



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۴۴-۳۳)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.334538.669141>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Experimental Study of Hysteretic Behavior of Supercritical Regime on Hydraulic parameters of Flow against Gabion Contraction

RASOUL DANESHFARAZ^{*1}, EHSAN AMINVASH², AMIR NAJIBI¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

2. Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

(Received: Nov. 25, 2021- Revised: Jan. 21, 2022- Accepted: Jan. 30, 2022)

ABSTRACT

In the present study, the hydraulic characteristics of the flow and the phenomenon of flow hysteresis with the supercritical regime, which can appear in the vicinity of the additional structures in the flow path, such as contracting of the cross-section of the channel, were investigated experimentally. To achieve the objectives of the study, two average diameters of materials inside the gabion basket with sizes of 1.28 and 2.08 cm were used. The inlet flow rate increased in the primary flow and decreased in the secondary flow in the range of 300 to 650 liters per minute. The results of the present study show that by increasing the flow rate and then decreasing the flow, two different behaviors and regimes of flow are observed in the same experimentally conditions. So that with the formation of the phenomenon of hysteresis, the relative depths of the flow were increased by 69.39% and the Froude number of the gabion contraction section has increased significantly by 69.15% and the main cause of the hysteretic behavior of the flow is the current behavior of the flow following its previous behavior. On the other hand, the rate of flow energy dissipation in the use of gabion basket has increased by a relative amount of 71.35% compared to simple contracting. The results also showed that by increasing the size of the constriction and increasing the average diameter of materials in the gabion basket increases energy dissipation and relative downstream depth.

Keywords: Hysteretic Behavior; Relative Energy Dissipation; Relative Downstream Depth; Downstream Froude Number.

* Corresponding Author's Email: daneshfaraz@yahoo.com

بررسی آزمایشگاهی رفتار هیسترتیک رژیم فوق بحرانی بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در برابر تنگ‌شدگی گابیونی

رسول دانشفراز^{۱*}، احسان امین‌وش^۲، امیر نجیبی^۱

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

۲. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰)

چکیده

در تحقیق حاضر، مشخصات هیدرولیکی جریان و پدیده هیسترتیزس جریان با رژیم فوق بحرانی که می‌تواند در مجاورت سازه‌های الحاقی قرار گرفته در مسیر جریان مانند تنگ‌شدگی مقطع عرضی کانال ظاهر شود، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به اهداف پژوهش، از دو قطر متوسط مصالح در داخل سبد گابیونی با اندازه‌های ۱/۲۸ و ۲/۰۸ سانتی‌متر استفاده گردید. دبی جریان ورودی به صورت افزایشی در جریان اولیه و به صورت کاهش در جریان ثانویه و در محدوده ۳۰۰ تا ۶۵۰ لیتر بر دقیقه وارد فلوم آزمایشگاهی گردید. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و سپس کاهش جریان، دو رفتار و رژیم متفاوت از جریان در شرایط یکسان آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. به طوری که با تشکیل پدیده هیسترتیزس اعماق نسبی جریان به میزان ۶۹/۳۹ درصد و عدد فرود مقطع تنگ‌شدگی گابیونی به میزان ۶۹/۱۵ درصد افزایش چشمگیری داشته است و علت اصلی رفتار هیسترتیک جریان تبعیت رفتار فعلی جریان از رفتار قبلی آن می‌باشد. از طرفی میزان استهلاك انرژی جریان در استفاده از سبد گابیونی به مقدار نسبی ۷۱/۳۵ درصد نسبت به تنگ‌شدگی ساده افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش اندازه تنگ‌شدگی و افزایش قطر متوسط مصالح در سبد گابیونی باعث افزایش استهلاك انرژی و عمق نسبی پایین دست می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: رفتار هیسترتیک جریان، استهلاك انرژی نسبی، عمق نسبی پایین دست، عدد فرود پایین دست.

مقدمه

حالت تشکیل و عدم تشکیل پرش هیدرولیکی محتمل است. وجود چنین رفتار متناقضی به دلیل پدیده هیسترتیزس اتفاق می‌افتد که مطالعات بسیار محدودی برای شناخت آن وجود داشته و برای بستر زبر تاکنون بررسی نشده است. وقوع پدیده هیسترتیزس در برخورد جریان با مانع عموماً قابل انتظار است. به طوری که برای یک جریان ورودی یکسان، دو رفتار متفاوت مشاهده می‌شود که این رفتار متفاوت وابسته به چرخه جریان است. منظور از چرخه جریان، افزایش دبی تا یک مقدار مشخص و سپس کاهش آن به دبی اولیه است. این پدیده یکی از موضوعات مهمی است که در کارهای عملی در طبیعت رخ می‌دهد ولی متأسفانه در طراحی سازه‌های هیدرولیکی تاکنون در نظر گرفته نشده است. تحقیقات انجام گرفته را می‌توان به دودسته تقسیم کرد، که دسته اول مطالعات مربوط به تنگ‌شدگی مسیر جریان و استهلاك انرژی و دسته دوم مربوط به سازه‌های گابیونی می‌باشد. دسته اول مطالعات مربوط به تنگ‌شدگی مسیر جریان به

انرژی جنبشی بالای جریان، یکی از مهم‌ترین موارد و مشکلاتی است که در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی وجود دارد. این انرژی مخرب در صورت عدم کنترل و استهلاك، باعث ایجاد خسارات قابل توجهی در سیستم‌های انتقال آب می‌شود. سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، به جهت کاهش سرعت و انرژی جریان پائین دست سازه‌های هیدرولیکی، به عنوان مقطع کنترل استفاده می‌شود (Daneshfaraz et al, 2020). میزان افزایش استهلاك انرژی، رابطه مستقیمی با تلاطم و آشفتگی جریان دارد، به همین دلیل مقدار بسیار قابل توجهی از استهلاك انرژی با کوچک کردن یک منطقه از کانال قابل دسترسی می‌باشد (Daneshfaraz et al, 2021a). ایجاد انقباض ناگهانی گابیونی در مسیر جریان با ایجاد پرش هیدرولیکی و با ورود جریان به منطقه گابیونی باعث مستهلک شدن انرژی جریان می‌گردد. یکی از مهم‌ترین اهداف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار متناقض جریان فوق بحرانی در برابر تنگ‌شدگی با سبد گابیونی بوده که در این نوع رفتار، هر دو

میزان افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. Daneshfaraz et al. (2017a) بررسی آزمایشگاهی آنها نشان‌دهنده این است که میزان کاهش عرض تنگ‌شدگی استهلاک انرژی را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد و لی تغییر زبری در دیواره تنگ‌شدگی تأثیر چندانی بر کاهش استهلاک انرژی ندارد.

مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده به‌منظور بررسی رفتار هیستریک پارامترهای هیدرولیکی جریان در مواجهه با موانع مختلف را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: گروه اول مطالعات مربوط به برآمدگی کف کانال؛ گروه دوم به مقاطع تنگ‌شدگی؛ گروه سوم مربوط پایه‌های پل و گروه چهارم مربوط به دریچه می‌باشد.

اولین مطالعه مربوط به پدیده هیستریک در گروه که به بررسی برآمدگی کف کانال می‌پردازد، به تحقیقات آبکاسیس و کوینتلا (Abecasis and Quintela, 1964) برمی‌گردد. مطالعات در این گروه بیشتر به بررسی رفتار تئوری و آزمایشگاهی پدیده هیستریک بر روی برآمدگی کف با عرض ثابت می‌باشند. مهم‌ترین تحقیق در این زمینه مربوط به آستریا (Austria, 1987)، (Lawrence, 1987)، بینز و وایت‌هد (Baines and Whitehead, 2003) و دفینا و سوزین (Defina and Susin, 2006) است. آستریا (Austria, 1987) به توصیف رفتار هیستریک جریان بر روی برآمدگی کف کانال با استفاده از تئوری کاتاستروف پرداخته است. تئوری استفاده شده از طرف ایشان مبتنی بر استفاده از معادلات کلاسیک جریان نظیر معادلات انرژی مخصوص در کنار معادلات تئوری کاتاستروف است. لارنس (Lawrence, 1987) به بررسی جریان دائمی عبوری از روی برآمدگی کف کانال و رفتارهای مختلف آن پرداخت. نتایج نشان داد که ممکن است دو حالت پایدار برای شرایط ورودی یکسان وجود داشته باشد که منجر به تشکیل حلقه هیستریک می‌گردد.

