

## بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در انقباض ناگهانی جریان با سطوح آزاد

رسول دانشفر از<sup>۱\*</sup>، علی رضازاده جودی<sup>۲</sup> و سینا صادق فام<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد عمران-آب، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مراغه

(دریافت: ۹۵/۷/۲۹، پذیرش: ۹۶/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۶/۳/۱)

### چکیده

یکی از مشکلات موجود در مراحل ذخیره‌سازی و انتقال آب افزایش انرژی جنبشی جریان است که با استفاده از مستهلک کننده‌های انرژی می‌توان آن را کاهش داد. در صورت عدم کنترل به هنگام انرژی جنبشی جریان ریزشی، خسارات قابل توجهی به کانال‌ها و سازه‌های پایین دست وارد خواهد شد. یکی از راهکارهای کاهش این انرژی جنبشی مخرب استفاده از حوضچه‌های آرامش و پرش هیدرولیکی می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق رفتار یک جریان فوق بحرانی با سطح آزاد در مواجهه با انقباض ناگهانی در مسیر جریان، به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر این اساس عدد فرود به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر بدون بعد در این زمینه در بازه ۳ تا ۸ تغییر کرده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی با افزایش عدد فرود جریان بالادست، پارامترهای افت انرژی نسبت به بالادست و پایین دست افزایش می‌یابند. همچنین میزان استهلاک انرژی ناشی از انقباض ناگهانی بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد مشاهده شد به طوری که بر اساس افت انرژی نسبت به بالادست، ۱۱/۴۳ درصد و بر اساس افت انرژی نسبت به پایین دست، ۶۵/۰۳ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد، استهلاک انرژی وجود داشته است. همچنین بیشترین مقدار افت انرژی مربوط به قبل از انقباض ناگهانی می‌باشد که در این مقطع با افزایش دبی جریان و متعاقباً با افزایش عدد فرود، میزان افت انرژی به شدت افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید، تنگ‌شدگی در تثبیت محل پرش مؤثر است.

**واژه‌های کلیدی:** استهلاک انرژی، انرژی جنبشی، انقباض ناگهانی، بررسی آزمایشگاهی، پرش هیدرولیکی آزاد.

### ۱- مقدمه

ایفا می‌کنند. لذا توجه به اهمیت استهلاک انرژی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، ضرورت تحلیل بیشتر و عمیق‌تر مطالعات تئوریک و آزمایشگاهی را جهت اجرای هرچه بهتر این سازه‌ها را فراهم کرده است.

استهلاک انرژی توسط سازه‌ها و شیوه‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. برخی از این سازه‌ها با ایجاد پرش هیدرولیکی در موقعیت مکانی بخصوصی، انرژی جریان را مستهلک می‌کنند. استفاده از حوضچه‌های آرامش و صفحات مشبک را می‌توان به ترتیب از قدیمی‌ترین و جدیدترین روش‌های استهلاک انرژی این دسته محسوب کرد (Rajaratnam و همکاران، ۲۰۰۰؛ صادق فام، ۱۳۹۱).

جریان ریزشی از روی سرریزها و شوت‌ها، انرژی جنبشی بالایی در پنجه سرریز دارد. وظیفه اصلی سازه‌های مستهلک کننده انرژی، تغییر رژیم جریان، یا از بین بردن انرژی مازاد جریان است که در صورت فقدان استفاده از این نوع سازه‌ها، انرژی جنبشی جریان منجر به خرابی‌هایی از قبیل فرسایش کانال، ساییش سازه‌های هیدرولیک، تولید امواج مخرب در پایاب و یا پدیده آبشستگی می‌شود. پرش هیدرولیکی پدیده‌ای رایج در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، نظیر سرریزها و دریچه‌ها می‌باشد که با تبدیل سریع جریان فوق بحرانی به شرایط زیر بحرانی در بازه‌ای نسبتاً کوتاه، عمق جریان را افزایش می‌دهد و نقش مهمی در میزان استهلاک انرژی جریان دارد (راور و همکاران، ۱۳۹۱). این سازه‌ها علاوه بر استهلاک انرژی، نقش کنترل و مهار پرش هیدرولیکی و تثبیت محل آن در یک موقعیت مکانی خاص را نیز

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۳۲۰۲۱۲۶

نپذیرفته است، اما مطالعات نسبتاً مناسبی در زمینه پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی انجام پذیرفته که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات ابریشمی و اسماعیلی (۱۳۷۶) و اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹) در زمینه بررسی پرش هیدرولیکی روی کف‌های با شیب معکوس و پله مثبت و پله منفی در انتها اشاره کرد. همچنین Shafai Bajestan و Izadjoo (۲۰۰۷)، مشخصات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری دوزنقه‌ای بررسی کردند. Farhoudi و Gohari (۲۰۰۹)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی مورد مطالعه قرار دادند. راور و همکاران (۱۳۹۱)، به بررسی تاثیر بستر زبر دوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی پرداختند. کاتورانی و کاشفی‌پور (۱۳۹۳)، اثر مشخصات هندسی مانع و شیب کف دراپ را روی شرایط هیدرولیکی جریان در دراپ‌های مانع‌دار را مورد بررسی قرار دادند. ولی‌نیا و همکاران (۱۳۹۳)، اثر فاصله‌های بلوک‌های کف از دریچه را بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی مورد بررسی قرار دادند. همچنین جم و همکاران (۱۳۹۳)، پرش هیدرولیکی را روی حوضچه دنداندار بلوکی مورد ارزیابی قرار دادند.

با توجه به امکان شکل‌گیری مقاطع انقباض یافته در مسیر جریان فوق بحرانی که ممکن است در اثر احداث پایه پل ایجاد گردد، ضرورت محاسبه میزان استهلاك انرژی ناشی از مواجهه جریان فوق بحرانی با مقطع تنگ شده احساس شده و در این مطالعه، سعی شده است رفتار جریان فوق بحرانی در مواجهه با تنگ‌شدگی ناگهانی از دیدگاه استهلاك انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- انواع پرش‌های هیدرولیکی در برخورد جریان فوق

#### بحرانی با مانع

با قرارگیری مانعی همانند انقباض ناگهانی در مسیر جریان فوق بحرانی، سه نوع رفتاری متفاوت، قابل مشاهده است. در تعیین عوامل رفتاری پارامترهای زیادی دخالت دارد از جمله: عدد فرود جریان فوق بحرانی، میزان تنگ‌شدگی و عمق پایاب. لذا تعیین نوع رفتار جریان با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی صورت می‌گیرد رفتار نوع اول زمانی اتفاق می‌افتد که فاصله مابین مانع و دریچه مولد جریان فوق بحرانی بیشتر از طول پرش هیدرولیکی کامل باشد. در این نوع رفتاری، مانع در ناحیه زیر بحرانی قرار گرفته و پرش هیدرولیکی قبل از مانع اتفاق می‌افتد (شکل ۱-الف)) (صادق‌فام، ۱۳۹۱).

