

بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای معکوس با بلوک‌های میانی

زهرا اشکو^۱، امیراحمد دهقانی^{۲*} و احمد احمدی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۵)

چکیده

حوضچه‌های آرامش معمولاً در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به عنوان مستهلک کننده انرژی استفاده می‌شوند. ابعاد حوضچه‌های آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی به صورت آزمایشگاهی بررسی و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی شد. در مجموع، آزمایش‌ها برای مقاطع مستطیلی با شیب کف معکوس ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ و زوایای واگرایی ۳، ۵ و ۹ درجه و با قرار دادن بلوک‌های اتلاف کننده انرژی انجام شد. دامنه تغییرات مقادیر دبی و عدد فرود از ۳۹ الی ۸۱/۷ لیتر بر ثانیه و ۴/۴۴ الی ۸/۵۶ بود. نتایج نشان داد بلوک‌های میانی طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه را به ترتیب به میزان ۱۸ درصد و ۱۲ درصد کاهش می‌دهد (در مقایسه با حوضچه واگرای معکوس بدون بلوک). نتایج همچنین نشان داد به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در جهش هیدرولیکی واگرای معکوس، منجر به پایدارسازی جهش و بهبود وضعیت ناپایداری جریان شده است.

واژه‌های کلیدی: آرامش واگرا، شیب کف معکوس، مشخصات هیدرولیکی پرش، بلوک‌های میانی

۱. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.dehghani@gau.ac.ir

مقدمه

شده است، تمایل به ایجاد جریان ناپایدار (Bi-Stable flow) است. این مسئله تا حدودی به وسیله اسکات مونکریف، خلیفا و مک کورکودال مطالعه شد (۵ و ۱۳). در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می کند. در نتیجه پرشی نامتقارن به همراه یک ناحیه ساکن (Dead Zone) یا گردابه جانبی (Side eddy) در طرف جداشدگی و یک جت قوی در سمت دیگر شکل می گیرد. این جت ناپایدار تمایل به گسترش به سمت کانال پائین دست دارد و گاهی موجب فرسایش شدید کناره کانال می شود.

این مسئله با افزایش زاویه واگرایی حوضچه (θ) بیشتر می شود. حوضچه آرامش SAF، حداکثر زاویه واگرایی دیواره ها را برحسب عدد فرود اولیه پرش، به صورت رابطه زیر توصیه کرده است (۶):

$$\theta < \tan^{-1} \left(\frac{1}{c Fr} \right) \quad (1)$$

که C ثابت پایداری زاویه واگرایی است. USBR برای این ثابت مقدار سه را توصیه کرده است. خلیفا و مک کورکودال پی بردند که با استفاده از دریچه های کنترل قطاعی، سینماتیک جریان ورودی تا حدودی بهبود می یابد و زوایای واگرایی بیشتری نسبت به توصیه USBR قابل استفاده خواهد بود (۵).

امید و همکاران پرش هیدرولیکی واگرای اجباری که با استفاده از آبپایه انتهایی تولید شده را بررسی و مشاهده کردند زمانی که عمق پایاب کمتر از عمق ثانویه یک پرش پایدار است، جریان فوق بحرانی به سمت پایین دست حرکت خواهد کرد. در چنین موقعیت هایی، آبپایه ای که به درستی طراحی شده باشد می تواند شکل و موقعیت پرش را تغییر دهد. ایشان نتیجه گرفتند کار اصلی یک آبپایه انتهایی در حوضچه آرامش واگرا پایدارسازی موقعیت پرش و بهبود شرایط آن به منظور جلوگیری از گسترش پرش به سمت مناطق محافظت نشده پایین دست است. همچنین آبپایه انتهایی باعث کاهش طول پرش می شود (۹).

حوضچه آرامش قسمت کوتاهی از یک کانال کف سازی شده است که به صورت سازه ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته شده و هدف از ساختن آن تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه است. با استفاده از این سازه ها، جریان فوق بحرانی قبل از رسیدن به رودخانه به جریان زیربحرانی تبدیل شده و از آبشستگی پایین دست و خرابی های احتمالی جلوگیری می شود. ابعاد حوضچه های آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد، از این رو تلاش پژوهشگران بر این بوده است تا با ایجاد تمهیداتی در محل وقوع پرش هیدرولیکی، بتوانند مشخصات پرش را بهبود بخشند تا صرفه جویی اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. افت انرژی بیشتر، طول پرش و نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کمتر، از پارامترهای تعیین کننده در طراحی حوضچه آرامش هستند.

اولین آزمایش ها درباره پرش های هیدرولیکی در کانال واگرا، توسط ریگل در بخش حفاظت محیط زیست میامی انجام گرفت (۱۱).

کلوسیوس و احمد، با فرض سیال تراکم ناپذیر، جریان شعاعی و ماندگار، ناچیز بودن افت ناشی از تنش برشی در طول پرش، هیدرواستاتیک بودن توزیع فشار در مقاطع عمق های مزدوج، برابر واحد بودن ضرایب تصحیح انرژی و اندازه حرکت، صرف نظر کردن از شتاب عمودی و خطی فرض کردن تغییرات عمق از مقاطع اولیه تا ثانویه، روابطی را برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی دایره ای ارائه کردند (۶). ایشان همچنین نتیجه گرفتند با افزایش شعاع نسبی، میزان عمق ثانویه در مقایسه با پرش مستطیلی کاهش و میزان افت نسبی انرژی افزایش می یابد و طول پرش در حالت دایره ای در مقایسه با پرش در مقطع مستطیلی کاهش یافته و تقریباً ۳/۵ تا ۴/۵ برابر عمق ثانویه می شود.

