تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۷، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۵ (ص ۷۶۴-۷۵۵)

بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق و توسعه‌ی روابطی جدید برای برآورد خصوصیات آن

امین قاسمی[1*]، محمدحسین امید[2]، محسن نصرآبادی[3]، علی رئیسی استبرق[4]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۲. استاد،گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۴. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۲- تاریخ تصویب:۱۳۹۵/۲/۲۲)

چکیده

در این پژوهش، یک مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور توسعهٔ روابطی جدید و با دقت مناسب برای برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق انجام شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی با طول ۹ متر، عرض ۰/۵ متر و عمق ۰/۴۵ متر انجام شده است. این آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود بین ۳/۵ تا ۱۱/۵ و همچنین نسبت‌های استغراق‌های ۰/۱ تا ۴ تنظیم شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، نیمرخ سطح آب در اعداد فرود و در نسبت استغراق‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین روابطی با دقت مناسب برای برآورد مشخصاتی همچون طول پرش مستغرق، عمق استغراق روی دریچه و همچنین افت انرژی نسبی توسعه یافته است. نتایج نشان داد 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. به‌علاوه 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. در پایان نیز با انجام تحلیل حساسیت روابط توسعه‌یافته، میزان تأثیر پارامترهای حاکم بر تغییرات عمق استغراق روی دریچه و افت انرژی نسبی تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی مستغرق، نیمرخ سطح آب، عمق استغراق روی دریچه، افت انرژی نسبی، تحلیل حساسیت

مقدمه

پرش هیدرولیکی یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که اغلب در جریان‌های با سطح آزاد مثل جریان رودخانه‌ها و جریان خروجی از سرریزها و دریچه‌ها و درون حوضچه‌های آرامش مورد بحث قرار می‌گیرد. به واسطهٔ این پدیده، تبدیل جریان فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی در طول کوتاهی رخ می‌دهد و انرژی زیادی از جریان گرفته می‌شود. 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؛ اما زمانی که عمق پایاب بزرگ‌تر از عمق ثانویه مربوط به پرش آزاد گردد، پرش هیدرولیکی به بالادست حرکت می‌کند و به‌صورت مستغرق برقرار خواهد شد.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه توسعه روابط برای مشخصات پرش هیدرولیکی آزاد (نسبت اعماق مزدوج، افت انرژی نسبی و طول پرش) انجام شده است که می‌توان به منابعی همچون Kindsvater (1944)، Woodward and Beebe (1957)، Bradley and Peterka (1967,1968)، Rajaratnam (1990) Hager *et al.* مراجعه کرد.

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 روابط زیر را بدست آورد (Mahmoodian Shooshtari (2009)):

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

(رابطه ۲)

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

$$\frac{L_j}{y_2}=4.9S+6.1$$

(رابطه ۳)

در این روابط، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی آزاد، y_2

* نویسنده مسئول : amin_ghassemi@ut.ac.ir

عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد، y_3 عمق استغراق روی دریچه، y_4 عمق پایاب، $S=\frac{y_4-y_2}{y_2}$ نسبت استغراق، $\varphi=\frac{y_2}{y_1}=\frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right)$ نسبت اعماق مزدوج پرش آزاد، Fr_1 عدد فرود اولیه جریان، E_L افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق، E_1 انرژی اولیه جریان قبل از پرش هیدرولیکی مستغرق و L_j طول پرش هیدرولیکی مستغرق می‌باشد.

Long *et al.* (1990) به مطالعه پرش هیدرولیکی مستغرق در پائین‌دست یک دریچه کشویی در کانال مستطیلی با بستر صاف پرداختند. آنها مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق شامل نیمرخ سطح آب، توزیع سرعت و نوسانات آن، تنش برشی ناشی از تلاطم و شدت تلاطم را بررسی کردند و پرش مستغرق را از نظر توسعه جریان به سه قسمت: ناحیه درحال‌توسعه[1]، ناحیه توسعه‌یافته[2] و ناحیه بهبودیافته[3] تقسیم کردند. آنها همچنین فاصله بین دریچه و انتهای ناحیه توسعه‌یافته را طول پرش هیدرولیکی مستغرق (طول جریان غلطان) L_{rsj} در نظر گرفتند. در این تقسیم‌بندی ناحیه درحال‌توسعه ۱۵٪ و ناحیه توسعه‌یافته ۸۵٪ طول پرش مستغرق را تشکیل می‌دهد.

Ead and Rajaratnam (2002) خصوصیات جت دیواره‌ای در عمق‌های پایاب کم را به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که زمانی که عمق پایاب کم باشد نیروی اندازه حرکت روبه‌جلوی جریان با افزایش فاصله از دریچه ورودی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که این کاهش به دلیل جریان‌های برگشتی[4] می‌باشد که دارای اندازه‌حرکت منفی بوده و سبب پائین‌افتادگی سطح آب در نزدیکی دریچه می‌شود. همچنین طول جریان برگشتی (ناحیه غلطان) در پرش هیدرولیکی مستغرق به دو پارامتر عمق پایاب و عدد فرود وابسته است. آنها رابطه زیر را برای طول نسبی پرش مستغرق ارائه کردند:

$$L_{rsj}=2(y_2+2y_4)$$ (رابطه ۴)

که در این رابطه y_4 عمق پایاب و y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد می‌باشد. این رابطه در اعماق پایاب کم معتبر است.

