

**EXTENDED ABSTRACT**

**Experimental study of the effect of different sill geometry on hysteretic behavior of supercritical regime**

R. Daneshfaraz<sup>1\*</sup>, E. Aminvash<sup>2</sup> and P. Ebadzadeh<sup>3</sup>

*1\* - Corresponding Author, Professor, Department of civil engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. (daneshfaraz@maragheh.ac.ir).*

*2- Phd student, Department of civil engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.*

*3- M.Sc. Student, Department of civil engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.*

**ARTICLE INFO**

*Article history:*

Received: 27 February 2022

Revised: 13 October 2022

Accepted: 16 October 2022

*Keywords:*

Hysteretic Behavior, Possible Flow Regimes, Sill, Relative Flow Depth, Hydraulic Jump.

**TO CITE THIS ARTICLE :**

Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ebadzadeh, P. (2023). 'Experimental study of the effect of different sill geometry on hysteretic behavior of supercritical regime', *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(3), pp. 1-15. doi: 10.22055/jise.2022.40134.2017.

**Introduction**

Hysteresis during supercritical flow is an issue that is not well understood. It occurs near structures in water supply systems, water transmission lines, and channels. The hysteretic behavior of a flow causes different states in the flow for otherwise identical conditions. (Defina and Viero, 2018) investigated the behavior of supercritical flow near a vertical gate. They proposed a theory for predicting hysteresis in the vicinity of a gate based on the Froude numbers upstream and downstream of the gate as well as on the gate opening ratio. Their results also confirm the existence of hysteretic behavior of the flow. The experiments also confirmed the validity of the theory on the effect of upstream and downstream Froude numbers on hysteretic behavior. (Defina and Viero, 2010) examined the various states created by the flow in a gradual narrowing. They showed that the friction and slope of the channel floor affect the stability of the flow and can create different hysteretic loops.

The main purpose of this study was to investigate the contradictory behavior of supercritical flow with a sill located in the flow path and with different geometries. The existence of such contradictory behavior occurs due to hysteresis, for which there are relatively limited studies. Generally, the occurrence of hysteresis at the collision of the flow with the obstacle is expected. As for the same input current, two different behaviors are observed that behavior depend on the flow cycle. The flow cycle means increasing the discharge to a certain value and then decreasing it to the initial discharge.

**Methodology**

The experiments were performed in a hydraulic laboratory with flume dimensions of 5 m in length, 0.30 m in width, and 0.5 m in height. The walls are made from Plexiglass in order to provide good visibility. The inlet flow was measured by two rotameters. The rotameters were installed at the outlet of the pump and made measurements with a point gage with an accuracy of 1 mm. A sluice gate is installed to provide supercritical flow. The gate opening was fixed at 2 cm in all experiments. Sills including cylindrical, pyramidal, and rectangular cubic shapes were prepared to investigate the shape effect. All three sill shapes were prepared with widths of 30 cm. The height of all sills in this study was 3 cm. In this study, flow discharge in the range of 0.0045 to 0.01 m<sup>3</sup>/s was applied to all models.

## Findings

The presence and absence of a hydraulic jump and the formation of two different profiles were obtained. The effect of hysteretic behavior was quantified by creating a flow that increase of 0.0045 to 0.01 m<sup>3</sup>/s and decreased from 0.01 to 0.0045 m<sup>3</sup>/s. Water was added or removed with increments of 0.00041 m<sup>3</sup>/s. Results showed that with increasing and decreasing discharge, two different behaviors are seen under otherwise identical circumstances.

Increasing and decreasing the flow to otherwise identical discharges resulted in two surface profiles in the same laboratory system. These two profiles were: a) Profile 1: in which sections 1 and 2 are in the subcritical regime, b) Profile 2: in which sections 1 and 2 are in the supercritical regime. In this research, three sills with cylindrical, pyramidal, and rectangular cubic geometry with a height of 3 cm have been used.

The main results are summarized below:

- In the M1 model, which used a cylindrical sill, hysteresis was formed in the Froude number range from 3.62 to 5.08 by increasing the flow rate by more than 0.0058 m<sup>3</sup>/s. The flow regime returns to supercritical by decreasing the flow rate to less than 0.005 m<sup>3</sup>/s, the flow regime returns to the subcritical regime with relative depths of the flow in sections 1 and 2 that have increased by 85.38 and 82.57%, respectively.

- In the M2 model, which is used a pyramidal sill, hysteresis was formed in the Froude number range 3.62 to 5.08. By increasing the flow rate by more than 0.0058 m<sup>3</sup>/s, the flow regime returns to the super-critical regime. By decreasing the flow rate to less than 0.005 m<sup>3</sup>/s, the flow regime returns to the sub-critical regime. The relative depths of the flow in sections 1 and 2 increased by 85.31 and 88%, respectively.

- In model M3, which is used a rectangular cubic sill, hysteresis was formed in the Froude numbers range of 3.94 to 5.08. By increasing the flow rate by more than 0.0058 m<sup>3</sup>/s, the flow regime returns to the super-critical regime. By decreasing the flow rate to less than 0.005 m<sup>3</sup>/s, the flow regime returns to the sub-critical regime, that the relative depths of the flow in sections 1 and 2 have increased by 70.68 and 60.37%, respectively.

- The efficiency of hydraulic jump at the rectangular cube sill is higher than other sills, with a relative increase of 72%.

## Conclusions

The present study investigates, for the first time, the hysteretic behavior of a supercritical current that can occur in a channel near additional structures such as a sill. The results showed that the relative depth values of  $y_1/y_0$ ,  $y_2/y_0$ , and Froude numbers in sections 1 and 2 were greatly increased, while the hydraulic jump efficiency for the relative energy dissipation parameter at the cubic sill was higher than the other sills. In the primary flow, these depths indicate the subcritical regime and in the secondary stream, with hysteresis at some discharge rates, it indicates the supercritical regime.

## References

- 1- Defina, A., Susin, F. M. and Viero, D. P., 2018. Bed friction effects on the stability of a stationary hydraulic jump in a rectangular upward sloping channel. *Physics of fluids*, 20(3), 036601.
- 2- Defina, A. and Viero, D. P., 2010. Open channel flow through a linear contraction. *Physics of Fluids*, 22(3), pp. 1-12. Doi: 10.1063/1.3370334.



## بررسی آزمایشگاهی تأثیر هندسه آستانه بر پدیده هیستریزس جریان با رژیم فوق بحرانی

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، احسان امین‌وش<sup>۲</sup> و پریسا عبادزاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> - نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران daneshfaraz@maragheh.ac.ir

<sup>۲</sup> - دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۲۱

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸

### چکیده

پژوهش حاضر، برای نخستین بار رفتار هیستریک جریان فوق بحرانی را که به دلیل دو رفتار متفاوت جریان در شرایط هیدرولیکی یکسان اتفاق می‌افتد، را به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار داده است. به همین منظور، از سه آستانه با هندسه‌های استوانه‌ای، مکعب مستطیلی و هرمی شکل بهره گرفته شده است. محدوده دبی‌های بکاررفته در محدوده  $+0.041$  تا  $+0.1$  مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. دبی به صورت افزایشی در جریان اولیه و سپس به صورت کاهشی در جریان ثانویه وارد فلوم آزمایشگاهی می‌گردد. رژیم-های احتمالی جریان در نزدیکی آستانه براساس اعماق نسبی در پایین دست دریچه کشویی و در دو مقطع یک و دو بصورت تابعی از عدد فرود عبوری از زیر دریچه طبقه‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و سپس کاهش آن، در برخی از دبی‌ها دو رفتار متفاوت از جریان در شرایط یکسان هیدرولیکی دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد مقادیر اعماق نسبی  $y_1/y_0$ ،  $y_2/y_0$  و اعداد فرود مقاطع یک و دو به مقدار زیادی افزایش یافته است در حالی که راندمان پرش هیدرولیکی برای پارامتر استهلاک انرژی نسبی در آستانه مکعبی بیشتر از سایر آستانه‌ها می‌باشد. به طوریکه در جریان اولیه میزان این اعماق بیانگر رژیم زیربحرانی و در جریان ثانویه با تشکیل پدیده هیستریزس در برخی از دبی‌ها بیانگر رژیم فوق بحرانی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: رفتار هیستریک، رژیم‌های احتمالی جریان، آستانه، اعماق نسبی جریان، پرش هیدرولیکی.

### مقدمه

عموماً وقوع پدیده هیستریزس در جریان با مانع قابل انتظار است. به طوریکه 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 عموماً در طراحی سازه‌های هیدرولیکی، به دلیل عدم شناخت کافی طراحان در نظر گرفته نمی‌شود.

