

## بررسی آزمایشگاهی اثر محل و دبی جریان جت آزاد مستطیلی بر پارامترهای پرش هیدرولیکی کلاسیک

مهدی دستورانی<sup>۱\*</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲</sup>، علی دیندالو<sup>۳</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۷

### چکیده

تشکیل پرش در حوضچه‌های آرامش نقش موثری در استهلاک انرژی جریان در پایاب سازه‌های آبی ایفا می‌کند. وارد نمودن جت بر پرش هیدرولیکی عامل موثری در کنترل پرش آبی، کاهش طول و عمق ثانویه پرش و افزایش افت انرژی به‌شمار می‌رود. در این مطالعه اثر موقعیت برخورد جت مستطیلی سریع را بر چهار منطقه، انتهای پرش، بین پرش، ابتدای پرش و قبل از پرش (ناحیه جریان فوق بحرانی) در زاویه حداکثر جابجایی پرش به سمت بالادست شامل سه دبی، ۳/۲، ۲/۵ و ۲ لیتر بر ثانیه در اعداد فرود ۶/۴، ۷/۸ و ۹/۶ بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تاثیر هریک از موارد مذکور بر خصوصیات پرش ارزیابی گردید. نتایج نشان داد با برخورد جت به منطقه یک (انتهای پرش هیدرولیکی) بیش‌ترین جابجایی نسبی به سمت بالادست اتفاق افتاد که با افزایش دبی جت جابجایی افزایش یافت. عمق ثانویه و طول پرش در شرایط برخورد جت نسبت به حالت بدون جت، حداکثر به ترتیب میزان ۳۹/۷ و ۵۵ درصد کاهش و افت انرژی حداکثر به میزان ۱۸ درصد افزایش یافت. تنش برشی کف نیز در حالت برخورد جت به پرش هیدرولیکی حداکثر ۱۳ و حداقل ۴/۲ برابر حالتی است که جت وجود ندارد. بنابراین وارد کردن جت با زاویه حداکثر به انتهایی پرش، بیش‌ترین اثر را بر طول پرش و در نتیجه کوتاه شدن طول حوضچه آرامش داشت.

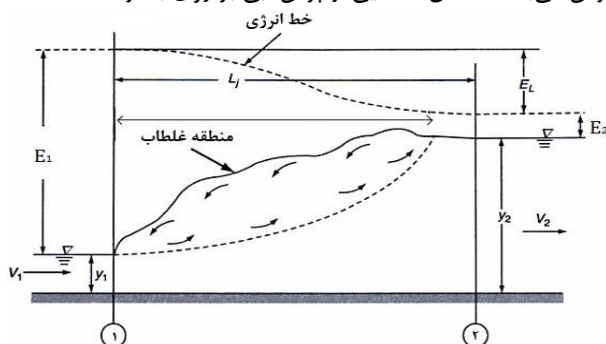
**واژه‌های کلیدی:** پرش هیدرولیکی، جریان غیریکنواخت سریع، موقعیت تداخل جریان، موقعیت جت آزاد

### مقدمه

کلاسیک در ناحیه زیربحرانی ( $y_2^*$ ) فرمول ۱ را ارائه کرد (Belanger, 1828).

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (1)$$

که  $Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}$  عدد فرود در مقطع جریان فوق بحرانی،  $v_1$  و  $y_1$  به ترتیب سرعت و عمق متوسط جریان فوق بحرانی در بالادست پرش می‌باشند. شکل ۱ نمایی از پرش آبی بر روی بستر صاف است.



شکل ۱- پرش آبی بر روی بستر صاف. نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰)

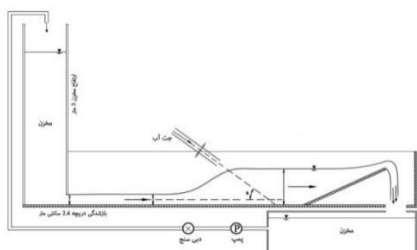
پرش آبی از جریان‌های متغیر سریع است که انرژی زیاد آب در جریان‌های فوق بحرانی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در پرش آبی جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر حالت می‌دهد. به تناسب شدت پرش و آشفتگی‌هایی که در سطح آب وجود دارد، انرژی آب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. حوضچه‌های آرامش بستر مناسبی برای کنترل و مهار پرش آبی و وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص می‌باشند. آن‌ها ممکن است دارای شکل هندسی متفاوت و یا حاوی ضمایم اضافی نظیر بلوک‌های کف و آستانه‌ها باشند که به عملکرد موثرشان کمک می‌کند. پرش آبی کلاسیک، پرشی است که در یک کانال مستطیلی و عریض افقی با کف صاف تشکیل می‌گردد. بلانگر (۱۸۲۸) برای عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند  
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
۳- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه خلیج فارس  
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند  
\* - نویسنده مسئول: (Email: mdastourani@birjand.ac.ir)

کاشفی پور (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی اثر تخلیه تحتانی سد انحرافی روی مشخصات پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تلاقی جت‌های آب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق بیش‌ترین تاثیر را در کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارد و هنگامی که ۲۶ درصد دبی از شکاف عبور می‌کند، طول پرش نسبت به حالت کلاسیک در حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. نیسی و همکاران (۱۳۹۳) مطالعات خود را بر تاثیر زبری‌های بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با نسبت بازشدگی ۵۰ درصد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی زبر، باعث ایجاد پرش نامتقارن قوی‌تر نسبت به پرش واگرایی صاف شده، عمق مزدوج را به‌طور متوسط به میزان ۳۱/۶ درصد کاهش و راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به‌طور متوسط به میزان ۱۹ درصد افزایش می‌دهد. پارسامهر و همکاران (۱۳۹۲) تحقیق خود را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل و آبپایه‌ی مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی انجام دادند. نتایج نشان داد طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد بر روی آبپایه به‌طور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر به‌طور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. جم و همکاران (۱۳۹۳) مطالعات خود را در حوضچه زبر شده به وسیله اجزای زبری (بلوک‌های دنداندار) با شکل هندسی و آرایش چیدمان جدید و در نهایت بررسی تاثیر پارامترهای مختلف پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۱۱-۱۴، روی آن انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی کاهش پارامترهای پرش هیدرولیکی را روی حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به بستر صاف نشان دادند، به طوری که طول پرش و عمق ثانویه پرش به ترتیب ۵۰-۶۰ درصد و ۱۰-۱۲ درصد کاهش داشت. ولی‌نیا و همکاران (۱۳۹۳) بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از دریچه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد طول پرش هیدرولیکی با فاصله بلوک از دریچه رابطه مستقیم دارد و با افزایش فاصله بلوک از دریچه افزایش می‌یابد و با افزایش عمق پایاب نسبی استهلاک انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد. احمدی و هنر (۱۳۹۳) در مطالعه خود اثر آبپایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی پرش در یک حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که آبپایه انتهایی با مقطع عریض‌تر (مربعی و سپس پلکانی) اثر بیش‌تری در کاهش اعماق مزدوج پرش و افزایش افت انرژی نسبت به آبپایه انتهایی کم عرض خواهد داشت. حال اگر پرش بعد از اعمال جت به صورت مستغرق رخ دهد، که در عمل غالباً وقتی پرش در ابتدایی دریچه تشکیل گردد اتفاق می‌افتد. پرش هیدرولیکی مستغرق با

