

بررسی میدان جریان آشفته اطراف آبشکن T شکل مستغرق

مجتبی مهرآیین^{۱*}، سید ماجد نوربخش^۲، مسعود قدسیان^۳

۱. عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران- ایران

۲. دانش آموخته عمران آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران- ایران

۳. استاد هیدرولیک پژوهشکده آب - دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران- ایران

mehraein@khu.ac.ir*

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۰/۱۵]

چکیده- در این مقاله میدان جریان در اطراف آبشکن T شکل مستغرق در مسیر مستقیم بررسی شد. بررسی‌های انجام شده شامل سرعت‌های میانگین، خطوط جریان و پارامترهای آشفتگی جریان است. نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده وجود یک جریان چرخشی در پایین دست آبشکن است. جهت جریان چرخشی، به دلیل تأثیر جریان روگذر از روی آبشکن، خلاف جهت جریان چرخشی مشاهده شده در آبشکن‌های غیر مستغرق است. محدوده جریان چرخشی، نسبت به آبشکن‌های مستغرق دوزنقه‌ای، تا محدوده وسیعتری از پایین دست امتداد می‌یابد. پارامترهای آشفتگی بررسی شده در این پژوهش شامل تنش‌های رینولدز عمودی، تنش‌های برشی وارد شده بر کف، و احتمال ایجاد هرکدام از پدیده‌های آشفتگی است. بیشترین مقدار تنش‌های رینولدز عمودی در نوک بالادست آبشکن مشاهده می‌شود. علاوه بر این نیز در این منطقه مشاهده شد. بررسی احتمال ایجاد هرکدام از پدیده‌های انفجار آشفتگی در راستای جریان و عمق کانال نشان دهنده احتمال بیشتر پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در بالادست آبشکن است. در حالی که در منطقه چرخشی پایین دست آبشکن، پدیده‌های اندرکنشی احتمال بیشتری دارند. احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در نوک بالادست آبشکن، برای نوسانات سرعت در راستای عرض و عمق کانال نیز بیشتر است.

واژگان کلیدی: آبشکن، میدان جریان، ADV، آشفتگی.

۱- مقدمه

پژوهش‌های متنوعی در مورد میدان جریان اطراف آبشکن‌ها انجام شده است [۴-۱]. پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که پدیده انفجار آشفتگی سهم زیادی در انتقال رسوبات اطراف آبشکن‌ها دارد به گونه‌ای که در نواحی نزدیک آبشکن‌های تیغه‌ای غیر مستغرق پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی بیشتر مشاهده می‌شوند [۴]. بیشتر پژوهش‌های پیشین در مورد بررسی میدان جریان اطراف آبشکن‌های غیر مستغرق بوده و پارامترهای سرعت میانگین و پارامترهای آشفتگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۵]. پژوهش‌هایی در مورد آبشستگی و میدان جریان اطراف آبشکن‌های مستغرق نیز به وسیله‌ی

آبشکن‌ها سازه‌هایی است که برای کاهش فرسایش سواحل رودخانه‌ها استفاده می‌شوند. اندرکنش جریان و آبشکن‌ها موجب ایجاد حفره آبشستگی در اطراف این نوع سازه‌ها می‌شود. رسوبات خارج شده از حفره آبشستگی به پایین دست منتقل شده و ممکن است پس از ته‌نشینی موجب تثبیت سواحل رودخانه شود. چاله‌های تشکیل شده در اطراف آبشکن‌ها مناطق مناسبی برای زندگی آبزیان است. از این رو استفاده از آبشکن‌ها برای حفظ گونه‌های مختلف زیست محیطی رودخانه‌ها نیز مفید است.

مورد پژوهش‌های تکمیلی برای جریانی پیچیده مانند جریان اطراف آبشکن‌ها انجام شود.

