

بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن با دیواره‌ی شیب‌دار

فرزین اسدزاده^۱، اکبر صفرزاده^۲، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استاد سازه‌های هیدرولیکی پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۳۰]

چکیده- در این مقاله به مطالعه‌ی آزمایشگاهی ساختار جریان پیرامون آبشکن با دیواره‌ی شیب‌دار پرداخته شده است. بدین منظور، هیدرودینامیک سه بعدی اطراف تک آبشکن مستقیم با دیواره‌ی شیب‌دار ۷۵ درجه، به صورت آزمایشگاهی و در یک کانال مستقیم با بستر صلب مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات جریان با برداشت پارامترهای آشفتگی اطراف آبشکن به وسیله سرعت‌سنج نقطه‌ای سه بعدی ADV، بررسی شد. در پشت آبشکن با کاهش سرعت جریان که منجر به تشکیل ناحیه‌ی سکون می‌شود، سرعت جریان در نواحی میانی افزایش می‌یابد. به همین علت جریان به دو قسمت تقسیم شده و قسمتی از جریان به سمت بالا و قسمتی از جریان به سمت پایین که فشار کمتر است، حرکت می‌کند. جریان پایین رونده عامل تشکیل گردابه‌ی نعل اسبی است. دو ناحیه‌ی تشدید سرعت، که اولی مربوط به تشدید سرعت در هسته‌ی اصلی جریان ناشی از کاهش عرض عبوری جریان بوده و ناحیه‌ی پرسرعت دیگر که مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین دست آبشکن در ناحیه-ی بیرونی لایه‌ی برشی است، تشکیل شد. بیشینه مقدار مؤلفه‌ی تنش $-\rho\overline{u'v'}$ در امتداد لایه‌ی برشی رخ می‌دهد. با توجه به مقادیر منفی تنش-های رینولدز $(-\rho\overline{v'w'})$ و $(-\rho\overline{u'w'})$ ، تجمع رسوبات در ناحیه‌ی چرخشی پشت آبشکن اتفاق می‌افتد.

واژگان کلیدی: آبشکن مستقیم، دیواره‌ی شیب‌دار، میدان جریان، پارامترهای آشفتگی، تنش‌های رینولدز.

۱- مقدمه

احداث سازه‌هایی مانند آبشکن، با وجود کنترل فرسایش به وسیله‌ی شکل‌گیری ساختارهای موضعی جریان مانند تنگ-شدگی مقطع عبور جریان، شکل‌گیری جریان رو به پایین و برخورد آن به بستر کانال در بالادست آبشکن، شکل‌گیری لایه برشی و آشفتگی‌های ناشی از آن و بالاخره شکل‌گیری گردابه نعل‌اسبی می‌تواند باعث ایجاد فرسایش موضعی حول سازه و تهدید ایمنی خود سازه شود.

قدیمی‌ترین پژوهش آزمایشگاهی در مورد آبشکن به وسیله‌ی Ahmed انجام شده است. وی با اندازه‌گیری تغییرات سطح آب حول تک آبشکن واقع در یک کانال مستقیم به غیر یکنواختی جریان در چنین میدانی اشاره کرده است [۱]. Chen

& Ikeda پژوهش‌های جامعی را در رابطه با الگوی جریان

حول تک آبشکن در مسیر مستقیم انجام دادند و دریافتند که چرخابه‌های گذرای از نوک آبشکن جدا شده و به صورت متناوب به سمت پایین دست منتقل می‌شوند. آن‌ها با آنالیز نتایج به دست آمده متوجه شدند که سرعت متوسط مهاجرت چرخابه‌ها تقریباً ثابت بوده و مقدار آن‌ها کمی بیشتر از ۱/۵ درصد سرعت متوسط است [۲]. Ahmad & Rajaratnam به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و توزیع تنش برشی بستر حول کوله پل با مقطع ذوزنقه‌ای شکل پرداختند. در مورد میدان سرعت، این پژوهشگران به نتیجه رسیدند که در لایه‌های میانی، تشدید سرعت دارای کمینه مقدار بوده و در لایه‌های بالایی تشدید سرعت افزایش می‌یابد. [۳]. Uijtewaal به بررسی

یافته انجام دادند. پژوهشگران یاد شده به وقوع دو جریان گردابه نعل اسبی اشاره کردند که نوع اول آن بواسطه جریان رو به پایین در وجه بالادست آبشکن و ترکیب آن با لایه مرزی جریان نزدیک شونده تشکیل می‌شود، ولی دلیل خاصی برای وقوع چرخابه دوم که بسیار ضعیف‌تر از گردابه اصلی است، عنوان نکردند. [7]. Koken & Constantinescu در ادامه مطالعه خود روی ساختار جریان حول تک آبشکن، به بررسی تأثیر بستر توسعه یافته بر روند شکل‌گیری جریان‌های گردابه‌ای و نیز توزیع تنش برشی بستر پرداختند. پژوهشگران مزبور به این نتیجه رسیدند که ساختار گردابه نعل اسبی در حالت بستر تخت، پایدارتر از حالت بستر توسعه یافته بوده و علاوه بر آن ساختار لحظه‌ای آن در حالت دوم، بسیار پیچیده‌تر از بستر تخت است. در بستر توسعه یافته گردابه نعل اسبی نوع دوم تشکیل نمی‌شود [8]. Kuhnle و همکاران. به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی (با استفاده از CCHE3D) الگوی جریان اطراف آبشکن دوزنقه‌ای مستغرق در مسیر مستقیم در دو حالت بستر تخت و تعادل یافته پرداختند، ایشان به طور خلاصه به نتایج زیر اشاره نموده‌اند [9، 10، 11]:

۱- طول ناحیه گردابی از قسمت جدایی جریان تا جایی که مجدداً متصل می‌شود برابر $L/6$ است.

۲- شبیه‌سازی عددی انجام شده به جز در ناحیه بازگشتی جریان در پایین‌دست آبشکن، نتایج قابل قبولی داشته است.
۳- بیشینه تنش برشی به دست آمده در پایین‌دست آبشکن و در نقطه با $X/L=5.85$ رخ داده است و $2/7$ برابر تنش برشی در بالادست آبشکن است.

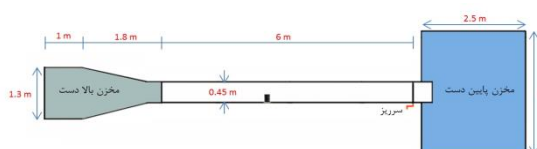
۴- پس از ۵۳ دقیقه از شروع آزمایش، آبشستگی رخ داده است که ناحیه پایین‌دست در محل حداکثر تنش برشی اتفاق افتاده است، اما آبشستگی در نوک بالادست با تنش برشی محاسبه شده قابل پیش بینی نبوده است. این تناقض یک چالش در پیش‌بینی آبشستگی به وسیله تنش برشی محاسبه شده از الگوی جریان را نشان می‌دهد.

