

مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق روی سطوح زبر و شیب معکوس

ناهید پور عبدالله^{۱*}، منوچهر حیدرپور^۲، جهانگیر عابدی کویایی^۳، جهانشیر محمدزاده هایلی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۸/۲۴)

چکیده

کنترل پرش هیدرولیکی برای کاهش خسارت وارده به ابنیه پایین دست از مسائل مورد توجه محققین است. هر چند تحقیقاتی بر روی کاربرد بستر زبر برای کنترل پرش مستغرق انجام شده است، اما مطالعه‌ای بر روی کاربرد همزمان شیب معکوس همراه با زبری بستر و پله انتهایی انجام نگرفته است. در این پژوهش، بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق در محدوده اعداد فرود اولیه ۴ تا ۱۰ و نسبت استغراق ۰/۱ تا ۱/۵ بر روی بستر با شیب معکوس، زبری سنگریزه‌ای و ارتفاع پله انتهایی متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که در یک عدد فرود معین، طول پرش مستغرق و افت انرژی نسبی آن به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. همچنین با افزایش نسبت استغراق اتلاف انرژی به‌طور متوسط ۱۰ و طول پرش مستغرق در مقایسه با حالت کلاسیک آن ۳۳ درصد کاهش نشان داد. همچنین ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در پرش مستغرق برابر با ۰/۳۷ به دست آمد. از سوی دیگر مقادیر ضریب نیروی برشی (E) به‌طور متوسط ۴/۴۴ برابر حالت کلاسیک محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: پرش مستغرق، عمق استغراق، طول پرش، افت انرژی، پروفیل سرعت.

مقدمه

پرش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که هرگاه جریان در قسمتی از مسیر خود با توجه به شرایط کانال از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل شود، رخ می‌دهد. این پدیده باعث افزایش عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاه و همچنین افزایش تلاطم جریان می‌شود. ضمن ایجاد پرش هیدرولیکی افت انرژی محسوس بوده و از میزان سرعت جریان به میزان قابل توجهی کاسته می‌شود. از این پدیده به‌طور وسیعی به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست اغلب سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌گردد. این پدیده به‌طور کلی به دو صورت آزاد و مستغرق رخ می‌دهد که در نوع آزاد، عمق پایاب با عمق ثانویه پرش هیدرولیکی برابر است.

مطالعات زیادی بر روی پرش هیدرولیکی آزاد در شرایط بستر شیبدار و بدون شیب در حضور زبری صورت گرفته است. Ead and Rajaratnam (2000) با انجام آزمایش‌هایی در کالورت با بستر موج‌دار نشان دادند که تنش‌های برشی رینولدز بر روی بسترهای موج‌دار به وجود آمده و این امر میدان‌های

سرعت روی بستر را کاهش می‌دهند و از آنجا که تاج سطح موج دار هم‌تراز با کف کانال است کاویتاسیون را نیز مقداری کم می‌کند. Pagliara and Palermo (2015) اثر زبری سنگریزه‌ای را بر روی بستر شیبدار معکوس مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در دو شیب معکوس ۵ و ۱۰ درصد و ۵ نوع اندازه زبری، آزمایش‌های خود را انجام دادند. همچنین راه حل تحلیلی را ارائه نمودند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آن‌ها عنوان کردند راه حل تحلیلی و نتایج آزمایش‌ها تطابق مناسبی دارد.

Parsamehr *et al* (2017) خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی در دو حالت با کف افقی و با شیب معکوس به همراه آب‌پایه را بررسی نمودند. نتایج نشان داد نصب آب‌پایه طول پرش هیدرولیکی را در بستر با شیب افقی به‌طور متوسط ۶/۳ درصد و در بستر با شیب معکوس ۱/۵ درصد، ۴۶/۶ درصد کاهش می‌دهد. Pourabdollah *et al* (2014) در تحقیق خود نشان دادند که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف معکوس و افزایش زبری، نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. این زبری‌ها در شرایط متفاوتی با اعداد فرود در محدوده بین ۴/۹ تا ۷/۸ مورد آزمایش قرار گرفتند. به‌طور متوسط کاهش اعماق نسبی در این تحقیق ۳۱/۱۵٪ بود.

گرفتند. همچنین نتایج کار آن‌ها نشان داد که در ناحیه توسعه یافته جهش مستغرق خصوصیات توزیع سرعت و نوسانات آن و شدت تلاطم جریان مشابه به هم می‌باشد.

Dey and Sarkar (2006) مطالعات آزمایشگاهی را روی میدان جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق تشکیل شده روی کانال‌های مستطیلی افقی با بستر صاف و زبر انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که نرخ کاهش سرعت جت انتشار یافته از زیر دریچه با افزایش ارتفاع زبری افزایش یافته است. تنش برشی بستر نیز با افزایش فاصله از دریچه کاهش و با افزایش ارتفاع زبری افزایش نشان داده و ضخامت لایه مرزی نیز با افزایش زبری افزایش یافته است.

Ghassemi *et al* (2017) در پژوهشی آزمایشگاهی به منظور توسعه روابط جدید و با دقت مناسب به بررسی برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آن‌ها اعلام نمودند که در یک عدد فرود معین، طول پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی نسبی پرش مستغرق به ترتیب بیشتر و کمتر از این مشخصات برای پرش هیدرولیکی آزاد است. به علاوه اینکه برای پرش مستغرق، در یک عدد فرود معین با افزایش نسبت استغراق، طول پرش و عمق استغراق روی دریچه افزایش و افت انرژی نسبی آن کاهش می‌یابد. Ead and Rajaratnam (2002) خصوصیات جت دیواره‌ای در عمق‌های پایاب کم را به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمانی که عمق پایاب کم باشد نیروی اندازه حرکت رو به جلوی جریان با افزایش فاصله از دریچه ورودی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده جریان‌های برگشتی است که دارای اندازه حرکت منفی بوده و سبب پائین افتادگی سطح آب در نزدیکی دریچه می‌شود. همچنان ایشان رابطه زیر را برای طول نسبی پرش مستغرق ارائه کردند:

$$Lsj = 2(y_2 + 2y_4) \quad (\text{رابطه ۴})$$

Abdel-Aal (2004) به مدل‌سازی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق در کانال‌های مستطیلی پرداخت و روابطی را برای محاسبه عمق استغراق نسبی روی دریچه و افت انرژی نسبی ناشی از پرش به شرح زیر ارائه نمود:

$$\frac{y_3}{y_1} = \left[\left(\frac{y_4}{y_1} \right)^2 + 2Fr_1^2 \left(\frac{y_1}{y_4} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{E_L}{E_1} = 1 - \frac{\left(\frac{y_4}{y_1} \right)^3 + 0.5Fr_1^2}{\left(\frac{y_4}{y_1} \right)^2 \left(\frac{y_3}{y_1} + 0.5Fr_1^2 \right)} \quad (\text{رابطه ۶})$$

Pagliara *et al* (2008) نشان دادند که اتلاف انرژی نسبی بر روی رمپ بستگی به اندازه زبری، شیب، نسبت بین عمق

Pourabdollah *et al* (2015) اثر زبری و شیب معکوس بستر را بر پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه ۴/۹ تا ۷/۸، بر روی ۳ نوع بستر زبر و شیب‌های صفر و معکوس ۰/۱۶، ۱/۳ و ۲٪ بررسی کردند. نتایج حاکی از تشابه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و تفاوت آن‌ها با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف بود. همچنین ضخامت لایه مرزی بی‌بعد برابر ۰/۶۶ محاسبه شد که در مقایسه با بستر صاف (۰/۱۶) قابل ملاحظه بود. ضمن آن که تنش برشی در بستر زبر همراه با شیب منفی کف حداقل ۱۰ برابر تنش برشی بر روی بستر صاف بدست آمد.