مسئله ای که در حوضچه های آرامش مستطیلی واگرا مشاهده

پایدار در اعداد فرود ۴ الی ۹ وجود داشت. مقایسه نتایج ایشان نشان داد که در هر زاویه واگرایی، افزایش شیب کف معکوس تا ۸ درصد باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به ترتیب به میزان ۴۷ درصد و ۳۵ درصد شد و افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش کلاسیک، ۲۰ درصد افزایش یافت. همچنین در هر شیب کف معکوس، افزایش زاویه واگرایی تا ۱۰ درجه باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به ترتیب به میزان ۵۱ درصد و ۳۸ درصد شد و افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش کلاسیک ۲۳ درصد افزایش یافت (۴). اشکو و همکاران نیز تأثیر چیدمان بلوک‌های میانی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با شیب کف معکوس را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد چیدمان همگرای بلوک‌های میانی می‌تواند مشخصات پرش هیدرولیکی را بهبود ببخشد (۳).

تلتون و مک کورکودال اثر بلوک‌های میانی روی مشخصه‌های پرش هیدرولیکی واگرا را بررسی کردند. آنها معادلات و منحنی‌های مختلفی برای طراحی اولیه حوضچه آرامش با انبساط تدریجی با بلوک‌های میانی پیشنهاد داده‌اند. ایشان نتیجه گرفتند که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی شعاعی اجباری به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از پرش شعاعی آزاد یا پرش کلاسیک است و طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی شعاعی اجباری تقریباً مشابه پرش شعاعی آزاد یعنی حدوداً برابر ۴۷٪ به دست آمد. همچنین مؤثرترین مکان استقرار بلوک در محل $0.5L$ به دست آمد. اگر بلوک‌ها به سمت بالادست نزدیک‌تر شوند یک قله بزرگ در پروفیل ایجاد می‌شود، درحالی که اگر بلوک‌ها از بالادست دورتر شوند (در نیمه پایین دست) طول نسبی پرش در اثر اغتشاش ناشی از بلوک‌ها افزایش می‌یابد (۸). رانگا راجو و همکاران به تحلیل جریان عبوری از بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی پرداختند و روابطی برای محاسبه نیروی درگ اعمال شده بر بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی ارائه دادند (۱۰).

تاکنون تکنیک‌های متعددی برای افزایش افت انرژی،

بنابراین به‌طور کلی پایداری پرش‌های واگرا ضعیف است و توصیه شده است که از ضمام کنترل، نظیر آستانه‌ها یا بلوک‌های میانی به‌منظور بهبود و تثبیت پرش در این گونه مقاطع استفاده شود.

در خصوص پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس، راس و همکاران نتیجه‌گیری کردند که کنترل آن غیرممکن است و استیونس و مک کورکودال و محمد پرش‌هایی روی شیب‌های معکوس ایجاد کردند (۷ و ۱۴). در سال ۱۳۶۹ بررسی‌هایی توسط ابریشمی و صانعی انجام شد که با استفاده از نتایج تجربی و تحلیل‌های مربوطه نشان داده شد که امکان ایجاد پرش هیدرولیکی پایدار روی شیب‌های منفی وجود دارد و این پایداری تابعی است حداقل از عدد فرود اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه به گونه‌ای که در صورت ثابت بودن سایر شرایط و برای هر شیب معکوس مشخص، چنانچه Fr_1 از یک مقدار معین کمتر باشد، پرش آبی پایدار تشکیل نخواهد شد. کاهش طول پرش و عمق ثانویه در اثر افزایش شیب معکوس از دیگر نتایج این تحقیقات است که شرایط اقتصادی بهتر را در این گونه شیب‌ها برای کنترل پرش و جلوگیری از خرابی‌های احتمالی معین می‌سازد (۱). بیرامی و چمنی در سال ۲۰۱۰ طول جهش و افت انرژی نوع زیادی از جهش‌های هیدرولیکی را بررسی کردند و نشان دادند که افت انرژی جهش کلاسیک بزرگتر از هر نوع جهش شکل گرفته در شیب‌های مثبت و منفی است (۲).

اسماعیلی و همکاران پرش هیدرولیکی معکوس در حوضچه آرامش واگرای تدریجی با سطح مقطع مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی و تئوریک بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش شیب بستر و افزایش زاویه واگرایی دیواره حوضچه، باعث کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش و افزایش افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی ایشان نشان داد که در اعداد فرود کمتر، پرش هیدرولیکی آزاد روی شیب معکوس ناپایدار بوده، اما امکان ایجاد پرش هیدرولیکی نسبتاً

فوق به شکل زیر در خواهد آمد:

$$f\left(F_1, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \theta, \beta\right) = 0 \quad (3)$$

ب) تجهیزات آزمایشگاهی

با توجه به اهداف مد نظر در انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با دیواره‌های شفاف پلکسی‌گلاس قائم به طول ۱۵ متر، عرض کف ۱ متر، عمق ۸۵ سانتی‌متر و دریچه کشویی لبه تیز با بازشدگی ثابت ۳ سانتی‌متر در بالادست کانال انجام شد. آب از مخزن زیر فلوم آزمایشگاه پمپاژ شده و توسط لوله‌ای با شیر کنترل به مخزن تأمین‌کننده ارتفاع و سپس مخزن آرام‌کننده هدایت و از طریق یک تبدیل جریان وارد فلوم می‌شد. جریان خروجی از فلوم وارد مخزن پایین دست می‌شد و توسط لوله‌هایی مجدداً وارد پمپ می‌شد. حوضچه آرامش بلافاصله بعد از دریچه کشویی بالادست قرار داشت. طرح و شمای فلوم آزمایشگاهی در شکل (۱) آورده شده است.

