

تأثیر شکل دیواره‌ی تبدیل‌های واگرا در خصوصیات پرش هیدرولیکی

حجت صادقی* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

رسول دانش‌فراز (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

جواد بهمنش (دانشیار)

گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه ارومیه

محمدرضا نیک‌پور (استادیار)

گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۵۷-۶۲

پرش هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع است، که مورد توجه مهندسان هیدرولیک است. در این مطالعه به توجه به اهمیت بالای این پدیده در علم هیدرولیک، خصوصیات هیدرولیکی پرش تشکیل‌یافته در تبدیل‌های واگرا با ۳ شکل دیواره‌ی S - شکل، مستقیم، و انحنا دار به ازا ۵ عدد فرود مختلف در بازه‌ی $0.5 < Fr_1 < 0.9$ بررسی شده است. بدین منظور مقادیر عمق و سرعت در نقاط مختلف پرش هیدرولیکی در تبدیل‌ها برداشت شده است. پس از تحلیل نتایج، مقادیر بیشینه و کمینه‌ی سرعت و طول پرش و از سوی دیگر، عمق پرش به ترتیب در تبدیل‌های انحنا دار و S - شکل مشاهده شده است. مقادیر به دست آمده از تبدیل با دیواره‌ی مستقیم نیز در بازه‌ی مقادیر دو تبدیل دیگر واقع شده است. نتایج نشان داده است که به ازا طول ثابت دیواره‌ی تبدیل، انحنای دیواره‌ها باعث کاهش تدریجی سرعت و در نتیجه کاهش نرخ استهلاك انرژی در پرش هیدرولیکی می‌شود.

hojat_sadeghi25@yahoo.com
daneshfaraz@yahoo.com
j.behmanesh@urmia.ac.ir
nikpoor.reza@gmail.com

واژگان کلیدی: پرش هیدرولیکی، تبدیل واگرا، طول پرش، عمق ثانویه، نرخ استهلاك انرژی.

۱. مقدمه

انتقال جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی توسط یک مکانیسم پراکنش قوی، که پرش هیدرولیکی نامیده می‌شود، مشخص می‌شود. این پدیده در نتیجه تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی ایجاد می‌شود. در اثر پدید آمدن پرش هیدرولیکی، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی افزایش و ضمن ایجاد افت انرژی زیاد، سرعت جریان به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. به همین دلیل پرش هیدرولیکی برای استهلاك انرژی جریان‌های فوق بحرانی با سرعت زیاد در پایین دست سازه‌هایی نظیر سدها، تندآب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، در حوضچه‌ی آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت بالای این پدیده در علم هیدرولیک، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری در زمینه‌ی بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی انجام شده است. برخی پژوهشگران در سال ۱۹۳۶، جزء اولین افرادی بودند که روابطی را برای تعیین طول پرش هیدرولیکی ارائه کردند.^[۱] و پس از آن برخی دیگر نیز تحقیقاتی را در

زمینه‌ی تعیین طول پرش هیدرولیکی انجام دادند.^[۲] همچنین برخی پژوهشگران نیز در سال ۲۰۰۸، جزء اولین محققانی بودند که مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر انجام دادند.^[۴] به دلیل ایجاد کاویتاسیون در زبری‌های کف، پژوهشگران دیگری در سال ۲۰۰۲ بسترهای موج‌دار را پیشنهاد کردند، و پوشش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار سینوسی شکل را در بازه‌ی عدد فرود ۴ تا ۱۰ و ارتفاع نسبی موج $t/1/8$ ارتفاع موج بستر و $1/8$ عمق اولیه‌ی پرش) برابر ۰/۲۵، ۰/۴۳، ۰/۷۵ بررسی کردند.^[۵] در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۰ نیز پرش هیدرولیکی بر روی ۵ نوع بستر زبر به شکل‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ی (با دو شیب کناره‌ی مختلف) و مستطیلی در محدوده‌ی اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ بررسی، و در تمام آزمایش‌ها ارتفاع زبری و طول موج به ترتیب ۱/۸ و ۶/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. براساس نتایج به دست آمده زبری نسبی و شکل زبری‌ها اثر قابل توجهی در عمق مزدوج نسبی ندارد، و میزان کاهش عمق مزدوج نسبی (D) به طور متوسط برابر با ۰/۳۷ به دست آمده است.^[۶] اولین مطالعات در زمینه‌ی کنترل پرش هیدرولیکی با آب‌پایه در پژوهش‌هایی در سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۱ انجام

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۸/۲۸، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۱۱.

