

بررسی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب- هوا در پرش هیدرولیکی تحت تأثیر پوشش گیاهی انعطاف‌ناپذیر

عاطفه عادل^۱، جواد احدیان^{۲*}، مهدی قمشی^۳، منوچهر فتحی مقدم^۴

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳ و ۴. استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۳/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۵/۲۵)

چکیده

پرش هیدرولیکی نوعی پدیده پیچیده سه‌بعدی است که به‌وفور در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز دیده می‌شود. مقاومت هیدرولیکی گیاهان کارکرد زیادی در هیدرودینامیک رودخانه‌ها با دشت‌های سیلابی طبیعی گسترده دارد. پوشش گیاهی به میدان جریان نفوذ می‌کند و باعث ایجاد نیروی مقاوم و در پی آن، اتلاف انرژی می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی اثر تراکم و ارتفاع پوشش، بر هیدرولیک جریان در پرش هیدرولیکی و پارامترهای مربوط به جریان دوفازی آب- هوا با استفاده از المان‌های استوانه‌ای شکل از جنس آهن گالوانیزه با قطر همگون ۷ میلی‌متر به‌عنوان پوشش گیاهی است. به این ترتیب، تأثیرات همراه با تنوع پوشش و یا خم شدن در نظر گرفته نمی‌شوند. به این منظور، چهار فرم بستر زبر، در دو حالت زبری پیوسته و غیر پیوسته و با دو ارتفاع ۱/۵ و ۳ سانتی‌متر استفاده شده و نتایج با داده‌های مربوط به بستر صاف به‌عنوان مرجع، مقایسه شد. آزمایش‌های مورد نیاز این مطالعه در فلومی مستطیلی افقی با عرض ۳۰ سانتی‌متر، در محدوده اعداد فرود بین $0.5 < Fr_1 < 1.5$ انجام شد. اندازه‌گیری و تعیین پارامترهای مشخصه مربوط به جریان آب- هوا، توسط دستگاه پروب الکتریکی دو سوزنی که در این تحقیق طراحی، توسعه و واسنجی شده است، انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد وجود پوشش در کف کانال موجب افزایش هوادهی از طریق افزایش جزء خالی در طول غلتاب پرش شده و از طرفی، با افزایش نیروی مقاوم و تنش برشی در بستر سبب کاهش اعماق مزدوج و طول غلتاب پرش می‌شود؛ که این افزایش و کاهش، بسته به مقدار عدد فرود و ارتفاع و تراکم زبری‌ها است.

کلیدواژگان: پرش هیدرولیکی، پروب رسانای دو سوزنی، پوشش گیاهی غیر منعطف، جریان آب - هوا.

مقدمه

پرش هیدرولیکی وقتی اتفاق می‌افتد که جریان فوق بحرانی (با عمق کم و سرعت زیاد) به جریان زیربحرانی (با عمق زیاد و سرعت کم) انتقال یابد [۱]. پدیده پرش هیدرولیکی، در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز، هنگام عبور از زیر یک دریچه، تغییر ناگهانی شیب آبراهه از شیب تند به شیب ملایم در طول نسبتاً کوتاه اتفاق می‌افتد. در نتیجه این جریان، عمق در فاصله کوتاهی افزایش می‌یابد و از میزان سرعت جریان کاسته می‌شود. هنگامی که جریان با سرعت زیاد به توده آب در حال حرکت با سرعت کم برخورد می‌کند، ابتدا جریان با سرعت زیاد در زیر توده آب حرکت می‌کند و سپس، به سمت سطح آب پخش و گسترش می‌یابد. این عمل موجب تلاطم و پیدایش گرداب‌ها در داخل و غلتاب‌ها در سطح آب می‌شود. غلتاب‌ها به‌طور پیوسته در سطح آزاد پرش تشکیل می‌شوند، توسعه پیدا می‌کنند و در تعامل با سطح آزاد به دلیل اصطکاک برشی بین آب‌وهوا در سطح، یک لایه هوا که در نزدیکی سطح آزاد شکل گرفته است، وارد غلتاب جریان می‌شوند. سپس، یک توده هوا، به‌عنوان حفره تهویه در ناپیوستگی عمق آب ایجاد می‌شود [۲ و ۳]. ورود هوا در فرم حباب‌های هوا و بسته‌های هوا^۱ در برخورد جریان جت بالادست با غلتاب و جریان معکوس در نزدیکی پای پرش، توده‌های هوا را فشرده می‌کند و توده‌ها تحت فشار به بسته‌های هوا تبدیل می‌شوند. سپس، بسته‌های هوا را به جریان برشی پایین‌دست رها می‌کند [۴]. بسته‌های هوا هنگام ورود به ناحیه لایه برشی توربولنت (که حاوی بیشترین میزان شمارش حباب هوا است) به‌سرعت شکسته شده و به حباب‌های هوا تبدیل می‌شوند. بیشتر حباب‌ها درون ساختارهای بزرگ گردابی در جهت جریان جابه‌جا می‌شوند. انتشار فرارفت حباب‌های هوا تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شناور شدن^۲، آشفتنگی و از بین رفتن^۳ آن قرار دارد. هر دو پروسه ورود و دفع هوا^۴ در سطح آزاد غلتاب رخ می‌دهد. هوا در تلاطم‌هایی در مقیاس بزرگ در نزدیکی سطح آزاد آب توسعه پیدا می‌کنند، به دام می‌افتند و حباب‌های هوای وارد شده به پای پرش بعد از فرارفت به ناحیه جریان برشی، به تدریج در جو رها می‌شوند [۵]. نوسان‌های قابل توجه سطح آب یک منطقه، جریان دو فاز را بالاتر از ارتفاع متوسط آب، با

میانگین زمانی مقدار هوا معمولاً بالاتر از ۵۰ درصد مشخص می‌کند. مرز فوقانی این ناحیه در ارتفاع ۷۹٪ جایی که غلظت هوا به ۹۰ درصد می‌رسد، در نظر گرفته شده است [۶]. این ارتفاع مشخص گاهی به‌عنوان سطح بالایی غلتان پرش در نظر گرفته می‌شود.

پرش هیدرولیکی نوعی پدیده پیچیده سه‌بعدی است که مشخصه آن اختلاط شدید توربولنت، توسعه ورتکس‌ها در مقیاس بزرگ، هوادهی و هواگیری در سطح آزاد غلتاب، ورود حباب هوا و برهم‌کنش بین حباب‌های هوا و ساختارهای توربولنت است و همچنان چالشی برای مهندسان، دانشمندان و محققان به شمار می‌رود. از این‌رو، با توجه به ورود هوا در پرش هیدرولیکی، ارزیابی پارامترهای مشخصه جریان آب-هوا در کنار پارامترهای دیگر جریان، به درک بهتر شرایط و پیچیدگی‌های آن کمک می‌کند. از طرفی، وجود موانع در مسیر حرکت جریان، موجب جداسازی جت جریان ورودی و افزایش میزان استهلاك انرژی می‌شود که در نتیجه آن، تنش برشی افزایش و به‌تبع آن، طول پرش کاهش می‌یابد. همچنین، وجود زبری در بستر، از طریق ایجاد نیروی اصطکاکی در کف کانال، منجر به کاهش مومنتم و نیز کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شوند.