بینز و وایت‌هد (Baines and Whitehead, 2003) رفتار هیستریک جریان را بر روی برآمدگی کف کانال به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج مطالعات تئوری و آزمایشگاهی نشان داد که در شرایط یکسان جریان ورودی، دو حالت متفاوت برای پایداری جریان ایجاد می‌شود که دلالت بر وجود حلقه هیستریک دارد. دفینا و سوزین (Defina and Susin, 2006) در ابتدا به‌صورت تئوریک روابطی جهت بررسی این پدیده بر روی برآمدگی ارائه کرده و سپس به‌صورت آزمایشگاهی آن را بررسی کردند. آنها دو عکس‌العمل ضعیف و قوی در شرایط دبی ورودی یکسان برای جریان تعریف کردند که عکس‌العمل ضعیف زمانی است که رژیم جریان فوق‌بحرانی بوده و مانع بر روی تغییر رژیم جریان تأثیرگذار نباشد. در مقابل، عکس‌العمل قوی دلالت بر

تحقیق (Hager et al. 1985) برمی‌گردد. آنها مطالعاتی را به‌صورت آزمایشگاهی بر روی تأثیر پارامترهای هندسی از قبیل زاویه جریان ورودی و خروجی را بر دبی جریان بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول نسبی انقباض، استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. (Wu and Mulinas 2001) با مطالعه بر روی برخورد جریان زیربحرانی با انقباض ایجاد شده در مسیر جریان به این نتیجه دست یافتند که ضریب دبی جریان متأثر از نسبت بازشدگی محل انقباض بوده است. (Day and Raikar 2007) با مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی در انقباض مسیر جریان با رژیم زیربحرانی به این نتیجه دست یافتند که عمق متعادل آبشستگی با کاهش نسبت بازشدگی در مقطع انقباض یافته و افزایش اندازه ذرات رسوبی، افزایش می‌یابد.

(Jan and Chang 2009) پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی را در یک شوت با انقباض تدریجی بررسی کردند. آنها در این تحقیق از چندین اندازه تنگ‌شدگی استفاده کردند که نتایج بیانگر این بود که با افزایش عدد فرود، استهلاک نسبی انرژی جریان در تمامی تنگ‌شدگی افزایش یافته است. (Sadeghi et al, 2015) به بررسی تأثیر شکل دیواره‌های تبدیل واگرا در خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که به‌ازای طول ثابت دیواره تبدیل، انحنا دیواره‌ها باعث کاهش سرعت و همچنین کاهش نرخ استهلاک انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی شده است. (Daneshfaraz et al, 2017a) بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در تنگ‌شدگی و واگرایی به این نتیجه رسیدند که افت انرژی در تنگ‌شدگی به طور متوسط به میزان ۸/۷۴ درصد در مقایسه با واگرایی کاهش می‌یابد. (Daneshfaraz et al, 2017b) با استفاده از روش‌های عددی به بررسی استهلاک انرژی جریان در پیچ ۹۰ درجه و با حضور المان‌های تنگ‌شدگی پرداختند، که نتایج نشان داد در محل پیچ ۹۰ درجه، استفاده از تنگ‌شدگی باعث افزایش افت فشار شده است.

مطالعه آزمایشگاهی استهلاک انرژی در تنگ‌شدگی ناگهانی توسط (Daneshfaraz et al. 2018) نشان داد که استهلاک انرژی ناشی از تنگ‌شدگی بیشتر از استهلاک ناشی از پرش هیدرولیکی است، به‌طوری‌که این میزان استهلاک نسبت به بالادست ۱۱/۴۳ درصد و نسبت به پایین‌دست ۶۵ درصد بیشتر از پرش هیدرولیکی آزاد می‌باشد. (Daneshfaraz et al. 2020, 2021a) با بررسی عددی تأثیر انقباض ناگهانی و تنگ‌شدگی هلالی شکل با اندازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵ سانتی‌متر بر میزان استهلاک انرژی در جریان فوق‌بحرانی با استفاده از مدل آشفتگی RNG، به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان تنگ‌شدگی،

پائین دست دریچه و همچنین نسبت بازشدگی دریچه ارائه کردند. نتایج آنها نیز موید وجود رفتار هیستریتیک جریان است. همچنین آزمایش‌های انجام گرفته، صحت نظریه ارائه شده در تأثیر اعداد فرود بالادست و پائین دست در رفتار هیستریتیک را تأیید کرد.

ویرو و دفینا (Viero and Defina, 2017) با ایجاد برآمدگی کف و انقباض موضعی در کانال، روابط تئوری جهت توصیف وقوع هیستریزس در بالادست و پائین دست موانع را توسعه دادند. نتایج نشان داد که در هر دو مدل مربوط به برآمدگی و انقباض ناگهانی، دامنه ناحیه هیستریزس گسترده بوده به طوری که در بسیاری از موارد عملی، احتمال وقوع هیستریزس افزایش می‌یابد.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که با وجود اندک مطالعات تئوریک و آزمایشگاهی انجام شده در ارتباط با رفتار هیستریتیک جریان، نیاز به انجام مطالعات گسترده‌تری برای بررسی ابعاد نامعلوم رفتار جریان وجود دارد. این ابعاد نامعلوم در موانعی نظیر پایه‌های پل که باعث کاهش مقطع عرضی جریان می‌شود، محسوس‌تر بوده که در مطالعات پیشین نیز کمابیش به آن اشاره شده است اما در زمینه تنگ‌شدگی گابیونی تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است. عموماً روابط تحلیلی در چنین موانعی تطابق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به سایر موانع دارد. علت این امر می‌تواند به این دلیل باشد که الگوی جریان در برابر این موانع، امکان ایجاد یک نظریه دقیق منطبق بر رویکرد یک‌بعدی جریان را فراهم نمی‌سازد. لذا در تحقیق حاضر، برای نخستین بار به بررسی رفتار هیستریتیک جریان در برابر تنگ‌شدگی گابیونی پرداخته شده و پروفیل‌های طولی ایجاد شده و رژیم‌های احتمالی جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

امکانات آزمایشگاهی

تجهیزات فلوم آزمایشگاهی به همراه مشخصات مدل تحقیق حاضر در جدول ۱ به تفصیل ارائه شده است. در پژوهش حاضر، اعماق جریان در ۵ نقطه از عرض کانال برداشت شده و عمق متوسط آن‌ها به عنوان عمق نهایی و محدوده دبی به کاررفته در این تحقیق از ۳۰۰ الی ۶۵۰ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. مدل آزمایشگاهی شامل تنگ‌شدگی ناگهانی مسیر جریان با استفاده از باکس‌های شیشه‌ای به عنوان مدل شاهد و تنگ‌شدگی ناگهانی با استفاده از سبدهای گابیونی می‌باشد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، در سبد گابیونی از مصالح شن با دو قطر متوسط مصالح ۲/۲۸ و ۱/۲۸ سانتی‌متر، تخلخل ۴۰ و ۲۰ درصد با اندازه‌های تنگ‌شدگی ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر (۵ و ۷/۵ سانتی‌متر از هر طرف) استفاده شده است. شماتیک کلی فلوم آزمایشگاهی به همراه مدل‌های ایجاد شده و تجهیزات نصب شده

شرایطی دارد که مانع به واسطه پرش هیدرولیکی باعث تغییر رژیم جریان به زیربحرانی می‌شود.

