پرش هیدرولیکی در مقطع مثلثی و مقایسه با مقطع مستطیلی

حسین حمیدی فر، محمد حسین امید* و جواد فرهودی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۳/۳)

چکیده

اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی انجام شده است، اما مطالعات صورت گرفته روی مقاطع مثلثی بسیار اندک می‌باشد. در این مقاله، خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقطع مثلثی به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مطالعه شده است. بررسی تحلیلی با استفاده از اصل پایستگی اندازه حرکت قبل و بعد از جهش صورت گرفته است. آزمایش‌ها در یک کانال با مقطع مثلثی و با زاویه داخلی $۹۴/۴^{\circ}$ و در دامنه وسیعی از دبی و عدد فرود و به ازای دو بازشدگی مختلف انجام شدند. مشخصه‌های کاربردی پرش از جمله نسبت عمق ثانویه، طول پرش، استهلاک انرژی و پروفیل سطح آب بررسی شد و نتایج با مشخصات پرش در مقطع مستطیلی مقایسه گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقطع مثلثی کارایی بیشتری نسبت به مقطع مستطیلی دارد. به طور مثال به ازای یک عمق اولیه ($Y_۱$) و عدد فرود ($F_۱$) معین جت ورودی، پرش در مقطع مثلثی به عمق ثانویه کمتری نیاز دارد. هم‌چنین میزان استهلاک انرژی نسبی در مقطع مثلثی حدوداً ۱۲ درصد بیشتر از مقطع مستطیلی است. در نهایت روابط تجربی و نمودارهایی نیز برای محاسبه طول پرش، استهلاک انرژی و پروفیل سطح آب در پرش پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، مقطع مثلثی، نسبت اعماق مزدوج ، طول پرش، استهلاک انرژی، پروفیل سطح آب

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: momid@ut.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

مقدمه

پرش هیدرولیکی که نتیجه تغییر سریع وضعیت جریان از فوق-بحرانی به زیربحرانی در یک فاصله کوتاه است، بر مبنای عدد فرود جریان ورودی $F_1 = V_1 / \sqrt{gD_1}$ که در آن g شتاب ثقل، V_1 سرعت و D_1 عمق هیدرولیکی جریان ورودی است، طبقه‌بندی می‌شود. از جمله کاربردهای پرش هیدرولیکی می‌توان به استهلاک انرژی، بالاآوردن سطح آب به منظور آبگیری از کانال و کاهش فشار بالابرنده، افزایش نیروی مؤثر کف‌بند، هوادهی جریان و اختلاط مواد در فرآیند تصفیه آب و نهایتا مشخص کردن یک رژیم خاص برای اندازه‌گیری جریان اشاره کرد (۸). روش‌های گوناگونی برای بهبود و افزایش کارایی پرش از سوی محققین مختلف پیشنهاد شده است که می‌توان به استفاده از بلوک‌های کف، آستانه انتهایی، پله‌های مثبت یا منفی، شیبدار کردن کف و افزایش عرض مقطع اشاره کرد (۱، ۲، ۴، ۵، ۶ و ۱۲).

یکی از روش‌های افزایش کارایی پرش هیدرولیکی که تا کنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است، تغییر شکل مقطع است. به طور مثال تغییر شکل مقطع از مستطیلی به ذوزنقه‌ای باعث تبدیل پرش از یک پدیده دو- بعدی به سه- بعدی می‌شود که خصوصیات آنها کاملاً متفاوت است. علاوه بر سهولت ساخت، مقطع ذوزنقه‌ای به ازای یک عدد فرود ورودی ثابت از لحاظ افت انرژی نسبی و نسبت عمق ثانویه بسیار کاراتر از مقطع مستطیلی می‌باشد. ولی بنابر تحقیقات انجام شده توسط برخی از محققین پرش هیدرولیکی در مقطع ذوزنقه‌ای بسیار ناپایدار است (۱۳). از طرفی معدود تحقیقات انجام گرفته در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی نشان می‌دهد که مقطع مثلثی از جهاتی مانند حداقل عمق پایاب مورد نیاز، کارآمدتر از مقطع ذوزنقه‌ای و مستطیلی می‌باشد و کمتر با مشکل ناپایداری مواجه است. از این رو می‌توان از قابلیت پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی برای بالا آوردن سطح آب و در نتیجه آبگیری و انحراف جریان موردنیاز در شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی بهره گرفت (۸).

برخلاف مقاطع مستطیلی که الگوی جریان نسبتاً دو- بعدی است، جریان در مقاطع مثلثی یک پدیده کاملاً سه‌بعدی است. از آنجا که مقطع مثلثی است و پرش در یک کانال با سطح صاف، افقی و منشوری رخ می‌دهد می‌توان آن را از نوع پرش هیدرولیکی کلاسیک (CHJ) در نظر گرفت.

اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مستطیلی انجام شده، اما اطلاعات موجود درباره خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقاطع غیرمستطیلی بسیار اندک است. اولین تحقیق شناخته شده در زمینه پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی مربوط به راجاراتنام (۱۹۶۷) است (۱۶). آرگیروپولوس سری اول آزمایش‌های خود را در کانالی با زاویه ۴۷ درجه و سری دوم را با زاویه ۶۰ درجه انجام داد (۱۲). راجاراتنام نیز به تجزیه و تحلیل تحقیقات سیلوستر پرداخت (۱۷).

هگر و ونوسچک (۱۳) نیز نتایجی را برای یک کانال مثلثی با زاویه ۹۰ درجه گزارش کردند. لازم به ذکر است که این محققین، آزمایش‌های خود را در یک کانال نیمه‌مثلثی با یک دیواره عمودی و یک دیواره مایل با زاویه ۴۵ درجه انجام دادند و نتایج را برای یک کانال مثلثی متقارن برون‌یابی کردند. در هر حال این برون‌یابی تا حدی غیرواقعی است زیرا نمی‌توان از تأثیر دیواره عمودی بر مشخصات پرش در کانال مثلثی که ذاتاً یک پدیده سه- بعدی است صرف‌نظر کرد. هم‌چنین هگر و ونوسچک (۱۳) با درنظر گرفتن عدد فرود جریان ورودی به صورت $F_1 = \left[2Q^2/(gm^2Y_1^5)\right]^{1/2}$ که درآن Q دبی جریان و m شیب جانبی دیواره کانال مثلثی است، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی توسعه دادند. آنها روابطی را نیز برای تعیین طول غلتابه و طول پرش در دامنه محدودی از m ارائه کردند.

آشور و دبابچه تأثیر آستانه لبه‌تیز بر پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی با زاویه ۹۰ درجه را بررسی و روابطی را برای نسبت عمق ثانویه و سایر مشخصات پرش بر حسب خصوصیات آستانه لبه‌تیز ارائه کردند (۷). دبابچه و آشور

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

خصوصیات پرش کنترل شده با آستانه و از نوع Minimum-B jump را مورد مطالعه قرار دادند (۹). هم‌چنین دبابچه و همکاران مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی شیبدار را بررسی کردند (۱۰). حمیدی‌فر و همکاران (۳) روابط تجربی و نمودارهایی برای تشکیل پرش هیدرولیکی کنترل شده با استفاده از آستانه لبه‌پهن در شرایط عدم کافی بودن عمق پایاب در کانال‌های مثلثی ارائه کردند.

بررسی تحلیلی

با استفاده از اصل پایستگی اندازه حرکت و درنظر گرفتن یک جریان دائمی در کانال مثلثی منشوری، افقی و متقارن و با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک و توزیع سرعت یک‌نواخت و نیز صرف‌نظر کردن از اصطکاک دیواره‌ها، می‌توان رابطه زیر را بین دو مقطع قبل و بعد از پرش نوشت:

$$\frac{Q^2}{gA_1}-\frac{Q^2}{gA_2}=\overline{Y}_2A_2-\overline{Y}_1A_1 \qquad [1]$$

که در این رابطه، $\overline{Y}_1$ و $\overline{Y}_2$ فاصله مرکز سطح مقاطع A_1 و A_2 تا سطح آزاد جریان هستند و در مقاطع مستطیلی $\overline{Y}_i=Y_i/2$ و در مقطع مثلثی $\overline{Y}_i=Y_i/3$ است. با قرار دادن این مقادیر در رابطه فوق برای مقطع مستطیلی، رابطه صریح زیر برای تعیین نسبت عمق ثانویه بر حسب عدد فرود به دست می‌آید:

$$\frac{Y_2}{Y_1}=\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8F_1^2}-1\right) \qquad [2]$$

اما برای یک مقطع مثلثی با قرار دادن مقدار $\overline{Y}_i$ در رابطه ۱، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{Q^2}{g}\left(\frac{1}{A_1}-\frac{1}{A_2}\right)=\frac{1}{3}\left(Y_2A_2-Y_1A_1\right) \qquad [3]$$

در یک کانال مثلثی نسبت بین دو سطح مقطع A_1 و A_2، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{A_2}{A_1}=\frac{mY_2^2}{mY_1^2}=\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)^2=Y^2 \qquad [4]$$

هم‌چنین با استفاده از تعریف عدد فرود، برای یک مقطع مثلثی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_1^2=\frac{V_1^2}{gD_1}=\frac{Q^2/A_1^2}{gY_1/2} \qquad [5]$$

که در این رابطه D عمق هیدرولیکی جریان است.