شد. [۸۷] همچنین آخرین مطالعه در زمینه‌ی آب‌پایه مربوط به سال ۲۰۰۷ است، که در آن به بررسی خصوصیات پرش کنترل‌شده با آب‌پایه با از نوع Minimum-B در محدوده‌ی اعداد فرود ۱/۶ تا ۱۱ پرداخته شده است. [۹] پرش هیدرولیکی بر روی سطوح شیب‌دار در قرن ۱۹ و ۲۰ توسط تعدادی از پژوهشگران مطالعه شد. [۱۰] پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس در دو حالت بستر صاف و زیر در سال ۲۰۰۹ بر روی ۴ شیب کف ۰/۱۲۵، -۰/۲۵، -۰/۳۷۵، -۰/۵ و -۰/۵۵ انجام شد و نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش بر روی بستر صاف بیشتر از بستر زبر، با شیب و عدد فرود یکسان است و در مقایسه‌ی درصد اتلاف انرژی، اتلاف انرژی بیشتری در بستر زبر نسبت به بستر صاف ایجاد می‌شود. [۱۱] در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۱ نیز میزان غلظت حباب هوای محبوس در پرش هیدرولیکی با استفاده از حس‌گرهای مخصوص و به ازاء $(2/4 < Fr_1 < 5/1)$ اندازه‌گیری شد. [۱۲] در مطالعه‌ی دیگری در همان سال نیز تأثیر دو نوع زیری زیگزاگ و نواری بر روی عمق ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی به ازاء اعداد فرود ۱۱/۵-۲/۹۸ مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد که زبری زیگزاگ باعث کاهش عمق ثانویه در حدود ۱۴ تا ۴۰ درصد شده است، ضمن اینکه زبری نواری نیز کاهش ۳۰٪ عمق ثانویه را به همراه داشته است. [۱۳] مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در سال‌های ۱۹۷۹ و ۲۰۰۷ در رابطه با اثر واگرایی دیواره‌ها در مشخصات پرش در مقاطع مستطیلی نشان داده است که افزایش زاویه‌ی واگرایی در حوضچه‌های آرامش مستطیلی موجب کاهش طول و عمق ثانویه‌ی پرش و افزایش افت انرژی در مقایسه با پرش مستقیم می‌شود. [۱۴، ۱۵] در نتیجه هزینه‌های احداث حوضچه‌های آرامش با مقاطع واگرا به مراتب کمتر از حوضچه‌های مستقیم خواهد بود و طرح این حوضچه‌ها را اقتصادی‌تر می‌کند. همچنین مطالعات انجام‌شده نشان داده است که با افزایش واگرایی دیواره‌های هدایت‌کننده‌ی جانبی حوضچه‌ی آرامش، عمق گودال آبستنگی کاهش می‌یابد. [۱۶]

در این مطالعه تأثیر شکل دیواره‌ی تبدیل واگرا در خصوصیات پرش هیدرولیکی بررسی شده است، که بدین منظور سه نوع تبدیل واگرا با شکل‌های متفاوت استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این مطالعه کار آزمایشگاهی بر روی فلومی فلزی با مقطع مستطیلی به طول ۸ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر با شیب کف ۰/۰۲، که بر روی یک شاسی به ارتفاع ۱/۱ متر از سطح زمین قرار داشته است، انجام شده است. به منظور تأمین ارتفاع استاتیک آب جهت تشکیل پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف، مخزنی به طول ۱/۷۵ متر، عرض ۱/۶۵ متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر در بالادست دریاچه‌ی کشویی قرار گرفته است. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی ورودی و تنظیم عمق اولیه‌ی موردنظر برای محدوده‌ی اعداد فرود مختلف، در بالادست کانال و در قسمت انتهایی مخزن تأمین فشار، یک دریاچه‌ی کشویی با لبه‌ی تیز از جنس ورق فلزی به عرض ۱ متر و ارتفاع ۱/۲۵ متر نصب شده است. همچنین برای کنترل پرش هیدرولیکی از یک دریاچه‌ی کشویی تعبیه‌شده در انتهای پایین‌دست کانال استفاده شده است، به صورتی که پرش هیدرولیکی در فاصله‌ی مشخصی از دریاچه‌ی بالادست تثبیت شود. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی‌سنج صوتی^۱ مدل UFM۶۱۰P، ساخت شرکت Krohne، با دقت $\pm 2\%$ ، که حس‌گرهای آن بر روی لوله‌ی آب‌رسان فلوم نصب شده، انجام شده است. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در نقاط مختلف، از