Duan به مطالعه ساختار جریان‌های متوسط و آشفته حول آبشکن مستقیم واقع در یک کانال آزمایشگاهی با بستر صلب و تخت پرداخت. وی برای اندازه‌گیری میدان جریان از دستگاه

آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آبشکن دوزنقه‌ای مستغرق با چهار شیب کناره در مسیر مستقیم و تأثیر طرح‌بندی آبشکن‌ها بر الگوی گردابه‌ها و جریان آشفته به دست آمده پرداخت. اندازه‌گیری میدان جریان با استفاده از روش PTV انجام شد و به این نتیجه رسید که در آبشکن‌های نفوذپذیر، برخلاف آبشکن‌های نفوذناپذیر، مومنتوم جریان عبوری از بدنه آبشکن، ساختار جریان چرخشی پشت آبشکن را به هم زده و در واقع مانع شکل‌گیری الگوی چرخشی می‌شود. همچنین ایشان با بررسی پروفیل‌های عمودی و پارامترهای آشفستگی به این نتیجه رسید که الگوی جریان اطراف آبشکن مستغرق کاملاً پیچیده است، به گونه‌ای که مدل‌سازی عددی آن نیز مشکل است [4]. Nagata و همکاران. به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سه بعدی حول تک آبشکن با بستر متحرک پرداخت [5]. بر اساس نتایج پژوهشگران یاد شده، در لحظه شروع محاسبات، خطوط جریان در محل دماغه متمرکز شده، ولی در حالت بستر متعادل، بواسطه تشکیل حفره آبشستگی، ابعاد ناحیه چرخشی گسترش یافته و خطوط جریان به سمت مرکز کانال منتقل می‌شوند. در حالت بستر تخت، جریان‌های چرخشی به اندازه کافی توسعه نیافته ولی با وقوع حفره آبشستگی، جریان‌های چرخشی تشدید شده و ضمن افزایش شدت جریان رو به پایین در وجه بالادست آبشکن، جریان برگشتی نزدیک کف نیز تشدید می‌شود [5]. Kadota و همکاران. به بررسی ساختار جریان حول تک آبشکن در دو حالت مستغرق و نیمه مستغرق در جریان کم عمق پرداختند. کادوتا و همکاران برای اندازه‌گیری میدان از تکنیک ردیابی ذرات سطحی (PTV) استفاده کردند. بر اساس نتایج ارائه شده به وسیله پژوهشگران مزبور برای آبشکن غیرمستغرق، گردابه‌های پر انرژی در امتداد لایه برشی شکل گرفته و به سمت پایین‌دست توسعه پیدا می‌کند. در آبشکن غیر مستغرق، مسیر گردابه‌های پر انرژی به سمت دیواره جانبی کانال متمایل شده و برخلاف آبشکن مستغرق در فاصله نسبتاً زیادی از بدنه آبشکن شکل می‌گیرند [6]. Koken & Constantinescu مطالعات جامعی در مورد ساختار جریان‌های سه بعدی (متوسط و لحظه‌ای) حول تک آبشکن واقع در کانال مستقیم در دو حالت بستر صلب تخت و بستر توسعه

۲- روش انجام آزمایش‌ها

کانال آزمایشگاهی مورد نظر که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس قرار داشت، به طول ۶ متر، عرض ۰/۴۵ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر است. جدارها و کف کانال از جنس شیشه شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. در شکل (۱) مشخصات کانال مورد استفاده نشان داده شده است.



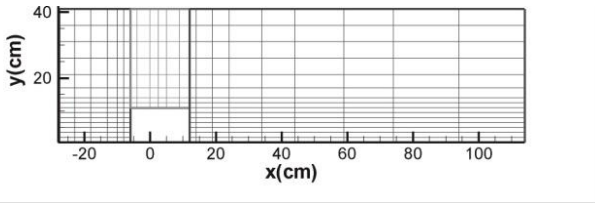
شکل (۱) شماتیکی از کانال مورد آزمایش

قطر متوسط مصالح مورد استفاده ۱/۴۸ میلی‌متر است و $\sigma_g = 1.19$ که نشان دهنده یکنواخت بودن مصالح مورد آزمایش است. آزمایش‌ها در حالت بستر تخت انجام شد. برای این منظور سطح بستر با یک لایه‌ی نازک از دوغاب سیمان تثبیت شده به گونه‌ای که در تمام طول آزمایش آبستنگی مشاهده نمی‌شود. آزمایش تحت دبی ۱۵ لیتر در ثانیه و ارتفاع آب ۱۱ سانتی‌متر انجام شد. در این آزمایش برای تنظیم دبی از دبی سنج مغناطیسی استفاده شد و برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب، از عمق سنج نقطه‌ای استفاده شد. تنظیم ارتفاع آب به وسیله‌ی دریچه‌ی پروانه‌ای که در انتهای کانال قرار داشت، انجام می‌شد.

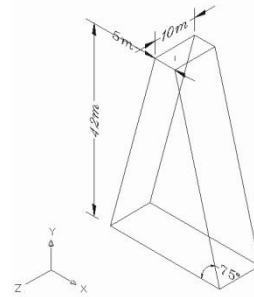
آبشکن مورد استفاده در این پژوهش، نفوذناپذیر و از جنس پلکسی گلاس بود. آبشکن با دیواره‌های کناره‌ی شیب‌دار با عرض تاج ۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۴۲ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر و شیب کناره ۷۵ درجه مورد استفاده قرار گرفت. آبشکن ۲۵ سانتی‌متر درون رسوبات قرار گرفت که در فاصله ۲/۵ متری از بالادست کانال قرار گرفت. در شکل (۲) نمایی از آبشکن مورد استفاده آورده شده است. به منظور بررسی دقیق ساختار هیدرودینامیک اطراف آبشکن با استفاده از سرعت‌سنج سه بعدی ADV مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت در محدوده‌ی وسیعی حول آبشکن اندازه‌گیری شد.