اما زمانی که عمق پایاب بزرگتر از عمق ثانویه مربوط به پرش آزاد گردد، پرش هیدرولیکی به بالادست حرکت نموده و به مستغرق تبدیل خواهد شد. اولین مطالعه در زمینه پرش هیدرولیکی مستغرق توسط Govinda Rao and Rajaratnam (1963) انجام شده است. آن‌ها با استفاده از اصول پیوستگی و اندازه حرکت نشان دادند که در کانال‌های مستطیلی با کف افقی می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$\frac{y_3}{y_1} = \left[(1+S)^2 \varphi^2 - 2Fr_1^2 + \frac{2Fr_1^2}{(1+S)\varphi} \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$(\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{E_L}{E_1} = \left[\left(\frac{y_3}{y_1} - (1+S)\varphi + 0.5Fr_1^2 \left(1 - \frac{1}{(1+S)^2 \varphi^2} \right) \right) \left[\frac{y_3}{y_1} + \frac{Fr_1^2}{2} \right]^{-1} \right]$$

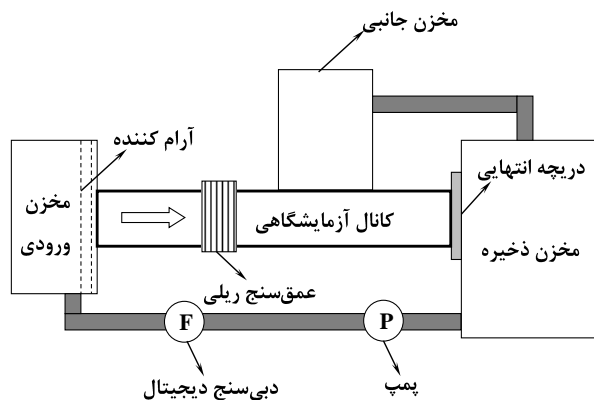
$$\frac{Lsj}{y_2} = 6.1 + 4.9S \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این روابط y_1, y_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش آزاد، y_3, y_4 به ترتیب عمق استغراق روی دریچه و عمق پایاب، $S = \frac{y_4 - y_2}{y_2}$ نسبت استغراق، $\varphi = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2} - 1)$ ، عدد فرود اولیه، E_L افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق، E_1 انرژی اولیه در پرش آزاد و Lsj طول پرش مستغرق می‌باشد.

Nasrabadi *et al* (2010) جهش‌های هیدرولیکی آزاد و مستغرق در پائین‌دست دریچه‌های کشویی و در روی دو بستر صاف و زبر را با هم مقایسه و بیان کردند که زبری بستر نقش مؤثری در کاهش طول هر دو نوع جهش آزاد و مستغرق دارد. طبق نتایج ایشان، طول جهش آزاد و مستغرق در اثر زبری بستر به ترتیب تا ۲۱ و ۱۴ درصد کاهش داشته است.

Long *et al* (1990) به مطالعه جهش هیدرولیکی مستغرق در پائین‌دست یک دریچه کشویی در کانال مستطیلی با بستر بدون زبری پرداختند. آن‌ها فاصله بین دریچه و انتهای ناحیه توسعه یافته را طول جهش هیدرولیکی مستغرق در نظر

در فلومی با مقطع مستطیلی به عرض ۰/۴ متر، ارتفاع ۰/۶ متر با طول ۸ متر و دیوارهای پلکسی گلاس شفاف صورت گرفت (شکل ۱). طول حوضچه آرامش شامل ۲ متر سطح شیبدار و یک پله مثبت انتهایی بود. به منظور افزایش عدد فرود اولیه در ۲ متر از طول کانال (قبل از دریچه بالادست) ارتفاع کانال از ۰/۶ متر به ۱/۲۵ متر افزایش یافت. آزمایش‌های این پژوهش هم در حالت بستر بدون زبری و هم برای بستر با زبری سنگریزه‌ای با قطر (t) $۴/۷۶ \leq t \leq ۵/۶۶$ ، $۱۱/۱ \leq t \leq ۱۲/۷$ و $۱۹/۱ \leq t \leq ۲۲/۲$ بر حسب میلی‌متر انجام گرفت (شکل ۲). همچنین شیب بستر حوضچه آرامش ۱/۵٪، ۳٪ و ۵٪- انتخاب گردید. از سوی دیگر اندازه پله مثبت انتهایی ۶ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق در هر شرایط شیب، زبری بستر و پله مثبت انتهایی آزمایش‌های مورد نظر در ۴ دبی بین ۲۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه، اعداد فرود ۴ تا ۱۰ و نسبت‌های استغراق ۰/۲۵ تا ۱/۴۵ انجام گرفت. بنابراین در این مطالعه ۱۹۲ آزمایش برنامه‌ریزی و انجام شد. پس از تثبیت هر پرش هیدرولیکی، خصوصیات آن شامل عمق جریان، پروفیل سرعت و طول پرش اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است در این پژوهش برای اندازه‌گیری عمق جریان از یک عمق‌سنج دستی با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری دبی و سرعت به ترتیب از دبی-سنج الکترومغناطیسی و لوله پیتوت استفاده گردید. شکل (۳) نمونه‌ای از پرش مستغرق تثبیت شده در حوضچه آرامش این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. پلان کانال آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ۲. زبری‌های سنگریزه‌ای دانه‌بندی شده

بحرانی و ارتفاع آن و طول آن در شرایط پرش مستغرق دارد. همچنین بیان داشتند برای اندازه‌های زبری مشابه می‌توان از اثر شیب صرفه نظر نمود.