پیشینه تحقیق

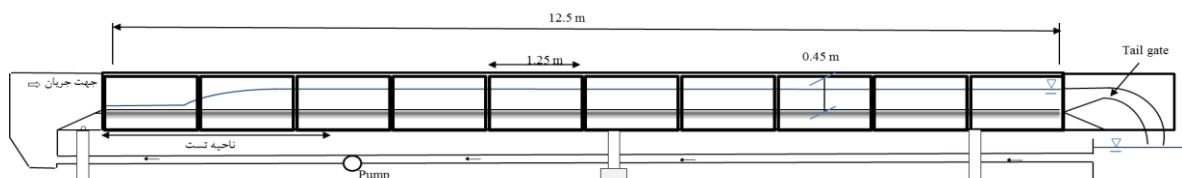
تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه پرش هیدرولیکی، استخراج روابط و بررسی مشخصه‌های جریان در پرش هیدرولیکی در هر دو فرم بستر صاف و زبر صورت گرفته است [۱، ۷-۱۰]. جریان در پرش هیدرولیکی از نوع جریان دوفازی آب-هوا است، بنابراین برای درک بهتر پیچیدگی‌ها و اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به این نوع جریان، محققان نیازمند ابزارهای مناسب بودند. ابتدا به وسیله ابزارهای اندازه‌گیری مثل هات فیلم [۱۱]، لیزر داپلر [۱۲] و سپس، با ابداع دستگاه‌های اندازه‌گیری پیشرفته‌تر مثل کاوشگر فیبر نوری [۱۳] و کاوشگرهای الکتریکی تک‌سر [۱۴] و یا دوسر [۱۴] تحقیقات در این زمینه توسعه یافت. کاوشگر الکتریکی که اولین بار در مخلوط جیوه و حباب‌های نیتروژن به کار برده شد [۱۵]، در گذر زمان با بالاتر رفتن سطح دقت، بهبود عملکرد و کاهش محدودیت‌های استفاده از آن، تکامل یافته‌تر شد. به طوری که در حال حاضر دقیق‌ترین وسیله در خصوص اندازه‌گیری پارامترهای جریان آب-هوا مثل توزیع بخش خالی، میزان شمارش حباب هوا، خوشه‌بندی و هوادهی،

1. Air Pocket
2. Buoyancy
3. Dissipation
4. Aeration and De-aeration

آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه کوئینزلند استرالیا بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد زبری در بستر موجب حرکت پای پرش به سمت بالادست، کاهش نسبت اعماق مزدوج از طریق افزایش نیروی مقاوم و افزایش پارامترهای مربوط به هوادهی می‌شود. در ادامه و در تکمیل تحقیقات فلدر و چانسون، بهمن‌پوری (۲۰۱۹) در فلوم مشابه به بررسی زبری‌هایی از جنس سنگ با قطر متوسط متفاوت در محدوده اعداد فرود بین $5 < Fr_1 < 1/5$ پرداخت. نتایج پژوهش ایشان نشان داد شکل‌گیری ساختارهای عمودی و جریان‌های برگشتی بیشتر در طول غلتاب پرش است. در تحلیل نتایج بصری نشان داده شد که نوسانات پای پرش در بستر زبر بیشتر از بستر صاف بود. همچنین، داده‌های برداشتی از کاوشگر دوسوزنی نشان داد زبری‌ها در بستر منجر به کاهش طول منطقه هوادهی و نوسانات سطح آزاد کوچک‌تر می‌شود که نشان‌دهنده میزان بیشتر اتلاف انرژی است. این تحقیقات آزمایشگاهی فقط مطالعات صورت‌گرفته در خصوص اثرات زبری بر جریان آب- هوا در کف کانال بوده است. برای اولین بار در این تحقیق به بررسی اثرات زبری‌های گیاهی روی الگوی جریان دوفازی آب- هوا و مشخصه‌های پرش هیدرولیکی پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

کلیه آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق، در آزمایشگاه مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو، در فلومی مستطیلی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، طول ۱۲/۵ متر و عرض ۴۵ سانتی‌متر در محدوده اعداد فرود بین $5 < Fr_1 < 1/5$ انجام شده است. در شکل ۱ مقطع فلوم استفاده‌شده، نشان داده شده است.



شکل ۱. مقطع فلوم آزمایشگاهی

میلگردها گالوانیزه شدند. در انجام آزمایش‌ها ۵ فرم بستر در نظر گرفته شده، یک بستر صاف و ۴ فرم بستر زبر که عبارت‌اند از:
 ۱. RB_۱ میله‌ها با ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر با پوشش پیوسته و متراکم؛

کاوشگر الکتریکی دوسوزنی است [۱۶]. بررسی پارامترهای جریان آب- هوا در تحقیقات مختلف با دامنه اعداد فرود و رینولدز متفاوت مطالعه و بررسی شده، اما مطالعات انجام‌شده در خصوص بررسی جریان آب- هوا روی بستر زبر بسیار محدود است. در این مورد پاگلیارا و همکاران [۱۷] مشخصات جریان دوفازی را روی بستر زبر از جنس سنگ‌های درشت بیرون‌زده اندازه‌گیری کرده و سپس، نتایج به‌دست‌آمده روی بستر زبر را با بستر صاف مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد زبری‌های استفاده‌شده در کف بر پروفیل غلظت هوا تأثیر گذاشته و ورود هوا به جریان را افزایش داده است. یک سال بعد و در ادامه تحقیق قبلی، پاگلیارا و همکاران [۱۸] برای تشدید زبری بستر از سنگ‌های زاویه‌دار خردشده و تخته‌سنگ‌های نیم‌کره استفاده کردند و نتایج مربوط به جریان دوفازی روی بستر زبر را با داده‌های مربوط به سرریز پلکانی در شرایط جریان مشابه مقایسه کردند و نشان دادند بیشترین شدت تلاطم با غوطه‌وری نسبی کاهش می‌یابد، در حالی که توزیع فرکانس حباب توسط شکل عناصر بستر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. آنها در سال ۲۰۱۵ [۱۹] طی یک نوآوری، مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله ورود هوا به جریان، در شیب معکوس با بسترهای زبر و اثر حباب‌های هوا بر اعماق مزدوج را بررسی کردند. علاوه بر این، یک رابطه نیمه‌نظری به منظور تخمین ویژگی‌های پرش برای طیف وسیعی از شرایط هیدرولیکی و هندسی که هر دو بستر زبر و صاف را پوشش می‌دهد، ارائه دادند. پس از آن، فلدر و چانسون (۲۰۱۶) [۲۰] جریان آب- هوا در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر با دو پیکربندی متفاوت از زبری‌هایی از جنس پلاستیک در محدوده اعداد فرود بین $6/5 < Fr_1 < 1/5$ را در

برای ایجاد پوشش گیاهی از استوانه‌های غیر منعطفی از جنس آهن استفاده شد. ابتدا میلگردهای صاف آهنی به قطر ۷ میلی‌متر تهیه شد. سپس، برش‌هایی به ارتفاع ۱/۵ و ۳ سانتی‌متر استخراج شد و نظر به اینکه مورد استفاده میله‌ها در آب بود، برای جلوگیری از اکسیداسیون آهن، تمامی

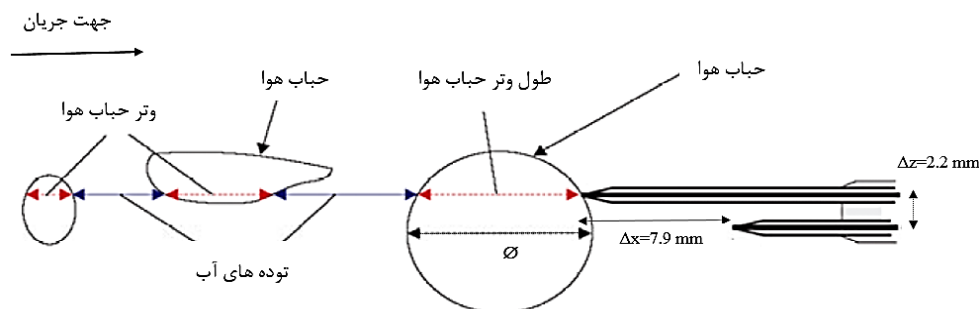
فاصله ثابت $x_1=0/9$ m از پایین دست دریچه ابتدایی فلوم قرار گرفت. پس از پایداری شرایط مشخصه‌های اصلی جریان در پرش اندازه‌گیری و پارامترهای مربوط به جریان دوفازی آب-هوا، در خط مرکزی فلوم آزمایشگاهی و در ۷ مقطع عمود بر کانال به فواصل طولی متفاوت از پای پرش $(x - x_1)$ اندازه‌گیری شد. این ۷ مقطع به ترتیب در فاصله ۵، ۷، ۱۲، ۲۰، ۲۵، ۳۵ و ۵۵ سانتی‌متری از پایین دست پای پرش قرار داشتند. در نزدیکی پای پرش به علت ورود هوا، فواصل کوتاه‌تر و با دور شدن از آن، فواصل طولی افزایش یافت. در هر یک از مقاطع کاوشگر در پایین‌ترین تراز در نزدیکی کف کانال ثابت شد و در راستای عمودی به فواصل مشخص حرکت کرد تا داده‌های مربوط به غلظت در هر تراز اندازه‌گیری شوند. در هر مقطع بسته به ارتفاع آب در ۱۵ تا ۳۵ نقطه و به مدت ۹۰ ثانیه برای هر نقطه، داده‌برداری انجام شده است.