در این تحقیق ابتدا به بررسی مطالعه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده به منظور بررسی رفتار هیستریک پارامترهای هیدرولیکی جریان در مواجهه با موانع مختلف نظیر پایه‌های پل، تنگ شدگی و برآمدگی کف کانال پرداخته می‌شود. مطالعه‌های انجام گرفته در این زمینه را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: دسته اول مطالعه‌ها مربوط به برآمدگی کف کانال؛ دسته دوم به مقاطع تنگ‌شدگی؛ دسته سوم مربوط پایه‌های پل و دسته چهارم مربوط به دریچه است. دسته اول مطالعه‌های مربوط به پدیده هیستریزس که به بررسی برآمدگی کف کانال می‌پردازد (Abecasis and Quintela, 1964). در ادامه مطالعه‌های

مربوط به رفتار پدیده هیستریزس از نظر تئوری و آزمایشگاهی روی برآمدگی کف با عرض ثابت تشریح شده است (Muskatirovic, and Batinic, Mehrotra, 1974). Austria (1987) با استفاده از تئوری کاتاستروف به توصیف رفتار هیستریک جریان روی برآمدگی کف کانال پرداخت و نشان داد که تئوری کاتاستروف می‌تواند به عنوان یک مدل توصیفی مورد استفاده گیرد. این تئوری مبتنی بر استفاده از معادله‌های کلاسیک جریان نظیر معادله‌های انرژی مخصوص در کنار معادله‌های تئوری کاتاستروف است. Lawrence (1987) به بررسی جریان دائمی عبوری از روی برآمدگی کف کانال و رفتار-های مختلف آن پرداخت. نتایج نشان داد که ممکن است دو حالت پایدار برای شرایط ورودی یکسان وجود داشته باشد که منجر به تشکیل حلقه هیستریزس گردد. Baines و (2003) Whitehead رفتار هیستریک جریان را روی برآمدگی کف کانال به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج مطالعه‌های 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. Defina و

نخستین تحقیق مطالعه‌های مربوط به تأثیر دریچه‌کشویی بر رفتار هیسترتیک جریان، به تحقیق Defina و Susin (2003) بر می‌گردد. آن‌ها یک رابطه تئوریک برای بررسی این رفتار ارائه کرده و سپس به صورت آزمایشگاهی آن را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که رفتار هیسترتیک برای این دسته از مطالعه‌ها نیز به این صورت قابل تعریف است که برای یک میزان بازشدگی دریچه در دی‌های 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. Viero و Defina (2019) رفتار جریان با رژیم فوق‌بحرانی را در نزدیکی دریچه قائم بررسی کردند. آن‌ها یک تئوری برای پیش‌بینی وقوع هیسترتیزس در مجاورت دریچه براساس عدد فرود بالادست و پائین‌دست دریچه و همچنین نسبت بازشدگی دریچه ارائه کردند. نتایج آن‌ها نیز موید وجود رفتار هیسترتیک جریان است. همچنین آزمایش‌های انجام گرفته، صحت نظریه ارائه شده در تأثیر اعداد فرود بالادست و پائین‌دست در رفتار هیسترتیک را تأیید کرد.

علاوه بر تحقیقاتی که در دسته‌بندی‌های فوق بیان شد، تحقیقات زیر رفتار هیسترتیک جریان را در مواجهه با ترکیبی از موانع مختلف ارزیابی کردند. مدل‌های ترکیبی شامل برآمدگی کف کانال به همراه انقباض موضعی و همچنین تأثیر اصطکاک کف بر روی برآمدگی تدریجی است. Viero و Defina (2017) با ایجاد برآمدگی کف و انقباض موضعی در کانال، روابط تئوری برای توصیف وقوع هیسترتیزس در بالادست و پائین‌دست موانع را توسعه دادند. نتایج نشان داد که در هر دو مدل مربوط به برآمدگی و انقباض ناگهانی، دامنه ناحیه هیسترتیزس گسترده بوده به طوری که در بسیاری از موارد عملی احتمال وقوع هیسترتیزس افزایش می‌یابد. Kabiri-Samani et al. (2014) به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تبدیل رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی بدون پرش هیدرولیکی و با استفاده از سازه تبدیل‌کننده رژیم جریان پرداختند. بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که با وجود اندک مطالعه‌های تئوریک و آزمایشگاهی انجام شده در ارتباط با رفتار هیسترتیک جریان، نیاز به انجام مطالعه‌های گسترده‌تری برای بررسی ابعاد نامعلوم رفتار این نوع جریان وجود دارد. البته این ابعاد نامعلوم در برخورد جریان با موانع محسوس‌تر می‌باشد، به طوری که اکثراً روابط تئوریک در چنین موانعی تطابق کمتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به سایر موارد دارد. علت این امر ناشی از الگوی جریان در برابر این موانع بوده و امکان ایجاد یک نظریه دقیق منطبق بر رویکرد یک بعدی جریان را فراهم نمی‌سازد. لذا در تحقیق حاضر برای نخستین بار رفتار نامعلوم هیسترتیک جریان، در قبال آستانه قرار گرفته در مسیر جریان با رژیم

Susin (2006) در ابتدا به صورت تئوریک روابطی برای بررسی این پدیده روی برآمدگی ارائه کرده و سپس به صورت آزمایشگاهی آن‌را 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 فوق بحرانی بوده و مانع روی تغییر رژیم جریان تأثیرگذار نباشد. در مقابل، عکس‌العمل قوی دلالت بر شرایطی دارد که مانع بواسطه پرش هیدرولیکی باعث تغییر رژیم جریان به زیر بحرانی می‌شود. دسته دوم مطالعه‌ها که مربوط به انقباض مقطعی در مسیر جریان است. Akers و Bokhove (2008) به صورت تئوریک و صحرانی رفتار هیسترتیک 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. Defina و 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 هیسترتیک را ایجاد کند. Sadeghfam et al. (2017) با استفاده از معادله‌های کلاسیک هیدرولیک و تئوری کاتاستروف رفتار هیسترتیک جریان فوق‌بحرانی 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 هیسترتیک را دارد. (2022a) Daneshfaraz et al. به بررسی رفتار هیسترتیک جریان و تأثیر آن بر انرژی نسبی باقی‌مانده در تنگ‌شدگی‌های ناگهانی و تدریجی با اندازه‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که در دی‌های یکسان، در تمامی مدل‌های بررسی شده دو رفتار متفاوت از جریان در رژیم‌های مختلفی از جریان ایجاد شده است. (2022b) Daneshfaraz et al. با بررسی آزمایشگاهی رفتار هیسترتیک جریان با رژیم فوق بحرانی در برابر تنگ‌شدگی گایبونی به این نتیجه رسیدند که میزان اعماق نسبی جریان و عدد فرود مقطع تنگ‌شدگی با تشکیل پدیده هیسترتیزس به ترتیب ۶۹/۳۶ و ۶۹/۱۵ درصد افزایش چشمگیری داشته است. دسته سوم مطالعه‌ها در زمینه پایه‌های پل بسیار محدود می‌باشد. Defina و 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 به کار گرفته شده بررسی کردند. همچنین آن‌ها یک رابطه تئوریک برای پیش‌بینی وقوع هیسترتیزس 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. در دسته چهارم،

شکل (۱)، مقطع (۱)، بالادست آستانه و مقطع (۲) محل قرارگیری آستانه و جریان عبوری از روی آن می‌باشد. لازم بذکر است که مقطع (۰) نشان دهنده محل جریان فوق‌بحرانی و جریان عبوری از زیر دریچه می‌باشد.

### مشخصات آزمایشگاهی و معرفی مدل‌ها

برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر از فلوم آزمایشگاهی در ابعادی بطول پنج متر، ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۳ متر، با شیب طولی صفر، دیواره‌ها و کف از جنس پلکسی‌گلس استفاده شده است. برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی از یک دریچه قائم فلزی با میزان بازشدگی دو سانتی‌متر که در فاصله ۱/۵ متری از مخزن ورودی قرار گرفته، استفاده گردید. جریان ورودی به فلوم توسط دو پمپ هر کدام با توان ۰/۰۷۵ مترمکعب بر ثانیه به‌صورت چرخشی با خطای  $\pm 2\%$  پمپاژ می‌گردد، دبی جریان با استفاده از روتامترهای نصب شده روی پمپ‌ها قرائت می‌گردد و به‌منظور اندازه‌گیری عمق جریان از یک گیج نقطه‌ای با خطای  $\pm 1$  میلی‌متر استفاده شده است. تحقیق حاضر در سه مدل با هندسه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است که شامل هندسه‌های استوانه‌ای، هرمی و مکعب مستطیلی بوده و جنس آستانه‌های به‌کار رفته از پلی اتیلن می‌باشد. مشخصات مدل‌ها و بازه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

شکل (۱)، دو پروفیل سطحی آب متفاوت در شرایط آزمایشگاهی یکسان برای پرش هیدرولیکی ایجاد شده به‌وسیله آستانه را نیز نشان می‌دهد. در ادامه به معرفی دو پروفیل مختلف محتمل پرداخته شده است. سناریوی آزمایش‌های صورت پذیرفته و هم‌چنین پروفیل‌های ایجاد شده در جدول (۲) ذکر شده‌اند.