تحقیقات اولیه توسط راجارتنام (۱۹۶۸) نشان داد که اگر بستر کانالی که پرش بر روی آن شکل می‌گیرد زبر باشد، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش می‌تواند به‌طور مشخصی کوچک‌تر از عمق مزدوج مشابه خود در بستر صاف باشد. وی پارامتری به نام زبری نسبی ( $k = K_e/y_1$ ) تعریف کرد که در آن  $K_e$  ارتفاع معادل زبری و  $y_1$  عمق جریان ورودی فوق بحرانی بر روی زبری‌ها است. وی نشان داد که طول غلتاب و طول پرش روی بستر زبر در مقایسه با همان پارامترها بر روی بستر صاف کاهش قابل توجهی دارند (Rajaratnam, 1968).

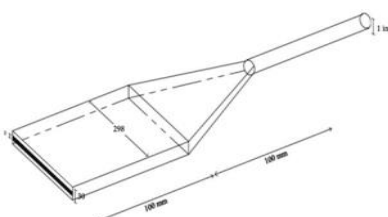
اید و راجارتنام (۲۰۰۲) مطالعه آزمایشگاهی بر روی پرش آبی روی بستر موج‌دار در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که عمق پایاب مورد نیاز برای پرش آبی روی بستر زبر کمتر از عمق مشابه آن در پرش بر روی بستر صاف است. عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ( $y_2^*$ ) در مقایسه با عمق ثانویه پرش کلاسیک ( $y_2^*$ ) پارامتر بی‌بعد  $D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*}$  تعریف نمودند، در بازه مورد بررسی،  $D$  تقریباً برابر با ۰/۲۵ بدست آمده است. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که طول پرش در بستر زبر تقریباً نصف طول متناظر آن در بستر صاف است. آن‌ها دلیل کاهش طول پرش را افزایش تنش برشی بستر بر اثر برهم‌کنش جریان فوق بحرانی با زبری‌های بستر توضیح دادند (Ead and Rajaratnam, 2002). گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، عباسپور و حسین‌زاده‌دلیر (۱۳۸۸)، شفاعی‌بجستان و نیسی (۲۰۰۹) و نژندعلی و همکاران (۱۳۹۰) در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بسترهای زبر مطالعاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی تاثیر دارد و باعث کاهش عمق مزدوج و طول پرش می‌گردد. یوکسل و همکاران (۲۰۰۴) شباهت بین پیشانی یک موج شکسته و پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند. موج مستغرق به وسیله یک پرش هیدرولیکی، تحت تماس جت آبی با یک زاویه مشخص به پنجه آن، شبیه‌سازی گردید. مطالعات عددی و آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات جریان و اتلاف انرژی انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که جت آبی می‌تواند باعث افزایش اتلاف انرژی در موج مستغرق شود (YükSEL et al., 2004). وارول و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعات آزمایشگاهی خود، تاثیر استفاده از جت آب را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی یک فلوم با مقطع مستطیلی و طول پنج متر انجام شد و در آن، پنج دبی برای جت آبی فرض گردید که با زاویه ثابت ۶۰ درجه، به پرش هیدرولیکی اعمال می‌شد. آن‌ها نیز مشاهده نمودند که وارد نمودن جت آبی به پرش هیدرولیکی باعث می‌شود که اتلاف انرژی افزایش یابد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش دبی جت آبی، مقدار اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد (Varol et al., 2009). توزنده جانی و



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق

جهت اندازه‌گیری جریان از سیستم دبی‌سنج الکترونیک با دقت  $0.001$  مترمکعب بر ساعت نصب شده بر روی لوله ورودی جریان به کانال استفاده شد. جهت تنظیم دبی نیز از یک شیر که در ابتدای لوله انتقال آب به فلوم تعبیه شده بود استفاده گردید. برای اندازه‌گیری عمق جریان از دو روش مستقیم و غیرمستقیم و با نصب پیژومترهایی در کف کانال و جهت قرائت ارتفاع پیژومترها از دوربین عکاسی با قدرت وضوح بالا و برای رقومی کردن عکس‌ها از نرم‌افزار گرافر استفاده شد و به صورت مستقیم ارتفاع پیژومترها و طول پرش توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه‌گیری شد. جهت ایجاد جریان فوق بحرانی از دریچه ایجاد شده در مخزن ابتدای کانال استفاده گردید و با توجه به مشخصات هندسی لبه ورودی دریچه، ضریب دریچه تعیین شد در تمام مراحل آزمایش شیب بستر کانال به صورت افقی نگه داشته شد.

جت آبی از طریق نازلی با مقطع مستطیلی که تصویر شماتیک آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود تولید گردید. از پمپی قوی که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را داشت جهت این که ضخامت جریان در تمام سطح خروجی یکسان باشد مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم زاویه برخورد توسط سیستم مکانیکی ساخته شد که موقعیت قرارگیری نازل را بر روی یک اشل (نقاله) که با دقت یک درجه نشان می‌دهد انجام گرفت و حرکت جت روی قاب مستطیلی ساخته شده روی کانال استفاده شد. (شکل ۴).