نتیجه برخورد جریان فوق بحرانی با مانع در رفتار نوع دوم، پرش هیدرولیکی تحمیلی است. در رفتار نوع دوم فاصله بین

نوع دیگری از این سازه‌ها، به عنوان نوع ضربه‌ای نامیده می‌شوند که در این دسته نوع شیب‌شکن<sup>۱</sup> (Carvalho و Leandro، ۲۰۱۲؛ Chanson، ۱۹۹۹) و پرش اسکی (Espinoza و همکاران، ۲۰۰۸؛ Peterka، ۱۹۸۳) جای می‌گیرد. (۱۹۸۳)، طراحی باکت‌های پرتابی را به عنوان سازه‌های استهلاك انرژی ضربه‌ای مورد بررسی قرار داد. Mason (۱۹۹۳)، نیز راهبردهایی برای طراحی ارائه کرد. Espinoza و Zevallos (۲۰۰۵) پرش اسکی را از دیدگاه آبشستگی، و Espinoza و همکاران (۲۰۰۸)، از دیدگاه هوادهی، ارزیابی کردند.

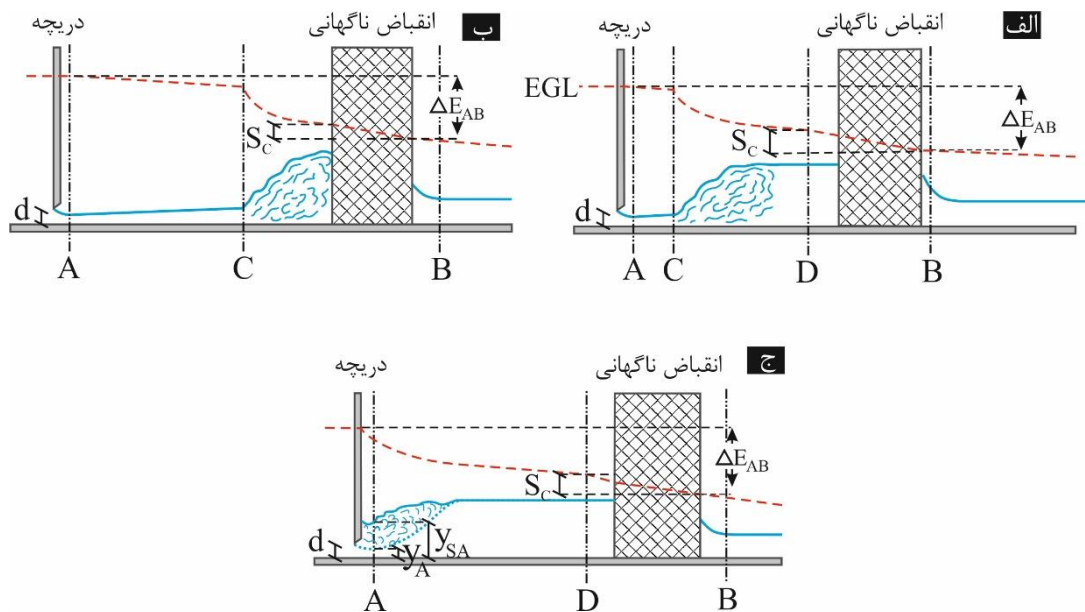
با توجه به اهمیت موضوع تاکنون محققان زیادی در سراسر جهان به مطالعات وسیعی در این زمینه پرداخته‌اند. کاهش عرض کانال یا انقباض ناگهانی سطح مقطع در مسیر جریان، ممکن است در اثر احداث سازه‌هایی نظیر پایه‌های پل، ایجاد شود که انسداد جریان عبوری را نیز به همراه خواهد داشت. Yarnell (۱۹۳۴)، مطالعات آزمایشگاهی وسیعی در زمینه انقباض پایه‌های پل و تحلیل تئوری برای محدود کردن ضریب انقباض انجام داده است. همچنین Chow (۱۹۵۹) و Henderson (۱۹۶۶)، مطالعاتی را در زمینه انسداد جریان صورت دادند. بر پایه مطالعات انجام شده برای درک پدیده انسداد در انقباض ناشی از پایه‌های پل، Bradley (۱۹۷۳)، رابطه‌ای برای محاسبه عمق پس‌زدگی جریان<sup>۱</sup> معرفی کرد. Hager و همکاران (۱۹۸۵)، مطالعاتی را به صورت آزمایشگاهی بر روی مشخصات جریان در انقباض ناگهانی انجام دادند. آنها به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی، تأثیر پارامترهای هندسی از قبیل زاویه جریان ورودی و خروجی، نسبت و طول انقباض را بر دبی جریان بررسی کردند. Wu و Molinas (۲۰۰۱)، مواجهه یک جریان زیر بحرانی را با انقباض کوتاهی در مسیر جریان مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس آزمایشات آنان، ضریب دبی از نسبت بازشدگی محل انقباض تأثیر زیادی می‌پذیرد. لازم به ذکر است رابطه ارائه شده توسط آنها برای محاسبه دبی جریان، با نتایج آزمایشگاهی مطالعات پیشین هم‌پوشانی قابل قبولی را نشان داده است. Dey و Raikar (۲۰۰۵)، آبشستگی در یک انقباض طویل را برای جریان‌های زیر بحرانی، مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس آزمایشات آنان، عمق متعادل آبشستگی با کاهش نسبت گشودگی مقطع انقباض یافته و افزایش اندازه ذرات رسوبی، افزایش می‌یابد. Jan و Chang (۲۰۰۹) نیز به بررسی پرش هیدرولیکی بر روی یک شوت انقباض یافته پرداختند. آنها روابط تئوری برای عمق ثانویه با در نظر گرفتن مقطع انقباض یافته و شیب کف ارائه کردند.