فوق‌بحرانی با سه هندسه استوانه‌ای، مکعب مستطیلی و هرمی شکل مورد تحلیل قرار گرفته است. رویکرد نوین این تحقیق بر دو نوع پروفیل جریان متمرکز بوده و شرایط و دلایل مختلف ایجاد و عدم ایجاد پرش هیدرولیکی در یک دبی یکسان و رفتارهای متفاوت جریان در مواجهه با آستانه در مسیر جریان را بررسی خواهد کرد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی رفتار متناقض جریان فوق‌بحرانی در برابر آستانه قرار گرفته در مسیر جریان با هندسه‌های می‌باشد. وجود چنین رفتار متناقضی به‌دلیل پدیده هیستریزیس اتفاق می‌افتد که مطالعه‌های نسبتاً محدودی برای شناخت آن وجود دارد.

### مواد و روش‌ها

#### توصیف پرش هیدرولیکی اجباری و پروفیل‌های جریان

پرش هیدرولیکی اجباری فرآیندی است که در آن رژیم جریان فوق‌بحرانی تشکیل شده، به واسطه سازه‌های الحاقی قرار گرفته در مسیر جریان، مجبور به بازگشت به رژیم زیر بحرانی می‌باشد. ابزار ایجاد پرش هیدرولیکی اجباری در تحقیق حاضر، شامل دو قسمت مجزا می‌باشد که عبارتند از: ۱- یک دریچه کشویی فلزی قائم که برای اندازه‌گیری و یا کنترل جریان در کانال نصب گردیده و نقش آن در این تحقیق فقط تشکیل جریان فوق‌بحرانی می‌باشد. ۲- قرارگیری یک آستانه از جنس پلی‌اتیلن در مسیر جریان که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی شده و رژیم جریان را از فوق‌بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌کند تا انرژی مخرب جریان فوق‌بحرانی را تقلیل بخشد، که بررسی پارامترهای هیدرولیکی در مجاورت این المان‌ها بسیار مهم و ضروری می‌باشد. شکل (۱) پروفیل‌های پرش هیدرولیکی تشکیل شده به واسطه قرارگیری آستانه در مسیر جریان، محل مقاطع و اندازه‌گیری اعماق جریان و هندسه المان‌ها را نشان می‌دهد. در

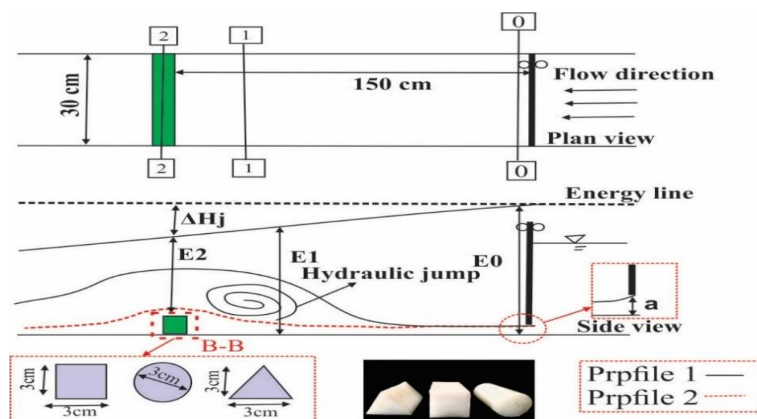


Fig.1- Profil of hydraulic jump, section conditins and sills geometry

شکل ۱- پروفیل‌های پرش هیدرولیکی، محل‌های مقاطع و اندازه‌گیری اعماق جریان و هندسه آستانه‌ها

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مدل‌ها و بازه تغییرات پارامترهای هیدرولیکی

Table 1- Physical characteristics and hydraulic parameters variation of the present study (Sizes are in cm)

Model	Model Geometry	Discharge (Lit/min)	Sill Dimensions (cm)			$(Re_0)$	$Y_{1(Cm)}$	$Y_{2(Cm)}$
			Height	Length	width			
M1	Cylindrical		Cylindrical diameter =3.0				1.83~7.5	2.1~6.6
M2	Pyramidal	275- 600	3	3	30	55287-121951	1.8~6.6	2~6.6
M3	Rectangular cubic		3	3	30		1.78~7.38	1.9~6.5

جدول ۲- سناریوی آزمایش‌های انجام شده و رژیم‌ها و پروفیل‌های جریان

Table 2- Scenario of tests performed and flow regimes and profiles

Model	Profiles (Fig.1)		Flow regimes		$Fr_0$ (vena contracta)	Flow history	
	Profile 2	Profile 1	Section 2	Section 1			
M1		✓	Subcritical	Subcritical	3.313	Flow increasing	
			"	"	3.621	"	
			"	"	3.941	"	
			"	"	4.230	"	
			"	"	4.571	"	
			"	"	4.825	"	
			"	"	5.079	"	
		✓		Supercritical	Supercritical	5.503	Increased flow caused supercritical hysteresis
		✓		"	"	5.079	Decreasing flow
		✓		"	"	4.825	"
		✓		"	"	4.571	"
		✓		"	"	4.230	"
		✓		"	"	3.941	"
		✓		"	"	3.621	"
		✓	Subcritical	Subcritical	2.958	Decreasing flow caused subcritical hysteresis	
M2		✓	Subcritical	Subcritical	3.313	Flow increasing	
			"	"	3.621	"	
			"	"	3.941	"	
			"	"	4.230	"	
			"	"	4.571	"	
			"	"	4.825	"	
			"	"	5.079	"	
		✓		Supercritical	Supercritical	5.503	Increased flow caused supercritical hysteresis
		✓		"	"	5.079	Decreasing flow
		✓		"	"	4.825	"
		✓		"	"	4.571	"
		✓		"	"	4.230	"
		✓		"	"	3.941	"
		✓		"	"	3.621	"
		✓	Subcritical	Subcritical	2.958	Decreasing flow caused subcritical hysteresis	
M3		✓	Subcritical	Subcritical	3.941	Flow increasing	
			"	"	4.230	"	
			"	"	4.571	"	
			"	"	4.825	"	
			"	"	5.079	"	
		✓		Supercritical	Supercritical	5.503	Increased flow caused supercritical hysteresis
		✓		"	"	4.852	Decreasing flow
		✓		"	"	4.571	"
		✓		"	"	4.230	"
			✓	Subcritical	Subcritical	3.621	Decreasing flow caused subcritical hysteresis

به منظور معنی دار کردن برخی از پارامترها، با تقسیم تعدادی از پارامترهای بدون بعد بر یکدیگر و ساده سازی آن‌ها، پارامترهای بدون بعد به صورت رابطه (۳) ارائه شد.

$$f_3(\Pi, Fr_0, Fr_1, Fr_2, Re_0, \frac{a}{y_0}, \frac{B}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}, \frac{h}{y_0}, \frac{y_2}{y_0}, \frac{y_{cr}}{h}, \frac{\Delta H_j}{y_0}, \Omega) = 0 \quad (3)$$

پارامتر  $\Pi$  بیانگر راندمان پرش هیدرولیکی می باشد که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می گردد:

$$\Omega = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = \frac{\Delta E}{E_0} \quad (4)$$

با توجه به اینکه در تمام دبی‌های به کاررفته در تحقیق حاضر، جریان کاملاً متلاطم و آشفته بوده و محدوده عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ می باشد، لذا می توان از تأثیر پارامتر عدد رینولدز صرف نظر کرد. همچنین پارامتر  $a/y_0$  به دلیل ثابت بودن میزان بازشدگی درپچه و پارامتر  $B/y_0$  به دلیل ثابت بودن عرض کانال، از میان پارامترهای بدون بعد مستقل حذف می گردند. در نهایت پارامترهای وابسته به صورت تابعی از پارامترهای مستقل به صورت رابطه (۵) ارائه می شوند:

$$\Pi, \frac{y_1}{y_0}, \frac{y_2}{y_0}, Fr_1, Fr_2 = f_4(Fr_0, \frac{y_{cr}}{h}, \Omega) \quad (5)$$