۲. RB_۲ میله‌ها با ارتفاع ۳ سانتی‌متر با پوشش پیوسته و متراکم؛

۳. RB_۳ میله‌ها با ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر با پوشش غیر پیوسته و غیرمتراکم؛

۴. RB_۴ میله‌ها با ارتفاع ۳ سانتی‌متر با پوشش غیر پیوسته و غیرمتراکم.

در پوشش‌های پیوسته با آرایش منظم در طول ۲/۷۵ متر از پایین دست دریچه ابتدایی فلوم، فاصله طولی و عرضی ۴/۷ سانتی‌متر و در پوشش‌های ناپیوسته با آرایش زیگزاگ فاصله طولی و عرضی ۹/۴ سانتی‌متر بود. میله‌ها در کف و روی صفحه پلاگسی گلاس که با سیستم لیزری و دقیق سوراخ شده بود، جایگذاری شدند. پس از نصب استوانه‌های غیر منعطف، از مخزن بالادست نرخ ثابت جریان در فلوم برقرار شد و از طریق یک دریچه کشویی در پایین دست ناحیه آزمون و خروجی جریان، پای پرش در تمام آزمایش‌ها در



شکل ۲. طرح و عملکرد دستگاه پروب دوسوزنی

شکل آنالوگ به دیتا لاگری که در مسیر مدار قرار دارد، می‌فرستند. این ولتاژ پس از عبور از تقویت‌کننده جریان با اتصال به برد آنالوگ به دیجیتال تعبیه شده در دیتا لاگر و با فرکانس مشخص اندازه‌گیری و به شکل قابل خوانش برای کامپیوتر تبدیل می‌شود. برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب برای تحلیل سیگنال‌های دریافتی و استخراج پارامترهای مشخصه جریان آب-هوا نوشته شده است. پروب فرکانس ۲۰ کیلوهرتز را برای ۹۰ ثانیه اسکن می‌کند. تحقیقات گذشته نشان داده است که فرکانس بالای ۲۰ کیلوهرتز و زمان نمونه‌برداری بیشتر از ۹۰ ثانیه اثری روی پارامترهای جریان آب‌وهوا ندارد [۲۱]. در ساخت پروب فاصله نوک سوزن‌ها بهینه‌ترین فاصله به دست آمده بر اساس تحقیقات فلدر و چانسون [۲۰] در راستای افق برابر با ۷/۹ میلی‌متر و در راستای عمود ۲/۲ میلی‌متر انتخاب شد.

اساس اندازه‌گیری این نوع پروب، اختلاف در هدایت الکتریکی فاز مایع و گاز است. در مورد آب‌وهوا، هدایت الکتریکی آب هزار بار از هوا بیشتر است. در شکل ۲ نمای ساده‌ای از مراحل برخورد حباب با پروب دوسوزنی نشان داده شده است. با برخورد حباب به سوزن، سطح حباب به میزان ناچیزی تغییر شکل می‌دهد و سپس، سوزن وارد حباب می‌شود. پس از ورود کامل نوک سوزن به داخل حباب، سطح ولتاژ کاملاً به سطح ولتاژ هوا می‌رسد و پس از عبور حباب و برخورد دوباره سوزن با مایع، ولتاژ به سطح اولیه ولتاژ مایع باز می‌گردد. بنابراین، با انتخاب سطح آستانه بین ولتاژ مایع و گاز، می‌توان هر دو فاز را در سیگنال خروجی از پروب شناسایی کرد. پس از قرارگیری پروب در مسیر جریان، برای اعمال ولتاژ به نوک سوزن‌ها از یک سیگنال ژنراتور استفاده شد. نوک سوزن‌ها که در جریان آب-هوا قرار گرفته‌اند، بسته به اینکه در کدام فاز آب و یا هوا قرار دارند، ولتاژی را به

تئوری

یک پرش هیدرولیکی به منزله نوعی ناپیوستگی از نظر مؤلفه‌های سرعت و فشار در پای پرش است. شکل انتگرالی اصول پیوستگی و مومنتم در پرش با روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$Q_w = V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2 \quad (1)$$

$$(2)$$

$$\rho \times Q_w \times (\beta_2 \times V_2 - \beta_1 \times V_1) = \iint_{A_1} P \times dA - \iint_{A_2} P \times dA - F_{fric} + W_f \times \sin \theta$$

که در آن Q دبی جریان، d و v به ترتیب عمق و سرعت جریان، ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل، A مساحت مقطع جریان، β ضریب اصلاح مومنتم، p فشار و زیر نویس ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به شرایط جریان بالادست و پایین دست است. عبارتهای سمت راست معادله به ترتیب نیروهای هیدرو استاتیک فشار در بالادست و پایین دست، F_{fric} نیروی مقاوم، W_f نیروی وزن (θ زاویه بین شیب بستر و افق). در یک کانال مستطیل شکل افقی، از حل معادله مومنتم و پیوستگی رابطه‌ای به شکل زیر حاصل می‌شود (رابطه ۳) [۲۲]:

$$(3)$$

$$Fr_1^2 = \frac{1}{2} \times \frac{d_2}{d_1} \times \left(\left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\frac{d_2}{d_1} - 1} \times \frac{F_{fric}}{\rho \times g \times B \times d_1^2} \right)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود در بالادست پرش، d_1 و d_2 به ترتیب اعماق پرش در بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی و B

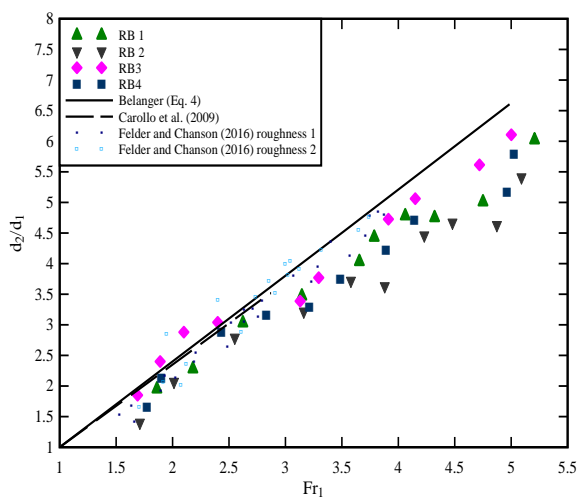
عرض کانال هستند. در این رابطه عدد فرود بالادست تابعی از نسبت اعماق مزدوج (d_2/d_1) و نیروی مقاوم جریان (F_{fric}) است. مطابق رابطه ۳، برای عدد فرود بالادست ثابت، زبری در بستر باعث افزایش مقاوم جریان و در نتیجه، کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شود. در صورتی که کانال مستطیلی و بستر آن صاف باشد، نیروی مقاوم جریان برابر با صفر است و رابطه ۳ به شکل کلاسیک رابطه بلانگر تبدیل می‌شود (رابطه ۴).