با توجه به کمبود امکانات آزمایشگاهی در ایران طبق بررسی‌ها انجام شده تاکنون مطالعه‌ای در زمینه رفتار جریان فوق بحرانی در مواجهه با تنگ‌شدگی ناگهانی از دیدگاه استهلاك انرژی صورت

هر دو در ناحیه زیر بحرانی قرار می‌گیرند (شکل (۱-ج)) (صادق-فام، ۱۳۹۱).

در شکل (۱)، مقدار افت انرژی بین مقاطع A و B در رفتار نوع اول و دوم که شامل افت موضعی از مقطع A تا C، افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی و افت انرژی ناشی از گردابی قبل از انقباض و افت داخل انقباض است، با استفاده از اصل انرژی و از طریق رابطه (۱)، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است، افت انرژی ناشی از گردابی قبل از انقباض و افت داخل انقباض با حرف  $S_C$  مشخص شده است.

$$\Delta E_{AB} = E_A - E_B = \left( y_A + \frac{V_A^2}{2g} \right) - \left( y_B + \frac{V_B^2}{2g} \right) \quad (1)$$



شکل ۱- انواع پرش‌های هیدرولیکی ناشی از مواجهه جریان فوق بحرانی با انقباض ناگهانی: الف) پرش هیدرولیکی آزاد (رفتار نوع اول)، ب) پرش هیدرولیکی تحمیلی (رفتار نوع دوم)، ج) پرش هیدرولیکی مستغرق (رفتار نوع سوم) (صادق‌فام، ۱۳۹۱)

با توجه به شکل (۱-ج)، مقدار افت انرژی بین مقاطع A و B برای رفتار نوع سوم که شامل افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی مستغرق و افت انرژی ناشی از انقباض ناگهانی و گردابی قبل از انقباض است، همانند رفتار نوع اول و دوم، با استفاده از اصل انرژی و رابطه (۱)، محاسبه می‌شود. نکته متمایز در رفتار نوع سوم، محاسبه عمق و سرعت در مقطع A است. اندازه‌گیری عمق جریان در مقطع A و یا عمق استغراق درپشه  $(Y_{SA})$ ، به علت جریان‌های متلاطم ناشی از پرش هیدرولیکی و در نتیجه نوسان پروفیل سطح آب در مقطع A، امکان‌پذیر نیست. Rajaratnam و Subramanva (۱۹۷۷) میزان عمق استغراق درپشه را با استفاده از ارتفاع آب پشت درپشه توسط رابطه (۳) به دست آورده‌اند.

$$Y_{SA} = y_h - \frac{V_A^2}{2g} \quad (3)$$

نقطه‌ای که پرش اتفاق می‌افتد و مانع، به اندازه‌ای نیست که پرش هیدرولیکی آزاد انجام شود و مانع کاملاً در ناحیه فوق بحرانی جریان قرار می‌گیرد. به دلیل آشفتگی‌های ایجاد شده، استهلاک انرژی در رفتار نوع دوم بیشتر از رفتار نوع اول است (شکل ۱-ب)) (صادق‌فام، ۱۳۹۱).

برخورد جریان فوق بحرانی با مانع در رفتار نوع سوم، منجر به پرش هیدرولیکی مستغرق می‌شود. این نوع رفتاری زمانی که عدد فرود جریان فوق بحرانی نسبتاً کم بوده و یا عمق پایاب نسبتاً زیاد باشد، قابل مشاهده است. در این حالت زمانی که پرش هیدرولیکی مستغرق رخ می‌دهد، مانع و جریانی که درپشه را ترک می‌کند،

در رابطه (۱)،  $V_A$  و  $Y_A$ ، به ترتیب برابر سرعت و عمق جریان در مقطع A،  $V_B$  و  $Y_B$ ، به ترتیب برابر سرعت و عمق جریان در مقطع B و g شتاب جاذبه زمین است. در طی آزمایشات انجام شده، مقادیر سرعت در مقاطع A و B از طریق سرعت متوسط، مقدار عمق جریان در مقطع B از طریق اندازه‌گیری و مقدار عمق جریان در مقطع A، از طریق رابطه (۲)، قابل محاسبه می‌باشد.

$$Y_A = d \times C_C \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $d$ ، میزان بازشدگی درپشه مولد جریان فوق بحرانی و  $C_C$  ضریب انقباض جریان است که از طریق نتایج تحلیلی Belaud و همکاران (۲۰۰۹)، برحسب نسبت‌های مختلف بازشدگی درپشه به ارتفاع آب پشت درپشه برای جریان‌های آزاد و مستغرق، محاسبه شده است (شکل (۲)).

باکینگهام رابطه (۶) را می‌توان به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعد رابطه (۶) بازنویسی کرد.

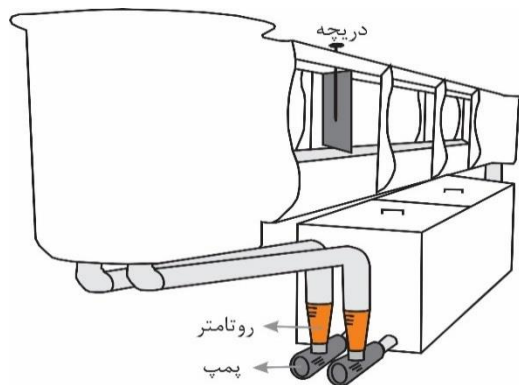
$$\Phi \left( \frac{Q}{Y_A^2 g^2}, Fr_A, (Re)_A, \frac{w}{Y_A}, \frac{E_A}{Y_A}, \frac{B}{Y_A}, \frac{l}{Y_A}, \frac{d}{Y_A}, \frac{X}{Y_A}, \frac{E_B}{Y_A}, \frac{Y_C}{Y_A}, \frac{Y_B}{Y_A}, \frac{Y_D}{Y_A}, \frac{L}{Y_A} \right) = 0 \quad (۶)$$

در تحقیق حاضر با توجه به اهداف مورد نظر بررسی برخی از پارامترها مورد نظر نبوده و برخی نیز با توجه به شرایط و محدودیت‌های آزمایشگاهی مقادیر معینی به خود گرفته‌اند که عبارتند از عرض کانال، مقدار تنگ‌شدگی در مقطع، طول تنگ‌شدگی در مقطع، میزان بازشدگی دریچه، فاصله بین دریچه و تنگ‌شدگی، لذا این پارامترها از رابطه بالا حذف گشتند. از طرف دیگر با توجه به متلاطم بودن جریان اثر عدد رینولدز قابل صرف نظر می‌باشد لذا پارامترهایی که در مطالعه حاضر مورد بررسی می‌باشند به صورت رابطه (۷) ارائه گردیده است:

$$\Phi \left( \frac{Q}{Y_A^2 g^2}, Fr_A, \frac{E_A}{Y_A}, \frac{E_B}{Y_A}, \frac{Y_C}{Y_A}, \frac{Y_B}{Y_A}, \frac{Y_D}{Y_A}, \frac{L}{Y_A} \right) = 0 \quad (۷)$$

### ۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده

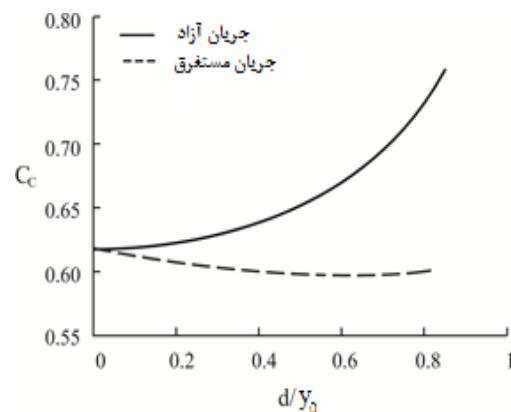
برای بررسی پارامترهای مؤثر، از مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه بهره‌گرفته شده است. این کانال دارای طول ۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر بوده و دیواره‌های آن از جنس پلکسی‌گلس می‌باشد که این امر مشاهده دقیق‌تر و جزئی‌تر رفتارهای جریان را امکان‌پذیر می‌نماید. جریان مورد نیاز توسط دو عدد پمپ که در بر روی مخزن کانال نصب شده است، تأمین می‌گردد که دبی‌های بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ لیتر بر دقیقه را تأمین می‌کنند. شکل (۳)، شکل شماتیک کانال و تجهیزات نصب شده و شکل (۴) فلوم آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهند.



شکل ۳- شکل شماتیک فلوم و تجهیزات نصب شده

در رابطه فوق با معلوم بودن سرعت جریان در مقطع A ( $V_A$ )، ارتفاع آب پشت دریچه ( $y_h$ )، مقدار عمق استغراق دریچه ( $Y_{SA}$ ) قابل محاسبه است. در حالی که مقدار  $V_A$  بر اساس عمق فرضی  $Y_A$ ، که از طریق رابطه (۲) به دست می‌آید، قابل محاسبه بوده و در نهایت افت انرژی برای نوع سوم رفتاری (پرش هیدرولیکی مستغرق) از طریق رابطه (۴) حاصل می‌شود.

$$\Delta E_{AB} = \left( Y_{SA} - \frac{V_A^2}{2g} \right) - \left( y_B - \frac{V_B^2}{2g} \right) \quad (۴)$$



شکل ۲- ضریب انقباض دریچه کشویی ارائه شده برای جریان‌های مستغرق و آزاد توسط Belaud و همکاران (۲۰۰۹)

### ۲-۲- تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر در آزمایش برای استهلاک انرژی به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته شد:

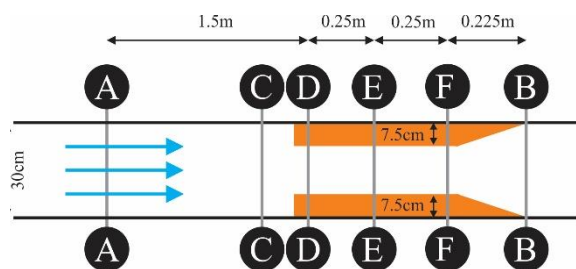
$$S = \Phi(Q, Fr_A, V, w, B, l, d, X, E_A, E_B, Y_A, Y_B, Y_C, Y_D, g, \rho, \mu, L) \quad (۵)$$

که در آن  $S$  میزان استهلاک انرژی،  $Q$  دبی جریان،  $Fr_A$  عدد فرود مقطع  $A$ ،  $V$  سرعت جریان،  $W$  عرض کانال،  $B$  مقدار تنگ‌شدگی در مقطع،  $l$  طول تنگ‌شدگی در مقطع،  $d$  بازشدگی دریچه،  $X$  فاصله بین دریچه و تنگ‌شدگی،  $E_A$  انرژی مخصوص در مقطع  $A$ ،  $E_B$  انرژی مخصوص در مقطع  $B$ ،  $Y_A$  عمق اولیه در مقطع  $A$ ،  $Y_B$  عمق اولیه در مقطع  $B$ ،  $Y_C$  عمق اولیه در مقطع  $C$ ،  $Y_D$  عمق اولیه در مقطع  $D$ ،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $L$  طول پرش می‌باشد. پارامترهای تکراری ( $Y_A, g, \rho$ ) به ترتیب جرم مخصوص، شتاب ثقل و عمق اولیه در مقطع  $A$  در نظر گرفته شد. با توجه به این که عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تابعی از عمق اولیه پرش هیدرولیکی و عدد فرود جریان در محل اولیه پرش هیدرولیکی می‌باشد، به همین دلیل  $Y_A$  به عنوان یکی از پارامترهای تکراری انتخاب شد تا شرایط یکسانی برای تمامی آزمایشات حاکم شود. با استفاده از روش

اندازه‌گیری عمق آب می‌باشد. گیج کامپیوتری نیز بر روی یک کالسکه ثابت در محل مورد نظر قرار داده می‌شود و عمق‌ها را در مدت یک دقیقه به صورت شعاعی برداشت می‌کند. اندازه‌گیری اعماق جریان در طول آزمایشات در مقاطع C, D, E, F و B صورت گرفته است. شکل (۵) جزئیات پلان مقطع و انقباض ناگهانی را نشان می‌دهد. در این شکل، مقطع A، جریان فوق بحرانی زیر دریاچه، مقطع C، محل جریان بلافاصله قبل از مقطع انقباض، مقاطع E, D و F، به ترتیب محل جریان در ابتدا، وسط و انتهای مقطع انقباض یافته و مقطع B، محل جریان پس از تبدیل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمایشی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۵- تصویر شماتیک از پلان مقطع تنگ شده و نامگذاری مقاطع

شایان ذکر است، دستگاه ارتفاع سنج دیجیتال، اعماق جریان را به صورت غیردائمی (در بازه زمانی یک دقیقه) و در فواصل عرضی مختلفی (در نقاطی به فاصله سه سانتی متری در عرض کانال) ثبت کرده که در نهایت میانگین اعماق ثبت شده، معرف عمق جریان در آن مقطع بوده است.