۲- وسایل و روش انجام آزمایش

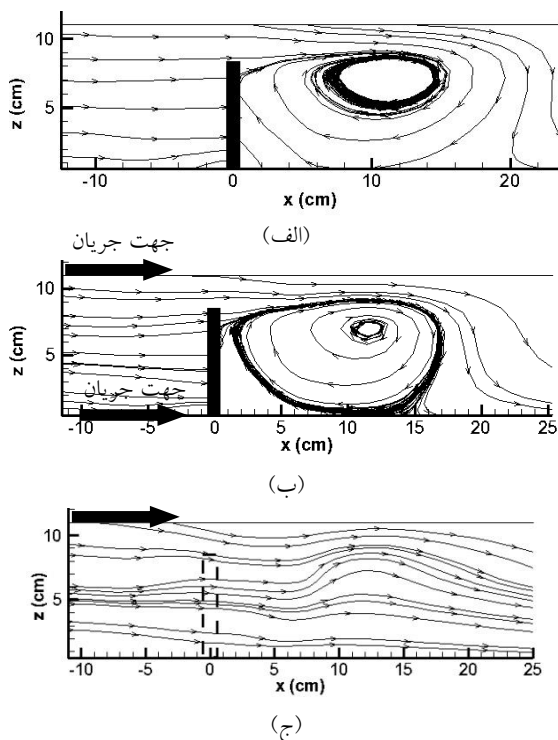
آزمایش‌ها روی کف تثبیت شده رسوبات (بدون آبستگي) با استفاده از دوغاب سیمان در کانالی به طول ۸ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر در، آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. قطر میانگین رسوبات مورد استفاده در این پژوهش ۱/۲۸ میلی‌متر و انحراف معیار دانه‌بندی مصالح ۱/۳ بود. آبشکن T شکل از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شد. طول بال و جان آبشکن ۹ سانتی‌متر بود که بال و جان آبشکن به صورت عمود به یکدیگر متصل شدند. آبشکن به فاصله ۴ متر از ابتدای کانال به صورت عمود بر دیواره کانال متصل شد. فاصله قرارگیری تاج آبشکن تا سطح رسوبات ۸/۷۸ سانتی-متر بود. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مثلثی کالیبره شده در مخزن پایین دست کانال استفاده شد. تنظیم عمق آب به وسیله دریچه پروانه‌ای قرار گرفته در انتهای کانال انجام شد و اندازه‌گیری عمق آب به وسیله عمق سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام شد. عمق جریان در بالادست و دبی به ترتیب برابر ۱۱/۷ سانتی‌متر و ۰/۰۲۵ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد.

برای اندازه‌گیری سرعت جریان در کانال از دستگاه برداشت سه بعدی سرعت (Vectorino) استفاده شد. این دستگاه توانایی اندازه‌گیری سرعت در سه بعد در محدوده وسیعی از سرعت‌ها (۰/۰۱ تا ۴ متر بر ثانیه) با دقت ۱ میلی‌متر بر ثانیه و تا فرکانس 200 HZ را دارد. شکل (۱) نشان دهنده نقاطی است که اندازه‌گیری سرعت در آنها انجام شد. سرعت در سایر نقاط با استفاده از حسگر رو به پایین اندازه‌گیری شد. مدت زمان اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه به صورتی انتخاب شد که پارامترهای آشفته‌گی با افزایش مدت زمان اندازه‌گیری سرعت، تغییر نکند.

الوادی و مانسانوری (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) انجام شد [۷ و ۶]. در این پژوهش‌ها بررسی کیفی میدان جریان اطراف آبشکن‌های مستغرق با استفاده از تزریق رنگ انجام شد. کوهنل و همکاران (۲۰۰۸) مدلی عددی را برای میدان جریان اطراف آبشکن‌ها توسعه دادند [۱]. پژوهش‌های انجام شده با استفاده از دستگاه ADV نشان داد که آشفته‌گی ایجاد شده به وسیله آبشکن در طول جریان ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد [۸ و ۷]. بررسی میدان جریان اطراف تکیه‌گاه پل با استفاده از دستگاه ADV در پژوهش‌های پیشین انجام شد [۸]. بررسی میدان جریان اطراف آبشکن با استفاده از دستگاه ADV به وسیلهی دوآن (۲۰۰۹) و داوان و همکاران (۲۰۱۱) در مورد نوسانات سرعت، انرژی جنبشی آشفته‌گی و تنش‌های برشی وارد بر کف انجام شد [۳ و ۴]. با توجه به اینکه تا به حال پژوهشی در مورد میدان جریان اطراف آبشکن‌های T شکل مستغرق انجام نشده است لازم است پژوهش‌هایی با جزئیات بیشتر در این مورد انجام شود.

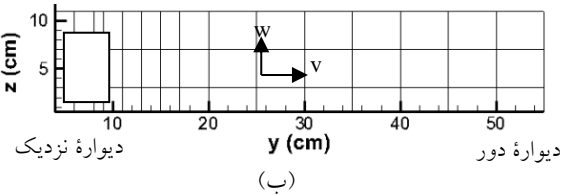
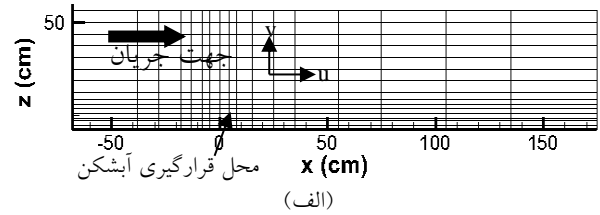
پدیده‌های انفجار آشفته‌گی (اندرکنش رو به داخل و خارج، بیرون‌رانی و جاروبی) تاثیر متفاوتی در فرآیند آبستگي و انتقال رسوبات دارند [۹ و ۱۰]. از این رو پژوهش‌های متعددی در مورد تاثیر این نوع فرآیندها بر آبستگي و رسوبگذاری انجام شده است [۱۱-۱۳]. با افزایش زبری بستر پدیده جاروبی افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش فاصله از کف پدیده بیرون‌رانی احتمال بیشتری پیدا می‌کند [۱۲]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ذرات درشت‌دانه به وسیله پدیده جاروبی انتقال می‌یابند در حالی که رسوبات ریزدانه بوسیله پدیده بیرون‌رانی به صورت بار معلق منتقل می‌شوند [۱۴]. پژوهش‌های پیشین نشان داد که پدیده جاروبی باعث انتقال رسوبات به صورت دسته جمعی خواهند شد [۱۵]. در حالی که پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون موجب انتقال رسوبات به صورت مجزا خواهند شد و پدیده‌های بیرون‌رانی و اندرکنش رو به داخل تاثیر کمتری در انتقال رسوبات خواهند داشت. با توجه به مطالعاتی که در مورد ارتباط آبستگي با پدیده انفجار آشفته‌گی انجام شده است می‌توان نتیجه گرفت پژوهش‌های انجام شده نتایج متفاوتی را ارائه داده‌اند و نیاز است در این