### نتایج و بحث

پروفیل‌های طولی جریان ناشی از برخورد جریان فوق بحرانی با آستانه، در مسیر جریان در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طوری که ذکر شد در انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر از دبی‌های ۰/۰۴۱ تا ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه به صورت افزایشی و سپس از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴۱ متر مکعب بر ثانیه به صورت کاهش استفاده شده است. با دقت در این شکل مشاهده می شود که در هر مدل با افزایش و کاهش دبی جریان، در چند دبی یکسان دو رفتار متفاوت از جریان دیده می شود که این رفتار، رفتار هیستریزیک جریان نامیده می شود. شکل (۲) به عنوان نمونه پدیده هیستریزیک ظاهر شده در دبی ۰/۰۷۹۱۶ متر مکعب بر ثانیه برای آستانه‌های استوانه‌ای، هرمی و مکعب مستطیلی را نشان می دهد. (شکل ۲). با دقت در شکل‌ها مشاهده می شود که در جریان اولیه، المان‌های آستانه قرار گرفته در مسیر جریان باعث ایجاد پرش هیدرولیکی می شود و در طول این مدت مقاطع یک و دو هر دو در رژیم زیر بحرانی قرار دارند. با افزایش دبی پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست حرکت کرده و رژیم جریان در تمام طول کانال فوق بحرانی می گردد. سپس با کاهش دبی جریان، رفتاری که در سیستم مشاهده می شود بیانگر این

پروفیل یک: این پروفیل نشان دهنده تشکیل پرش هیدرولیکی در مقطع (۱) و (۲) می باشد. در مقطع (۱) جریان به رژیم زیر بحرانی منتقل می شود. این رژیم جریان به واسطه جریان برگشتی توسط آستانه قرار گرفته در مقطع (۲) ایجاد می شود. رژیم جریان در مقطع (۲) به دلیل تلاطم و افزایش عمق جریان با رژیم زیر بحرانی از روی آستانه به سمت پایین دست کانال حرکت می کند.

پروفیل دو: این پروفیل بیان گر عدم تشکیل پرش هیدرولیکی در سرتاسر کانال آزمایشگاهی می باشد. رژیم ایجاد شده در مقاطع (۱) و (۲) فوق بحرانی بوده و به این معنی است که آستانه قرار گرفته در مسیر جریان هیچ گونه پرشی ایجاد نکرده و رژیم جریان را تغییر نمی دهد و رژیم جریان، برابر با رژیم عبوری از زیر درپچه می باشد. هدف اصلی و رویکرد نوین این تحقیق بر این دو نوع پروفیل جریان متمرکز بوده و شرایط و دلایل مختلف ایجاد و عدم ایجاد پرش هیدرولیکی در یک دبی و رفتارهای متفاوت جریان در مواجهه با آستانه در مسیر جریان را بررسی خواهد کرد. جریان ورودی به کانال به این صورت است که در ابتدا دبی به صورت افزایشی از ۰/۰۴۱ تا ۰/۰۱ متر مکعب بر ثانیه و سپس به صورت کاهش از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴۱ متر مکعب بر ثانیه با گام‌های افزایشی و کاهش می گردد. لازم به ذکر است که محدوده دبی‌های آزمایش شده، برای مشاهده رفتار هیستریزیک کافی بوده و پدیده هیستریزیک جریان در این بازه به وضوح قابل مشاهده می باشد.

### آنالیز ابعادی

مطابق شکل (۱)، پارامترهای مؤثر برای بررسی رفتار هیستریزیک جریان فوق بحرانی به هنگام مواجهه با آستانه قرار گرفته در مسیر جریان، به صورت رابطه (۱) ارائه می گردد:

$$f_1(Q, \rho, g, a, B, h, y_0, y_1, y_2, y_{cr}, v_0, v_1, v_2, E_0, E_1, \Delta H_j, \Omega) = 0 \quad (1)$$

که در آن:  $Q$  دبی جریان،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $g$  شتاب گرانش جاذبه زمین،  $a$  میزان بازشدگی درپچه،  $B$  عرض کانال،  $h$  ارتفاع آستانه،  $y_0$  عمق جریان عبوری از زیر درپچه،  $y_1$  عمق جریان در بالادست آستانه مقطع (۱)،  $y_2$  عمق جریان عبوری از روی آستانه مقطع (۲)،  $y_{cr}$  عمق بحرانی جریان، و  $v_0, v_1, v_2$  به ترتیب سرعت جریان در مقاطع (۰)، (۱) و (۲)،  $\Delta H_j$  افت انرژی ناشی از پرش هیدرولیکی و  $\Omega$  فاکتور شکل می باشند. با استفاده از روش پی-بکینگهام تحلیل ابعادی انجام و با در نظر گرفتن پارامترهای  $\rho, g$  و  $y_0$  به عنوان پارامترهای تکراری رابطه (۲) ارائه گردید.

$$f_3(Fr_0, Fr_1, Fr_2, Re_0, \frac{a}{y_0}, \frac{B}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}, \frac{y_2}{y_0}, \frac{y_{cr}}{h}, \frac{E_0}{y_0}, \frac{E_1}{y_0}, \frac{\Delta H_j}{y_0}, \Omega) = 0 \quad (2)$$

از زیر درپچه را که تحت اثر رفتار هیسترتیک قرار گرفته است، نشان می‌دهد. شکل (۳-الف) عمق نسبی جریان در مقطع (۱) و شکل (۳-ب) عمق نسبی جریان در مقطع (۲) را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در یک جریان افزایشی و کاهش، در چند دبی با شرایط آزمایشگاهی یکسان، اعماق نسبی متفاوتی در هر دو مقطع ایجاد می‌شود. در مدل M1 در بازه دبی‌های  $0/0058$  تا  $0/0091$  مترمکعب بر ثانیه پدیده هیستریزس ظاهر شده است. در این حالت در جریان اولیه در بازه دبی‌های ذکر شده، به دلیل حضور آستانه در مسیر جریان و به تبع آن تشکیل پرش هیدرولیکی، مقاطع (۱) و (۲) در محدوده رژیم زیر بحرانی قرار می‌گیرند و پروفیل سطحی ایجاد شده از نوع پروفیل یک می‌باشد. در جریان ثانویه با بازگشت دبی به محدوده  $0/0058$  تا  $0/0091$  مترمکعب بر ثانیه، پرش هیدرولیکی از آستانه عبور کرده و هر دو مقطع با کاهش عمق نسبت به جریان اولیه در محدوده رژیم فوق بحرانی قرار گرفته و پروفیل ایجاد شده از نوع پروفیل دو می‌باشد. بدین صورت که در جریان اولیه با افزایش دبی، سرعت جریان افزایش یافته و با کاهش عمق، مقاطع یک و دو که در دبی‌های پایین در رژیم زیر بحرانی قرار داشتند به رژیم فوق بحرانی تبدیل می‌گردند. با کاهش تدریجی دبی و با رسیدن آن به مقداری که در جریان اولیه، هر دو مقطع در محدوده رژیم زیر بحرانی بودند، شاهد رژیم فوق بحرانی خواهیم بود. زیرا رژیم حالت قبلی جریان در محدوده فوق بحرانی قرار دارد. با اثرگذاری رفتار هیسترتیک، در مدل آستانه استوانه‌ای اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب به میزان  $70/8$  و  $65/27$  درصد افزایش می‌یابد که این میزان افزایش عمق نسبی به دلیل تغییرات رژیم جریان و تبدیل حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی و به دنبال آن افزایش سرعت جریان و افزایش تنش پسماند جریان به شدت در سیستم سازه‌ای اثر گذاشته و در صورت عدم کنترل آن خسارات قابل توجهی را به بار خواهد آورد.

است که در چند دبی مشخص دو رفتار متفاوت مشاهده می‌شود. بطوریکه جریان ثانویه ایجاد شده در کانال، مقاطع یک و دو را تماماً در رژیم فوق بحرانی قرار می‌دهد.