سرعت سنج ADV استفاده نمود. بر اساس یافته‌های Duan، جریان متوسط در هر دو جهت جانبی و قائم جدا شده و در داخل ناحیه چرخشی پشت آبشکن، ترکیبی از گردابه‌های افقی و قائم مشاهده می‌شود. هر سه مؤلفه تنش‌های قائم رینولدز با عبور از مقطع آبشکن تشدید شده و بیشینه تنش در عمق میانی کانال و در امتداد لایه تنش برشی اتفاق می‌افتد. بیشینه مقدار تنش‌های قائم مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت نزدیک به هم بوده، ولی بیشینه تنش قائم مؤلفه قائم سرعت در محدوده ۱۵-۱۰ درصد کمتر از دو مؤلفه دیگر است. تنش برشی حداکثر به اندازه ۳ برابر تنش برشی بالادست تشدید شده، ولی این ناحیه بسیار محدود بوده و در نزدیکی دماغه بالادست سازه آبشکن اتفاق می‌افتد [۱۲ و ۱۳]. صفرزاده به بررسی هیدرودینامیک سه بعدی حول تک آبشکن با شکل‌های مختلف دماغه، به صورت آزمایشگاهی و در یک کانال با بستر صلب و تخت پرداخت. آزمایش‌ها در دو بخش شامل، استفاده از سرعت‌سنج نقطه‌ای سه بعدی ADV برای برداشت میدان جریان و ترکیب ابزارهای دو لوله‌ای و سه لوله‌ای برای برداشت تنش برشی بستر حول آبشکن‌های مستقیم، T شکل و L شکل انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار جریان متوسط و آشفتگی حول آبشکن‌های مستقیم و غیر مستقیم کاملاً متفاوت است. در ناحیه بالادست آبشکن مستقیم، شکل‌گیری و توسعه گردابه‌های نعل اسبی به سمت دماغه و پایین‌دست آبشکن، جریان حول سازه و همچنین توزیع تنش برشی بستر را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. توزیع تنش برشی بستر حول آبشکن مستقیم، نشانگر تشدید تنش حول دماغه آبشکن و توسعه ناحیه پر تنش به سمت پایین‌دست، منطبق بر مسیر گردابه وقوع گردابه نعل اسبی و مماس بر بخش بیرونی لایه برشی است [۱۴].

یکی از روش‌های عملی و اقتصادی، ساختن آبشکن با استفاده از سنگ‌چین است و به این دلیل آبشکن‌ها اغلب دوزنقه‌ای شکل ساخته می‌شوند. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن با دیواره‌ی شیب‌دار پرداخته شد.



شکل (۳) پلان شبکه بندی مقاطع ارتفاعی



شکل (۲) مشخصات آبشکن مورد استفاده

۴-۱- الگوی جریان متوسط

با استفاده از مقادیر متوسط سری‌های زمانی سرعت اندازه‌گیری شده در هر نقطه، خطوط جریان صفحات مختلف افقی، حاصل از دو مؤلفه‌ی طولی و عرضی سرعت در کل محدوده میدان جریان اندازه‌گیری شده و در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل، در بالادست میدان و دور از سازه آبشکن، خطوط جریان نسبتاً موازی بوده و در امتداد دیواره‌های کانال است. با حرکت به سمت آبشکن، جریان تحت تأثیر آبشکن قرار گرفته و خطوط جریان به شکل تدریجی از دیواره‌ی سمت آبشکن به سمت مرکزی کانال منحرف می‌شوند. در لایه‌های نزدیک بستر، جدایی جریان از دیواره‌ی سمت آبشکن، سریع‌تر از لایه‌های بالایی است، که علت این امر تشکیل جریان برگشتی در ناحیه نزدیک بستر و اندرکنش آن با جریان نزدیک شونده است.

خطوط جریان نزدیک بستر، نشان دهنده‌ی وقوع یک جریان برگشتی به سمت بالادست، در محل تقاطع آبشکن و دیواره‌ی سمت آبشکن است. همچنین در لایه‌های نزدیک کف، جریان عرضی قوی در نزدیکی دماغه به سمت قسمت میانی کانال ایجاد می‌شود. در لایه‌های نزدیک به سطح آب تأثیر آبشکن بر جریان‌های عبوری از جلوی آبشکن کمتر بوده و از میزان انحراف جریان به سمت دیواره‌ی مقابل کاسته می‌شود.

در پایین‌دست آبشکن و نزدیک دیواره‌ی سمت آبشکن یک ناحیه‌ی چرخشی شکل گرفته است. طول و عرض ناحیه‌ی چرخشی در لایه‌ی نزدیک سطح بستر بیشتر از لایه‌های فوقانی است. مرکز ناحیه چرخشی با عمق تغییر می‌کند. در نواحی نزدیک بستر، مرکز ناحیه چرخشی نزدیک بدنه‌ی آبشکن، و با حرکت به سمت سطح آب، مرکز ناحیه‌ی چرخشی به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. همچنین با نزدیک شدن به سطح

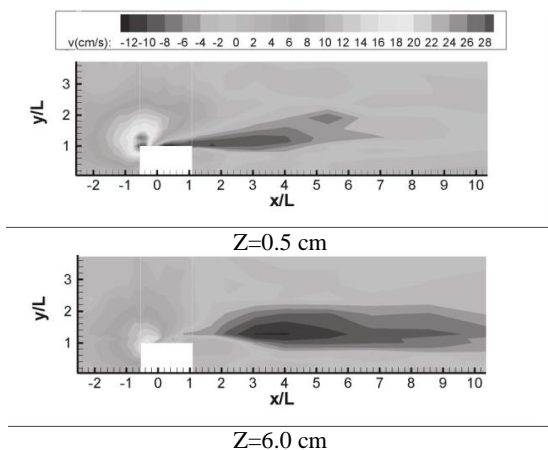
۳- مشاهدات کیفی ساختار جریان حول تک آبشکن

برای مشاهده‌ی کیفی ساختار جریان و شناخت اولیه‌ی آن از طریق تزریق ماده رنگی و استفاده از نوارهای روبان رنگی در نواحی بالادست و نیز نواحی چرخشی میدان، جریان استفاده شد. مشاهده شد که در پشت آبشکن با کاهش سرعت جریان و تشکیل ناحیه‌ی سکون، سرعت جریان در نواحی میانی افزایش می‌یابد که باعث ایجاد یک صفحه‌ی جدایی می‌شود. به همین علت قسمتی از جریان به سمت بالا و قسمتی از جریان به سمت پایین، حرکت می‌کنند. جریان‌های پایین‌رونده و بالارونده تبدیل به دو گردابه‌ی پادساعتگرد با جهتی عمود بر جهت جریان اصلی می‌شوند و همزمان با این گردابه‌های عمودی، گردابه‌های افقی ناشی از برخورد جریان بازگشتی از پشت آبشکن با ناحیه جدایی جریان در لبه‌ی آبشکن ایجاد می‌شود.