Castro-Orgaz *et al* (2012) با حل همزمان رابطه انرژی و اندازه حرکت فرمول جدیدی را برای محاسبه افت انرژی پرش هیدرولیکی مستغرق دریچه‌های کشویی در کانال مستطیلی بدست آوردند. آن‌ها با اندازه‌گیری توزیع سرعت نشان دادند که به ازای یک توزیع سرعت معین، شار اندازه حرکت درون غلظت‌ها را نمی‌توان نادیده گرفت. Subhasish and Bernhard (2003) مطالعاتی بر روی تنش برشی در پرش مستغرق روی بستر صاف و بدون زبری انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که سرعت جریان در پرش مستغرق با افزایش زبری کاهش پیدا می‌کند. Habibzadeh *et al* (2011) خصوصیات پرش مستغرق را در حضور بلوک در حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد اتلاف انرژی در حضور بلوک در پرش مستغرق بیشتر از حالت حضور بلوک در پرش آزاد خواهد بود.

Nasrabadi *et al* (2012) عنوان کردند با افزایش رسوب، انرژی پرش هیدرولیکی مستغرق تقریباً ثابت می‌باشد. همچنین افزایش رسوب، طول پرش مستغرق را در بستر زبر ۱۴ درصد کاهش می‌دهد. Ahmad *et al* (2014) عنوان نمودند طول پرش مستغرق ۲۰/۰۳٪ در حالت زبر نسبت به حالت بدون زبری کاهش را نشان می‌دهد. همچنین عمق استغراق ۲۹/۰۳٪ نسبت به حالت بدون زبری کاهش داشته است. Dilrooban *et al* (2014) اثر زبری‌های مکعبی را بر پرش مستغرق مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عمق استغراق در حالت زبری ۱۱ درصد نسبت به حالت بدون زبری کاهش یافته است.

باید توجه نمود که همیشه شرایط برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد در پائین‌دست دریچه‌ها امکان‌پذیر نیست و همچنین با کوچک‌ترین افزایش در عمق پایاب، پرش هیدرولیکی به صورت مستغرق تشکیل خواهد شد. همان‌طور که در بررسی مطالعات پیشین مشاهده شد، تاکنون بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق در بستر با شیب منفی همراه با زبری و پله مثبت انتهایی پژوهشی ارائه نگردیده است. از سوی دیگر به نظر می‌رسد هر سه عامل شیب منفی، زبری بستر و پله مثبت انتهایی در تسهیل کنترل پرش هیدرولیکی مستغرق و افزایش افت انرژی آن اثر داشته باشند. لذا ارزیابی خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق در حوضچه‌های آرامش با بستر زبر، شیب منفی همراه با پله مثبت انتهایی ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان

که در این رابطه: g شتاب ثقل (m/s^2)، ρ دانسیته (kg/m^3)، μ لزجت دینامیکی آب ($N.s/m^2$)، t قطر زبری (m)، v لزجت سینماتیکی (m^2/s)، θ شیب بستر (%) و z ارتفاع پله مثبت انتهایی (m) می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار عدد رینولدز در این تحقیق در محدوده ۲۰۰۰۰ تا ۴۵۰۰۰ متغیر بود (جریان آشفته)، بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرفه نظر نمود در نتیجه نسبت عمق استغراق بصورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$\frac{D_3}{D_1} = f_1(Fr_1, \frac{t}{D_1}, \frac{z}{D_1}, \theta, S = \frac{D_4 - D_2}{D_2}) \quad (\text{رابطه ۸})$$

با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن D_3/D_1 به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، t/D_1 ، z/D_1 ، θ و S به عنوان متغیرهای مستقل، آزمون رگرسیون خطی انجام شد. بر همین مبنا و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه (۹) برای محدوده فرود ۴ تا ۱۰ قابل ارائه است:

$$\frac{D_3}{D_1} = -3.468 + 0.676Fr_1 + 5.383S - 2.169\frac{t}{D_1} + 0.461\frac{z}{D_1} + 0.246\theta$$

$$R^2 = 0.908 \quad RMSE = 0.1$$



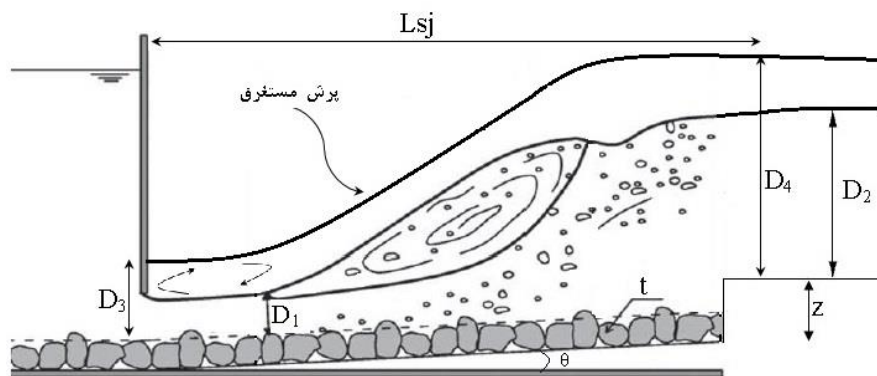
شکل ۳. نمونه پرش مستغرق در زبری $11/12 \leq t \leq 14/17$ ، شیب ۵٪ و پله انتهایی ۶ سانتیمتری

نتایج و بحث

آنالیز ابعادی

به منظور بررسی میزان تأثیر زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی بر پرش هیدرولیکی مستغرق چنانچه D_1 عمق اولیه پرش آزاد بر روی بستر زبر، u_1 سرعت متوسط در مقطع اولیه پرش و D_2 عمق مزدوج پرش آزاد، D_4 عمق پایاب در پرش مستغرق باشد، بنابراین D_3 (عمق استغراق روی دریاچه) تابعی از پارامترهای زیر خواهد بود (شکل ۴):

$$D_3 = f(D_1, D_2, D_4, u_1, g, \mu, \rho, t, \theta, z) \quad (\text{رابطه ۷})$$