در این تحقیق، عدد فرود به عنوان اصلی‌ترین پارامتر تأثیرگذار، در بازه ۳ تا ۸ مورد بررسی قرار گرفت، با تغییر جریان ورودی به صورتی که در جدول (۱) ارائه گردیده است، تغییر می‌کند.

در جدول (۲) محاسبه دبی، عمق پشت دریاچه، ضریب انقباض و عمق در ناحیه A ارائه گردیده است. در این جدول  $Q_1$  برابر با دبی خوانده شده از روتامترها،  $Q_2$  برابر با دبی اصلاح شده برحسب لیتر بر دقیقه،  $Q_3$  برابر با دبی اصلاح شده بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $Y_h$  برابر با عمق آب پشت دریاچه،  $d/Y_h$  برابر با نسبت بازشدگی دریاچه به عمق آب پشت دریاچه،  $C_c$  برابر با ضریب انقباض دریاچه و  $Y_a$  برابر با عمق جریان قبل از پرش می‌باشد. بررسی نتایج آزمایشگاهی توسط دو پارامتر بدون بعد، افت انرژی نسبت به بالادست ( $\Delta E_{AB}/E_A$ ) و افت انرژی نسبت به پایین دست ( $\Delta E_{AB}/E_B$ ) صورت گرفته است. شکل‌های (۶) و (۷) نشان‌دهنده میزان تغییرات این پارامترها می‌باشند که در این شکل‌ها، محور افقی بیانگر عدد فرود در مقطع A و محور قائم، بیانگر میزان افت انرژی نسبی است.

### ۳- نتایج و بحث

اندازه‌گیری دبی جریان توسط روتامتر که بر روی لوله رانش پمپ‌ها نصب شده، انجام شده است. سپس با مقایسه مقدار دبی محاسبه شده با مقدار قرائت شده روتامتر، رابطه‌ای جهت کالیبره کردن دستگاه دبی سنج حاصل شده است. با حاصل ضرب مقادیر سرعت در مساحت محصور بین هر کدام از نقاط اندازه‌گیری شده، مقدار دبی جزء حاصل شده و مقدار دبی کل، مجموع مقادیر مربوط به دبی جزء است.

با مکش پمپ‌ها جریان آب پس از ورود به قسمت ورودی، و انجام عمل تلاطم‌گیری طی چندین مرحله وارد بخش شیشه‌ای می‌شود. در این تحقیق جهت ایجاد جریان فوق بحرانی از دریاچه کشویی استفاده شده است. این دریاچه در فاصله ۱/۵ متری از قسمت ورودی کانال نصب شده و میزان بازشدگی آن ۲/۶ سانتی متر است. با توجه به محدودیت دیواره‌های کانال، این میزان بازشدگی با هدف جلوگیری از عدم لبریز شدن جریان آب پشت دریاچه از جداره‌های کانال، از طریق آزمون و خطا به دست آمده است.

برای ایجاد انقباض ناگهانی در مسیر جریان، از صفحات چوبی به طول ۵۰ سانتی متر و عرض ۷/۵ سانتی متر و ارتفاع ۴۵ سانتی متر استفاده شده است. سطح لایه تنگ شدگی با وجود این که از جنس چوب ساخته شده، به منظور نزدیک کردن ضریب زبری تنگ شدگی به بستر و دیواره‌های فلوم، سطح آن توسط لاک شفاف ضد آب پوشانیده شده بود. همچنین برای حذف نوسانات شدید جریان از خروجی مقطع انقباض یافته، از دو عدد تبدیل مثلثی به طول ۲۲/۵ سانتی متر با ضخامت ۷/۵ سانتی متر بهره‌گرفته شده که در انتهای مقطع انقباض یافته قرار گرفته است (شکل (۵)).

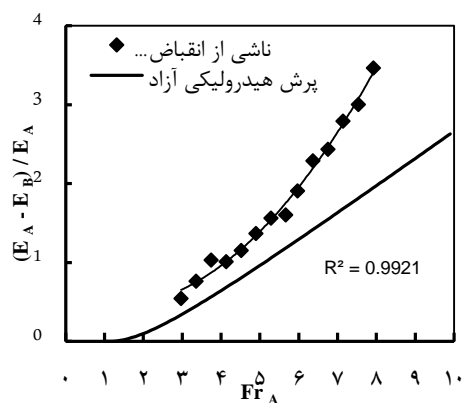
اندازه‌گیری عمق آب توسط یک گیج کامپیوتری و یک گیج نقطه‌ای انجام می‌گیرد. که گیج نقطه‌ای با دقت ۰/۵ میلی‌متر عمق را اندازه می‌گیرد و بر روی یک کالسکه که در جهت طولی و عرضی قادر به حرکت می‌باشد سوار شده و در محل مورد نظر قادر به

جدول ۱- مقادیر دبی و عدد فرود به کار رفته در آزمایشات

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
دبی (لیتر بر دقیقه)	۳۰۰	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰	۷۵۰	۸۰۰	۸۵۰	۹۰۰	۹۵۰
عدد فرود	۲/۹۷	۳/۳۶	۳/۷۴	۴/۱۳	۴/۵۲	۴/۹۰	۵/۲۸	۵/۶۷	۵/۹۷	۶/۳۶	۶/۷۵	۷/۱۴	۷/۵۳	۷/۹۲

