پرش هیدرولیکی دایره‌یی روی سطوح شیب‌دار با شیب معکوس

مصطفی فاضلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

عبدالرضا کبیری سامانی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳۷-۴۷

در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز سدها، شوت‌ها، آبشارها به دلیل سرعت زیاد جریان، احداث سازه‌یی مناسب جهت استهلاك انرژی جریان به‌منظور جلوگیری از فرسایش پایین‌دست ضروری است. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلك‌کننده‌ی انرژی، حوضچه‌های آرامش هستند که در سه نوع کلاسیک، واگرا و دایره‌یی استفاده می‌شوند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مشخصات پرش در حوضچه‌ی دایره‌یی نسبت به دو حوضچه‌ی دیگر بهبود یافته است. لذا در پژوهش حاضر از دو مدل تحلیلی و آزمایشگاهی جهت بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی دایره‌یی روی شیب معکوس استفاده شده است. در مدل تحلیلی با استفاده از روابط انتگرالی حاکم بر دینامیک سیالات به استخراج رابطه‌هایی برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی قابل استفاده برای هر دو نوع پرش کلاسیک و دایره‌یی پرداخته شده است. با بررسی میزان تأثیر پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی آزمایشگاهی مشاهده شد که با افزایش نسبت شعاع‌های مزدوج ۲ تا ۵٪، نسبت اعماق مزدوج و طول پرش به ترتیب ۳° و ۶۰٪ کاهش و افت نسبی انرژی ۳۰٪ افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: حوضچه‌ی آرامش دایره‌یی، اعماق مزدوج، طول پرش، شعاع‌های مزدوج.

mfazeli.2012@yahoo.com
akabiri@cc.iut.ac.ir

۱. مقدمه

معمولاً در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز سدها، شوت‌ها، آبشارها و پایین‌دست دریچه‌ها، به دلیل سرعت زیاد جریان، احداث سازه‌یی مناسب جهت استهلاك انرژی اضافی جریان و کاهش سرعت آن به‌منظور جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست ضروری است. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلك‌کننده‌ی انرژی، حوضچه‌های آرامش^۱ از نوع پرش هیدرولیکی^۲ هستند که در آن‌ها با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی و تغییر رژیم جریان از فوق‌بحرانی به زیربحرانی، انرژی جریان مستهلك می‌شود. در طراحی متداول حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی، عرض حوضچه تا انتها ثابت نگه داشته می‌شود. ولی در مواردی ثابت نگه داشتن عرض به روش اشاره شده با مشکلاتی نظیر: غیراقتصادی بودن طرح، تغییر مشخصات پرش با تغییرات تراز پایاب، نامطلوب بودن عملکرد حوضچه‌های آرامش متداول به ازاء اعداد فرود کم و سایر همراه است.^[۱] پارامترهایی مانند طول حوضچه و عمق پایاب موردنیاز، از جمله مشخصات مهمی هستند که در اقتصادی‌تر کردن سازه‌ی حوضچه‌ی آرامش تأثیر فراوانی دارند. لذا پژوهشگران همواره در تلاش بوده‌اند تا با اتخاذ تمهیداتی، عمق ثانویه و طول پرش را کاهش دهند و طرح حوضچه‌های آرامش

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۴/۵، اصلاحیه ۱۳۹۷/۸/۱۲، پذیرش ۱۳۹۷/۸/۲۶

DOI:10.24200/J30.2018.50627.2334

را اقتصادی‌تر کنند. بنابراین برای غلبه بر مشکلات ذکر شده و اقتصادی‌تر کردن طرح، انواع دیگری از حوضچه‌های آرامش نظیر: حوضچه‌های آرامش با دیواره‌ی جانبی واگرا^۳،^[۲] حوضچه‌های آرامش دایره‌یی^۴ مطرح شده‌اند. با توجه به تأثیر مثبت شیب معکوس در بهینه‌سازی پارامترهای پرش هیدرولیکی کلاسیک، استفاده از حوضچه‌های آرامش دایره‌یی با شیب کف معکوس می‌تواند گزینه‌ی قابل رقابتی برای حوضچه‌های معمول محسوب شود. تاکنون مطالعات محدودی در ارتباط با کارایی بهتر حوضچه‌های آرامش واگرا و دایره‌یی نسبت به حوضچه‌های کلاسیک صورت گرفته است؛ از جمله: در سال ۱۹۶۹، خصوصیات پرش هیدرولیکی دایره‌یی بررسی شده است که در آن با فرض تغییرات خطی پروفیل پرش و به‌کارگیری قوانین پیوستگی، انرژی و مومنتوم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه شده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ضمن تأیید فرضیات به‌کار رفته دریافت‌اند که نسبت عمق ثانویه و طول پرش در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش و افت انرژی افزایش می‌یابد.^[۴]

در سال ۱۹۷۱، خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا مطالعه و با فرض پروفیل ربع بیضی برای نیم‌رخ پرش و به‌کارگیری قوانین حاکم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت انرژی ارائه شد و نتایج نشان داد که واگرایی سبب کاهش عمق ثانویه، افزایش افت نسبی انرژی و کاهش طول پرش در مقایسه با پرش

کلاسیک می‌شود.^[۵] در پژوهش دیگری در سال ۱۹۷۵، با فرض تغییرات خطی پروفیل پرش و به‌کارگیری تئوری لایه‌ی مرزی، روابطی برای عمق ثانویه و افت نسبی انرژی حوضچه‌های دایره‌ی ارائه و نتایج با اطلاعات مدل آزمایشگاهی ارزیابی شدند.^[۶]

در یک مطالعه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی در سال ۱۹۷۹، نیز طول و افت انرژی پرش هیدرولیکی شعاعی بررسی شد و با شعاعی در نظر گرفتن خطوط جریان و یک معادله‌ی درجه ۲ برای پروفیل سطح پرش، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در کانال مستطیلی و اگر ا ارائه شد و نتایج نشان داد که واگرایی دیواره‌ها در مقایسه با پرش کلاسیک، موجب کاهش طول پرش به میزان ۷۰٪ و افزایش افت انرژی به میزان ۱۵٪ می‌شود. همچنین در سال ۱۹۸۰، خصوصیات پرش هیدرولیکی شعاعی در حالت مستغرق بررسی و ملاحظه شد که طول و افت انرژی پرش نسبت به حالت جریان آزاد به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.^[۷]