شکل ۳- وسیله ساخته شده جهت ایجاد جت آبی و ابعاد آن

استفاده از عدد فرود و ضریب استغراق  $S = \frac{y_1 - y_2}{y_2}$  (عمق  $y_1$  ثانویه پرش هیدرولیکی،  $y_2$  عمق آب پایین دست) توصیف می‌شود. بدیهی است که در پرش محل دریچه یعنی در پرش هیدرولیکی آزاد ضریب استغراق برابر صفر می‌باشد و هنگامی که ضریب استغراق بیش‌تر از صفر شود پرش هیدرولیکی مستغرق با درجات مختلف استغراق شکل می‌گیرد. در تحقیق حاضر به دلیل طول کافی در بالادست پرش هیدرولیکی جهت انتقال آن، پرش مستغرق نگردید. دستورانی و همکاران (۱۳۹۵) با اعمال جت به انتهای پرش، اثر زاویه جت بر مشخصات پرش هیدرولیک را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که جت در یک زاویه هیچ گونه اثری ندارد که این زاویه را زاویه بی‌اثر نام‌گذاری کردند و در یک زاویه هم بیش‌ترین اثر را دارد که این زاویه را زاویه حداکثر نام‌گذاری کردند و اگر جت با زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر اعمال گردد باعث افزایش و با زاویه بیش‌تر از زاویه بی‌اثر، باعث کاهش نسبت اعماق، طول پرش می‌گردد. با توجه به مطالعات ذکر شده، در این تحقیق اثر محل برخورد جت در چهار ناحیه انتهایی پرش، بین پرش، ابتدای پرش و قبل پرش در زاویه حداکثر جت مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین هدف از تحقیق حاضر بررسی محل اثر جت روی مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی به‌طور آزمایشگاهی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### بررسی آزمایشگاهی

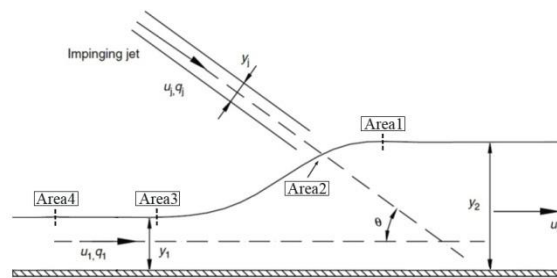
آزمایش‌های مورد نظر در یک کانال با جداره‌های تمام شیشه‌ای به عرض  $30$  سانتی‌متر، طول  $12$  متر و ارتفاع  $50$  سانتی‌متر انجام گرفت. برای ایجاد جریان فوق بحرانی با عدد فرود بالا، مخزنی به عرض  $30$  سانتی‌متر، طول  $50$  سانتی‌متر و ارتفاع  $3$  متر از ورق آهن گالوانیزه ساخته و در قسمت ابتدایی کانال نصب گردید. جهت تنظیم عمق پایاب و همچنین تثبیت موقعیت پرش، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده گردید. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ ارایه شده است.



شکل ۴- نمایی از نحوه اندازه‌گیری زاویه و جابجایی جت

پرش را همراه داشت به چهار منطقه، انتهای پرش هیدرولیکی (Area1)، بین پرش (Area2)، ابتدایی پرش (Area3) و قبل پرش (Area4) وارد گردید و میزان جابجایی پرش توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود ۶ تا ۹/۵ انجام شد (شکل ۵).

بازشدگی دریچه ورودی جریان از مخزن به کانال به میزان ۲/۴ سانتی‌متر به‌طور ثابت تنظیم و سه دبی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه جاری گردید. پس از تثبیت پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، عدد فرود جریان فوق بحرانی مشخص و پارامترهای هیدرولیکی پرش برداشت گردید. سپس جت آزاد با دبی‌های ۲، ۲/۵ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه با زاویه انتخابی نسبت به افق که حداکثر، اثر جابجایی ابتدایی



شکل ۵- شکل ساده از نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی

پرش می‌باشد.  $u_2$  و  $y_2$  به ترتیب سرعت و ضخامت جت است.  $\theta$  زاویه جت نسبت به افق،  $F$  نیروی ناشی از تلاطم ایجاد شده در اثر اعمال جت می‌باشد و  $\rho$  جرم مخصوص آب می‌باشد. بنابراین  $q_1 = y_1 u_1$ ،  $q_2 = y_2 u_2$  و  $q_j = y_j v_j$  می‌باشد. تقسیم معادله‌ی مقدار حرکت به  $\frac{1}{2} \rho g y_1^2$  معادله ۲ به معادله ۴ و معادله ۳ به معادله ۵ تبدیل گردید.

(۴)

$$\frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} 2Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j^2 y_1}{q_1^2 y_j} \cos \theta \right) - 1 + 2Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{gy_1^2 \rho} = 0$$

(۵)

$$\frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} 2Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j}{q_1} + \frac{q_j^2 y_1}{q_1^2 y_j} \cos \theta \right) - 1 + 2Fr_1^2 \left( 1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{gy_1^2 \rho} = 0$$

$Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{g y_1}}$  برابر است با عدد فرود بالادست پرش جریان. برای  $q_j = 0$  معادله ۴ و ۵ به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد

#### معادلات حاکم بر پرش هیدرولیکی در حالت برخورد جت آبی

معادله‌ی تک بعدی مقدار اندازه حرکت برای پرش هیدرولیکی در واحد عرض به همراه جت آبی در انتهای پرش، بین پرش، ابتدایی پرش، و قبل پرش هرکدام به صورت زیر می‌باشد: زمانی که جت به انتهای پرش (Area1) و بین پرش (Area2) برخورد می‌کند معادله‌ی، تک بعدی مقدار اندازه حرکت به صورت معادله ۲ خواهد بود.

$$(q_1 + q_j)u_2 - \rho q_1 u_1 - \rho q_j u_j \cos \theta + F = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2 \quad (۲)$$

زمانی که جت به ابتدایی پرش (Area3) و قبل پرش (Area4) برخورد می‌کند معادله‌ی تک بعدی مقدار اندازه حرکت به صورت معادله ۳ خواهد بود.