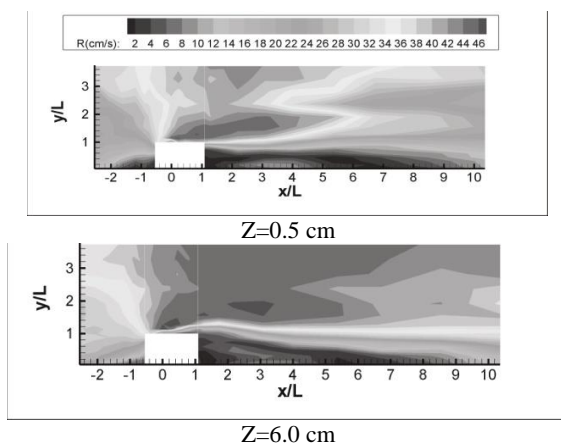
۴- الگوی جریان حول آبشکن با دیواره شیبدار

ابعاد طولی و عرضی میدان جریان نسبت به طول آبشکن و بعد قائم نیز نسبت به ارتفاع جریان بی‌بعد شده است. مش بندی انجام شده برای برداشت داده‌ها، بدین صورت بود که در جهت طولی کانال نقطه $x/l=0$ تاج بالا دست آبشکن و $x/l=+0.5$ تاج پایین دست آبشکن است. (x: مختصات طولی کانال، L: طول آبشکن). در شکل (۳) شبکه‌بندی دو بعدی مورد استفاده در این پژوهش برای اندازه‌گیری میدان جریان در لایه‌های مختلف جریان در مقاطع ارتفاع مشاهده می‌شود.

دور شده و به سمت پایین دست منتقل می‌شود. توزیع برآیند سرعت حاصل از سه مؤلفه‌ی متوسط سرعت در صفحات مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به شکل در تمامی لایه‌ها در ارتفاع، دو ناحیه‌ی تشدید سرعت مشاهده می‌شود. یک ناحیه مربوط به تشدید سرعت در هسته-ی اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان و در نتیجه افزایش عمومی سرعت است. ناحیه‌ی پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین دست آبشکن و در ناحیه‌ی بیرونی لایه‌ی برشی می‌باشد که میزان تشدید سرعت در این ناحیه از تشدید سرعت عمومی بیشتر است. تشدید برآیند سرعت در صفحات فوقانی بیشتر از صفحات تحتانی میدان بوده و همچنین، گستردگی ناحیه‌ی پرسرعت نیز در لایه‌های فوقانی بیشتر از نواحی نزدیک بستر است. بیشینه سرعت متوسط جریان در پایین دست آبشکن $1/55$ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده است.

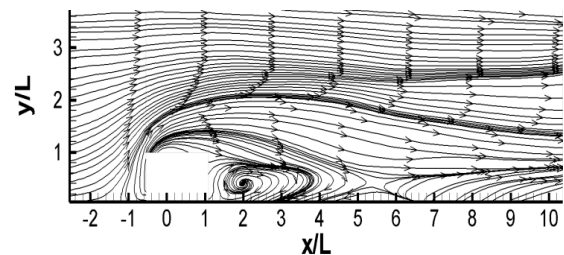


شکل (۵) توزیع مؤلفه عرضی سرعت در ترازهای مختلف قائم

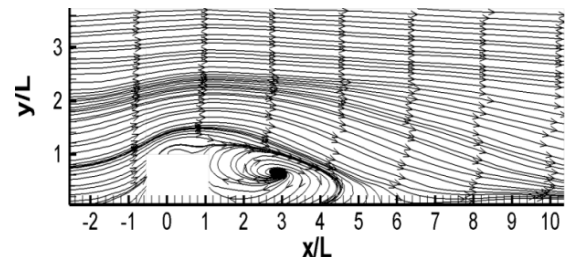


شکل (۶) توزیع برآیند سرعت در ترازهای مختلف قائم جریان

آب، فاصله مرکز ناحیه چرخشی از دیواره‌ی سمت آبشکن بیشتر شده و به وسط کانال منتقل می‌شود. در صفحات نزدیک به بستر، خطوط جریان مورب در انتهای ناحیه‌ی چرخشی و در کنار دیواره‌ی سمت آبشکن کانال تشکیل شده که در لایه‌های نزدیک سطح آب دیده نمی‌شود. این خطوط جریان ناشی از شکل‌گیری یک جریان چرخشی با محور چرخشی در امتداد محور طولی کانال است. (Z ارتفاع از سطح بستر بر حسب سانتی‌متر).



الف) Z=0.5

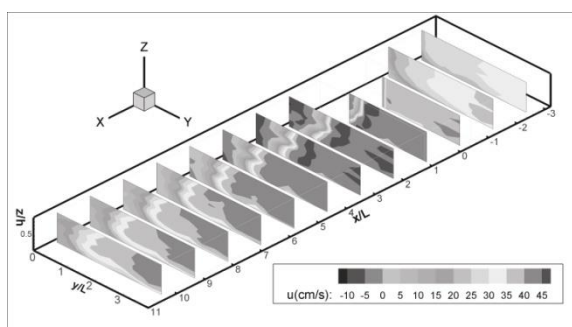


ب) Z=4.0

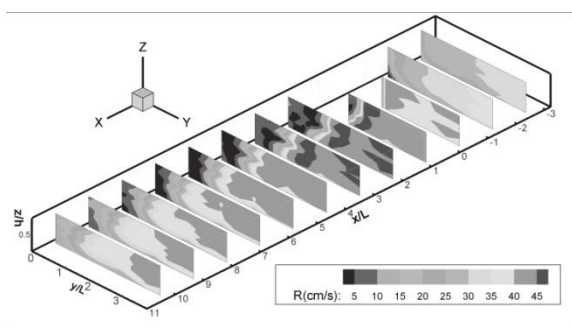
شکل (۷) خطوط جریان حول آبشکن با شیب دیواره‌ی ۷۵ درجه در ترازهای مختلف.

