسبه‌ی تنش برشی بستر، سرعت‌های سه‌بعدی در ناحیه‌ی لایه‌ی مرزی آشفته (۰/۵ سانتی‌متری بستر) به این ترتیب که حس‌گر پایین‌نگر^۵ در هر نقطه در فاصله‌ی ۵/۵ سانتی‌متری بستر تنظیم شده است، به مدت ۳ و ۵ دقیقه (نقاط اطراف

به پایین‌دست در امتداد لایه‌ی برشی نسبت به سایر نواحی اطراف آبشکن‌ها که انرژی جنبشی آشفتگی افزایش پیدا کرده است قابل پیش بینی است.

۴.۳. بررسی تنش‌های رینولدز

با توجه به اینکه تنش‌های رینولدز^۴ به مفهوم تبادل مومنتوم جریان متوسط ناشی از نوسانات سرعت هستند، مؤلفه‌های $TRE 1 = -\overline{\rho u_i' v_i'}$ ، $TRE 2 = -\overline{\rho u_i' w_i'}$ و $TRE 3 = -\overline{\rho v_i' w_i'}$ از جنس تنش هستند. در شکل ۸، کانتورهای تنش‌های رینولدز در ۲ تراز نزدیک بستر و سطح آب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' v_i'}$ مقادیر بزرگ‌تری نسبت به دو مؤلفه‌ی دیگر دارد، به گونه‌ی که بیشینه‌ی مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' v_i'}$ به ترتیب حدوداً ۵ و ۶ برابر مؤلفه‌های $-\overline{\rho u_i' w_i'}$ و $-\overline{\rho v_i' w_i'}$ است و بیشینه‌ی مقادیر آن‌ها در پایین‌دست آبشکن‌ها و در جلوی بال رخ داده است. همچنین مؤلفه‌ی $-\overline{\rho u_i' v_i'}$ در ناحیه‌ی بین آبشکن اول و دوم نیز بیشتر از ناحیه‌ی بین آبشکن دوم و سوم است. به نظر می‌رسد تأثیر آبشکن‌ها در الگوی جریان و ایجاد جریان عرضی قوی دلیل این است که

برشی اطراف آبشکن‌های سری، این نتیجه به دست آمده است که محل بیشینه تنش برشی در دماغه دومین آبشکن اتفاق افتاده است در حالی که بیشینه آبشستگی در نوک اولین آبشکن رخ داده است.^[۳۰] با توجه به اینکه در شکل‌های ارائه شده، فقط به ارائه‌ی نمونه‌ی از مقاطع مختلف اشاره شده است، در جدول ۲ مقادیر بیشینه‌ی پارامترهای مختلف به صورت کمی مقایسه شده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن‌های سری سه تایی سرسپری جاذب در حالت غیرمستغرق در مسیر مستقیم پرداخته و این نتایج حاصل شده است:

۱. استقرار آبشکن‌ها باعث جدایی جریان و در نتیجه افزایش سرعت‌های عرضی و عمقی در بالادست آن‌ها شده و همچنین به دلیل تنگ‌شدگی ناشی از احداث آبشکن‌ها، سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن‌ها تا ساحل مقابل افزایش یافته است.

۲. سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن اول بیشتر از جلوی بال آبشکن‌های دوم و سوم و در جلوی بال آبشکن سوم بیشتر از جلوی بال آبشکن دوم بوده است. بیشینه‌ی سرعت‌های طولی در جلوی بال آبشکن اول حدوداً ۲ و ۱/۶ برابر جلوی بال آبشکن‌های دوم و سوم بوده است.

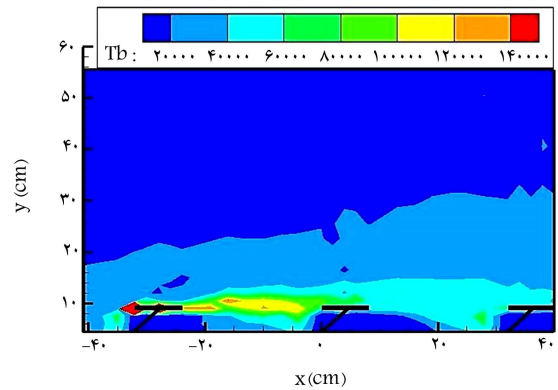
۳. سرعت‌های مثبت عرضی در ناحیه‌ی جدایی جریان و در تراز نزدیک بستر بیشترین مقدار را داشته‌اند و همچنین سرعت‌های عرضی منفی جریان بازگشتی در ناحیه‌ی بین آبشکن‌ها و جلوی بال آبشکن‌های دوم و سوم بیشترین مقدار را در تراز نزدیک سطح آب داشته‌اند.

۴. سرعت‌های مثبت عمقی در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول و بین آبشکن‌ها وجود داشته‌اند.