گروه دوم مطالعات مربوط به انقباض مقطعی در مسیر جریان است و در این راستا می‌توان به تحقیقات آکرز و بوخوف (Akers & Bokhove, 2008) اشاره کرد. آن‌ها به صورت تئوریک و صحرانی رفتار هیستریتیک را در انقباض تدریجی بررسی کردند. نتایج نشان داد که امواج مورب جریان فوق بحرانی می‌تواند تحت تأثیر اثرات دیگری از جمله کشش سطحی قرار گرفته باشد. دفینا و ویرو (Defina and Viero, 2010) حالت‌های مختلف ایجاد شده از جریان در تنگ‌شدگی تدریجی را بررسی کردند. نتایج بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی آنان نشان داد که اصطکاک و شیب کف کانال بر پایداری جریان تأثیر داشته و می‌تواند حلقه‌های مختلف هیستریتیک را ایجاد کند. صادق‌فام و همکاران (Sadeghfam et al., 2017) با استفاده از معادلات کلاسیک هیدرولیک و تئوری کاتاستروف رفتار هیستریتیک جریان فوق-بحرانی در مواجهه با تنگ‌شدگی موضعی کانال را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی آنان نشان داد که به کارگیری روابط مربوط به تئوری کاتاستروف در کنار روابط کلاسیک قابلیت توصیف رفتار هیستریتیک را دارد.

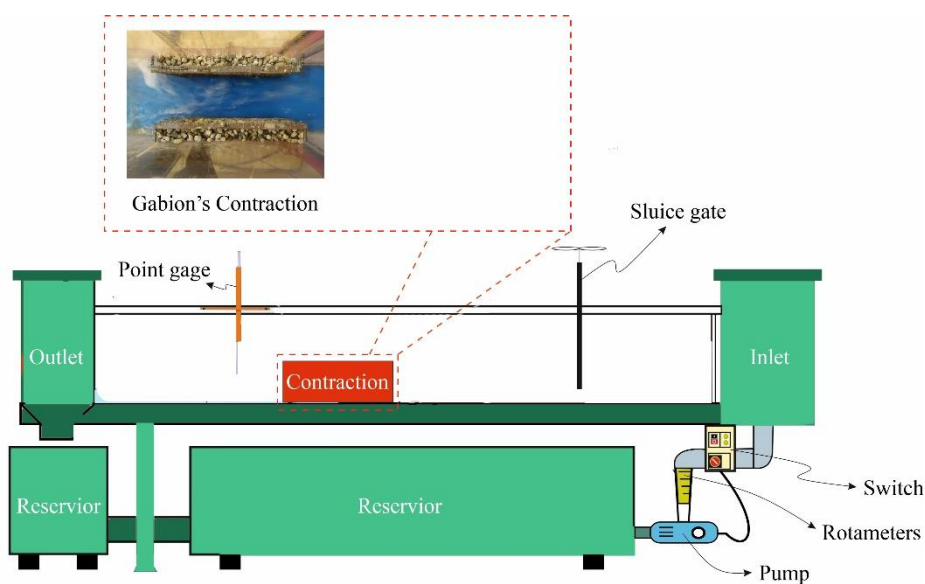
گروه سوم مطالعات در زمینه پایه‌های پل بوده و در این زمینه می‌توان به تحقیق دفینا و سوزین (Defina and Susin, 2006) اشاره نمود. آن‌ها در این تحقیق از چندین پایه پل با قطرهای مختلف استفاده کرده و رفتار جریان را در مواجهه با پایه‌های بکار گرفته شده بررسی کردند. همچنین آن‌ها یک رابطه تئوریک جهت پیش‌بینی وقوع هیستریزس هیدرولیکی ارائه کردند. نتایج نشان داد که در برخورد جریان با پایه‌های پل مشابه با تنگ‌شدگی، دو عکس‌العمل متفاوت ضعیف و قوی در شرایط یکسان ورودی ایجاد می‌شود.

نخستین تحقیق در گروه چهارم مطالعات مربوط به تأثیر دریچه بر رفتار هیستریتیک جریان، به تحقیق دفینا و سوزین (Defina and Susin, 2003; 2006) برمی‌گردد. آن‌ها یک رابطه تئوریک جهت بررسی این رفتار ارائه کرده و سپس به صورت آزمایشگاهی آن را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که رفتار هیستریتیک برای یک میزان بازشدگی دریچه در دبی‌های مختلف، دو حالت می‌تواند وجود داشته باشد که حالت اول عدم تشکیل پرش هیدرولیکی و حالت دوم تشکیل پرش هیدرولیکی در یک میزان بازشدگی دریچه است. ویرو و دفینا (Viero and Defina, 2018) رفتار جریان با رژیم فوق‌بحرانی را در نزدیکی دریچه قائم بررسی کردند. آن‌ها یک تئوری برای پیش‌بینی وقوع هیستریزس در مجاورت دریچه بر اساس عدد فرود بالادست و

بر روی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فلوم آزمایشی و تجهیزات نصب شده روی آن

تجهیزات و مواد	مشخصات			
	ابعاد (ارتفاع×عرض×طول) (m)	مواد	دقت اندازه گیری	سایر مشخصات
فلوم	۵×۰/۳×۰/۴۵	پلکسی گلس	-----	----
ابزار اندازه گیری				
پمپ	مورد 2	فلز	±۴%	ظرفیت Lit/min ۴۵۰-۱۵۰
فلومتر	مورد 2	روتامتر	±۳%	----
نقطه سنج	----	فلز	±۱ mm	اندازه گیری عمق
مدل (گابیون)				
ساده	(از هر طرف) ۰/۵×۰/۰۵×۰/۱۵	شیشه ۶ mm	----	مقدار انقباض کل: ۱۵ و ۱۰ cm
تنگ شدگی ناگهانی	(از هر طرف) ۰/۵×۰/۰۷۵×۰/۱۵	میلگرد و توری	----	مقدار انقباض کل: ۱۵ و ۱۰ cm
تنگ شدگی ناگهانی گابیونی	(از هر طرف) ۰/۵×۰/۰۷۵×۰/۱۵	فلزی	----	۱۵ و ۱۰ cm
اندازه زبری	$D_{50} = ۲/۰۸ \text{ cm}$	سنگ ریزه	----	----
	$D_{50} = ۱/۲۸ \text{ cm}$			