با قرار دادن روابط ۴ و ۵ در رابطه ۳ و ساده‌سازی، معادله‌ای به شکل زیر از مرتبه چهار به دست می‌آید:

$$2Y^4+2Y^3+2Y^2-3F_1^2Y-3F_1^2=0 \qquad [6]$$

تاکنون راه‌حل صریحی برای این رابطه ارائه نشده است. با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert و جابه‌جایی متغیرها، رابطه ساده زیر با ضریب هم‌بستگی $R^2=0/999$ حاصل می‌شود:

$$Y=0/756(F_1-1)^{0/787}+1 \qquad [7]$$

این رابطه در محدوده اعداد فرود $1\le F_1\le 13$ معتبر است. با استفاده از این رابطه می‌توان نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در یک مقطع مثلثی را بر حسب عدد فرود جریان ورودی به سهولت محاسبه کرد.

بررسی آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و در یک کانال مستطیلی به طول ۹ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر از جنس شیشه شفاف انجام شد. مقطع این کانال در بازه‌ای به طول۳/۶ متر از ابتدای کانال با قراردادن دیواره‌های مایل با زاویه ۴۲/۸۵ نسبت به افق به مقطع مثلثی تغییر داده شد (زاویه داخلی کانال برابر ۹۴/۴ است). به منظور ایجاد جت موردنیاز یک جعبه فشار (Pressure box) به طول ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع معادل بازشدگی موردنظر در ابتدای کانال تعبیه شد که هدف از آن، ایجاد جریان با سرعت بالا و افزایش دقت در اندازه‌گیری عمق اولیه پرش می‌باشد (به علت تلاطم شدید جریان در ابتدای پرش، اندازه‌گیری عمق اولیه بسیار مشکل است. طبق گزارش‌های هگر و ونوسچک (۱۳) و آشور و دبابچه (۷) می‌توان عمق اولیه پرش را معادل بازشدگی جعبه فشار در نظر گرفت).

آزمایش‌ها در محدوده دبی $1/6\le Q\le 6/8$ لیتر بر ثانیه و با دو ارتفاع جعبه فشار معادل ۲/۵ و ۴/۳ سانتی‌متر انجام شد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

که اعداد فرود بالادست در بازه $۲/۵۷ \leq F_۱ \leq ۱۲/۴۶$ را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که به منظور کاهش تلاطم در جت ورودی و همراستا شدن دیواره‌ها و کف کانال با خطوط جریان، از تبدیل‌های سهموی در مقطع قبل از دریچه کشویی استفاده شد. پس از برقراری دبی موردنظر، عمق پایاب توسط یک دریچه کشویی که در انتهای کانال قرار گرفته است در رقومی تنظیم می‌شد که پنجه پرش در فاصله ۴ تا ۵ سانتی‌متری خروجی جعبه فشار قرار گیرد. این فاصله را نمی‌توان کمتر گرفت زیرا همان‌طور که در آزمایش‌های آشور و دبابچه مشاهده شده است به ناپایداری شدید پرش منجر خواهد شد (۷). طول پرش، L_j، معادل فاصله از ابتدای پرش تا نقطه‌ای که سطح آب تقریبا افقی شود در نظر گرفته شد. پروفیل سطح آب توسط یک عمق‌سنج با دقت ۰/۱± میلی‌متر برداشت شد و سایر مشخصه‌های پرش با توجه به آن استخراج شد. طرحواره‌ای از پرش در مقطع مثلثی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج

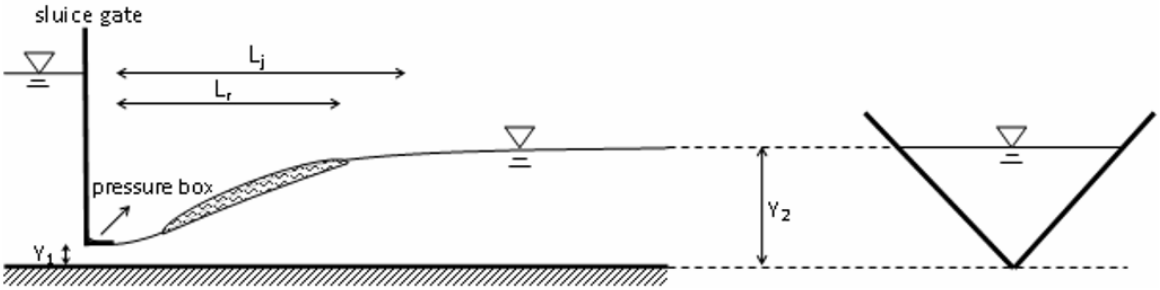
برخلاف پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی، پرش در مقطع مثلثی تحت تأثیر پدیده‌های مکانی قابل‌توجهی است. یک جریان برگشتی روی دیواره‌های شیبدار توسعه می‌یابد و به ایجاد یک جریان ثانویه در طرفین کانال منجر می‌شود. در خط مرکزی و سطح بالایی پرش نیز غلتابه‌هایی به وضوح دیده می‌شود که تقریباً تا انتهای پرش ادامه می‌یابد.