سرعت‌سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق^۲، ساخت شرکت ژاپنی ALEC Electronics، با خروجی دیجیتال استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب از عمق‌سنج نقطه‌ی مکانیکی^۳ با دقت اندازه‌گیری $\pm 0/1$ میلی‌متر، ساخت شرکت Armfield، استفاده شده است. آزمایش‌ها به ازاء ۵ عدد فرود مختلف (با تغییر هد مخزن) انجام شده‌اند. مقایر اعداد فرود به همراه هد متناظر با آنها در جدول ۱ ارائه شده است. منظور از Fr_1 در جدول مذکور، عدد فرود جریان نزدیک‌شونده است.

در تمامی آزمایش‌ها، عرض کانال‌های بالادست و پایین‌دست به ترتیب برابر ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر بوده است. همان‌گونه که اشاره شد، در این مطالعه سه نوع تبدیل واگرا با شکل‌های متفاوت استفاده شده است. در شکل‌های ۱ الی ۳، نمای کلی تبدیل‌های مذکور نمایش داده شده است.

در شکل‌های ۴ الی ۶ نیز نمونه‌ی از پرش هیدرولیکی تشکیل‌یافته در تبدیل‌های فوق نمایش داده شده است.

پس از تشکیل پرش هیدرولیکی از فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متری ابتدای پرش، مقادیر سرعت لحظه‌ی در راستای قائم و به فواصل طولی ۳۰ سانتی‌متر (۵ مقطع) برداشت شده است. برداشت داده‌ها در اولین راستای قائم در فواصل عمودی ۱ سانتی‌متری و در سایر راستاها در فواصل عمودی ۳ سانتی‌متری انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

در شکل‌های ۷ الی ۹ پروفیل‌های سرعت برداشت‌شده در مقاطع مختلف پرش در تبدیل‌های واگرا با دیواره‌های s- شکل، مستقیم و انحناءدار به ازاء اعداد فرود

جدول ۱. مقادیر هد مخزن و اعداد فرود متناظر با آن.

هد مخزن (متر)	۰/۵۰	۰/۷۶	۰/۹۱	۱/۰۳	۱/۱۴
Fr_1	۵/۸	۷/۳	۸/۰	۸/۵	۹/۱



شکل ۱. تبدیل s شکل.



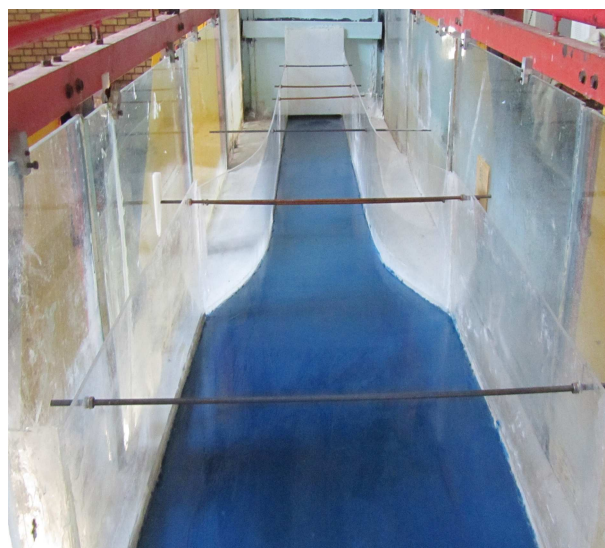
شکل ۴. تشکیل پرش هیدرولیکی در تبدیل s شکل.