یک دریچه پروانه‌ای در انتهای کانال پایین دست برای تنظیم عمق پایاب و تثبیت محل تشکیل پرش، یک دریچه کشویی در بالادست برای ایجاد پرش و فلومتر برای اندازه‌گیری دبی جریان به کار گرفته شد. بخشی از ابتدای کانال که بلافاصله بعد از دریچه مخزن قرار دارد، به عنوان حوضچه آرامش در نظر گرفته شد. شیب کف معکوس با استفاده از ورق گالوانیزه به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر و ضخامت ۲ میلی‌متر تأمین شد. با استفاده از پایه‌هایی با ارتفاع قابل تنظیم، شیب‌های معکوس مختلف توسط این کف کاذب اجرا شد. دیواره‌های واگرا در زوایای ۳، ۵ و ۹ درجه در فلوم قرار گرفته و با چسب‌های مخصوص تثبیت و آب‌بندی شد. به دلیل عکس‌برداری از پروفیل پرش یکی از دیواره‌ها از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شد (شکل ۲).

بلوک‌های میانی (Baffles) و آبپایه انتهایی (End sill) بر مبنای ابعاد استاندارد حوضچه آرامش تیپ USBR III طراحی و داخل حوضچه نصب شد. در هر آزمایش ابتدا بلوک‌های میانی در فاصله مشخص از دریچه بالادست نصب شد، سپس آبپایه

کاهش طول و عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به کار رفته است. ترکیبی از این تکنیک‌ها در سال‌های اخیر به منظور بهینه کردن طرح حوضچه آرامش، بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از موانع، واگرایی جریان، شیب معکوس در افزایش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه، در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و چیدمان متفاوت بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

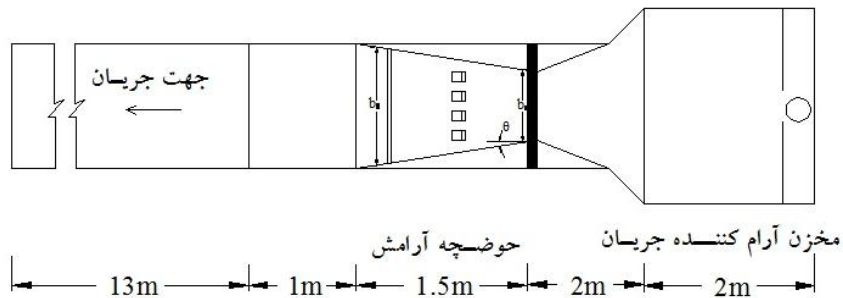
الف) تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با بلوک‌های میانی را می‌توان به صورت تابع زیر بیان کرد:

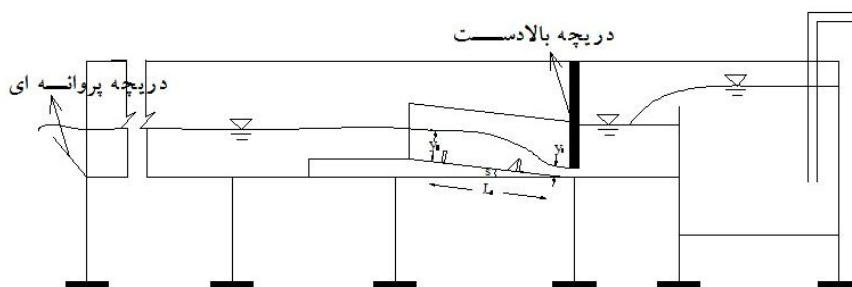
$$f\left(F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, R_1 = \frac{V_1 y_1}{V}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{b_2}{b_1}, \frac{L}{\Delta Z}\right) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه y_1 و y_2 اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی هستند، b_2 عرض حوضچه آرامش در انتهای پرش، θ زاویه واگرایی دیواره‌ها، b_1 عرض حوضچه در پنجه پرش، V_1 سرعت اولیه، ν ویسکوزیته، g شتاب ثقل، ρ جرم مخصوص، L طول حوضچه معکوس، ΔZ میزان بالآمدگی در انتهای حوضچه، L_j طول پرش هیدرولیکی از محل حداقل عمق در پنجه پرش تا جایی که اغتشاشات سطحی جریان به حداقل می‌رسید. پارامترهای رابطه (۲) در شکل (۱) نشان داده شده است.

b_2/b_1 تأثیر دیواره‌های واگرا را نشان می‌دهد و $L/\Delta Z$ نیز تأثیر شیب کف معکوس را شامل می‌شود. لذا می‌توان به جای این پارامترها، به ترتیب پارامترهای بی‌بعد θ و β را قرار داد. عدد رینولدز در عمق بالادست جریان برای همه آزمایش‌ها بیشتر از 2×10^5 بوده، لذا جریان در این اعداد رینولدز کاملاً آشفتنه بوده و اثر ویسکوزیته قابل صرف نظر است. بنابراین معادله



