

بررسی آزمایشگاهی ساختار تلاطم پرش هیدرولیکی مستغرق در کانال واگرای تدریجی با بستر زبر

ساجده حاجی عزیزی^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، اکرم عباس پور^۳ و هادی ارونقی^۴

چکیده

در این تحقیق مشخصات آشفتگی جریان در طول پرش هیدرولیکی مستغرق روی بستر زبر در حوضچه آرامش با دیواره‌های واگرا به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک کانال مستطیلی افقی با عرض ۰/۵ متر و طول ۱۰ متر با دیواره‌های واگرا انجام گرفت. سه مدل آزمایشگاهی در فلوم با زبری‌های مکعب-مستطیلی با ارتفاع‌های ۱/۴ و ۲/۸ سانتی‌متر واقع در بستر کانال اجرا شد. نسبت‌های واگرایی ۱، ۰/۶ و ۰/۴ با فاکتورهای استغراق ۱/۲۵، ۱/۳۸ و ۱/۵۲ مورد مطالعه قرار گرفت. برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت از دستگاه سرعت‌سنج صوتی ADV ساخت Nortek نوژ با فرکانس ۲۵ هرتز استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی شامل توزیع متوسط زمانی مؤلفه‌های سرعت، مؤلفه‌های شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدزی تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع زبری‌های کف و کاهش نسبت واگرایی دیواره‌های حوضچه، به طور متوسط موجب افزایش ۵۲ درصدی نرخ رشد لایه مرزی، افزایش ۴۷ درصدی تنش برشی و افت انرژی و کاهش ۴۳ درصدی طول ناحیه کاملاً توسعه‌یافته می‌شود. بررسی مؤلفه‌های $\bar{u}$ و $\bar{v}$ نیز مؤکد افت انرژی قابل توجه در پرش و وجود جریان‌های قوی برگشتی بود. مقایسه مقادیر مؤلفه‌های افقی، عمودی و عرضی شدت آشفتگی نیز نشان داد که کمترین نرخ پخش پرش در راستای عرضی است.

واژه‌های کلیدی: بستر زبر، پرش هیدرولیکی، ساختار تلاطم، واگرایی تدریجی.

ارجاع: حاجی عزیزی س. فرسادی زاده د. عباس پور ا. و ارونقی ه. ۱۴۰۱. بررسی آزمایشگاهی ساختار تلاطم پرش هیدرولیکی مستغرق در کانال واگرای تدریجی با بستر زبر. مجله پژوهش آب ایران. ۴۶: ۳۹-۵۰. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13852.2395>

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: sajedah.azizi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

مقدمه

همواره کنترل انرژی در جریان‌های با سرعت بالا جزو مهم‌ترین دغدغه مهندسان هیدرولیک بوده‌است. معمولاً جریان خروجی از سازه‌هایی مانند سرریز سدها، تندآب‌ها، دریچه‌ها و... دارای سرعت بالایی بوده و استفاده از سازه‌ای برای استهلاک انرژی و کاهش سرعت جریان به منظور حفاظت از تأسیسات پایین‌دست ضروری است. ساخت حوضچه‌های آرامش و ایجاد پرش هیدرولیکی در این سازه‌ها یکی از اساسی‌ترین روش‌های استهلاک انرژی جریان است. در طول پرش هیدرولیکی ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، سرعت جریان به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود. شدت تلاطم ایجادشده در طول پرش هیدرولیکی نیز از پارامترهای تأثیرگذار در توزیع تنش‌های برشی و سرعت و در نتیجه استهلاک انرژی است؛ به همین دلیل این پارامتر در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. اولین اندازه‌گیری‌های سرعت روی بستر زیر توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) انجام گرفت. او در این مطالعات پروفیل سرعت در ناحیه جریان جلورونده را برای مقاطع مختلف پرش اندازه‌گیری کرده و به این نتیجه رسید که در ناحیه اختلاط آزاد، زبری‌ها تأثیر محسوسی بر پروفیل سرعت نمی‌گذارند. کیرونوتو و گراف (۱۹۹۵) به بررسی توزیع آشفتگی و سرعت متوسط در جریان غیریکنواخت و یکنواخت در کانال باز با بستر زیر پرداخته و دریافتند که مقادیر شدت‌های آشفتگی و تنش‌های رینولدزی در جریان تندشونده کمتر از جریان یکنواخت است. سانگ و گراف (۱۹۹۴) با اندازه‌گیری سرعت و پارامترهای آشفتگی به مطالعه جریان‌های غیریکنواخت روی بستر زیر پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده توسط این محققان در زمینه وقوع حداکثر سرعت، نیم‌رخ سرعت در ناحیه داخلی جریان و پیروی آن از قانون لگاریتمی مشابه با نتایج مطالعه کیرونوتو و گراف (۱۹۹۵) بود. بررسی پارامترهای سرعت، شدت تلاطم و تنش‌های رینولدزی توسط لیو و همکاران (۲۰۰۴) برای اعداد فرود کوچک ۲، ۵/۲ و ۳/۳۲ نشان داد که متوسط سرعت‌های عمودی بسیار کوچک‌تر از متوسط سرعت‌های طولی هستند. یانگ و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی مؤلفه‌های سرعت در یک جریان تندشونده پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سرعت‌های عمودی غیرصفر سبب

اضافه‌شدن یک عبارت مومنتوم و انحراف نیم‌رخ‌های تنش برشی رینولدز از توزیع خطی رایج در جریان‌های دو بُعدی شد. در مطالعه اسلام و همکاران (۲۰۰۷) بررسی بردارهای متوسط زمانی سرعت نشان داد که با حرکت به سمت پایین‌دست بردارهای سرعت کاملاً افقی شده‌اند. تحلیل شدت‌های آشفتگی بی‌بعد افقی و عمودی مشخص کرد هر دو پارامتر در ابتدای پرش دارای مقادیر حداکثر خود بوده و با حرکت به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابند. مطالعه دی و سرکار (۲۰۰۸) در میدان جریان یک پرش مستغرق با ضرایب استغراق ۰/۹۶ تا ۱/۸۵ و اعداد فرود ۲/۵۸ تا ۴/۸۷ روی بسترهای افقی زیر نشان داد که نرخ استهلاک سرعت خروجی جت در یک پرش مستغرق با افزایش زبری بستر افزایش می‌یابد. حبیب‌زاده و همکاران (۲۰۱۱) میدان جریان را در پرش هیدرولیکی مستغرق با بلوک‌های میانی برای اعداد فرود ۳/۳ تا ۷ و عامل استغراق ۰/۲ تا ۲/۶۷ مطالعه کردند. بررسی‌ها نشان داد شدت‌های تلاطم عمودی و افقی در نزدیکی بستر شدت بیشتری داشته و تنش‌های رینولدزی در لایه برشی ایجادشده توسط جت دیواره در نزدیکی بستر رخ می‌دهد. دمیرل (۲۰۱۵) ساختار تلاطم جریان پایین‌دست دریچه در پرش هیدرولیکی مستغرق را مورد مطالعه قرار داد. نتایج گویای این بود که آشفتگی به‌طور قابل توجهی در نزدیکی بازشدگی دریچه افزایش می‌یابد. وی همچنین دریافت مقادیر تنش برشی رینولدزی و سرعت متوسط جریان در نزدیکی بستر مثبت بوده و با افزایش عمق آب به دلیل اثرات جریان برگشتی کاهش می‌یابند. جاسودس و همکاران (۲۰۱۸) به‌صورت عددی میدان جریان آشفتۀ یک پرش هیدرولیکی کلاسیک را مطالعه کرده و دریافتند که لایه برشی ایجادشده توسط جت دیواره در جهت عمودی منبسط شده، به سطح آزاد رسیده و باعث بروز موج‌های شدید و شکستن سطح آزاد می‌شود. وانگ و جانسون (۲۰۱۹) به بررسی نوسانات سرعت در پرش هیدرولیکی شبه دو بُعدی در اعداد فرود بالا پرداخته و به این نتیجه رسیدند که در جهت وجود نوسانات مؤلفه سرعت عرضی، میدان ساختار تلاطم ماهیتی سه بُعدی دارد. کرامر و والرو (۲۰۲۰) تنش‌های برشی، پارامترهای آشفتگی و نوسانات سرعت را برای یک پرش هیدرولیکی پایدار بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اندازه‌گیری سری‌های زمانی سرعت و مقادیر آشفتگی در نزدیکی