Abdel-Aal (2004) به مدل‌سازی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق در کانال‌های مستطیلی پرداخت. وی با فرض توزیع فشار هیدواستاتیک در ابتدا و انتهای پرش هیدرولیکی مستغرق و نیز استفاده از معادله مومنتوم یک‌بعدی، پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی مستغرق را مورد بررسی قرار داد. ایشان روابطی را برای محاسبه عمق استغراق نسبی روی دریچه[5] و افت انرژی نسبی ناشی از پرش به شرح زیر ارائه نمود:

$$\frac{y_3}{y_1}=\left[Y_0^{\,2}+2Fr_1^{\,2}\left(\frac{1}{Y_0}-1\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$ (رابطه ۵)

$$\frac{E_L}{E_1}=1-\frac{Y_0^3+0.5Fr^2}{Y_0^2\left(\frac{y_3}{y_1}+0.5Fr^2\right)}$$ (رابطه ۶)

که در این روابط y_3 عمق استغراق روی دریچه، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی (برابر است با بازشدگی دریچه ضرب‌در ضریب فشردگی)، Y_0 عمق نسبی پرش (y_4/y_1)، y_4 عمق پایاب، E_L افت انرژی ناشی از پرش (E_1-E_2)، E_1 انرژی جریان در ابتدای پرش ($y_3+\frac{v_1^2}{2g}$)، E_2 انرژی جریان در انتهای پرش ($y_4+\frac{v_4^2}{2g}$)، v_1 سرعت جریان در مقطع با عمق y_1، v_4 سرعت جریان در مقطع با عمق y_4 و F_1 عدد فرود اولیه پرش با عمق y_1 می‌باشد.

Nasrabadi *et al.* (2010) به مقایسه خصوصیات پرش آزاد و مستغرق در بسترهای صاف و زبر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در اعداد فرود یکسان (بزرگ‌تر از حدود ۴) طول پرش آزاد همواره بزرگ‌تر یا مساوی طول پرش مستغرق بوده و همچنین افت انرژی نسبی پرش مستغرق در اعداد فرود کم، همواره بزرگ‌تر یا مساوی افت انرژی نسبی پرش آزاد است. گفتنی است این مطالعه در یک عمق پایاب ثابت انجام شده است.

Castro-Orgaz *et al.* (2012) با تحلیل منطقی روش حل همزمان معادله‌های انرژی و اندازه‌حرکت (EM)، یک فرمول‌بندی جدید برای محاسبه‌ی افت انرژی پرش هیدرولیکی مستغرق پایین‌دست دریچه‌های کشویی در کانال‌های مستطیلی بدست آوردند. آن‌ها با اندازه‌گیری توزیع سرعت، نشان دادند که به ازای یک توزیع سرعت معین، شار اندازه‌حرکت درون غلتاب‌ها (به‌ویژه در مقطع تنگ‌شده) نمی‌تواند نادیده گرفته شود. بنابراین شار اندازه‌حرکت غلتاب‌ها و افت انرژی ناشی از غلتاب‌ها را در این فرمول‌بندی در نظر گرفتند و رابطهٔ زیر را پیشنهاد کردند:

1. Developing Region
2. Developed Region
3. Recovering Region
4. Return flow
5. Depth ratio

$$\Delta H=\left[\frac{8x_2}{V_{j2}h_2(y_2-h_2)}\left(\frac{u_r}{V_j}\right)^2\overline{\nu_t}\right]\frac{V_{j2}^2}{2g}=K\frac{V_{j2}^2}{2g} \qquad \text{(رابطه ۷)}$$

براساس Rajaratnam and Subramanya (1967a) فرض می‌شود که مقطع انقباض در $x_2 \approx w$ رخ می‌دهد. همچنین براساس Madsen and Svendsen (1983) ضخامت جریان غلتابی پایین‌دست دریچه برابر است با $\overline{\nu_t}=\Lambda(y_2-h_2)$؛ که Λ ثابت تناسب است و سرعت جت به‌صورت $V_{j2} = [2g(y_1- y_2)]^{0.5}$ برآورد می‌شود (Rajaratnam and Subramanya (1967 a, b)). با در نظر گرفتن این فرضیه‌ها، ضریب K در معادله (۷) به‌صورت زیر در می‌آید:

$$K=\frac{8\Lambda}{C_c}\left(\frac{u_r}{V_j}\right)^2\sqrt{2g(y_1-y_2)} \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

در این رابطه، C_c ضریب انقباض، g شتاب ثقل، ΔH افت انرژی پرش هیدرولیکی مستغرق، h_2 حداقل ضخامت جت مستغرق، K ضریب افت انرژی، u_r سرعت جریان غلتابی، V_j سرعت متوسط جت، V_{j2} سرعت متوسط جت در مقطع انقباض، w بازشدگی دریچه، x_2 موقعیت مقطع انقباض[1]، y_1 عمق جریان بالادست، y_2 عمق کل جریان در مقطع انقباض، $\overline{\nu_t}$ لزجت گردابی متوسط عمقی[2] و Λ ضریب لزجت گردابی متوسط عمقی[3] است. آنها درنهایت خاطر نشان کردند که فرمول جدید توسعه‌یافته دقت برآورد دبی عبوری از دریچه‌های کشویی را بهبود نمی‌بخشد (٪ ۱۰ ±) اما فرضیاتی که در این روش در نظر گرفته شده است، پایه و اساس منطقی‌تری نسبت به سایر روش‌های مرسوم و پیشین دارد.

همان‌طور که در بررسی مطالعات پیشین مشاهده می‌شود، تاکنون برای مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق روابطی که ضمن ساده و کاربرپسند[4] بودن، دربرگیرنده محدوده‌ای گسترده از اعداد فرود و نسبت استغراق باشد، ارائه نشده است. با توجه به اینکه همیشه شرایط برای تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد در پائین‌دست دریچه‌ها امکان‌پذیر نیست و همچنین با کوچک‌ترین افزایش در عمق پایاب، پرش هیدرولیکی به‌صورت مستغرق تشکیل خواهد شد. لذا ارزیابی ابعاد حوضچه‌های آرامش بر اساس مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق نیز بسیار ضروری به نظر می‌رسد. وجود روابطی با دقت مناسب برای تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق می‌تواند در استخراج روابطی به‌منظور طراحی دقیق‌تر و اقتصادی حوضچه‌های آرامش نیز مورد استفاده قرار گیرد. در راستای این اهداف، یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق که پوشش‌دهنده اعداد فرود و همچنین نسبت‌های استغراق (اعماق پایاب) مختلف باشد، لازم می‌نماید. تا بتوان با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها، روابط ارائه‌شده تاکنون را صحت‌سنجی و مقایسه نمود.