شکل (۲) تغییرات رژیم و پروفیل‌های طولی جریان را در مواجهه با آستانه هندسه‌های استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی را نشان می‌دهد. در آستانه استوانه‌ای شکل (۲-۱) با افزایش دبی تا  $0/0083$  مترمکعب بر ثانیه مقاطع (۱) و (۲) در رژیم زیر بحرانی قرار می‌گیرند. با رسیدن دبی به میزان  $0/00875$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان در هر دو مقطع به رژیم فوق بحرانی تغییر پیدا می‌کند. سپس با کاهش تدریجی دبی تا میزان  $0/00625$  مترمکعب بر ثانیه مقاطع همچنان در رژیم فوق بحرانی قرار دارند تا جائیکه با رسیدن دبی به میزان  $0/0058$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان به حالت زیر بحرانی تغییر پیدا می‌کند. با توجه به پروفیل‌های تشکیل شده، مشاهده می‌گردد که مابین دبی‌های  $0/00625$  تا  $0/0083$  مترمکعب بر ثانیه دو رفتار متفاوت از جریان در حالت‌های افزایشی و کاهش دبی وجود دارد که به این پدیده ظاهر شده، پدیده هیستریزس می‌گویند. در آستانه‌های هرمی و مکعب مستطیلی شکل (۱-۱) و (۱-۲) این اتفاق دوباره رقم زده شده و رفتار هیسترتیک، تأثیر خود را در دبی‌های  $0/005$  تا  $0/006$  مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد و وجه تفاوت آن‌ها در میزان اعماق نسبی، انرژی‌های نسبی باقی‌مانده و دیگر پارامترهای هیدرولیکی است. علت اصلی این رفتار و تشکیل پدیده هیستریزس وابستگی حالت فعلی جریان به حالت قبلی آن است. یعنی با کاهش جریان ورودی رژیم جریان که در حالت فوق بحرانی می‌باشد، از حالت قبلی خود که دارای رژیم فوق بحرانی است تبعیت می‌کند تا جایی که با کاهش بیش از حد دبی ورودی، سرعت جریان توانایی تشکیل حالت فوق بحرانی را نداشته و رژیم جریان به حالت زیر بحرانی برمی‌گردد.

شکل (۳) تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری

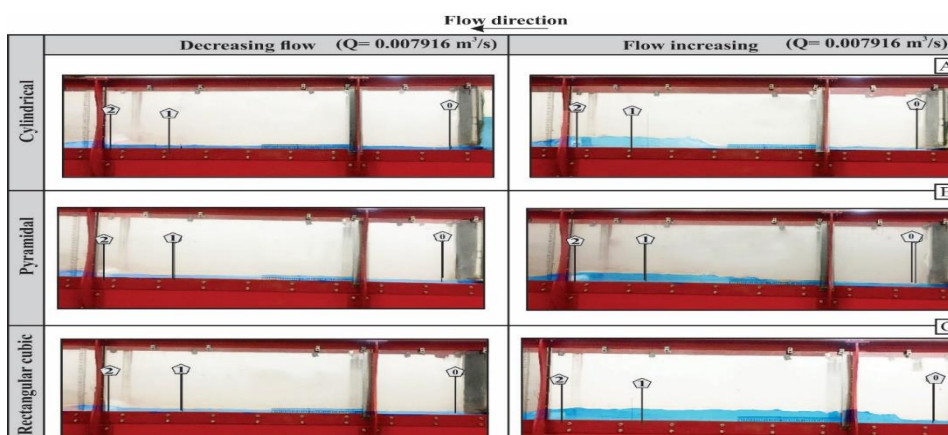


Fig. 2- Hysteretic behavior of flow against the sill (A) Cylindrical, (B) Pyramidal, (C) Rectangular cubic  
شکل ۲ - رفتار هیسترتیک جریان برابر آستانه (الف) آستانه استوانه‌ای، (ب) آستانه هرمی، (ج) آستانه مکعب مستطیل



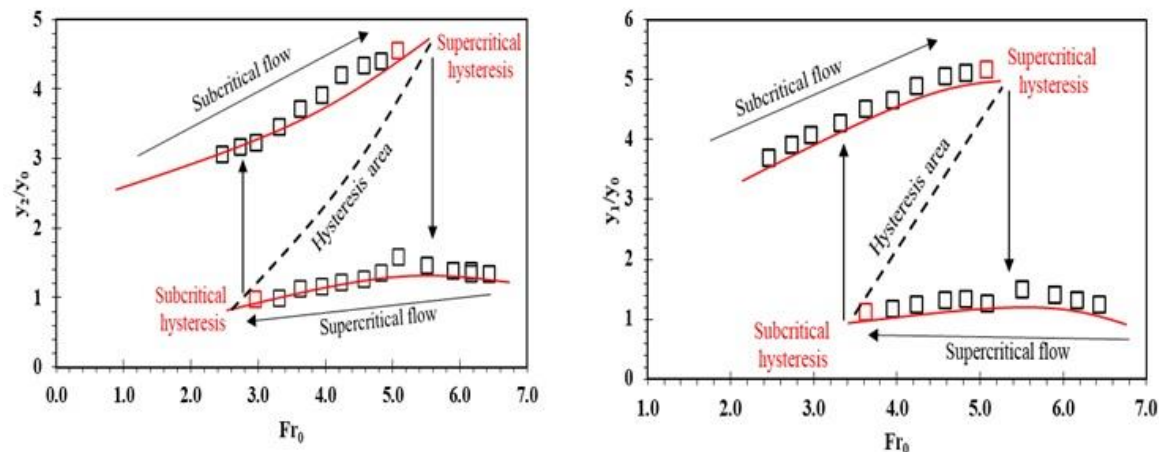


Fig. 3- Relative flow depths changes against the Froude number due to hysteresis phenomenon for Cylindrical sill (A) section [1] (B) section [2]

شکل ۳ - تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از دریچه متاثر از پدیده هیستریزس در برابر آستانه استوانه‌ای (الف) مقطع [1] (ب) مقطع [2]

چند دبی با شرایط آزمایشگاهی برابر، اعماق نسبی متفاوتی در هر دو مقطع ایجاد شده می‌شود. در مدل M1 در بازه دبی‌های  $0.0625$  تا  $0.083$  مترمکعب بر ثانیه، پدیده هیستریزس ظاهر شده است. در این حالت در جریان اولیه در بازه دبی‌های ذکر شده، به دلیل حضور آستانه در مسیر جریان و به تبع آن تشکیل پرش هیدرولیکی، مقاطع (۱) و (۲) در محدوده رژیم زیر بحرانی قرار می‌گیرند و پروفیل سطحی ایجاد شده از نوع پروفیل یک می باشد ولی در جریان ثانویه با بازگشت دبی به محدوده  $0.0625$  تا  $0.083$  مترمکعب بر ثانیه، پرش هیدرولیکی از آستانه عبور کرده و هر دو مقطع با کاهش عمق نسبت به جریان اولیه در محدوده رژیم فوق بحرانی قرار گرفته و پروفیل ایجاد شده از نوع پروفیل دو می‌باشد. علت ایجاد پدیده هیستریزس در تمامی مدل‌های بررسی شده در تحقیق حاضر، 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 یک و دو که در دبی‌های پایین در رژیم زیر بحرانی قرار داشتند به رژیم فوق بحرانی تبدیل می‌گردند. با کاهش تدریجی دبی و با رسیدن آن به مقداری که در جریان اولیه، هر دو مقطع در محدوده رژیم زیر بحرانی بودند، شاهد رژیم فوق بحرانی خواهیم بود زیرا رژیم حالت قبلی جریان در محدوده فوق بحرانی قرار دارد. با اثرگذاری رفتار هیستریزس، در مدل آستانه استوانه‌ای اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب به میزان  $77/98$  و  $77/78$  درصد افزایش می‌یابد.

شکل (۴- الف) تغییرات عدد فرود در مقطع (۱) در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که با افزایش دبی و سپس کاهش آن، در دو عدد فرود عبوری از زیر دریچه در شرایط یکسان، در مقاطع (۱) و (۲) رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر در مدل M1 محدوده‌ای که در آن رفتار هیستریزس مشاهده می‌گردد در محدوده عدد فرود  $3.313 \leq Fr_0 \leq 5.89$  می‌باشد که با کاهش دبی به مقدار کمتر از  $0.058$  مترمکعب بر ثانیه، جریان به حالت اولیه برمی‌گردد یا به عبارت دیگر مقاطع (۱) و (۲) در محدوده زیر بحرانی قرار می‌گیرد. با تشکیل پدیده هیستریزس میزان عدد فرود در هر دو مقطع به میزان نسبی  $85/38$  درصد افزایش می‌یابد. همچنین شکل (۴- ب) نیز تغییرات عدد فرود جریان در مقطع (۱) در برابر عدد فرود مقطع (۲) را نشان می‌دهد. در این شکل نیز مشخص است که با اثرگذاری رفتار هیستریزس بر جریان در مقابل آستانه استوانه‌ای رفتارهای دوگانه‌ای از رژیم جریان حاصل شده است که با اثرگذاری آن، میزان عدد فرود در هر دو مقطع (۱) و (۲) به ترتیب به میزان  $85/38$  و  $82/57$  درصد افزایش تأثیرگذاری کرده است که ناشی از تغییرات رژیم جریان در جریان ورودی یکسان می‌باشد.