شکل (۵) توزیع مؤلفه‌ی عرضی سرعت را در صفحات مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل حداکثر مقدار مؤلفه‌ی عرضی سرعت در محل دماغه‌ی آبشکن رخ داده و شدت آن در لایه‌های نزدیک به بستر بیشتر از نواحی سطح آب است. حداکثر مقدار مؤلفه‌ی عرضی سرعت در نزدیکی بستر $1/5$ برابر مقدار سرعت در لایه‌ی نزدیک سطح آب است. در نزدیکی بستر، انحراف عرضی جریان در مقطع آبشکن تا دیواره‌ی مقابل کانال ادامه داشته و با حرکت به سمت پایین دست، از میزان انحراف عرضی کاسته می‌شود. نقطه شروع توزیع میزان انحراف جانبی سرعت متوسط به طرف دیواره‌ی سمت آبشکن (مقدار منفی مؤلفه‌ی عرضی سرعت)، هر چه از لایه‌ی نزدیک بستر به سمت لایه‌های فوقانی پیشروی شود، از جلوی دماغه‌ی آبشکن

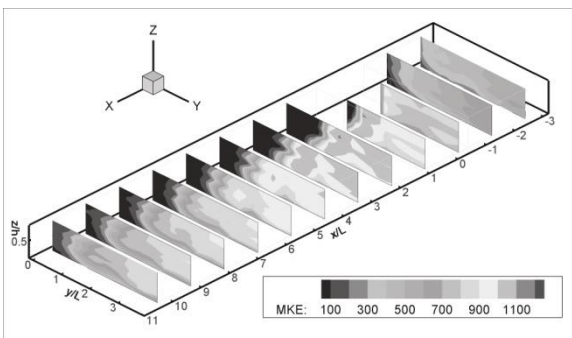
مشاهده است که این موضوع در توزیع پارامترهای دیگر مشهود نبود. بیشینه مقدار انرژی جنبشی جریان متوسط به اندازه ۲/۵ برابر انرژی جنبشی جریان نزدیک شونده تشدید می‌شود. کمترین انرژی جنبشی جریان متوسط در ناحیه چرخشی رخ داده و ناحیه مزبور تا انتهای میدان جریان ادامه دارد. پارامتر انرژی جنبشی جریان متوسط، شاخص بهتری نسبت به مؤلفه‌های سرعت و همچنین برآیند سرعت در نشان دادن آثار آبشکن بر محدوده بالادست خود، به ویژه نواحی نزدیک بستر و وقوع جریان برگشتی در این ناحیه است (واحد توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط (cm/s) ۲ است).



شکل (۷) توزیع مؤلفه طولی سرعت در مقاطع عرضی



شکل (۸) توزیع برآیند سرعت در مقاطع عرضی



شکل (۹) توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط

به منظور بررسی دقیق تغییرات متوسط جریان اطراف آبشکن، توزیع منحنی‌های هم تراز مؤلفه‌ی طولی سرعت، در شکل (۷) در مقاطع مختلف عرضی در طول کانال آورده شده است. با توجه به شکل در مقطع بالادست آبشکن، به واسطه‌ی تأثیر آبشکن بر ناحیه‌ی بالادست و کاهش سرعت جریان نزدیک شونده در امتداد دیواره‌ی سمت آبشکن و نیز انحراف جریان به سمت دیواره‌ی مقابل، سرعت در امتداد مجرای اصلی کانال (به سمت دیواره‌ی مقابل) افزایش یافته و سرعت در لایه‌های نزدیک به سطح آب بیشترین مقدار خود را دارد و با نزدیک شدن به آبشکن، سرعت افزایش می‌یابد. با گذر از آبشکن، وقوع ناحیه‌ی چرخشی در پشت آبشکن و در امتداد دیواره‌ی سمت آبشکن به صورت جریان برگشتی (مقدار منفی مؤلفه‌ی طولی سرعت) مشخص شده، گسترش عرضی ناحیه‌ی چرخشی در لایه‌های فوقانی بیشتر از لایه‌های تحتانی بود. وجود ناحیه‌ی کم سرعت در نزدیکی بستر و در امتداد دیواره‌ی سمت کانال ناشی از تشکیل جریان چرخشی ذکر شده است. با گذر طولی از آبشکن به سمت پایین‌دست، ناحیه پر سرعت از جلوی آبشکن دور شده و به سمت وسط کانال متمایل می‌شود. همچنین وسعت این ناحیه در مقاطع طولی با حرکت به سمت پایین‌دست بزرگ‌تر می‌شود و این ناحیه تا $x/L=+3.6$ ادامه دارد.

با مقایسه توزیع برآیند سرعت (شکل ۸) و مؤلفه‌ی طولی سرعت مشاهده می‌شود که تفاوت چندانی در الگوی توزیع سرعت و بیشینه سرعت مشاهده نمی‌شود. تنها در مقطع قرارگیری آبشکن و در جلوی آبشکن، بخاطر آثار مؤلفه‌های جانبی و قائم سرعت بر روند توزیع، برآیند سرعت با توزیع طولی سرعت تفاوت دارد، که توزیع طولی سرعت در جلوی آبشکن یکنواخت بوده، اما در توزیع برآیند سرعت در مقطع آبشکن، حداکثر سرعت در جلوی آبشکن رخ می‌دهد.

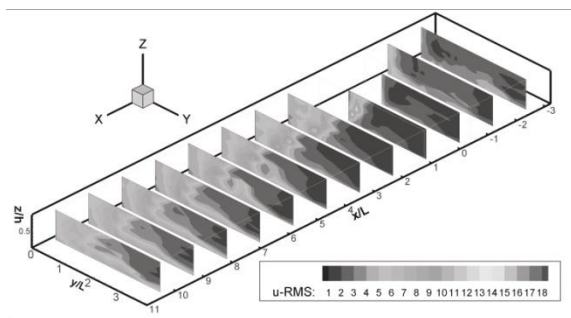
توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط (شکل ۹) مشابه توزیع برآیند سرعت می‌باشد، با این تفاوت که در مقاطع بالادست آبشکن و در امتداد جداره‌ی سمت راست کانال آثار آبشکن در شکل‌گیری جریان برگشتی و کاهش سرعت جریان نزدیک بستر، به وسیله‌ی منحنی‌های هم تراز انرژی جنبشی قابل