از دیدگاه طراحی سازه‌های مرتبط با پرش هیدرولیکی، نسبت اعماق مزدوج و نیز مشخصه‌های طولی پرش بسیار اهمیت دارند. در شکل ۲ تغییرات نسبت اعماق مزدوج بر حسب عدد فرود جریان ورودی برای دو مقطع مثلثی و مستطیلی (رابطه ۲) آورده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، به ازای تمامی اعداد فرود در دامنه آزمایش‌ها، نسبت اعماق مزدوج در کانال مثلثی به مراتب کمتر از کانال مستطیلی است؛ به طوری‌که به ازای عدد فرود $F_۱ = ۱۲/۴$ این اختلاف تقریباً به بیش از ۲/۲ برابر می‌رسد. این نتیجه نشان می‌دهد برای تشکیل پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی عمق پایاب بسیار کمتری موردنیاز است و این امر ضریب اطمینان بیشتری را در طراحی‌ها به دست می‌دهد. هم‌چنین در این شکل، رابطه ۷ که از رابطه تئوری اندازه حرکت استخراج گردید نیز رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که داده‌های آزمایشگاهی انطباق خوبی با رابطه ۷ دارند و اندک اختلاف موجود، به دلیل فرضیات ساده کننده در استفاده از معادله اندازه حرکت و استخراج رابطه تئوری است. در هر حال، اکثر داده‌های آزمایشگاهی تاحدی کمتر از مقادیر به دست آمده از معادله اندازه حرکت هستند و این نشان می‌دهد که معادله اندازه حرکت تا حدودی مقادیر نسبت اعماق مزدوج را بیشتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌کند.

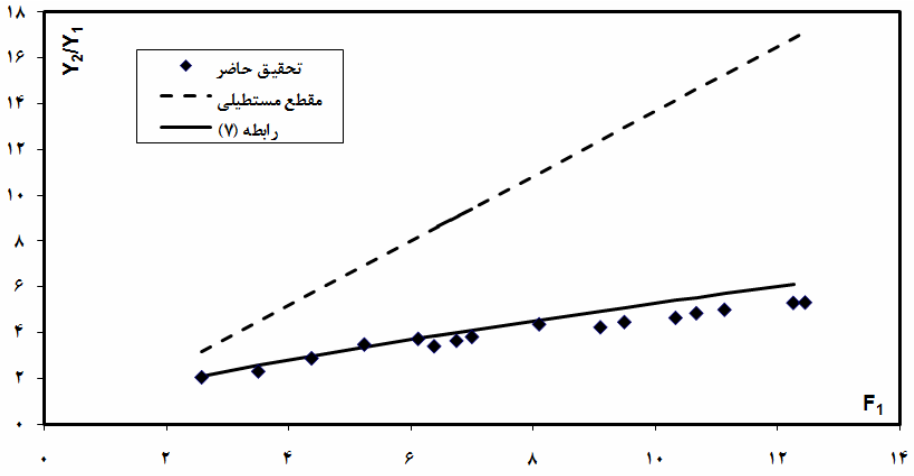
طول پرش به صورت فاصله بین ابتدای جهش تا اولین نقطه در پایین‌دست گردابه‌ها که سطح آب نسبتاً افقی می‌شود تعریف می‌گردد. تعیین این طول با استفاده از روابط تئوری امکان‌پذیر نیست و اغلب محققین به صورت آزمایشگاهی آن را تعیین می‌کنند. تغییرات طول بدون بعد پرش در مقابل عدد فرود جریان ورودی در شکل ۳ آورده شده است. در اینجا نیز به ازای تمامی اعداد فرود در دامنه آزمایش‌ها، طول بدون بعد پرش در مقطع مثلثی کمتر از مقطع مستطیلی می‌باشد. طول پرش در کانال مستطیلی از رابطه‌ای که توسط سیلوستر به صورت $L_j / Y_۱ = ۹/۷۵(F_۱ - ۱)^{۱/۰۱}$ ارائه شده است، محاسبه گردید (۱۷). هم‌چنین در این شکل، رابطه ارائه شده توسط سیلوستر که برای طول پرش در کانال مثلثی با زاویه مرکزی $۴۷/۳^\circ$ ارائه شده نیز رسم شده است. باتوجه به این شکل، طول پرش در کانال مثلثی بسیار وابسته به زاویه مرکزی کانال است. به گونه‌ای که با تغییر زاویه مرکزی کانال از $۴۷/۳^\circ$ به ۹۰°، طول پرش در مقطع مثلثی افزایش یافته و به مقطع مستطیلی نزدیک‌تر شده است. از طرفی، مطالعه انجام گرفته توسط هگر و ونوسچک (۱۳) بر روی کانال با زاویه ۴۵° نیز نشان می‌دهد که طول پرش در کانال مثلثی تا دو برابر کوتاه‌تر از کانال مستطیلی می‌باشد. هم‌چنین، شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش عدد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