شکل ۱- شکل شکاتیک فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر

تحلیل ابعادی

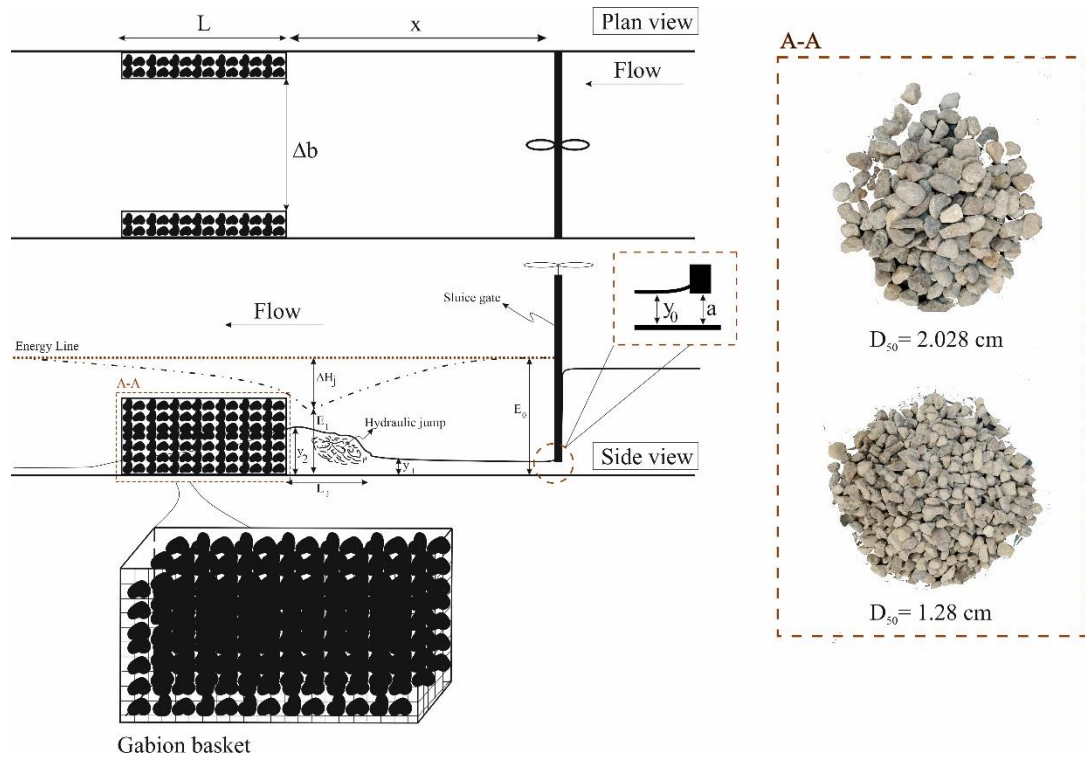
باتوجه به شکل ۲ و با در نظر گرفتن خصوصیات هندسی و هیدرولیکی مدل های تحقیق حاضر، پارامترهای تأثیرگذار برای بررسی هیدرولیکی تنگ شدگی ناگهانی گابیونی به صورت رابطه (۱) ارائه می گردد.

(رابطه ۱)

$$f1(q, \mu, g, \rho, \varepsilon, y_0, y_1, y_2, y_{cr}, v_2, B, D_{50}, L_{jump}, E_0, E_2, \Delta b, a, L, x) = 0$$

که در رابطه فوق، q دبی واحد عرض جریان، μ لزوجت دینامیکی، g شتاب گرانش جاذبه زمین، ρ چگالی سیال، ε درصد

تخلخل سنگ دانه ها، y_0 عمق جریان عبوری از زیر دریاچه، y_1 عمق قبل از پرش هیدرولیکی، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، y_{cr} عمق بحرانی، B عرض کانال، D_{50} قطر متوسط مصالح سبب گابیونی، L_{jump} طول پرش هیدرولیکی، E_0 انرژی مخصوص زیر دریاچه، E_2 انرژی مخصوص مقطع پایین دست، Δb عرض مسیر جریان در محل گابیون، a باز شدگی دریاچه، L طول ناحیه گابیونی و x فاصله دریاچه تا سبب گابیونی می باشد.



شکل ۲- شماتیک و پارامترهای هندسی و هیدرولیکی تنگ‌شدگی گابیونی و مصالح به کاررفته

همچنین با ساده‌سازی و تقسیم برخی از پارامترهای بدون بعد برهم جهت معنی‌دار کردن پارامترها، رابطه ۳ به صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$f3(Fr_0, Fr_2, \varepsilon, \frac{y_1}{y_2}, \frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_{jump}}{y_{cr}}, \frac{D_{50}}{\Delta b}) = 0 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در نهایت، پارامترهای وابسته بدون بعد برای بررسی پارامترهای تحقیق حاضر طبق رابطه ۴ ارائه شده است.

$$\frac{y_1}{y_2}, \frac{\Delta E}{E_0}, Fr_2 = f4(Fr_0, \varepsilon, \frac{D_{50}}{\Delta b}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در رابطه فوق، y_1/y_2 اعماق نسبی مزدوج، $\Delta E/E_0$ استهلاک انرژی نسبی و Fr_2 عدد فرود مقطع پایین دست می‌باشد.

تحلیل ابعادی در تحقیق حاضر بر اساس روش پی‌باکینگهام انجام گرفت و برای استخراج پارامترهای بدون بعد، از ρ ، g و y_0 به عنوان پارامترهای تکراری، استفاده شد.

(رابطه ۲)

$$f2(Fr_0, Fr_2, Re_0, \varepsilon, \frac{y_1}{y_0}, \frac{y_2}{y_0}, \frac{y_{cr}}{y_0}, \frac{B}{y_0}, \frac{D_{50}}{y_0}, \frac{L_{jump}}{y_0}, \frac{E_0}{y_0}, \frac{E_2}{y_0}, \frac{\Delta b}{y_0}, \frac{a}{y_0}, \frac{L}{y_0}, \frac{x}{y_0}) = 0$$

در رابطه فوق به دلیل متلاطم بودن جریان ($133662 - Re_0$) در تمام دبی‌های بکار رفته از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر شده است (Daneshfaraz et al, 2020, 2021a, b). پارامترهای L/y_0 و x/y_0 به ترتیب به دلیل ثابت بودن مقادیر بازشدگی دریاچه، طول سبد گابیونی و فاصله دریاچه تا ناحیه گابیونی، از میان پارامترهای بدون بعد حذف گردیده است.

جدول ۲- محدوده متغیرهای اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های مدل

شماره مدل	D_{50} (cm), ε (%), Δb (cm)	دبی (lit/sec)	$D_{50}/\Delta b$	عدد رینولدز	فرود بالادست	فرود پایین دست
مدل ۱	$\Delta b = 15$		----			۱/۲۵ - ۲/۲۳
مدل ۲	$\Delta b = 20$		----			۱/۶۹ - ۲/۶۸
مدل ۳	۲/۰۸، ۴۰، ۱۵	۴/۱۷ - ۱۰/۸۳	۰/۱۳۸	۵۰۱۴۹ - ۱۳۳۶۶۲	۲/۱۵ - ۸/۶۶	۰/۷۶ - ۱/۳۵
مدل ۴	۱/۲۸، ۲۰، ۱۵		۰/۰۸۵			۰/۶۱ - ۰/۸۰
مدل ۵	۲/۰۸، ۴۰، ۲۰		۰/۱۰۴			۰/۸۷ - ۲/۱۰
مدل ۶	۱/۲۸، ۲۰، ۲۰		۰/۰۶۴			۰/۸۹ - ۲/۲۳

می‌دهد. لازم به توضیح است که مقطع (۰) نشان‌دهنده محل قرارگیری دریاچه مولد جریان فوق بحرانی و جریان عبوری از زیر

در شکل (۲)، مقطع (۱)، محل شروع بستر زبر و مقطع (۲) جریان بر روی بستر زبر و محل تشکیل پرش هیدرولیکی را نشان

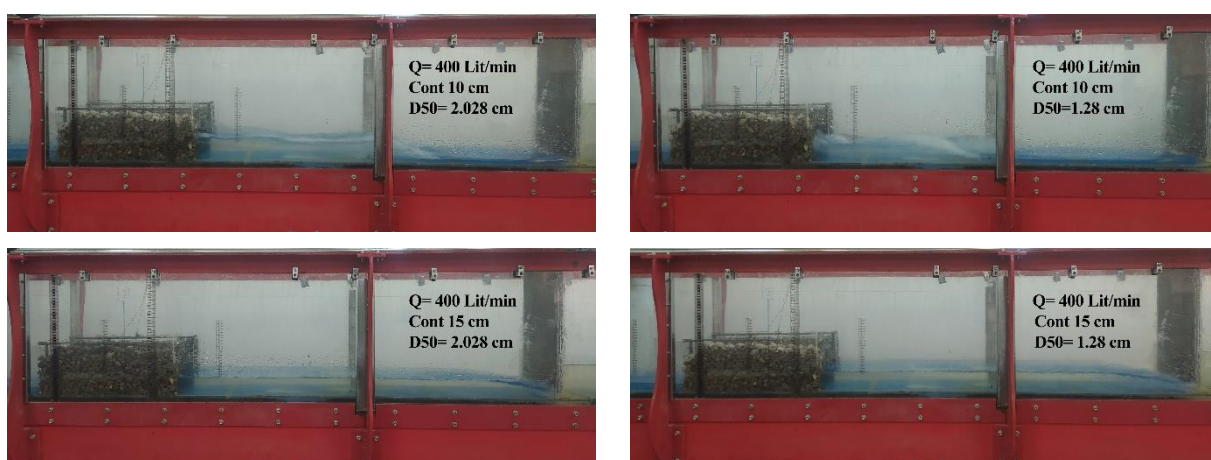
دریچه می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج مربوط به تنگ‌شدگی گابیونی

