

مقاله پژوهشی

بررسی پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب با چیدمان زبری منظم در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف

پردیس زیدوند^۱ و مهدی بهداروندی عسکر^{۲*}

چکیده

پرش هیدرولیکی نوعی جریان متغیر سریع است که در محیط آزاد اتفاق می‌افتد. وقوع پدیده پرش هیدرولیکی در کانال‌های روباز باعث کاهش سطح انرژی و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی می‌شود. تعبیه موانع با هندسه‌های مختلف در مسیر جریان تأثیر مهمی بر عمق ثانویه پرش، کاهش طول پرش هیدرولیکی و افزایش افت انرژی جریان در طی پرش دارد. در این پژوهش به بررسی پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب با چیدمان زبری منظم در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف در Flow-3D پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها در چهار نسبت عمقی، سه نسبت ارتفاع زبری و سه سرعت مختلف انجام شده است. مطابق با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها حضور زبری‌ها باعث کاهش عمق ثانویه پرش نسبت به حالت بدون زبری شده است؛ به‌طوری‌که در عرض سیلاب‌دشت ۱۸ سانتی‌متر و نسبت عمقی ۰/۳، نسبت ارتفاع زبری ۲ و سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه، به‌طور میانگین عمق ثانویه به مقدار ۵/۶۴ درصد نسبت به کانال بدون زبری کاهش می‌یابد. طول پرش در کمترین مقدار نسبت ارتفاع زبری، عرض سیلاب‌دشت ۱۸ سانتی‌متر، سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه و نسبت عمقی ۰/۳، حدود ۱۰/۹۸ درصد کاهش و در بیشترین مقدار نسبت ارتفاع زبری، سرعت ۵ متر بر ثانیه و نسبت عمقی ۰/۳، حدود ۴۷/۳۷ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بررسی عددی، مقاطع مرکب مستطیلی، کف زبر، نرم‌افزار Flow-3D

ارجاع: زیدوند پ. و بهداروندی عسکر م. ۱۴۰۳ بررسی پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب با چیدمان زبری منظم در شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف. مجله پژوهش آب ایران. ۵۳: ۱۱۶-۱۰۷. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14725.2592>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران.
۲- دانشیار، گروه عمران سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.

* نویسنده مسئول: m.behdarvandi@kmsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸

مقدمه

پرش هیدرولیکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده و در زمرهٔ جریان‌های متغیر سریع طبقه‌بندی می‌شود. این پدیده امکان استهلاك انرژی اضافی آب را در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، تندآب‌ها و دریچه‌ها فراهم می‌آورد. به‌طور کلی پرش هیدرولیکی دارای خصوصیتی است که در آن انرژی جنبشی مازاد جریان تلف می‌شود. از این ویژگی مهم به‌عنوان مستهلك‌کنندهٔ انرژی در پایین‌دست سرریزها، دریچه‌ها، تندآب‌ها و... استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت پرش هیدرولیکی، این پدیده در هفتاد سال گذشته به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و اطلاعات جامعی نیز در رابطه با آن منتشر شده است. هدف از این مطالعات، شناخت بهتر مکانیسم پرش و ایجاد روابطی برای پیش‌بینی خصوصیات آن نظیر طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز، میزان استهلاك انرژی، توزیع سرعت جریان، نوسانات فشار و نیز پروفیل سطح آب در طول پرش بوده است. برآورد دقیق این خصوصیات کمک کرده است تا سازه‌های مستهلك‌کنندهٔ انرژی، اقتصادی‌تر و ایمن‌تر طراحی شوند (Rajaratnam, 1976). پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبه‌رو بوده و آن عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق‌بحرانی به زیر بحرانی. در پرش هیدرولیکی سطح آب به‌طور ناگهانی افزایش پیدا کرده و سبب آشفتگی زیادی در جریان می‌شود و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس از سرعت به میزان قابل‌توجهی کاسته می‌شود (Hosseini and Abrishami, 1999). اندازه‌های مختلفی از زبری‌های مکعب شکل برای عدد فرود $4/5$ تا 12 را آزمایش کرد و به این نتیجه رسید نیمرخ سطحی آب در طول پرش به‌وسیلهٔ معادله بی‌بعد با دقت خوبی برای همهٔ زبری‌ها برازش شد و نشان داده شد که در مقایسه با پرش روی بستر صاف، طول کمتری دارند. نتایج نشان می‌دهد که طول پرش در همهٔ زبری‌های آزمایش‌شده کمتر از طول پرش روی بستر صاف است. میزان کاهش برای هر شکل به عدد فرود بستگی دارد. بیشترین کاهش طول مربوط به مقایسهٔ زبری لوزی‌شکل با 40 درصد کاهش است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که میزان استهلاك انرژی بر اثر