جدول ۲- محاسبه دبی، عمق پشت دریاچه، ضریب انقباض و عمق در ناحیه A

$Q_1$ (Lit/min)	$Q_2$ (Lit/min)	$Q_3$ (Lit/min)	$y_h$ (m)	$d/y_h$ (-)	$Cc$ (-)	$Y_a$ (m)
۳۰۰	۳۲۹/۹۸۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۹۷	۰/۳۶۸۰۴۱	۰/۶۰۴۲۲۲	۰/۰۱۵۷۱
۳۵۰	۳۷۴/۴۷۵	۰/۰۰۶۲۴۱	۰/۱۱۶	۰/۲۲۴۱۳۸	۰/۶۰۶۰۱۶	۰/۰۱۵۸۵۶
۴۰۰	۴۱۸/۹۶۵	۰/۰۰۶۹۸۳	۰/۱۴۲	۰/۱۸۳۰۹۹	۰/۶۰۷۸۵۷	۰/۰۱۵۸۰۴
۴۵۰	۴۶۳/۴۵۵	۰/۰۰۷۷۲۴	۰/۱۵	۰/۱۷۳۳۳۳	۰/۶۰۸۳۱۹	۰/۰۱۵۸۱۶
۵۰۰	۵۰۷/۹۴۵	۰/۰۰۸۴۶۶	۰/۱۷۷	۰/۱۴۶۸۹۳	۰/۶۰۹۶۱۳	۰/۰۱۵۸۵
۵۵۰	۵۵۲/۴۳۵	۰/۰۰۹۲۰۷	۰/۲۱	۰/۱۲۳۸۱	۰/۶۱۰۷۹۷	۰/۰۱۵۸۸۱
۶۰۰	۵۹۶/۹۲۵	۰/۰۰۹۹۴۹	۰/۲۲۷	۰/۱۱۴۵۳۷	۰/۶۱۱۲۸۶	۰/۰۱۵۸۹۳
۶۵۰	۶۴۱/۴۱۵	۰/۰۱۰۶۹	۰/۲۵۸	۰/۱۰۰۷۷۵	۰/۶۱۲۰۲۸	۰/۰۱۵۹۱۳
۷۰۰	۶۸۵/۹۰۵	۰/۰۱۱۴۳۲	۰/۲۸۳	۰/۰۹۱۸۷۳	۰/۶۱۸۰۹۷	۰/۰۱۶۰۷۱
۷۵۰	۷۳۰/۳۹۵	۰/۰۱۲۱۷۳	۰/۳۲	۰/۰۸۱۲۵	۰/۶۱۷۸۵۸	۰/۰۱۶۰۶۴
۸۰۰	۷۷۴/۸۸۵	۰/۰۱۲۹۱۵	۰/۳۵	۰/۰۷۴۲۸۶	۰/۶۱۷۷۱۷	۰/۰۱۶۰۶۱
۸۵۰	۸۱۹/۳۷۵	۰/۰۱۳۶۵۶	۰/۳۸۲	۰/۰۹۸۰۶۳	۰/۶۱۷۶۰۲	۰/۰۱۶۰۵۸
۹۰۰	۸۶۳/۸۶۵	۰/۰۱۴۳۹۸	۰/۴۱	۰/۰۶۳۴۱۵	۰/۶۱۷۵۲۳	۰/۰۱۶۰۵۸
۹۵۰	۹۰۸/۳۵۵	۰/۰۱۵۱۳۹	۰/۴۳۶	۰/۰۵۶۹۳۳	۰/۶۱۷۴۲۳	۰/۰۱۶۰۵۴

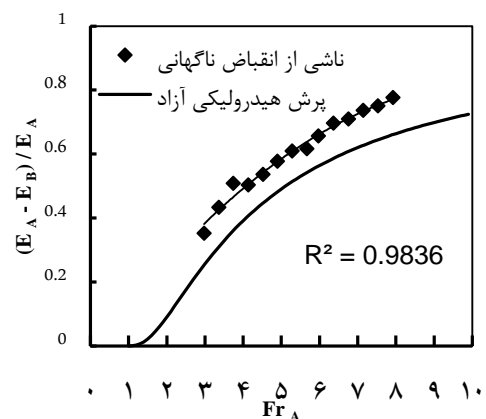


شکل ۷- تغییرات افت انرژی نسبت به پایین دست به صورت تابعی از تغییرات عدد فرود

نتایج حاصل از بررسی‌های آزمایشگاهی، توسط معادلاتی از نوع درجه‌ی دوم، برازش داده شده و روابط زیر با ضرایب تبیین بزرگتر از ۰/۹۸ به دست آمده است که نشان‌دهنده وجود رابطه مستقیم بین میزان تغییرات عدد فرود و میزان تغییرات افت انرژی می‌باشد. روابط (۸) و (۹)، به ترتیب ارتباط بین افت انرژی نسبت به بالا دست و پایین دست را با عدد فرود نشان می‌دهند. این روابط می‌توانند جهت درونیابی و برونیابی پارامترهای افت انرژی نسبی به کار گرفته شوند.

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A} = -0/007(Fr_A^2) + 0/159(Fr_A) - 0/027 \quad (A)$$

در این شکل‌ها خطوط ممتد، افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک را نشان می‌دهد که در تمامی حالات افت انرژی ناشی از انقباض ناگهانی، بیشتر از افت انرژی پرش هیدرولیکی آزاد کلاسیک است که این مسأله به علت وجود جریان‌های گردابی در مقطع C (شکل (۵))، قابل توضیح است. با توجه به شکل‌های (۶) و (۷)، میزان افت انرژی ناشی از انقباض ناگهانی، بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد بوده و با افزایش عدد فرود نیز میزان اختلاف در افت انرژی نسبی، بیشتر می‌شود.



شکل ۶- تغییرات افت انرژی نسبت به بالادست به صورت تابعی از تغییرات عدد فرود

#### ۴- نتیجه گیری کلی

انقباض ناگهانی در مسیر جریان ممکن است در اثر احداث سازه‌هایی نظیر پایه‌های پل ایجاد گردد که هدف اصلی این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی رفتار جریان فوق بحرانی در مواجهه با انقباض ناگهانی است. لازم به ذکر است مطالعات بر روی کانالی با مقطع مستطیلی، به ابعاد طولی ۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه انجام شده است. میزان بازشدگی انقباض ناگهانی ۵۰ درصد بوده و در فاصله ۱/۵ متری از دریچه مولد جریان فوق بحرانی قرار گرفته است. میزان بازشدگی دریچه کشویی، ۲/۶ سانتی‌متر بوده و عدد فرود جریان فوق بحرانی در بازه ۳ تا ۸ مورد بررسی قرار گرفته است. افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست به عنوان پارامتری برای ارزیابی عملکرد استهلاک انرژی انتخاب شده است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی با افزایش عدد فرود جریان بالادست، پارامترهای افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست افزایش می‌یابند. همچنین میزان استهلاک انرژی ناشی از انقباض ناگهانی بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد مشاهده گردید به طوری که بر اساس افت انرژی نسبت به بالادست، ۱۱/۴۳ درصد و بر اساس افت انرژی نسبت به پایین‌دست، ۶۵/۰۳ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد، استهلاک انرژی وجود داشته است. همچنین بیشترین مقدار افت انرژی مربوط به قبل از انقباض ناگهانی می‌باشد (بین مقاطع A و C) که در این مقطع با افزایش دبی جریان و متعاقباً با افزایش عدد فرود، میزان افت انرژی به شدت افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید، تنگ‌شدگی در تثبیت محل پرش مؤثر است.