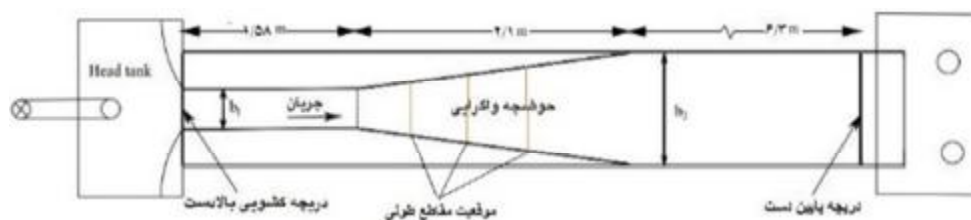
هیدرولیکی جریان و مشخصات هندسی بستر، مشخصات ساختار تلاطم در حوضچه آرامش با استفاده از ابزار دقیق در مدل آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و در شرایط هیدرولیکی مختلف مورد بحث قرار گرفته‌است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شده‌است. دیواره‌های فلوم شفاف و از جنس شیشه بوده و حوضچه آرامش در فاصله ۱/۵۸ متری از دریچه بالادست قرار گرفته بود. در این آزمایش‌ها ارتفاع بازشدگی دریچه کشویی موجود در ابتدای فلوم در همه آزمایش‌ها ثابت (۲/۱ سانتی‌متر) بوده و تغییرات عدد فرود اولیه با تغییر دبی و هد آب داخل مخزن صورت گرفت. به‌منظور ایجاد واگرایی تدریجی از ورق‌های پلکسی‌گلس با طول ۲/۱ متر و ارتفاع ۰/۵ متر استفاده شد. در این مطالعه نسبت‌های واگرایی (b_1/b_2) ۰/۶، ۰/۴ و ۰/۳ به ترتیب برای عرض‌های ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۲ متر در مقطع بالادست کانال در نظر گرفته شد (شکل ۱).

دیواره جانبی با خطا همراه است؛ اما می‌توان با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی جدید میدان داخلی جریان‌های دوفازی را بررسی کرد. بررسی تأثیر زبری بستر بر تنش‌های رینولدزی و شدت آشفتگی توسط شجاعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد با افزایش زبری بستر، شدت آشفتگی مؤلفه‌های W و u در فواصل طولی متناظر از جت افزایش یافته‌است. تنش برشی بستر نیز با افزایش فاصله از جت، کاهش و با افزایش زبری بستر، افزایش یافته‌است. طالب‌محمدی (۱۳۹۷) به بررسی تأثیر آشفتگی بر توزیع سرعت، شکل‌گیری گردابه‌ها و پارامترهای آشفتگی در پرش هیدرولیکی مستغرق در حوضچه انتهایی سرریز اوجی شکل همراه با بلوک‌های کف پرداخته و گزارش کرد که با افزایش عدد فرود بالادست، قدرت جریان ثانویه و در نتیجه بازده و انرژی جنبشی آشفتگی افزایش یافت.

براساس بررسی منابع صورت‌گرفته می‌توان مشاهده کرد که تحلیل ساختار تلاطم جریان در حوضچه آرامش واگرا با بستر زبر از نظرها دور مانده‌است؛ بنابراین در مطالعه حاضر تأثیر زبری‌های مصنوعی روی کف حوضچه با واگرایی تدریجی مقطع، بر ساختار تلاطم جریان مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بدین‌منظور با تغییر شرایط



شکل ۱- طرح شماتیک و مدل اجرایی آزمایشگاهی

تنظیم و درنهایت با محاسبه مقادیر ارتفاع آب در پایاب و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، مقادیر درجه استغراق محاسبه شد. برای اندازه‌گیری توزیع سرعت جریان و

اجزای زبر از جنس پلی‌اتیلن، با مقطع عمود بر جریان به شکل لوزی، در دو ارتفاع ۱/۴ و ۲/۸ سانتی‌متر ساخته شدند. به‌وسیله دریچه پایین‌دست فلوم میزان استغراق

در فاصله مشخصی از بستر به صفر می‌رسد، در بخش فوقانی نیز شاهد مقادیر منفی سرعت به دلیل وجود جریان‌های برگشتی هستیم. همچنین می‌توان اشاره کرد در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره است، به طوری که با افزایش فاصله طولی از ابتدای پرش، لایه مرزی رشد کرده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد.

در شکل‌های ۳ تا ۶ که نشان‌دهنده توزیع عمودی $\bar{u}$ در مقابل $\hat{x}$ هستند، به منظور درک بهتر نمودار مقادیر $(u = u_{max})$ و $(u = 0)$ و $(u = u'_{max})$ نیز مشخص شده است. قابل ذکر است u'_{max} نشان‌دهنده مقادیر سرعت ماکزیمم در پرش کلاسیک است، مطابق با تصاویر در حرکت به سمت پایین دست، تلاطم جریان کمتر و توزیع‌ها یکنواخت‌تر شده که این نشان‌دهنده افت انرژی در طول پرش هیدرولیکی است. همچنین با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نرخ رشد لایه مرزی نیز افزایش یافته است. با توجه به تمرکز کامل اثر گرانشی سیال در این لایه، این رشد باعث افزایش تنش برشی و در نهایت افزایش نرخ استهلاك انرژی می‌شود. همچنین می‌توان از این شکل‌ها دریافت که با افزایش ارتفاع نسبی زبری‌ها و کاهش نسبت واگرایی، طول ناحیه کاملاً توسعه یافته کاهش یافته است؛ به نحوی که می‌توان فاصله طولی برخورد نمودار $(u = 0)$ با سطح آزاد آب را تقریباً برابر با طول ناحیه کاملاً توسعه یافته دانست. راجاراتنام (۱۹۶۸) نیز در مطالعات خود با بررسی تغییرات در پروفیل سطح آزاد جریان، همسو با تحقیق حاضر به کاهش طول ناحیه کاملاً توسعه یافته اشاره کرده است.