مواد و روش‌ها

فلوم آزمایشگاهی

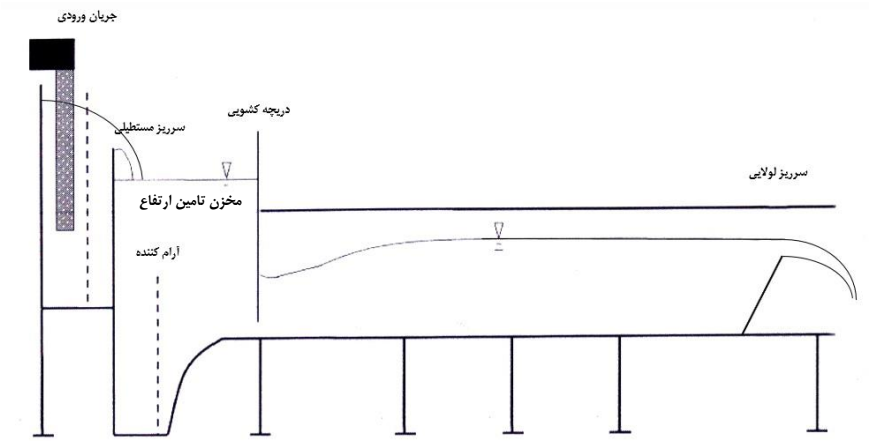
به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش‌هایی در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۹ متر، عرض ۰/۵ متر و عمق ۰/۴۵ متر و نیز شیب کف صفر انجام شده است. قسمت‌های مختلف این مدل آزمایشگاهی شامل مخزن تأمین ارتفاع، دریچه کشویی ایجادکننده جت جریان ورودی، کانال مستطیلی، سرریز لولایی تنظیم عمق پایاب در فاصله ۹ متری از ابتدای کانال و سیستم انتقال آب است که به‌صورت شماتیک در شکل (۱) آورده شده است.

دبی جریان در این تحقیق توسط سرریز مستطیلی نصب‌شده در مخزن تأمین ارتفاع بالادست اندازه‌گیری شد که پیش از اجرای آزمایش‌ها با استفاده از یک فلومتر الکترومغناطیسی فلنچی از نوع Mag Ab 3000، منحنی دبی اشل آن تهیه و واسنجی شده بود. جریان ورودی به سیستم نیز به کمک یک شیرفلکه کشویی قابل تنظیم بود. با نصب یک دریچه کشویی در ابتدای کانال مستطیلی، شرایط ایجاد عمق اولیه جریان برای تشکیل پرش هیدرولیکی فراهم گردید. بازشدگی دریچه در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

سامانه برداشت پروفیل سطح آب

جهت برداشت پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی پس از دریچه کشویی، یک عمق‌سنج مکانیکی با دقت ۰/۱ میلی‌متر با قابلیت جابجایی به‌صورت ریلی در طول فلوم نصب گردید (شکل ۲). همچنین در کف فلوم و در میانه عرض آن نیز تا فاصله‌ی ۱/۱۵ متر از محل دریچه کشویی، ۱۲ پیزومتر به فاصله ۱۰ سانتیمتر از یکدیگر نصب شده بود که به‌وسیله آن‌ها عمق آب درون فلوم در یک تابلو پیزومتر قابل‌اندازه‌گیری بود. جهت محاسبه عمق جریان با استفاده از پیزومترها، ابتدا از تابلو پیزومترها عکس‌برداری صورت می‌گرفت و پس از آن با رقومی نمودن[5] عکس‌ها در نرم‌افزار Grapher 11، عمق جریان در طول پرش هیدرولیکی مستغرق اندازه‌گیری می‌شد.

1. Position of vena contracta section
2. Depth-averaged eddy-viscosity
3. Depth-averaged eddy-viscosity coefficient
4. User-friendly
5. Digitize



شکل ۱- طرحواره‌ای از مدل آزمایشگاهی مورداستفاده

روش انجام آزمایش

ابتدا با توجه به بازشدگی دریچه و ضریب تنگ‌شدگی احتمالی آن، دبی لازم برای عدد فرود موردنظر تعیین و بر اساس آن جریان در فلوم برقرار می‌شد. با استفاده از یک عمق سنج مکانیکی که در فاصله ۸ سانتی‌متری از دریچه قرار داشت، عمق جریان خروجی از دریچه قرائت و با توجه به آن ضریب تنگ-شدگی دریچه محاسبه می‌گردید. در صورت اختلاف این مقدار با ضریب تنگ‌شدگی در نظر گرفته شده، مجدداً مراحل ذکرشده تکرار می‌شد تا عدد فرود موردنظر حاصل شود. در ادامه با استفاده از سرریز لولایی که در انتهای فلوم قرار داشت، پایاب در شرایطی تنظیم می‌گردید که پرش هیدرولیکی آزاد به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از دریچه به‌صورت پایدار تشکیل شود. عمق ثانویه پرش هم با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی و هم با استفاده از پیزومتر مربوطه بدست می‌آمد. پروفیل سطح آب نیز با استفاده از عمق‌سنج مکانیکی و نیز سامانه برداشت پروفیل سطح آب، ثبت می‌گردید. پس از طی این مراحل، با استفاده از سرریز لولایی عمق پایاب افزایش پیدا می‌کرد تا پرش هیدرولیکی به‌صورت مستغرق تشکیل شود و مراحل اندازه‌گیری ذکرشده به‌علاوه‌ی تعیین طول پرش بر روی آن تکرار می‌شد. در هر عدد فرود حداقل شش حالت از پرش هیدرولیکی مستغرق که در واقع شامل اعماق پایاب مختلف بود، برداشته شد. پس از اتمام این مراحل، عدد فرود بعدی اعمال و تمام این مراحل مجدداً تکرار می‌شد.