همچنین در سال ۱۹۸۳، خصوصیات هیدرولیکی پرش دایره‌ی بررسی و با فرض تغییرات خطی پروفیل پرش و به‌کارگیری قوانین حاکم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه شد.^[۹] در سال ۲۰۰۷، نیز تأثیر زاویه‌ی واگرایی و شیب جانبی حوضچه‌ی آرامش دوزنقه‌ی در مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی و با فرض شکل ربع بیضی برای نیمرخ پرش، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه شد و نتایج نشان داد که با افزایش زاویه‌ی واگرایی، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به ترتیب ۲۲/۵ و ۳۰٪ کاهش و افت نسبی انرژی ۲۴/۵٪ افزایش می‌یابد.^[۱۰]

همچنین در سال ۲۰۱۴، یک معادله‌ی عمومی برای نسبت اعماق مزدوج ارائه شد، که برای پرش مستغرق و آزاد، در هر دو حالت شعاعی و کلاسیک قابل استفاده است.^[۱۱] بیشتر مطالعات تجربی و تحلیلی موجود در ارتباط با پرش هیدرولیکی کلاسیک، در کانال‌های افقی یا با شیب مثبت ملایم یا تند انجام شده و در مورد کف‌های با شیب معکوس اطلاعات بسیار محدودی در اختیار است. اولین مطالعه در زمینه‌ی پرش روی شیب معکوس، توسط راوز^۵ انجام گرفت. وی دریافت که پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس، فقط بر روی شیب‌های نزدیک به صفر پایدار است. استیونس^۶ نیز با مدل‌سازی تحلیلی بیان داشت که پرش هیدرولیکی بر روی تمامی شیب‌های معکوس بدون هیچ‌گونه محدودیتی پایدار است.^[۱۲] در ادامه‌ی برخی مطالعات در سال ۱۹۷۲، با انجام آزمایش‌هایی در ارتباط با پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۰/۲۵ ملاحظه شد که پرش هیدرولیکی در شیب‌های تندتر غیرممکن است و نتیجه‌گیری شد که طول پرش هیدرولیکی روی بستر با شیب معکوس، نسبت به بستر افقی کمتر است.^[۱۳] همچنین در سال ۱۹۹۴، مطالعه‌ی در ارتباط با پرش هیدرولیکی در شیب معکوس صورت پذیرفت و آزمایش‌هایی بر روی حوضچه‌ی با شیب معکوس تا ۰/۲۵ در محدوده‌ی اعداد فرود ۲ تا ۱۰ انجام شد و نتایج مطالعات نشان داد که امکان ایجاد پرش پایدار بر روی شیب‌های منفی وجود دارد.^[۱۴]

مطالعه‌ی دیگری نیز در همان سال در مورد پرش هیدرولیکی کلاسیک روی شیب‌های معکوس ۰/۱، ۰/۱۶۷ و ۰/۲ انجام شد و نتایج نشان داد که تثبیت پرش در این‌گونه بسترها در اعداد فرود کمتر از ۹ مشکل است.^[۱۵] در سال ۲۰۰۶، پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار بررسی و با به‌کارگیری معادله‌ی اندازهی حرکت، روابطی برای انواع پرش روی سطوح شیب‌دار ارائه و عنوان شد که در دبی‌های کوچک، ایجاد پرش نوع F ، روی شیب‌های تندتر از ۰/۱ و ۰/۷۵ غیرممکن است. بیشتر پژوهشگران ذکر شده گزارش کرده‌اند که برای تشکیل پرش نوع F ، یک عدد فرود کمینه (F_{rmin}) مورد نیاز است و بیان کرده‌اند که عدد فرود کمینه به طول

حوضچه وابسته است و هر چه طول حوضچه کوتاه‌تر شود، F_{rmin} کوچک‌تری برای تشکیل پرش نوع F مورد نیاز است.^[۱۶]

حوضچه‌های آرامش دایره‌ی با کف افقی پیش از این توسط برخی از پژوهشگران مطالعه و خصوصیات پرش و نکات مربوط به طراحی آن‌ها به صورت محدود ارائه شده است. از آنجایی که موضوع پرش در مسیر کانال‌ها و حوضچه‌های با شیب معکوس^۷ هنوز در سطح وسیعی بررسی نشده است، و از طرف دیگر، شیب معکوس کف حوضچه‌های آرامش سبب کاهش هزینه‌های اجرا می‌شود، استفاده از حوضچه‌های آرامش دایره‌ی با شیب کف معکوس می‌تواند گزینه‌ی قابل رقابتی برای حوضچه‌های معمول محسوب شود. و از آنجا که تاکنون تأثیر شیب معکوس در خصوصیات پرش هیدرولیکی دایره‌ی مطالعه نشده است، لذا هدف پژوهش حاضر بررسی شرایط و خصوصیات پرش هیدرولیکی دایره‌ی بر روی شیب‌های معکوس بوده است.

۲. مدل‌سازی تحلیلی و آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر از دو مدل تحلیلی و آزمایشگاهی جهت بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی سطوح شیب‌دار با شیب معکوس نظیر نسبت اعماق مزدوج، افت نسبی انرژی و طول نسبی پرش استفاده شده است. در مدل تحلیلی با اعمال یک سری فرضیات و به‌کارگیری روابط انتگرالی حاکم بر دینامیک سیالات به استخراج رابطه‌هایی برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی، قابل استفاده برای هر دو نوع پرش کلاسیک و دایره‌ی، پرداخته شده است. مدل‌سازی آزمایشگاهی در یک مخزن مکعبی به طول ضلع ۲/۵ و ارتفاع ۱/۵ متر بر روی یک صفحه دایره‌ی به قطر ۲ متر در فاصله‌ی ۰/۵ متری از کف مخزن در مرکز آن انجام شده است. با برخورد جت قائم به مرکز صفحه‌ی برخورد، جریان فوق بحرانی در راستای شعاع شکل می‌گیرد و به دلیل وجود سرریز در انتهای صفحه‌ی برخورد، در ناحیه‌ی مذکور جریان زیر بحرانی می‌شود و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی توسط یک پرش هیدرولیکی دایره‌ی انجام می‌شود (شکل ۱). ارتفاع سرریز ثابت بوده و با سعی و خطا به نحوی انتخاب شده است که پرش هیدرولیکی برای تمام دبی‌های مورد آزمایش بر روی شیب معکوس و به صورت آزاد (غیرمستغرق) تشکیل شود. محل تشکیل عمق اولیه بر روی شیب معکوس قرار گرفته و عوامل مؤثر در محل تشکیل آن در نوشتار لوسان^۸ و همکارش (۱۹۸۳)،^[۹] بیان شده است.

شکل ۱. پرش هیدرولیکی دایره‌ی.

شکل ۳. مقایسه‌ی پروفیل تئوری سطح پرش و نتایج آزمایشگاهی.

شکل ۴. حجم کنترل انتخاب شده برای رابطه‌ی اندازه‌ی حرکت.