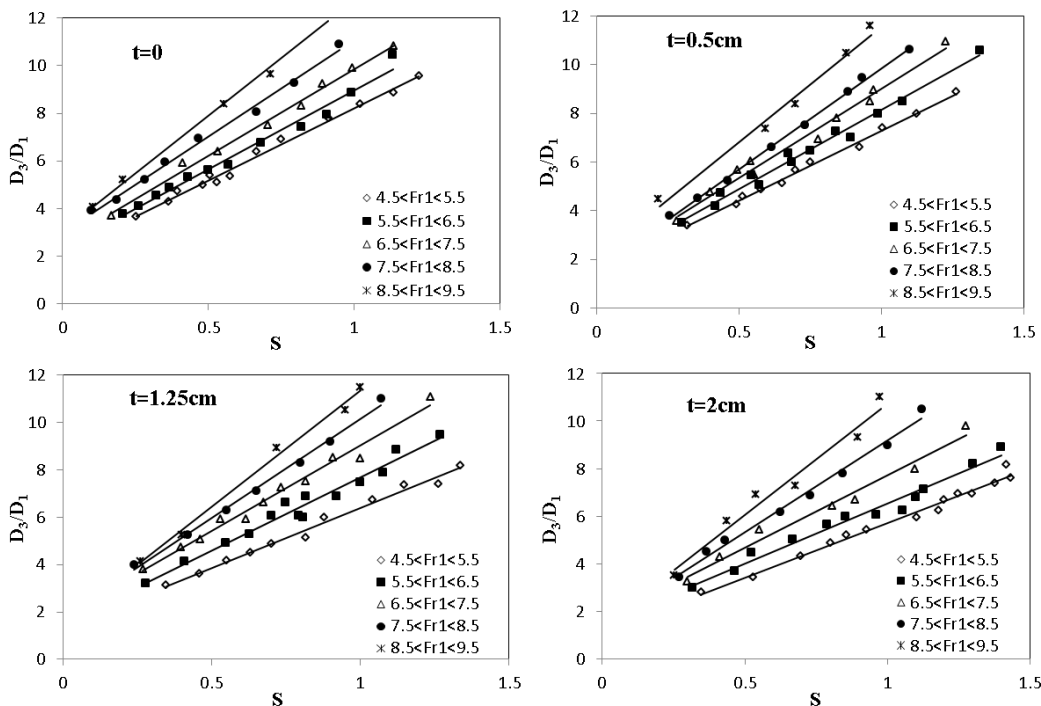


شکل ۴. تصویر شماتیک از پرش مستغرق بر روی سطح شیبدار معکوس همراه با زبری بستر و پله مثبت انتهایی

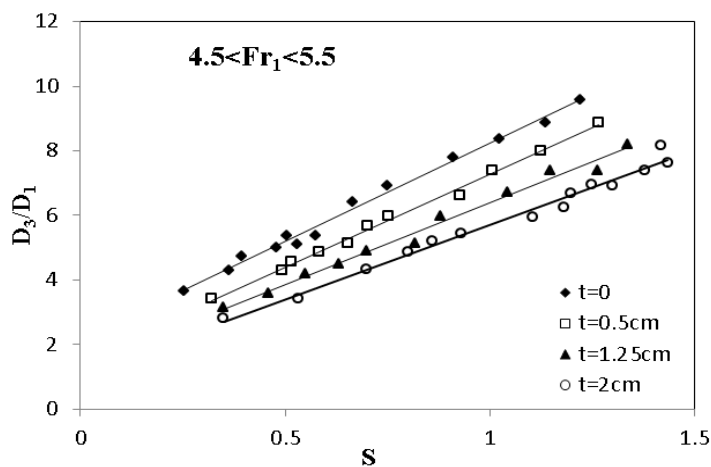
است، با افزایش زبری مقدار نسبت D_3/D_1 کاهش یافته است. این پدیده به دلیل اتلاف انرژی پرش مستغرق نسبت به حالت کلاسیک رخ داده است. به‌طور متوسط در این تحقیق مقدار کاهش D_3/D_1 در شرایط زبری بستر همراه با شیب معکوس و پله انتهایی ۲۲/۳ درصد نسبت به حالت کلاسیک آن بوده است. شکل (۶) نمونه‌ای از تغییرات D_3/D_1 را برای عدد فرود ۴/۵ تا ۵/۵ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زبری پارامتر بدون بعد D_3/D_1 کاهش یافته است. این روند برای تمامی اعداد فرود اولیه تکرار گردید.

عمق استغراق

یکی از مشخصات مهم پرش هیدرولیکی مستغرق، عمق استغراق روی دریاچه (D_3) است که برای محاسبه انرژی اولیه پرش هیدرولیکی مستغرق مورد نیاز می‌باشد. در شکل (۵) تغییرات عمق نسبی استغراق (D_3/D_1) در مقابل نسبت استغراق (S) و به ازای اعداد فرود مختلف در انواع شیب، زبری و پله انتهایی ترسیم گردیده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت استغراق، عمق استغراق روی دریاچه نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فرود اولیه مقدار D_3/D_1 افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده



شکل ۵. تغییرات D_3/D_1 در برابر S برای انواع زبری، شیب و پله مثبت انتهایی



شکل ۶. تغییرات D_3/D_1 در برابر S برای $4/5 < Fr_1 < 5/5$

بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تغییرات Lsj/D_1 در برابر عدد فرود برای نمونه در پله ۱۰ سانتیمتری و انواع شیب و زبری در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس این شکل با قرار دادن زبری بر روی شیب‌های مختلف، طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته است، به طوری که در هر شیب منفی با افزایش زبری این نسبت بیشتر کاهش می‌یابد. این نتیجه را می‌توان به صورت مشابه برای ثابت در نظر گرفتن زبری و افزایش شیب منفی نیز بیان کرد. با توجه به اثر کاهشی هر یک از متغیرهای شیب، زبری و پله انتهایی بر روی طول پرش هیدرولیکی می‌توان نتیجه گرفت اثر متقابل این سه بر روی

طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

به طور مشابه با نسبت عمق استغراق، با استفاده از نرم‌افزار SPSS و در نظر گرفتن Lsj/D_1 به عنوان متغیر وابسته و Fr_1 ، t/D_1 ، z/D_1 و θ و S به عنوان متغیرهای مستقل، آزمون رگرسیون خطی انجام شد. بر همین مبنا و با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، رابطه برازش داده شده به صورت زیر حاصل گردید:

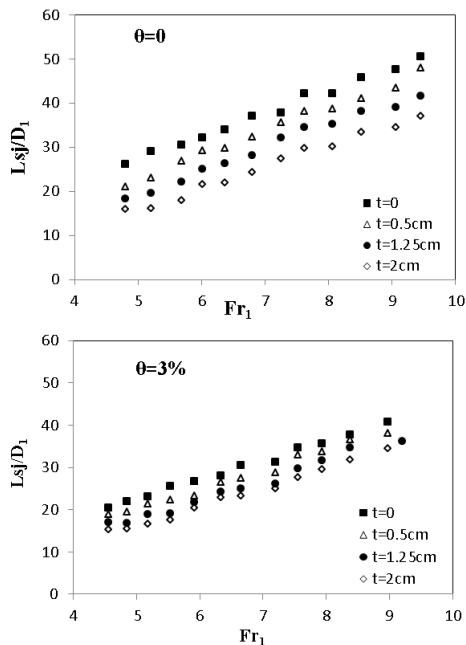
(رابطه ۱۰)

$$\frac{Lsj}{D_1} = -2.983 + 4.87Fr_1 - 3.434S - 7.607 \frac{t}{D_1} - 0.446 \frac{z}{D_1} + 0.525\theta$$