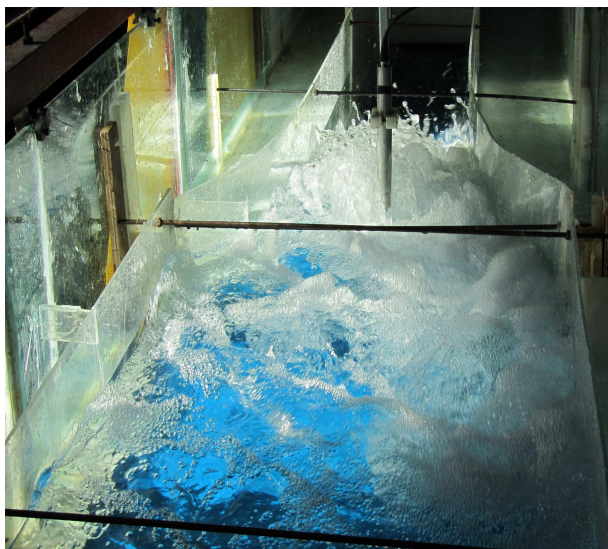
شکل ۲. تبدیل با دیواره‌ی مستقیم.



شکل ۵. تشکیل پرش هیدرولیکی در تبدیل با دیواره‌ی مستقیم.



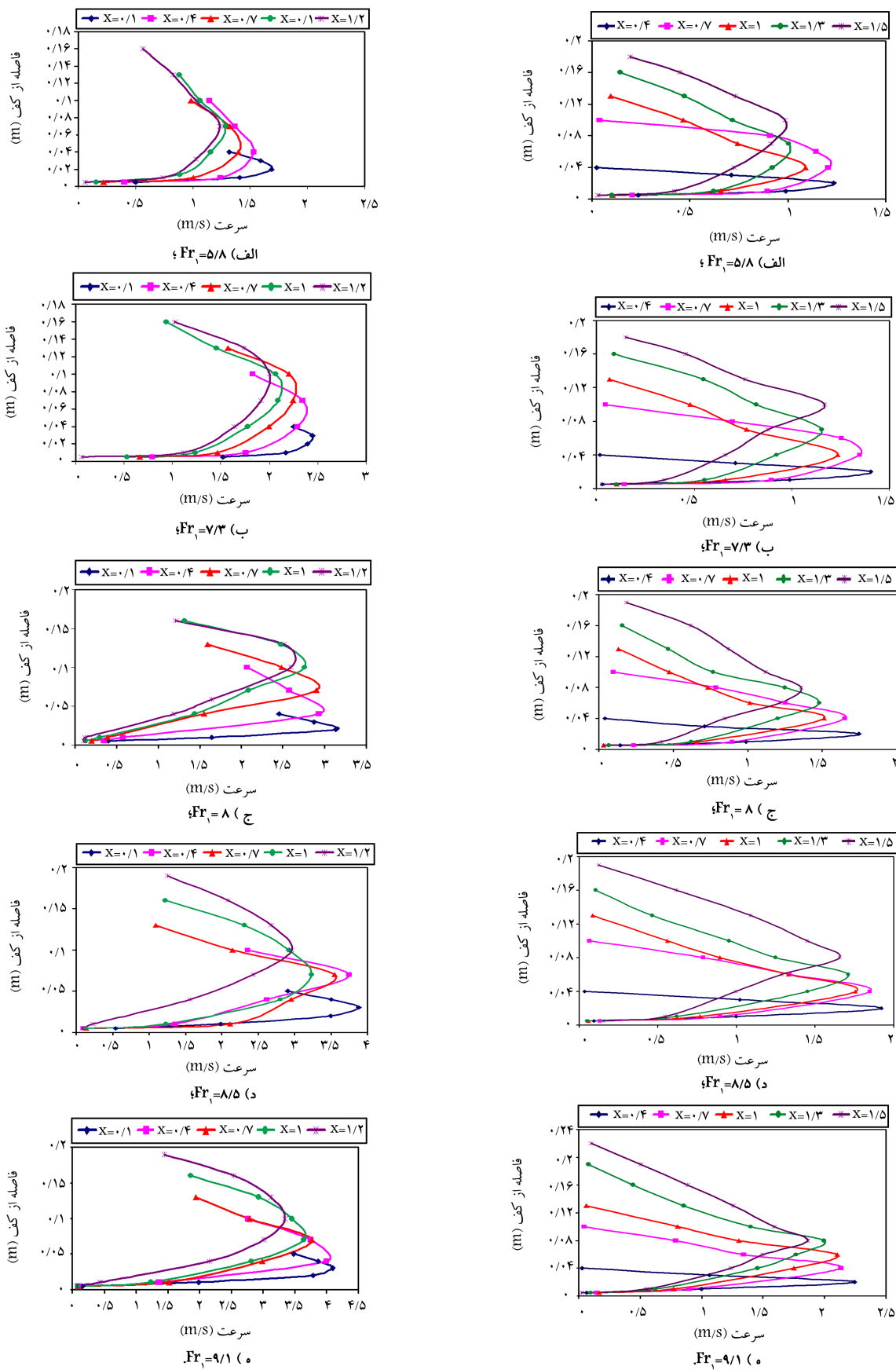
شکل ۳. تبدیل انحنادار.