۴-۲- الگوی جریان آشفته

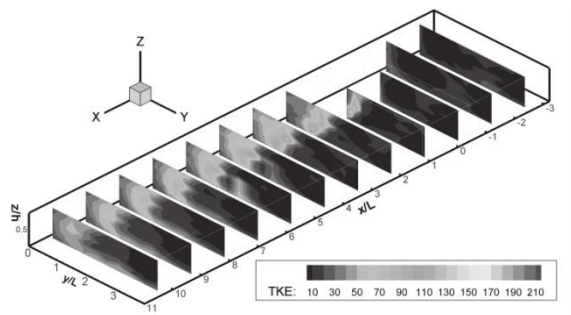
در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) توزیع مجذور مربع نوسانات مؤلفه طولی سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در صفحات عرضی در طول کانال مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۹ در مقاطع بالادست آبشکن، نوسانات مؤلفه‌ی طولی سرعت در نواحی نزدیک بستر شدیدتر از نواحی فوقانی بوده و مقادیر حداکثر در بالادست آبشکن در امتداد دیواره سمت آبشکن رخ می‌دهد. مقدار حداکثر نوسانات طولی سرعت در مقابل دماغه‌ی آبشکن اتفاق افتاده که ناشی از شکل‌گیری گردابه‌ی نعل‌اسبی و گسترش آن به سمت پایین دست است. با گذر از مقطع آبشکن و در مقاطع عرضی پایین دست، حداکثر نوسانات طولی سرعت در امتداد لایه‌ی برشی رخ می‌دهد. برخلاف مقدار متوسط مؤلفه‌ی طولی سرعت، نوسانات مؤلفه طولی سرعت در ناحیه‌ی چرخشی شدیدتر از سایر نواحی بوده و با حرکت به سمت پایین دست، ناحیه تشدید نوسانات سرعت به سمت دیواره‌ی آبشکن منتقل می‌شود. ناحیه‌ی حداقل نوسانات مؤلفه‌ی طولی سرعت در دیواره‌ی مقابل آبشکن شکل می‌گیرد که با حرکت از جلوی آبشکن به سمت پایین دست این ناحیه ضعیف‌تر می‌شود.

توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در شکل (۱۱) ارائه شده است. با توجه به شکل، حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایه‌ی برشی بوده و از مقطع $x/L=0.8$ تا $x/L=3.5$ ناحیه پر انرژی در کل عمق میدان گسترش یافته است، در حالی که با حرکت به سمت پایین دست، از شدت و وسعت این ناحیه کاسته می‌شود. با مقایسه چگونگی توزیع انرژی جنبشی آشفتگی با انرژی جنبشی جریان متوسط مشاهده می‌شود که در قسمت‌هایی از میدان که انرژی جنبشی آشفتگی بیشینه مقدار را دارد، انرژی جنبشی جریان متوسط حداقل بوده و بر عکس. با توجه به شکل توزیع انرژی جنبشی جریان متوسط، بیشترین انرژی جنبشی در بخش مرکزی کانال و دور از لایه‌ی برشی شکل می‌گیرد، در حالیکه بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایه‌ی برشی رخ می‌دهد. افزایش انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایه‌ی برشی نقش مهمی در انتقال رسوبات بستر به

سمت پایین دست دارد، انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تشکیل گردابه‌های آشفتگی است که در کل عمق جریان گسترش یافته‌اند. گردابه‌های آشفتگی به واسطه قدرت چرخشی لحظه‌ای زیاد، تنش‌های شدیدی بر ذرات رسوب بستر وارد کرده و باعث جابه‌جایی آن‌ها می‌شوند. در بالادست آبشکن توزیع انرژی جنبشی آشفتگی تقریباً یکنواخت است. (واحد توزیع انرژی جنبشی آشفتگی cm^2/s است).



شکل (۱۰) توزیع مجذور مربع نوسانات مؤلفه طولی سرعت

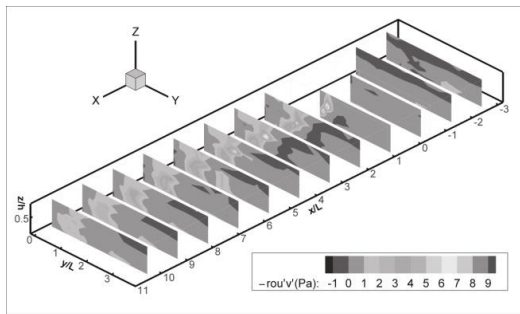


شکل (۱۱) توزیع انرژی جنبشی آشفتگی جریان

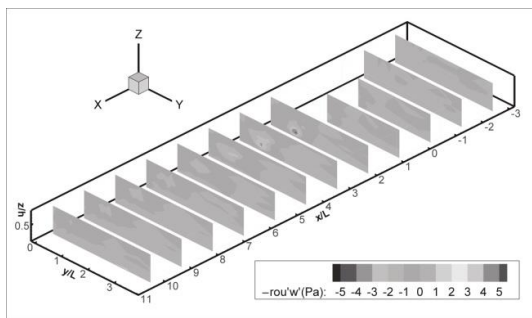
Teruzzi و همکاران. با انجام پژوهش‌هایی به این نتیجه رسیدند که نوسانات سه مؤلفه‌ی سرعت در میدان جریان سه بعدی مستقل از هم نبوده و همبستگی نوسانات مزبور منجر به ایجاد تنش‌های برشی موسوم به تنش‌های رینولدز می‌شود. همبستگی نوسانات سرعت و تشکیل تنش‌های رینولدز، در بحث انتقال رسوب و فرسایش مهم است [۱۵].

شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ توزیع مؤلفه‌های مماسی تنش‌های رینولدز را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۱ میزان مثبت تنش $-\rho u'v'$ در امتداد لایه‌ی برشی تشکیل می‌شود. حداکثر مقدار مؤلفه‌ی مورد نظر تنش رینولدز در امتداد لایه‌ی برشی و در محلی که

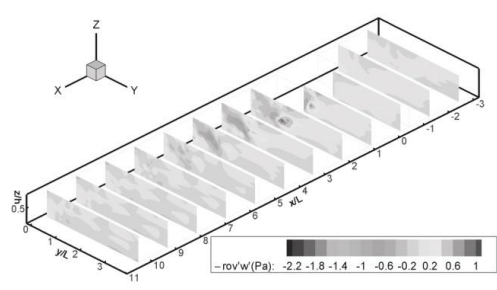
$-\overline{\rho u'w'}$ بزرگتر از دو تنش دیگر می‌باشد و قدر مطلق منفی تنش $-\overline{\rho u'w'}$ بزرگتر از تنش $-\overline{\rho u'v'}$ است.