$$R^2 = 0.905 \quad RMSE = 0.2$$

است که ناشی از کاهش Lsj/D_2 در حضور شیب منفی، بستر زبر همراه با پله مثبت انتهایی می‌باشد. این کاهش نسبت به نتایج Govinda Rao and Rajaratnam (1963) ۳۳ درصد بوده است. همچنین با افزایش نسبت استغراق این کاهش شدیدتر شده است. بر همین اساس می‌توان طول حوضچه‌های آرامش را کاهش داد. بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌توان رابطه بین نسبت Lsj/D_2 و نسبت استغراق (S) را به صورت رابطه (۱۱) بیان نمود:

$$\frac{Lsj}{D_2} = 3.9793 + 2.1464S \quad R^2 = 0.72 \quad RMSE = 0.02$$

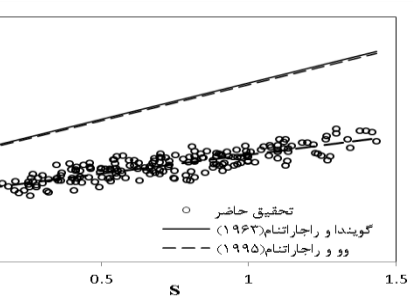
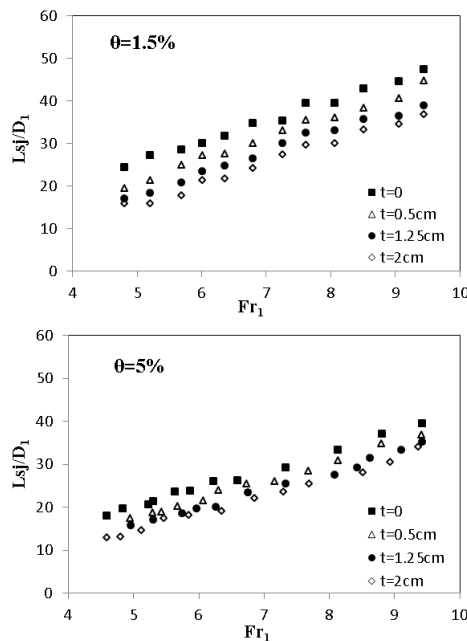


شکل ۷. تغییرات Lsj/D_1 در برابر Fr_1 برای پله ۱۰ سانتیمتری، انواع شیب منفی و زبری بستر

به منظور بررسی تأثیر شیب معکوس، زبری بستر و پله مثبت انتهایی بر نرخ اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی مستغرق در مقایسه با بسترهای صاف و افقی، منحنی تغییرات افت انرژی نسبی E_L/E_3 در مقابل عدد فرود اولیه برای نمونه در پله ۱۰ سانتیمتری و انواع شیب و زبری در شکل (۹) ترسیم شده است. مطابق این شکل در شیب ثابت با افزایش زبری بستر افت انرژی نسبی افزایش یافته است. همچنین با افزایش شیب معکوس نیز افت نسبی انرژی بیشتر شده است. بر اساس نتایج، میانگین افت انرژی نسبی ناشی از وجود زبری، شیب معکوس و پله مثبت انتهایی به ترتیب ۱۱/۳، ۹/۷ و ۹ درصد اندازه‌گیری شد. بنابراین متوسط افت انرژی نسبی در حالت وجود زبری همراه با شیب معکوس و پله انتهایی ۱۰ درصد نسبت به حالت کلاسیک پرش مستغرق افزایش نشان می‌دهد. همچنین با افزایش عدد فرود

طول پرش هیدرولیکی نیز کاهشی بوده به طوری که افزایش شیب معکوس بستر، افزایش ارتفاع پله مثبت انتهایی و یا قطر زبری، طول پرش هیدرولیکی مستغرق کاهش خواهد یافت. همچنین همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نسبت Lsj/D_1 تحت تأثیر عدد فرود اولیه بوده و با افزایش عدد فرود اولیه نسبت Lsj/D_1 نیز افزایش یافته است.

شکل (۸) تغییرات Lsj/D_2 در برابر نسبت استغراق (S) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش S مقدار نسبت Lsj/D_2 نیز افزایش خواهد یافت. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود نسبت Lsj/D_2 در مقایسه با معادله ارائه شده توسط Govinda Rao and Rajaratnam (1963) کاهش داشته



شکل ۸. تغییرات Lsj/D_2 در برابر S

افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

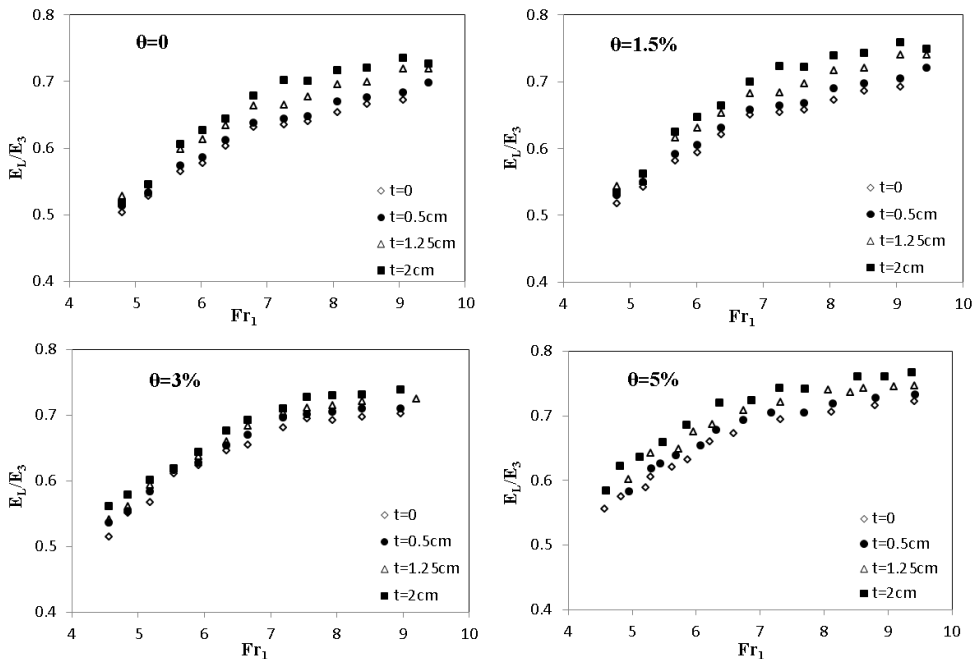
افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق، همانند روش ارائه شده توسط Abdel-Aal (2004) به صورت زیر می‌باشد.

(رابطه ۱۲)

$$\frac{E_L}{E_3} = \frac{E_3 - E_4}{E_3} = \frac{D_3 + V_1^2/2g - D_4 - V_4^2/2g - Lsj \times \sin \theta}{D_3 + V_1^2/2g}$$

تأثیر مثبتی در کنترل پرش هیدرولیکی مستغرق دارد. بنابراین می‌توان به‌جای صرف هزینه‌های گزاف برای ساخت حوضچه‌های آرامش طولانی، از بستر زبر همراه با شیب منفی و پله مثبت انتهایی در حوضچه‌های کوتاه‌تر استفاده نمود.