۵. بررسی پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی در الگوی جریان نشان می‌دهد که پارامتر مذکور در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول بیشترین مقدار را داشته و در لایه‌ی برشی جلو بال آبشکن‌ها افزایش یافته است.

۶. بررسی تنش‌های رینولدز در الگوی جریان نشان می‌دهد که بیشینه‌ی مؤلفه‌ی $-\rho u'_i v'_i$ به ترتیب حدوداً ۵ و ۶ برابر مؤلفه‌های $-\rho u'_i w'_i$ و $-\rho v'_i w'_i$ بوده و بیشینه‌ی مقدار آن‌ها در پایین دست آبشکن‌ها و در جلوی بال رخ داده است. مؤلفه‌ی $-\rho u'_i w'_i$ کمترین مقدار را نسبت به دو مؤلفه‌ی دیگر داشته است و همچنین مؤلفه‌ی $-\rho v'_i w'_i$ در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول، بیشترین مقدار نسبت به دیگر مؤلفه‌های تنش رینولدز را داشته و کمترین مقدار آن در پایین دست آبشکن‌ها و بین آبشکن‌ها بوده است.

۷. بررسی تنش برشی نزدیک بستر نشان می‌دهد که مقدار تنش برشی بستر با ورود به ناحیه‌ی جدایی جریان افزایش یافته و بیشینه‌ی مقدار تنش برشی در لبه‌ی بال بالادست آبشکن اول رخ داده است.



شکل ۹. کانتورهای تنش برشی بستر T_b .

جدول ۲. مقادیر بیشینه‌ی پارامترهای سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش رینولدزی.

T_b	TKE	w (cm/s)	ν (m/s)	u (cm/s)
۱۴۰۰۰۰/۹	۲۵۸۷	۳/۶	۱۵/۸	۴۹/۸

آبشکن) برداشت شده و پس از فیلتراسیون داده‌های مذکور با استفاده از الگوریتم ویل^۶ (۲۰۰۳ و ۲۰۰۰) و با فرض هم‌بستگی^۷ بزرگ‌تر از 70° و SNR^8 بزرگ‌تر از ۱۵،^[۲۱، ۲۲] و در نظر گرفتن معیار نیکورا و گورینگ (۲۰۰۲)^۹ فیلتر شده‌اند.^[۲۶] با توجه به طبیعت سه‌بعدی جریان از روش تک‌نقطه‌ی تنش‌های رینولدز بارباویا و دی (۲۰۰۴)^{۱۰}، استفاده شده است (روابط ۸ الی ۱۰):^[۶]

$$\tau_b = (\tau_x^2 + \tau_y^2)^{0.5} \quad (8)$$

$$\tau_x = \rho(\overline{w'_i u'_i} + \overline{v'_i u'_i}) \quad (9)$$

$$\tau_y = \rho(\overline{v'_i u'_i} + \overline{w'_i u'_i}) \quad (10)$$

که در آن‌ها τ_x ، τ_y و τ_b به ترتیب مؤلفه‌ی تنش برشی در راستای طول کانال، عرض کانال و تنش برشی برآیند بستر هستند.

شکل ۹، کانتورهای تنش برشی بستر در اطراف آبشکن‌ها را نشان می‌دهد. در بالادست آبشکن اول، یک ناحیه‌ی با افزایش تنش برشی مشاهده می‌شود که شروع آن منطبق بر شروع ناحیه‌ی جدایی جریان است. با ورود جریان به ناحیه‌ی جدایی جریان و افزایش جریان عمقی و عرضی، آشفتگی و در نتیجه تنش برشی افزایش یافته است که این نتیجه منطبق بر بیشینه‌ی مقدار تنش‌های رینولدزی و انرژی جنبشی آشفتگی در این نقاط است. بیشینه‌ی تنش برشی در نوک بال بالادست آبشکن اول وجود دارد. این نتیجه با نتایج برخی پژوهشگران،^[۲۹-۲۷، ۱۰، ۹، ۲] هم‌خوانی خوبی دارد. پژوهشگران مذکور به این نتیجه رسیده‌اند که بیشینه‌ی تنش برشی در دماغه‌ی بالادست آبشکن اتفاق افتاده است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، در بررسی تنش