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (4)$$

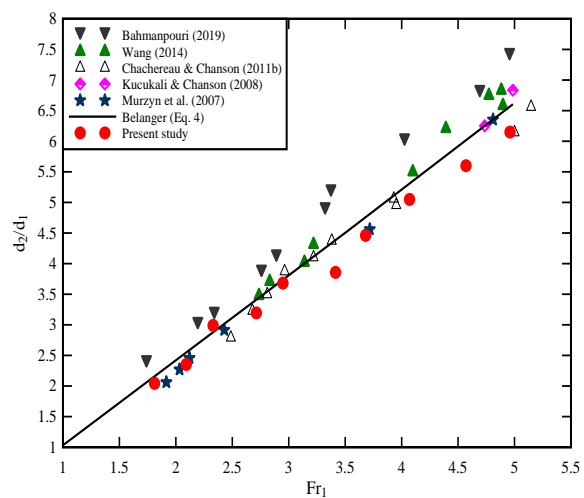
یافته‌ها

اعماق مزدوج

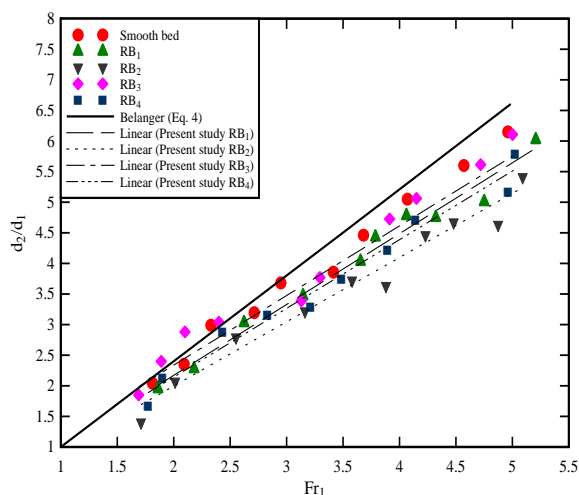
برای بررسی تأثیر اجزای زبر بر نسبت اعماق مزدوج (d_2/d_1)، داده‌های مربوط به آن در برابر عدد فرود جریان ورودی (Fr_1) ترسیم شده است. به منظور ارزیابی دقت و صحت آزمایش‌های انجام شده، آزمایش‌هایی روی بستر صاف انجام گرفت که در مقایسه با تحقیقات پیشین [۵، ۲۳-۲۶] و رابطه بلانگر [۱] تطابق خوبی دارد (شکل ۳ قسمت الف). در قسمت ب شکل ۳ داده‌های مربوط به بسترهای زبر در ۴ فرم بستر و در قیاس با تحقیقات پیشین [۲۰ و ۲۷] و رابطه بلانگر نشان داده شده است. با توجه به اینکه عمق اولیه با توجه به ثابت بودن پای پرش، در فاصله اندکی از بالادست پای پرش و در نقطه m $x_1=0/8$ و عمق ثانویه در پایین دست انتهایی غلتاب پرش اندازه‌گیری شد، برای هر شرایط جریان متفاوت بود.



ب. بستر زبر



الف. بستر صاف



ج. دو فرم بستر صاف و زبر
شکل ۳. مقایسه نسبت اعماق مزدوج

یکنواخت تا تراز سطح آب در پایین دست افزایش می یابد [۲۸]. در اینجا L_r از میانگین پروفیل های سطح آزاد مشاهده شده مشتق شده است. برای بررسی تأثیر زبری های موجود در کف، پارامتر طول غلتاب بدون بعد L_r/d_1 در شکل ۴ به عنوان تابعی از عدد فرود جریان ورودی Fr_1 در هر دو فرم بستر صاف و زبر را در مقایسه با مطالعات قبلی و نتایج تحقیقات انجام شده روی بستر صاف [۵، ۲۳، ۲۶ و ۲۸] و بستر زبر [۲۷] و همچنین، رابطه تجربی و خطی بین طول نسبی غلتاب و مقدار عدد فرود جریان ورودی ارائه شده توسط وانگ [۵] (رابطه ۶) نشان داده شده است.

$$\frac{L_r}{d_1} = 6(Fr_1 - 1) \quad (6)$$

با توجه به مشاهده بصری، حداکثر ارتفاع غلتاب حدود ۱۰-۲۰ درصد بیشتر از عمق جریان پایین دست بود. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، داده های مربوط به بستر زبر پایین تر از داده های مربوط به بستر صاف قرار دارند که نشان می دهد طول غلتاب پرش روی بستر زبر کمتر از طول آن بر بستر صاف است. در واقع، افزایش زبری موجب کاهش طول غلتاب شده است. با در نظر گرفتن رابطه ۶ برای بستر صاف و با استفاده از داده های به دست آمده، معادله ای تجربی برای تعیین مقدار طول غلتاب به واسطه عدد فرود جریان ورودی و زبری نسبی استخراج شده است:

$$\frac{L_r}{d_1} = 6(Fr_1 - 1)^{(1 - 0.34 \frac{k_s}{d_1})} \quad (7)$$

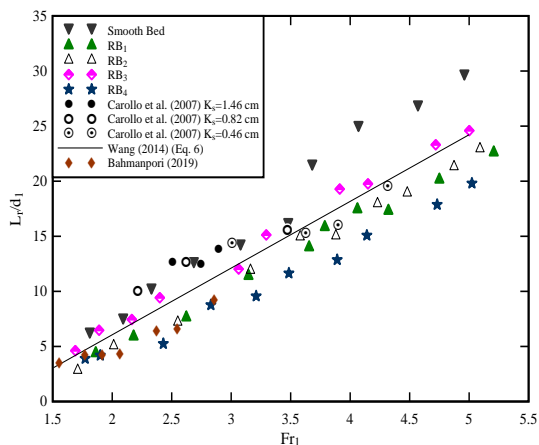
در قسمت ج شکل ۳ داده های مربوط به ۴ فرم بستر زبر در مقایسه با داده های مربوط به بستر صاف و رابطه بلانگر رسم و برای بسترهای زبر خط روند برازش داده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، داده های مربوط به بسترهای زبر پایین تر از داده های مربوط به بستر صاف قرار دارند، به این معنا که قرارگیری زبری ها در بستر سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج از مقدار متناظر آن در پرش هیدرولیکی کلاسیک شده است. این روند با افزایش عدد فرود و از طرفی، با افزایش ارتفاع و تراکم زبری های موجود در کف بیشتر شده و مطابق شکل بیشترین کاهش مربوط به فرم بستر RB_2 (میله هایی با ارتفاع ۳ سانتی متر و پوشش منظم) به مقدار ۱۷/۵ درصد است که در آن ارتفاع و تراکم بیشینه بود. با در نظر گرفتن داده های برداشت شده از آزمایش ها در حالت های مختلف فرم بستر رابطه ای به شکل زیر بین نسبت اعماق مزدوج و عدد فرود جریان ورودی مشتق شده است (رابطه ۵):

$$\frac{d_2}{d_1} = 1 + \sqrt{2} \exp\left(0.6 \frac{k_s}{dc}\right) (Fr_1 - 1)^{0.98} \quad (5)$$

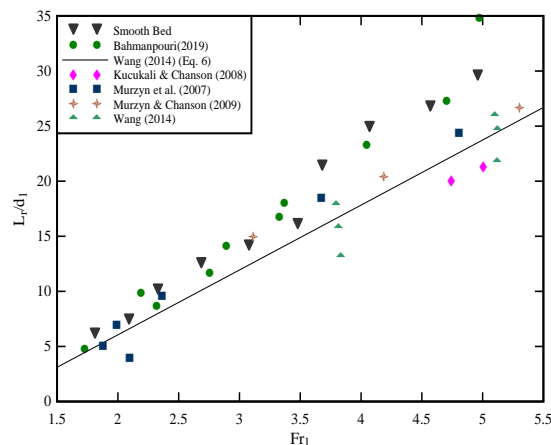
که در آن Fr_1 عدد فرود در بالادست پرش، k_s ارتفاع زبری، dc عمق بحرانی پرش و d_1 و d_2 به ترتیب اعماق پرش در بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی هستند. با استفاده از این رابطه می توان مقدار عمق جریان در پایاب را با داشتن شرایط جریان بالادست و زبری نسبی محاسبه کرد.

غلتاب پرش

غلتاب پرش فاصله طولی است که در آن ارتفاع آب به صورت



ب. بستر زبر



الف. بستر صاف

شکل ۴. مقایسه طول غلتاب با عدد فرود

RB_۲ که در آن ارتفاع و تراکم بیشینه است. به طور کلی، برای یک عدد فرود یکسان تنش برشی مرزی و نیروی مقاوم در بستر زبر بیشتر از مقدار آن روی بستر صاف است.