تفکیک استهلاک انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی و تنگ‌شدگی با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود امکان‌پذیر نبود. برای این تفکیک می‌توان از شبیه‌سازی عددی استفاده نمود که می‌تواند هدف تحقیقات آتی باشد. لذا در این مطالعه منظور از استهلاک انرژی عبارت از مجموع استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی، پرش هیدرولیکی و افت طولی می‌باشد.

#### ۵- پیشنهادات

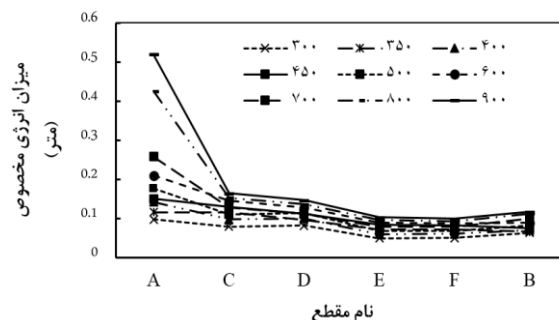
- ۱- در این پژوهش درصد انقباض ۵۰٪ مورد بررسی قرار گرفته است. لذا می‌توان درصد انقباض‌های کمتر یا بیشتر را مورد بررسی قرار داد.
- ۲- با توجه به این که آزمایشات انقباض انجام گرفته در قسمتی از کانال بوده می‌توان با تغییر فاصله انقباض ناگهانی از دریچه به نتایج دیگری دست یافت.

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = 0/065(Fr_A^2) - 0/156(Fr_A) + 0/539 \quad (9)$$

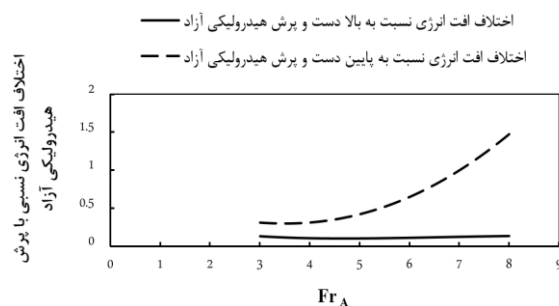
لازم به ذکر است، نتایج موجود در شکل‌های (۶) و (۷) رفتار افت انرژی نسبی را نسبت به بالادست و پایین‌دست توصیف می‌کند. در حالی که روابط (۸) و (۹) اختلاف بین پارامتر افت انرژی نسبی در کل سیستم و پارامتر افت انرژی نسبی ناشی از پرش هیدرولیکی (منحنی موجود در شکل‌های (۶) و (۷)) را نشان می‌دهد.

شکل (۸) میزان اختلاف پارامترهای افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست را نشان می‌دهد. براساس این شکل با افزایش عدد فرود در بالادست، میزان این اختلاف برای پارامتر افت انرژی نسبت به پایین‌دست افزایش یافته است. همچنین با بررسی جزئی‌تر شکل‌های (۶) تا (۸) مشخص می‌شود، میزان افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست، به ترتیب به میزان ۱۱/۴۳ و ۶۵/۰۳ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد است.

شکل (۹)، تغییرات انرژی مخصوص در مقاطع مختلف به‌ازای مقادیر مختلف دبی جریان را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی نام مقطع و محور قائم مقادیر انرژی مخصوص را بر حسب متر آب نمایش می‌دهد. با توجه به شکل مذکور بیشترین مقدار افت انرژی مربوط به قبل از انقباض ناگهانی می‌باشد (بین مقاطع A و C) که در این مقطع با افزایش دبی جریان و متعاقباً با افزایش عدد فرود، میزان افت انرژی بین مقاطع A تا C به شدت افزایش یافته است.



شکل ۸- اختلاف افت انرژی نسبی با پرش هیدرولیکی آزاد



شکل ۹- تغییرات انرژی مخصوص در مقاطع مختلف به‌ازای مقادیر دبی جریان

- Gohari A, Farhoudi J, "The Characteristics of Hydraulic Jump on Rough Bed Stilling Basins", 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 2009, 9-14.
- Hager WH, Dupraz PA, "Discharge characteristics of local, discontinuous contractions", Journal of Hydraulic, 1985, 23(5), 421-433.
- Henderson F.M., "Open channel flow", Macmillan, New York, 1966.
- Izadjoo F, Shafai-Bajestan M, "Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin", Journal of Applied Sciences, 2007, 7(8), 1164-1169.
- Jan CDS, Chang CJ, "Hydraulic Jumps in an Inclined Rectangular Chute Contraction", Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(11), 949-958.
- Mason PJ, "Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools", International Water Power & Dam Construction, 1993, 45(9), 40-45.
- Peterka AJ, "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators", 7th Ed., Engineering Monograph 25, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, 1983.
- Rajaratnam N, Hurtig K, "Screen-Type Energy Dissipater for Hydraulic Structures", Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(4), 310-312.
- Rajaratnam N, Subramanya K, "Flow immediately below submerged sluice gate", Journal of Hydraulic Engineering, 1977, 93(HY4), 57-77.
- Wu B, Molinas A, "Choked Flows through Contractions", Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(8), 657-662.
- Yarnell DL, "Bridge piers as channel obstructions", Tech. Bull. No. 442, U.S. 1934, Department of Agriculture, Washington, D.C.
- ۶- مراجع  
 ابریشمی ج، اسماعیلی ک، "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله مثبت"، امیرکبیر، ۱۳۷۶، ۹(۳۵)، ۲۷۶-۲۹۲.
- اسماعیلی ک، ابریشمی ج، "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله منفی"، استقلال، ۱۳۷۹، ۱۹(۲)، ۹۷-۱۱۰.
- جم م، مرودشتی ا، طالب بیدختی ن، "ارزیابی پرش هیدرولیکی روی حوضچه دنداندار بلوکی"، مجله هیدرولیک، ۱۳۹۳، ۱(۱)، ۱-۱۰.
- راور ز، فرهودی ج، نژندعلی ع، "تاثیر بستر زبر ذوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی"، نشریه آب و خاک، ۱۳۹۱، ۲۶(۱)، ۸۵-۹۴.
- صادق‌فام س، "بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی ناشی از صفحات مشبک"، دانشگاه رازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.
- کاتورانی س، کاشفی‌پور س م، "اثر مشخصات هندسی مانع و شیب کف دراپ روی شرایط هیدرولیکی جریان در دراپ‌های مانع‌دار"، مجله مهندسی آبیاری، ۱۳۹۳، ۲۷(۲)، ۵۱-۵۹.
- ولی‌نیا م، ایوب‌زاده س ع، یاسی م، "بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از دریچه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی"، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳۹۳، ۳(۳)، ۱-۱۰.
- Belaud G, Cassan L, and Baume JP, "Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement", Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(12), 1086-1091.
- Bradley JN, "Hydraulics of bridge waterways", Journal of Hydraulic, 1973, Des. No. 1 .U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Carvalho RF, Leandro J, "Hydraulic Characteristics of a Drop Square Manhole with a Downstream Control Gate", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(6), 569-576.
- Chanson H, "Energy Dissipation and Drop Structures in Ancient times: the Roman Dropshafts", Water 99 Joint Congress, Brisbane, Australia, 1999, 987-992.
- Chow VT, "Open channel hydraulics", McGraw-Hill, New York, 1959.
- Dey S, Raikar V, "Scour in Long Contractions", Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(12), 1036-1049.
- Espinoza EVM, Zevallos EJMK, "Scour in Non-Cohesive Soil Due to the Impact of Jet Spillway Out of Ski Jump", Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, 2005, 1-11.
- Espinoza EVM, Pfister M, Hager WH, Minor HE, "Aeration Characteristics of Ski Jump Jets", Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(1), 90-97.