الف) نما از بالا



ب) نما از کنار

شکل ۱. نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی و مدل حوضچه آرامش



شکل ۲. نمای کلی کف معکوس و دیواره واگرا

انتهایی با محاسبه تئوری طول پرش از گراف‌های USBR در محل انتهای پرش حوضچه نصب شد. بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی از جنس پلاستیک تفلون است. دبی ورودی توسط یک فلومتر آلتراسونیک با دقت اندازه‌گیری $\pm 2\%$ درصد اندازه‌گیری شد. به منظور برداشت عمق جریان در طول پرش، از یک عمق‌سنج دیجیتال با دقت ± 0.01 میلی‌متر که روی سیستم ریلی موجود بر حوضچه آرامش قرار داشت، استفاده شد. همچنین نیمرخ پرش هیدرولیکی با تصاویر ثبت شده از رقوم

سطح آب و پردازش تصویر ثبت شد. یک دوربین عکاسی بر روی پایه دقیقاً مقابل محل وقوع پرش و در نقطه ثابتی قرار داده و از پروفیل پرش، تصاویر آنی گرفته و میانگین این تصاویر به عنوان پروفیل پرش در نظر گرفته شد. بدین ترتیب که عکس به نرم‌افزار اتوکد منتقل شد و با توجه به متر نصب شده در دیواره کانال، مقیاس تصویر در اتوکد تصحیح سپس پروفیل با استفاده از دستور polyline ترسیم شد و در نهایت ارتفاع پروفیل اندازه‌گیری شد. به دلیل وجود نوسان در سطح

عکس برداری از پروفیل نیز صورت گرفته است. از آنجا که معیارهای مختلفی برای تعیین طول پرش وجود دارد، در این پژوهش طول پرش از شروع، تا جایی که میزان نوسانات سطح آب در آنجا به حداقل رسیده و آشفتگی و تلاطم سطح آب در آنجا ناچیز بود، در نظر گرفته شد. طول پرش سخت‌ترین پارامتر برای اندازه‌گیری بوده است. در بسیاری از آزمایش‌ها، بلوک‌ها یک قله در جریان ایجاد می‌کردند که با یک فرورفتگی پس از آن همراه بود. انتهای پرش در این موارد، بعد از اولین فرورفتگی در نظر گرفته می‌شد. عمق اولیه پرش در کمترین عمق در ابتدای پرش و عمق ثانویه در محل انتهای پرش توسط عمق‌سنج دیجیتال اندازه‌گیری می‌شد.

نتایج و بحث

مشاهدات آزمایشگاهی

در مجموعه آزمایش‌ها انجام گرفته در این پژوهش، مشاهدات آزمایشگاهی صورت گرفته درباره خصوصیات پرش هیدرولیکی معکوس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

آزمایش‌ها در وضعیت پرش بدون بلوک (پرش آزاد) و با بلوک استاندارد USBR III (پرش اجباری) مقایسه شد (شکل ۳). در حوضچه با به‌کارگیری بلوک، شکل و پروفیل طولی پرش هیدرولیکی تا حدی متفاوت از پرش هیدرولیکی آزاد (بدون به‌کارگیری بلوک و آبپایه) بوده است.

با افزایش زاویه واگرایی دیواره‌ها و در اعداد فرود اولیه بالا، گردابه‌های طولی در امتداد یکی از دیواره‌ها مشاهده شد. همچنین مشاهدات صورت گرفته نشان داد که با افزایش شیب کف معکوس، شدت تلاطم و سرعت گردابه‌ها در سطح حوضچه کاهش می‌یابد.

پیشانی پرش در پرش واگرا حالت مورب و مثلثی شکل داشته و در اعداد فرود بالا یک قسمت از پیشانی پرش جلوتر از پیشانی مقابل تشکیل می‌شد. این وضعیت برای پیشانی پرش، از ویژگی‌های پرش واگراست که اسماعیلی و همکاران نیز به این پدیده اشاره داشتند. در ادامه نمونه‌ای از پیشانی پرش واگرا در شکل ۴ نشان داده شده است.

آب در طول پرش، عکس برداری در لحظات متوالی انجام و میانگین اندازه‌گیری‌ها مبنای محاسبات در نظر گرفته شد. همچنین برای قرائت طول پرش در آزمایش‌ها، از طریق متر نواری نصب شده روی بدنه فلوم با دقت ± 1 میلی‌متر، طول پرش و طول غلتاب اندازه‌گیری شد.

قبل از انجام هر آزمایش، ابتدا کف کاذب برای رسیدن به شیب کف معکوس مد نظر قرار داده می‌شد. سپس دیواره‌های حوضچه آرامش برای زاویه واگرایی مورد نظر تنظیم می‌شد. نحوه کار بدین صورت بود که با داشتن عرض اولیه و طول حوضچه، برای زاویه واگرایی، عرض حوضچه در انتها محاسبه شده، سپس دیواره‌ها به گونه‌ای قرار می‌گرفتند که عرض محاسبه شده را تأمین کند. بعد از تنظیم دیواره‌های حوضچه برای زاویه واگرایی مد نظر، حوضچه به‌طور کامل توسط چسب‌های مخصوص شیشه اتومبیل آب‌بندی می‌شد.

در این پژوهش از بلوک میانی و آبپایه انتهایی برای افزایش راندمان پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش استفاده شد. در هر آزمایش ابتدا بلوک‌های میانی، طبق معیار نتلتون و مک کورکودال در فاصله نصف طول پرش از دریچه بالادست نصب شد. سپس آبپایه انتهایی با محاسبه تئوری طول پرش از گراف‌های USBR در محل انتهای پرش حوضچه USBR III نصب شد.