نیروی اصطکاک مرزی و تنش برشی

بر اساس ملاحظات مومنتم برای یک کانال افقی مستطیلی (رابطه ۱) می‌توان یک رابطه از نیروی مقاوم مرزی به‌عنوان تابعی از نسبت اعماق مزدوج و عدد فرود جریان ورودی ارائه کرد (رابطه ۸):

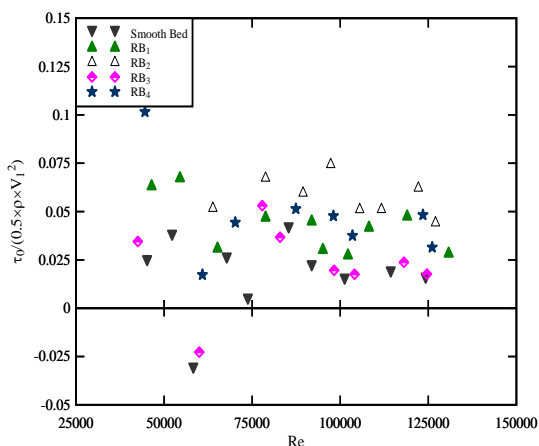
(۸)

$$\frac{F_{fric}}{\rho \times g \times B \times d_1^2} = \left(\frac{Fr_1^2}{\frac{1}{2} \times \frac{d_2}{d_1}} - \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right) \right) \times \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right)$$

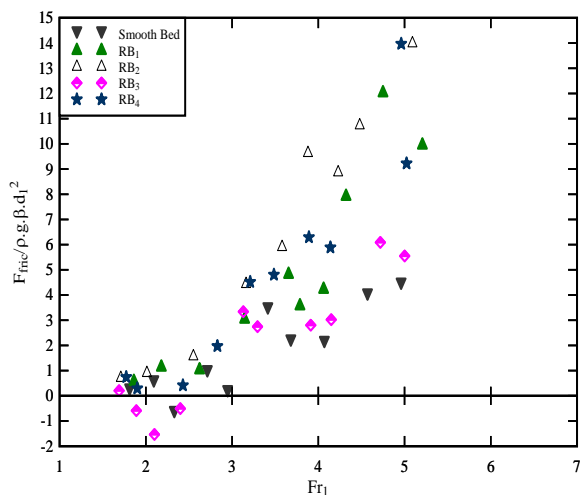
با فرض اینکه طبق رابطه ارائه‌شده توسط وانگ (رابطه ۶)، تنش برشی مرزی متوسط پائین غلتاب برابر است با (رابطه ۹):

(۹)

$$\frac{\tau_0}{\frac{1}{2} \times \rho \times V_1^2} = \frac{\left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right)}{3 \times Fr_1^2 \times (Fr_1 - 1)} \times \left(\frac{Fr_1^2}{\frac{1}{2} \times \frac{d_2}{d_1}} - \left(1 + \frac{d_2}{d_1} \right) \right)$$



شکل ۵. تنش برشی مرزی بی‌بعد



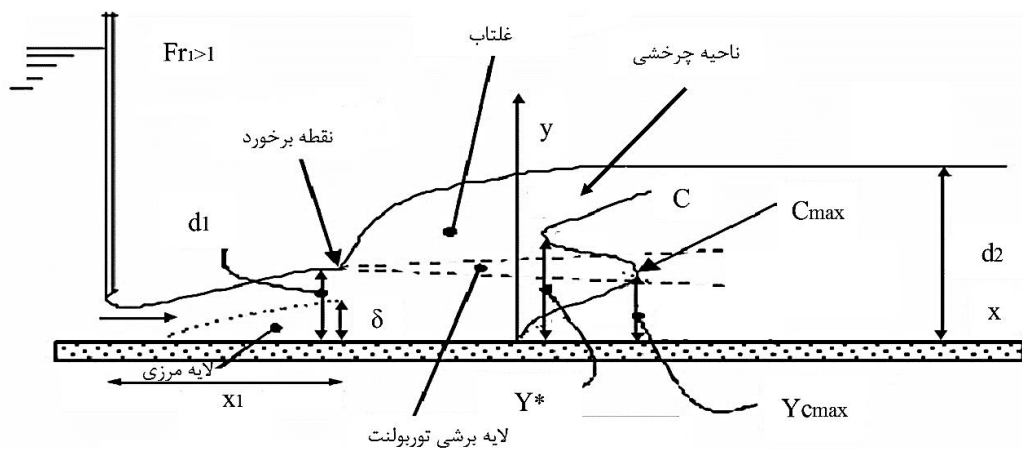
شکل ۶. نیروی اصطکاک مرزی بی‌بعد

تنش برشی میانگین و نیروی اصطکاک مرزی، بر اساس نسبت اعماق مزدوج و عدد فرود ورودی جریان به‌ترتیب با استفاده از روابط ۸ و ۹ برآورد شده و نتایج آن در برابر عدد فرود جریان در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌شوند. داده‌های بی‌بعد نشان می‌دهند که نیروی اصطکاک مرزی، برای بستر صاف با افزایش مقدار عدد فرود جریان ورودی افزایش و روند صعودی داشته، اما در بستر زبر برای اعداد فرود $Fr_1 < 2$ روند کاهشی و پس از آن برای $Fr_1 > 2$ روندی افزایشی دارد و روند تغییر در بستر صاف و زبر یکسان بود. در نمودار شکل ۵ داده‌ها با زبری نسبی همبستگی دارد، به طوری که در اعداد رینولدز مشابه تنش برشی در بستر زبر در تراز بالاتری نسبت به بستر صاف است و بیشترین مقدار آن مربوط به فرم بستر

ناحیه اصلی جریان درون غلتاب مشاهده می‌شود: ناحیه منطقه برشی توربولنت^۲ و ناحیه چرخش بالا^۳. در ناحیه منطقه برشی توربولنت یک پروفیل زنگ شکل، از میانگین زمانی c از کف کانال با بخش خالی برابر با صفر شروع شده تا تراز مشخص y^* با مقدار حداقل محلی C^* . هسته اصلی گرداب‌هایی با هوادهی بسیار زیاد، منجر به شکل‌گیری یک مقدار ماکزیمم برای بخش خالی که در تراز Y_{Cmax} قرار دارد، در ناحیه برشی توربولنت ($0 < y < y^*$) می‌شود. ناحیه چرخش بالایی که در آن بخش خالی به‌طور یکنواخت از C^* تا ۱ افزایش می‌یابد، شامل دو ناحیه است، در قسمت زیر یک ناحیه جریان حیابی و یک سطح آزاد در حال پاشش بالاتر از تراز متوسط آب.

میانگین زمانی بخش خالی^۱

مشخصه کلیدی در جریان آب‌هوا غلظت هوا C یا جزء خالی و یا میانگین زمانی بخش خالی که به‌وسیله کاوشگر رسانای دوسر اندازه‌گیری شده، با نسبت زمانی که نوک کاوشگر در هوا معرض هوا قرار گرفته، برابر است. مقدار متوسط زمانی جزء خالی در موقعیت (x,y) درون جریان، از سری زمانی سیگنال‌های آنی دریافتی از نوک سوزن‌ها پروب به دست می‌آید. همان‌طور که گفته شد، مقادیر غلظت در خط مرکزی فلوم آزمایشگاهی و در Y مقطع عمود بر کانال به فواصل طولی متفاوت از پای پرش $(x_1 - x)$ اندازه‌گیری شده است. در شکل ۷ پروفیل‌های جزء خالی همراه با پارامترهای مشخصه مربوطه، ترسیم شده‌اند. بر اساس پروفیل بخش خالی، دو



شکل ۷. توزیع بخش خالی در یک مقطع عمودی غلتاب پرش

شرایط جریان پایدار در نظر گرفته شده است [۲۹]. با توجه به متغیر $X = x - (x_1 + u_r/V_1 \times y)$ با موقعیت طولی پای پرش، یک معادله دوبعدی ادوکشن-دیفیوژن به‌صورت زیر حاصل می‌شود (رابطه ۱۱) [۳۰]:

$$V_1 \frac{\partial c}{\partial x} = D_r \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y} \quad (11)$$

با شرط مرزی اینکه پای پرش به‌عنوان یک منبع نقطه‌ای هوا عمل می‌کند (رابطه ۱۲):

$$at : x - x_1 = 0, y = d_1 \quad (12)$$

$$C = Q_{air} / Q$$

در تحقیق حاضر مرز بین دو ناحیه جریان در تراز مشخصه y^* معین شد. با فرض اینکه توزیع سرعت یکنواخت افقی، برابر با سرعت جریان ورودی V_1 است، می‌توان توضیحی تئوری از توزیع بخش خالی در ناحیه برشی توربولنت از معادله پیوستگی حباب‌های هوا در یک حجم کنترل ارائه کرد (رابطه ۱۰):

$$V_1 \frac{\partial c}{\partial x} + u_r \frac{\partial c}{\partial y} = D_r \frac{\partial^2 c}{\partial^2 y} \quad (10)$$

که در آن x و y به‌ترتیب مختصات طولی و عمودی هستند و u_r سرعت بالا رفتن حباب‌ها، D_r انتشار^۲ (نفوذ) ثابت فرض شده‌اند؛ ضمن اینکه اثرات تراکم‌پذیری چشم‌پوشی شده و

3. Turbulent Shear Region
4. Recirculation Region Above

1. Time-averaged Void Fraction
2. Diffusivity

معادله ۱۳ حاصل می‌شود [۲۹]:

(۱۵)