شکل (۵) تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه را که تحت اثر رفتار هیستریزس قرار گرفته است، نشان می‌دهد. شکل (۵- الف) عمق نسبی جریان در مقطع (۱) و شکل (۵- ب) عمق نسبی جریان در مقطع (۲) را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در یک جریان افزایشی و کاهش، در

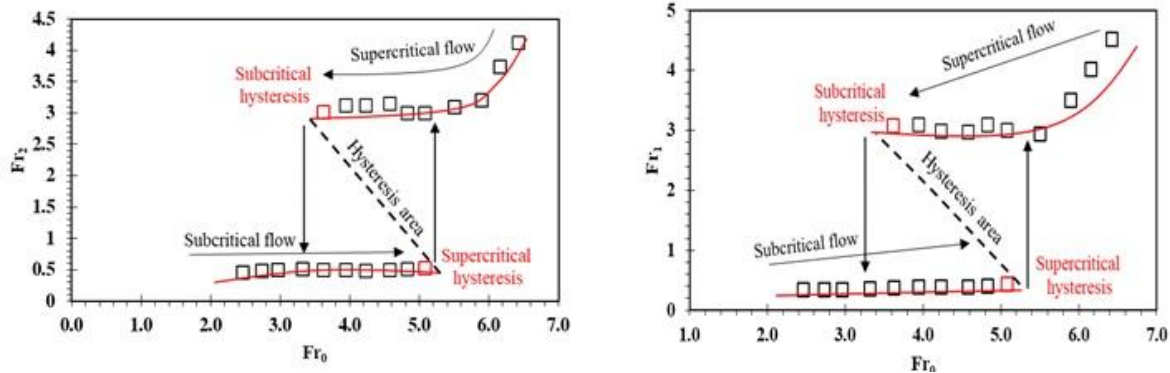


Fig. 4- Froude number changes against the Froude number of undergate flow due to hysteresis phenomenon for Cylindrical sill (A) section [1] (B) section [2]

شکل ۴ - تغییرات عدد فرود در برابر عدد فرود عبوری از دریچه متاثر از پدیده هیستریزس در آستانه استوانه‌ای (الف) مقطع (۱) (ب) مقطع (۲)

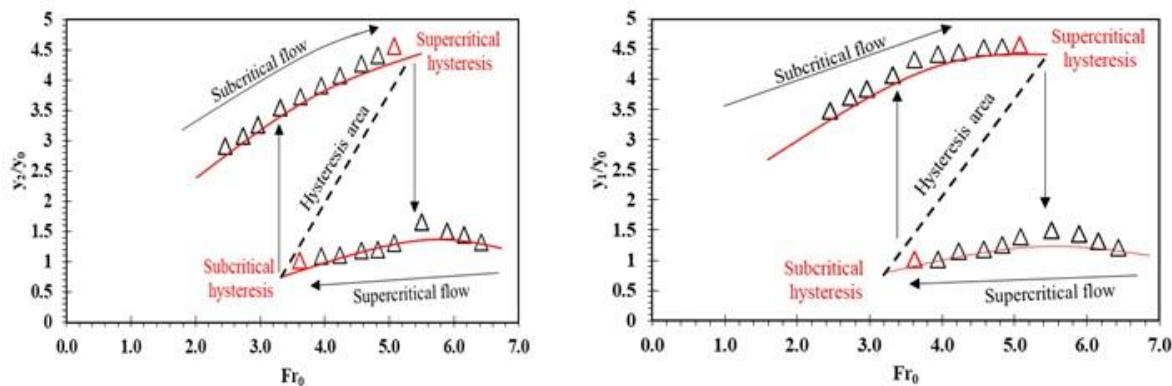


Fig. 5- Relative flow depths changes against the Froude number due to hysteresis phenomenon for Pyramidal sill (A) section [1] (B) section [2]

شکل ۵ - تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از دریچه متاثر از پدیده هیستریزس در آستانه هرمی: (الف) مقطع (۱) (ب) مقطع (۲)

(۱) و (۲) به ترتیب به میزان ۸۵/۳۱ و ۸۸ درصد افزایش تاثیرگذاری کرده است

شکل (۷) تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه در مدل با استفاده از آستانه با هندسه مکعب مستطیلی را که تحت اثر رفتار هیستریزس قرار گرفته است، نشان می‌دهد. شکل (۷-الف) عمق نسبی جریان در مقطع (۱) و شکل (۷-ب) عمق نسبی جریان در مقطع (۲) را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در یک جریان افزایشی و کاهششی، در چند دبی با شرایط آزمایشگاهی برابر، اعماق نسبی متفاوتی در هر دو مقطع ایجاد شده می‌شود. در مدل M3 در بازه دبی‌های ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۸۳ مترمکعب بر ثانیه، پدیده هیستریزس ظاهر شده است. در این حالت در جریان اولیه در بازه دبی‌های ذکر شده، به دلیل حضور آستانه در مسیر جریان و به تبع آن تشکیل پرش هیدرولیکی، مقاطع (۱) و (۲)

شکل (۶) تغییرات عدد فرود جریان در برابر آستانه هرمی شکل در مقاطع (۱) و (۲) در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که با افزایش دبی و سپس کاهش آن، در دو عدد فرود عبوری از زیر دریچه در شرایط یکسان، در مقاطع (۱) و (۲) رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق‌بحرانی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر در مدل M2 محدوده‌ای که در آن رفتار هیستریزس مشاهده می‌گردد در محدوده عدد فرود  $3.621 \leq Fr_0 \leq 5.09$  می‌باشد که با کاهش دبی به مقدار کمتر از ۰/۰۵۸ مترمکعب بر ثانیه جریان به حالت اولیه برمی‌گردد یا به عبارت دیگر مقاطع (۱) و (۲) در محدوده زیربحرانی قرار می‌گیرد. در این شکل نیز مشخص است که با اثرگذاری رفتار هیستریزس بر جریان در مقابل آستانه مکعب مستطیلی رفتارهای دوگانه‌ای از رژیم جریان حاصل شده بطوریکه با ظاهر شدن پدیده هیستریزس مقادیر اعداد فرود در مقاطع

در شکل‌های (۳، ۵ و ۷) که بیان‌گر تغییرات اعماق نسبی جریان که متأثر از رفتار هیسترتیک می‌باشد با افزایش دبی که بر روی فلش با عبارت Subcritical flow نشان داده شده است، رژیم جریان زیربحرانی می‌باشد و با رسیدن به نقطه  $J1$  که با عبارت Supercritical hysteresis مشخص شده است، نقطه تبدیل رژیم زیربحرانی به فوق‌بحرانی می‌باشد. پس از سیر کامل صعودی دبی جریان، با کاهش تدریجی دبی که روی نمودار با Supercritical flow مشخص شده است، رژیم جریان دارای حالت فوق‌بحرانی می‌باشد که با رسیدن به نقطه  $J2$  که با عبارت Subcritical hysteresis نشان داده شده است نقطه تبدیل رژیم فوق‌بحرانی به زیر بحرانی است. به‌طور واضح مشخص است که در بازه نقطه  $J1$  تا  $J2$  در دبی‌های یکسان دو رفتار متفاوت از جریان مشاهده می‌شود که علت اصلی آن، وابستگی حالت فعلی جریان به حالت قبلی آن بوده و از طرف دیگر به‌نوعی انرژی پسماند در جریان می‌باشد. با تغییر رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی، مقداری از انرژی به‌صورت انرژی پسماند در جریان باقی می‌ماند که این انرژی پسماند باعث افزایش سرعت و تغییر رژیم جریان در شرایط برابر آزمایشگاهی می‌باشد.

در محدوده رژیم زیربحرانی قرار می‌گیرند و پروفیل سطحی ایجاد شده از نوع پروفیل یک می‌باشد ولی در جریان ثانویه با بازگشت دبی به محدوده  $0/006$  تا  $0/0083$  مترمکعب بر ثانیه، پرش هیدرولیکی از آستانه عبور کرده و هر دو مقطع با کاهش عمق نسبت به جریان اولیه در محدوده رژیم فوق‌بحرانی قرار گرفته و پروفیل ایجاد شده از نوع پروفیل دو می‌باشد. علت ایجاد پدیده هیستریزس در تمامی مدل‌های بررسی شده در تحقیق حاضر، 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 زیر بحرانی قرار داشتند به رژیم فوق بحرانی تبدیل می‌گردند. با کاهش تدریجی دبی و با رسیدن آن به مقداری که در جریان اولیه، هر دو مقطع در محدوده رژیم زیر بحرانی بودند، شاهد رژیم فوق بحرانی خواهیم بود، زیرا رژیم حالت قبلی جریان در محدوده فوق بحرانی قرار دارد. با اثرگذاری رفتار هیسترتیک، در مدل آستانه استوانه‌ای اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب به میزان  $70/68$  و  $60/73$  درصد افزایش می‌یابد که این میزان افزایش عمق نسبی به شدت در سیستم سازه‌ای اثر گذاشته و در صورت عدم کنترل آن خسارات قابل توجهی را به بار خواهد آورد.