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر گسترده‌تر از تحقیقات پیشین بوده و می‌توان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی آن، روابط ارائه‌شده تاکنون را مقایسه نمود و نیز در صورت امکان روابط جدیدی را ارائه داد. درمجموع ۶۷ آزمایش که شامل ۹ عدد فرود مختلف و در هر عدد فرود حداقل هفت نسبت استغراق مختلف بود، انجام شد و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

جدول ۱- مقایسه محدوده مطالعاتی تحقیقات پیشین و تحقیق حاضر

محقق	محدوده عدد فرود	محدوده نسبت استغراق
Long *et al.* (1990)	۳ تا ۵/۵	۰/۲ تا ۱/۷
Ead and Rajaratnam (2002)	۴ تا ۸	۱/۵۸ تا ۸/۶۲
Abdel-Aal (2004)	۲/۲ تا ۴/۴	۰/۱۵ تا ۰/۷۵
تحقیق حاضر	۳/۵ تا ۱۱/۵	۰/۱ تا ۴

نتایج و بحث

تحلیل ابعادی

در این بخش ابتدا در مورد تحلیل ابعادی انجام‌شده به‌منظور یافتن پارامترهای مؤثر بر پرش مستغرق بحث می‌شود. به طورکلی مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق در بستر صاف و افقی، تابعی از پارامترهای زیر است:

$$F(\rho, \mu, y_1, y_2, y_3, y_4, g, V_1, L_j) = 0 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در این رابطه ρ جرم حجمی سیال، μ گرانروی دینامیکی سیال، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی آزاد، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد، y_3 عمق استغراق روی دریچه، y_4 عمق پایاب، g شتاب ثقل، V_1 سرعت جریان در مقطع تنگ-شدگی و L_j طول پرش هیدرولیکی مستغرق می‌باشد. با استفاده از نظریه باکینگهام (π) و استفاده از y_1، V_1 و ρ به‌عنوان متغیرهای تکرارشونده، می‌توان روابط زیر را استخراج نمود:

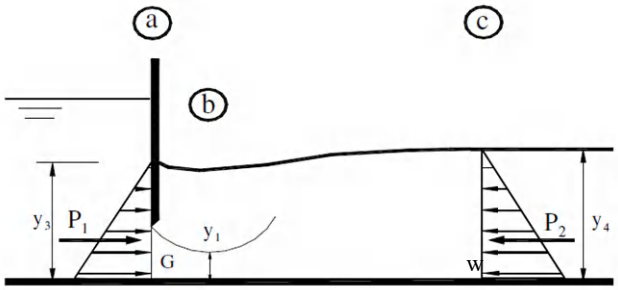
$$\frac{y_3}{y_1} = f_1(\mathrm{Re}_1 = \frac{\rho.V_1.y_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g.y_1}}, S = \frac{y_4 - y_2}{y_2}) \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

$$\frac{L_j}{y_2} = f_2(\mathrm{Re}_1 = \frac{\rho V_1 . y_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g.y_1}}, S = \frac{y_4 - y_2}{y_2})$$ (رابطه ۱۱)

در رابطه (۱۱) جهت مشابه‌سازی با رابطه (۳)، از نسبت طول پرش هیدرولیکی مستغرق به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی آزاد استفاده شده است. همچنین در اعداد رینولدز بسیار زیاد می‌توان از تأثیر لزجت و درنتیجه عدد رینولدز صرف‌نظر کرد. بنابراین روابط بالا به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{y_3}{y_1} = f_3(Fr_1, S)$$ (رابطه ۱۲)

$$\frac{L_j}{y_2} = f_4(Fr_1, S)$$ (رابطه ۱۳)



شکل ۲- پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین‌دست دریچه‌های کشویی و پارامترهای آن (Abdel-Aal (2004))

جهت محاسبه افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق، همانند روش ارائه‌شده توسط Abdel-Aal (2004)، با توجه به شکل (۲) و برقراری معادله انرژی در حجم کنترل b-c، میزان انرژی مخصوص ابتدا (E_b) و انتهای پرش (E_c) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_b = y_3 + \frac{v_1^2}{2g}$$ (رابطه ۱۴)

$$E_c = y_4 + \frac{v_4^2}{2g}$$ (رابطه ۱۵)

$$\frac{E_L}{E_b} = \frac{E_b - E_c}{E_b}$$ (رابطه ۱۶)

با استفاده از نظریه باکینگهام (π)، رابطه زیر برای تعیین افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{E_L}{E_b} = f_5(Fr_1, S)$$ (رابطه ۱۷)

نتایج آزمایشگاهی

تغییرات نیمرخ سطح آب پرش هیدرولیکی مستغرق در نسبت استغراق‌های مختلف

شکل (۳) شامل مجموعه نمودارهایی است که در هرکدام از آن‌ها، تغییرات نیمرخ سطح آب به ازای یک عدد فرود ثابت و نسبت استغراق‌های مختلف نشان داده شده است. گفتنی است در این تحقیق مقدار عمق پایاب، با توجه به محدودیت ارتفاع فلوم آزمایشگاهی (۴۵ سانتی‌متر)، تا زمانی که عمق استغراق روی دریچه با عمق پایاب به تقریب برابر شود، افزایش داده شده است. تمامی نیمرخ‌های سطح آب از محل دریچه (نقطه صفر در محور x) تا محل انتهای غلتاب (طول پرش هیدرولیکی) رسم شده‌اند.

همان‌طور که در نمودارهای شکل (۳) مشاهده می‌شود، در هر عدد فرود، با افزایش نسبت استغراق، طول پرش هیدرولیکی مستغرق افزایش یافته است. همچنین مشخص می‌شود که پرش هیدرولیکی مستغرق برخلاف پرش هیدرولیکی آزاد، دارای نیمرخ سطح آب مشابه نمی‌باشد، بلکه با تغییر نسبت استغراق، فرم کلی نیمرخ سطح آب تغییر می‌کند. برای بررسی بیشتر این موضوع در شکل (۴) با توجه به اطلاعات موجود، نیمرخ سطح آب در دو نسبت استغراق ثابت و در اعداد فرود مختلف رسم شده است.

با توجه به شکل (۴) مشخص می‌شود که نیمرخ سطح آب پرش هیدرولیکی مستغرق در نسبت استغراق ثابت، به ازای اعداد فرود مختلف مشابه است. در شکل (۴) همچنین نشان داده شده است که به ازای یک نسبت استغراق ثابت، با افزایش عدد فرود، طول پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد.

