

## Research Article

# Energy Dissipation of Supercritical Flow with Use of Different Geometric Shapes of Sills

P Ebadzadeh<sup>1</sup>, R Daneshfaraz<sup>2\*</sup>, R Norouzi<sup>3</sup>

Received: March 10, 2023

Revised: May 30, 2023

Accepted: August 27, 2023

Published online: June 21, 2024

1- M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Iran

2- Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Iran

3- Ph.D., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Iran

\* Corresponding Author Email: [daneshfaraz@maragheh.ac.ir](mailto:daneshfaraz@maragheh.ac.ir)

## Abstract

### Background and Objectives

In the past, many studies have been carried out on the hydraulics of slide gate. In addition to flow control and measurement, this structure is used for energy consumption downstream. This structure plays an important role in controlling and regulating the speed downstream of the structure. The supercritical flow passing through slide gates has attracted the attention of researchers due to its high energy dissipation. The high velocity of the flow in the downstream of the hydraulic structures is one of the important issues of water engineering and usually causes damages if there is no control in the downstream. The creation of hydraulic jump is associated with the transformation of supercritical to subcritical flow, and as a result, energy consumption occurs. This phenomenon can be seen downstream of structures such as dams, rapids and gates. So far, successive methods have been used to reduce the kinetic energy of the flow passing through the slide gate, which are discussed below. Among the first researches in this field, the studies of Rajaratnam (1967), Rajaratnam (1968) and Alhamid, (1994) can be mentioned. Daneshfaraz et al. (2022a) investigated the hysteretic behavior of the supercritical flow which occurs with two different flow behaviors under the same hydraulic conditions. The results showed in the primary flow, the amount of these depths indicates the subcritical regime, and in the secondary flow, with the formation of the hysteresis phenomenon in some flow rates, it indicates the supercritical regime. The hysteretic phenomenon has a different effect on the amount of energy consumption depending on the type of flow.

### Methodology

The experiments were performed in a laboratory flume 5 m long, 0.30 m wide, and 0.45 m deep. The laboratory channel has a floor and walls made of Plexiglass and is equipped with a point depth gauge with an accuracy of  $\pm 1$  mm. A 1 cm thick sluice gate is installed one meter away from the beginning of the flume. In all experiments, the gate opening was considered constant and equal to 5 cm. The discharge applied in the present study ranged from 700 to 900 l/min. The effect of the threshold with semi-cylindrical, cylindrical, pyramidal, and rectangular cube geometric shapes and with different widths of 5, 7, 10, 15, and 20 cm was investigated experimentally. In the present paper, the sill was



installed in the different position, including under, the tangential state downstream and upstream of slide gate.

### **Findings**

The energy dissipation of the sluice gate was investigated in the non-sill mode and with increasing discharge. Laboratory studies showed that the increase in flow rate caused an increase in the flow speed and consequently the descent number of the supercritical region. As a result, the depth of flow in section A has decreased and it has caused energy consumption downstream of the sliding gate. Energy consumption by installing sill in different positions showed that all four geometries, including semi-cylindrical, cylindrical, pyramidal and rectangular cubic sill, had the maximum energy loss in the position under the gate. Results showed that for under gate sill, the maximum of energy dissipation is related to pyramidal, semi- cylindrical, cylindrical and rectangular cubic sills, respectively. The increase in the jetting streamlines due to the application of the pyramid sill is evident in the tangential position downstream of the gate. The results showed that placing circular sills, including semi-cylindrical and cylindrical, in the downstream of the slide gate, cause the uniformity of the flow lines. Therefore, the depth of the flow in the initial section of the hydraulic jump is reduced compared to the polygon sills.

### **Conclusion**

The results showed that the amount of energy loss increases with the increase in sill width. Due to having the slope of the downstream side in the same direction as the flow, the pyramid threshold increases the speed of the flow and therefore causes a decrease in the initial depth of the flow. Circular sills including semi-cylindrical, cylindrical and rectangular cube were included, respectively, with the greatest initial depth .By changing the position of the threshold to the tangent position downstream of the slide gate, the highest amount of energy loss was assigned to semi-cylindrical, cylindrical, rectangular cube and pyramidal thresholds, respectively.