اولیه، شدت افت انرژی کاهش یافته است. علت این پدیده این است که با افزایش عدد فرود اولیه مقدار عمق D_4 مورد نیاز برای ایجاد پرش مستغرق افزایش یافته است، بر همین اساس مقدار E_4 افزایش یافته و بنابراین افت انرژی کاهش یافته است. با توجه به نتایج، شیب معکوس همراه با زبری بستر و پله مثبت انتهایی



شکل ۹. تغییرات E_1/E_3 در برابر Fr_1 برای پله ۱۰ سانتیمتری، انواع شیب منفی و زبری بستر

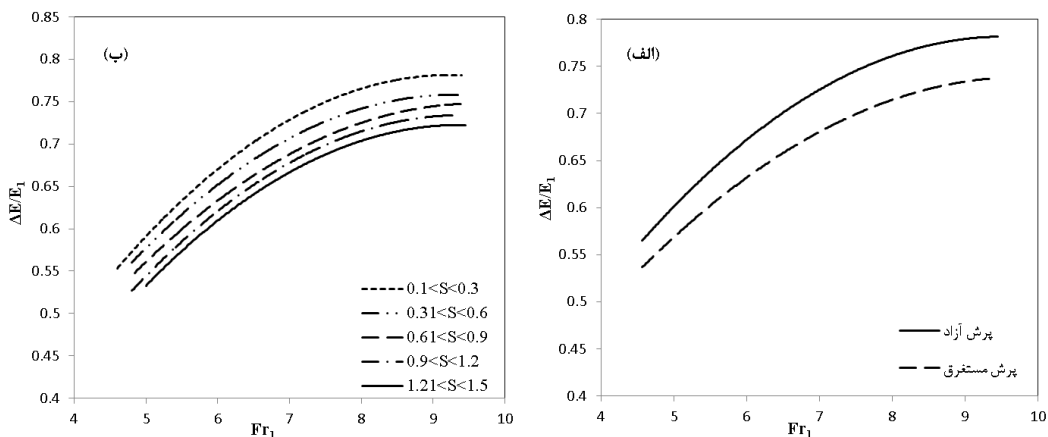
$$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0082Fr_1^2 + 0.1675Fr_1 - 0.0858 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$R^2 = 0.84 \quad RMSE = 0.05$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0072Fr_1^2 + 0.1384Fr_1 + 0.065 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$R^2 = 0.87 \quad RMSE = 0.03$$

شکل (۱۰-الف) مقایسه بین اتلاف انرژی بین پرش آزاد و پرش مستغرق را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اتلاف انرژی در پرش آزاد بیشتر از مستغرق بوده است. همچنین با توجه به شکل (۱۰-ب) با افزایش نسبت استغرق، اتلاف انرژی کاهش یافته است. این یافته‌ها با نتایج Rajaratnam (1967) مطابقت دارد. روابط ارائه شده برای پرش آزاد و مستغرق به ترتیب به‌صورت زیر می‌باشد:



شکل ۱۰. مقایسه اتلاف انرژی در پرش آزاد و مستغرق

پروفیل سرعت

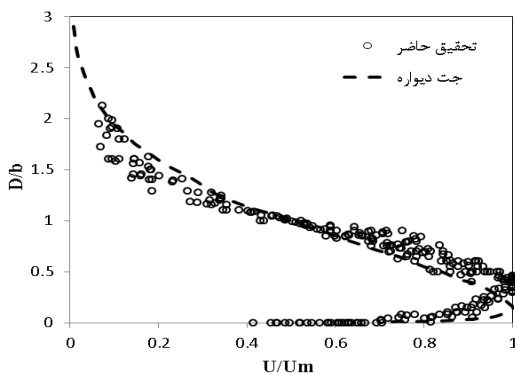
پروفیل بدون بعد سرعت از ترسیم تغییرات نسبت عمق جریان (D) به پارامتر b در مقابل نسبت سرعت جریان به سرعت حداکثر رسم می‌گردد. b عمقی است که در آن سرعت جریان برابر نصف سرعت حداکثر و $\partial u / \partial D < 0$ باشد. شکل پروفیل‌های قائم بدون بعد سرعت برداشت شده در آزمایش‌های مختلف این مطالعه و حالت جت دیواره در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق این شکل، سرعت حداکثر بر روی بستر زبر همراه با شیب معکوس و پله مثبت انتهایی نسبت به نازل دیواری در عمق بیشتری رخ داده است. با توجه به این که ضخامت لایه مرزی در هر مقطع از پرش هیدرولیکی برابر عمقی است که در آن سرعت ماکزیمم است، بنابراین ضخامت لایه مرزی (δ) در حالت‌های مختلف شیب، زبری بستر و پله مثبت انتهایی در این مطالعه نسبت به حالت کلاسیک افزایش یافته است. این تفاوت حاکی از یکنواختی بیشتر سرعت در طول پرش مستغرق بر روی بستر زبر همراه با شیب منفی در مقایسه با جت دیواره است.

تغییرات ضخامت لایه مرزی بدون بعد (δ/b) در برابر x/D_1 (فاصله از ابتدای پرش) در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت لایه مرزی در این تحقیق ۰/۳۷ بدست آمده است. ضخامت لایه مرزی بدون

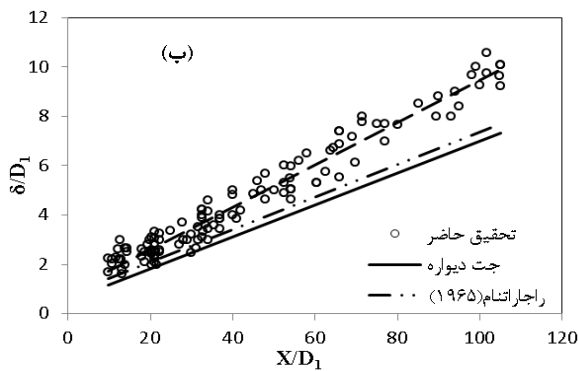
بعد را علاوه بر روش قبلی، می‌توان از تقسیم ضخامت لایه مرزی بر عمق اولیه پرش نیز بدست آورد. با توجه به اندازه-گیری‌های آزمایشگاهی، تغییرات لایه مرزی بی‌بعد (δ/D_1) به ازای x/D_1 در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است. بر همین اساس، می‌توان ضخامت لایه مرزی بی‌بعد در امتداد طولی پرش هیدرولیکی مستغرق برای شیب‌های منفی همراه با بستر زبری و پله مثبت انتهایی را با استفاده از رابطه زیر برآورد نمود:

$$\frac{\delta}{D_1} = 0.0857 \frac{x}{D_1} + 0.8862 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