در توزیع متوسط زمانی سرعت عمودی $(\bar{v} = v/U)$ در شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان مشاهده کرد که با حرکت به پایین دست، در جهت نمودارهای سرعت در راستای $(\hat{x})$ به دلیل جریان‌های گردابی بالای جت ورودی تغییر می‌کند. با مقایسه نمودارها و بررسی دقیق میدان جریان روی بستر زبر، مشاهده شد که با افزایش ارتفاع اجزای زبر، حرکت رو به بالای جریان قبل از ناحیه بازسازی (منتهی‌الیه ناحیه کاملاً توسعه یافته) به صورت قابل توجهی تقویت شده است. همچنین در نزدیکی دریچه بالادست، حرکت رو به پایین جریان (مقادیر منفی $\bar{v}$) نشان‌دهنده یک غلطاب سطحی قوی در این ناحیه است.

پروفیل سرعت، از دستگاه سرعت‌سنج صوتی ADV ساخت Nortek نروژ با فرکانس ۲۵ هرتز استفاده شد که مقادیر سرعت لحظه‌ای را در زمان‌های مختلف ثبت کرده و در نتیجه، سری‌های زمانی سرعت در محل‌های مورد نظر به دست آمد. با کنترل دو پارامتر همبستگی (COR) و نسبت سیگنال به نویز (SNR) صحت و کیفیت داده‌های برداشتی در حین آزمایش بررسی شد. در هر آزمایش پس از رسیدن جریان به عمق مطلوب و ثابت ماندن عمق‌ها نسبت به زمان، برداشت پروفیل‌های سرعت در مقاطع مورد نظر انجام گرفت. جدول ۱ شامل اطلاعات هندسی و هیدرولیکی این مطالعه است.

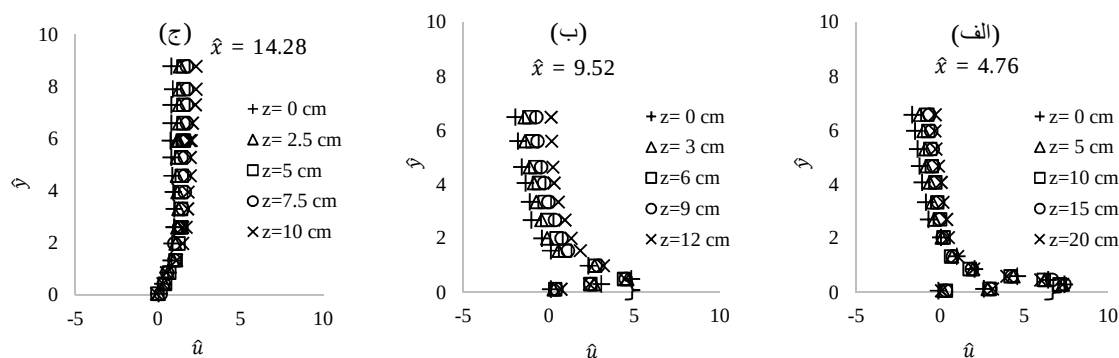
جدول ۱- مقادیر و مشخصات متغیرهای مطالعه

مشخصات بستر	پرش کلاسیک		
	بستر صاف/زبر با دیواره واگرا		
مشخصات زبری‌ها (cm)	طول	عرض	ارتفاع
	۲/۸	۲/۸	۲/۸-۱/۴
بازه دبی (l/s)	۱۲/۱-۳۵/۴		
بازه اعداد فرود	۳-۷		
نسبت‌های استغراق	۱/۵۲ و ۱/۳۸، ۱/۲۵		

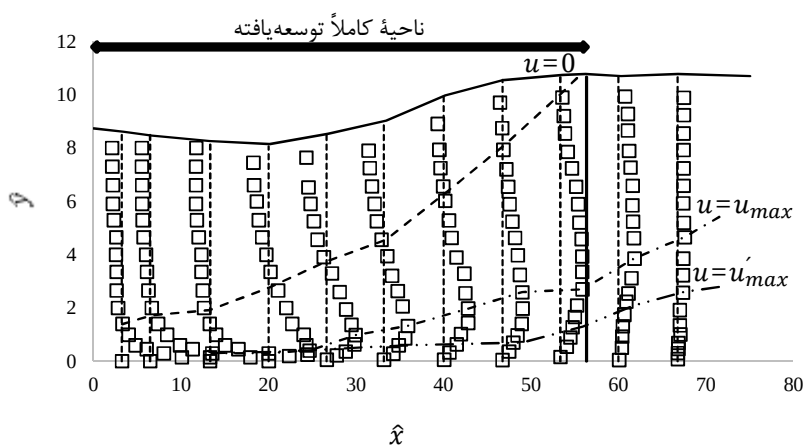
نتایج و بحث

توزیع سرعت

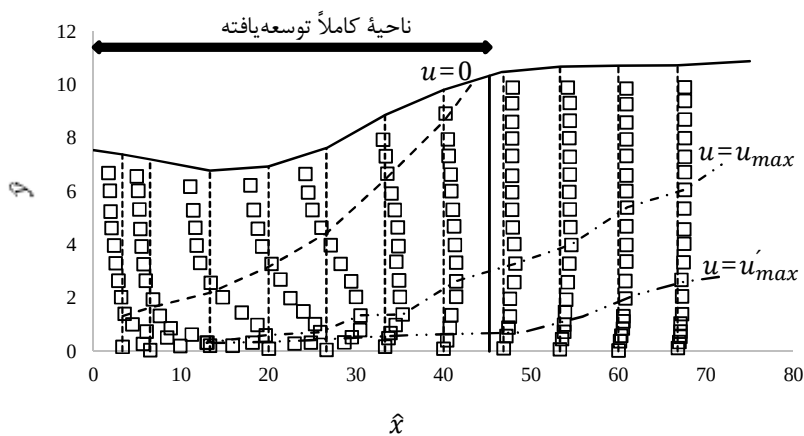
ابتدا به منظور بررسی دوبعدی جریان در صفحه بی‌بعد $(\hat{x}\hat{y})$ ، در شکل ۲ توزیع عمودی بی‌بعد متوسط زمانی سرعت افقی $(\hat{u} = u/U)$ در مقابل $(\hat{y} = y/h)$ در مقاطع طولی بی‌بعد مختلف $(\hat{x} = x/h)$ در نسبت‌های واگرایی ۱، ۰/۴ و ۰/۶، برای بستر با زبری نسبی ۱/۳۳ در درجه استغراق ۱/۲۵ ترسیم شده است. در این روابط h میزان بازشدگی دریچه بالادست، U سرعت جریان ورودی، x فاصله طولی از دریچه بالادست، y عمق در مقطع مورد نظر و z فاصله از محور مرکزی کانال است. مطابق با نمودارها، لایه لغزشی ایجاد شده در کف بستر باعث کندی سرعت در لایه جداری شده، به نحوی که پروفیل‌های سرعت (الف) و (ب) دارای دو بخش متمایز هستند. بخش تحتانی با جریان به طرف جلو و بخش فوقانی با سرعت منفی. در بخش تحتانی پروفیل سرعت در نزدیکی بستر دارای سرعت صفر و در فاصله δ (بخش لایه مرزی) به حداکثر مقدار خود رسیده، سپس تدریجاً کاهش یافته و