شکل ۶. تشکیل پرش هیدرولیکی در تبدیل انحنادار.

مختلف نمایش داده شده است. در شکل‌های مذکور منظور از x فاصله از ابتدای پرش بر حسب متر است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در کلیه مقاطع اندازه‌گیری سرعت، ابتدا با فاصله‌گرفتن از کف بستر مقدار سرعت افزایش و پس از رسیدن به مقدار بیشینه، مقدار آن کاهش یافته است. در واقع وقوع پرش هیدرولیکی باعث اختلاط شدید آب و هوا در نزدیکی سطح آب می‌شود و در نتیجه آن، انرژی جریان کاهش می‌یابد و از مقادیر سرعت کاسته می‌شود. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که در تبدیل انحنادار، کاهش سرعت جریان در نزدیکی سطح آب نسبت به دو تبدیل دیگر با شدت کمتری صورت گرفته است. در این تبدیل به علت انحنای دیواره‌ها و افزایش ملایم و تدریجی عرض کانال، در هنگام وقوع پرش هیدرولیکی اختلاط آب و هوای کمتری نسبت به دو تبدیل دیگر رخ می‌دهد و همین عامل باعث می‌شود تا استهلاك انرژی جریان در فاصله‌ی طولانی‌تری انجام شود و به عبارت دیگر، طول پرش هیدرولیکی L_p افزایش و عمق ثانویه پرش y_p کاهش می‌یابد. همچنین به ازاء یک عدد فرود ثابت، مقادیر بیشینه‌ی سرعت در تبدیل‌های انحنادار نسبت به



شکل ۸. پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در تبدیل با دیواری مستقیم به‌ازاء اعداد فرود مختلف.

شکل ۷. پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در تبدیل s - شکل به‌ازاء اعداد فرود مختلف.

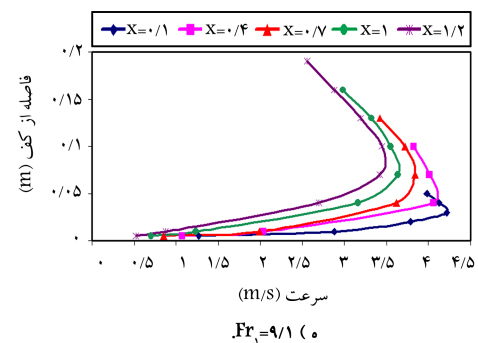
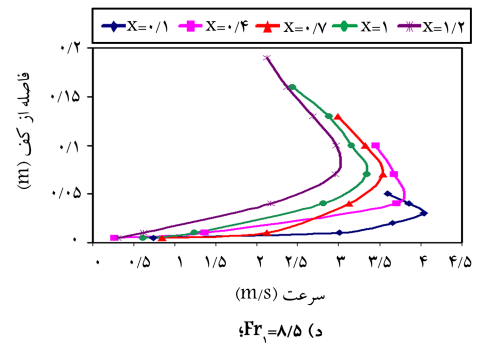
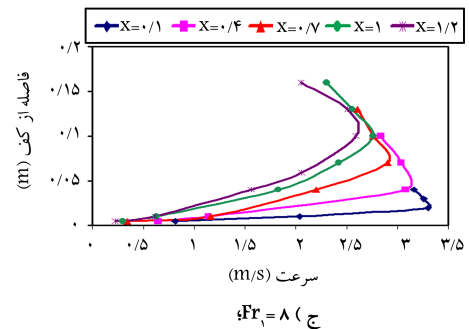
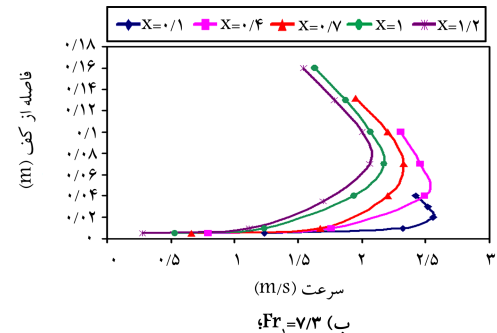
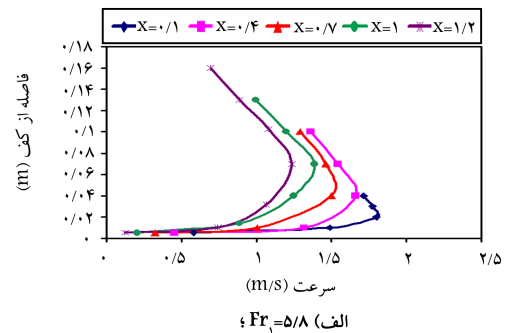
جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی پرش در تبدیل‌های مورد آزمایش.