سانتی‌متر و دارای تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر هستند، تشکیل می‌گردد. در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر با قطر متوسط ۲/۰۸ و ۱/۲۸ سانتی‌متر در دبی‌های پائین، پرش هیدرولیکی مستغرق نیز تشکیل می‌شود ولی با افزایش جریان، پرش هیدرولیکی به سمت مقطع تنگ‌شدگی حرکت کرده و تبدیل به پرش کلاسیک می‌گردد. شکل ۳ تصاویری از رفتار جریان در فلوم آزمایشگاهی در تنگ‌شدگی‌های ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متری را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ تغییرات استهلاک انرژی نسبی در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد.

با جاری شدن آب در فلوم آزمایشگاهی و برخورد جریان آن با تنگ‌شدگی‌های گابیونی، به دلیل محدود شدن مقطع عرضی کانال، پس‌زدگی جریان رخ داده و در این حالت پرش هیدرولیکی مستغرق تشکیل می‌گردد. البته پرش هیدرولیکی مستغرق در تنگ‌شدگی گابیونی که دارای مصالح با قطر متوسط ۲/۰۸



شکل ۳- رفتار هیدرولیکی جریان در برابر سبد گابیونی در دبی ۴۰۰ لیتر بر دقیقه

است که در تنگ‌شدگی گابیونی ۱۰ سانتی‌متری، افزایش D_{50} مصالح سنگی در ناحیه گابیونی تأثیری بر میزان افزایش یا کاهش استهلاک انرژی ندارد. مقایسه تنگ‌شدگی‌های گابیونی تحقیق حاضر با تحقیق (Daneshfaraz et al., 2020) که به بررسی عددی تأثیر تنگ‌شدگی ناگهانی ساده پرداخته است، نشان می‌دهد که استفاده از تنگ‌شدگی گابیونی در مقایسه با حالت شاهد استهلاک انرژی را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد به طوری که این مقدار افزایش نسبت به حالت شاهد به میزان ۷۱/۳۵ درصد می‌باشد. از نظر اقتصادی نیز، استفاده از تنگ‌شدگی گابیونی به دلیل در دسترس بودن مصالح طبیعی اقتصادی‌تر بوده و می‌توان با کاهش طول حوضچه‌های آرامش، از هزینه‌های اضافی جلوگیری کرد.

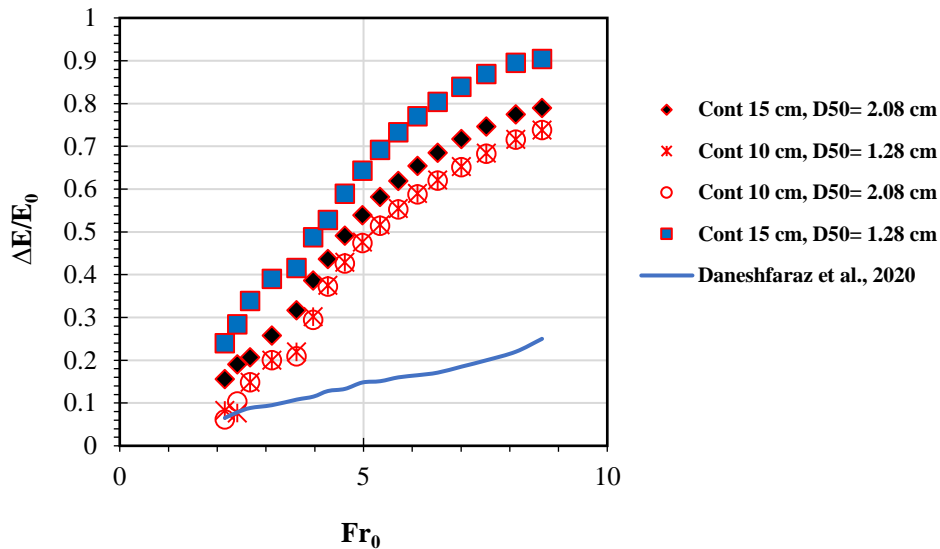
شکل ۵ نمودار ستونی تغییرات عدد فرود جریان در مقطع تنگ‌شدگی را در مدل‌های تحقیق حاضر نشان می‌دهد. باتوجه به نمودار ستونی زیر مشخص است که در تمامی دبی‌های به کاررفته در تحقیق حاضر میزان عدد فرود جریان در مقطع کنترل نسبت به عدد فرود عبوری از دریچه به مقدار زیادی کاهش یافته است که تغییرات کمی آن را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. با دقت

شکل ۴ بیانگر تغییرات استهلاک انرژی نسبی جریان در برابر عدد فرود جریان عبوری از دریچه را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان استنتاج کرد که استهلاک انرژی جریان به واسطه قرارگیری مان‌های انقباض دهنده در مسیر جریان با افزایش جریان ورودی، روند صعودی و افزایشی دارد. همچنین می‌توان دریافت که با افزایش عرض تنگ‌شدگی کانال، استهلاک و با افزایش قطر متوسط مصالح موجود در سبد گابیونی، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش قطر متوسط مصالح سنگ‌دانه‌ای موجود در سبد گابیونی و با کاهش میزان تخلخل در آن، استهلاک انرژی در گابیون با قطر متوسط ۲/۰۸ سانتی‌متر به مقدار کمی، کمتر از استهلاک انرژی در گابیون با قطر متوسط مصالح ۱/۲۸ سانتی‌متر می‌باشد. علت این امر به این دلیل است که با افزایش D_{50} در سبد گابیونی، تخلخل سنگ‌دانه‌ها کاهش یافته و فضای خالی کمتری نسبت به مصالح بزرگ‌تر برای عبور جریان از میان سنگ‌دانه‌ها ایجاد می‌شود.

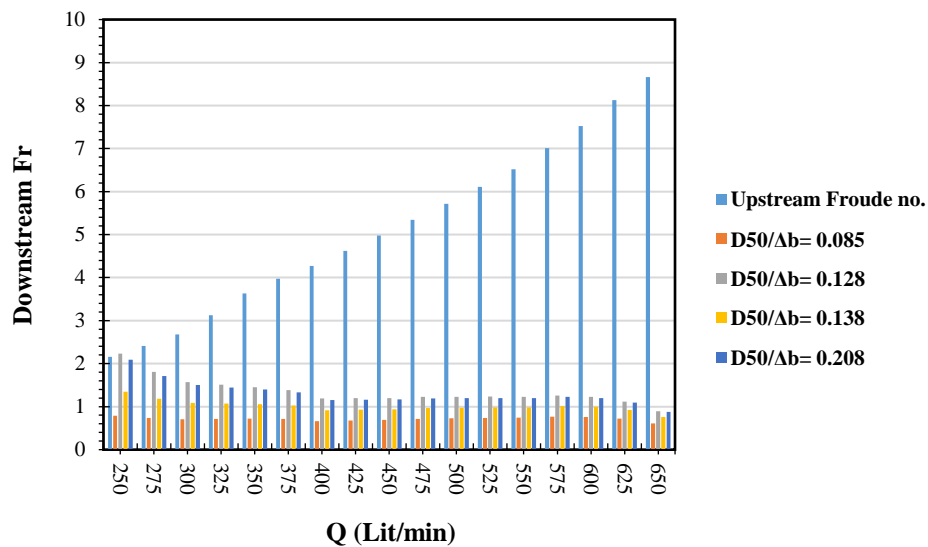
به همین علت در مصالح با D_{50} کوچک‌تر، پرش هیدرولیکی تشکیل‌یافته از نوع مستغرق بوده و با تشکیل پروفیل Back water، استهلاک انرژی نسبی افزایش می‌یابد. لازم به توضیح

۰/۲۰۸ به ترتیب به میزان نسبی ۸۵/۹۴، ۷۳/۵۷، ۸۰/۲۶ و ۷۴/۵۰ درصد کاهش چشمگیری یافته است.