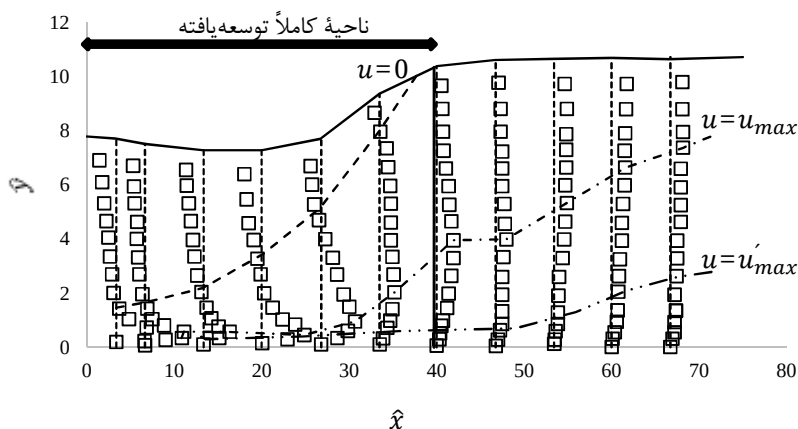
شکل ۲- توزیع عمودی $\hat{u}$ در درجه استغراق ۱/۲۵ و زبری نسبی ۱/۳۳ در: الف) نسبت واگرایی ۱، ب) نسبت واگرایی ۰/۶، ج) نسبت واگرایی ۰/۴



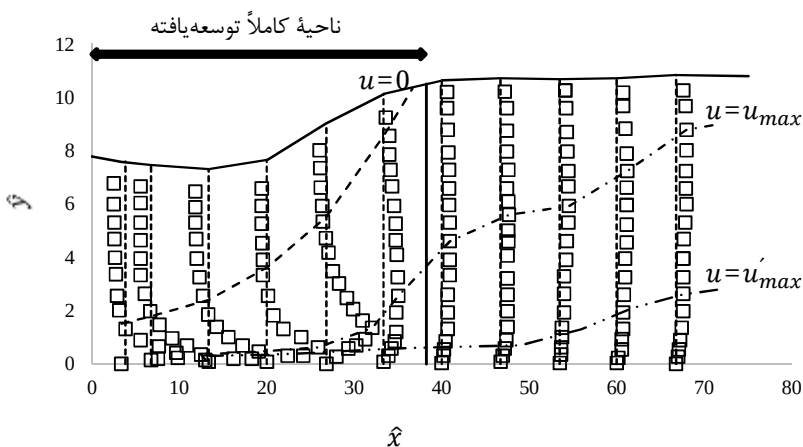
شکل ۳- توزیع عمودی $\hat{u}$ در نسبت واگرایی ۰/۶، زبری نسبی ۰/۶۷ و درجه استغراق ۱/۲۵



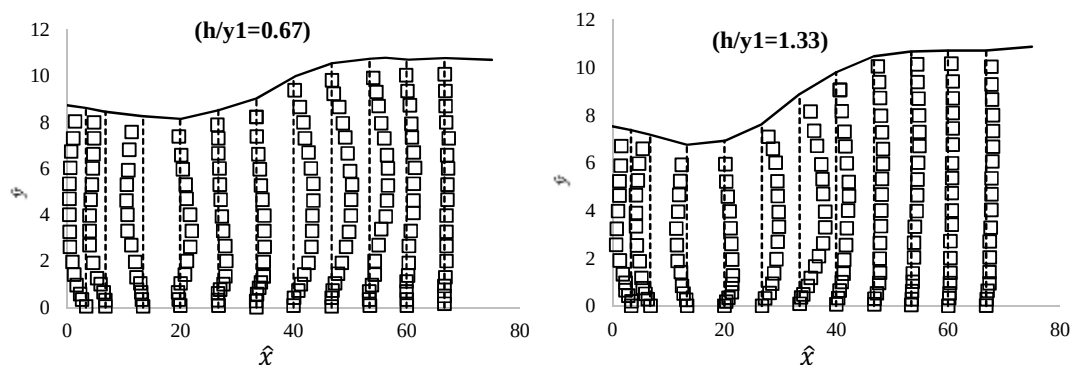
شکل ۴- توزیع عمودی $\hat{u}$ در نسبت واگرایی ۰/۶، زبری نسبی ۱/۳۳ و درجه استغراق ۱/۲۵



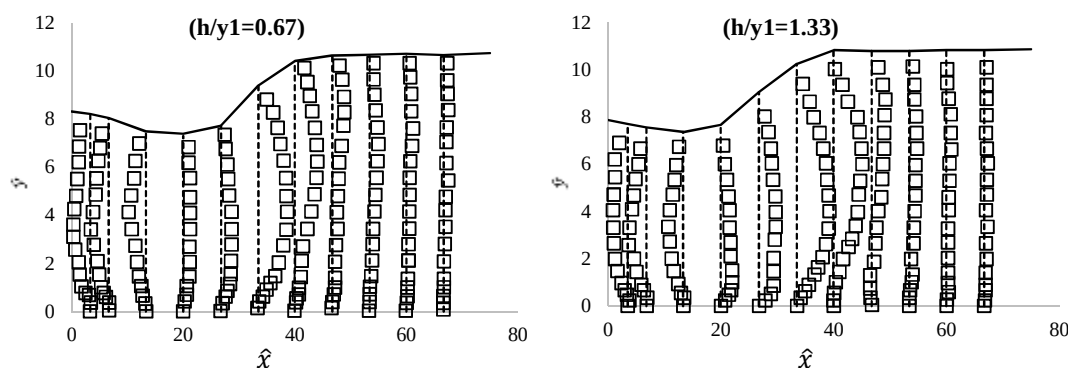
شکل ۵- توزیع عمودی $\hat{u}$ در نسبت واگرایی ۰/۴، زبری نسبی ۰/۶۷ و درجه استغراق ۱/۲۵