(۳)

$$\rho(q_1 + q_j)u_2 - \rho(q_1 + q_j)u_1 - \rho q_j u_j \cos \theta + F = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2$$

که در معادله‌های فوق  $u_1$  و  $y_1$  به ترتیب سرعت و عمق بالادست پرش می‌باشد و  $u_2$  و  $y_2$  نیز به ترتیب سرعت و عمق پایین دست

تحت اعداد فرود متفاوت پرش اثرات متفاوتی را خواهد داشت که در ادامه به طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

### تأثیر جت بر تغییر نسبی موقعیت پرش هیدرولیکی

شکل ۶ اثر محل برخورد جت سریع آبی را بر جابجایی نسبی پرش هیدرولیکی در فرودهای مختلف و در دبی جت یکسان نشان می‌دهد. در این شکل،  $x_c$  فاصله حرکت پنجه پرش هیدرولیکی نسبت به حالت بدون جت بوده، که در جهت جریان مثبت و خلاف جهت جریان منفی می‌باشد.

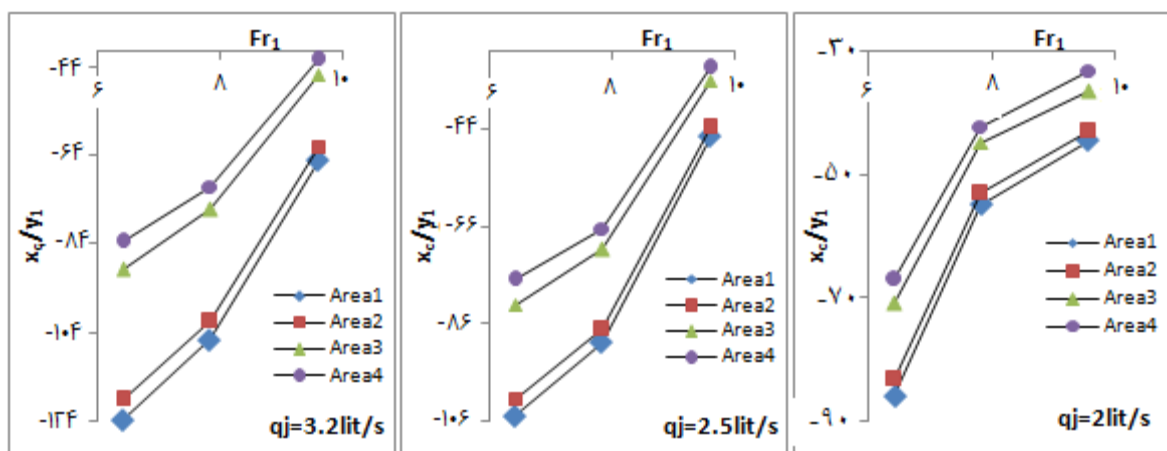
تغییر می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث اتلاف انرژی ( $\Delta E$ ) می‌گردد. این اتلاف انرژی در پرش برابر است با تفاوت انرژی قبل و بعد از پرش که به صورت رابطه ۶ تعریف است.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad (6)$$

$$E_1 = \left( y_1 + \frac{u_1^2}{2g} \right) \quad E_2 = \left( y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \right)$$

### نتایج و بحث

مجموعه آزمایش‌های انجام شده در مورد تأثیر برخورد یک جت سریع با پرش هیدرولیکی نشان داد میزان جریان و محل اثر جت



شکل ۶- تغییرات نسبی پنجه پرش نسبت به عدد فرود

شده‌اند. با استفاده از اصول تحلیل ابعادی نسبت عمق ثانویه به صورت رابطه ۸ ساده شد.

$$f_2(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \cdot \frac{y_j}{y_1} \cdot \theta \cdot \frac{x_j}{y_1} \cdot \frac{u_j}{v_1}) \quad (8)$$

از آنجایی که مقادیر اعداد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بزرگ است می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد و معادله ۸ را به صورت رابطه ۹ ساده کرد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} \cdot \frac{y_j}{y_1} \cdot \theta \cdot \frac{x_j}{y_1} \cdot \frac{u_j}{v_1}) \quad (9)$$

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده بدون جت، نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در شکل ۷ ترسیم گردید. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده رابطه‌ی بلانگر می‌باشد. این شکل بیانگر این واقعیت بود که جت با زاویه حداکثر جابجایی، باعث کاهش نسبت عمق‌های مزدوج هیدرولیکی گردید. بیش‌ترین میزان کاهش نیز زمانی افتاد که جت به منطقه چهار (قبل پرش) وارد شد. چون زمانی که جت به قبل پرش اثر نمود عمق آب را در محل اثر افزایش داد. با توجه به اینکه نقطه کنترل جریان فوق بحرانی پایین‌دست بود و هرگونه تغییر در بالادست جریان، بر روی پایین‌دست جریان تأثیر داشت، از طرفی

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، زمانی که جت به منطقه یک (انتهایی پرش هیدرولیکی) اثر می‌کند، پرش هیدرولیکی بیش‌ترین جابجایی نسبی را به سمت بالادست دارد. با افزایش دبی جت این جابجایی نیز افزایش می‌یابد. هر چه عدد فرود کم‌تر باشد اثر جت افزایش می‌یابد. حداکثر جابجایی نسبی پرش مربوط به حداقل عدد فرود، حداکثر دبی جت و زمانی که جت به منطقه یک اثر می‌نماید به میزان  $123/6$  می‌باشد و حداقل جابجایی نسبی پرش مربوط به حداکثر عدد فرود و حداقل دبی جت و زمانی که جت به منطقه چهار (قبل پرش) اثر می‌نماید به میزان  $33/2$  می‌باشد.

### عمق‌های مزدوج

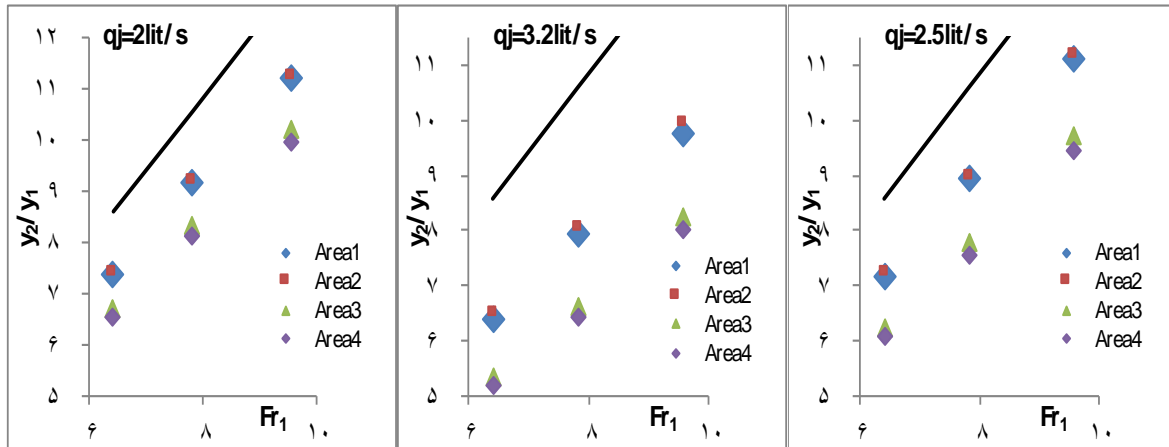
عمق ثانویه پرش هیدرولیکی پس از اعمال جت می‌توان به صورت معادله ۷ تعریف کرد.