نوع تبدیل	Fr_1	L_j (cm)	y_2 (cm)	ΔE (%)
s - شکل	۵٫۸	۹۰	۱۸٫۷۴	۴٫۴۲
	۷٫۳	۹۶٫۵	۱۹٫۵۲	۲۹٫۲۹
	۸٫۵	۱۰۵	۲۰٫۵	۵۱٫۸۷
	۸٫۵	۱۱۴٫۵	۲۲٫۳۵	۶۰٫۰۶
	۹٫۱	۱۲۰	۲۵٫۵	۶۱٫۲۶
	۵٫۸	۱۱۸٫۵	۱۷٫۸۵	۳٫۵۷
مستقیم	۷٫۳	۱۲۱	۱۸٫۷	۲۱٫۶۳
	۸٫۵	۱۲۲٫۷	۱۹٫۲۵	۴۷٫۹۲
	۸٫۵	۱۲۵	۲۰٫۶	۵۹٫۴۲
	۹٫۱	۱۲۸٫۵	۲۱٫۵	۶۱٫۰۱
	۵٫۸	۱۲۲٫۵	۱۶٫۵۴	۲٫۲۷
	۷٫۳	۱۲۴٫۸	۱۷٫۵۶	۱۸٫۵۵
انحنادار	۸٫۵	۱۲۶٫۳	۱۸٫۳۵	۴۴٫۸۱
	۸٫۵	۱۲۸٫۵	۱۹٫۲۸	۵۸٫۵۶
	۹٫۱	۱۳۱٫۶	۲۱٫۵	۵۸٫۹۸

دو تبدیل دیگر بیشتر است، که علت آن پایین بودن نرخ استهلاک انرژی و کاهش تدریجی سرعت است. اما در تبدیل s - شکل به علت افزایش ناگهانی عرض کانال، شدت اختلاط آب و هوا نیز بیشتر است، به طوری که در نزدیکی سطح آب سرعت جریان به شدت کاهش یافته و به صفر نزدیک شده است. همچنین در این تبدیل نرخ استهلاک انرژی نسبت به دو تبدیل دیگر بیشتر بوده و طول پرش نیز کمتر است. نتایج تبدیل با دیواره‌ی مستقیم نیز بینابین مقادیر دو تبدیل دیگر قرار دارد. در جدول ۲، مقادیر طول پرش، عمق ثانویه و نرخ استهلاک انرژی نسبی (ΔE) به ازاء اعداد فرود مختلف در تبدیل‌های مورد آزمایش ارائه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر شکل دیواره‌ی تبدیل واگرا در خصوصیات پرش هیدرولیکی بررسی شده و بدین منظور سه نوع تبدیل واگرا با شکل‌های متفاوت استفاده شده است. پروفیل‌های سرعت برداشت‌شده، نشان داده است که در هر سه تبدیل ابتدا با فاصله‌گرفتن از بستر مقدار سرعت افزایش و پس از رسیدن به بیشینه کاهش می‌یابد. اختلاط شدید آب و هوا در نزدیکی سطح آب در هنگام وقوع پرش هیدرولیکی، عامل اصلی پدیده‌ی مذکور است. از سوی دیگر، مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت تبدیل‌ها نشان داده است که در تبدیل انحنادار به علت انحنای دیواره‌ها و افزایش ملایم و تدریجی عرض کانال، در هنگام وقوع پرش هیدرولیکی اختلاط



شکل ۹. پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی در تبدیل با دیواره‌ی انحنادار به‌ازاء اعداد فرود مختلف.