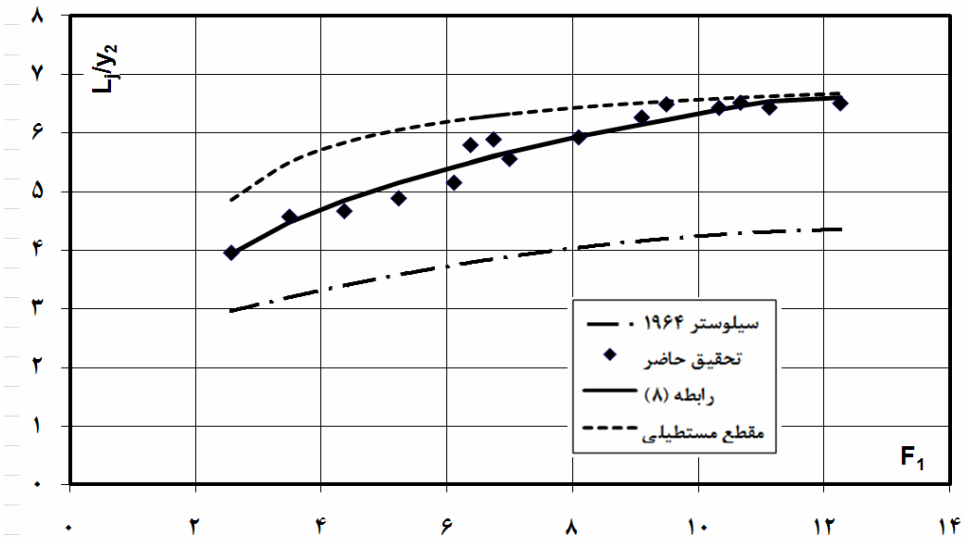
[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]



شکل ۱. طرحواره‌ای از پرش هیدرولیکی در مقطع مثلثی



شکل ۲. تغییرات نسبت عمق ثانویه بر حسب عدد فرود



شکل ۳. تغییرات طول بدون بعد پرش بر حسب عدد فرود

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

فرود، نرخ تغییرات طول بدون بعد پرش نیز کاهش یافته و طول پرش به یک مقدار حدی ثابت که وابسته به زاویه مرکزی کانال است میل می‌کند. با استفاده از داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌ها، رابطه‌ای به شکل زیر با ضریب همبستگی $R^2 = ۰/۹۵$ برای برآورد طول پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی حاصل گردید که در کنار یافته‌های سایر محققین در شکل ۳ ترسیم شده است:

$$\frac{L_j}{Y_2} = ۳/۴۷۲(F_1 - ۱)^{۰/۲۷۳} \qquad [۸]$$

لازم به ذکر است که این رابطه در محدوده شرایط آزمایشگاهی این تحقیق معتبر است.

چنانچه E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص در پنجه و پاشنه جهش باشند، افت انرژی نسبی در طول پرش به صورت $\eta = (E_1 - E_2)/E_1$ تعریف می‌شود. شکل ۴ نشاندهنده تغییرات پارامتر η برحسب تغییرات عدد فرود است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای تمامی اعداد فرود در دامنه آزمایش‌های این تحقیق، افت انرژی نسبی در مقطع مثلثی بیشتر از مقطع مستطیلی می‌باشد. هم‌چنین در این شکل رابطه تئوری نسبتاً پیچیده‌ای که راجاراتنام برای برآورد افت نسبی انرژی پرش پیشنهاد کرده است نیز رسم شده است که نشان می‌دهد انطباق خوبی میان نتایج آزمایشگاهی و رابطه تئوری وجود دارد (۱۶). با توجه به این شکل اختلاف پارامتر η بین مقاطع مستطیلی و مثلثی به حدود ۱۲٪ نیز می‌رسد.

آگاهی از وضعیت پروفیل سطح آب در طراحی دیواره‌های حوضچه آرامش و انتخاب ارتفاع آزاد کانال در محل وقوع پرش نقش بسیار مهمی دارد. هم‌چنین تحقیقات نشان داده است که توزیع عمودی فشار روی یک کف‌بند افقی در زیر پرش هیدرولیکی عملاً مشابه پروفیل سطح آب است؛ بنابراین اطلاع از پروفیل سطح آب می‌تواند در طراحی سازه‌ای حوضچه و ضخامت کف‌بند مورد نیاز به کار رود. اما مشکلی که در ارائه نتایج آزمایش‌های محققین قبلی وجود دارد وابستگی پروفیل سطح آب به عدد فرود است به طوری‌که به ازای هر عدد فرود یک پروفیل به دست می‌آید. چنانچه پارامترهای بدون بعد به صورتی انتخاب شوند که دربرگیرنده تأثیر عدد فرود باشند می‌توان رابطه منفردی ارائه کرد که به ازای یک دامنه مشخص از اعداد فرود قابل استفاده باشد. بر این اساس چنانچه عمق جریان به صورت پارامتر بدون بعد $y/(Y_2 - Y_1)$ که در آن y عمق جریان در فاصله x از ابتدای پرش می‌باشد تعریف شود می‌توان با تقسیم صورت و مخرج کسر به Y_1، به رابطه $(y/Y_1)/(Y_2/Y_1 - ۱)$ رسید که در آن پارامتر Y_2/Y_1 طبق رابطه ۷ دربرگیرنده اثر F_1 است. با استفاده از این رابطه می‌توان بدون در نظر گرفتن تأثیر مستقیم عدد فرود، پروفیل بدون‌بعد پرش در کانال با مقطع مثلثی را برای اعداد فرود مختلف در یک منحنی منفرد ارائه کرد. در شکل ۵، پروفیل بدون بعد پرش برحسب پارامتر $y/(Y_2/Y_1)$ در مقابل x/L_j ترسیم شده است.