۵. پرش به صورت یک دایره‌ی کامل تشکیل می‌شود.

به دست آوردن یک راه حل منطقی در مسائل عملی جهت تحلیل پرش، مشکلات متعددی دارد که از جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد

- عبارت $W \sin \theta$ (تصور مؤلفه‌ی وزن روی محور موازی سطح شیب‌دار)، معمولاً به علت ناشناخته بودن طول و شکل پرش، به خوبی اندازه‌گیری نمی‌شود.
- وزن مخصوص سیال در حجم کنترل، می‌تواند به طور مشخص با ورود هوا تغییر کند.
- عبارت‌های فشار نمی‌توانند به دقت اندازه‌گیری شوند.
- شکل پرش یک دایره‌ی کامل نیست. [۵]

دستگاه مختصات انتخاب شده برای تحلیل پرش به این شکل است که محور افقی موازی با کف و در جهت شعاع صفحه دایره‌ی است و با r نمایش داده می‌شود. محور قائم نیز عمود بر کف صفحه دایره‌ی است و با y نمایش داده می‌شود. بر این اساس با توجه به شکل ۴، معادله‌ی اندازه‌ی حرکت برای حجم کنترل

شکل ۲. مدل تحلیلی پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی شیب معکوس.

۱.۲. مدل سازی تحلیلی

برای تحلیل پرش هیدرولیکی دایره‌ی بر روی شیب‌های معکوس، از مدل تحلیلی ارائه شده در شکل ۲ استفاده شده است که در آن، جت آب توسط یک نازل از بالا به یک صفحه‌ی دایره‌ی برخورد می‌کند. صفحه‌ی دایره‌ی شکل قابلیت تغییر شیب دارد، به نحوی که پس از شیب‌دار شدن، تمام صفحه به یک مخروط وارونه تبدیل می‌شود و پرش بر روی شیب معکوس رخ می‌دهد. خطوط جریان پس از برخورد جت با صفحه‌ی دایره‌ی به صورت شعاعی به سمت بیرون از مرکز دایره حرکت می‌کنند. در انتهای صفحه‌ی دایره‌ی، یک سرریز لبه‌تیز دایره‌ی جهت تأمین عمق پایاب مورد نیاز در نظر گرفته شده است. وجود سرریز ذکر شده در انتهای صفحه باعث ایجاد پرش دایره‌ی می‌شود. کف صفحه و دیواره‌ی سرریز انتهایی کاملاً صیقلی است و می‌توان از تنش برشی کف صرف نظر کرد. چون پرش هیدرولیکی از نوع جریان متغیر سریع است و در طول کوتاهی رخ می‌دهد، می‌توان نیروی اصطکاک را ناچیز فرض کرد. آنچه روابط مربوط به پرش هیدرولیکی دایره‌ی بر روی شیب معکوس را با پرش کلاسیک متفاوت و پیچیده می‌سازد، وجود مؤلفه‌ی وزن و نیروی فشار جانبی است که خود تابعی از شکل پرش و طول پرش هستند. در نتیجه، برآورد نیروهای مذکور به صورت دقیق امکان‌پذیر نیست و باید برای محاسبه‌ی آن‌ها یک سری فرضیات ساده‌کننده استفاده شود. یکی از فرضیات ذکر شده، پروفیل پرش است که در حالت طبیعی یک سطح بسیار متلاطم دارد و تعیین آن کار بسیار دشواری است. در مطالعاتی که تاکنون بر روی پرش هیدرولیکی انجام شده است، پروفیل سطح پرش به صورت خطی، سهموی و ربع بیضی در نظر گرفته شده و روابط حاکم استخراج شده است. در پژوهش حاضر، از پروفیل پرش سهموی، استفاده شده است. [۱۷] تطابق نسبتاً خوب داده‌های آزمایشگاهی با پروفیل پرش سهموی، در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

در تئوری مربوط به پرش هیدرولیکی دایره‌ی در سطوح با شیب معکوس فرض می‌شود که:

۱. جریان دائمی، تراکم‌ناپذیر و خطوط جریان شعاعی هستند.
۲. اصطکاک بستر در محدوده‌ی پرش قابل صرف نظر کردن است.
۳. قبل و بعد از پرش، فشار به صورت هیدرواستاتیک است.
۴. جریان تک‌فازی در نظر گرفته می‌شود. [۵]

مشخص شده بین دو مقطع ۱ و ۲ در جهت r به شکل رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:

$$\sum F_r = \sum F_{sr} + \sum F_{Br} = \underbrace{\frac{\delta}{\delta t} \int_{CV} V_r r dv}_{\text{دانی}} + \int_{CV} v_r \rho (v_r \cdot \hat{n}) dA \quad (1)$$

که در آن، $\sum F_{sr}$ مجموع تمام نیروهای وارد بر حجم کنترل در جهت r ، $\sum F_{Br}$ مجموع تمام نیروهای وارد بر سطوح حجم کنترل در جهت r ، v_r سرعت جریان در جهت r و ρ چگالی آب است. نیروهای وارد بر حجم کنترل به دو دسته‌ی نیروهای داخلی^۹ و نیروهای سطحی^{۱۰} تقسیم می‌شوند. در مسئله‌ی پیش رو، فقط نیروی وزن به‌عنوان نیروی داخلی در نظر گرفته شده است. نیروهای سطحی نیز که در این مسئله لحاظ شده است، شامل نیروهای وارد بر سطوح حجم کنترل، مانند نیروی فشار هیدرواستاتیک در مقاطع ۱ و ۲ و نیروی فشار جانبی هستند؛ بنابراین می‌توان روابط ۲ و ۳ را نوشت:

$$\sum F_{sr} = F_{p1} - F_{p2} + 2F_{ps} \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

$$\sum F_{Br} = F_w \quad (3)$$

با جای‌گذاری روابط ۲ و ۳ در رابطه‌ی ۱، معادله‌ی اندازه حرکت به شکل رابطه‌ی ۴ نوشته می‌شود:

$$F_{p1} - F_{p2} + 2F_{ps} \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) + F_w = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (4)$$

که در آن، F_{p1} نیروی فشار هیدرواستاتیک در مقطع ۱، F_{p2} نیروی فشار استاتیک در مقطع ۲، F_{ps} نیروی فشار کناری، F_w نیروی وزن، Q دبی جریان، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در مقاطع ۱ و ۲، β_1 و β_2 ضرایب تصحیح اندازه‌ی حرکت و $d\varphi$ زاویه‌ی واگرایی المان قطاعی انتخاب شده به‌عنوان حجم کنترل هستند. با فرض $\beta_1 = \beta_2$ برابر ۱ و استفاده از رابطه‌ی پیوستگی به‌صورت $Q = V_1 A_1 = V_2 A_2$ ، مقدار V_2 بر حسب V_1 به صورت رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$V_2 = V_1 \frac{A_1}{A_2} = V_1 \frac{(R_1 d\varphi)}{(R_2 d\varphi)} \frac{d_1}{d_2} = \frac{V_1}{R_o d_o} \quad (5)$$