بعد از آماده شدن تنظیمات حوضچه و اطمینان از آب‌بندی آن، با راه‌اندازی پمپ، جریان وارد مدل می‌شد. سپس با قرائت فلومتر، دبی جریان برای تأمین عدد فرود مد نظر تنظیم می‌شد.

پس از برقراری دبی مد نظر و اطمینان از تثبیت جریان در فلوم، از طریق باز و بسته کردن دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم، پیشانی پرش طوری تنظیم می‌شد که حداقل فاصله نسبت به ابتدای حوضچه که به‌عنوان نقطه مبنا انتخاب شده بود را دارا باشد. عمق پایاب توسط این دریچه پروانه‌ای کنترل می‌شد و در هر آزمایش به گونه‌ای تنظیم شد که شروع پرش حداقل یک الی سه برابر عمق اولیه، پایین‌دست آغاز شیب معکوس قرار گیرد. در هر آزمایش بعد از طی شدن مراحل فوق، نیمرخ طولی پرش از شروع تا انتها توسط عمق‌سنج برداشت شده و همچنین



(ب)



(الف)

شکل ۳. مقایسه پروفیل‌های سطح آب در کانال واگرای معکوس الف) پرش (آزاد)، ب) پرش در حوضچه با بلوک استاندارد

USBRIII



شکل ۴. پیشانی پرش واگرای معکوس

جدا شده و به دیواره مقابل وارد شد. نتون و مک کورکودال به مواردی از گزارش‌های ارائه شده توسط پژوهشگران درباره این مسئله در حوضچه‌های واگرا اشاره کرد که با افزایش عدد فرود اولیه، غیریکنواختی و نامتقارن بودن جریان تشدید شده است. در تفسیر جریان ناپایداری مشاهده شده می‌توان گفت پرش هیدرولیکی مانند یک تقویت‌کننده جریان عمل کرده و باعث شده عدم تقارن جزئی جریان ورودی به میزان چشمگیری تشدید شود (شکل ۵).

نیمرخ جهش واگرای معکوس

یکی از تفاوت‌های اساسی در استخراج روابط تئوری جهش هیدرولیکی واگرای معکوس با جهش‌های مستقیم، وجود

پایداری پرش واگرای معکوس در مقایسه با پرش مستقیم به‌ویژه در اعداد فرود بالا به دشواری صورت می‌گرفت، در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته، با مانور درجه‌ها امکان تشکیل پرش در ابتدای کانال واگرای معکوس وجود داشت لیکن تثبیت پرش با تنظیم پیوسته درجه پروانه‌ای پایین دست انجام می‌گرفت، استفاده از بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در حوضچه آرامش واگرای معکوس پایداری و تثبیت کردن پرش را بهبود بخشید. بدین معنی که پرش راحت‌تر در ابتدای درجه کشویی بالادست تثبیت می‌شد.

با افزایش زاویه واگرایی، جریان ناپایدار در حوضچه آرامش واگرای معکوس تشکیل شد و جت آب از یک دیواره حوضچه



شکل ۵. جریان ناپایدار در پرش واگرایی معکوس

الف) طول نسبی پرش

شکل ۷ تأثیر شیب کف معکوس بر طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه را با وجود بلوک نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده، در این زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس به میزان ۷/۵ درصد، طول نسبی پرش ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش طول نسبی پرش در شیب کف ۷/۵ درصد بوده است. اسماعیلی و همکاران نیز کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش در اثر افزایش شیب بستر را گزارش کرده بودند و در بیشترین شیب کف معکوس یعنی ۱۰ درصد بیشترین کاهش طول نسبی پرش را مشاهده کرده بودند.

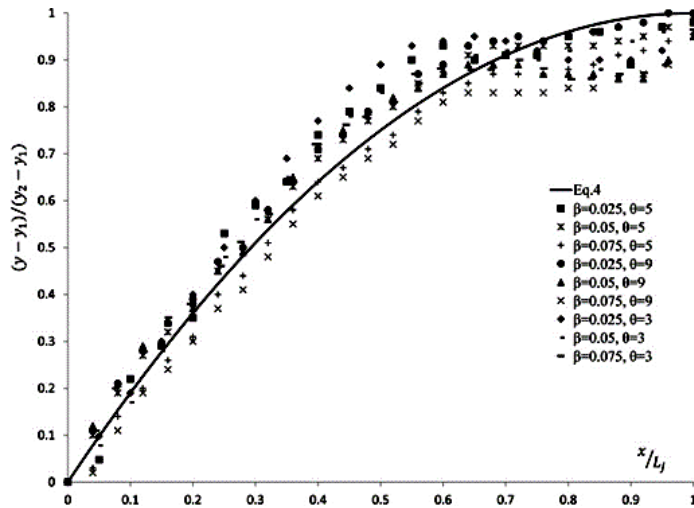
شکل ۸ تأثیر زاویه واگرایی بر طول نسبی پرش در شیب کف معکوس ۷/۵ درصد را با وجود بلوک نشان می‌دهد. در این شکل افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه به میزان ۹ درجه، باعث کاهش طول نسبی پرش به میزان ۲۳ درصد می‌شود. بیشترین کاهش طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه بوده است. با افزایش زاویه واگرایی، عرض مقطع جریان در عمق ثانویه افزایش یافته لذا عمق جریان برای تأمین نیروی هیدروستاتیک و دینامیک لازم برای برابری با نیروهای مربوط به عمق اولیه پرش کاهش می‌یابد. لذا منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش زاویه واگرایی، عمق جریان و به تبع آن طول نسبی پرش کاهش یابد. نتلتون و مک کورکودال نیز کاهش طول نسبی پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی را گزارش کرده‌اند.