از دیواره نزدیک آبشکن است. مطابق شکل (۲ الف) جریان چرخشی در بالادست و پایین دست آبشکن وجود دارد. در بالادست آبشکن قسمتی از جریان به صورت رو گذر از روی آبشکن عبور می کند در حالی که قسمت دیگری از آن به سمت بستر منحرف شده و جریان پایین رونده را ایجاد می کند. این جریان ها در اثر ایجاد گرادیان فشار در اثر برخورد جریان به جان آبشکن ایجاد می شود. در آبشکن های غیر مستغرق جریان روگذر به صورت جریان بالارونده و جریان پایین رونده نیز مانند جریان پایین رونده در این پژوهش مشاهده شده است.



شکل ۲- خطوط جریان در اطراف آبشکن: الف- به فاصله ۰/۴۴ طول آبشکن از دیواره نزدیک، ب- به فاصله ۰/۶۷ طول آبشکن از دیواره نزدیک و ج- نزدیک بال آبشکن

تفاوت چندانی بین شکل و اندازه های گردابه تشکیل شده در فاصله ی مختلف تا دیواره نزدیک آبشکن وجود ندارد (شکل های ۲ الف و ب). شکل ۲-ج نشان دهنده این است که گردابه تشکیل شده در حد فاصل بین دیواره نزدیک کانال و بال آبشکن در این ناحیه تشکیل نشده است. شکل های (۳ الف و ب) نشان دهنده خطوط جریان دو صفحه



شکل ۱- نقاطی که سرعت در آنها برداشت شده است: الف- پلان و ب- مقطع

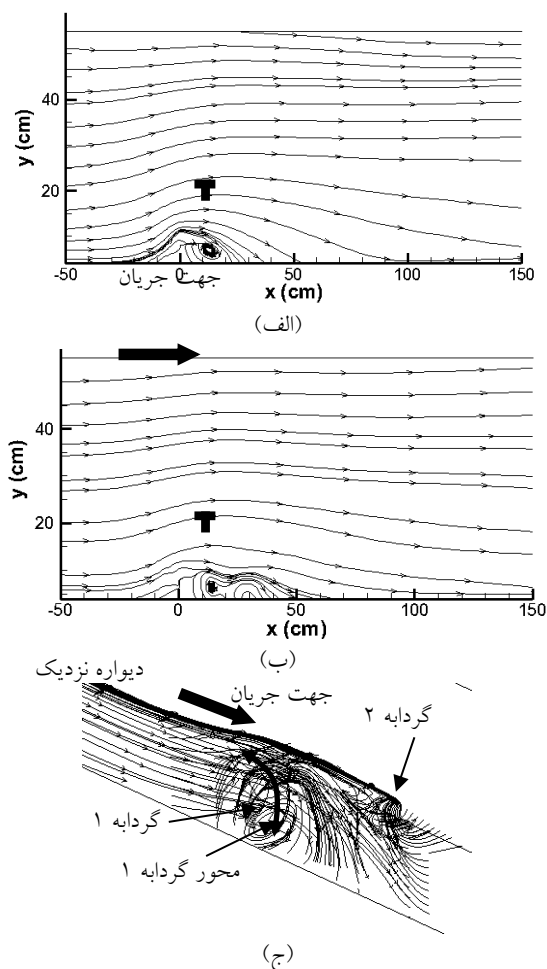
مطابق پژوهش های پیشین فرکانس برداشت داده ها ۵۰HZ در نظر گرفته شد [۷]. برای حذف نویزهای موجود در سری زمانی از دو معیار ارایه شده به وسیله شرکت سازنده دستگاه، یعنی حذف داده های با ضریب همبستگی کمتر از ۷۰ و نسبت سیگنال به نویز کمتر از ۱۴ استفاده شد. علاوه بر این از معیار ارایه شده در مرجع [۱۶] نیز برای حذف نویزهای باقی مانده استفاده شد. پس از حذف نویزهای موجود در سری زمانی، تعداد داده های باقی مانده در سری زمانی نیز بررسی شد. در تمام نقاط، داده های باقی مانده در سری زمانی بعد از حذف نویزها، بیشتر از ۱۰۰۰ سرعت لحظه ای است که بیشتر از معیار ارایه شده است [۱۷] پس از حذف نویزهای موجود در سری زمانی سرعت های میانگین و پارامترهای آشفتگی از جمله تنش های رینولدز، تنش برشی وارد بر کف، احتمال ایجاد هرکدام از پدیده های انفجار آشفتگی و همبستگیهای سه گانه محاسبه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت که نتایج آن در ادامه ارایه می شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی خطوط جریان و مقادیر سرعت میانگین