که در آن، $R_o = R_2/R_1$ نسبت شعاع‌های مزدوج (فواصل R_1 و R_2 بر روی شیب معکوس اندازه‌گیری شده است) و $d_o = d_2/d_1$ نسبت اعماق مزدوج است. با جای‌گذاری رابطه‌ی ۵ در رابطه‌ی ۴ می‌توان رابطه‌ی ۶ را نوشت:

$$F_{p1} - F_{p2} + 2F_{ps} \sin\left(\frac{d\varphi}{2}\right) + F_w = \rho V_1^2 R_1 d_1 d\varphi \left(\frac{1 - R_o d_o}{R_o d_o}\right) \quad (6)$$

رابطه‌ی ۶، شکل ساده شده‌ی رابطه‌ی اندازه‌ی حرکت خطی برای پرش هیدرولیکی دایره‌ای روی شیب‌های معکوس است. در ادامه، به نحوه‌ی برآورد نیروهای فشار هیدرواستاتیک مقاطع ۱ و ۲، فشار کناری و نیروی وزن که در رابطه‌ی ۶ ارائه شده است، پرداخته شده است.

۱.۱.۲. برآورد نیروهای وارد بر حجم کنترل

الف) نیروی فشار هیدرواستاتیک در مقاطع ۱ و ۲ (F_{p1} و F_{p2}): نیروی فشار هیدرواستاتیک در مقاطع ۱ و ۲ را می‌توان با استفاده از روش انتگرال‌گیری مستقیم، به صورت رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه کرد:

$$F_{p1} = \int_{d_1} p dA = \int_{d_1} \gamma y \cos \theta (R_1 d\varphi dy) = \frac{1}{2} \gamma R_1 d_1^2 \cos \theta \quad (7)$$

$$F_{p2} = \frac{1}{2} \gamma R_2 d_2^2 \cos \theta \quad (8)$$

که در آن‌ها، R_1 و R_2 شعاع‌های اولیه و ثانویه پرش (محل پنجه و پاشنه‌ی پرش)، d_1 و d_2 ارتفاع‌های اولیه و ثانویه پرش، $d\varphi$ و θ به ترتیب زاویه‌ی واگرایی المان حجم کنترل و شیب کف هستند.

ب) نیروی فشار جانبی (F_{ps}): نیروی فشار جانبی نیرویی است که از طرف سیال بر سطوح کناری حجم کنترل وارد می‌شود و مانند نیروی فشار هیدرواستاتیک عمل می‌کند. برای برآورد نیروی فشار جانبی به شکل پروفیل پرش هیدرولیکی، جهت انتگرال‌گیری به مؤلفه‌ی جزء نیرو نیاز است. بر این اساس، با توجه به مطالب گفته شده در مورد پروفیل پرش سهموی و تطابق نسبتاً خوب داده‌های آزمایشگاهی با پروفیل پرش هیدرولیکی، برای برآورد نیروهای فشار جانبی و وزن از پروفیل سهموی که معادله‌ی آن در ادامه ارائه شده است، استفاده شده است (شکل ۵).

با در نظر گرفتن المان شکل ۱۶ الف، نیروی فشار جانبی با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$dF_{ps} = P_G dA = \gamma \bar{y} \cos \theta (y dr) = \gamma \frac{y}{r} \cos \theta (y dr) \dots \dots = \frac{\gamma y^2}{r} \cos \theta dr \quad (9)$$

$$F_{ps} = \int dF_{ps} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\gamma y^2}{r} \cos \theta dr \quad (10)$$

با جای‌گذاری مقدار y در رابطه‌ی ۱۰ و انتگرال‌گیری، می‌توان روابط ۱۱ و ۱۲

شکل ۵. پروفیل تئوری سطح پرش.

$$\begin{aligned} & 3^{\circ}(R_o d_o - R_o d_o^{\circ}) + 2^{\circ} R_o d_o (R_o - 1)(\lambda d_o^{\circ} + 4 d_o + 3) + \dots \\ & \dots 5^{\circ} R_o d_o \frac{R_o}{d_o} S_o (R_o - 1)(5 R_o d_o + 3 d_o + R_o + 3) - \dots \\ & \dots 6^{\circ} F r_1^{\circ} + 6^{\circ} F r_1^{\circ} R_o d_o = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

با انجام یک سری عملیات جبری، معادله‌ی نسبت اعماق مزدوج به صورت روابط ۱۹ و ۲۰ ساده می‌شود:

$$\lambda_1 d_o^{\circ} + \lambda_2 d_o^{\circ} + \lambda_3 d_o - 6^{\circ} F r_1^{\circ} = 0 \quad (19)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = -2^{\circ} R_o (3 R_o + \lambda) \\ \lambda_2 = \lambda R_o (R_o - 1) + 5^{\circ} \frac{R_o}{d_o} S_o R_o (R_o - 1)(5 R_o + 3) \\ \lambda_3 = 6^{\circ} R_o (R_o + 4) + 5^{\circ} \frac{R_o}{d_o} S_o R_o (R_o - 1)(R_o + 3) \\ \quad + 6^{\circ} R_o F r_1^{\circ} \end{cases} \quad (20)$$

با توجه به رابطه‌ی بین d و y ، می‌توان رابطه‌ی ۲۰ را بر حسب y به صورت روابط ۲۱ و ۲۲ بازنویسی کرد:

$$d = y \cos \theta \rightarrow d_o = \frac{d_r}{d_1} = \frac{y_2 \cos \theta}{y_1 \cos \theta} = y_o \quad (21)$$

$$\lambda_1 y_o^{\circ} + \lambda_2 y_o^{\circ} + \lambda_3 y_o - 6^{\circ} F r_1^{\circ} = 0 \quad (22)$$

رابطه‌ی ۲۲ تابعی از اعداد بدون بُعد y_o ، R_o ، $F r_1$ ، R_1/d_1 و S_o است که با مشخص بودن مقادیر R_o ، R_1/d_1 و S_o می‌توان نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی شیب‌های معکوس را بر حسب عدد فرود اولیه محاسبه و ترسیم کرد. با توجه به مطالب ارائه شده، هدف مدل‌سازی تحلیلی در پژوهش حاضر، پیشنهاد رابطه‌ی کلی برای نسبت اعماق مزدوج در دو حالت دایره‌ی با و بدون شیب معکوس و پرش کلاسیک است. برای به دست آوردن رابطه‌ی نسبت اعماق مزدوج در کانال مستطیلی (پرش کلاسیک) می‌توان در رابطه‌ی ۲۰ مقدار R_o را برابر ۱ قرار داد که در این صورت، رابطه‌ی ۲۲ به صورت رابطه‌ی ۲۳ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & -3^{\circ} y_o^{\circ} + (3^{\circ} + 6^{\circ} F r_1^{\circ}) y_o - 6^{\circ} F r_1^{\circ} = 0 \\ & y_o = \frac{y_r}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 F r_1^{\circ}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (23)$$

رابطه‌ی ۲۳ همان رابطه‌ی نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی کلاسیک است.