$$y_2 = f_1 = (y_1 \cdot V_1 \cdot g \cdot v \cdot \theta \cdot y_j \cdot u_j \cdot x_j) \quad (7)$$

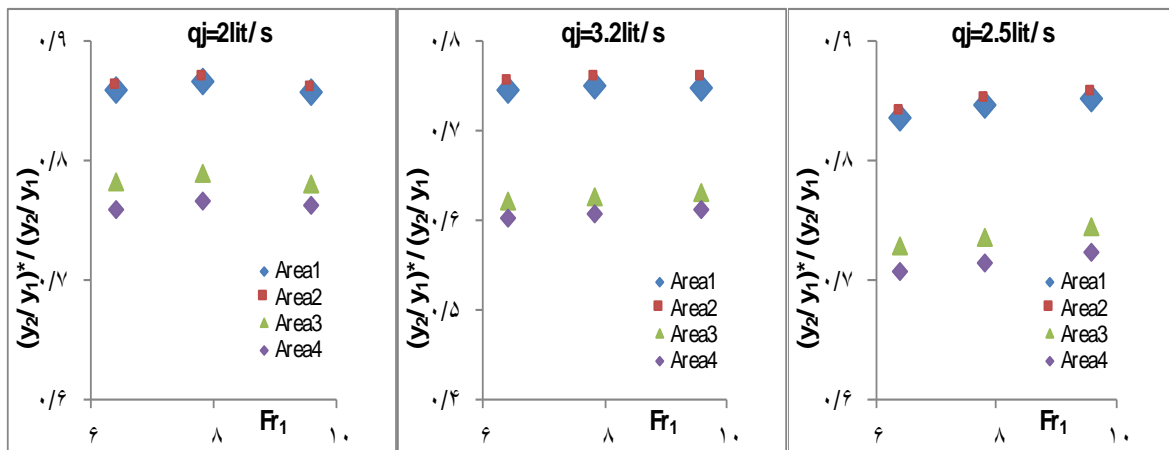
که در این رابطه،  $v$  لزجت سینماتیک سیال،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $g$  شتاب ثقل،  $x_j$  محل اثر جت و بقیه پارامترها قبلاً تعریف

شد) نسبت عمق‌های ثانویه تا حدود ۳۹/۷ درصد نسبت با حالت بدون جت کاهش یافت. برای بهتر نشان دادن تغییرات، در شکل ۸ نسبت  $(y_2/y_1)^*/(y_2/y_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش رسم شده است، که در آن  $(y_2/y_1)^*$  نسبت عمق ثانویه اندازه‌گیری شده و  $(y_2/y_1)$  نسبت عمق ثانویه در حالت بدون جت بود.

چون در پایین دست محل اثر، پرش هیدرولیکی وجود داشت، باعث افزایش عمق اولیه پرش گردید. لذا این عامل باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج پرش شد. کم‌ترین کاهش وقتی که جت به منطقه یک و دو وارد شد، اتفاق افتاد. هر چه دبی جت افزایش یابد به طبع کاهش نسبت عمق‌های مزدوج نیز بیشتر خواهد بود بطوری که در بیش‌ترین دبی جت و کم‌ترین عدد فرود (زمانی که جت به منطقه چهار وارد



شکل ۷- تغییرات نسبت  $y_2/y_1$  در برابر محل برخورد جت



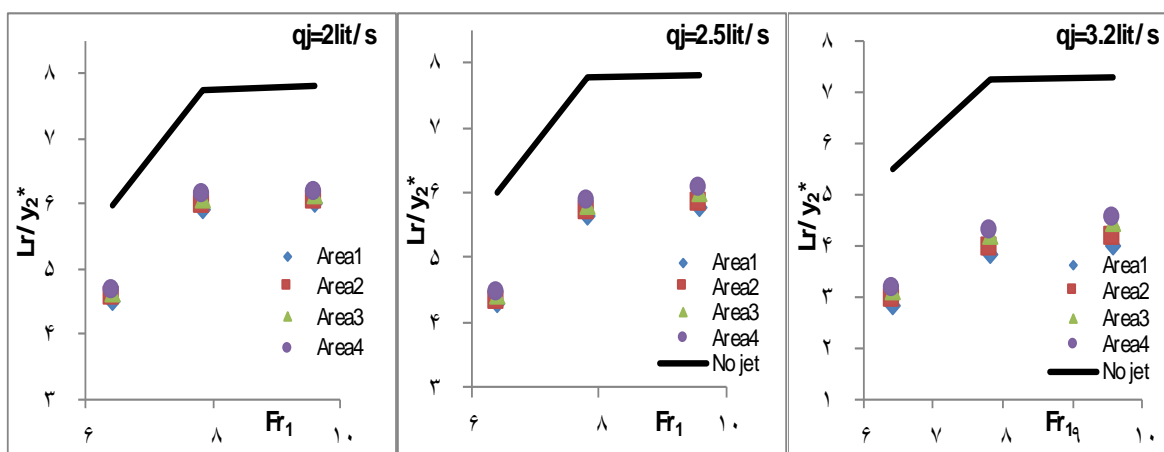
شکل ۸- تغییرات نسبت  $(y_2/y_1)^*/(y_2/y_1)$  در برابر محل برخورد جت

روی پرش بدون جت را در مقابل عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که طول نسبی پرش حداکثر ۵۵ درصد پس از اعمال جت نسبت به طول نسبی پرش بدون جت کاهش داشته و با افزایش دبی جت میزان کاهش طول پرش بیش‌تر شد بیش‌ترین کاهش طول نسبی زمانی که جت به منطقه سه و چهار و کم‌ترین کاهش نیز در منطقه یک و دو وارد گردید اتفاق افتاد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، نسبت  $(Lr/y_1)^*/(Lr/y_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش در شکل ۱۱ رسم شده است، که در آن،  $(Lr/y_1)^*$  طول نسبی اندازه‌گیری شده و  $(Lr/y_1)$  طول نسبی حالت بدون جت بود.