شکل های (۲ الف-ج) به ترتیب نشان دهنده خطوط جریان دو صفحه عمودی، در فاصله ۰/۴۴، ۰/۶۷ و ۱ برابر طول آبشکن

قرارگیری آبشکن ایجاد شده است که حدود $4/1$ برابر سرعت متوسط جریان در بالاست آبشکن است. به دلیل تاثیر کف جامد بر جریان در لایه نزدیک تراز بستر (تراز $0/44$ عمق جریان از بستر)، منطقه پر سرعت در این تراز کمتر بسمت پایین دست توسعه یافته است. در ناحیه حد فاصل دیواره نزدیک تا بال آبشکن و در پایین دست آبشکن، ناحیه با سرعت کم و جریان چرخشی به دلیل جدایی جریان از بال و تاج آبشکن مشاهده می شود. این ناحیه تا حدود 2 برابر طول آبشکن در پایین دست آبشکن گسترش می یابد. برای آبشکن های ذوزنقه ای مستغرق طول ناحیه جداشدگی جریان در پایین دست حدود $6/1$ برابر طول آبشکن گزارش شده است [۱].

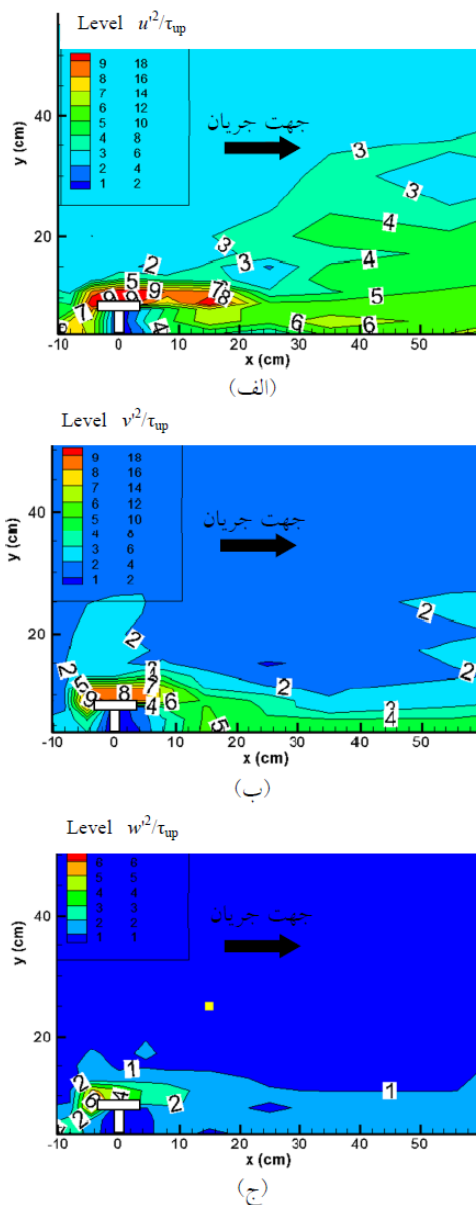


شکل ۳- خطوط جریان در اطراف آبشکن: الف- در تراز 25 در صد عمق جریان از کف ، ب- در تراز 69 درصد عمق جریان از کف و ج- خطوط جریان سه بعدی در نزدیک دیواره نزدیک کانال و آبشکن

افقی و در فاصله 25 و 69 درصد عمق جریان از کف است و در شکل ۳-ج خطوط جریان به صورت سه بعدی در نزدیکی آبشکن ارائه شده است. شکل های (۳ الف و ب) نشان دهنده فرم دیگری از جریان چرخشی در پایین دست آبشکن های مستغرق است. این جریان چرخشی در پلان مشاهده شده و در اثر جدایی جریان نزدیک شده به آبشکن و عبور آن از اطراف آبشکن ایجاد شده است. ترکیب گردابه های شکل گرفته در مقطع (شکل های ۲ الف و ب) و پلان (شکل های ۳ الف و ب) تشکیل گردابه ای را در پایین دست آبشکن می دهد (شکل ۳ج) که در ترازهای نزدیک کف بیشتر تحت تاثیر جریان عبوری از اطراف آبشکن است (در این ترازها محور این گردابه متمایل به کف کانال است) در حالی که در ترازهای بالایی بیشتر تحت تاثیر جریان روگذری از آبشکن است (در این ترازها محور این گردابه متمایل به دیواره های جانبی کانال است). پژوهش های پیشین نشان داد در شرایطی که آبشکن غیر مستغرق باشد، ناحیه چرخشی در پایین دست آبشکن نیز مشاهده می شود [۲ و ۳ و ۸ و ۱۸]. با این تفاوت که در ترازهای بالایی جریان، جهت حرکت جریان به سمت بالادست در حالی که در ترازهای نزدیک به بستر، جهت حرکت جریان بسمت پایین دست است. اما همان گونه که شکل (۲- الف) نشان می دهد، در شرایطی که آبشکن مستغرق باشد جهت جریان چرخشی در پایین دست آبشکن در ترازهای بالایی جریان، بسمت پایین دست و در ترازهای نزدیک بستر به سمت بالادست است. در نتیجه وجود چنین جریانی در پایین دست آبشکن، در ساعات اولیه آبشستگی در اطراف آبشکن های مستغرق، رسوبات در پایین دست آبشکن ته نشین خواهد شد. ارتفاع رسوبات ته نشین شده در پایین دست آبشکن مستغرق در ساعات اولیه آبشستگی تا تاج آبشکن نیز گزارش شده است [۱۹].