شکل ۶- توزیع عمودی $\hat{u}$ در نسبت واگرایی ۰/۴، زبری نسبی ۱/۳۳ و درجه استغراق ۱/۲۵



شکل ۷- توزیع عمودی $\hat{v}$ در نسبت واگرایی ۰/۶ و درجه استغراق ۱/۳۸

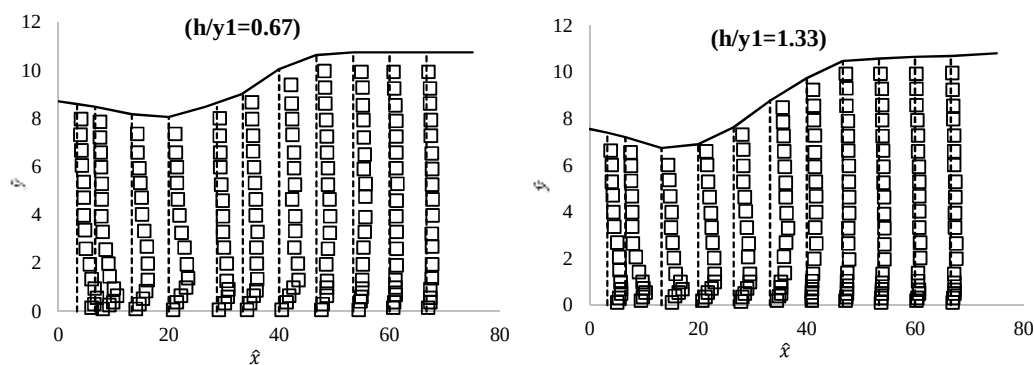


شکل ۸- توزیع عمودی $\hat{v}$ در نسبت واگرایی ۰/۴ و درجه استغراق ۱/۳۸

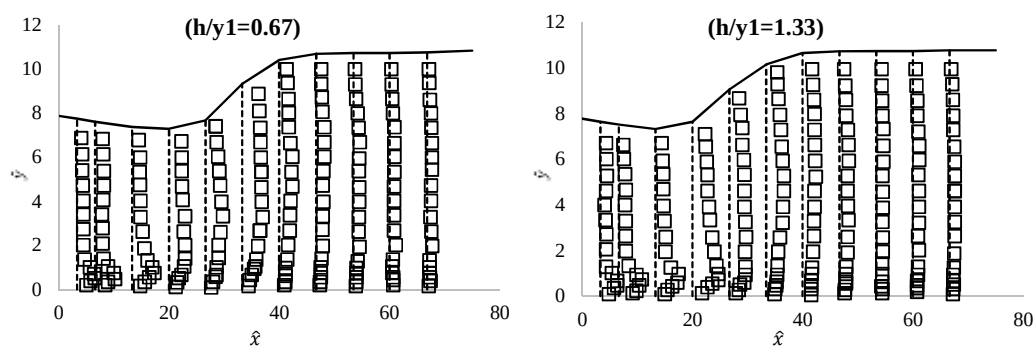
کششی افزایش یافته است. درباره مؤلفه v^+ نیز با حرکت به سمت سطح آزاد آب به دلیل وجود جریان‌های برگشتی عمودی، شاهد رشد آن هستیم. در نزدیکی دریچه بالادست تغییرات مؤلفه‌های u^+ و v^+ تقریباً مشابه است؛ اما به‌طور کلی شدت آشفتگی u^+ بیشتر از v^+ بوده است. در مطالعه شجاعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) نیز مشخص شد که شدت تغییرات u^+ نسبت به v^+ بیشتر و به تبع آن نرخ پخش جت در راستای افقی بیشتر از راستای عمودی است.

توزیع شدت آشفتگی

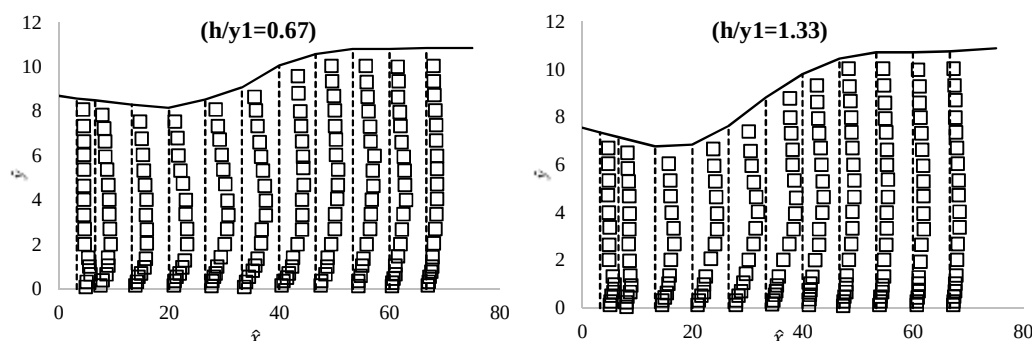
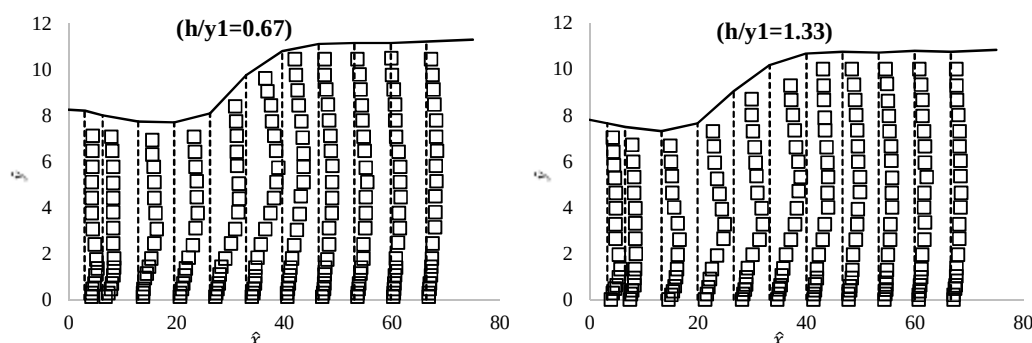
در شکل‌های ۹ و ۱۰، توزیع مؤلفه افقی شدت آشفتگی $(u^+ = (\sqrt{u'u'})/U)$ و در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، توزیع مؤلفه عمودی شدت آشفتگی $(v^+ = (\sqrt{v'v'})/U)$ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان شاهد تأثیر زبری‌ها و واگرایی تدریجی دیواره‌ها بر u^+ در نزدیکی کف کانال بود؛ به نحوی که در ناحیه کاملاً توسعه یافته با افزایش ارتفاع نسبی زبری‌ها و کاهش نسبت واگرایی، مقادیر این مؤلفه در نزدیکی بستر به دلیل افزایش نیروی