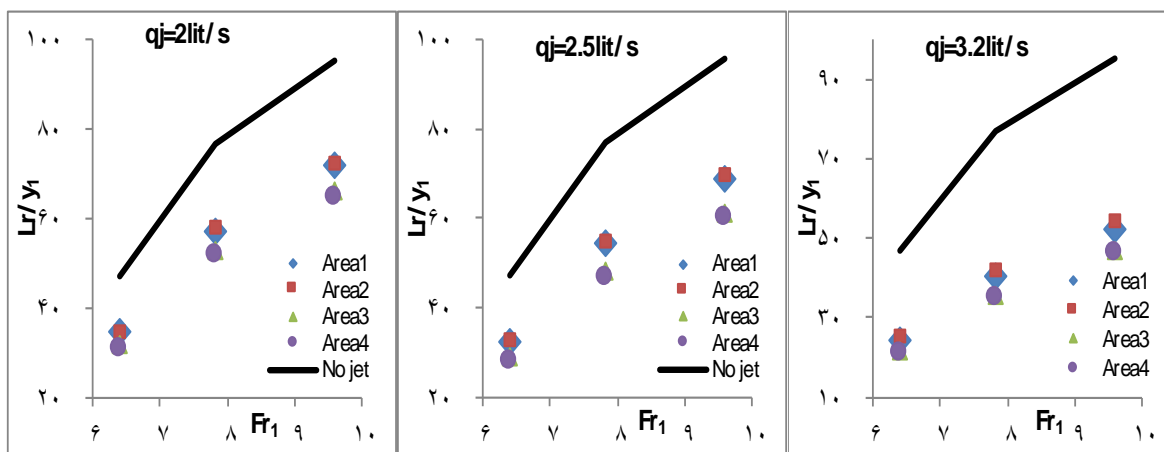
### طول پرش هیدرولیکی

تغییرات طول بی‌بعد پرش آبی  $L_{ij}/y_2^*$  با عدد فرود جریان فوق

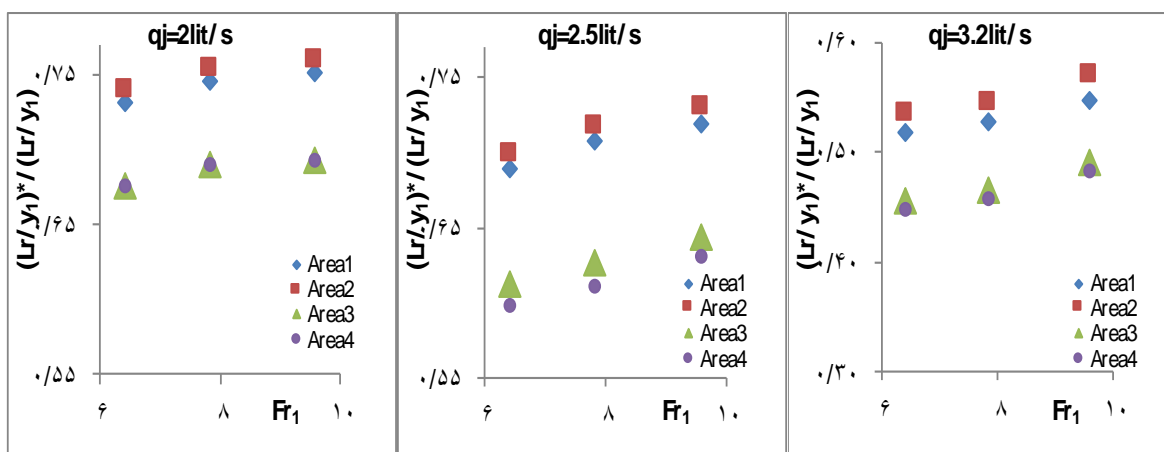
بحرانی ورودی در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، طول بی‌بعد پرش آبی مستقل از عدد فرودهای بزرگ‌تر از ۷/۵ است و دارای مقدار متوسط در دبی جت ۲ لیتر بر ثانیه ۵/۶، ۲/۵ لیتر بر ثانیه ۵/۳، در دبی جت ۳/۲ لیتر بر ثانیه ۴/۲ و در حالت بدون جت ۷/۳ می‌باشد. شکل ۱۰ تغییرات طول نسبی پرش آبی  $L_{ij}/y_1$  پس از اعمال جت به همراه داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر



شکل ۹- تغییرات طول بی‌پرش در برابر عدد فرود در تمامی آزمایش‌ها



شکل ۱۰- تغییرات طول بی‌پرش آبی با عدد فرود برای محل برخورد متفاوت جت



شکل ۱۱- تغییرات نسبت  $(Lr/y_1)^*/(Lr/y_1)$  در مقابل عدد فرود

### استهلاک انرژی

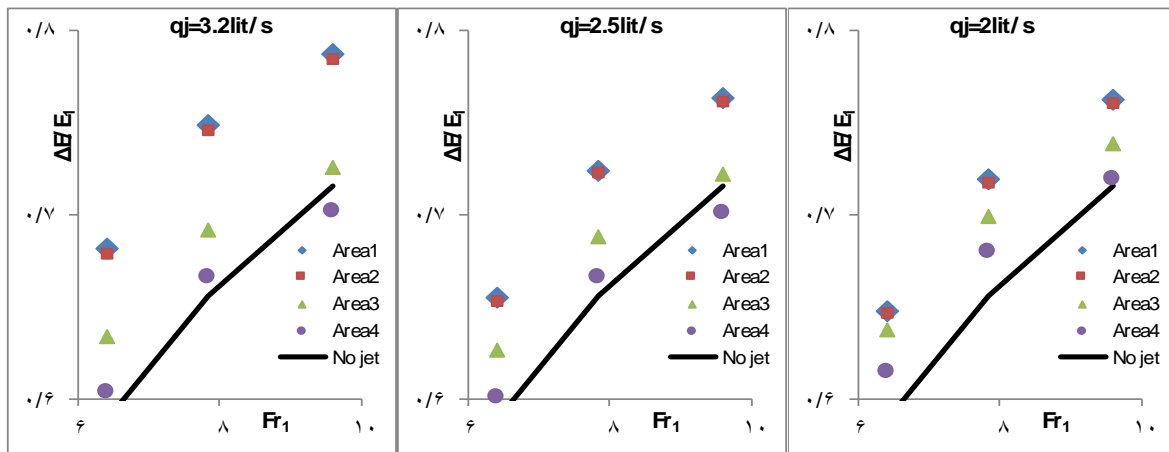
است. از این شکل مشخص است که مقادیر زمانی که جت بر پرش وارد می‌گردد بزرگ‌تر از پرش بدون جت است. در این نمودارها