شکل های (۴ الف و ب) نشان دهنده کانتورهای نسبت سرعت متوسط جریان (برآیند برداری سرعت ها در سه راستا) به سرعت متوسط عمقی جریان در بالادست U_{up} در ترازهای $44/0$ و $94/0$ عمق جریان از کف است. این شکل نشان می دهد که بیشینه سرعت در ناحیه تنگ شدگی جریان در محل

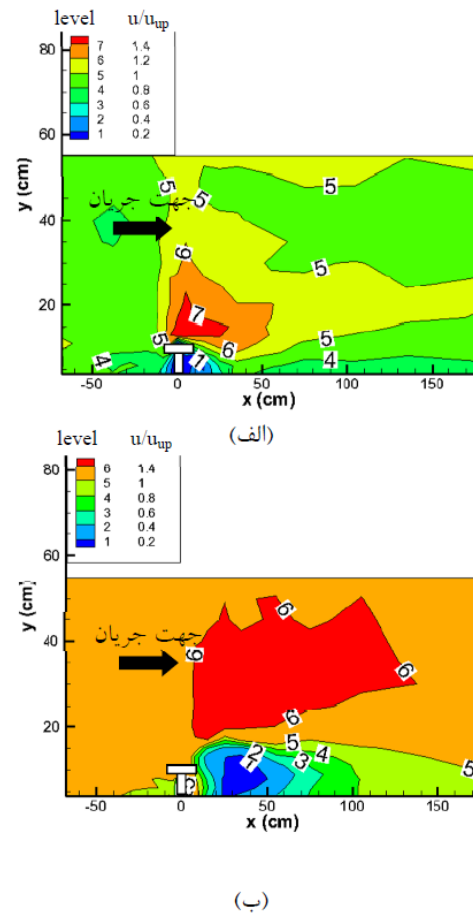
کف در بالادست آبشکن نشان داد [۳ و ۲۰]. تعدادی از پژوهشگران این مقادیر را حدود ۲ تا ۳ برابر تنش‌های وارد بر کف در بالادست گزارش کردند که نزدیک به مقادیر به دست آمده در این پژوهش است [۲۱]. محل بیشینه تنش رینولدز عمودی در هر سه راستای جریان در نزدیک نوک بالادست آبشکن است. مقادیر بیشینه تنش‌های رینولدز عمودی در راستای طولی و عرضی حدود ۱۸ برابر تنش وارد شده بر کف در بالادست است.



شکل ۵- تنش‌های رینولدز عمودی در لایه نزدیک کف: الف- در راستای جریان، ب- در راستای عرض کانال و ج- در راستای عمق کانال

۲-۳- بررسی تنش‌های رینولدز عمودی

شکل‌های (۵ الف، ب و ج) نشان‌دهنده نسبت تنش‌های رینولدز عمودی $(-\overline{\rho u'^2}, -\overline{\rho v'^2}, -\overline{\rho w'^2})$ در تراز ۰/۴۴ عمق جریان از کف به تنش برشی وارد بر کف در بالادست آبشکن (τ_{tp}) است. در بالادست آبشکن و در نواحی که تحت تاثیر آبشکن قرار ندارد تنش‌های رینولدز عمودی در راستای جریان $\overline{\rho u'^2}$ حدود ۴ برابر تنش وارد شده بر کف در بالادست آبشکن (τ_{tp}) است. این نسبت برای تنش‌های رینولدز عمودی در راستای عرض و عمق کانال کمتر و به ترتیب حدود ۳ و ۱ برابر تنش برشی وارد بر کف در بالادست است.