شکل ۹- توزیع عمودی u^+ در نسبت واگرایی ۰/۶ و درجه استغراق ۱/۲۵



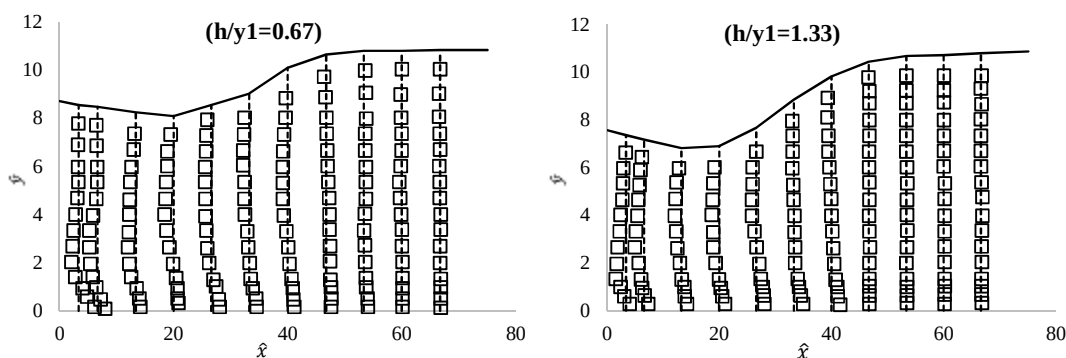
شکل ۱۰- توزیع عمودی u^+ در نسبت واگرایی ۰/۴ و درجه استغراق ۱/۲۵

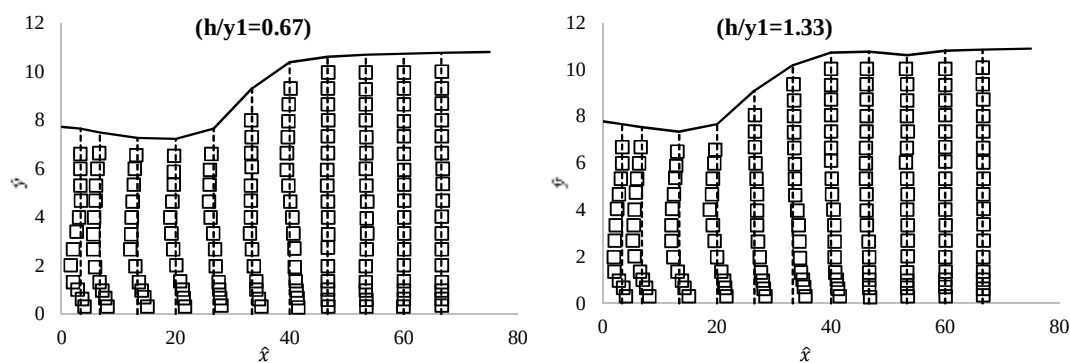
شکل ۱۱- توزیع عمودی v^+ در نسبت واگرایی ۰/۶ و درجه استغراق ۱/۳۸شکل ۱۲- توزیع عمودی v^+ در نسبت واگرایی ۰/۴ و درجه استغراق ۱/۳۸

کاهش یافته، به نحوی که خارج از این ناحیه، توزیع آن کاملاً یکنواخت است. این نتایج در همخوانی کامل با نتایج ارائه شده توسط طالب محمدی (۱۳۹۷) است. همچنین با توجه به شکل‌ها می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع نسبی زبری‌ها و کاهش نسبت واگرایی دیواره‌ها، مقادیر منفی بیشینه uv^+ نیز افزایش می‌یابد. یعنی با افزایش ارتفاع زبری و کاهش واگرایی، تنش رینولدزی و در نتیجه آن، آشفته‌گی افزایش می‌یابد.

تنش رینولدزی

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، توزیع عمودی بی‌بعد شده تنش رینولدزی $(uv^+ = (-\overline{u'v'})/U^2)$ مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها، تنش رینولدزی uv^+ در نزدیکی بستر به دلیل جت جریان ورودی مثبت بوده؛ اما در فاصله کمی به شدت کاهش یافته و منفی می‌شود که دلیل آن را می‌توان به وجود جریان‌های برگشتی نسبت داد. با حرکت به سمت انتهای ناحیه توسعه یافته تغییرات شدید uv^+ به تدریج

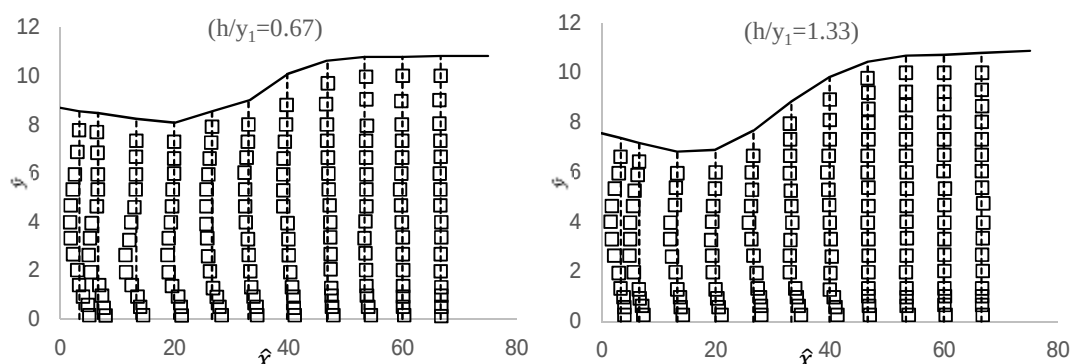
شکل ۱۳- توزیع عمودی uv^+ در نسبت واگرایی ۰/۶ و درجه استغراق ۱/۲۵



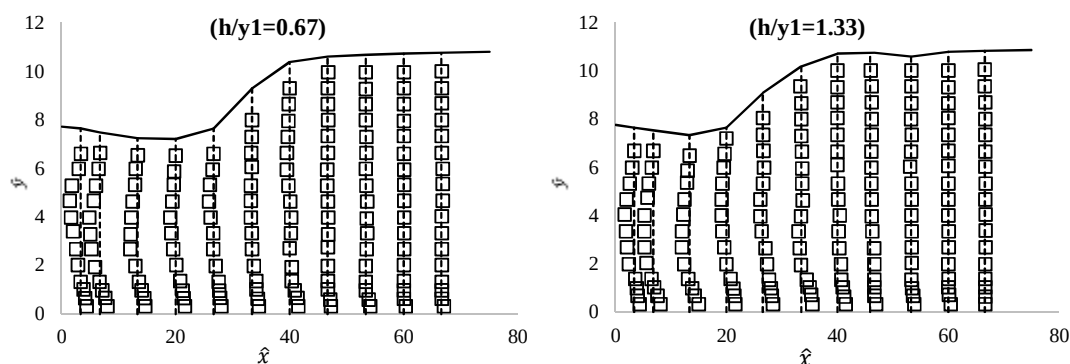
شکل ۱۴- توزیع عمودی uv^+ در نسبت واگرایی ۰/۴ و درجه استغراق ۱/۲۵