پانویس‌ها

1. spur dike
2. scour

3. turbulent kinetic energy
4. reynolds stress
5. down looking
6. Whal

7. Correlatinon
8. signal noise ratio
9. Nikora & Goring
10. Barbahuiya and Dey

(References) منابع

1. Copeland, R.R. "Bank protection techniques using spur dikes", *Hydraulic Laboratory*, U.S. Army Engineer Waterways Experiments Station Vicksburg Mississippi, **32**, pp. 1-83 (1983).
2. Rajaratnam, N. and Nwachukwu, B.A. "Flow near groin-like structures", *J. Hydraul. Eng.*, **109**(3), pp. 463-480 (1983).
3. Soliman, M.M., Attia, K.M., Kotb Talaat, A.M. and Ahmed, A.F. "Spur dike effects on the river Nile morphology after high aswan dam", *Congress of the International Association of Hydraulic Research, LAHR*, **120**(9), pp. 125-146 (1997).
4. Elawady, E. and Mansanori, M. "Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed", *Annual J. Hydraul. Eng.*, **44**, pp. 539-544 (2000).
5. Elawady, E. and Mansanori, M. "Movable bed scour around submerged spur-dikes", *Annual J. Hydraul. Eng.*, **45**, pp. 373-378 (2001).
6. Barbahuiya, A.K. and Dey, S. "Local scour at abutment: A review", *Sadhana*, **29**(5), pp. 449-476 (2004).
7. Nagy, H.M. "Hydraulic evaluation of emerged and submerged spur-dikes: Temporal bed evolution and equilibrium state characteristics", *Alexandria Eng. J.*, **44**(2), pp. 279-290 (2005).
8. Kuhnle, R.A., Alonso, C.V. and Jia, Y.J. "Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case", *J. Hydraul. Eng.*, **128**(12), pp. 1087-1093 (2008).
9. Ghodsian, M. and Vaghefi, M. "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dikes in a 90° bend", *Int. J. of Sediment Res.*, **24**(2), pp. 145-158 (2009).
10. Duan, J.G., He, L., Fu, X. and Wang, Q. "Mean flow and turbulence around experimental spur dike", *Adv. Water Resour.*, **32**(12), pp. 1717-1725 (2009).
11. Yaeger, M. and Duan, J.G. "Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes", *World Environmental and Water Resources Congress* (2010).
12. Masjedi, A., Akbari, I. and Abyar, H. "Evaluating scour at L-shape spur dike in a 180 degree bend", *World Applied Sciences Journal*, **15**(12), pp. 1740-1745 (2011).
13. Xiufang, Z., Pingyi, W. and Chengyu, Y. "Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure", *Procedia Eng.*, **28**, pp. 772-775 (2012).
14. Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salehi, S.A.A. "Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend", *J. Hydraul. Eng.*, **138**(5), pp. 471-474 (2012).
15. Dehghani, A.A., Azamathulla, H., Hashemi Najafi, S.F. and Ayyoubzadeh, S.A. "Local scouring around L-head groynes", *J. Hydrol.*, **500**(7), pp. 299-309 (2013).
16. Vaghefi, M., Akbari, M. and Fiouz, A.R. "Experimental investigation on bed shear stress distribution in a 180 degree sharp bend by using depth-averaged method", *Int. J. of Sci. Eng. and Tech.*, **3**(5), pp. 675-679 (2014).
17. Vaghefi, M., Akbari, M. and Fiouz, A.R. "Experimental investigation of the Three-dimensional flow velocity components in a 180 degree sharp bend", *World App. Pro.*, **5**(9) pp. 125-131 (2015).
18. Vaghefi, M., Akbari, M. and Fiouz, A.R. "An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress", *KSCE J. Civil Eng.*, **20**(4), pp. 1-12 (2015).
19. Mousavi Naeni, S.A. "Experimental investigation of flow pattern around a T shape spur dike in 90 degree bend", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Iran (2009).
20. Safarzadeh Gandeshmin, A. "Experimental study of turbulent flow pattern around a groyne with various head shapes", Ph.D Thesis, Tarbiat Modarres University, Iran (2011).
21. Khosravi Mashizi, M. "Experimental study on flow pattern and scour around a T-shaped submerged spur dike in a 90 degree bend", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Iran (2011).
22. Alizadeh Armaki, H. "Investigation on flow pattern and scour around a repelling and attracting T head spur dike", M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Iran (2012).
23. Beheshti, A.A. "Experimental and numerical study of flow pattern around bridge piers with complex geometry, with and without scour hole", Ph.D. Thesis, Sharif University of Technology, Iran (2010).
24. Wahl, T. "Analyzing ADV data using Win ADV", Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, **300**, pp. 1-10 (2000).
25. Wahl, T. "Discussion of despiking acoustic doppler velocimeter data", *J. Hydraul. Eng.*, **129**(6), pp. 484-487 (2003).
26. Nikora, V.I. and Goring, D.G. "Despiking acoustic doppler velocimeter data", *J. Hydraul. Eng.*, **124**(6), pp. 630-634 (2002).
27. Molinas, A., Kheireldin, K. and Baosheng, W. "Shear stress around vertical wall abutments", *J. Hydraul. Eng.*, **124**(8), pp. 822-830 (1998).
28. Ahmed, F. and Rajaratnam, N. "Observations on flow around bridge abutments", *J. Eng. Mech.*, **126**(1), pp. 51-59 (2000).
29. Koken, M. and Constantinescu, G. "An investigation of flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process", *Water Resour. Res.*, **44**(8), pp. 1-19 (2008).
30. Acharya, A. "Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes", Ph.D. Thesis, University of Arizona, USA (2011).