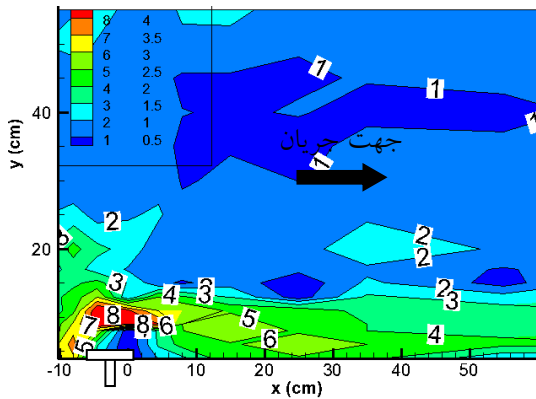
شکل ۴- کانتورهای سرعت میانگین در ترازهای: الف- تراز ۰/۴۴ عمق جریان از کف و ب- تراز ۰/۹۴ عمق جریان از کف

نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین، تنش‌های رینولدز عمودی در بالادست آبشکن را حدود ۱ تا ۲ برابر تنش وارد بر

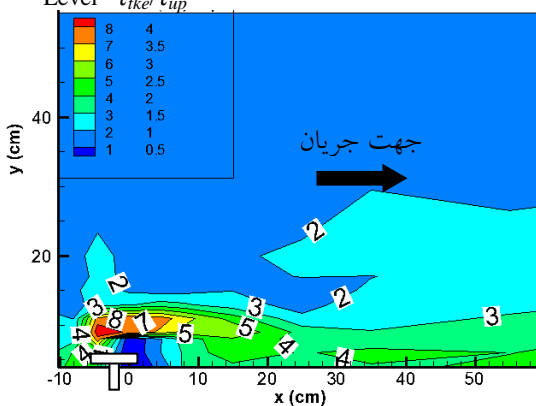
$$\tau o_y = -\rho (\overline{v'w'} + \overline{u'v'}) \quad (2)$$

$$\tau_{re} = (\tau o_x + \tau o_y)^{0.5} \quad (3)$$

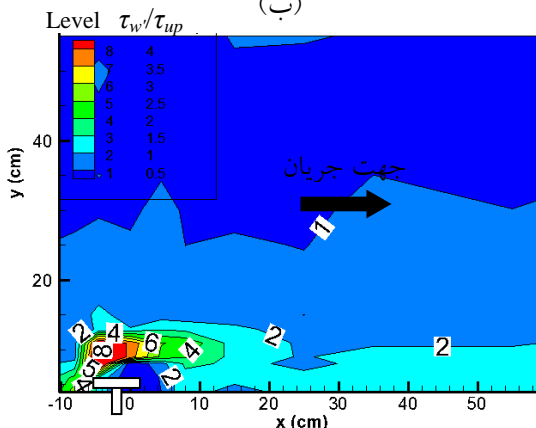
که u' , v' , w' نوسانات سرعت در راستاهای طول، عرض و عمق کانال است. τo_x و τo_y تنش‌های برشی در راستای طولی و عرضی کانال. τ_{re} کل تنش برشی وارد بر کف (محاسبه شده از تنش‌های رینولدز) است.



(الف) Level τ_{tkel}/τ_{up}



(ب) Level τ_w/τ_{up}



(ج)

شکل ۶- تنشهای برشی وارد بر کف نسبت به تنش برشی وارد بر کف

در بالادست: الف- روش تنشهای رینولدز، ب- روش انرژی جنبشی

آشفتهگی و ج- نوسانات سرعت در راستای عمق کانال

اما تنش‌های رینولدز عمودی در راستای عمق کانال حدود ۷ برابر تنش وارد شده بر کف در بالادست است. مقادیر نسبت تنش‌های رینولدز عمودی در پژوهش‌های دوآن (۲۰۰۹) حدود ۲۲ برابر تنش وارد بر کف در بالادست آبشکن گزارش شد [۳] علت این اختلاف این است که در پژوهش‌های دوآن (۲۰۰۹) از آبشکن تیغه‌ای با درصد تنگ شدگی ۵۰٪ در راستای عرضی کانال استفاده شد که موجب افزایش تنش‌های رینولدز عمودی در این ناحیه نسبت به آبشکن T شکل مستغرق در این پژوهش می‌شود.

افزایش میزان آشفتهگی در آبشکن‌های تیغه‌ای نسبت به آبشکن‌های T شکل یکی از عوامل افزایش میزان آشفتهگی در اطراف آبشکن‌های تیغه‌ای نسبت به آبشکن‌های T شکل است. ناحیه‌ای پر تنش در مرز بین جریان عبوری از اطراف آبشکن و جریان برگشتی مشاهده می‌شود. افزایش شدید تنش‌های رینولدز عمودی در این ناحیه نشان‌دهنده وجود لایه‌ای برشی در اطراف آبشکن است.

۳-۳- بررسی تنش‌های برشی وارد بر کف

پژوهشگران مختلف روش‌های متفاوتی را برای محاسبه تنش برشی وارد بر کف ارائه کردند [۳ و ۲۲ و ۲۳]. یکی از این روش‌ها روش تک نقطه‌ای است. در این روش تنش‌های برشی وارد بر کف با استفاده از پارامترهای آشفتهگی نزدیک کف (تنش‌های رینولدز، انرژی جنبشی آشفتهگی و نوسانات سرعت در راستای عمق کانال) تخمین زده می‌شود. اگر چه روش تک نقطه‌ای مقادیر متفاوتی را نسبت به تنش برشی واقعی وارد بر کف ارائه می‌دهد اما طبق پژوهش‌های پیشین توزیع تنش برشی وارد بر کف بوسیله روش تک نقطه‌ای در جریان‌های سه‌بعدی پیچیده و برکف‌های زبر هماهنگی خوبی با توزیع واقعی تنش برشی وارد بر کف دارد. یکی از پارامترهایی که در این روش برای محاسبه تنش برشی وارد بر کف استفاده می‌شود تنش‌های رینولدز است [۲۴ و ۲۵]. طبق پژوهش‌های پیشین تنش‌های برشی وارد بر کف از روابط زیر تخمین زده می‌شود [۸].