وجود زبری بیشتر از میزان استهلاك انرژی برای بستر صاف است (Shafaei Bejestan and Nisi, 2009). Esmaili and Abrishami (2001) مشاهده کردند استفاده همزمان از شیب معکوس و پله‌های منفی نقش مؤثری بر پایداری پرش داشته و موجب افزایش طول نسبی پرش و همچنین عمق ثانویهٔ پرش می‌شوند. Dastourani et al. (2016)، تأثیر زاویهٔ برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند جت باعث حرکت پرش هیدرولیکی به سمت بالادست و پایین‌دست جریان می‌شود؛ به‌طوری‌که پرش هیدرولیکی با اعمال جت با زاویهٔ کمتر از زاویهٔ اثر به سمت پایین‌دست و در زاویهٔ بیشتر از آن به سمت بالادست جابجا می‌شود. تغییرات در زاویهٔ جت باعث کاهش و افزایش عمق ثانویهٔ پرش هیدرولیکی می‌شود؛ به‌طوری‌که در حداکثر زاویهٔ جت، بیشترین دبی جت و کم‌ترین عدد فرود، نسبت عمق ثانویه تا حدود $25/4$ درصد کاهش می‌یابد و در زاویهٔ 60° درجه که کمتر از زاویهٔ بی‌اثر است، با بیشترین دبی جت و بیشترین عدد فرود تا حدود $8/7$ درصد افزایش می‌یابد. با تغییرات زاویهٔ جت طول پرش نسبت به پرش بدون جت کاهش و افزایش می‌یابد. افزایش دبی جت این تغییرات را تشدید می‌کند؛ به‌طوری‌که به‌ازای حداکثر میزان کاهش تا حدود $48/3$ درصد مربوط به حداکثر زاویهٔ جت، بیشترین دبی جت و حداقل عدد فرود و حداکثر میزان افزایش تا حدود 29 درصد مربوط به حالت زاویهٔ 60° درجه، حداکثر دبی جت و در حداکثر عدد فرود است. تغییرات زاویهٔ جت باعث افزایش و کاهش افت نسبی انرژی می‌شود؛ به‌طوری‌که در حداکثر عدد فرود، بیشترین دبی جت و در زاویهٔ حداکثر افت انرژی نسبی به میزان $0/76$ است و در حداقل عدد فرود، بیشترین دبی جت و در زاویهٔ 60° افت انرژی نسبی تا حدود $0/56$ تغییرات زاویهٔ جت باعث کاهش و افزایش نیروهای برشی بستر می‌شود؛ به‌طوری‌که در زاویهٔ 60° درجه، کمترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود $6/7$ برابر نسبت به حالت بدون جت کاهش می‌یابد و در زاویهٔ حداکثر، بیشترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود 18 برابر نسبت به حالت بدون جت باعث افزایش نیروهای برشی می‌شود. خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر بستریابی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدودهٔ اعداد

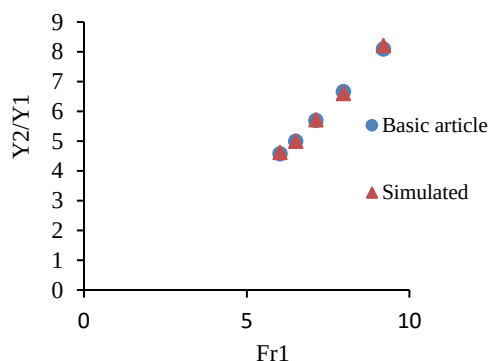
نسبت عمق ثانویه و افت انرژی افزایش و برای طول نسبی جهش کاهش می‌یابد (Omid and EsmaeeliVaraki, 2004).

(Farhoudi, 1993) بر این باور بود که پرش هیدرولیکی عمدتاً به‌عنوان یک وسیله انرژی‌کاه برای کاستن انرژی اضافی جریان پایاب سازه‌های هیدرولیکی، نظیر سرریزهای سطحی و دریچه‌های خروجی عمل می‌کند. معمولاً برای تثبیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از بلوک‌ها و آبیاه‌ها استفاده می‌شود. استفاده از اجزای زیر در حوضچه آرامش موجب افزایش کارایی حوضچه، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌شود. در مورد پرش هیدرولیکی روی بستر زیر، مطالعات مفصلی توسط محققان انجام گرفته است (Hughes and Flack, 1984). Parsamehr and Hosseinzade (2013) بر تأثیر بستر سینوسی روی پارامترهای مختلف جهش هیدرولیکی تحقیق کردند. آنها کاهش پارامترهای جهش را در مدل خود نسبت به بستر صاف مشاهده کردند. شدت پرش هیدرولیکی به عدد فرود در محل شروع پرش هیدرولیکی بستگی دارد. مطابق با طبقه‌بندی ایالات متحده آمریکا، زمانی که عدد فرود بین $4/5$ تا 9 باشد، پرش به‌دست‌آمده که پرش ساکن ۱ نیز نامیده می‌شود، شدید و پایدار است (Peterka, 1978).