(۱۳)

$$y > y^*$$

$$C = \frac{1}{2} \times \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{y - y_{50}}{2 \times \sqrt{\frac{D^* \times (x - x_1)}{V_1}}} \right) \right)$$

$$C = \frac{Q_{air}/Q}{\sqrt{4 \times \pi \times D^* \times X'}} \times \left(\exp \left(-\frac{(y' - 1)^2}{4 \times D^*} \right) + \exp \left(-\frac{(y' + 1)^2}{4 \times D^*} \right) \right)$$

که در آن D^* یک انتشار بی‌بعد در ناحیه بالایی سطح آزاد است. تابع خطای گوس (رابطه ۱۶):

که در آن Q_{air} حجم هوای وارد شده، Q حجم آب- هوا، d_1 عمق جریان ورودی، $y' = y/d_1$ و $X' = X/d_1$ ، $D^* = D/(V_1 \times d_1)$ با ساده کردن رابطه توربولنت بی‌بعد ۱۳ در نهایت رابطه‌ای به شکل زیر حاصل می‌شود (رابطه ۱۴) [۳۲ و ۳۱]:

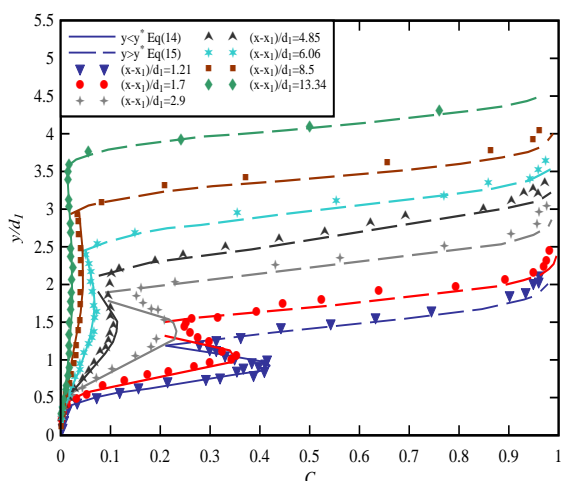
$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-t^2) \times dt \quad (16)$$

$$0 < y < y^*$$

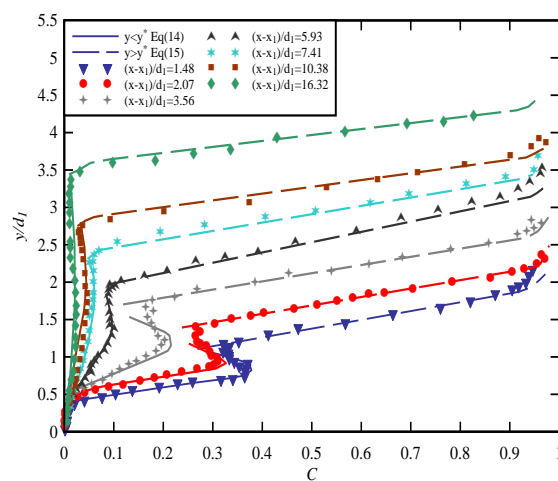
$$C = C_{max} \times \exp \left(-\frac{1}{4 \times D^*} \times \left(\frac{y - y_{c_{max}}}{d_1} \right)^2 - \frac{(x - x_1)}{d_1} \right)$$

شکل ۸ داده‌های مربوط به مقایسه و تحلیل بین توزیع غلظت هوا c در دو فرم بستر صاف و زبری RB_z که در آن ارتفاع و تراکم پوشش بیشینه است، برای اعداد فرود جریان ورودی یکسان و نسبت‌های ثابت $h/w = 0.1$ و $x_1/h = 3.0$ بازشدگی درجه بالادست، w عرض فلوم، x_1 موقعیت پای پرش که در همه آزمایش‌ها ثابت و در ۹۰ سانتی از درجه بالادست تنظیم شد، به‌عنوان توابعی از ارتفاع بدون بعد y/d_1 بالاتر از بستر کانال را نشان می‌دهد. هر گراف نشان‌دهنده پروفیل بخش خالی در هفت موقعیت طولی در پایین دست پای پرش است. راه‌حل‌های تحلیلی روابط ۱۵ و ۱۶ برای لایه برشی توربولنت و ناحیه چرخشی به‌ترتیب، برای مقایسه با داده‌ها رسم شده‌اند.

اثرات شناوری به‌طور ضمنی، با استفاده از Y_{Cmax} که بر اساس داده‌های تجربی تعیین می‌شود، در نظر گرفته می‌شود [۴]. در ناحیه چرخشی، بر اساس قیاس با جت‌های آبی که با توزیع سرعت یکنواخت در هوا تخلیه می‌شوند، نشان می‌دهد که بخش خالی C از یک راه‌حل تحلیلی در قالب تابع خطای گاوسی پیروی می‌کند (رابطه ۱۵) [۳۳-۳۵]:



ب. بستر زبر RB_z و $Fr_1 = 4/7$



الف. بستر صاف و $Fr_1 = 4/7.3$

شکل ۸. پروفیل توزیع غلظت در پرش هیدرولیکی در مقطع عرضی و خط مرکزی فلوم در مقایسه با راه‌حل تحلیلی

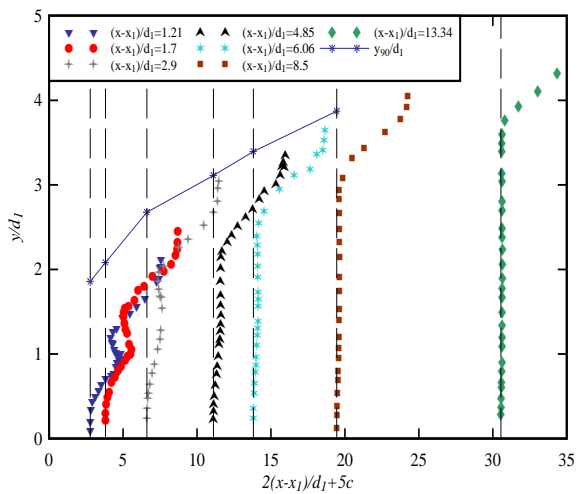
حرکت در ناحیه برشی توربولنت ($0 < y < y^*$) دارای یک ماکزیمم برای بخش خالی C_{max} است، در این ناحیه با افزایش موقعیت طولی شکل پروفیل به‌طور مشخصی تغییر کرده است، در حالی که در ناحیه بالایی و چرخشی ($y > y^*$) روند

با توجه به نمودارها در هر دو فرم بستر زبر و صاف شکل پروفیل توزیع غلظت‌ها C مستقل از فرم بستر شکل‌های مشابهی داشتند. در هر دو فرم بستر صاف و زبر در نزدیکی بستر ورود هوا بسیار کم و مقدار C ناچیز است، سپس با

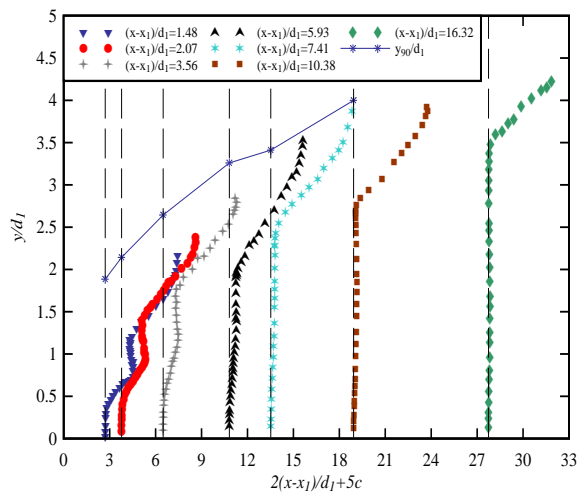
فرم بستر، به علت بالا بودن عدد رینولدز در بستر زبر تراز عمودی C^* به سمت بالا جابه‌جا شده که منجر به حرکت به سمت بالای ناحیه برشی توربولنت بوده که نشان‌دهنده کاهش طول غلتاب پرش با افزایش زبری است. توزیع عمودی بخش خالی در موقعیت‌های مختلف طولی برای هر دو فرم بستر صاف و زبر با عدد فرود جریان ورودی یکسان در مقایسه با مشخصه عمق جریان y_{90}/d_1 که در آن ارتفاع مشخصه‌ای که مقدار C برابر 0.9 خواهد بود، در شکل ۹ نشان داده شده است. داده‌های برداشت‌شده و مشاهدات بصری نشان‌دهنده یک منطقه حبایی طولانی‌تر روی بستر زبر هستند. برای $(x - x_1)/d_1 < 8$ به‌طور مشخص مقدار C برای بستر زبر بیشتر بوده و در مقاطعی با $(x - x_1)/d_1 < 8$ مقدار آن تقریباً برابر صفر بود، ضمن اینکه در دو مقطع آخر به علت بالا بودن تراز سطح آب و محدودیت در ارتفاع عمودی سنسورهای کاوشگر امکان اندازه‌گیری y_{90} را نداشتند.