در شکل ۱۲ تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل  $Fr_1$  رسم شده

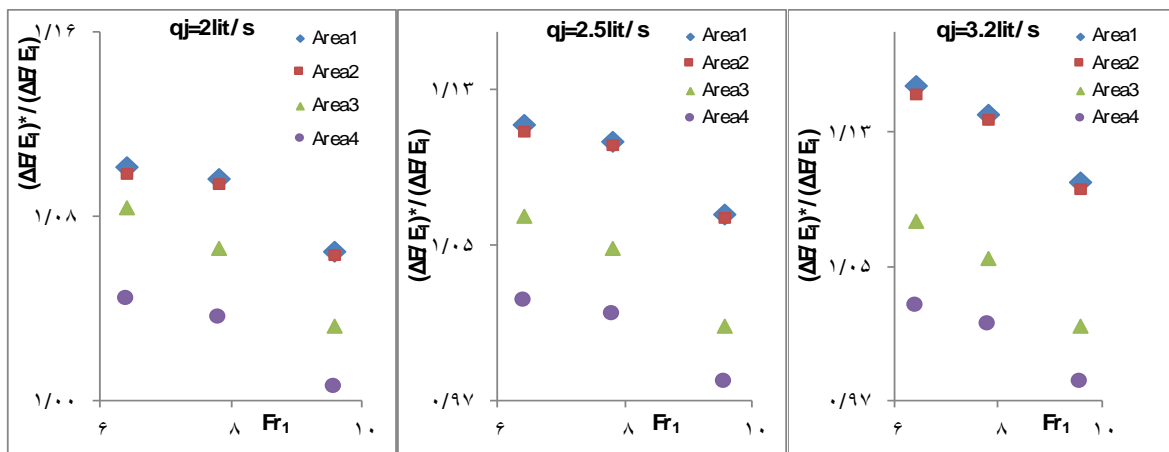


انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیش تر است، با کاهش عمق ثانویه، اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش نشان داد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، نسبت  $(\Delta E/E_1)*/(\Delta E/E_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش در شکل ۱۳ رسم شده است.

مشاهده می شود که با تغییر محل اثر جت افت انرژی نسبی تغییر می یابد و هرچه دبی جت افزایش و عدد فرود کاهش یابد افت انرژی نسبی بیش تر خواهد بود. در توجیه این تغییرات می توان گفت که با توجه به اعمال جت در زاویه حداکثر جابجایی به سمت بالادست جریان و همچنین افزایش دبی جت عمق ثانویه پرش کاهش یافت. با توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در



شکل ۱۲- تغییرات افت نسبی انرژی پرش با عدد فرود



شکل ۱۳- تغییرات، نسبت  $(\Delta E/E_1)*/(\Delta E/E_1)$  در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش

۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می باشند راجاراتنام (۱۹۶۵) در تحقیق خود ضریب تنش برشی بستر  $\varepsilon = \frac{F_\tau}{\gamma y_1^2/2}$  را تعریف کرد (Rajaratnam, 1965). با به کارگیری رابطه بدست آمده توسط راجاراتنام و داده های بدست آمده از آزمایش های انجام شده، تغییرات ضریب تنش برشی بستر  $(\varepsilon)$  با  $Fr_1$  در شکل ۱۴ رسم شده است.

شکل ۱۴ نشان داد که، از مقایسه بدون جت و با جت، مقدار  $\varepsilon$  در پرش هیدرولیکی به همراه جت، حداکثر ۱۳ و حداقل ۴/۲ برابر بیش تر از پرش هیدرولیکی بدون جت است.