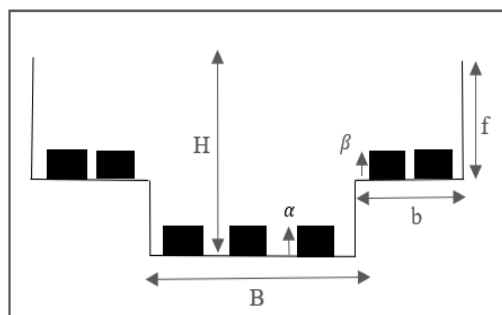
Elsebaie and Shabayek (2010) تأثیر شکل‌های مختلف کنگره‌ای بر جهش هیدرولیکی را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که تأثیر این شکل‌ها (مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی و سینوسی) بر پارامترهای جهش تقریباً یکسان بود، اما همگی باعث کاهش پارامترهای جهش، نسبت به بستر صاف می‌شدند. در یک مطالعه توسط Ead and Rajaratnam (2002) پرش هیدرولیکی بر بستر موج‌دار سینوسی شکل در بازه عدد فرود 4 تا 10 و ارتفاع‌های نسبی مختلف موج بررسی شد. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن بود که طول پرش بر بستر موج‌دار سینوسی نسبت به طول پرش در بستر صاف تقریباً نزدیک به نصف می‌شود. Maturi and Askar (2021) با استفاده از فلوم لبه چاقویی به طول 14 ، عرض 1 و عمق 1 متر با روش اندازه‌گیری مستقیم به بررسی اثر پوششی گیاهی صلب غیرمستغرق بر انتقال اندازه حرکت در کانال مرکب مستطیلی متقارن پرداختند. در مطالعاتی که تاکنون در

فرود 3 تا 10 مورد مطالعه قرار داده شد و مشاهده شد که عمق ثانویه پرش بر سطوح زبر در مقایسه با سطوح صاف کاهش قابل‌ملاحظه‌ای دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها، شدت می‌یابد. همچنین پی بردند تغییر ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب تنش برشی کف نیز بر بسترهای زبر به‌مراتب بیشتر از بسترهای صاف و در حدود 9 برابر است (Gohari and Farhoudi, 2009).

(Abbaspour et al., 2009) بر تأثیر بستر سینوسی روی پارامترهای مختلف جهش هیدرولیکی تحقیق کردند. آنها کاهش پارامترهای جهش را در مدل خود نسبت به بستر صاف مشاهده کردند. به صورت تئوری و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای واگرا را مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها پژوهش خود را در مورد تأثیر توأم تغییرات شیب جانبی و واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر پرش هیدرولیکی انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی نیم‌رخ‌های طولی جهش و منحنی‌های تئوری وجود دارد که صحت فرضیه پیشنهادی در استفاده از معادله بیضی برای نیم‌رخ طولی در معادله تئوری جهش را تأیید می‌کند. در همه آزمایش‌ها، بین مقادیر تئوری و آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، هم‌بستگی خوبی وجود دارد. در هر زاویه واگرایی، با کاهش شیب جانبی، طول نسبی جهش افزایش، نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد. در مقاطع مستطیلی، افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در مقایسه با مقطع جهش کلاسیک، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. این اختلافات با افزایش زاویه واگرایی دیواره‌ها افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در زاویه واگرایی 9 درجه، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش به‌ترتیب $22/5$ و 30 درصد کاهش و افت انرژی $24/5$ درصد افزایش داشت. در مقاطع دوزنقه‌ای، افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در هر شیب جانبی، در مقایسه با مقطع دوزنقه‌ای مستقیم، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش و افزایش افت انرژی می‌شود. روند این تغییرات، با افزایش زاویه واگرایی برای



شکل ۱- مقایسه نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج مقاله پایه



شکل ۲- شکل شماتیک مقطع عرضی کانال مرکب

همه شبیه‌سازی‌ها در سه سرعت مختلف انجام می‌شود. چیدمان زبری‌های کف به صورت منظم است. زبری‌های کف به شکل مکعب‌های کوچک هستند که به فاصله ۱ متر از ابتدای کانال قرار دارند. طول و عرض زبری‌های کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها ۶ سانتی‌متر هستند. ارتفاع زبری‌های کف کانال اصلی ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است، اما ارتفاع زبری‌های سیلاب‌دشت‌ها مطابق با نسبت‌های تعریف‌شده ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متر هستند. فاصله هر زبری از دیگری در کف کانال اصلی ۳ سانتی‌متر و فاصله هر زبری از دیگری در کف سیلاب‌دشت‌ها ۲ سانتی‌متر است. فاصله هر دسته زبری به اندازه ۰/۱۵ متر است. جدول ۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی کانال مرکب را نشان می‌دهد. در جدول زیر منظور از b_m و y_m به ترتیب عرض و عمق کانال اصلی و b_f و y_f عرض و عمق سیلاب‌دشت است.

شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب شبکه حل اعمال شد. شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی بدین گونه است که مرز بالادست به صورت مقدار سرعت جریان^۱، مرز

خصوص پرش هیدرولیکی انجام شده است، اغلب پرش در کانال ساده مستطیلی همراه با زبری کف بررسی شده است. به دلیل مطالع کمتر پرش هیدرولیکی در کانال مرکب و همچنین به دلیل داشتن شرایط هیدرولیکی و هندسی متفاوت کانال مرکب در بخش‌های کانال اصلی و سیلاب‌دشت، این نوع کانال در مقایسه با دیگر مقاطع شباهت بیشتری به کانال‌های موجود در طبیعت دارد؛ به همین دلیل بررسی پرش هیدرولیکی در کانال مرکب ضروری است. در این تحقیق هدف بررسی پرش هیدرولیکی در کانال مرکب و تأثیر زبری کف با چیدمان منظم بر پرش هیدرولیکی است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به بررسی پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب همراه با زبری کف با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی مقطع مرکب به صورت مستطیل-مستطیل به طول ۱۲ m است که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل شده است. عمق و عرض کانال اصلی ثابت در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو نسبت عرضی (w_f)، چهار عمق نسبی (D_f) و سه نسبت ارتفاع زبری (n_f) مختلف انجام می‌شود که این نسبت‌ها به شکل زیر (فرمول ۱ تا ۳) تعریف می‌شوند. قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها، مدل مربوطه با مدل عددی مقاله پایه صحت‌سنجی شد. مقدار سرعت و عمق اولیه جریان داده‌های ورودی به این نرم‌افزار هستند. بدین منظور از یک سرعت ۵ متر بر ثانیه و پنج جریان ورودی ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶ و ۰/۰۷ متر و همچنین مدل آشفتگی (RNG) استفاده شد. شکل ۱ نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش حاصل از نتایج صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده شد که نرم‌افزار Flow-3D از دقت بالایی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی برخوردار است.

$$w_f = \frac{2b}{B} = 1.2, 5 \quad (1)$$

$$D_f = \frac{f}{H} = 0.3, 0.4, 0.6, 0.7 \quad (2)$$

$$n_f = \frac{\beta}{\alpha} = 2, 3, 4 \quad (3)$$

¹ Specified velocity

چپ)، مرز دیواره جانبی کانال اصلی به صورت متقارن^۳، مرز در کف بستر کانال اصلی و سیلابدشتها به صورت دیواره و مرز در سطح آب به صورت متقارن انتخاب شد.

پایین دست به صورت جریان خروجی^۱، مرز دیواره جانبی y_{min} به صورت دیواره^۲ (سیلابدشت سمت راست)، مرز دیواره جانبی y_{max} به صورت دیواره (سیلابدشت سمت

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی کانال مرکب

نسبت ارتفاع زبری ها (n_r)	عمق نسبی (D_r)	سرعت (V)	b_m	y_m	b_f	y_f
۲	۰/۳، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۷	۵، ۳/۵، ۴/۵	۳۰	۱۵	۱۸	۱۰، ۶/۴
۳	۰/۳، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۷					
۵	۰/۳، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۷	۶، ۵/۵، ۴/۵			۷۵	۳۵، ۲۲/۵

جدول ۲- نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۱/۲

$\frac{y_2}{y_1}$ (%)	V (m/s)	n_r	D_r
۵/۶۴		۲	
۷/۴۴	۳/۵	۳	۰/۳
۹/۷۳		۵	
۷/۰۸		۲	
۱۰/۲۷	۵	۳	۰/۳
۱۳/۱۹		۵	
۴/۱۲		۲	
۶/۴۸	۳/۵	۳	۰/۴
۸/۷۰		۵	
۵/۸۳		۲	
۹/۰۶	۵	۳	۰/۴
۱۲/۰۱		۵	
۴/۰۷		۲	
۵/۷۴	۴/۵	۳	۰/۶
۷/۸۷		۵	
۸/۱۲		۲	
۱۲/۷۴	۶	۳	۰/۶
۱۷/۵۷		۵	
۲/۴۹		۲	
۵/۰۴	۴/۵	۳	۰/۷
۷		۵	
۴/۱۴		۲	
۷/۷۲	۶	۳	۰/۷
۹/۹۳		۵	

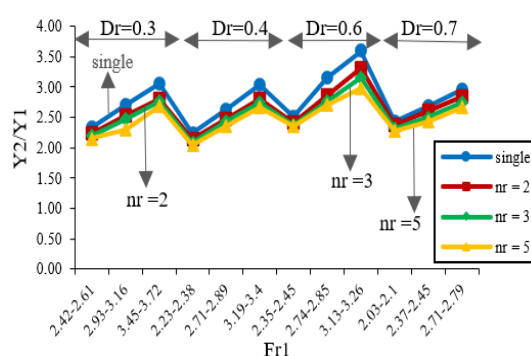
همان طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{y_2}{y_1}$) نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت

نتایج و بحث

با توجه به اهداف اصلی پژوهش، در این مبحث تأثیر بستر زبر بر ویژگی های پرش هیدرولیکی در کانال مرکب همچون نسبت اعماق اولیه و ثانویه پرش و طول پرش تجزیه و تحلیل شدند.

نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش

همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{y_2}{y_1}$) نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت عرضی ۱/۲ نشان داده شده است. در جدول ۲ نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۱/۲ نشان داده شده است.