در شکل می‌توان دریافت که استفاده از المان‌های انقباض دهنده در مسیر جریان به صورت گابیونی میزان عدد فرود جریان در مقطع تنگ شده در قطرهای نسبی ۰/۰۸۵، ۰/۱۲۸، ۰/۱۳۸ و



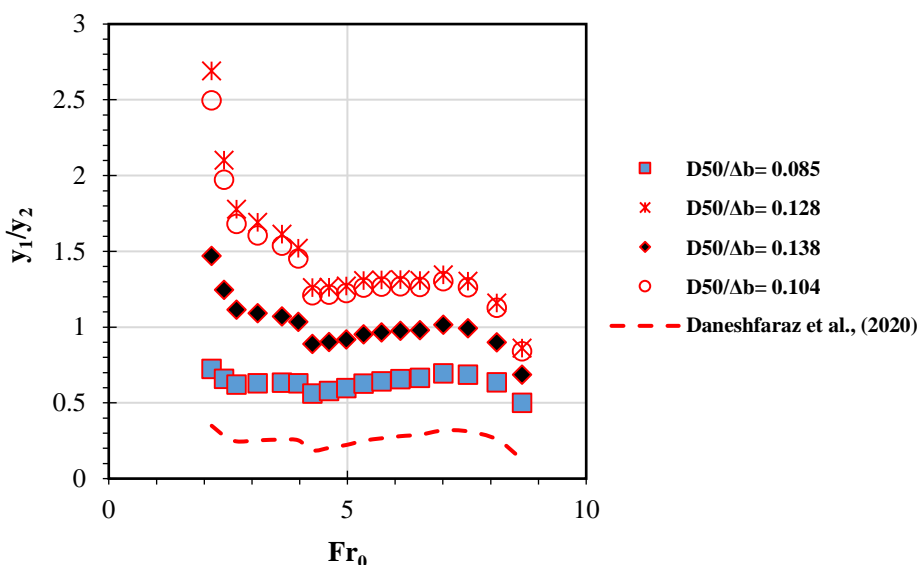
شکل ۴- تغییرات استهلاك انرژی نسبی در برابر عدد فرود عبوری از دریچه



شکل ۵- نمودار ستونی تغییرات عدد فرود جریان در مقطع تنگ‌شدگی گابیونی

سنگ‌دانه با قطر متوسط ۱/۲۸ سانتی‌متر میزان عمق مزدوج جریان نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است. با مقایسه مدل‌های تحقیق حاضر با تحقیق (Daneshfaraz et al., 2020) که به بررسی عددی تنگ‌شدگی ناگهانی با باکس‌های ساده پرداخته است استنتاج گردید که میزان اعماق مزدوج جریان در تنگ‌شدگی گابیونی نسبت به مدل شاهد آن به میزان نسبی ۷۴/۶۷ درصد افزایش داشته است.

شکل ۶ تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از دریچه را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۶ میزان اعماق نسبی جریان با افزایش عدد فرود بالادست، روند نزولی و کاهشی دارد. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش میزان قطر متوسط مصالح قرار گرفته در سبد گابیونی اعماق نسبی جریان کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که در دبی‌های پایین و در سبد گابیونی مسلح شده با سنگ‌دانه‌های ریزتر پرش هیدرولیکی تشکیل شده از نوع مستغرق بوده و به همین دلیل در



شکل ۶- نمودار تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از دریچه

نتایج مربوط به رفتار هیستریک جریان

پیکربندی پرش هیدرولیکی اجباری در تحقیق حاضر، شامل قسمت‌های مجزا می‌باشد که عبارت‌اند از: ۱- دریچه کشویی فلزی قائم که جهت اندازه‌گیری و یا کنترل جریان در کانال نصب گردیده و نقش آن در این تحقیق فقط تشکیل جریان فوق‌بحرانی می‌باشد. ۲- تغییر در مقطع عرضی کانال و محدود شدن مسیر عبور جریان با استفاده سبد گابیونی که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی شده و رژیم جریان فوق‌بحرانی را به زیربحرانی تبدیل می‌کند که بررسی پارامترهای هیدرولیکی در این حالت بسیار ضروری می‌باشد.

بر اساس اهداف تحقیق حاضر دو نوع پروفیل طولی جریان قابل تشخیص است، که این پروفیل‌ها عبارت‌اند از:

پروفیل ۱: این پروفیل نشان‌دهنده تشکیل پرش هیدرولیکی در مقاطع (۱) و (۲) می‌باشد. مقطع (۰)، جریان عبوری از زیر دریچه می‌باشد که در آن مقطع رژیم جریان عبوری از آن فوق‌بحرانی می‌باشد. به عبارت‌دیگر در مقطع (۱) جریان فوق‌بحرانی می‌باشد. این رژیم جریان توسط دریچه بالادست ایجاد شده است. در مقطع (۲) نیز به دلیل تلاطم و افزایش عمق جریان، پرش هیدرولیکی تشکیل شده و رژیم جریان به زیربحرانی منتقل می‌شود.

پروفیل ۲: این پروفیل بیانگر عدم تشکیل پرش هیدرولیکی در سرتاسر کانال آزمایشگاهی است. در اثر افزایش دبی جریان، بستر زبر دیگر قابلیت نگهداری پرش هیدرولیکی در بالادست خود را نداشته، پرش هیدرولیکی به پایین دست کانال منتقل شده و

رژیم ایجاد شده در مقاطع (۱) و (۲) فوق‌بحرانی می‌گردد. به عبارت‌دیگر رژیم جریان در تمامی مقاطع برابر رژیم عبوری از زیر دریچه و فوق‌بحرانی است.

جریان ورودی به کانال در ابتدا به صورت افزایشی از ۳۰۰ تا ۶۵۰ لیتر بر دقیقه و سپس به صورت کاهش از ۶۵۰ تا ۳۰۰ لیتر بر دقیقه با گام‌های افزایشی و کاهش ۵۰ لیتر بر دقیقه وارد فلوم آزمایشگاهی می‌گردد. لازم به ذکر است که محدوده دبی‌های آزمایش شده، جهت مشاهده رفتار هیستریک کافی بوده و پدیده هیستریزس جریان در این بازه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