$$\tau o_x = -\rho (\overline{u'w'} + \overline{u'v'}) \quad (1)$$

خوانی خوبی دارد [۱ و ۸]. این مقدار برای تنش برشی τ_w' مقداری بیشتر بوده و حدود ۵ برابر تنش برشی وارد در بالادست است. از آنجایی که تنش‌های برشی وارد بر کف نقش اصلی را در فرآیند آبستنگی اطراف آبشکن دارند، در صورت فرسایش پذیر بودن بستر، آبستنگی از مناطقی آغاز می‌شود که تنش برشی وارد بر کف زیاد است. مطالعات انجام شده پیشین نشان داد بیشینه عمق آبستنگی در نزدیک نوک بالادست آبشکن است [۱]. در مورد آبشکن‌های T شکل نیز شروع آبستنگی از نزدیک بال آبشکن T شکل گزارش شده است [۱۹ و ۳۰].

۴- نتیجه گیری

میدان جریان اطراف آبشکن مستغرق T شکل با درصد استغراق ۲۵٪ بررسی شد. نتایج زیر با بررسی سرعت‌های متوسط، خطوط جریان و پارامترهای آشفتگی در نزدیک بستر به دست آمد:

۱- دو گردابه در پایین دست آبشکن مستغرق شناسایی شد که جهت چرخش گردابه اول در پایین دست آبشکن مستغرق در خلاف جهت جریان چرخشی تشکیل شده در پایین دست آبشکن غیر مستغرق است. گردابه کوچک دوم می‌تواند موجب آبستنگی سواحل رودخانه در شرایط استغراق آبشکن شود.

۲- بررسی پارامترهای آشفتگی نشان دهنده وجود لایه برشی در اطراف آبشکن است. در نوک بالادست آبشکن تنش‌های رینولدز عمودی در آبشکن مستغرق کمتر از آبشکن غیر مستغرق است که نشان دهنده آشفتگی بیشتر در این ناحیه در آبشکن‌های غیر مستغرق است و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که آبشکن‌های T شکل مستغرق به عنوان گزینه‌ای برای کاهش عمق حفره آبستنگی تشکیل شده در اطراف آبشکن ارایه شود.

۳- تنش‌های برشی محاسبه شده در اطراف آبشکن با استفاده از هر سه روش ارایه شده به وسیله پژوهشگران پیشین، تغییرات یکسان تنش برشی را در نزدیک کف نشان داد.

در پژوهش‌های انجام شده رابطه خطی بین تنش برشی و انرژی جنبشی آشفتگی جریان وجود دارد [22]. تنش برشی وارد بر کف را می‌توان از رابطه (۴) به دست آورد.

$$\tau_{tke} = c_1[\rho(TKE)] \quad (4)$$

TKE انرژی جنبشی آشفتگی است و τ_{tke} تنش برشی وارد شده بر کف (محاسبه شده از انرژی جنبشی آشفتگی) است. از این روش در بسیاری از پژوهش‌های پیشین در مورد جریان‌های دریایی استفاده شده است [23, 26, 27] و پژوهش‌های کمی با استفاده از این روش برای تخمین تنش برشی در جریان در رودخانه‌ها استفاده شده است. پژوهش‌های پیشین نشان داد که $c_1 = 0.19$ است [28].

از آنجایی که طبق پژوهش‌های انجام شده با استفاده از ADV میزان نویز وارد شده به داده‌ها در جهت عمق کانال (Z) کمتر است. رابطه (۵) برای تخمین تنش برشی وارد بر کف ارایه شده است [23, 29].

$$\tau_w' = c_2[\rho(w'^2)] \quad (5)$$

که $c_2 = 0.9$ می‌باشد [۲۳]. شکل‌های (۶ الف- ج) نشان‌دهنده تغییرات تنش برشی وارد بر کف در طول کانال با استفاده از هر سه روش ارایه شده در بالا است. در این شکل τ_{up} تنش برشی وارد بر کف در بالادست آبشکن است در محلی که تحت تاثیر آبشکن نیست. توزیع تنش برشی وارد بر کف در اطراف آبشکن، به وسیله‌ی سه روش ارایه شده در بالا یکسان است. تنش برشی وارد بر کف در بالادست آبشکن و در منطقه‌ای که تحت تاثیر آبشکن قرار ندارد تغییرات چندانی نمی‌کند. با نزدیک شدن جریان به آبشکن، تنش برشی وارد بر کف افزایش می‌یابد و نقاط پر تنش در اطراف آبشکن و در مرز بین جریان عبوری از اطراف آن و جریان بازگشتی در پایین دست آبشکن توسعه می‌یابد. بیشینه تنش برشی وارد بر کف (τ_{tke} و τ_{re}) حدود ۴ برابر تنش برشی وارد شده بر کف در بالادست کانال می‌باشد که با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشین هم

۵- مراجع

the initiation of the erosion and deposition process." *Water Resources Research*, 44(8),2008, W08406.