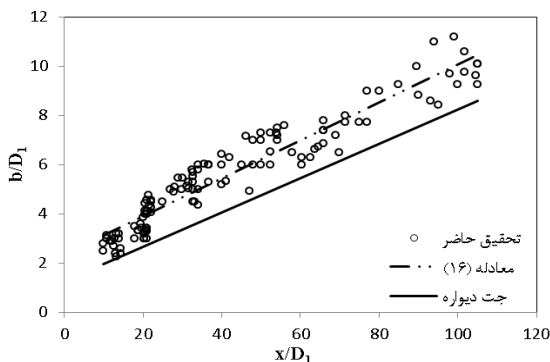
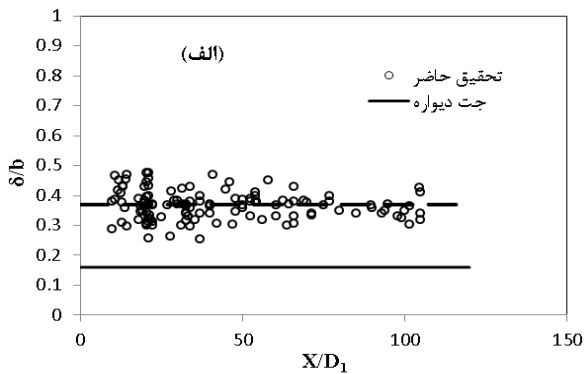
$$R^2 = 0.96 \quad RSME = 0.095$$



شکل ۱۱. پروفیل بدون بعد سرعت برای تمامی آزمایش‌ها



شکل ۱۲. (الف) تغییرات δ/b در برابر x/D_1 (ب) تغییرات δ/D_1 در برابر x/D_1



شکل ۱۳. تغییرات b/D_1 را در برابر x/D_1

از سوی دیگر تغییرات b/D_1 در برابر x/D_1 در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج این مطالعه نسبت b/D_1 را می‌توان از رابطه زیر برای پرش مستغرق برآورد نمود:

$$\frac{b}{D_1} = 0.077 \frac{x}{D_1} + 2.3563 \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$R^2 = 0.91 \quad RMSE = 0.11$$

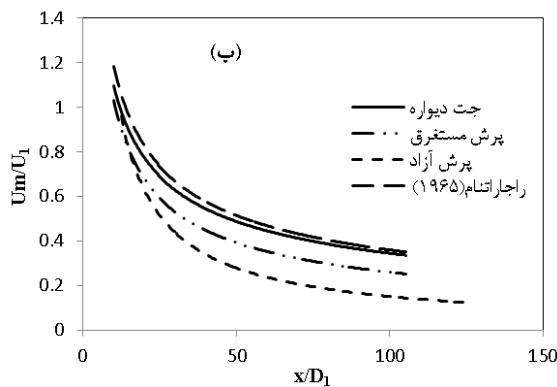
برای جت دیواره، پرش آزاد، پرش مستغرق و مطالعات Rajaratnam (1965) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقدار U_m/U_1 در برابر x/D_1 ثابت در پرش مستغرق کمتر از جت دیواره بوده است. علت کمتر بودن U_m/U_1 در پرش مستغرق نسبت به جت دیواره، کاهش انرژی جریان و در پی آن سرعت پرش مستغرق در شرایط این مطالعه به دلیل وجود شیب معکوس، زبری بستر و پله مثبت انتهایی نسبت به جت دیواره بوده است. همچنین مقدار U_m/U_1 در برابر x/D_1 ثابت در پرش مستغرق بیشتر از پرش آزاد بوده که نشان‌دهنده آشفته‌گی و افت انرژی بیشتر در پرش آزاد می‌باشد (Rajaratnam, 1967).

یکی دیگر از پارامترهای بدون بعد مورد مطالعه در پرش هیدرولیکی، بررسی نسبت تغییرات سرعت بدون بعد (U_m/U_1) در طول جریان می‌باشد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تغییرات U_m/U_1 در برابر x/Ls_j در شکل (۱۴) الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ابتدای پرش مقدار سرعت ماکزیمم و با نزدیک شدن به انتهای پرش، مقدار سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج این مطالعه، تغییرات U_m/U_1 برای x/Ls_j مختلف را می‌توان توسط رابطه (۱۷) برآورد نمود:

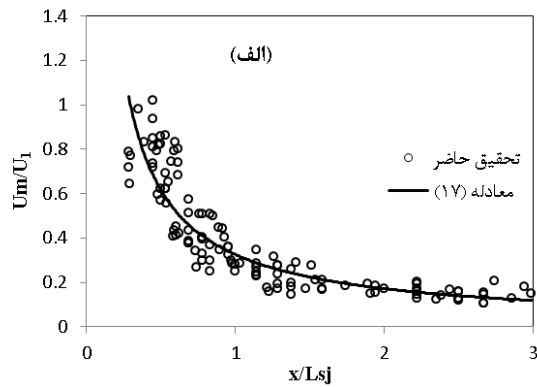
$$\frac{U_m}{U_1} = 0.3257 \left(\frac{x}{Ls_j} \right)^{-0.919} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$R^2 = 0.86 \quad RMSE = 0.012$$

همچنین شکل (۱۴) ب) تغییرات U_m/U_1 در برابر x/D_1 را



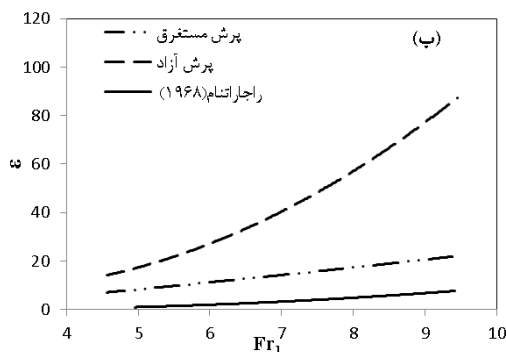
شکل ۱۴. الف) تغییرات U_m/U_1 در برابر x/Ls_j ب) تغییرات U_m/U_1 در برابر x/D_1



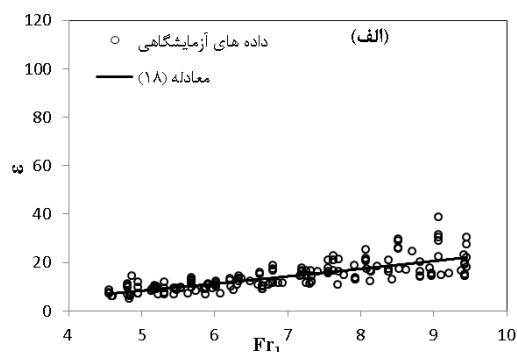
مقایسه ضریب نیروی برشی در این تحقیق با جت دیواره و پرش آزاد در شکل (۱۵) ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار ε در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب‌های منفی و با پله مثبت انتهایی بیشتر از جت دیواره و کمتر از پرش آزاد می‌باشد. بر اساس نتایج، مقدار ε در مطالعه حاضر به طور میانگین $4/44$ برابر ضریب نیروی برشی در بسترهای صاف است.