تعیین عمق استغراق روی دریچه در پرش هیدرولیکی مستغرق

یکی از مشخصات مهم پرش هیدرولیکی مستغرق، عمق استغراق روی دریچه (y_3) است که برای محاسبه انرژی اولیه پرش هیدرولیکی مستغرق مورد نیاز می‌باشد. بر اساس رابطه (۱۲)، در شکل (۵) مقادیر عمق استغراق نسبی y_3/y_1 در مقابل نسبت استغراق S و به ازای اعداد فرود مختلف نشان داده شده است.

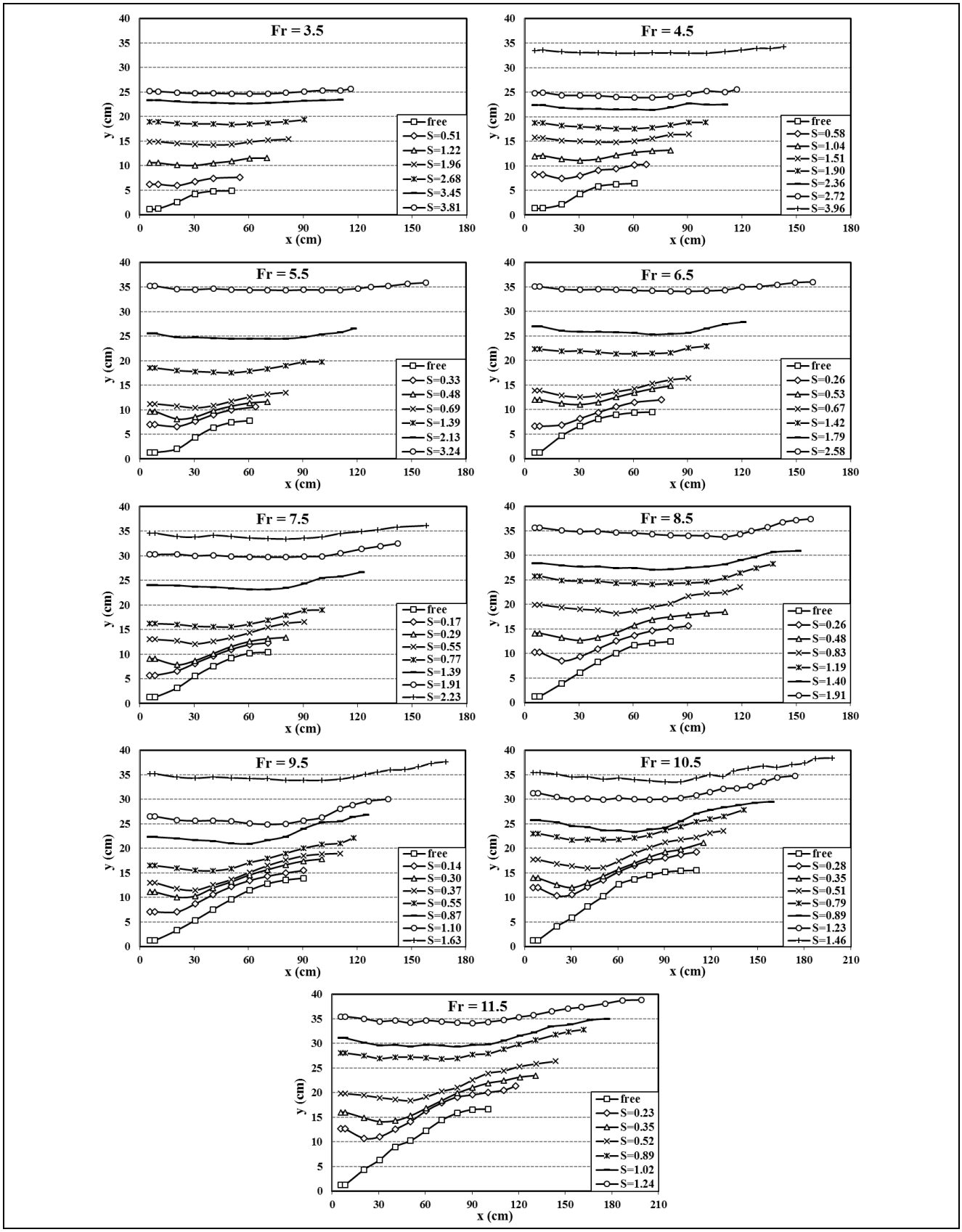
همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت استغراق (افزایش عمق پایاب)، عمق استغراق روی دریچه نیز افزایش یافته است. این افزایش تابعی از عدد فرود است، به‌طوری که با افزایش عدد فرود، شیب افزایش عمق استغراق با افزایش نسبت استغراق، بیشتر خواهد شد. همچنین در یک نسبت استغراق معین، با افزایش عدد فرود، عمق استغراق روی دریچه افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، با استفاده از تحلیل همبستگی[1] بر روی

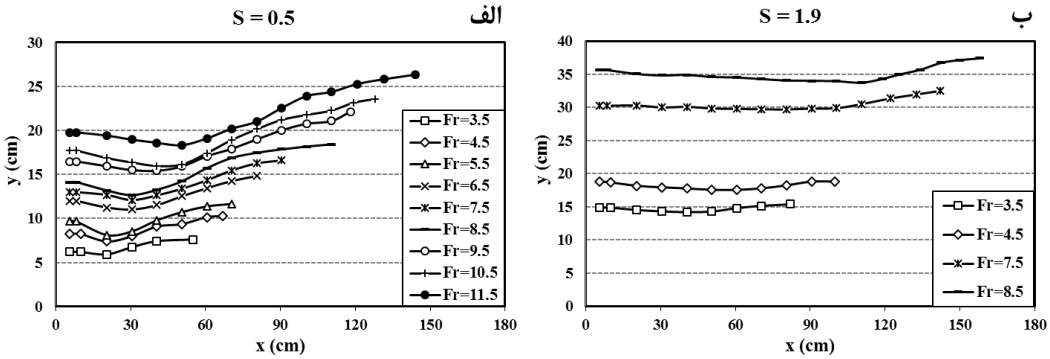
1. Regression Analysis

نتایج آزمایشگاهی، رابطه (۱۸) برای برآورد عمق استغراق نسبی دریچه به شرح زیر توسعه یافته است:

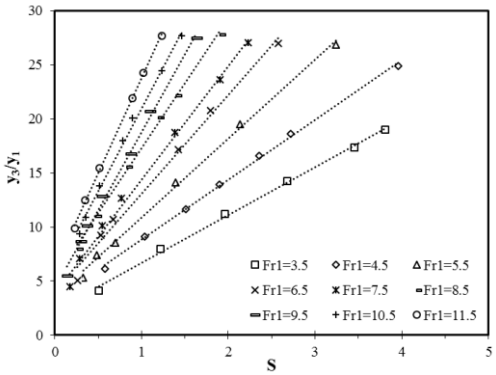
$$\frac{y_3}{y_1} = (0.1 + 0.6Fr_1)(0.3 + 3S^{0.75}) \qquad \text{(رابطه ۱۸)}$$



شکل ۳- تغییرات نیمرخ سطح آب، به ازای اعداد فرود ۳/۵ تا ۱۱/۵ و نسبت استغراق‌های مختلف



شکل ۴- تغییرات نیمرخ سطح آب، به ازای اعداد فرود مختلف و نسبت استغراق الف) ۰/۵ و ب) ۱/۹



شکل ۵- عمق استغراق نسبی دریچه در مقابل نسبت استغراق و به ازای اعداد فرود مختلف

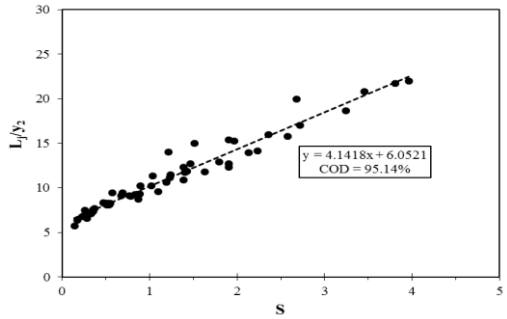
این رابطه با توجه به دامنه نتایج آزمایشگاهی موجود، در محدوده وسیعی از اعداد فرود و نسبت‌های استغراق معتبر است. جهت مقایسه روابط ارائه‌شده برای محاسبه عمق استغراق روی دریچه و بررسی میزان صحت و دقت آن‌ها نسبت به مقادیر آزمایشگاهی، جدول (۲) به‌صورت زیر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه (۱۸) ضمن سادگی نسبت به دو رابطه دیگر، دارای دقت بالاتر در محاسبه مقدار عمق استغراق روی دریچه می‌باشد.

جدول ۲- نتایج مربوط به صحت سنجی مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه عمق استغراق نسبی دریچه

رابطه	COD (٪)	$RMSE_N$ (٪)
۱۸	۹۹/۵۵	۲/۲۳
۱	۹۹/۵۹	۱۰/۲۶
۵	۹۷/۱۵	۵/۴۰

تعیین طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

یکی دیگر از مشخصات مهم پرش هیدرولیکی مستغرق، طول پرش است که نقش مهمی در طراحی اقتصادی حوضچه‌های آرامش و همچنین طول حفاظت پایین‌دست سازه دارد. در این تحقیق، برای اندازه‌گیری طول پرش از معیار Long *et al.* (1990) استفاده شده است، به‌طوری که فاصله‌ی بین دریچه تا انتهای ناحیه توسعه‌یافته (انتهای جریان‌های برگشتی) به‌عنوان طول پرش در نظر گرفته شده است. در شکل (۶) تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق ($\frac{L_j}{y_2}$) در مقابل نسبت استغراق (S) نشان داده شده است. مطابق رابطه (۱۳)، پس از رسم مقادیر طول نسبی پرش مستغرق در مقابل نسبت استغراق به ازای اعداد فرود مختلف، مشخص گردید که طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق حساسیت زیادی به تغییر عدد فرود نداشته و در اعداد فرود مختلف روندی ثابت و مشخص بین طول نسبی و نسبت استغراق برقرار است. چنانچه قبلاً در شکل (۳) نشان داده شد، در یک نسبت استغراق ثابت، با افزایش عدد فرود، طول پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. علت اینکه در شکل (۶) به ازای اعداد فرود مختلف تغییر روندی مشاهده نشده است، مربوط به پارامتر y_2 در نسبت $\frac{L_j}{y_2}$ می‌باشد. چراکه عدد فرود در محاسبه این پارامتر لحاظ شده است.



شکل ۶- طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق در مقابل نسبت استغراق

نکته جالب توجهی که در شکل (۶) مشهود است، افزایش قابل‌توجه طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق با افزایش نسبت استغراق است. به‌طوری که به‌عنوان مثال، در عدد فرود بیشینه Fr_1 = ۱۱/۵ به ازای افزایش نسبت استغراق از ۰/۲ تا ۱/۲۳ (بیشینه استغراق ممکن)، طول پرش هیدرولیکی مستغرق به‌اندازه ۶۸ درصد افزایش یافته است. این نکته باید همواره موردتوجه طراحان در طراحی حوضچه‌های آرامش پایین‌دست

سرریزها و سدها قرار گیرد.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، رابطه زیر برای برآورد طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق با توجه به مقادیر آزمایشگاهی حاصل می‌شود:

$$\frac{L_j}{y_2} = 4.14S + 6.05 \qquad \text{(رابطه ۱۹)}$$

گفتنی است شکل کلی و ضرایب این رابطه بسیار شبیه به رابطه (۳) توسعه‌یافته توسط Govinda Rao and Rajaratnam (1963) و کاملاً برابر با رابطه ارائه‌شده توسط Wu and Rajaratnam (1995) است. در جدول (۳) نتایج حاصل از بررسی صحت و دقت مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه طول پرش بر اساس داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رابطه (۱۹) بهترین برآورد را برای داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین اختلاف کم بین ضرایب رابطه (۳) با رابطه (۱۹) سبب افزایش قابل‌ملاحظه خطا شده است.