آب و هوای کمتری نسبت به دو تبدیل دیگر رخ می‌دهد و لذا کاهش سرعت در

این تبدیل نسبت به دو تبدیل دیگر کمتر است. به علاوه اینکه در تبدیل s - شکل به علت افزایش ناگهانی عرض کانال، شدت اختلاط آب و هوا نیز بیشتر بوده است؛ به طوری که در نزدیکی سطح آب بیشترین کاهش سرعت را در نزدیکی سطح آب (نسبت به دو تبدیل دیگر) به خود اختصاص داده است. در نهایت براساس نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که به ازاء یک عدد فرود ثابت، روابط ۱ الی ۴ میان

سه نوع تبدیل مذکور برقرار است:

$$L_{j(\text{curved})} > L_{j(\text{straight})} > L_{j(\text{s-shaped})} \quad (۱)$$

$$u_{\max(\text{curved})} > u_{\max(\text{straight})} > u_{\max(\text{s-shaped})} \quad (۲)$$

$$y_{\tau(\text{curved})} < y_{\tau(\text{straight})} < y_{\tau(\text{s-shaped})} \quad (۳)$$

$$\Delta E_{(\text{curved})} < \Delta E_{(\text{straight})} < \Delta E_{(\text{s-shaped})} \quad (۴)$$

پانویسها

1. ultrasonic flow meter
2. electromagnetic current velocity sensor
3. point gauge

منابع (References)

1. Chow, V.T., *Open Channel Hydraulics*, Mc Graw-Hill, New York (1959).
2. Hager, W.H., *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers (1992).
3. Gohari Khaliliha, A. "The investigation of the features of hydraulic jump on rough beds", Unpublished M.Sc thesis, Irrigation and Reclamation Engineering Group, Faculty of Soil and Water Engineering, Tehran University (1388).
4. Pagliara, S., Lotti, I. and Palermo, M. "Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures", *J. of Hydro-Environ. Res.*, **2**(1), pp. 29-38 (2008).
5. Ead, S.A. and Rajaratnam, N. "Hydraulic jump on corrugated bed", *J. of Hydraul. Eng-Asce.*, **128**(7), pp. 656-663 (2002).
6. Ibrahim, H.E. and Shazy, S. "Formation of hydraulic properties over a rough bed", *J. of Civ-Environ. Eng.*, **1**(10), pp. 40-50 (2010).
7. Karki, K.S. "Supercritical flow over sills", *J. of Hydr. Eng. Div. Asce.*, **10**, pp. 1449-1459 (1976).
8. Ohtsu, I. "Forced hydraulic jump by a vertical sill Trans", *J. of Hydraul. Sanit. Eng. Div-Jsce.*, **13**, pp. 165-168 (1981).
9. Debabeche, M. and Achour, B. "Effect of sill in the hydraulic jump in a trianzular channel", *J. of Hydraul. Res.*, **45**(1), pp. 135-139 (2007).
10. Rajaei, H., Beirami, M.H. and Chamani, M.R. "The introduction and analysis of the new type of hydraulic jump (B-F type) on sloped surfaces with negative slope and the investigation of this type of jump in stilling basin", A paper Presented at Sixth International Conference on Civil Engineering (ICCE), Isfahan Industrial University, pp. 109-116 (15-17 Ordibehesht 1382).
11. Nikmehr, S. and Tabebordbar, A. "Hydraulic jump on adverse slop in two cases of rough and smooth bed", *Int. J. of Appl. Sci. Eng. Tech-ISSN.*, **2**(1), pp. 19-22 (2009).
12. Chachereau, Y. and Chanson, H. "Air entrainment and scale effects in hydraulic jumps with small froude numbers", 33th Hyd. And water Res. Symp., pp. 2388-2395 (2011).
13. Fathy, A. and Sun, Z. "Effect of prismatic elements as bed roughness on hydraulic jump characteristics", *J. of Phys. Sci-ISSN.*, **7**(17), pp. 2607-2615 (2012).
14. Khelifa, A.M. and McCorquodale, A.M. "Radial hydraulic jump", *J. of Hydr. Eng. Asce.*, **105**(9), pp. 1065-1078 (1979).
15. Omid, M.H., Esmailin Varaki, M. and Narayanan, R. "Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel", *J. of Hydr. Res. IAHR.*, **45**(4), pp. 512-518 (2007).
16. Mosavi Khandan, A., Borgheie, M. and Daemi, E. "Scour profile properties in downward of divergent stilling basin", A Paper Presented at Third National Conference on Hydraulic, University of Tehran, pp. 97-104 (15-17 Aban 1380).