شکل ۳- نسبت ($\frac{Y_2}{Y_1}$) به عدد Fr_1 در نسبت عرضی ۱/۲ (عرض سیلابدشت ۱۸ سانتی متر) نسبت به کانال بدون زبری

¹ Outflow

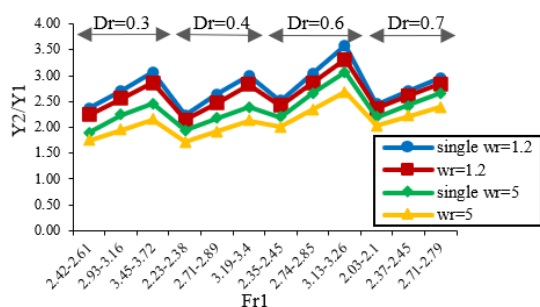
² Wall

³ Symmetry

جدول ۳- نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۵

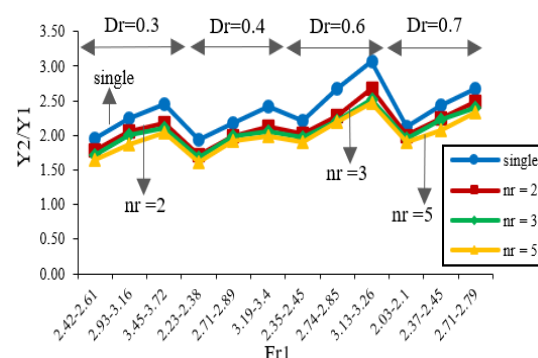
$\frac{y_2}{y_1}$ (%)	V (m/s)	n_r	D_r
۱۳/۰۴		۲	
۱۷/۱۷	۳/۵	۳	۰/۳
۲۲/۷۳		۵	
۱۴/۴۴		۲	
۲۰/۹۲	۵	۳	۰/۳
۲۶/۵۳		۵	
۱۲/۳۱		۲	
۱۶/۱۶	۳/۵	۳	۰/۴
۲۱/۰۸		۵	
۱۳/۳۳		۲	
۱۸/۹۸	۵	۳	۰/۴
۲۴/۷۸		۵	
۹/۹۸		۲	
۱۵/۰۹	۴/۵	۳	۰/۶
۱۹/۳۵		۵	
۱۳/۵۷		۲	
۲۲/۴۶	۶	۳	۰/۶
۲۹/۵۶		۵	
۷/۵۵		۲	
۱۳/۰۸	۴/۵	۳	۰/۷
۱۷/۸۲		۵	
۱۱/۰۷		۲	
۱۸/۴۰	۶	۳	۰/۷
۲۳/۴۳		۵	

در شکل ۵ نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۲ نشان داده شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۲ نشان داده شده است.



شکل ۵- نسبت ($\frac{Y_2}{Y_1}$) به عدد Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۲ نسبت به کانال بدون زبری

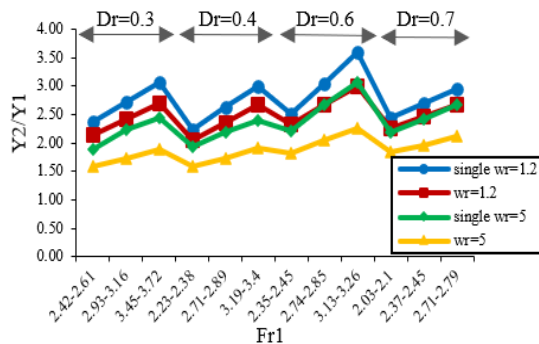
عرضی ۵ نشان داده شده است. در جدول ۳ نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- نسبت ($\frac{Y_2}{Y_1}$) به عدد Fr_1 در نسبت عرضی ۵ (عرض سیلاب دشت ۷۵ سانتی متر) نسبت به کانال بدون زبری

همان طور که از جدول های ۲ و ۳ و بررسی شکل های ۳ و ۴ مشخص است، افزایش نسبت ارتفاع زبری ها (n_r) سبب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) می شود، همچنین با افزایش عمق نسبی (D_r) در یک نسبت ارتفاع زبری (n_r) ثابت نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) کاهش می یابد. در یک عمق نسبی ثابت و نسبت ارتفاع زبری ثابت افزایش سرعت سبب افزایش نسبت عمق ثانویه پرش می شود. با مشاهده نمودارها مشخص شد که افزایش نسبت ارتفاع زبری ها (n_r) سبب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) نسبت به کانال بدون زبری می شود، اما با مقایسه نسبت ارتفاع زبری ها (n_r) با یکدیگر نتیجه گرفته شد که افزایش نسبت ارتفاع زبری ها (n_r) تأثیر چندانی بر نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) ندارد. همچنین مشخص شد که کمترین تغییر در نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) در عمق نسبی ۰/۷، مخصوصاً در نسبت ارتفاع زبری ۲ رخ می دهد، به این دلیل که ارتفاع زبری ها آنقدر کوچک و عمق ورودی آنقدر بزرگ است که حضور زبری تأثیر بسیار کمی دارد، اما هرچه نسبت ارتفاع زبری ها به ۳ و ۵ افزایش یابد، این تغییر بیشتر نمود پیدا می کند.