[۱۹] خسروی مشیزی؛ مجتبی؛ (۱۳۹۰)؛ بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبستگی پیرامون آبشکن T شکل مستغرق در قوس ۹۰ درجه؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۰.

[20] Song, T., and Chiew, Y. M. (2001). "Turbulent measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic Doppler velocimeter(ADV)." *Journal of Engineering Mechanics*, 127(3), 219–232.

[21] Nikora, V., and Goring, D. (2000). "Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(9), 679–690.

[22] Soulsby, R.L. (1983). "The bottom boundary-layer in shelf seas." In *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Areas*, Elsevier: Amsterdam, 189–266.

[23] Kim, S. C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P. Y, Wright, L. D. "Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126(6), 2000, 399–406.

[24] Biron, P.M., Robson, C., Lapointe, M.F., and Gaskin, S.J. "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flowfields." *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(11), 2004, 1403–1415.

[25] Bagherimeyab, F. Albayrak, I. and Lemmin, U. "Bed shear velocity estimates in rough open-channel flow obtained from Acoustic Doppler Velocity Profiler data and direct bed shear stress measurements." *Proceeding of River flow 2008 conference*, Cesme, Turkey.

[26] Williams, J. J., Rose, C. P., Thorne, P. D, O'Connor, B. A, Humphery, J. D, Hardcastle, P. J, Moores, S. P, Cooke, J. A., and Wilson, D. J. "Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions." *Continental Shelf Research*, 19, 1999, 507–536.

[27] Huthnance, J. M, Humphery, J. D., Knight, P. J, Chatwin, P. G, Thomsen, L., and White, M. "Near-bed turbulence measurements, stress estimates and sediment mobility at the continental shelf edge." *Progress in Oceanography*, 52, 2 2002, 171–194.

[28] Stapleton, K.R., Huntley D.A. (1995). "Seabed stress determination using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method." *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 2005, 807–815.

[29] Voulgaris, B., Trowbridge, J.H. "Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 15, 1998, 272–289.

[۳۰] نوربخش؛ سید ماجد؛ مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبستگی پیرامون آبشکن مستغرق در مسیر مستقیم؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۰.

[1] Kuhnle, R. A., Jia, Y., and Alonso, C. V. "Measured and simulated flow near a submerged spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(7), 2008, 916–924.

[2] Muste, M., Yu, I., Fujita, K., and Ettema, R. "Two phase versus mixed-flow perspective on suspended sediment transport in turbulent channel flows." *Water Resources Research*, 41, W10402.

[3] Duan J. G. "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike." *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), 2009, 803–811.

[4] Duan, J., Li, H. E, Wang, G., Fu, X. "Turbulent burst around experimental spur dike." *International Journal of Sediment Research*, 2011, 28(4), 471-523.

[5] Duan, J., He, L., Fu, X. and Wang, Q. "Mean flow and turbulence around experimental spur dike." *Advances in Water Resources*, 32(12), 1717-1725.

[6] Elawady, E., Mansanori, M. "Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 44, 2000, 539-544.

[7] Elawady, E., Mansanori, M. "Movable bed scour around submerged spur-dikes." *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 45, 2001, 373-378.

[8] Dey, S., Barbhuiya, A. K. "Velocity and turbulent in a scour hole at a vertical-wall abutment." *Flow Measurement and Instruments*. 17(1), 2006, 13–21.

[9] Nezu, I., Nakagawa H. *Turbulent in open-channel flow*. IAHR Monograph Series, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1993, Publisher: Taylor and Francis.

[10] Bridge, J.S., and Bennett, S.J.. "A model for entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes and densities." *Water Resources Research*, 28(2), 1992, 337–363.

[11] Thorne P. D., Williams J. J., and Heathershaw A. D. "In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport." *Sedimentology*, 36(1), 1989, 61–74.

[12] Cuthbertson, A. J. S., Irvine, D. A. "Experimental study of fine particle settling in turbulent open channel flows over rough porous beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 2005, 905–916.

[13] Bey, A. Faruque M. A. A., and Balachandar, R.. "Two-dimensional scour hole problem: Role of fluid structures." *Jour of Hydraulic Engineering*, 133(4), 2007, 414–430.

[14] Marchioli, C., Soldati, A. "Mechanisms for particle transfer and segregation in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 468, 2002, 283–315.

[15] Nelson, J. M., Shreve R. L., Mclean S. R., and Drake T. G. (1995). "Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics." *Water Resources Research*, 31(8), 2071–2086.

[16] Goring, D. and Nikora, V. " Despiking acoustic dopplervelocimeter data." *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 2002, 117–126.

[17] Yaeger, M. A.. Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes. Msc thesis, 2009, University of Arizona.

[18] Koken, M., Constantinescu, G. "An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 1. Conditions corresponding to