پیک منفی را چندان تحت تأثیر قرار نداده‌اند. روند تغییرات uw^+ در تحقیق حاضر با مطالعه انجام شده توسط شجاعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) مشابه است؛ به نحوی که در مطالعه ایشان نیز ابتدا این مؤلفه در نزدیکی بستر مقداری مثبت داشته، ناگهان تغییر جهت داده و منفی شده که علت آن جریان برگشتی در محدوده نزدیک جت بوده و سپس این پیک منفی با فاصله گرفتن از جت، از بین می‌رود.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، توزیع عمودی بی‌بعد تنش رینولدزی $(uw^+ = (-\overline{u'w'})/U^2)$ بررسی شده است. تغییر رفتار مشاهده شده در توزیع تنش رینولدزی uv^+ در این شکل‌ها نیز قابل مشاهده است. خارج از بازه $x = 0 - 45$ که تقریباً معادل با طول ناحیه توسعه یافته است، توزیع این مؤلفه نیز یکنواخت شده است. همچنین با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که افزایش ارتفاع نسبی اجزای زبر بستر و کاهش نسبت واگرایی دیواره‌ها مقادیر



شکل ۱۵- توزیع عمودی uw^+ در نسبت واگرایی ۰/۶ و درجه استغراق ۱/۳۸

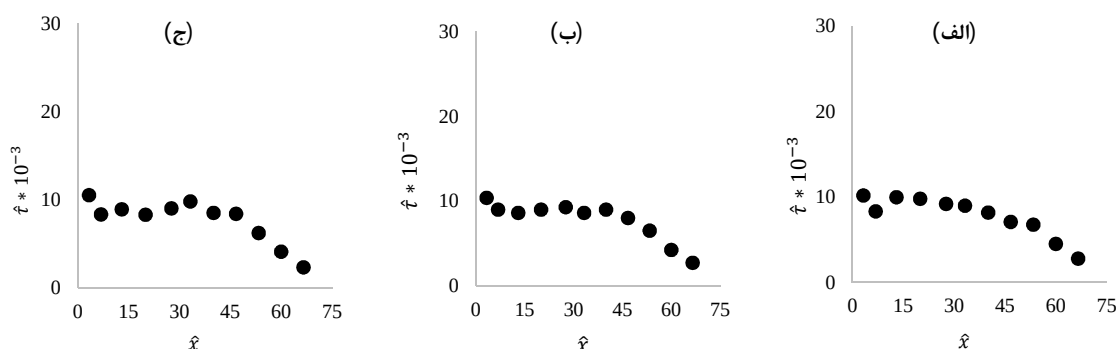


شکل ۱۶- توزیع عمودی uw^+ در نسبت واگرایی ۰/۴ و درجه استغراق ۱/۳۸

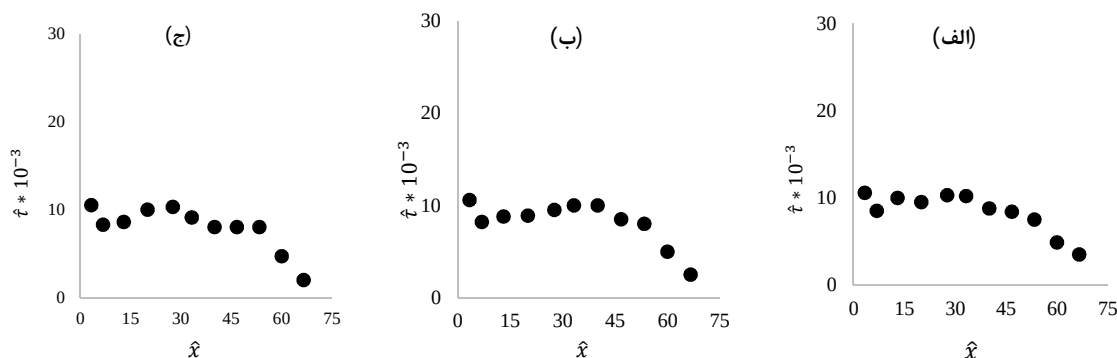
تنش برشی بستر

توزیع افقی تنش برشی بی‌بعد بستر ($\hat{\tau} = \tau/(\rho U^2)$) در محور مرکزی کانال و در شرایط مختلف از نظر واگرایی تدریجی دیواره‌ها و زبری کف کانال در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که روند تغییرات تنش برشی در همه حالات مشابه بوده، به‌نحوی که با افزایش فاصله از ابتدای پرش و کاهش سرعت جت ورودی، مقادیر آن کاهش یافته‌است. این یافته‌ها با نتایج ارائه‌شده توسط طالب‌محمدی (۱۳۹۷) و شجاعی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی داشته و در

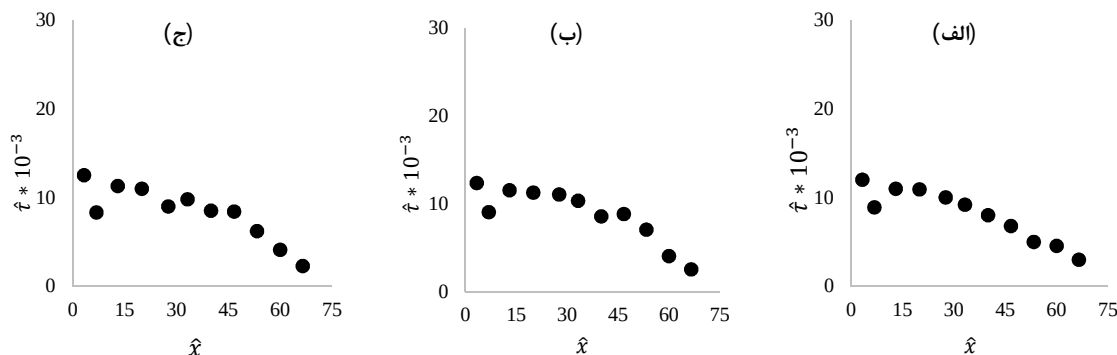
مطالعات ایشان نیز روند کاهشی مقادیر تنش برشی در طول کانال با افزایش فاصله از ورودی جت مشاهده شد. همچنین به‌دلیل وجود اجزای زبر کف و جریان‌های گردابی تشکیل شده مابین آن‌ها و همین‌طور کاهش نسبت واگرایی و افزایش تلاطم ناشی از آن، شاهد افزایش مقدار تنش برشی بی‌بعد بستر بودیم، به‌نحوی که این روند با افزایش ارتفاع اجزای زبر و کاهش نسبت واگرایی دیواره‌ها تشدید شده و به‌طور متوسط موجب افزایش ۴۷ درصدی این پارامتر نسبت به پرش کلاسیک شد.