در شکل ۷، نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۵ نشان داده شده است. در جدول ۶ نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷- نسبت ($\frac{Y_2}{Y_1}$) به عدد Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۵ نسبت به کانال بدون زبری

جدول ۶- نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۵

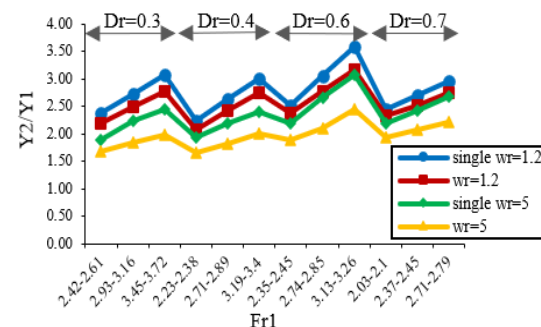
$\frac{Y_2}{Y_1}$ (%)	V (m/s)	w_r	D_r
۳۱/۸۱	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۳۵/۴۵	۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۲۶/۰۴	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۳۳/۳۳	۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۲۴/۱۵	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۶
۲۸/۰۳	۶	۵ به ۱/۲	۰/۶
۲۰/۹۲	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۷
۲۳/۸۰	۶	۵ به ۱/۲	۰/۷

همان طور که از جداول ۴ تا ۶ و بررسی شکل های ۵ تا ۷ مشخص است، افزایش نسبت عرضی (w_r) سبب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) می شود، همچنین با افزایش عمق نسبی (D_r) در یک سرعت ثابت و نسبت ارتفاع زبری (n_r) ثابت نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) کاهش می یابد. با مقایسه نمودارها با یکدیگر این نتیجه به دست آمده است که افزایش ارتفاع زبری سبب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش می شود. همچنین مشخص شد که کمترین مقدار نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) در عمق نسبی ۰/۷، در تغییر نسبت عرضی از ۱/۲ به ۵ و نسبت ارتفاع زبری ۲ رخ می دهد، به این دلیل

جدول ۴- نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۲

$\frac{Y_2}{Y_1}$ (%)	V (m/s)	w_r	D_r
۲۶/۲۶	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۲۹/۲۶	۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۲۲/۴۵	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۲۷/۵۰	۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۱۸/۵۰	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۶
۲۰/۰۴	۶	۵ به ۱/۲	۰/۶
۱۵/۱۹	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۷
۱۷/۳۸	۶	۵ به ۱/۲	۰/۷

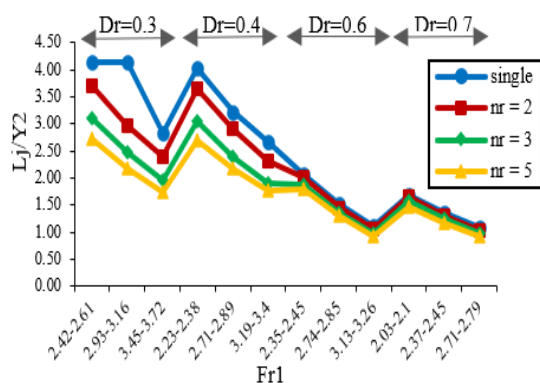
در شکل ۶، نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش ($\frac{Y_2}{Y_1}$) نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۳ نشان داده شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۳ نشان داده شده است.



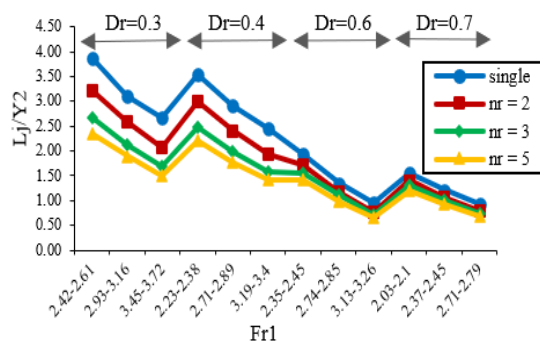
شکل ۶- نسبت ($\frac{Y_2}{Y_1}$) به عدد Fr_1 در نسبت ارتفاع زبری ۳ نسبت به کانال بدون زبری

جدول ۵- نتایج حاصل از نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت ارتفاع زبری ۳

$\frac{Y_2}{Y_1}$ (%)	V (m/s)	w_r	D_r
۲۸/۵۷	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۳۲/۷۷	۵	۵ به ۱/۲	۰/۳
۲۴/۷۴	۳/۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۳۰/۷۴	۵	۵ به ۱/۲	۰/۴
۲۲/۰۱	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۶
۲۵/۳۱	۶	۵ به ۱/۲	۰/۶
۱۸/۳۵	۴/۵	۵ به ۱/۲	۰/۷
۲۰/۹۷	۶	۵ به ۱/۲	۰/۷



شکل ۸- نسبت $(\frac{L_j}{Y_2})$ به عدد Fr_1 در نسبت عرضی ۱/۲ (عرض سیلاب دشت ۱۸ سانتی متر) نسبت به کانال بدون زبری



شکل ۹- نسبت $(\frac{L_j}{Y_2})$ به عدد Fr_1 در نسبت عرضی ۵ (عرض سیلاب دشت ۷۵ سانتی متر) نسبت به کانال بدون زبری

نسبت طول پرش به عمق ثانویه $(\frac{L_j}{Y_2})$ نسبت به عدد فرود Fr_1 در نسبت عرضی ۵ در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از نسبت طول پرش به عمق ثانویه کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۵ در جدول ۸ نشان داده شده است.