نیروهای جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از جهش است. برای محاسبه این جزء نیرو شناخت نوع معادله نیمرخ سطح آب ضروری است. در این پژوهش معادله بیضی برای نیمرخ سطح آب در طول جهش در نظر گرفته شده است. بنابراین معادله پروفیل سطح آب به صورت زیر خواهد بود:

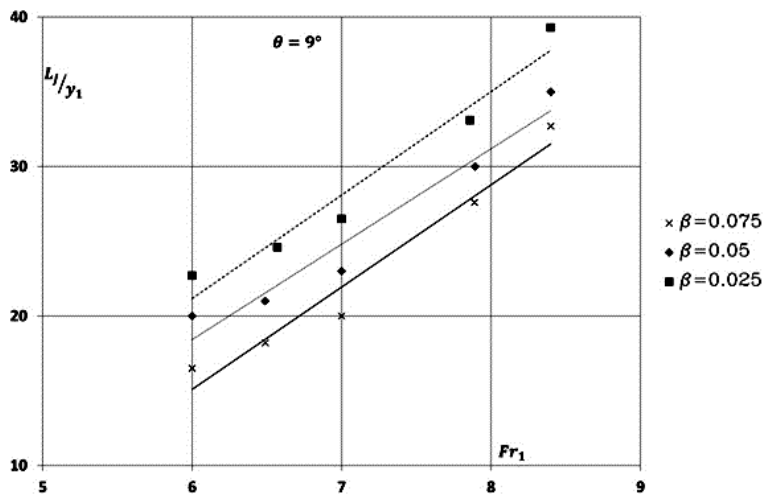
$$\frac{y_x - y_1}{y_2 - y_1} = -\left(\frac{x}{L_j}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L_j}\right) \quad (4)$$

لذا به منظور بررسی درستی این فرضیه، در کلیه آزمایش‌ها نیمرخ طولی جهش برداشت شد. سپس برای تمام نیمرخ‌های آزمایشگاهی، منحنی تئوری (منحنی بیضی) ترسیم شده است و در کنار داده‌های آزمایشگاهی نمایش داده شد. در شکل ۶ پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده در زوایای واگرایی ۳، ۵ و ۹ و شیب کف معکوس ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ و زاویه بلوک ۳۰ درجه در عدد فرود ۸/۴ نشان داده شده است. مقادیر بی‌بعد پروفیل پرش از معادله ۴ با قرار دادن مقادیر صفر الی یک در x/L_j به دست آمد. سپس اختلاف این مقادیر با مقادیر مشاهداتی بی‌بعد پروفیل محاسبه شد. خطای نسبی معادله ۴ تقریباً شش درصد به دست آمده است.

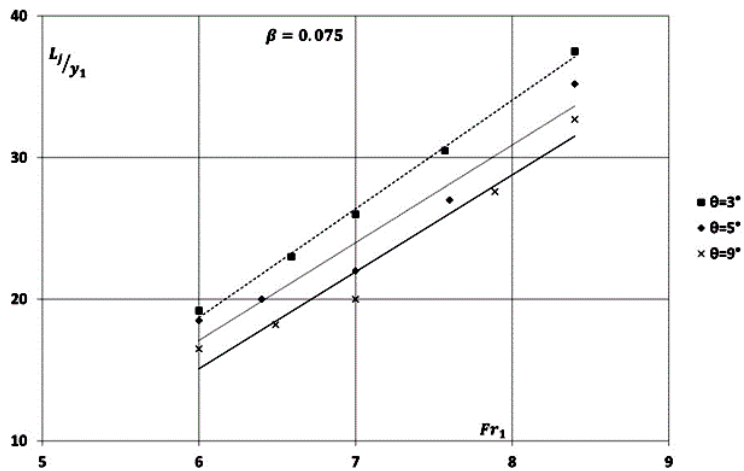
بررسی تأثیر پارامترهای بی‌بعد بر مشخصه‌های هیدرولیکی پرش در این قسمت تأثیر این پارامترهای بی‌بعد بر طول نسبی و نسبت عمق ثانویه پرش در شکل‌های ۷ الی ۱۲ بررسی شده است.



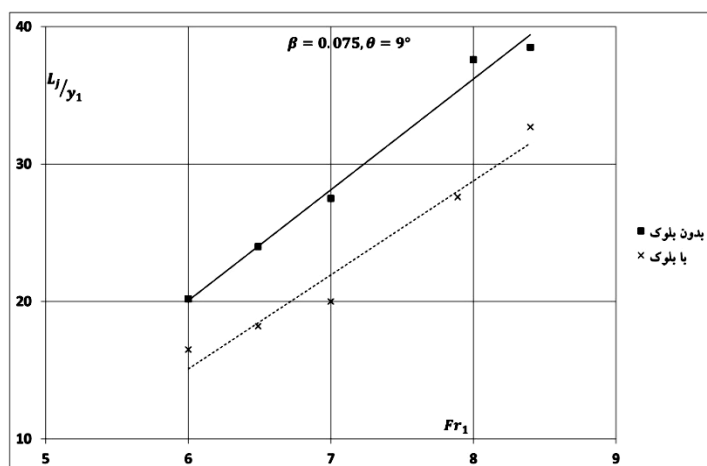
شکل ۶. مقایسه منحنی تنوری و آزمایشگاهی نیمرخ جهش در مقاطع واگرایی معکوس