تغییرات ضریب نیروی برشی (ε) در برابر عدد فرود اولیه برای آزمایش‌های این مطالعه در شکل (۱۵) الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود اولیه مقدار ε به صورت توانی افزایش می‌یابد. بر همین اساس برای برآورد ضریب نیروی برشی در شرایط مطالعه حاضر می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$\varepsilon = 0.7485 Fr_1^{1.4946} \quad R^2 = 0.68 \quad RMSE = 0.14 \quad (\text{رابطه ۱۸})$$



شکل ۱۵- تغییرات ε به ازای Fr_1 . الف) برای تمامی داده‌های آزمایش، ب) مقایسه با مطالعات گذشته



نتیجه‌گیری

توجه به اثر کاهشی هر یک از متغیرهای شیب، زبری و پله انتهایی بر روی طول پرش هیدرولیکی می‌توان نتیجه گرفت اثر متقابل این سه بر روی طول پرش هیدرولیکی نیز کاهشی بوده به طوری که با افزایش شیب معکوس بستر، افزایش ارتفاع پله مثبت انتهایی و یا قطر زبری، طول پرش هیدرولیکی مستغرق کاهش خواهد یافت. افزون بر این اتلاف انرژی در پرش آزاد بیشتر از پرش مستغرق بوده است. همچنین با افزایش نسبت استغراق اتلاف انرژی کاهش یافته است. در این تحقیق تأثیر شیب منفی، زبری بستر همراه با پله مثبت انتهایی بر پروفیل‌های سرعت نیز مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج ضخامت لایه مرزی بی‌بعد δ/b در بستر زبر با شیب کف منفی همراه با پله مثبت انتهایی برابر با 0.37 به دست آمد که در مقایسه با این مقدار در پرش بر روی بستر صاف (0.16) بیشتر است. همچنین مقادیر ضریب نیروی برشی ε در این تحقیق به طور متوسط $4/44$ برابر حالت کلاسیک بدست آمد.

در این مطالعه اثر همزمان شیب معکوس بستر، قطر زبری سنگریزه‌ای و ارتفاع پله مثبت انتهایی حوضچه آرامش بر نسبت عمق استغراق، طول پرش به عمق اولیه پرش و پروفیل سرعت پرش هیدرولیکی مستغرق بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد نسبت عمق استغراق در شیب معکوس، قطر زبری و ارتفاع پله انتهایی ثابت، با افزایش عدد فرود اولیه افزایش یافته است. همچنین با افزایش زبری مقدار نسبت D_3/D_1 به دلیل اتلاف انرژی نسبت به حالت کلاسیک کاهش یافته است. همچنین با قرار دادن زبری بر روی شیب‌های مختلف، طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته است، به طوری که در هر شیب منفی و پله مثبت انتهایی با افزایش زبری کاهش این نسبت شدت یافته است. این نتیجه را می‌توان به صورت مشابه برای ثابت در نظر گرفتن زبری و افزایش شیب منفی نیز بیان کرد. با

REFERENCES

- Abdel-Aal, G. M. (2004). Modeling of rectangular submerged hydraulic jumps. *Alexandria Engineering Journal*, 43(6), 865-873.
- Ahmad, H.M.A., Gendy, M.E., Mirdan, A.M.H., Mohammad Ali, A.A. and Abdel Haleem, F.S.F. (2014). Effect of corrugated beds on characteristics of submerged hydraulic jump. *Ain Shams Engineering Journal*, 5, 1033-1042.
- Castro-Organ, O., Mateos, L. and Dey, S. (2012). Revisiting the energy-momentum method for rating vertical sluice gates under submerged flow conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(4), 325-335.
- Dey, S. and Sarkar, A. (2006). Response of velocity and turbulence in submerged wall jets to abrupt changes from smooth to rough beds and its application to scour downstream of an apron. *Journal of Fluid Mechanics*, 556, 387-419.
- Dilrooban, Y., Imasalan, K., Sujana, K. and Pathirana, K.P.P. (2014). Effect of Bed Roughness on Submerged Hydraulic Jumps. *Engineer*, XLVII(4), 33-39.
- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2), 656-663.
- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. (2000). Plane turbulent wall jets in shallow tail water. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(2), 143-155.
- Ghassemi, A., Hossen Omid, M., Nasrabadi, M. and Raesi, A. (2017). Evaluate and develop new relationship to estimate submerge hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 755-764. (In Farsi)
- Govinda Rao, N. S. and Rajaratnam, N. (1963). The submerged hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division*, 89(1), 139-162.
- Habibzadeh, A., Loewen, M. and Rajaratnam, N. (2011). Exploratory Study of Submerged Hydraulic Jumps with Blocks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6), 706-710.
- Long, D., Steffler, P.M. and Rajaratnam, N. (1990). LDA study of flow structure in submerged Hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 437-460.
- Nasrabadi, M., Omid, M.H. and Farhoudi, J. (2010). Comparative study of free and submerged hydraulic jump downstream of sluice gates. In: *Proceeding of 9th Iranian Hydraulics Conference*, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Nasrabadi, M., Omid, M.H. and Farhoudi, J. (2012). Submerged hydraulic jump with sediment-laden flow. *International Journal of Sediment Research*, 27(1), 100-110.
- Pagliara, S and M. Palermo. (2015). Hydraulic jumps on rough and smooth beds: aggregate approach for horizontal and adverse-sloped beds. *Journal of Hydraulic Research*, 53(2), 243-252.
- Pagliara, S., Das, R. and Palermo, M. (2008). Energy Dissipation on Submerged Block Ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(527).
- Parsamehr, P., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh Dalir, A., Abbaspour, A., and Nasr Esfahani, M. J. (2017). Characteristics of hydraulic jump on rough bed with adverse slope. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(3), 301-307.
- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A. (2015). Investigation of Water Velocity and Surface Profile in Hydraulic Jump over Rough Bed with Adverse Slope. *Water and Soil Science*, 25(1),

143-152. (In Farsi)

- Pourabdollah, N., Honar, T. and Fatahi, R.A. (2014). The Influence of Roughness in Adverse Bed Slopes on Conjugate Depth and Energy Losses of Hydraulic Jump. *JWSS - Journal of Water and Soil Science*, 18(67), 165-174. (In Farsi)
- Rajaratnam, N. (1967). Hydraulic jumps. *Advances in hydro science*, 4, 197-280.
- Rajaratnam, N. (1965). Submerged hydraulic jump.

Journal of Hydraulic Division, 91, 71-96.

- Subhasish, D. and Bernhard, W. (2003). Hydraulics of Submerged Jet Subject to Change in Cohesive bed Geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 44 - 53.
- Wu, S. and Rajaratnam, N. (1995). Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 197-212.