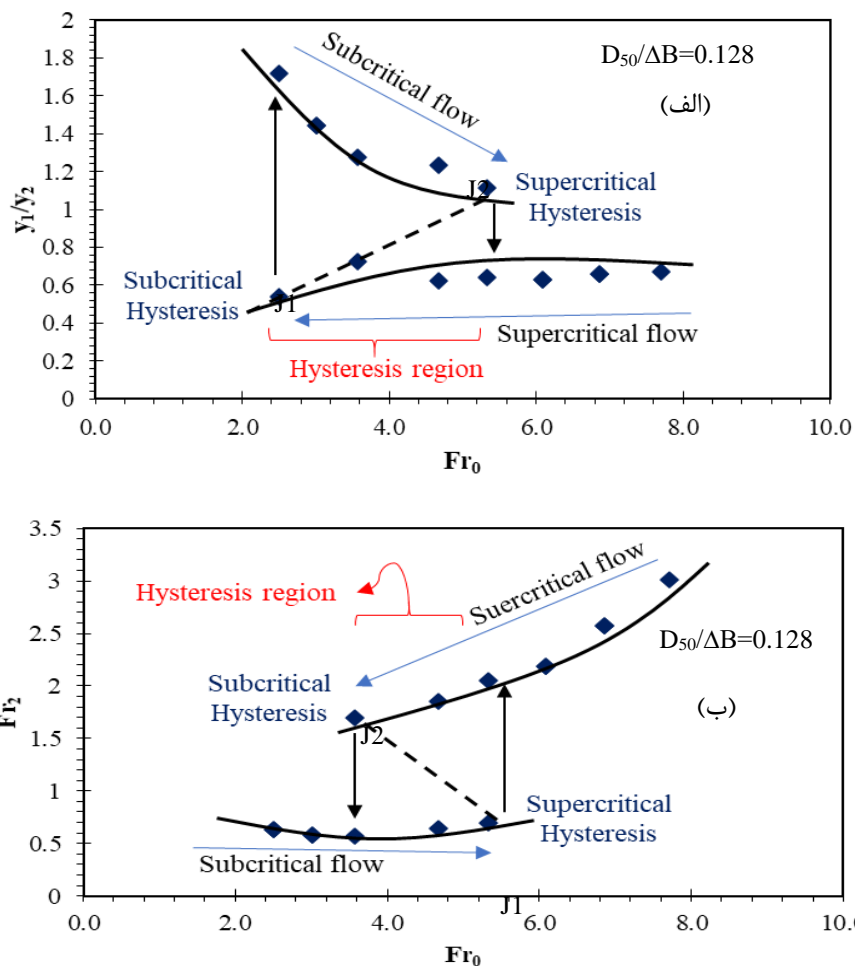
شکل ۷ به عنوان نمونه تغییرات رژیم و پروفیل‌های طولی جریان در برابر تنگ‌شدگی گابیونی ۱۰ سانتی‌متر با قطر متوسط مصالح ۱/۲۸ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. با افزایش دبی جریان تا مقدار ۴۵۰ لیتر بر دقیقه مقاطع ۱ و ۲ در رژیم زیربحرانی قرار می‌گیرند. با افزایش دبی جریان به مقدار ۵۰۰ لیتر بر دقیقه، رژیم جریان در مقطع کنترل به فوق‌بحرانی انتقال می‌یابد. سپس با کاهش تدریجی دبی تا میزان ۳۵۰ لیتر بر دقیقه، مقطع کنترل همچنان در رژیم فوق‌بحرانی بوده تا جاییکه با رسیدن به دبی ۳۰۰ لیتر بر دقیقه، رژیم موجود در مقطع کنترل زیربحرانی می‌گردد. بررسی پدیده هیستریزس در این تحقیق فقط برای تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر با مصالح با قطر متوسط ۱/۲۸ سانتی‌متر انجام گرفته است. علت این امر آن است که در تنگ‌شدگی ۱۵ سانتی‌متر به دلیل کاهش بیش از حد فضای عبوری جریان در دبی‌های حاضر، پرش هیدرولیکی تشکیل شده از نوع مستغرق می‌باشد.



شکل ۷- رفتار هیسترتیک جریان در برابر تنگ‌شدگی گابیونی

قطر متوسط $1/28$ سانتی‌متر می‌باشد. با دقت در این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در یک جریان افزایشی و کاهششی، در دو دبی مشابه با شرایط یکسان آزمایشگاهی، اعماق نسبی متفاوتی در مقاطع ۱ و ۲ ایجاد می‌شود که پدیده هیسترتیزس تشکیل شده را به‌وضوح در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد.

برای بررسی رفتار هیسترتیک جریان در مقاطع ۱ و ۲ بر اساس کمیت‌های بدون بعد (عدد فرود و اعماق نسبی) استخراج شده از آنالیز ابعادی، در شکل ۸ ارائه شده است. شکل ۸-الف و ۸-ب به ترتیب بیانگر نمودار رفتار هیسترتیک عمق مزدوج جریان و عدد فرود مقطع تنگ شده برای تنگ‌شدگی 10 سانتی‌متر با



شکل ۸- تأثیر پدیده هیسترتیزس بر عمق مزدوج جریان و عدد فرود مقطع انقباض‌یافته با تنگ‌شدگی 10 سانتی‌متر و قطر مصالح $1/28$ سانتی‌متر

ورودی 400 تا 550 لیتر بر دقیقه، به دلیل حضور سبده گابیونی در مسیر جریان، پرش هیدرولیکی تشکیل شده و هر دو مقطع ۱ و ۲ در رژیم زیربحرانی قرار می‌گیرند. در جریان ثانویه و با کاهش

در مدل $D_{50} = 1/28$ cm با افزایش و کاهش تدریجی دبی، در دبی‌های 400 و 550 لیتر بر دقیقه، رفتار هیسترتیک خود را نشان می‌دهد. در این حالت در جریان با افزایش دبی، در جریان

تشکیل پدیده هیستریک می‌شود.

نتیجه‌گیری

پدیده هیستریک در جریان فوق‌بحرانی یکی از مسائلی است که تاکنون زیاد شناخته شده نیست و در نزدیکی سازه‌های الحاقی در سیستم‌های آبرسانی، خطوط انتقال آب و کانال‌ها تشکیل می‌گردد. رفتار هیستریک جریان باعث ایجاد حالات مختلف در جریان می‌گردد که اصلی‌ترین دلیل این رفتار، وابستگی حالت فعلی جریان به حالت قبلی خود می‌باشد که بررسی این پدیده بایستی در طراحی هیدرولیکی سازه‌ها مورد توجه طراحان و مهندسان هیدرولیک قرار بگیرد. در مطالعه حاضر، جهت دستیابی به اهداف مورد نظر، که بررسی شرایط و دلایل وجود و عدم وجود پرش هیدرولیکی و تشکیل دو پروفیل متفاوت و تأثیر رفتار هیستریک است، لذا با ایجاد جریان از دبی ۳۰۰ تا ۶۵۰ لیتر بر دقیقه و با ایجاد جریان کاهشی از ۶۵۰ تا ۳۰۰ لیتر بر دقیقه با گام‌های افزایشی و کاهشی ۵۰ لیتر بر دقیقه آب وارد فلوم شد. افزایش و کاهش جریان به یک دبی برابر باعث تشکیل دو پروفیل سطحی در یک سیستم آزمایشگاهی یکسان شد. این دو پروفیل عبارت بودند از: (a) پروفیل ۱: که در آن، مقاطع ۱ و ۲ در رژیم زیربحرانی قرار می‌گیرد (b) پروفیل ۲: که در آن، مقاطع ۱ و ۲ در رژیم فوق‌بحرانی قرار می‌گیرد. با افزایش میزان تنگ‌شدگی عرض کانال با سبب گابیونی و همچنین افزایش قطر متوسط مصالح داخل سبب گابیونی استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین‌دست افزایش یافته و عدد فرود مقطع کنترل به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. همچنین با تشکیل پدیده هیستریک در تنگ‌شدگی ۱۰ سانتی‌متر با مصالح با قطر ۱/۲۸ سانتی‌متر میزان عمق مزدوج جریان و عدد فرود مقطع کنترل در یک جریان افزایشی و کاهشی به میزان ۶۹/۳۹ و ۶۹/۱۵ درصد به ترتیب افزایش می‌یابد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