نسبتاً ثابتی مشاهده می‌شود که به‌صورت یک افزایش سریع از C^* به سمت ۱ است. مقدار مشخصه C^* که به‌عنوان مینیمم محلی بخش خالی در مرز بین لایه برشی توربولنت و ناحیه چرخشی وجود دارد، به‌عنوان مرزی مجازی تعریف می‌شود که پروفیل توزیع بخش خالی را به دو قسمت تقسیم می‌کند، ناحیه برشی توربولنت پایین تراز y^* و ناحیه چرخشی بالای تراز y^* . با افزایش فاصله از پای پرش ناحیه برشی توربولنت گسترش پیدا کرده و مرز بین ناحیه برشی توربولنت و ناحیه چرخشی به سمت بالا جابه‌جا شده است. در انتهای پایین دست پرش هیچ ناحیه چرخشی‌ای مشاهده نشد.

y/d_1 مربوط به مقدار مینیمم محلی بخش خالی C^* در مرز بین لایه برشی توربولنت و ناحیه چرخشی روی بستر زبر مقدار بیشتری دارد، در سه مقطع ابتدایی نزدیک به پای پرش مقادیر y/d_1 به ترتیب برابر است با $1/36$ ، $1/15$ و $1/67$ برای بستر زبر و $1/31$ ، $1/51$ و $1/94$ برای بستر صاف است؛ که نشان می‌دهد به‌رغم یکسان بودن اعداد فرود در هر دو



ب. بستر زبر



الف. بستر صاف

شکل ۹. توزیع‌های بخش خالی در پرش هیدرولیکی در مقایسه با مشخصه عمق جریان y_{90}/d_1

عمودی y_{Cmax} به دلیل اثرات شناوری و برهم‌کنش‌های بین ورتکس‌های بزرگ و کف کانال افزایش یافته است. در بستر زبر مقدار این برهم‌کنش‌ها افزایش یافته و در نتیجه، مقدار y_{Cmax} نسبت به بستر صاف افزایش می‌یابد. ونگ [۵] در نتیجه تحقیق خود، رابطه ۱۷ را برای تعیین مقدار C_{max} در بستر صاف ارائه داد:

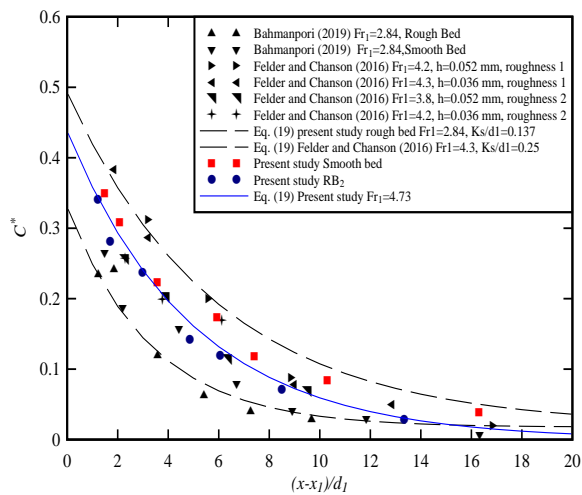
$$C_{max} = 0.5 \times \exp\left(-\frac{1}{1.8 \times (Fr_1 - 1)} \times \frac{x - x_1}{d_1}\right) \quad (17)$$

این رابطه بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده در محدوده

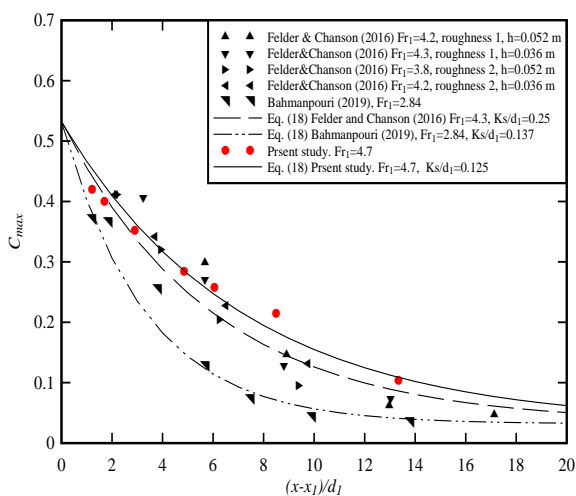
پارامترهای مشخصه C

همان‌طور که گفته شد، در پرش هیدرولیکی توزیع‌های C دارای یک ماکزیمم محلی در لایه برشی توربولنت در حال توسعه C_{max} و یک مینیمم محلی در مرز بین ناحیه برشی و ناحیه چرخشی C^* هستند. همان‌طور که در نمودارهای توزیع طولی پروفیل بخش خالی (شکل ۸) نشان داده شده، با افزایش فاصله از پای پرش، در نتیجه انتقال و پخش شدن حباب‌های هوا در جریان آب، مقدار C_{max} کاهش و موقعیت

مقادیر کاهش متفاوتی برای اعداد فرود متفاوت، اما با روندی یکسان دیده می‌شود. در تحقیق حاضر نیز مشابه آنچه در نتایج تحقیقات فلدر و چانسون [۲۰] و بهمن پوری [۲۴] آمده است، مقدار C_{max} در بستر زبر بیشتر از مقدار آن در داده‌های بستر صاف و نتایج ارائه‌شده توسط ونگ [۵] و در واقع، مقدار بخش خالی روی بستر زبر بیشتر از بستر صاف بود. مقدار C_{max} در نیمه اول غلتاب کاهش بیشتری دارد و در نیمه انتهایی غلتاب حباب‌های هوا از طریق نیروی شناوری به سطح منتقل و با آزاد شدن حباب‌های هوا در سطح و یا ناپدید شدن آنها در ستون آب مقدار آن به سمت صفر میل می‌کند.



شکل ۱۰. توزیع طولی بی‌بعد از مینیمم محلی در مرز بین ناحیه برشی و ناحیه چرخشی



ب. بستر زبر

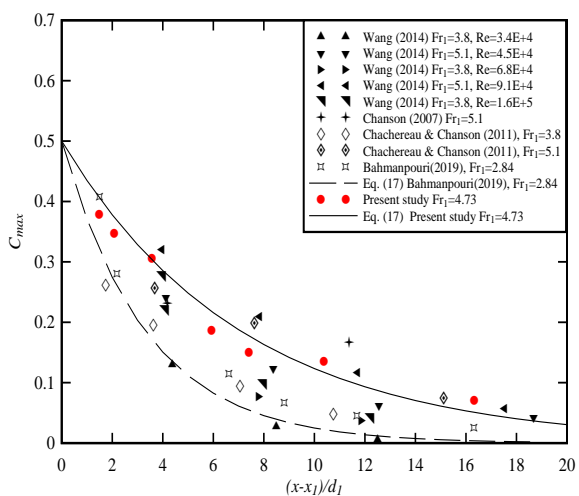
عدد فرود بین $Fr_1 < 10$ و $Fr_1 < 3/8$ و عدد رینولدز بین $Re < 1/6 \times 10^4$ و $Re < 3/4 \times 10^4$ به دست آمده است. با در نظر گرفتن رابطه یادشده برای بستر صاف و همچنین، نتایج حاصل از مطالعه فلدر و چانسون [۲۰]، بهمن پوری [۲۴] روابط تجربی برای ۱۸ و ۱۹ را به منظور تعیین مقدار C_{max} و C^* روی بستر زبر برای $0 < (x - x_1)/d_1 < 15$ و محدوده فرود بین $1/5 < Fr_1 < 5/5$ ارائه کرد:

$$(18)$$

$$C_{max} = 0.5 \times \exp\left(-\frac{1}{1.8 \times (Fr_1 - 1)} \times \frac{x - x_1}{d_1}\right) + 0.03 \exp\left(\frac{K_s}{d_1}\right)^{0.4} \quad (19)$$

$$C^* = k \times \exp\left(-\frac{1}{1.8 \times (Fr_1 - 1)} \times \frac{x - x_1}{d_1}\right) + (0.06 \exp\left(\frac{K_s}{d_1}\right)^{0.2}) - b$$