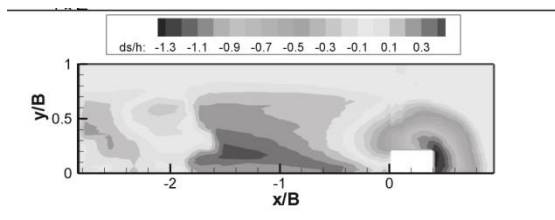
شکل (۱۲) توزیع تنش رینولدز ناشی از نوسانات مؤلفه طولی و عرضی سرعت



شکل (۱۳) توزیع تنش رینولدز ناشی از نوسانات مؤلفه طولی و قائم سرعت



شکل (۱۴) توزیع تنش رینولدز ناشی از نوسانات مؤلفه عرضی و قائم سرعت



شکل (۱۵) تغییرات توپوگرافی بستر برای آبشکن با شیب کناره‌ای ۷۵ درجه

۵- نتیجه گیری

در پایین دست آبشکن و پشت آبشکن یک ناحیه چرخشی شکل می‌گیرد که با افزایش ارتفاع تراز سطح آب، مرکز این گردابه از بدنه آبشکن و دیواره‌ی کانال دور می‌شود. همچنین با

مقدار جریان متوسط کوچک است، رخ می‌دهد. در بالادست آبشکن و تا $x/L=0$ تغییرات مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت در مقاطع عرضی در طول کانال تقریباً یکنواخت است. از جلوی آبشکن تا مقطع $x/L=+1$ این نوسانات افزایش می‌یابد و به سمت پایین دست کاهش، بعد افزایش دارد، که دوباره تا انتهای کانال کاهش می‌یابد. محدوده‌ی مثبت تغییرات مؤلفه‌ی طولی و عرضی با حرکت به سمت پایین دست به سمت دیواره‌ی سمت آبشکن کشیده می‌شود. با توجه به شکل‌ها برخلاف $-\overline{\rho u'v'}$ ، توزیع دو مؤلفه دیگر تنش مماسی رینولدز $-\overline{\rho v'w'}$ و $-\overline{\rho u'w'}$ نشان از وقوع مقادیر منفی این تنش‌ها در ناحیه‌ی چرخشی دارد.

Nelson و همکاران به تجمع رسوبات در نواحی از میدان جریان که در آن دو مؤلفه‌ی تنش $-\overline{\rho u'w'}$ و $-\overline{\rho v'w'}$ دارای مقدار منفی باشند، اشاره کرده‌اند [۱۶]. پس می‌توان نتیجه گرفت که تجمع رسوبات در ناحیه‌ی چرخشی شکل می‌گیرد. مقدار مثبت تنش رینولدز $-\overline{\rho u'v'}$ در پایین دست آبشکن در ناحیه‌ی میانی کانال و در نواحی نزدیک بستر مثبت بوده، بنابراین در این نواحی بواسطه نوسانات مؤلفه‌های طولی و قائم سرعت، ذرات رسوب حرکت کرده و منتقل خواهند شد.

با توجه به تغییرات توپوگرافی بستر برای آبشکن با شیب کناره ۷۵ درجه برای حالت $Fr=0.29$ (شکل ۱۵)، شامل الگوی جریان برای این حالت برداشت شده است، ناحیه مقدار منفی دو مؤلفه‌ی تنش $-\overline{\rho u'w'}$ و $-\overline{\rho v'w'}$ با ناحیه تجمع رسوبات در پایین دست آبشکن هماهنگ است. بیشینه مقدار $-\overline{\rho u'v'}$ در جلوی آبشکن و نزدیک بستر رخ می‌دهد و کمینه مقدار آن در مقطع $x/L=+2$ و نزدیک بستر رخ داده و به سمت پایین دست ناحیه‌ی کمینه نوسانات به سمت سطح بستر و دیواره‌ی کانال حرکت می‌کند. توزیع نوسانات مؤلفه‌ی طولی و قائم سرعت در بالادست آبشکن یکنواخت است. ناحیه‌ی حداکثر مقدار $-\overline{\rho v'w'}$ از $x/L=+0.8$ تا $x/L=+3$ ادامه می‌یابد. مقدار مثبت تنش رینولدز $-\overline{\rho u'v'}$ بزرگتر از دو مؤلفه‌ی دیگر تنش است، به گونه‌ای که حداکثر مقدار آن نسبت به حداکثر مقدار مثبت تنش $-\overline{\rho u'w'}$ تقریباً $1/\sqrt{2}$ برابر و نسبت به تنش $-\overline{\rho v'w'}$ تقریباً هشت برابر بزرگتر است. مقدار قدرمطلق حداقل تنش

دهد. افزایش انرژی جنبشی در امتداد لایه‌ی برشی نقش مهمی در انتقال رسوبات بستر به سمت پایین‌دست دارد، به گونه‌ای که انرژی جنبشی مزبور ناشی از تشکیل گردابه‌های آشفتگی است که در کل عمق جریان گسترش یافته‌اند.

- میزان مثبت تنش $-\rho u'v'$ در امتداد لایه‌ی برشی تشکیل می‌شود. حداکثر مقدار مؤلفه‌ی مورد نظر تنش رینولدز در امتداد لایه‌ی برشی و در محلی که مقدار جریان متوسط کوچک است، رخ می‌دهد. با توجه به مقادیر منفی تنش‌های رینولدز $-\rho u'w'$ و $-\rho v'w'$ در ناحیه‌ی چرخشی پشت آبشکن، تجمع رسوبات در ناحیه‌ی چرخشی رخ خواهد داد.

- در ناحیه‌ی بالادست آبشکن، یک جریان چرخشی در پای آبشکن شکل می‌گیرد. این جریان چرخشی ابعاد کوچکی دارد و در نزدیکی بدنه‌ی آبشکن متمرکز بوده که از قدرت چرخشی بالایی برخوردار است. در بالادست دماغه، خطوط جریان ناشی از گردابه‌ی نعل اسبی، ضمن چرخش حول دماغه، با حرکت به سمت پایین‌دست و در مجاورت لایه‌ی برشی بصورت در هم تنیده در می‌آیند.

۶- مراجع

- [1]Ahmed, M. 1953. Experiments on design and behavior of spur-dikes, In proc. Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis.145-59.
- [2]Chen, F. Y., and Ikeda, S. 1997. Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 15(2): 15-30.
- [3]Ahmed, F., and Rajaratnam, N. 2000. Observations on flow around bridge abutments. J. Eng. Mech., ASCE, 126(1): 51-59.
- [4] Ujtewaal W. 2005. Effect of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments. J. Hydraul. Eng., 131(9): 782-91.
- [5]Nagata, N., Hosada T., and Nakato, T. 2005. Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. J. Hydraul. Eng., 131(12): 1074-1087.
- [6] Kadota, A., Suzuki, K. and Uijtewaal, W. S. J. 2006. The shallow flow around a single groyne under submerged and emerged conditions. RiverFlow 2006, Portugal, 673-682.
- [7]Koken, M. and Constantinescu, G. 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel:1.

پیشروی از سطح بستر به سطح آب، ابعاد گردابه بزرگ‌تر می‌شود.

- حداکثر مقدار مؤلفه‌ی عرضی سرعت در دماغه‌ی بالادست آبشکن شکل می‌گیرد و شدت آن در لایه‌های نزدیک بستر، بیشتر از نواحی سطح آب می‌باشد، به گونه‌ای که حداکثر مقدار مؤلفه‌ی عرضی سرعت در نزدیکی بستر ۱/۵ برابر مقدار سرعت در لایه‌ی نزدیک سطح آب می‌باشد.