جدول ۳- نتایج مربوط به صحت سنجی مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه طول نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

رابطه	COD (٪)	$RMSE_N$ (٪)
۱۹	۹۴/۹۲	۵/۴۵
۳	۹۵/۰۵	۹/۲۶
۴	۹۴/۷۸	۵/۶۹

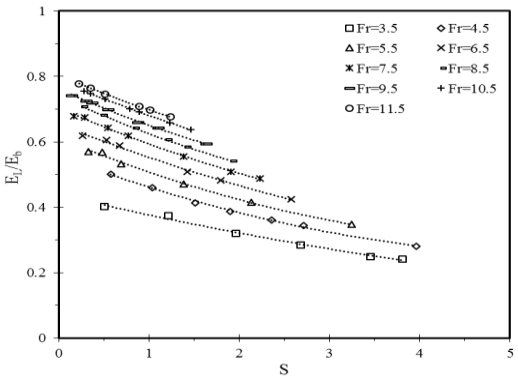
تعیین افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

یکی دیگر از مهم‌ترین مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق، میزان افت انرژی نسبی در اثر پرش هیدرولیکی می‌باشد. در شکل (۷) مطابق رابطه (۱۷)، تغییرات افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق در مقابل نسبت استغراق به ازای اعداد فرود مختلف رسم شده است. همان‌طور مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود، افت انرژی جریان افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش نسبت استغراق، افت انرژی کاهش می‌یابد، اما شیب کاهش افت انرژی با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود.

در اینجا نیز با استفاده از تحلیل همبستگی، رابطه زیر برای برآورد افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق توسعه یافته است:

$$\frac{E_L}{E_b} = 2.62 - 2.65\frac{S^{0.04}}{Fr^{0.13}} \qquad \text{(رابطه ۲۰)}$$

این رابطه در محدوده وسیعی از اعداد فرود و نسبت‌های استغراق معتبر است. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی صحت و دقت مدل‌های ارائه‌شده برای محاسبه افت انرژی نسبی پرش بر اساس داده‌های آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رابطه (۲۰) ارائه‌شده در این تحقیق، ضمن سادگی دارای کمترین خطا بوده ولی میزان همبستگی آن نسبت به دو رابطه دیگر کمتر می‌باشد. در مقابل رابطه (۲) ارائه‌شده توسط Govinda Rao and Rajaratnam (1963) دارای بیشترین همبستگی و بیشترین خطا می‌باشد. رابطه (۶) که دارای شرایط بهتری نسبت به دو رابطه دیگر است، به‌تنهایی قابل‌استفاده نبوده و لازم است ابتدا با استفاده از رابطه (۵) عمق استغراق نسبی دریچه محاسبه و سپس میزان افت انرژی نسبی پرش محاسبه شود.



شکل ۷- افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق در مقابل نسبت استغراق

جدول ۴- نتایج مربوط به صحت سنجی مدل‌های ارائه شده برای محاسبه افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق

رابطه	COD (٪)	$RMSE_N$ (٪)
۲۰	۹۸/۸۱	۳/۲۷
۲	۹۹/۸۰	۱۲/۵۱
۶	۹۹/۷۲	۴/۰۳

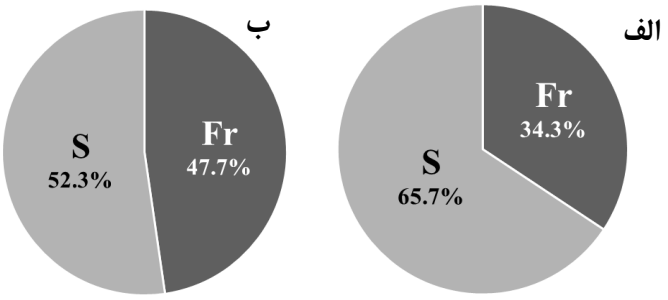
تحلیل حساسیت

منظور از اجرای تحلیل حساسیت، بررسی تأثیر متغیرهای مستقل و تغییرات آن‌ها بر میزان متغیر وابسته است. محققین مختلفی از جمله Ranjan *et al.* (1996)، Sivakumar Babu *et al.* (2008)، Khatibi *et al.* (2014) و Soltani *et al.* (2014) با ارائه روش‌های مختلف بر پایه آزمون‌های آماری و یا روش‌های تحلیلی به اجرای تحلیل حساسیت پرداختند. در این تحقیق جهت اجرای تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های ارائه‌شده از رابطه (۲۱) توسط Ghassemi *et al.* (2015) به شرح زیر استفاده گردید:

$$S_{x_i}(\%) = \frac{\overline{\left|\frac{\partial W}{\partial X_i}\right|}\frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_W}}{\sum_{i=1}^{N}\left(\overline{\left|\frac{\partial W}{\partial X_i}\right|}\frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_W}\right)} \times 100 \;;\; i = 1, 2, 3, ..., N \qquad \text{(رابطه ۲۱)}$$

که در آن S_{X_i}: میزان حساسیت متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل X_i (٪)، W: متغیر وابسته و یا معادله رگرسیونی موردبررسی، $\overline{\left|\frac{\partial W}{\partial X_i}\right|}$: میانگین قدر مطلق مشتق جزئی متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل X_i به ازای تمامی داده‌های شرکت داده‌شده در مدل‌سازی، $\frac{\sigma_{Xi}}{\sigma_W}$: نسبت انحراف معیار متغیر مستقل X_i به انحراف معیار متغیر وابسته و N: تعداد متغیرهای مستقل برای مدل‌سازی می‌باشد.

میزان حساسیت متغیرهای مستقل برای دو رابطه (۱۸) و (۲۰) مطابق با رابطه (۲۱) در نمودارهای دایره‌ای شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) مشخص می‌شود که تأثیر تغییر نسبت استغراق هم در تغییر عمق استغراق نسبی و هم در تغییر افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی مستغرق، بیشتر از تأثیر تغییر عدد فرود می‌باشد.