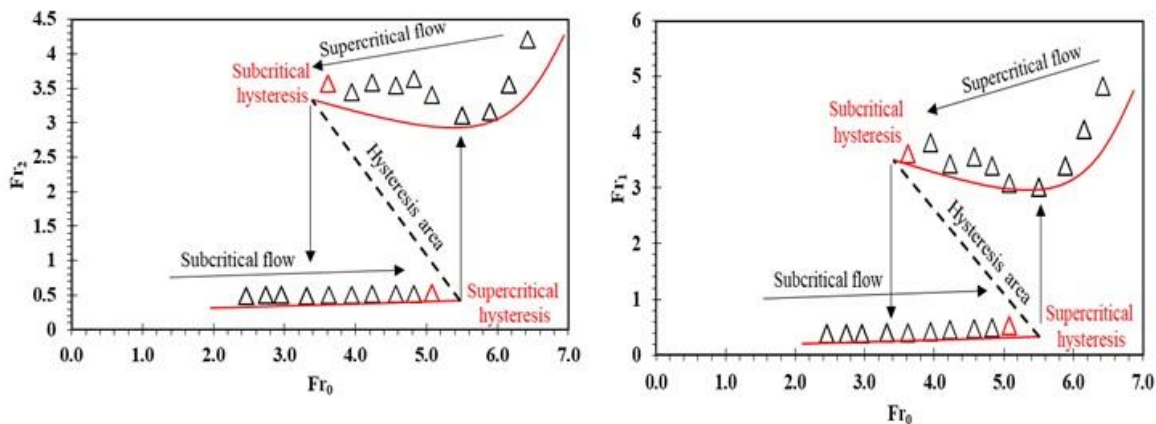


Fig.6- Froude number changes against the Froude number of undergate flow due to hysteresis phenomenon for Pyramidal sill (A) section [1] (B) section [2]

شکل ۶- تغییرات عدد فرود مقطع (۱) و (۲) در برابر عدد فرود عبوری از دریچه متأثر از پدیده هیستریزس در آستانه هرمی: الف) مقطع (۱) ب) مقطع (۲)

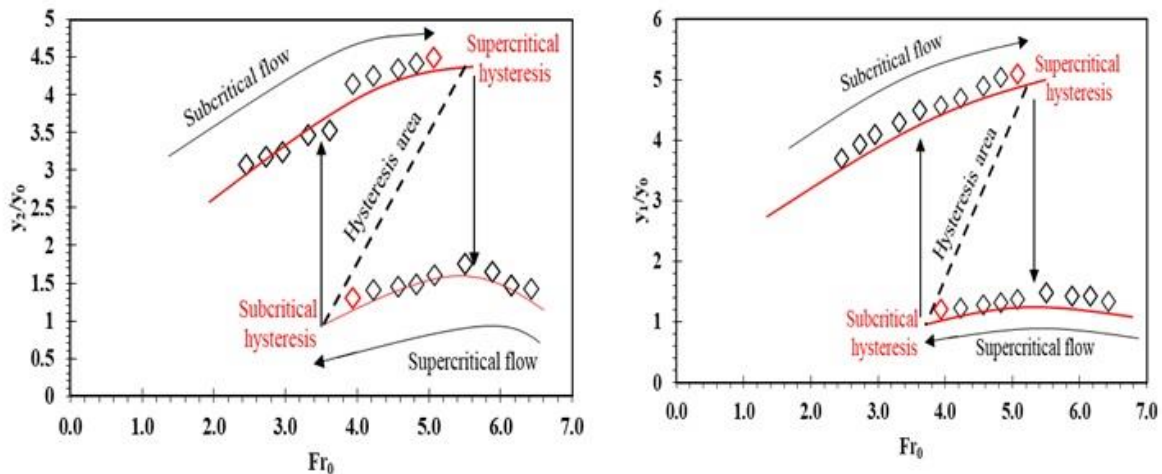


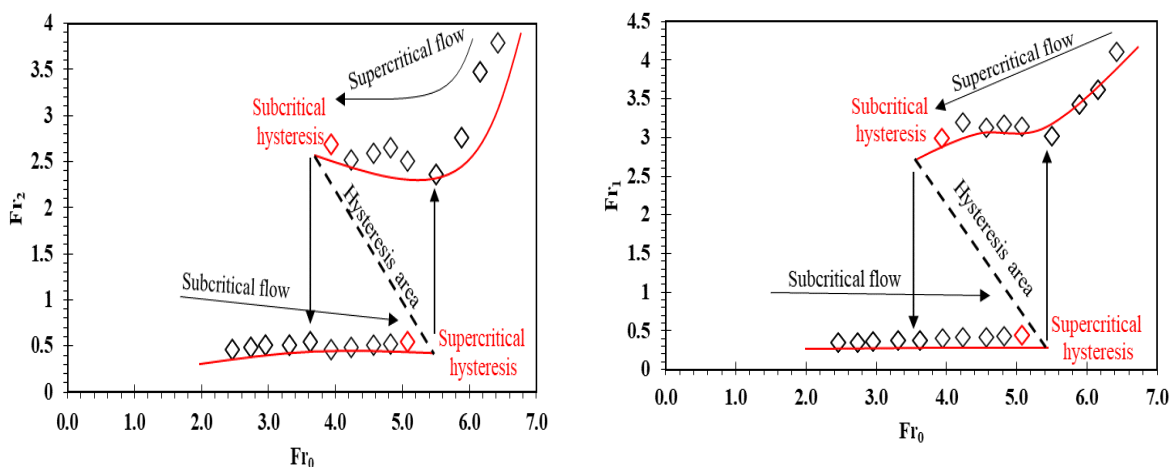
Fig. 7- Relative flow depths changes against the Froude number due to hysteresis phenomenon for rectangular cubic sill (A) section [1] (B) section [2]

شکل ۷- تغییرات اعماق نسبی جریان در برابر عدد فرود عبوری از دریچه در استوانه مکعب مستطیلی شکل متأثر از پدیده هیستریزیس مکعب مستطیل (الف) مقطع (۱) (ب) مقطع (۲)

(۱) محل تشکیل پرش هیدرولیکی می‌باشد. با دقت در شکل می‌توان دریافت که راندمان پرش هیدرولیکی در آستانه مکعب مستطیلی شکل بیشتر از آستانه با هندسه‌های هرمی شکل و استوانه‌ای می‌باشد. علت این امر آن است که آستانه مکعب مستطیلی به علت داشتن هندسه مکعبی و سطح تماس بیشتر با سیال، جریان با برخورد به آن دچار پس‌زدگی (Back water profile) شده و با تشکیل پرش هیدرولیکی، عمق جریان نسبت به سایر آستانه‌ها افزایش بیشتری می‌یابد. در دبی‌های پایین، میزان راندمان پرش با افزایش عمق بحرانی نسبی به‌صورت صعودی افزایش می‌یابد اما در دبی‌های بالا با عبور پرش هیدرولیکی از روی آستانه و تشکیل رژیم فوق بحرانی، میزان راندمان پرش کاهش می‌یابد. از طرفی در آستانه‌های استوانه‌ای و هرمی راندمان پرش تغییر چندانی در مقایسه با خود نمی‌کنند اما نسبت به حالت ساده دارای افزایش راندمان می‌باشد. بیشترین میزان راندمان که مربوط به آستانه مکعبی است در حدود ۷۲ درصد می‌باشد. از طرف دیگر، راندمان پرش هیدرولیکی آستانه مکعب مستطیلی نسبت به سایر آستانه‌ها چیزی در حدود ۶۵ درصد بیشتر از سایر آستانه‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که راندمان پرش آستانه مکعبی نسبت به آستانه هرمی شکل ۶۵ درصد و نسبت به آستانه استوانه‌ای حدود ۵۸ درصد بیشتر است.