- در ناحیه‌ی نزدیک بستر و در دماغه‌ی بالادست آبشکن، جریان قائم رو به بالا و در ناحیه‌ی مقابل آن جریان قائم رو به پایین تشکیل می‌شود که حاکی از وجود گردابه‌ی نعل اسبی است که در محل دماغه‌ی بالادست آبشکن حداکثر مقدار را دارد.

- دو ناحیه‌ی تشدید سرعت، یک ناحیه مربوط به تشدید سرعت در هسته‌ی اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان و ناحیه‌ی پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین‌دست آبشکن و در ناحیه‌ی بیرونی لایه‌ی برشی، تشکیل می‌شود. حداکثر سرعت متوسط جریان در پایین‌دست آبشکن ۱/۵۵ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده است.

- در مقاطع بالادست آبشکن و در امتداد جداره‌ی سمت راست کانال آثار آبشکن در شکل‌گیری جریان برگشتی و کاهش سرعت جریان نزدیک بستر، به وسیله‌ی منحنی‌های هم‌تراز انرژی جنبشی قابل مشاهده است. حداکثر مقدار انرژی جنبشی جریان متوسط به اندازه ۲/۵ برابر انرژی جنبشی جریان نزدیک شونده تشدید می‌شود.

- مقدار بیشینه نوسانات طولی سرعت در مقابل دماغه‌ی آبشکن اتفاق افتاده، که ناشی از شکل‌گیری گردابه‌ی نعل اسبی و گسترش آن به سمت پایین‌دست می‌باشد. با گذر از مقطع آبشکن و در مقاطع عرضی پایین‌دست، بیشینه نوسانات طولی سرعت در امتداد لایه‌ی برشی رخ می‌دهد.

- در میدان جریان متوسط، بیشترین انرژی جنبشی در بخش مرکزی کانال و دور از لایه‌ی برشی شکل می‌گیرد در حالیکه بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در امتداد لایه‌ی برشی رخ می‌-

[12] Duan, J., 2009. Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike. *J. Hydraul. Eng.*, 135(10): 803-811.

[13] Duan, J., He, L., Fu, X., and Wang, Q. 2009. Mean flow and turbulence around an experimental spur dike. *Adv. Water Resour.*, 132(12): 1717-1725.

[۱۴] صفرزاده گندشمین، ا. ۱۳۸۹. "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان آشفته حول آبشکن با شکل‌های مختلف دماغه".

رساله دکتری. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه تربیت مدرس.

[15] Teruzzi, A., Ballio, F., and Armenio, V. 2009. Turbulent stresses at the bottom surface near an abutment: laboratory-scale numerical experiment. *J. Hydraul. Eng.*, 135(2): 106-117.

[16] Nelson, J. M., Shreve, R. L., McLean, S. R., and Drake, T. G. 1995. Role of near-bed turbulence structure on bed load transport and bed form mechanics. *Water Resour. Res.*, 31(8): 2071-2086.

Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process. *Water resources research*. 44, W08406, doi:10.1029/2007WR006489.

[8] Koken, M. and Constantinescu, G. 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stages of the erosion and deposition process. *Water resources research*. 44, W08407, doi:10.1029/2007WR006491.

[9] Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Jia, Y. J., . 2008 "Measured and simulated flow near spur dikes, ". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.128, No. 12, 1087-1093

[10] Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Jia, Y. J., 2008 "Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case , ". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.128, No. 12, 1087-1093. .

[11] Kuhnle, R. A., Alonso, C. V., and Shields, F. D., Jr., 2002. "Local scour associated with angled spur dikes, ". *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.128, No. 12, 1087-1093..

Experimental study of flow around a spur dike with side slope

F. Asadzadeh¹, A. Safarzadeh² and S. A. A. Salehi Neyshabouri^{3*}

1- M. Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modres University

2- Associate Prof., Civil Eng. Dep., Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3- Prof., Hydraulic Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modres University

salehi@modares.ac.ir

Abstract:

Spur dikes are man-made transverse river structures. They divert the high velocity to the channel center and prevent undesirable bank erosion. In this paper, flow structure around a single spur dike with side slope is investigated experimentally. Three dimensional flow field around a single spur dike with 75° side slope located in a flat-bed rectangular laboratory flume has been measured using the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and mean flow and turbulence parameters are investigated. Downstream of the spur dike due to the decrease of the flow velocity, a recirculation zone forms, while the flow accelerates at the middle zone of the channel. Upstream of the tested spur dike, flow is divided into two parts. A part of the approaching flow is diverted to the channel bed and the remaining form a bow wave near the water surface. Downward deflected flow interacts with the near bed approach flow and results in the horseshoe vortex. The horseshoe vortex is the main responsible for scouring at the upstream of the spur dike. Dye visualizations showed that due to the upstream side slope of the spur dike, the down flow is weaker than the spur dike with vertical side slope. Along the main channel two distinctly velocity amplification zones form. A velocity amplification along the outer boundary of the shear layer, downstream of the spur dike forms due to the local effects of the spur dike. Due to the spur dike constriction imposed to the channel, another high velocity zone forms. The second velocity amplification zone forms along the right channel wall. Flow velocity in the first amplification zone is higher than the second zone. The horse shoe vortex is strong near the lower layers and consequently the velocity amplification along the shear layer at the near bed layers is higher than the near water surface layers. By going from near bed layers to the water surface layers the extent of the second amplification zone increases. Flow streamlines at the near bed plane shows development of some oblique streamlines, after the reattachment zone. This stream lines are attributed to the coherent flow structures reported in the literature. The near bed streamlines are more diverted to the opposite channel wall, compared to the near water surface layers. By going from the near bed layers to the water surface layer the center of the recirculating zone moves downstream. The mean flow kinetic energy is amplified 2.5 times of the approach flow. The maximum mean flow amplification occurs at the central zone of the channel, while the maximum turbulent kinetic energy is measured along the outer boundary of the separation zone. The higher turbulent kinetic energy along the shear layer is responsible for the pickup and movement of the sediment particles at low mean velocity zones. Distribution of the Reynolds shear stresses show that the maximum $-\overline{\rho u'v'}$ stress occurs along the shear layer bounding the separation zone. Minus values of the $-\overline{\rho v'w'}$ and $-\overline{\rho u'w'}$ stresses shows that the sedimentation will occur at the downstream zone of the spur dike.

Keywords: Straight spur dike, side slope, flow field, turbulence parameters, Reynolds stresses.