شکل ۸- میزان حساسیت متغیرهای مستقل در تعیین (الف) عمق استغراق نسبی (رابطه (۱۸)) و (ب) افت انرژی نسبی (رابطه (۲۰)) پرش هیدرولیکی مستغرق

در رابطه (۲۱) عامل $\overline{\frac{\partial W}{\partial Xi}}$ بیانگر آهنگ متوسط تغییرات متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل است، لذا منفی بودن این عامل برای یک متغیر مستقل به معنای وجود روند نزولی بین متغیر وابسته و متغیر مستقل مورد بررسی است، به‌طوری که کاهش متغیر مستقل سبب افزایش متغیر وابسته می‌گردد. در تحقیق حاضر عامل $\overline{\frac{\partial W}{\partial Xi}}$ در تعیین عدد عمق استغراق نسبی برای هر دو متغیر مستقل عدد فرود و نسبت استغراق، مثبت به دست آمد. همچنین این عامل در تعیین افت انرژی نسبی، برای عدد فرود مثبت و برای نسبت استغراق منفی به دست آمد. جدا از مثبت یا منفی بودن این عامل، آهنگ این تغییرات برای هر متغیر مستقل، بسته به میزان حساسیت متغیر وابسته، با یکدیگر متفاوت است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی برای توسعه روابطی جدید و با دقت مناسب برای برآورد مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق انجام شد. با بررسی جامع مطالعات پیشین و انجام تحلیل ابعادی، پارامترهای بدون‌بعد مؤثر بر پرش هیدرولیکی مستغرق شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آن‌ها طرح‌ریزی شد. نتایج این تحقیق به‌صورت خلاصه نشان داد که:

فرم کلی نیمرخ سطح آب در پرش هیدرولیکی مستغرق ثابت نبوده و با تغییر نسبت استغراق، تغییر می‌کند. اما در یک نسبت استغراق ثابت، فرم کلی نیمرخ سطح آب ثابت بوده و با تغییر عدد فرود تغییری نمی‌کند.

با افزایش نسبت استغراق (افزایش عمق پایاب) عمق استغراق روی دریچه افزایش می‌یابد. این افزایش تابعی از عدد فرود است به‌طوری که با افزایش عدد فرود، شیب افزایش عمق استغراق با افزایش نسبت استغراق بیشتر خواهد شد. همچنین در یک نسبت استغراق معین، با افزایش عدد فرود، عمق استغراق روی دریچه افزایش می‌یابد.

نتایج نشان داد که طول پرش مستغرق حساسیت زیادی به تغییر عدد فرود ندارد و در اعداد فرود مختلف روند مشخصی بین طول نسبی پرش و نسبت استغراق برقرار است. همچنین طول نسبی پرش مستغرق با افزایش نسبت استغراق به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این نکته باید همراه موردتوجه طراحان حوضچه‌های آرامش پایین‌دست سرریزها و سدها قرار گیرد.

با افزایش عدد فرود افت انرژی جریان افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش نسبت استغراق افت انرژی کاهش می‌یابد اما شیب کاهش افت انرژی با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود.

افزون بر این، نتایج نشان داد 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.

در این تحقیق روابطی برای برآورد مشخصات پرش مستغرق شامل عمق استغراق روی دریچه، طول و افت انرژی نسبی پرش مستغرق توسعه‌یافته که با روابط ارائه‌شده توسط محققین پیشین مقایسه شده است و از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. همچنین آنالیز حساسیت بر روی این روابط، میزان تأثیر متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته را نشان داد.

REFERENCES

Abdel-Aal, G. M. (2004). Modeling of rectangular submerged hydraulic jumps. *Alexandria Engineering Journal*, *43*(6), 865-873.

Bradley, J. N., & Peterka, A. J. (1957). The hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (basin i). *Journal of the Hydraulics Division*, *83*(5), 1-24.

Castro-Orgaz, O., Mateos, L., & 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.

Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Plane turbulent wall jets in shallow tailwater. *Journal of engineering mechanics*, *128*(2), 143-155.

Ghassemi, A., Soltani, A. and Raeesi Estabragh, A. (2015). Laboratory modeling of the free swelling and swelling pressure curves for high plasticity clays stabilized with chemical additives. *In Proceeding of 10th International Congress on Civil Engineering, Tabriz, Iran*

Hager, W. H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, *28*(5), 591-608.

Khatibi, M., Estabragh, A. R., Soltani, A. & Rafatjoo, H. (2014). Assessment of swelling behavior of randomly reinforced expansive soils using regression analysis. *In Proceeding of 8th National conference on Civil Engineering, Babol, Iran.* (In Farsi)

Kindsvater, C. E. (1944). The hydraulic jump in sloping channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *109*(1), 1107-1120.

Long, D., Steffler, P.M. and Rajaratnam, N. (1990). "LDA study of flow structure in submerged Hydraulic jumps". J. of Hydraulic Res, 28(4), pp 437-460.

Madsen, P. A., & Svendsen, I. A. (1983). Turbulent bores and hydraulic jumps. *Journal of Fluid Mechanics*, *129*, 1-25.

Mahmoodian Shooshtari, M. (2009) *Principles of flow in open channels, Volume 1* (2th ed.). Shahid Chamran University Press. (In Farsi)

Nasrabadi, M., Omid, M.H. & 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)

Rajaratnam, N. (1967). Hydraulic jumps. *Advances in hydroscience*, *4*, 197-280.

Rajaratnam, N. (1968). "Hydraulic jump on rough bed". Trans. Eng. Inst. Canada, 11, pp 1-8.

Rajaratnam, N., & Subramanya, K. (1967a). Flow equation for the sluice gate.*Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *93*(3), 167-186.

Rajaratnam, N., & Subramanya, K. (1967b). Flow immediately below submerged sluice gate. *Journal of the Hydraulics Division*, *93*(4), 57-77.

Ranjan, G., Vasan, R. M., & Charan, H. D. (1996). "Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil". Journal of Geotechnical Engineering, 122(6), 419-426.

Sivakumar Babu, G. L., & Vasudevan, A. K. (2008). "Seepage velocity and piping resistance of coir fiber mixed soils". Journal of irrigation and drainage engineering, 134(4), 485-492.

Soltani, A., Estabragh, A. R. & Khatibi, M. (2014). Regression-aided analysis of improving piping resistance using randomly distributed fibers. *In Proceeding of 8th National conference on Civil Engineering, Babol, Iran*. (In Farsi)

Woodward, S. M., & Beebe, J. C. (1917). *Theory of the Hydraulic Jump and Backwater Curves*. State of Ohio, Miami Conservancy District.

Wu, S., & Rajaratnam, N. (1995). Free jumps, submerged jumps and wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, *33*(2), 197-212.