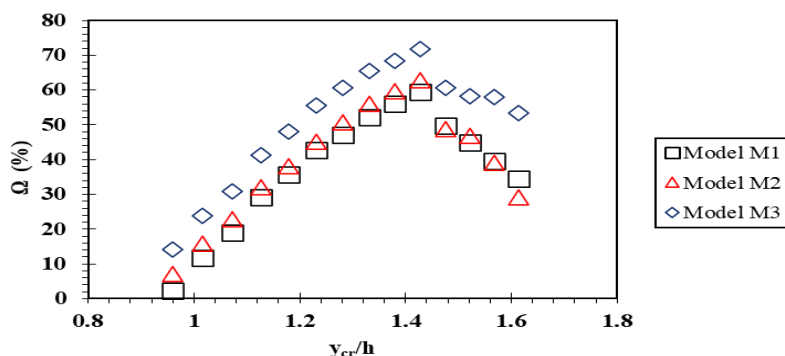
شکل (۸) تغییرات عدد فرود جریان در برابر آستانه مکعب مستطیلی شکل در مقاطع (۱) و (۲) در برابر عدد فرود عبوری از زیر دریچه را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که با افزایش دبی و سپس کاهش آن، در دو عدد فرود عبوری از زیر دریچه در شرایط یکسان، در مقاطع (۱) و (۲) رژیم جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر در مدل M3 محدوده‌ای که در آن رفتار هیسترتیک مشاهده می‌گردد در محدوده عدد فرود  $3.941 \leq Fr_0 \leq 5.09$  می‌باشد که با کاهش دبی به مقدار کمتر از  $0.006$  مترمکعب بر ثانیه جریان به حالت اولیه بر می‌گردد. به‌عبارت دیگر مقاطع (۱) و (۲) در محدوده زیر بحرانی قرار می‌گیرد. در این شکل نیز مشخص است که با اثرگذاری رفتار هیسترتیک بر جریان در مقابل آستانه مکعب مستطیلی رفتارهای دوگانه‌ای از رژیم جریان حاصل شده به‌طوری‌که با ظاهر شدن پدیده هیستریزیس مقادیر اعداد فرود در مقاطع (۱) و (۲) به‌ترتیب به میزان  $85/21$  و  $80$  درصد افزایش تأثیرگذاری کرده است.

شکل (۹) مقایسه راندمان پرش هیدرولیکی به واسطه المان‌های آستانه قرار گرفته در مسیر حرکت جریان را نشان می‌دهد. راندمان پرش هیدرولیکی با استفاده از رابطه (۵) به‌دست می‌آید. علت اینکه راندمان پرش نسبت به مقطع (۱) محاسبه شده است این است که آستانه، پرش هیدرولیکی را به سمت بالادست هدایت می‌کند و مقطع



**Fig. 8- Froude number changes against the Froude number of undergate flow due to hysteresis phenomenon for rectangular cubic sill (A) section [1] (B) section [2]**

شکل ۸- تغییرات عدد فرود مقطع (۱) و (۲) در برابر عدد فرود عبوری از دریچه منتهی به پدیده هیستریزس در آستانه مکعب مستطیلی (الف) مقطع (۱) (ب) مقطع (۲)



**Fig. 9- Comparison of percentage of hydraulic jump changes for different sills**

شکل ۹- مقایسه تغییرات درصد راندمان پرش هیدرولیکی برای آستانه‌های مختلف

جریان از دبی  $0.0041$  تا  $0.01$  مترمکعب بر ثانیه و با ایجاد جریان کاهش از  $0.01$  تا  $0.0041$  مترمکعب بر ثانیه با گام‌های افزایشی و کاهش  $0.0041$  مترمکعب بر ثانیه 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 یک: که در آن، مقاطع یک و دو در رژیم زیر بحرانی قرار می‌گیرد (b) پروفیل دو: که در آن، مقاطع یک و دو در رژیم فوق بحرانی قرار می‌گیرد. در این تحقیق از سه آستانه با هندسه‌های هرمی، استوانه‌ای و مکعب مستطیلی شکل با ارتفاع سه سانتی‌متر استفاده شده است که نتایج آن به اختصار در ذیل ارائه شده است.

### نتیجه‌گیری

پدیده هیستریزس 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 هیسترتیک 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، برای دستیابی به اهداف مورد نظر، که بررسی شرایط و دلایل وجود و عدم وجود پرش هیدرولیکی و تشکیل دو پروفیل متفاوت و تاثیر رفتار هیسترتیک است، لذا با ایجاد

- در مدل M1 که در مسیر جریان از آستانه استوانه‌ای استفاده شد، پدیده هیستریزیس در محدوده عدد فرود  $3/62$  و  $5/08$  تشکیل شد که با افزایش دبی به مقدار بیشتر از  $0/0058$  مترمکعب بر ثانیه جریان به رژیم فوق‌بحرانی و با کاهش دبی به مقدار کمتر از  $0/005$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان به رژیم زیربحرانی برمی‌گردد که میزان اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب  $85/38$  و  $82/57$  درصد افزایش یافته است.
- در مدل M2 نیز که در مسیر جریان آستانه هرمی شکل استفاده شده است، پدیده هیستریزیس در محدوده عدد فرود  $3/62$  و  $5/08$  تشکیل شد که با افزایش دبی به مقدار بیشتر از  $0/0058$  مترمکعب بر ثانیه جریان به رژیم فوق‌بحرانی و با کاهش دبی به مقدار کمتر از  $0/005$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان به رژیم زیربحرانی برمی‌گردد که میزان اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب  $70/68$  و  $60/37$  درصد افزایش یافته است.
- راندمان پرش هیدرولیکی در آستانه مکعب مستطیلی شکل بیشتر از سایر آستانه‌ها بوده که این مقدار افزایش به میزان نسبی  $72$  درصد می‌باشد.
- مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب  $85/31$  و  $88$  درصد افزایش یافته است.
- در مدل M3 نیز که در مسیر جریان آستانه مکعب مستطیلی شکل استفاده شده است، پدیده هیستریزیس در محدوده عدد فرود  $3/94$  و  $5/08$  تشکیل شد که با افزایش دبی به مقدار بیشتر از  $0/0058$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان به رژیم فوق‌بحرانی و با کاهش دبی به مقدار کمتر از  $0/005$  مترمکعب بر ثانیه رژیم جریان به رژیم زیربحرانی برمی‌گردد که میزان اعماق نسبی جریان در مقاطع (۱) و (۲) به ترتیب  $70/68$  و  $60/37$  درصد افزایش یافته است.

#### References

- 1- Abecasis, F.M. and Quintela, A.C., 1964. Hysteresis in steady free-surface flow. *Water Power*, 16 (4), pp.147–151.
- 2- Akers, B. and Bokhove, O., 2008. Hydraulic flow through a channel contraction: Multiple steady states. *Physics of fluids*, 20(5). Doi: 10.1063/1.2909659.
- 3- Austria, P.M., 1987. Catastrophe model for the forced hydraulic jump. *Journal of Hydraulic research*, 25 (3), pp.269–280. Doi: 10.1080/00221688709499270
- 4- Baines, P. G. and Whitehead, J. A., 2003. On multiple states in single-layer flows. *Physics of fluids*, 15(2), pp.298-307.
- 5- Daneshfaraz, R., Aminvash, E. and Najibi, A. 2022 b. Experimental study of hysteretic behavior of supercritical regime on hydraulic parameters of flow against gabion contraction. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(1), pp.33-44. Doi: 10.22059/IJSWR.2022.334538.669141.
- 6- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Aminvash, E. and Abraham, J.P., 2022 a. Experimental Investigation of Multiple Supercritical Flow States and the Effect of Hysteresis on the Relative Residual Energy in Sudden and Gradual Contractions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 46, pp.3843–3858. Doi: 10.1007/s40996-022-00818-9.
- 7- Defina, A. and Susin, F.M., 2003. Hysteretic behavior of the flow under a vertical sluice gate. *Physics of Fluids*, 15(9), pp.2541-2548. doi: 10.1063/1.1596193.
- 8- Defina, A. and Susin, F.M., 2006. Multiple states in open channel flow. *Vorticity and Turbulence Effects in Fluid Structures Interactions*, pp.105-130.
- 9- Defina, A. and Viero, D. P., 2010. Open channel flow through a linear contraction. *Physics of Fluids*, 22(3), pp. 1-12. Doi: 10.1063/1.3370334.
- 10- Kabiri-Samani, A., Rabiei, M. H., Safavi, H., & Borghei, S. M., 2014. Experimental–analytical investigation of super- to subcritical flow transition without a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), pp. 129-136. Doi: 10.1080/00221686.2013.822935.

- 
- 11-Lawrence, G.A., 1987. Steady flow over an obstacle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(8), pp.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))
- 12-Mehrotra, S. C., 1974. Hysteresis effect in one and two fluids systems. *Proceeding V Australian conference on hydraulics and fluids mechanics New Zealand, Christchurch, University of Canterbury*, 2, pp. 452-461.
- 13-Muskatirovic, D. and 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.
- 14-Sadeghfam, S., Khatibi, R., Hassanzadeh, Y., Daneshfaraz, R. and Ghorbani, M. A., 2017. Forced hydraulic jumps described by classic hydraulic equations reproducing cusp catastrophe features. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(9), pp. 4169-4179.
- 15-Viero, D. P. and Defina, A., 2017. Extended theory of hydraulic hysteresis in open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(9), 06017014. Doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001342.
- 16-Viero, D. P. and Defina, A., 2019. Multiple states in the flow through a sluice gate. *Journal of Hydraulic Research*, 57(1), pp. 39-50. Doi: 10.1080/00221686.2018.1434694.