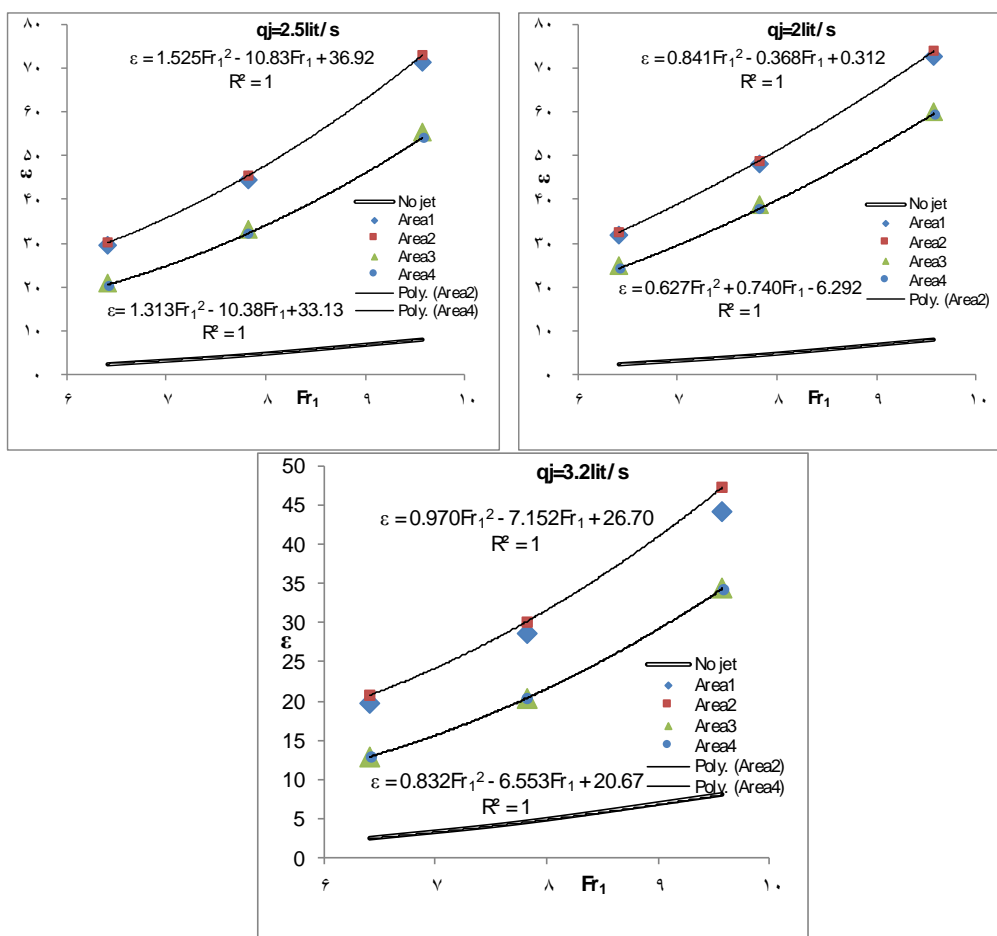
### تنش برشی

دلیل اصلی کاهش عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به همراه اعمال جت در مقایسه با بدون جت وجود تنش برشی اضافه است. اگر  $F_\tau$  جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی، نیروی های تنش برشی رینولدز و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، با استفاده از معادله مومنتم می توان بیان کرد.

$$F_\tau = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (10)$$

که در آن P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتم و اندیس های ۱ و





شکل ۱۴- تغییرات ε با عدد فرود

## نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر جت و محل اثر جت بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اعمال جت با زاویه حداکثر، باعث حرکت پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جریان و باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش نسبت به حالت بدون جت گردید. افزایش دبی جت این تغییرات را تشدید نمود. اعمال جت با زاویه حداکثر، باعث کاهش افت نسبی انرژی و افزایش نیروهای برشی بستر گردید.

## منابع

احمدی، ا و هنرت. ۱۳۹۳. ارزیابی تاثیر آبپایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی های پرش هیدرولیکی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۷۰ : ۱۸ . ۱۳۵-۱۴۴.

پارسامهر، پ، فرسادی زاده، د و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۲. تاثیر آبپایه و زبری های مصنوعی روی شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳ : ۲۷-۵۸۱.

توزنده جانی، م و کاشفی پور، م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر تخلیه تحتانی سد انحرافی روی مشخصات پرش هیدرولیکی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۱۶ : ۶۰۲-۲۰۵.

جم، م، مردشتی، ا و طالب بیدختی، ن. ۱۳۹۳. ارزیابی پرش هیدرولیکی روی حوضچه دنداندار بلوکی، مجله علمی- پژوهشی هیدرولیک. ۹ : ۱-۱۰.

دستورانی، م، اسماعیلی، ک و خداشناس، س. ۱۳۹۵. بررسی اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۲۳ : ۲۲۵-۲۳۹.

عباسپور، ا و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۸۸. تاثیر بستر موج دار سینوسی بر

- Ead, S. A and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 128:656-663.
- Gohari, A and Farhoudi, J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins, 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 9-14.5.
- Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *Journal of Hydraulic Division*. by. American Society of Civil Engineers. 91.5:107-132.
- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. *Trans. Engineering Institute of Canada*. 11(A-2). 1-8.
- Shafai-Bajestan, M and Neisi, K. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin." *Journal of Applied Science*. 2: 436-445.
- Varol, F.A., Evik, E and Yüksel, Y. 2009. The Effect of Water Jet on the Hydraulic Jump. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 (2009), Hurghada, Egypt.
- YükSEL, Y., Günal, M., Bostan, T., Çevik, E and Çelikoğlu, Y. 2004. The Influence of Impinging Jets on Hydraulic Jumps. *Proceedings Of the Institution of Civil Engineering. Water Management* 157. WM2, pp: 63-76.
- خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله دانش آب و خاک. ۱۹. ۱: ۱۳-۲۶.
- نژندعلی، ع.، اسماعیلی، ک.، فرهودی، ج.، راوری، ز. ۱۳۹۰. تاثیر زبری‌های یک پارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۵. ۲: ۲۴۱-۲۳۴.
- نیسی، ک.، شفاعی بجستان، م.، قمشی، م. و کاشف پور، م. ۱۳۹۳. بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی با بستر زبر، نشریه علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی). ۳۷. ۲: ۸۳-۹۳.
- ولی‌نیا، م.، ایوب‌زاده، ع. و یاسی، م. ۱۳۹۳. بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از دریچه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی، نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۳. ۳: ۱-۱۰.
- Belanger, J.B. 1828. *Essai sur la solution numrique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes (Essay on the Numerical Solution of Some Problems relative to Steady Flow of Water)*. Carilian-Goeury: Paris, France (in French).

## Experimental Evaluation of Location and Discharge of Rectangular Free Jet on Parameters of Classic Hydraulic Jump

M.Dastourani<sup>1\*</sup>, K.Esmaili<sup>2</sup>, A. dindalou<sup>3</sup>, A. Khashei-siuki<sup>4</sup>

Received: Apr.23, 2017

Accepted: Jul.08, 2018

### Abstract

Hydraulic jump formation in stilling basins plays an effective role in energy dissipation of flow, downstream of water structures. A fast jet entrance on hydraulic jump is considered as an important factor in control of hydraulic jump, reduce in the length and secondary depth of the jump and increase in energy loss. In this study, has been studied the effect of rapid rectangular jet collision on four area of jump: before, beginning, middle and end of the jump occur (supercritical area), in the maximum angular displacement of the jump to the upstream, including 3 jet discharges; 2, 2.5 and 3 liters per second, in 6–9.6 Froude number range on the hydraulic jump characteristics. Also, has been evaluated the impact of mentioned options on the jump characteristics. Results showed with collision of jet in the end of hydraulic jump, has been occurred maximum relative displacement to the upstream that has been increased with increasing in jet discharge. In with and without jet conditions, the secondary depth and length of the jump decreased in 39.7 and 55 percent, respectively and energy loss increased to 18%. Bed shear has been increased between 4.2 to 13 times in jet collision conditions to hydraulic jump than without a jet. Jet with maximum angle to jump end section has been had maximum effect on jump length and as a result on length of stilling basin.

**Keywords:** Hydraulic jump, Flow interference situation, Free jetlocation, Rapidly varied flow

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand

2- Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant Professor, University of Persian Gulf

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand

(\*- Corresponding Author Email:mdastourani@birjand.ac.ir)