۳.۱.۲. استخراج رابطه‌ی افت نسبی انرژی $(\Delta E/E_1)$

با در نظر گرفتن شکل ۷ و استفاده از رابطه‌ی انرژی مخصوص بین دو مقطع ۱ و ۲، می‌توان رابطه‌ی ۲۴ را نوشت:

$$\begin{aligned} & \underbrace{d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}}_{E_1} = \underbrace{d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g}}_{E_2} + \Delta E \\ & \Delta E = E_1 - E_2 \rightarrow \frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \end{aligned} \quad (24)$$

با فرض $a_1 = a_2 = 1$ [۱۷، ۱۶، ۵، ۴] و به کارگیری رابطه‌ی پیوستگی و همچنین ارتباط بین y و d می‌توان رابطه‌ی ۲۵ را نوشت:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \left[\frac{F r_1^{\circ} + 2^{\circ} R_o y_o^{\circ}}{R_o y_o^{\circ} (F r_1^{\circ} + 2^{\circ})} \right] \quad (25)$$

الف) فشار کناری؛

ب) وزن.

شکل ۶. المان‌گیری جهت برآورد نیروها.

را نوشت:

$$F_{ps} = \frac{\gamma}{3^{\circ}} (R_2 - R_1) (\lambda d_r^{\circ} + 4 d_1 d_r + 3 d_1^{\circ}) \cos \theta \quad (11)$$

$$F_{ps} = \frac{\gamma}{3^{\circ}} R_1 d_r^{\circ} (R_o - 1) (\lambda d_o^{\circ} + 4 d_o + 3) \cos \theta \quad (12)$$

ج) نیروی وزن (F_w): برای محاسبه‌ی نیروی وزن از المان شکل ۶ استفاده شده است. با توجه به المان در نظر گرفته شده می‌توان روابط ۱۳ و ۱۴ را نوشت:

$$F_w = W \sin \theta = \gamma V \sin \theta \quad (13)$$

$$V = \int dv = \int_{R_1}^{R_2} y(dr)(rd\varphi) \quad (14)$$

با جای‌گذاری مقدار y در رابطه‌ی ۱۴ و انتگرال‌گیری از آن، رابطه‌ی ۱۵ حاصل می‌شود که با جای‌گذاری آن در رابطه‌ی ۱۳، رابطه‌ی ۱۶ به دست می‌آید:

$$V = \frac{d\varphi}{12} (R_2 - R_1) (3 d_1 R_1 + 3 d_2 R_1 + d_1 R_2 + 5 d_2 R_2) \quad (15)$$

$$F_w = \frac{\gamma}{12} d\varphi R_1 d_1 (R_o - 1) (3 + 3 d_o + R_o + 5 d_o R_o) \sin \theta \quad (16)$$

۳.۱.۲. استخراج رابطه‌ی نسبت اعماق مزدوج (y_o)

با جای‌گذاری روابط ۷، ۸، ۱۲ و ۱۶ در رابطه‌ی ۶، تعریف عدد فرود و قرار دادن مقدار $S_o = \tan \theta$ ، رابطه‌ی اندازه‌ی حرکت به صورت روابط ۱۷ و ۱۸ ساده می‌شود:

$$\begin{cases} F r = \frac{V \sqrt{\alpha}}{\sqrt{g D_h \cos \theta}} a \Rightarrow \dots \\ \dots F r = \frac{V}{\sqrt{g D_h \cos \theta}} \rightarrow F r = \frac{V}{\sqrt{g d \cos \theta}} \\ D_h = \frac{A}{T} = \frac{r d\varphi d}{r d\varphi} \Rightarrow D_h = d \end{cases} \quad (17)$$

الف) پلان؛

ب) نمای جانبی.

شکل ۸. شمای دستگاه آزمایشگاهی.

جدول ۱. مقادیر ضریب همبستگی و توابع خطا در روابط ارائه شده.

EF	WQD	NRMSE	R^2	
۰/۹۸۴	۰/۰۰۰۶۸	۰/۱۲۲۱	۰/۹۸۸	رابطه‌ی ۲۱
۰/۹۹۹	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۸۱	۰/۹۹	رابطه‌ی ۲۳

تحلیلی برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی مخصوص بر حسب دیگر پارامترها ارائه شد. در بخش حاضر، به منظور بررسی خطای هر یک از روابط ارائه شده، ضمن بهره‌گیری از ضریب همبستگی R^2 ، از توابع خطای NRMSE^{۱۱}، WQD^{۱۲} و EF^{۱۳} نیز استفاده شده است. براساس معیارهای ذکر شده، مقادیر ضریب همبستگی و خطاهای به دست آمده برای روابط مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۹، دامنه‌ی پراکندگی پارامترهای محاسبه شده از روابط در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۲، اطلاعات کلی مربوط به آزمایش‌ها ارائه شده است.

۴. نتایج و بحث

برای ارائه‌ی بهتر تجزیه و تحلیل پژوهش حاضر، نتایج در ۴ بخش ارائه شده است

۱.۴. تأثیر نسبت شعاع‌های مزدوج و شیب کف در نسبت اعماق مزدوج

با توجه به شکل ۱۰ که برای مقادیر مختلف شیب کف از ۰٪ تا ۵٪ رسم شده است، می‌توان تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مشاهده کرد. با افزایش نسبت شعاع‌های مزدوج در هر شیب کف معین، نسبت اعماق مزدوج کاهش یافته است که این نتیجه‌گیری هم با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی تطابق دارد. با افزایش نسبت شعاع‌های مزدوج، عرض مقطع زیاد شده و در نتیجه، دبی در واحد عرض

شکل ۷. نمای جانبی پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی شیب معکوس.