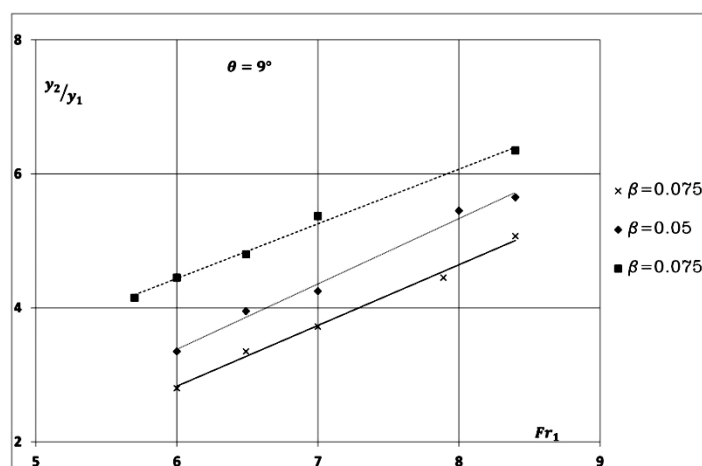
شکل ۷. تأثیر شیب کف معکوس بر طول پرش نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه با وجود بلوک



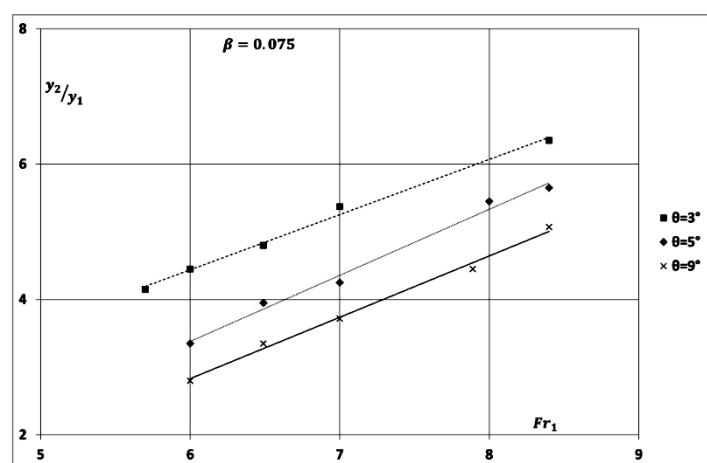
شکل ۸. تأثیر زاویه واگرایی بر طول پرش نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و با وجود بلوک



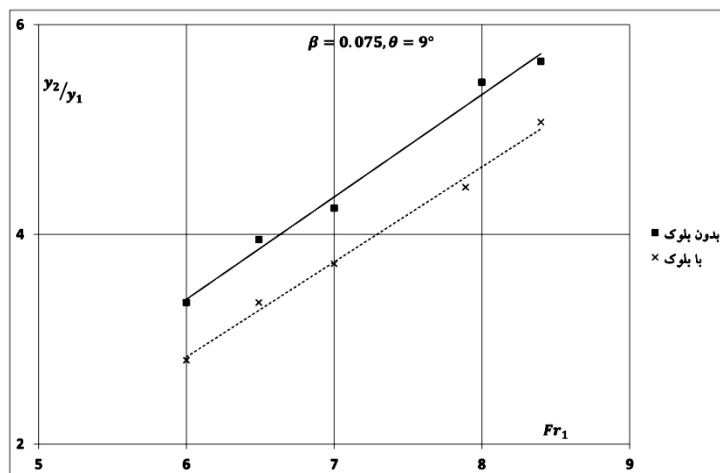
شکل ۹. تأثیر وجود بلوک‌ها بر طول پرش نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد



شکل ۱۰. تأثیر شیب کف معکوس بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و با وجود بلوک



شکل ۱۱. تأثیر زاویه واگرایی بر عمق ثانویه نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و با وجود بلوک



شکل ۱۲. تأثیر وجود بلوک‌ها بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد

پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی را گزارش کرده‌اند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه شد ترکیب بیشترین شیب کف معکوس و بیشترین زاویه واگرایی کمترین نسبت عمق ثانویه پرش را نتیجه داد. لذا در شکل ۱۲ تأثیر وجود بلوک بر نسبت عمق ثانویه پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف معکوس ۷/۵ درصد بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود به‌کارگیری بلوک در حوضچه آرامش واگرایی معکوس نسبت عمق ثانویه پرش را به میزان ۱۲ درصد کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی بر پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج به شرح زیر ارائه شد:

- به‌کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس منجر به پایدارسازی پرش و بهبود وضعیت ناپایداری جریان شده است.
- طول نسبی پرش واگرایی معکوس با بلوک به‌میزان ۱۸ درصد کمتر از حوضچه واگرایی معکوس بدون بلوک به‌دست آمده است.
- نسبت عمق ثانویه در حوضچه آرامش واگرایی معکوس در

همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه شد ترکیب بیشترین شیب کف معکوس و بیشترین زاویه واگرایی منجر به حصول کمترین طول نسبی پرش شده است. لذا در شکل ۹ تأثیر وجود بلوک بر طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف معکوس ۷/۵ درصد بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به‌کارگیری بلوک در حوضچه آرامش واگرایی معکوس، طول نسبی پرش را به‌میزان ۱۸ درصد کاهش می‌دهد.