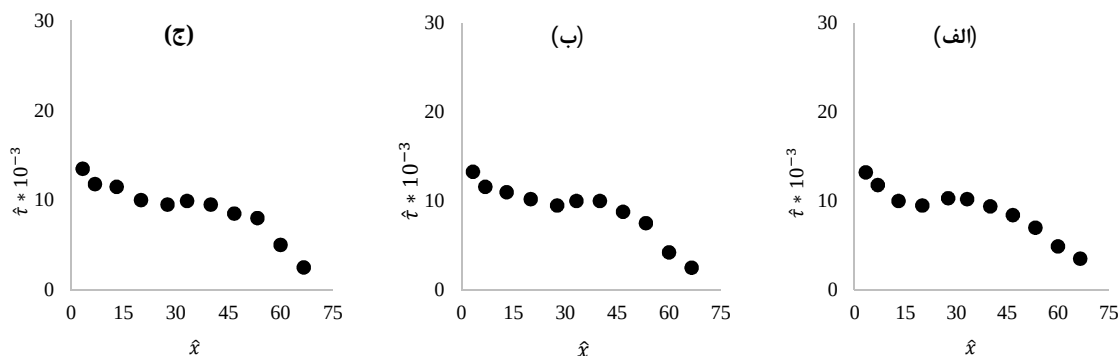
شکل ۱۷- توزیع افقی مقادیر $\hat{\tau}$ در مقابل $\hat{x}$ در نسبت واگرایی ۰/۶، زبری نسبی ۰/۶۷ و درجه استغراق: الف) ۱/۲۵، ب) ۱/۳۸، ج) ۱/۵۲



شکل ۱۸- توزیع افقی مقادیر $\hat{\tau}$ در مقابل $\hat{x}$ در نسبت واگرایی ۰/۶، زبری نسبی ۱/۳۳ و درجه استغراق: الف) ۱/۲۵، ب) ۱/۳۸، ج) ۱/۵۲



شکل ۱۹- توزیع افقی مقادیر $\hat{\tau}$ در مقابل $\hat{x}$ در نسبت واگرایی ۰/۴، زبری نسبی ۰/۶۷ و درجه استغراق: الف) ۱/۲۵، ب) ۱/۳۸، ج) ۱/۵۲



شکل ۲۰- توزیع افقی مقادیر $\hat{t}$ در مقابل $\hat{x}$ در نسبت واگرایی ۰/۴، زبری نسبی ۱/۳۳ و درجه استغراق: الف) ۱/۲۵، ب) ۱/۳۸ و ج) ۱/۵۲

نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان نتایج حاصل از تحقیق حاضر را به‌صورت زیر خلاصه کرد.

- با حرکت به سمت دیواره و پایین‌دست کانال، توزیع مؤلفه $\hat{u}$ یکنواخت‌تر شده که این نشان‌دهنده افت انرژی در طول پرش هیدرولیکی بوده و با کاهش نسبت واگرایی و افزایش ارتفاع نسبی زبری مقادیر بیشینه این مؤلفه در عمق بیشتری (افزایش ضخامت لایه مرزی) نسبت به کف کانال اتفاق می‌افتد.

- با افزایش ارتفاع اجزای زیر نرخ رشد لایه مرزی افزایش یافته که این خود باعث افزایش تنش برشی و در نهایت افزایش افت انرژی شد.

- با افزایش ارتفاع اجزای زیر و کاهش نسبت واگرایی، طول ناحیه کاملاً توسعه یافته کاهش یافته است.

- با افزایش ارتفاع اجزای زیر و کاهش نسبت واگرایی، مقادیر مؤلفه $\hat{v}$ به‌خصوص در ناحیه کاملاً توسعه یافته، افزایش یافت.

- مقادیر مؤلفه u^+ با افزایش ارتفاع نسبی اجزای زیر و کاهش نسبت واگرایی، در نزدیکی بستر به دلیل افزایش نیروی کششی افزایش یافت.

- شدت تغییرات u^+ نسبت به v^+ بیشتر و به تبع آن نرخ پخش جت در راستای افقی بیشتر از راستای عمودی است.

- افزایش ارتفاع زبری و کاهش واگرایی، تنش رینولدزی uv^+ و در نتیجه آشفتگی را افزایش داده، اما مقادیر تنش رینولدزی uw^+ را چندان تحت تأثیر قرار نمی‌دهند.

- مقادیر تنش برشی بستر ($\hat{\tau}$) با افزایش فاصله از ابتدای پرش، کاهش و با کاهش نسبت واگرایی و افزایش ارتفاع اجزای زیر، افزایش می‌یابد.

منابع

۱. شجاعی‌زاده ع، قدسیان م، صالحی نیشابوری ع، و صفرازه ا. ۱۳۹۲. بررسی آثار زبری بستر بر پارامترهای آشفتگی جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی. مجله مهندسی عمران مدرس، ۱۳(۲): ۹۵-۱۰۴.
۲. طالب‌محمدی ن. ۱۳۹۷. بررسی خصوصیات جریان و ساختار تلاطم در پرش هیدرولیکی مستغرق در حوضچه آرامش. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
3. Demirel D. 2015. Measured and simulated flow downstream of the submerged sluice gate. Water and Environment Journal. 29(3): 446-455.
4. Dey S. and Sarkar A. 2008. Characteristics of turbulent flow in submerged jumps on rough beds. Journal of Engineering Mechanics. 134(1): 49-59.
5. Habibzadeh A. Wu S. Ade F. Rajaratnam N. and Loewen M.R. 2011. Exploratory study of submerged hydraulic jump with blocks. Journal of Hydraulic Engineering. 137(6): 706-710.
6. Islam Z. Riad T. and El-Daly M. 2007. Turbulence structure downstream of a forced hydraulic jump. PhD course project. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.
7. Jesudhas V. Balachandar R. Roussinova V. and Barron R. 2018. Turbulence Characteristics of Classical Hydraulic Jump Using DES. Journal of Hydraulic Engineering. 144(6): 1-15.
8. Kironoto B. and Graf W. H. 1995. Turbulence characteristics in rough non-uniform open channel flow. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Maritime and Energy. 112(4): 336-348.
9. Kramer M. and Valero D. 2020. Turbulence and self-similarity in highly aerated shear flows: The stable hydraulic jump. International Journal of Multiphase Flow. 129(16): 316-327.

10. Liu M. Rajaratnam N. and Zhu D. Z. 2004. Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(6): 511-520.
11. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of Engineering Institute of Canada*. 11(A-2): 1-8.
12. Song T. and Graf W. H. 1994. Non-uniform open-channel flow over rough bed, *Journal of Hydraulics and Hydraulic Engineering*. 12(1): 1-25.
13. Wang H. and Chanson H. 2019. Characterization of transverse turbulent motion in quasi-two-dimensional aerated flow: Application of four-point air-water flow measurements in hydraulic jump. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 100(9): 222-232.
14. Yang S. Q. Xu W. L. and Yu G. L. 2006. Velocity distribution in a gradually accelerating free surface flow. *Advances in Water Resources*. 29(12): 1969-1980.