بر اساس داده‌های به دست آمده در این تحقیق، رابطه‌ای به فرم زیر بر حسب پارامترهای بدون بعد با ضریب هم‌بستگی $R^2 = ۰/۸۶$ به دست آمد که می‌توان از آن در تعیین پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی در محدوده اعداد فرود $۲/۵ \le F_1 \le ۱۲/۵$ استفاده کرد:

$$\frac{y}{Y_2 - Y_1} = a + b \cdot \cos(c\frac{x}{L_j} + d) \qquad [۹]$$

که در آن ضرایب ثابت a، b، c و d به ترتیب برابر ۱/۱۳-، ۲/۴۵، ۰/۹۱۵ و ۰/۸۴۵- است.

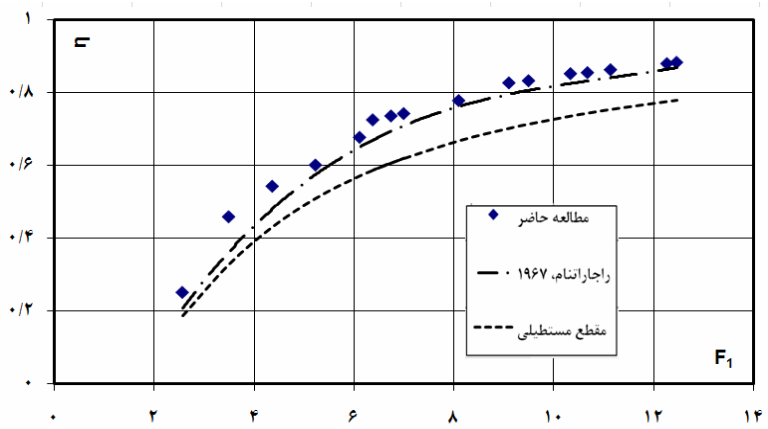
به منظور صحت‌سنجی رابطه به دست آمده، مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر محاسبه شده در شکل ۶ رسم گردید. با توجه به این شکل مشخص است که رابطه فوق، دقت قابل قبولی در برآورد پروفیل سطح آب در کارهای عملی دارد به طوری که بیش از ۸۸٪ از داده‌های اندازه گیری شده در محدوده خطای ۱۵٪ ± قرار دارند.

تحلیل حساسیت

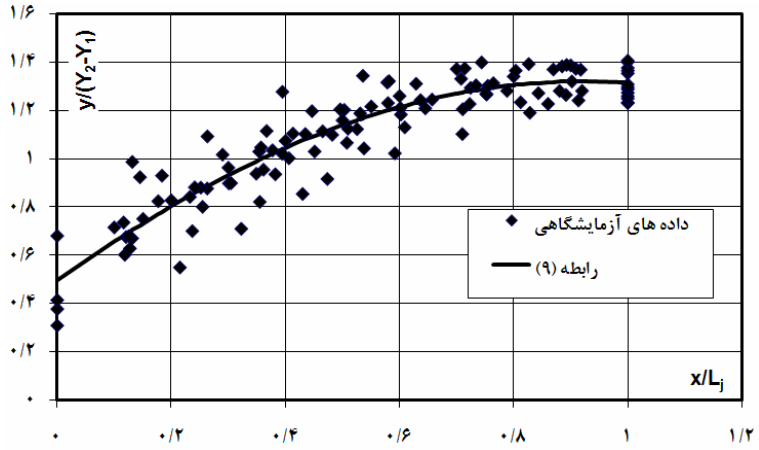
در شکل ۷ نتایج تحلیل حساسیت روابط ارائه شده در قسمت‌های قبلی این تحقیق برای محاسبه نسبت اعماق مزدوج و طول پرش در کانال با مقطع مثلثی بر طبق متغیر مستقل یعنی عدد فرود جریان ورودی (F_1) آورده شده است. در این شکل،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