## EXTENDED ABSTRACT

# Experimental Investigation of Energy Dissipation in the Sudden Choked Flow with Free Surfaces

Rasul Daneshfaraz <sup>a,\*</sup>, Ali Rezazadeh Joudi <sup>b</sup>, Sina Sadeghfam <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>b</sup> Young Researchers and Elite Club, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

**Received:** 20 October 2016; **Accepted:** 21 May 2017

### Keywords:

Energy dissipation, Experimental investigation, Choked flow, Hydraulic free jump.

## 1. Introduction

One problem of accumulation and water flow is the increase in the kinetic energy experienced by the flow. Amortized energy regulators can be used to reduce this effect. If the kinetic energy of the falling flow is not controlled, considerable damage may be done to canals and downstream, structures. Due to the importance of making structures for energy dissipation lots of studies have been done so far that for instance studies of Peterka 1983 and Carvalho and Leandro (2012) must be noticed. A hydraulic jump is a common phenomenon that occurs downstream of hydraulic structures, such as weirs and grates which increase the fluid depth by converting from supercritical to subcritical flow conditions in a relatively short range. These jumps have an important role in the energy dissipation. The possibility of shrinking sections in the supercritical flow that may result from construction of a bridge foundation makes it necessary to calculate the energy dissipation caused by exposure to supercritical flow. In this study, supercritical flow behavior near sudden constrictions is evaluated.

## 2. Methodology

In studying the effective flow parameters, physical models were built in the hydraulic laboratory of the University of Maragheh. The channel has a length of 5 meters, a width of 30 cm and a height of 50 cm. The walls are made from polymer plates to provide good visibility. The flow current is provided by two channel pumps installed in a tank. The pumps provide between 300 and 1000 liters per minute of water flow. Flowrate measurements were made by a rotameter on a drift tube. Comparisons of rotameter flow measurements with velocity based flow calculations were made. In this study, a slide valve is used to help create supercritical flow the slide valve is installed at a distance of 5.1 meters from the entrance channel. To create a sudden contraction in the flow path, panels with length of 50 cm, width of 5.7 cm and height of 45 cm were used. The panels were, polished to create a flat surface that were both oil and water resistant. The polishing also removed sharp corners in the system. Two triangular panels of 5.7 cm length of 5.22 cm thickness were used at the end of the structure. Water depths were measured using a point gage connected to a computer. The gage point accurately measures 5.0 mm in depth and is positioned on a carriage that is mounted to be able to move in the longitudinal and transverse directions. Computerized data collection will result in data collection at one-minute intervals at desired measurement locations. Measurements of the depth of flow at sections C, D, E, F, and B will be taken. Figure 1 shows twitching schematic image of the test plan. In this way, section A, follows the supercritical valves, section C. The flow immediately is choked upstream f locations D, E, and F, respectively, the flow at the beginning, middle and end of the contract period. Section B shows the flow after a transformation.

\* Corresponding Author

E-mail addresses: daneshfaraz@maragheh.ac.ir (Rasul Daneshfaraz), alijoudi66@gmail.com (Ali Rezazadeh Joudi), s.sadeghfam@maragheh.ac.ir (Sina Sadeghfam).

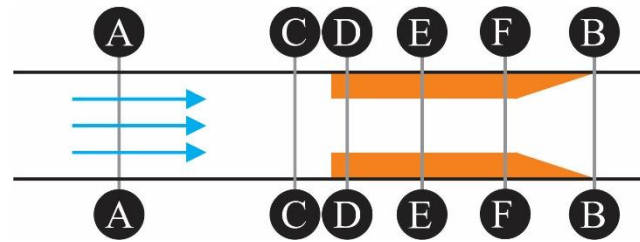


Fig. 1. Schematic illustration of test plan and measurement locations

### 3. Results and discussion

In this study, the Froude number is used as the main parameter and takes values in the range of 3 to 8. The Froude number was studied that by changing the input discharge. Evaluation of the results using two dimensionless parameters, the energy dissipation of the upstream ( $\Delta E_{AB}/E_A$ ) and downstream energy dissipation ( $\Delta E_{AB}/E_B$ ) have been made. In all cases, the energy dissipation caused by a sudden contraction, is greater than the energy dissipation caused by a classic free jump that this is due to eddy discharges in the cross-shrunk. The highest amount of energy dissipation is related to the sudden contraction at this stage to increase the flow rate and subsequently increasing the Froude number. The results show that the energy dissipation upstream and downstream, respectively, are 11.43 and 65.03 percent that of the free hydraulic jump. A closer examination of the results shows that as the upstream Froude number increases, the difference between the two parameters of energy loss ratio also increases.

### 4. Conclusions

The results indicate that in all cases, the energy dissipation caused by a sudden contraction, is greater than the energy dissipation caused by a classic free jump. The energy loss is related to the sudden contraction at this stage and the increase in velocity and subsequently the Froude number. The results also show that choked point is effective in stabilizing the jump length.

### 5. References

- Carvalho RF, Leandro J, "Hydraulic Characteristics of a Drop Square Manhole with a Downstream Control Gate", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(6), 569-576.
- Peterka AJ, "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators", 7th Ed., Engineering Monograph 25, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, 1983.