تدریجی دبی، با بازگشت جریان ورودی به مقادیر ۴۰۰ تا ۵۵۰ لیتر بر دقیقه، پرش هیدرولیکی محدوده سبب گابیونی را ترک کرده و هر دو مقطع کنترل با کاهش عمق نسبت به جریان اولیه در رژیم فوق‌بحرانی قرار گرفته و پروفیل طولی ایجاد شده از نوع پروفیل ۲ می‌باشد. با افزایش دبی جریان تا مقدار ۴۰۰ لیتر بر دقیقه و رسیدن به نقطه $J1$ (Supercritical hysteresis) رژیم جریان در حالت زیربحرانی قرار دارد و با رسیدن به نقطه Supercritical hysteresis رژیم جریان به فوق‌بحرانی تبدیل می‌شود و با افزایش دبی به ۴۲۵ لیتر بر دقیقه به نقطه متقابل $J1$ می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش جزئی دبی از ۴۰۰ لیتر بر دقیقه رژیم جریان فوق‌بحرانی می‌شود. در مقابل با کاهش تدریجی دبی از ۶۵۰ لیتر بر دقیقه تا رسیدن جریان به نقطه $J2$ (Subcritical hysteresis) رژیم جریان در حالت فوق‌بحرانی بوده و با کاهش دبی به مقدار کمتر از ۳۵۰ لیتر بر دقیقه به رژیم زیربحرانی تبدیل می‌گردد. با تشکیل پدیده هیستریک، میزان عمق مزدوج جریان به میزان ۶۹/۳۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین تأثیرگذاری رفتار هیستریک بر عدد فرود جریان در مقطع تنگ شده گابیونی، مقدار عدد فرود با تشکیل پدیده هیستریک به میزان ۶۹/۱۵ درصد افزایش می‌یابد و رژیم جریان در این مقطع از زیربحرانی به فوق‌بحرانی تبدیل می‌شود.

علت اصلی تشکیل پدیده هیستریک، وابستگی حالت فعلی جریان به حالت قبلی خود می‌باشد. بدین صورت که در جریان اولیه با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش یافته و با کاهش عمق، مقاطع ۱ و ۲ که در دبی‌های پایین در رژیم زیربحرانی قرار داشتند به رژیم فوق‌بحرانی تبدیل می‌گردند. با کاهش تدریجی دبی و با رسیدن آن به مقداری که در جریان اولیه دارا بود، هر دو مقطع که در محدوده رژیم زیربحرانی بودند، این بار شاهد ایجاد رژیم فوق‌بحرانی خواهیم بود. زیرا رژیم حالت قبلی جریان در محدوده فوق‌بحرانی قرار دارد. به همین دلیل مقداری از تنش‌های ایجاد شده در جریان با کاهش دبی از بین رفته و مقداری از این تنش‌ها به عنوان تنش پسماند در سیستم باقی می‌ماند که باعث

REFERENCES

- Abecasis, F.M., Quintela, A.C. (1964). *Hysteresis in steady free-surface flow*. *Water Power* 16 (4), 147-151.
- Akers, B., Bokhove, O. (2008). Hydraulic flow through a channel contraction: Multiple steady states. *Physics of fluids*, 20(5), 1-15. <https://doi.org/10.1063/1.2909659>
- Austria, P.M. (1987). Catastrophe model for the forced hydraulic jump. *Journal of Hydraulic research*, 25 (3), 269-280. <https://doi.org/10.1080/00221688709499270>
- Baines, P. G., Whitehead, J. A. (2003). On multiple states in single-layer flows. *Physics of fluids*, 15(2), 298-307. <https://doi.org/10.1063/1.1531178>
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Abbaszadeh, H. (2021a). Numerical Simulation of Energy Dissipation in Crescent-Shaped Contraction of the Flow Path. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1299-1314. doi: 10.22059/ijswr.2021.318989.668895. (In Farsi)
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Esmaeli, R., Sadeghfam, S., & Abraham, J. (2020).

- Experimental and numerical investigation for energy dissipation of supercritical flow in sudden contractions. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 8(4), 396-406.
- Daneshfaraz, R., Najibi, A. (2021b). Experimental Investigation of Supercritical Flow Energy Dissipation in Sudden Contraction with Wall Roughness. *Journal of Hydraulics*, 16(4), -. doi: 10.30482/jhyd.2021.290706.1532. (In Farsi)
- Daneshfaraz, R., Rezazadeh joudi, A., Sadeghfam, S. (2018). Experimental Investigation of Energy Dissipation in the Sudden Choked Flow with Free Surfaces. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48.2(91), 101-108.
- Daneshfaraz, R., Rezazadehjoudi, A. & Abraham, J. (2017a). Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. *KSCE J Civ Eng* 22, 603-612
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Aminvash, E., Abraham, J. P. (2022). Experimental investigation of multiple supercritical flow states and the effect of hysteresis on the relative residual energy in sudden and gradual contractions. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 46 (1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00818-9>
- Daneshfaraz, R., Sadeghi, H., RezazadehJoudi, A., & Abraham, J. (2017b). Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in contractions and expansions. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences*, 35(1), p87-98. 12p.
- Defina, A., Susin, F. M. (2003). Hysteretic behavior of the flow under a vertical sluice gate. *Physics of Fluids*, 15(9), 2541-2548. <https://doi.org/10.1063/1.1596193>
- Defina, A., Susin, F. M. (2006). Multiple states in open channel flow. *Vorticity and Turbulence Effects in Fluid Structures Interactions*, pp. 105-130.
- Defina, A., Susin, F. M., Viero, D. P. (2008). Bed friction effects on the stability of a stationary hydraulic jump in a rectangular upward sloping channel. *Physics of fluids*, 20(3), 036601. <https://doi.org/10.1063/1.2841622>
- Defina, A., Viero, D. P. (2010). Open channel flow through a linear contraction. *Physics of Fluids*, 22(3), 1-12. <https://doi.org/10.1063/1.3370334>
- Dey Subhasish, & Raikar Rajkumar V. (2007). Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers. *Journal of hydraulic Engineering*, 133(4), 399-413.
- Hager, W.H., Dupraz, P.A. (1985). Discharge characteristics of local, discontinuous contractions. *Journal of Hydraulic*, 1985, 23(5), 421-433
- Jan Chyan-Deng, & Chang Chia-Jung. (2009). Hydraulic jumps in an inclined rectangular chute contraction. *Journal of hydraulic Engineering*, 135(11), 949-958.
- Lawrence, G. A. 1987. Steady flow over an obstacle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(8), 981-991. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:8\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:8(981))
- Mehrotra, S. C. (1974). Hysteresis effect in one and two fluids systems. *Proceeding V Australian conference on hydraulics and fluids mechanics* (Vol. 2, pp. 452-461) New Zealand: Christchurch, University of canterbury.
- Muskatirovic, D., Batinic, D. (1977). The influence of abrupt change of channel geometry on hydraulic regime characteristics. *In Proceedings of the 17th IAHR Congress* (pp. 397-404).
- Sadeghfam, S., Khatibi, R., Hassanzadeh, Y., Daneshfaraz, R., Ghorbani, M. A. (2017). Forced hydraulic jumps described by classic hydraulic equations reproducing cusp catastrophe features. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(9), 4169-4179. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2616-x>
- Sadeghi, H., Daneshfaraz, R., Behmanesh, J., Nikpour, M. (2015). The effect of shape of walls of expansion on the characteristics of hydraulic jump. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31 (2), 57-62.
- Viero, D. P., Defina, A. (2017.) Extended theory of hydraulic hysteresis in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 06017014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001342](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001342)
- Viero, D. P., Defina, A. (2019). Multiple states in the flow through a sluice gate. *Journal of Hydraulic Research*, 57(1), 39-50. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1434694>
- Wu Baosheng, & Molinas Albert. (2001). Choked flows through short contractions. *Journal of hydraulic Engineering*, 127(8), 657-662.