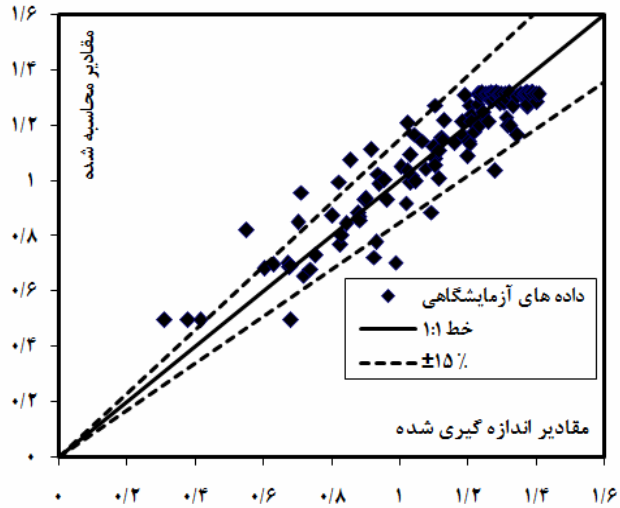
[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]



شکل ۴. تغییرات افت انرژی نسبی برحسب عدد فرود



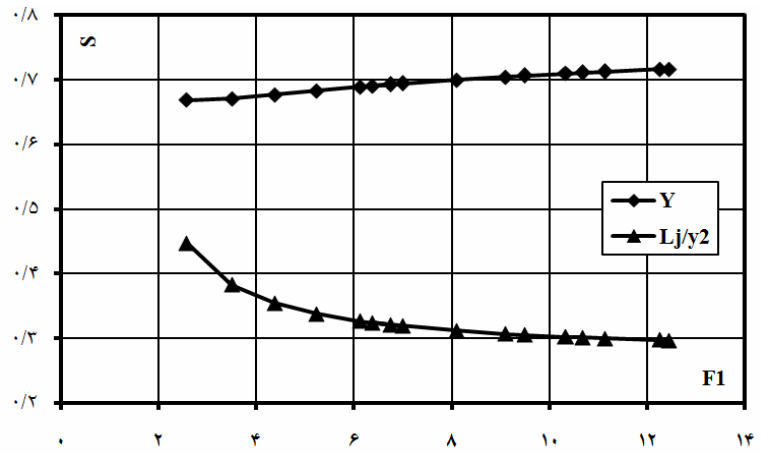
شکل ۵. پروفیل سطح آب در طول پرش برحسب پارامترهای بدون بعد



شکل ۶. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده پروفیل سطح آب در طی پرش هیدرولیکی در کانال مثلثی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]



شکل ۷. حساسیت هیدرولیکی پارامترهای پرش هیدرولیکی نسبت به F_1 در کانال با مقطع مثلثی

جدول ۱. نتایج آنالیز آماری روابط ارائه شده

شماره رابطه	شکل رابطه	R^2	*MRE*
(۷)	$Y = ۰/۷۵۶(F_1 - ۱)^{۰/۷۸۷} + ۱$	۰/۹۹۹	۰/۰۹
(۸)	$L_j / Y_2 = ۰/۴۷۲(F_1 - ۱)^{۰/۲۷۳}$	۰/۹۵	۰/۰۳
(۹)	$y/(Y_2 - Y_1) = a + b\cos(cx/L_j + d)$	۰/۸۶	۰/۰۸

پارامتر S حساسیت هیدرولیکی است و نشان‌دهنده نسبت تغییرات نسبی پارامتر خروجی (dY/Y یا $(d(Lj/y2)/(Lj/y2)$ به میزان تغییرات نسبی پارامتر ورودی (dF_1/F_1) است.

با توجه به این شکل مشخص است که اگر چه به ازای اعداد فرود کمتر از ۴/۵ تغییرات عدد فرود در یک F_1 معین تأثیر قابل‌توجهی بر میزان تغییر پارامتر L_j/Y_2 دارد اما برای دامنه اعداد فرود کاربردی یعنی $F_1 \geq$ ۴/۵ تأثیر تغییرات عدد فرود چندان قابل توجه نیست. هم‌چنین تغییرات نسبت اعماق مزدوج نیز در دامنه اعداد فرود تحقیق حاضر چندان وابسته به F_1 نمی‌باشد. در جدول ۱ نیز میزان میانگین خطای نسبی (MRE) که به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود برای روابط ۷ و ۸ و ۹ محاسبه شده است:

$$MRE = \frac{\sum\left(\left|\frac{X_0 - X_c}{X_0}\right|\right)}{n} \qquad [۱۰]$$

در این رابطه، X_0 و X_c به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده پارامتر موردنظر و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که میزان متوسط خطای نسبی در برآورد پارامترهای مشخصه پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی با استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق کمتر از ۹٪ است.