برای به دست آوردن رابطه‌ی افت انرژی در کانال مستطیلی (پرش کلاسیک) می‌توان در رابطه‌ی ۲۵ مقدار R_0 را برابر ۱ و مقدار عدد فرود را از رابطه‌ی ۱۸ قرار داد، لذا رابطه‌ی ۲۶ به دست می‌آید:

$$\Delta E = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (26)$$

۲.۲. مدل‌سازی آزمایشگاهی

مدل‌سازی آزمایشگاهی در یک مخزن مکعبی با قاعده‌ی مربع‌شکل از جنس ورق آلومینیز به ضلع ۲/۵ متر و ارتفاع ۱/۵ متر تشکیل شده است. در مرکز مخزن مکعبی مذکور، یک صفحه‌ی برخورد دایره‌ی به قطر ۲ متر از جنس ورق استیل در فاصله‌ی ۰/۵ متری از کف مخزن نصب شده است. صفحه‌ی دایره‌ی موردنظر به وسیله‌ی جکی که در زیر آن تعبیه شده است، قابلیت تغییرشکل از یک صفحه‌ی دایره‌ی مسطح به یک مخروط با شیب کناری بیشینه‌ی ۵٪ را دارد. در محیط بیرونی صفحه‌ی برخورد دایره‌ی موردنظر، یک سرریز دایره‌ی لبه‌تیز جهت تأمین عمق پایاب موردنیاز در نظر گرفته شده است. در کف صفحه‌ی برخورد دایره‌ی، ۳۴ پیرومتر در دو جهت عمود بر هم، جهت برآورد عمق جریان و پروفیل پرش تعبیه شده است. همچنین از یک عمق‌سنج نقطه‌ی با دقت ۰/۱ میلی‌متر که امکان حرکت در دو جهت شعاعی و مماسی را دارد، برای اندازه‌گیری عمق و طول پرش استفاده شده است. آب درون مخزن مکعبی به وسیله‌ی یک پمپ با بیشینه‌ی دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه وارد خط لوله‌ی به قطر ۳ اینچ می‌شود. در مسیر خط لوله و بعد از پمپ، یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی با دقت ۰/۰۰۰۰۱ لیتر بر ثانیه و یک شیر کنترل سوزنی قرار دارد. جریان آب پس از عبور از خط لوله توسط نازل (به قطر ۲ اینچ) قرار گرفته در انتهای خط لوله به صورت جت قائم با صفحه‌ی دایره‌ی برخورد می‌کند و آب در جهت شعاع دایره جریان می‌یابد و پس از تشکیل پرش هیدرولیکی دایره‌ی، در انتهای مسیر از روی سرریز لبه‌تیز دایره‌ی عبور می‌کند و وارد مخزن مکعبی می‌شود و مجدداً به وسیله‌ی سیستم پمپاژ، چرخه‌ی اخیر تکرار می‌شود. شکل ۸، نماهای کلی پلان و ساختار جانبی دستگاه آزمایشگاهی و چرخه‌ی آب و موقعیت استقرار اجزاء را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

۳. صحت‌سنجی

در بخش‌های قبل با به کارگیری روابط انتگرالی حاکم بر دینامیک سیالات، روابطی

شکل ۱۰. تأثیر نسبت شعاع‌های مزدوج.

تأثیر هم‌زمان هر دو پارامتر نسبت شعاع‌های مزدوج و شیب کف بر نسبت اعماق مزدوج را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده کرد که مطابق آن برای هر مقدار از نسبت شعاع‌های مزدوج، یک دسته‌ی منحنی وجود دارد، که هر منحنی معرف یک شیب به‌خصوص است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت شعاع‌های مزدوج و شیب کف، نسبت اعماق مزدوج کاهش یافته است. در نسبت شعاع‌های مزدوج بزرگ‌تر به دلیل آنکه حجم بیشتری از آب در حجم کنترل قرار گرفته است، اثر شیب کف افزایش یافته است. در شکل ۱۳، نیز مقایسه‌ی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی با نتایج دیگر پژوهشگران مشاهده می‌شود.

جدول ۲. اطلاعات کلی آزمایش‌ها.

متغیر	محدوده‌ی متغیر
دبی (Q)	۵-۱۵ لیتر بر ثانیه
قطر صفحه‌ی برخورد (D)	۰°-۲۰° سانتی‌متر
ارتفاع سرریز (P)	۳ سانتی‌متر
قطر نازل (d_n)	۲ اینچ
فاصله‌ی نازل تا صفحه‌ی برخورد (h_n)	۵ سانتی‌متر
ارتفاع اولیه‌ی پرش (y_1)	۰/۳-۰/۶ سانتی‌متر
ارتفاع ثانویه‌ی پرش (y_2)	۲/۸-۴/۸ سانتی‌متر
نسبت اعماق مزدوج (y_o)	۵-۱۲/۶۷
عدد فرود بالادست (Fr_1)	۱/۸-۱۰/۴
شعاع اولیه‌ی پرش (R_1)	۱۸/۱-۵۷/۵ سانتی‌متر
شعاع ثانویه‌ی پرش (R_2)	۲۸/۴-۶۸/۷ سانتی‌متر
نسبت شعاع‌های مزدوج (R_o)	۱/۱۴-۱/۶۳
طول پرش ($L_i = R_2 - R_1$)	۷/۱-۱۲/۳ سانتی‌متر
شیب کف ($S_o = \tan\theta$)	۰°-۵°

رابطه ۲۳. (ب)

شکل ۹. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و تحلیلی.

کاهش یافته و این کاهش دبی در واحد عرض، باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج شده است.

با توجه به شکل ۱۱ که برای مقادیر مختلف نسبت شعاع‌های مزدوج رسم شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش شیب کف، نسبت اعماق مزدوج کاهش یافته است. علت این کاهش را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش شیب کف، مؤلفه‌ی نیروی وزن در راستای شیب کف افزایش یافته است که این افزایش نیرو با توجه به رابطه‌ی اندازه‌ی حرکت، باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شود.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی نسبت اعماق مزدوج $R_o = 1/6$ و $R_1/d_1 = 100$.

شکل ۱۴. تأثیر نسبت شعاع‌های مزدوج.

۲.۴. تأثیر نسب شعاع‌های مزدوج و شیب کف در افت نسبی انرژی
با توجه به رابطه‌ی تحلیلی ارائه شده برای افت نسبی انرژی مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت اعماق مزدوج، افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بخش قبل گفته شد، دو پارامتر شیب کف و نسبت شعاع‌های مزدوج باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شوند، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش مقادیر دو پارامتر ذکر شده، افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. تأثیر دو پارامتر شیب کف و نسبت شعاع‌های مزدوج را می‌توان در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ مشاهده کرد.

شکل ۱۵. تأثیر شیب کف.

شکل ۱۶. تأثیر هم‌زمان شیب کف و نسبت اعماق مزدوج ($R_1/d_1 = 100$).

شکل ۱۷. تغییرات طول نسبی پرش.