که در آن برای بستر زبر (RB_z) با عدد فرود $Fr_1 = 4/7$ مقدار $K_s/d_1 = 0/125$ بود. روند تغییرات مینیمم محلی بخش خالی و تفاوت آن بین دو فرم بستر صاف و زبر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، مقدار مینیمم محلی غلظت در بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش یافته است. شکل ۱۱ توزیع داده‌های حداکثر بخش خالی را به عنوان تابعی از موقعیت طولی بدون بعد $(x - x_1)/d_1$ بر هر دو فرم بستر صاف و زبر را نشان می‌دهد، نتایج مطالعه حاضر با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی [۵، ۲۰، ۲۱، ۲۴، ۳۶] مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، توافق قابل قبولی بین داده‌های مربوط به بستر صاف وجود دارد. در مقایسه بین تحقیقات انجام‌شده، در همه موارد از پای پرش تا انتهای غلتاب پرش،



الف. بستر صاف

شکل ۱۱. توزیع طولی بی‌بعد از حداکثر بخش خالی

- Engineering Conference. 1998:8.
- [4]. Chanson H. Advective diffusion of air bubbles in hydraulic jumps with large Froude numbers: an experimental study. 2009a.
- [5]. Wang H. Turbulence and air entrainment in hydraulic jumps. 2014.
- [6]. Cain P, Wood IR. Measurements of self-aerated flow on a spillway. *Journal of the Hydraulics Division*. 1981;107(11):1425-44.
- [7]. Hager W, Sinniger R. Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise. *Journal of Hydraulic Research*. 1985;23(2):101-13.
- [8]. Rajaratnam N. Hydraulic jumps. *Advances in hydroscience*. 4: Elsevier; 1967. p. 197-280.
- [9]. Ead S, Rajaratnam N. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2002;128(7):656-63.
- [10]. Hughes WC, Flack JE. Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic engineering*. 1984;110(12):1755-71.
- [11]. Abel R, Resch FJ. A method for the analysis of hot-film anemometer signals in two-phase flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 1978;4(5):523-33.
- [12]. Resch FJ, Leutheusser HJ, Alemu S. Bubbly two-phase flow in hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*. 1974;100(1):137-49.
- [13]. Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical fiber technology*. 2003;9(2):57-79.
- [14]. Chanson H. Phase-detection measurements in free-surface turbulent shear flows. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2016;13(2):S74-S87.
- [15]. Neal LG, Bankoff S. A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow. *Aiche Journal*. 1963;9:490-4.
- [16]. Felder S, Chanson H. Air-water flow patterns of hydraulic jumps on uniform beds macro-roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2018;144(3):04017068.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از المان‌های استوانه‌ای شکل از جنس آهن گالوانیزه به‌عنوان پوشش گیاهی، به بررسی اثر تراکم و ارتفاع پوشش، روی هیدرولیک جریان و پارامترهای مربوط به جریان دوفازی آب- هوا در پرش هیدرولیکی پرداخته و روابطی تجربی برای تخمین نسبت اعماق مزدوج و طول غلتاب به‌صورت تابعی از عدد فرود و زبری نسبی ارائه شد. بررسی پارامترهای مشخصه جریان و غلظت هوا در جریان، در اعداد فرود مختلف نشان داد خصوصیات اصلی جریان مثل نسبت اعماق مزدوج و طول پرش تابعی از عدد فرود جریان ورودی است و با افزایش عدد فرود، نسبت اعماق مزدوج بیشتر می‌شود و طول غلتاب افزایش می‌یابد و وجود پوشش در کف کانال با افزایش نیروی مقاوم در برابر جریان و تنش برشی در بستر موجب کاهش طول غلتاب پرش و کاهش نسبت اعماق مزدوج شده و موجب افزایش هوادهی از طریق افزایش جزء خالی در طول پرش می‌شود. در پایین‌دست پرش غلظت هوا مقادیر کاهش متفاوتی برای اعداد فرود متفاوت اما با روندی یکسان دیده می‌شود. در هر دو فرم بستر صاف و زیر در هر مقطع عمودی، یک پروفیل زنگی شکل از کف کانال با بخش خالی برابر با صفر شروع می‌شود و در ناحیه سطح آزاد با افزایش ارتفاع غلظت به‌شدت به سمت مقدار واحد افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه غلظت در بستر زیر بیشتر از مقدار آن در داده‌های بستر صاف است و این مقدار در نیمه اول غلتاب کاهش بیشتری دارد و در نیمه انتهایی غلتاب با آزاد شدن حباب‌های هوا در سطح و یا ناپدید شدن آنها در ستون آب مقدار آن به سمت صفر میل می‌کند.

منابع

- [1]. Bélanger J. Notes sur l'Hydraulique. Ecole Royale des Ponts et Chaussées, Paris, France, session. 1841;1842:223.
- [2]. Cummings PD, Chanson H. Air Entrainment in the Developing Flow Region of Plunging Jets—Part 1: Theoretical Development. *Journal of Fluids Engineering—transactions of The Asme*. 1997;119:597-602.
- [3]. Chanson H, Brattberg T. Air Entrainment by Two-Dimensional Plunging Jets: the Impingement Region and the Very-Near Flow Field. *Proceedings of 1998 ASME Fluids*

- hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*. 2007;45(5):679- 85.
- [27]. Carollo FG, Ferro V, Pampalone V. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007;133(9):989- 99.
- [28]. Murzyn F, Chanson H. Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps. *Environmental Fluid Mechanics*. 2009;9(2):143- 59.
- [29]. Chanson H. Convective transport of air bubbles in strong hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*. 2010;36(10):798- 814.
- [30]. Crank J. *The mathematics of diffusion*: Oxford university press; 1979.
- [31]. Chanson H. Air entrainment in two- dimensional turbulent shear flows with partially developed inflow conditions. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995;21(6):1107- 21.
- [32]. Chanson H. *Air bubble entrainment in free- surface turbulent shear flows*: Elsevier; 1997a.
- [33]. Chanson H. Study of air entrainment and aeration devices. *Journal of Hydraulic research*. 1989;27(3):301- 19.
- [34]. Brattberg T, Chanson H, Toombes L. Experimental investigations of free- surface aeration in the developing flow of two- dimensional water jets. 1998.
- [35]. Murzyn F, Mouazé D, Chaplin J. Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps. *International Journal of Multiphase Flow*. 2005;31(1):141- 54.
- [36]. Chachereau Y, Chanson H. Bubbly flow measurements in hydraulic jumps with small inflow Froude numbers. *International Journal of Multiphase Flow*. 2011;37(6):555- 64.
- [17]. Pagliara S, Carnacina I, Roshni T. Air-water flows in the presence of staggered and row boulders under macroroughness conditions. *Water Resources Research*. 2010;46(8).
- [18]. Pagliara S, Roshni T, Carnacina I. Turbulence, aeration and bubble features of air- water flows in macro- and intermediate roughness conditions. *Water Science and Engineering*. 2011;4(2):170- 84.
- [19]. Pagliara S, Palermo M. Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse- sloped beds. *Journal of Hydraulic Research*. 2015;53(2):243- 52.
- [20]. Felder S, Chanson H. *An experimental study of air- water flows in hydraulic jumps with channel bed roughness*. 2016.
- [21]. Chanson H, Carosi G. Advanced post- processing and correlation analyses in high- velocity air- water flows. *Environmental Fluid Mechanics*. 2007a;7(6):495- 508.
- [22]. Chanson H. Momentum considerations in hydraulic jumps and bores. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2012;138(4):382- 5.
- [23]. Kucukali S, Chanson H. Turbulence measurements in the bubbly flow region of hydraulic jumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008;33(1):41- 53.
- [24]. Bahmanpouri F. *Experimental study of air entrainment in hydraulic jump on pebbled rough bed*. PhD thesis: Civil, Architectural and Environmental Engineering Department, The University of Napoli Federico II; 2019.
- [25]. Chachereau Y, Chanson H. Free- surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011b;35(6):896- 909.
- [26]. Murzyn F, Mouazé D, Chaplin J. Air- water interface dynamic and free surface features in