نتیجه‌گیری

مشخصات اصلی و کاربردی پرش هیدرولیکی از جمله نسبت اعماق مزدوج، طول پرش، استهلاک انرژی و پروفیل سطح آب در یک مقطع مثلثی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده با روابط موجود در زمینه پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی مقایسه گردید و در هر مورد، روند تغییرات و نیز اختلاف بین دو مقطع مثلثی و مستطیلی بررسی شد. هم‌چنین یک رابطه بر اساس اصل اندازه حرکت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

برای تعیین نسبت اعماق مزدوج در مقاطع مثلثی ارائه گردید. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، به ازای یک عدد فرود ثابت، نسبت اعماق مزدوج در کانال مثلثی به مراتب کمتر از مقطع مستطیلی است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که استفاده از رابطه اندازه حرکت نیز تا حد زیادی منجر به برآورد بیش از اندازه واقعی نسبت اعماق مزدوج می‌شود. هم‌چنین مشخص گردید که طول پرش در مقطع مثلثی کوتاهتر از مقطع مستطیلی است و مقدار آن به زاویه داخلی مقطع مثلثی بستگی دارد. از دیدگاه استهلاک انرژی نیز مقطع مثلثی به ازای تمامی اعداد فرود نسبت به مقطع مستطیلی کارآمدتر است به گونه‌ای که به ازای برخی اعداد فرود، اختلاف این پارامتر در دو کانال مثلثی و مستطیلی به ۱۲٪ نیز می‌رسد. هم‌چنین روابط تجربی برای محاسبه طول پرش و تعیین پروفیل سطح آب در طول پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی ارائه گردید که آنالیز آماری داده‌ها نشان داد که متوسط خطای نسبی روابط ارائه شده کمتر از ۱۰٪ است. با انجام تحلیل حساسیت مشخص شد، که در دامنه کاربردی اعداد فرود جریان ورودی (اعداد فرود بزرگ‌تر از ۴/۵)، میزان حساسیت روابط ارائه شده برای طول‌های مشخصه پرش هیدرولیکی چندان قابل‌توجه نیست. در پایان باید ذکر شود که اگر چه به طور کلی نتایج نشان‌دهنده برتری مقطع مثلثی بر مقطع مستطیلی در مورد مشخصه‌های اصلی پرش هیدرولیکی است، اما به علت بزرگ و حجیم بودن سازه در مواردی مانند حوضچه آرامش سدها و سرریزهای بزرگ، استفاده از مقطع مثلثی محدود به مقیاس‌های کوچک از قبیل شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی می‌شود.

سپاسگزاری

نگارندگان از همکاری آقای دکتر علیرضا وطنخواه در برخی مراحل انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع مورد استفاده

۱. اسماعیلی، ک. و ج. ابریشمی. ۱۳۷۹. پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی. مجله استقلال (۲) ۱۹: ۹۷-۱۱۰.

۲. بیرامی، م.ک. و م. حسینی. ۱۳۸۴. کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی. مجله استقلال (۱)۲۴: ۹۷-۱۱۹.

۳. حمیدی‌فر، ح.، م. ح. امید و م. شکرانی . ۱۳۸۸. بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مثلثی و کنترل آن با استفاده از آستانه لبه‌پهن. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

۴. قویسی، ح. ۱۳۸۵. مطالعه آزمایشگاهی اثر بلوک‌های کف بر خصوصات هیدرولیکی جهش واگرا در مقاطع ذوزنقه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

۵. گرد نوشهری، ا. ۱۳۸۷. بررسی وضعیت و مشخصات جهش هیدرولیکی در حوضچه ذوزنقه‌ای واگرا با آستانه انتهایی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

6. AbdulMatin, M., M. Hasan and M. Islam. 2008. Experiment on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. J. Civil Eng. IEB. 36(2): 65-77.
7. Achour, B. and M. Debabèche. 2003. Control of hydraulic jump by sill in triangular channel (in French). J. Hydraul. Res. IAHR. 41(3): 319–325.
8. Chow, V.T. 1959. Open Channel Hydraulics. Academic Press. McGraw-Hill, New York.
9. Debabèche, M. and B. Achour. 2007. Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. J. Hydraul. Res. IAHR. 45(1): 135–139.
10. Debabèche, M., S. Cherhabil, A. Hafnaoui and B. Achour. 2009. Hydraulic jump in a sloped triangular channel. Can. J. Civ. Eng. 36: 655–658.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]

11. Hager, W. H. 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Pub., Netherlands.
12. Hager, W. H. and D. Li. 1992. Sill-controlled energy dissipater. J. Hydraul. Res. IAHR. 30(2): 165–181.
13. Hager, W. H. and R. Wanoschek. 1987. Hydraulic jump in triangular channel. J. Hydraul. Res. IAHR. 25(5): 549-564.
14. Matin, M. A., A. Alhamid and A. M. Negm. 1998. Prediction of sequent depth ratio of hydraulic jump in abruptly expanding channel. 3th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Cottbus, Germany.
15. Peruginelli, A. and S. Pagliara. 1999. Adverse slope hydraulic jump: sequent depth. 28th Cong. of IAHR, Grazz, Austria.
16. Rajaratnam, N. 1967. Hydraulic jumps. Adv. in Hydrosci. 4: 197-280.
17. Silvester, R. 1964. Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels. Proc. ASCE J. Hydrol. Div. 90(HY1):23-55.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1389.14.54.3.2]