این صورت ارتفاع نقطه‌ی مذکور تقریباً با ارتفاع پایاب برابر است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که تعیین مقدار دقیق L_r بسیار مشکل است و عمده‌تاً نتایج متفاوتی به دست می‌آید. در حالی که اندازه‌گیری مقدار L_r عموماً به نتایج مشابهی منتج می‌شود و در نتیجه طول پرش همان L_r در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که با افزایش شیب کف، طول نسبی پرش کاهش یافته است. همچنین در این نوع پرش هیدرولیکی، طول پرش تقریباً به میزان ۵۰٪ نسبت به حالت کلاسیک کاهش یافته است.

۴.۴. بررسی هیدرولیکی پرش دایره‌ی به کمک منحنی‌های

$$F - y \text{ و } E - y$$

با توجه به شکل ۱۸ الف در پرش کلاسیک که در یک مقطع مستطیلی با عرض ثابت انجام می‌شود، دبی در واحد عرض تغییر نمی‌کند و منحنی ثابت می‌ماند. در پرش دایره‌ی با افزایش شعاع، عرض مقطع زیاد می‌شود و در نتیجه دبی در واحد عرض کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که منحنی‌های انرژی مخصوص به سمت چپ حرکت کنند. با توجه به نمودار شکل ۱۸ الف مشاهده می‌شود که عمق متناوب در جریان شعاعی با افزایش شعاع افزایش یافته و عمق متناوب جریان شعاعی از عمق متناوب جریان کلاسیک بیشتر بوده است.

از دیگر نتایج نمودار اخیر می‌توان به افت بیشتر پرش شعاعی و همچنین تولید عمق ثانویه‌ی کوچک‌تر نسبت به حالت کلاسیک اشاره کرد. در پرش دایره‌ی، عمق ثانویه کوچک‌تر است و طبیعتاً گره عمق کم شود، باید سرعت جریان

شکل ۱۵. تاثیر شیب کف.

شکل ۱۶. تاثیر همزمان شیب کف و نسبت اعماق مزدوج ($R_1/d_1 = 100$).

۳.۴. طول نسبی پرش

اگرچه طول پرش هیدرولیکی، یکی از پارامترهای حساس در طراحی است، اما در حالت کلی از طریق تحلیل‌های ریاضی قابل محاسبه نیست و باید در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده شود. در پرش‌های هیدرولیکی، عموماً به دو طول مختلف توجه می‌شود: طول چرخش (L_r) که عبارت از فاصله‌ی شروع پرش تا آخرین موج غلتان است و دیگری طول پرش (L_j) که برابر با فاصله‌ی شروع پرش تا نقطه‌ی در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلتان است که در

عمق ثانویه دارند، در حالی که کاهش دبی در واحد عرض تأثیر محسوسی در کاهش عمق ثانویه دارد. نتایجی که از منحنی‌های نیروی مخصوص و انرژی مخصوص استخراج شده است، در نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نیز به اثبات رسیده است.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی پارامترهایی نظیر: نسبت اعماق مزدوج، افت نسبی انرژی، و طول نسبی پرش در پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی سطوح شیب‌دار با شیب معکوس پرداخته شده و این نتایج به دست آمده است:

— مدل تحلیلی ارائه شده، قادر است به خوبی نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی را برآورد کند. به طوری که نتایج صحت‌سنجی تطابق بسیار خوبی را بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

— روابط تحلیلی ارائه شده برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی برای هر دو نوع پرش کلاسیک و دایره‌ی کاربرد دارد و تمام پارامترهای روابط ذکر شده را اعداد بدون بُعد تشکیل داده‌اند.

— با افزایش نسبت شعاع‌های مزدوج و شیب کف، نسبت اعماق مزدوج کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. به طوری که در عدد فرود اولیه 1^0 ، مقدار کاهش نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی دایره‌ی روی شیب معکوس با شیب کف صفر در مقایسه با پرش کلاسیک روی کف افقی تقریباً نزدیک 10% است. این مقدار به ازاء شیب کف 5% تقریباً به 30% رسیده است.

— با افزایش شیب کف تا 5% و نسبت شعاع‌های مزدوج برابر 2 ، منحنی افت نسبی انرژی به صورت یک خط تقریباً افقی بوده است که بیانگر بی‌تأثیر بودن شیب کف بیشتر از این مقدار است. در حالت کلی می‌توان برای هر نسبت شعاع مزدوج، یک بیشینه‌ی شیب کف بهینه، که بیشترین اتلاف انرژی را در پی داشته باشد، به دست آورد.

— در مقادیر بالای عدد فرود، اتلاف انرژی در هر سه نوع پرش به هم نزدیک می‌شوند، در نتیجه می‌توان گفت که در مقادیر بالای عدد فرود، تقریباً اتلاف انرژی در سه نوع حوضچه‌ی ذکر شده با هم برابر است. بنابراین برای افزایش افت نسبی انرژی باید به دیگر سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی نظیر حوضچه‌ی استغراق روی آورد.

— در پرش هیدرولیکی دایره‌ی، طول پرش تقریباً نصف طول پرش کلاسیک است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شیب (منفی یا معکوس) کف، طول پرش کاهش می‌یابد؛ که در شیب 5% ، مقدار آن به 60% می‌رسد.

فهرست علائم

- A : سطح مقطع کل جریان (m^2)؛
 T : عرض سطح آزاد جریان (m)؛
 $D_h = A/T$: عمق هیدرولیکی مقطع جریان (m)؛
 D : قطر صفحه‌ی برخورد دایره‌ی (m)؛
 r : فاصله‌ی شعاعی از مرکز صفحه‌ی برخورد (m)؛

الف) منحنی انرژی مخصوص؛

ب) منحنی نیروی مخصوص.

شکل ۱۸. روند جابه‌جایی و تغییرات منحنی‌های انرژی مخصوص و نیروی مخصوص.

بیشتر شود و افزایش سرعت، باعث آسیب رساندن به تأسیسات پایین دست می‌شود که باعث نامطلوب شدن عملکرد حوضچه‌ی آرامش می‌شود. اما باید به این نکته دقت کرد که در این پرش دایره‌ی، عرض مقطع در حال افزایش یافتن است و دبی در واحد عرض را کاهش می‌دهد، که باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. به عبارت دیگر، کاهش عمق ثانویه در پرش دایره‌ی با افزایش عرض مقطع و کاهش دبی در واحد عرض همراه است، که موجب کاهش سرعت جریان می‌شود.