همان طور که از جداول ۷ تا ۸ و بررسی شکل های ۸ و ۹ مشخص است افزایش نسبت عرضی (W_r) سبب کاهش نسبت طول پرش به عمق ثانویه $(\frac{L_j}{Y_2})$ می شود، همچنین با افزایش عمق نسبی (D_r) در یک نسبت ارتفاع زبری (n_r) ثابت نسبت طول پرش به عمق ثانویه $(\frac{L_j}{Y_2})$ کاهش می یابد. افزایش عمق نسبی (D_r) سبب افزایش طول پرش $(\frac{L_j}{Y_2})$ می شود و افزایش عدد فرود در یک عمق نسبی (D_r) ثابت سبب کاهش طول پرش می شود.

که آنقدر عرض سیلاب دشت ها و ارتفاع زبری ها کوچک هستند و عمق ورودی آنقدر بزرگ است که عمق ثانویه تغییر چندانی نسبت به حالتی که کانال مرکب بدون زبری است، مشاهده نمی شود.

طول نسبی پرش هیدرولیکی

شکل ۸ و ۹ طول نسبی پرش $(\frac{L_j}{Y_2})$ را نسبت به عدد فرود اولیه Fr_1 نشان می دهد. همان طور که در هر دو شکل مشخص است، بیشترین طول نسبی پرش مربوط به کانال بدون زبری است. در جدول ۷ نتایج حاصل از نسبت طول پرش به عمق ثانویه کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۱/۲ نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج حاصل از نسبت طول پرش به عمق ثانویه کانال زبر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۱/۲

$\frac{L_j}{Y_2}$ (%)	V (m/s)	n_r	D_r
۱۰/۹۸		۲	
۲۸/۴۹	۳/۵	۳	۰/۳
۴۱/۱۷		۵	
۱۶/۰۹		۲	
۳۵/۹۸	۵	۳	۰/۳
۴۷/۳۷		۵	
۹/۹۰		۲	
۲۷/۶۰	۳/۵	۳	۰/۴
۴۰/۲۴		۵	
۱۴/۰۸		۲	
۳۳/۳۳	۵	۳	۰/۴
۴۴/۶۰		۵	
۲/۹۴		۲	
۹/۶۲	۴/۵	۳	۰/۶
۱۵/۰۶		۵	
۶/۹۳		۲	
۱۴/۸۷	۶	۳	۰/۶
۲۰/۶۸		۵	
۱/۸۰		۲	
۷	۴/۵	۳	۰/۷
۱۳		۵	
۴		۲	
۱۰/۷۳	۶	۳	۰/۷
۱۶		۵	

جدول ۸- نتایج حاصل از نسبت طول پرش به عمق ثانویه کانال زیر نسبت به کانال بدون زبری در نسبت عرضی ۵

$\frac{L_j}{Y_2} (\%)$	V (m/s)	n_r	D_r
۱۸/۲۹		۲	
۳۷	۳/۵	۳	۰/۳
۴۹/۵۲		۵	
۲۰/۵۰		۲	
۴۵/۱۳	۵	۳	۰/۳
۵۶/۱۲		۵	
۱۶/۸۰		۲	
۳۵/۳۰	۳/۵	۳	۰/۴
۴۷/۵۲		۵	
۲۴		۲	
۴۳/۵۰	۵	۳	۰/۴
۵۳/۹۰		۵	
۱۲/۰۹		۲	
۲۲/۰۹	۴/۵	۳	۰/۶
۳۱/۴۸		۵	
۲۱/۹۷		۲	
۲۹/۲۵	۶	۳	۰/۶
۳۷/۷۷		۵	
۱۰/۱۷		۲	
۱۷/۹۳	۴/۵	۳	۰/۷
۲۶/۷۰		۵	
۱۷/۳۴		۲	
۲۶/۵۱	۶	۳	۰/۷
۳۲/۱۰		۵	