شکل ۱۰ تأثیر شیب کف معکوس بر نسبت عمق ثانویه در زاویه واگرایی ۹ درجه را با وجود بلوک نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده، در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس به‌میزان ۷/۵ درصد، نسبت عمق ثانویه پرش ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش نسبت عمق ثانویه در شیب کف ۷/۵ درصد بوده است. بیرامی و چمنی نیز کاهش نسبت عمق ثانویه پرش در اثر افزایش شیب کف معکوس را گزارش کرده‌اند.

شکل ۱۱ تأثیر زاویه واگرایی بر نسبت عمق ثانویه پرش در شیب کف معکوس ۷/۵ درصد را با وجود بلوک نشان می‌دهد. در این شکل افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه به‌میزان ۹ درجه، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه پرش به‌میزان ۲۰ درصد می‌شود. بیشترین کاهش نسبت عمق ثانویه پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه بوده است. کلسیوس و احمد نیز کاهش نسبت عمق ثانویه

وضعیت پرش اجباری (با به کارگیری بلوک) به میزان ۱۲ درصد کمتر از پرش آزاد (حوضچه واگرای معکوس بدون بلوک) به دست آمده است.

در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش می یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که به طور متوسط افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۷/۵ درصد باعث می شود که نسبت عمق ثانویه ۲۸ درصد و طول نسبی پرش ۱۵ درصد کاهش در مقایسه با پرش واگرای معکوس بدون بلوک داشته است.

در هر زاویه واگرایی از صفر به ۹ درجه منجر به کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به طور متوسط به ترتیب به میزان ۱۹ و ۲۲ درصد می شود.

منابع مورد استفاده

1. Abrishami, J. and M. Saneie. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. *International Journal of Water Research Engineering* 2(1): 51-63.
2. Beirami, M. K. and M. R. Chamani. 2010. Hyrdraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. *Canadian Journal of Civil Engineering* 37(9): 535-543.
3. Eshkou, Z., A. A. Deghani and A. Ahmadi. 2018. Forced hydraulic jump in a diverging stilling basin using angled baffle blocks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 144 (8): 06018004.
4. Esmaeili varaki, M., A. Kasi, J. Farhoodi and D. Sen. 2014. Hydraulic jump in a diverging channel with an adverse slope. *Iranian Journal of Science and Technology* 38: 111-121
5. Khalifa, A. M. and A. M. McCorquodale. 1979. Radial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 105(HY9): 1065-1078.
6. Kouluseus H. J. and D. Ahmad. 1969. Circular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division* 95(1): 409-422.
7. McCorquodale, J. A. and M. S. Mohamed. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research* 31(1): 119-130.
8. Nettleton, P. C. and J. A. McCorquodale. 1989. Radial flow stilling basins with baffle blocks. *Canadian Journal of Civil Engineering* (16): 489-497.
9. Omid, M. H., A. Gord-Noshahri and S. Kouchakzade. 2010. Sill-controlled hydraulic jump in a gradually expanding channel. *Journal of Water Management, ICE* 163(10): 515-522.
10. Ranga Raju, K. G., M. K. Kitaal, M. S. Verma and V. R. Ganeshan. 1980. Analysis of flow over baffle blocks and end sill. *Journal of Hydraulic Research* 18(3): 227-241.
11. Riegel R. M. and J. C. Beeba. 1917. The Hydraulic Jump as a Means of Dissipating Energy. Ohio, Technical Report, Part III. Miami Conservancy District. Dayton.
12. Rouse, H., T. T. Siao and S. Nagaratnam. 1958. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division* 84(1): 1-30.
13. Scott-Moncrief, A. 1974. Behaviour of water jet in a diverging shallow open channel. In: Proceeding of the Fifth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, Christ Church, New Zealand, pp. 42-48.
14. Stevens, J. C. 1944. Discussion of the 'Hydraulic jump in sloping channels' by C. E. Kindsvater. *Trans. ASCE* 109: 1154-1187.

Experimental Investigation of the Characteristics of Hydraulic Jump in a Diverging Stilling Basin with an Adverse Slope Using Baffle Blocks

Z. Eshkou¹, A. Dehghani^{2*} and A. Ahmadi¹

(Received: September 26-2018 ; Accepted: December 26-2018)

Abstract

Stilling basins have been used as an energy dissipater downstream of hydraulic structures. Dimensions of the stilling basins depends on hydraulic jump characteristics. In this research diverging hydraulic jump with an adverse slope using baffle blocks and an end sill have been studied experimentally and effect of diverging angle of the walls, adverse bed slope and baffle blocks on the hydraulic jump characteristics have been evaluated. Tests have been done for rectangular stilling basin with different bed slopes (0.025-0.05-0.075) and different diverging angle (3-5-9) degree and using baffle blocks. Discharge and Froude numbers considered to range from 39 to 81.7 lit/s and 4.44 to 8.56 respectively. Results have been indicated that the baffle blocks have been reduced sequent depth ratio and relative length of the jump 12% and 18% respectively (in comparison to diverging stilling basin with adverse slope without block). It was also found that baffle blocks and end sill could considerably improve the general condition and features of an expanding hydraulic jump with an adverse slope and could stabilize the position of this type and bi-stable situation of the flow.

Keywords: Diverging stilling basin, Adverse bed slope, Characteristics of Hydraulic jump, Baffle blocks

1. Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Sharood, Iran.

2. Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: a.dehghani@gau.ac.ir