مانند آنچه در قسمت قبل گفته شد، در پرش دایره‌ی با افزایش شعاع پرش، عرض مقطع بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه دبی در واحد عرض کاهش می‌یابد، بنابراین منحنی‌های نیروی مخصوص نیز به سمت چپ حرکت می‌کنند (شکل ۱۸ب) که این کاهش دبی در واحد عرض باعث کاهش عمق ثانویه و سرعت جریان می‌شود. از طرف دیگر، در پرش کلاسیک هیچ‌گونه نیروی خارجی در حجم کنترل اثر ندارد. این در حالی است که در پرش دایره‌ی روی شیب معکوس، نیروهای خارجی وزن و فشار کناری بر حجم کنترل وارد و موجب می‌شوند که اعماق اولیه و ثانویه‌ی پرش در یک نیروی مخصوص رخ ندهند و به اندازه‌ی جمع جبری نیروهای مذکور با نیروی مخصوص اختلاف داشته باشند (شکل ۱۸ب).

مشاهده می‌شود که علت اصلی کاهش عمق ثانویه در پرش دایره‌ی، کاهش دبی در واحد عرض است. در حالی که نیروی فشار کناری باعث افزایش نیروی مخصوص می‌شود و به عنوان یک عامل منفی در کاهش عمق ثانویه عمل می‌کند. نیروی وزن باعث کاهش نیروی مخصوص می‌شود و کاهش نیروی مخصوص، کاهش عمق ثانویه را به دنبال دارد. هر دو عامل ذکر شده، تأثیر کمی در

d_0 : نسبت اعماق مزدوج در راستای عمود بر جریان؛
 y_W : عمق آب روی سرریز (m) ؛
 Q : دبی کل (m^3/s) ؛
 $V_1 = Q/A_1$: سرعت متوسط در پنجه‌ی پرش (m/s) ؛
 $V_2 = Q/A_2$: سرعت متوسط در پنجه‌ی پرش (m/s) ؛
 g : شتاب ثقل (m/s^2) ؛
 $Fr_1 = V_1/\sqrt{gd_1}$: عدد فرود در پنجه‌ی پرش؛
 $Fr_2 = V_2/\sqrt{gd_2}$: عدد فرود در پاشنه‌ی پرش؛
 $d\varphi, \text{ or } \varphi$: زاویه‌ی واگرایی؛
 θ : زاویه‌ی شیب کف؛
 $S_0 = \tan\theta$: شیب کف.

R_1 : شعاع پنجه‌ی پرش (m) ؛
 R_2 : شعاع پاشنه‌ی پرش (m) ؛
 $R_0 = R_2/R_1$: نسبت شعاع‌های مزدوج؛
 R_W : شعاع سرریز (m) ؛
 y : عمق جریان در راستای قائم (m) ؛
 y_1 : عمق جریان در پنجه‌ی پرش در راستای قائم (m) ؛
 y_2 : عمق جریان در پاشنه‌ی پرش در راستای قائم (m) ؛
 $y_0 = y_2/y_1$: نسبت اعماق مزدوج در راستای قائم؛
 $d = y \cos\theta$: عمق جریان در راستای عمود بر جریان (m) ؛
 $d_1 = y_1 \cos\theta$: عمق جریان در پنجه‌ی پرش در راستای عمود بر جریان (m) ؛
 $d_2 = y_2 \cos\theta$: عمق جریان در پاشنه‌ی پرش در راستای عمود بر جریان (m) ؛

پانویس‌ها

1. stilling basin
2. hydraulic jump
3. divergent stilling basin
4. circular stilling basin
5. Rouse
6. Stevens
7. adverse slope
8. Lawson
9. body force
10. surface force
11. normalized root mean square error
12. weighted quadratic deviation
13. efficiency

منابع (References)

1. Palermo, M. and Pagliara, S. "Semi-theoretical approach for energy dissipation estimation at hydraulic jumps in rough sloped channels", *J. Hydra. Res.*, Published Online (2018).
2. Jafari, F. and Salehi Neyshabouri, S.A.A. "Numerical study of effective parameters in length of submerged hydraulic jumps with baffle blocks", **33-2**(3.2), pp. 65-73 (2017).
3. Sadeghi, H., Daneshfaraz, R. and Behmanesh, J. "The effect of shape of walls of expansions on the characteristics of hydraulic jump", *Sharif J. Civil Eng.*, **31-2**(2.2), pp. 57-62 (2015).
4. Koloseus, H.J. and Ahmad, D. "Circular hydraulic jump", *J. Hydra. Div.*, **95**(HY1), Proc. Paper 6367, pp. 409-422 (1969).
5. Arbbabhirama, A. and Abella, A. "Hydraulic jump within gradually expanding channel", *J. Hydra. Div.*, **97**(HY1), Proc. Paper 7831, pp. 31-41 (1971).
6. Khalifa, A.M. and McCorquodale, J.A. "Radial hydraulic jump", *J. Hydra. Div.*, **105**(9), pp. 1065-1078 (1979).
7. McCorquodale, J.A. and Khalifa, A.M. "Submerged radial hydraulic jump", *J. Hydra. Div.*, **106**(HY3), pp. 355-367 (1980).
8. Hager, W.H. "Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels", *J. Hydra. Res.*, **23**(1), pp. 21-35 (1985).
9. Lawson, J.D. and Phillips, B.C. "Circular hydraulic jump", *J. Hydra. Eng.*, **109**(4), pp. 505-518 (1983).
10. Omid, M.H., Esmaceli Varaki, M. and Narayanan, R. "Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel", *J. Hydra. Res.*, **45**(4), pp. 512-518 (2007).
11. Zobeyer, H., Rajaratnam, N. and Zhu, D.Z. "Radial Jet and hydraulic jump in a circular basin", *J. Hydra. Mec.*, **140**(1), pp. 128-133 (2014).
12. Hosseini, M. and Abrishami, J. "Open channel hydraulics", 2th Edn., p. 613, Imamreza University, Mashhad (2010).
13. Abdul Khader, M.H. and Rajagopal, S. "Hydraulic jump in adverse channel slopes", *Irrig Power.*, **29**(1), pp. 77-82 (1972).
14. Abrishami, J. and Saneie M. "Hydraulic jump in adverse basin slopes", *Int. J. Water Res. Eng.*, **2**(1), pp. 51-63 (1994).
15. McCorquodale, J.A. and Mohamed, M.S. "Hydraulic jumps on adverse slopes", *J. Hydra. Res.*, **32**(1), pp. 119-130 (1994).
16. Beirami, M.K. and Chamani, M.R. "Hydraulic jumps in sloping channels: Sequent depth ratio", *J. Hydra. Eng.*, **132**(10), pp. 1061-1068 (2006).
17. Varaki, M.E., Kasi, A., Farhodi, J. and et al. "Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope", *IJST, Trans. Civ. Engineering*, **38**(C1), pp. 111-121 (2014).