عمق نسبی ۰/۳ مخصوصاً در نسبت ارتفاع زبری ۵ و نسبت عرضی ۵ در سرعت ۵ متر بر ثانیه رخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در کانال مرکب هرچه عرض سیلاب‌دشت‌ها بیشتر شود، عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش عرض سطح بزرگتر و آب در سطح بیشتری پخش می‌شود. همچنین افزایش عرض باعث می‌شود پرش تپل‌تر شده که کاهش طول پرش را به همراه دارد. در کانال مرکب با عمق نسبی یکسان هرچه عدد سرعت بیشتر شود، طول پرش کاهش می‌یابد. در یک سرعت ثابت هرچه عمق نسبی (D_r) افزایش یابد، طول پرش نیز افزایش می‌یابد. وجود زبری باعث افزایش عدد فرود می‌شود. وجود زبری با چیدمان منظم باعث کاهش عمق ثانویه نسبت به کانال بدون زبری می‌شود. با افزایش نسبت ارتفاع زبری‌ها (n_r)، عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. در کانال مرکب وجود زبری باعث کاهش طول پرش نسبت به کانال بدون زبری می‌شود و هرچه نسبت ارتفاع زبری‌ها (n_r) افزایش یابد، طول پرش نیز کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع زبری‌ها عمق ثانویه کاهش می‌یابد، اما با مقایسه عمق‌های ثانویه مشاهده شد که افزایش ارتفاع زبری تأثیر چشمگیری بر عمق ثانویه ندارد، اما افزایش نسبت عرضی تأثیر قابل‌مشاهده‌تری بر عمق ثانویه دارد. حداکثر کاهش طول پرش در نسبت عرضی ۵، سرعت ۵ متر بر ثانیه، عمق نسبی ۰/۳ و ارتفاع زبری ۵ اتفاق می‌افتد که حدود ۵۶/۱۲ درصد مقدار آن در کانال بدون زبری است. حداکثر کاهش عمق ثانویه در نسبت عرضی ۵، سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه، عمق نسبی ۰/۳ و ارتفاع زبری ۵ اتفاق می‌افتد که حدود ۱۳/۰۴ درصد نسبت به کانال بدون زبری است.

سپاسگزاری

از زحمات استاد راهنمای عزیز، دکتر بهداروندی عسکر که در این پژوهش بنده را همراهی کردند، تشکر و قدردانی می‌کنم.

منابع

1. Abbaspour, A., Hosseinzade, A., Farsadizadeh, D., and Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump

با مشاهده شکل‌ها مشخص شد که افزایش نسبت ارتفاع زبری‌ها (n_r) سبب کاهش نسبت طول پرش به عمق ثانویه ($\frac{L_j}{Y_2}$) نسبت به کانال بدون زبری می‌شود. همچنین مشخص شد که کمترین مقدار در کاهش نسبت طول پرش به عمق ثانویه ($\frac{L_j}{Y_2}$) در عمق نسبی ۰/۷ در نسبت ارتفاع زبری‌ها ۲ رخ می‌دهد، به این دلیل که ارتفاع زبری‌ها آنقدر کوچک و عمق ورودی آنقدر بزرگ است که وجود زبری مخصوصاً در نسبت ارتفاع زبری ۲ عملاً تأثیر چندانی ندارد، اما هرچه نسبت ارتفاع زبری ۳ و ۵ افزایش می‌یابد، این تغییر بیشتر نمود پیدا می‌کند. بیشترین مقدار در کاهش نسبت طول پرش به عمق ثانویه ($\frac{L_j}{Y_2}$) در

10. Maturi, F., and Askar, M. B., 2021. Direct measurement of the effect of non-submerged rigid vegetation-induced flow cross-section area variations on flow force in compound channel. *Flow Measurement and Instrumentation*, 78, 101884.
11. Omid, M.H., and EsmaeeliVaraki, M., 2004. Theoretical and experimental study of the expanding hydraulic jump in trapezoidal channel. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 9:17-30.
12. Parsamehr, P., and Hosseinzade, A., 2013. Experimental study of the effect of rough bed on the relative conjugate depth of hydraulic jump on the reverse slope. *Journal of Irrigation Engineering Sciences*, 36(1): 89-101. [In Persian].
13. Peterka, A. J., 1978. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipater. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Washington. 240 p.
14. Rajaratnam, N., 1976. Turbulent jets. Elsevier Science, Amsterdam. The Netherlands.
15. Shafaei Bejestan, M., and Nisi, K., 2009. Investigation of hydraulic jump sequent depth under the influence of rough floor components. *Journal of Soil and Water Science*, 19(1): 165-176. [In Persian].
- characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, 3(2): 109-117.
2. Dastourani, M., Esmaili, K., and Khodashenas, S. R., 2016. The impact of water rectangular jet angel on the characteristics of hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3): 225-238. [In Persian].
3. Esmaili, K., and Abrishami, J., 2001. Hydraulic jump over negative slopes with negative steps. *Jame*. 19(2): 97-110. [in Persian].
4. Ead, S. A., and Rajaratnam, N., 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7): 656-663.
5. Elsebaie, I.H. and Shabayek, S., 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *International Journal of Civil T Environment al Engineering IJCEE-IJENS*, 10(1): 37-47.
6. Farhoudi, J., 1993. Flow in Open Streams (Translation). Orumiyeh University Pub.
7. Gohari, A., and Farhoudi, J., 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, Aug. 9-14. British Columbia.
8. Hosseini, S. M., and Abrishami, J., 1999. Open Channel Hydraulics. Second Ed. Astan Quds Razavi Pub. Mashhad, Iran. [In Persian].
9. Hughes, W.C., and Flack, J.E., 1984. Hydraulic jump properties over rough bed. *Journal Hydrualic Engineering*. 110(12): 1751-1771.