**Keywords:** Energy dissipation, Hydraulic jump, Sill, Free flow condition, Slide gate.

## مقاله پژوهشی

### استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی با کاربرد اشکال هندسی متفاوت آستانه

پریسا عبادزاده<sup>۱</sup>، رسول دانشفراز<sup>۲\*</sup>، رضا نوروزی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- استاد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳- دانش آموخته دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: daneshfaraz@maragheh.ac.ir

#### چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی کاربرد سازه دریچه‌کشویی با آستانه پرداخته شد. آستانه‌های به‌کار گرفته شده به‌منظور مطالعه تأثیر هندسه و عرض‌های مختلف تهیه گردید. هندسه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفت. آستانه‌ها در عرض ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر تهیه شد. تغییرات ناشی از محل قرارگیری آستانه شامل آستانه در زیر دریچه‌کشویی، مماس بر بالادست و مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی، بر میزان افت انرژی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که کاربرد آستانه در تمامی حالت‌ها، میزان استهلاک انرژی را نسبت به حالت بدون آستانه افزایش می‌دهد. بررسی آستانه در عرض‌های مختلف حاکی از این است که افزایش در عرض آستانه، به‌دلیل کاهش در بازشدگی دریچه‌کشویی، افزایش در سرعت جریان و به‌تبع آن کاهش عمق در مقطع اولیه پرش‌هیدرولیکی، سبب افزایش در میزان افت انرژی می‌گردد. نتایج حاصل از تغییر موقعیت آستانه نشان داد که نصب آستانه‌های هرمی، نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب‌مستطیلی در زیر دریچه‌کشویی میزان افت انرژی نسبت به پایین‌دست پرش‌هیدرولیکی را در بیش‌ترین عرض آستانه به ترتیب به میزان ۱۸۰، ۲۱۵، ۱۹۰ و ۱۶۵ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش می‌دهد.

مقادیر ذکر شده در حالت آستانه مماس بر بالادست به‌ترتیب به ۱۷۵، ۱۴۳، ۱۳۶ و ۱۲۸ درصد و در حالت آستانه مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی به ۱۳۲، ۱۲۱، ۱۱۰ و ۱۰۳ کاهش یافت. با تعبیه کردن آستانه در هندسه‌های متفاوت، تأثیر بیشتر آستانه هرمی بر میزان استهلاک انرژی در موقعیت آستانه در زیر دریچه‌کشویی نسبت به سایر موقعیت‌ها برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: آستانه، استهلاک انرژی، پرش‌هیدرولیکی، شرایط جریان آزاد، دریچه‌کشویی

## مقدمه

بالا بودن سرعت و به تبع آن عدد فرود جریان در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از جمله مسائل مهم مهندسی آب بوده و معمولاً در صورت عدم کنترل در پایین دست باعث خسارات می‌گردد. ایجاد پرش هیدرولیکی با تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی همراه بوده و در نتیجه آن استهلاك انرژی اتفاق می‌افتد. این پدیده در پایین دست سازه‌هایی چون سدها، تندآب‌ها و دریاچه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. تاکنون روش‌های متدوالی جهت کاهش انرژی جنبشی جریان عبوری از دریاچه‌های کشویی صورت گرفته است که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است دانشفرز و همکاران (۲۰۲۱).

کنترل پرش هیدرولیکی با به‌کارگیری بسترهای زبر از جمله مباحث مورد مطالعه پژوهشگران می‌باشد. از اولین پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۷) و راجاراتنام (۱۹۶۸) و حسین و همکاران (۱۹۹۴) اشاره کرد. بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۰ با زبری نسبی ۰/۲۵، ۰/۴۳ و ۰/۵ توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) انجام شد. آن‌ها با در نظر گرفتن ضریب نیروی برشی به صورت تابعی از عدد فرود اولیه جریان، روابطی برای بستر صاف و بستر موج‌دار ارائه دادند. نتایج نشان داد که بستر موج دار با کاهش عمق نسبی ۲۵ درصد، عملکرد بهتری در کاهش عمق ثانویه و تشکیل پرش هیدرولیکی دارند. تاثیر بستر موج‌دار نوزنقه‌ای بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ و چهار زبری نسبی مختلف توسط ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که عمق پایاب مورد نیاز جهت تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار کمتر از عمق پایاب مربوط به پرش هیدرولیکی مشابه بر روی بسترهای صاف می‌باشد. تاثیر بستر موج‌دار سینوسی بر روی شش بستر با شیب موج‌های ۰/۲۸۶ تا ۰/۶۲۵ و محدوده عدد فرود ۲/۸ تا ۸/۶ توسط عباس‌پور

و همکاران (۲۰۰۹) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان کوچکتر است. همچنین بررسی و مقایسه نیروی برشی و ضریب تنش برشی نشان داد که تنش برشی در بستر موج‌دار حداقل ۱۰ برابر بستر صاف می‌باشد. نسبت عمق‌های مزدوج و طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با المان‌های گوه‌ای شکل در محدوده عدد فرود ۲/۰۶ تا ۱۰/۹۵ و زبری نسبی ۰/۲۲ تا ۱/۴ توسط الیان و سان (۲۰۱۲) به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بستر زبر با المان‌های زبری غیر ممتد گوه‌ای شکل، طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی را در مقایسه با بستر صاف به ترتیب ۳۰ تا ۵۳ درصد و ۱۶/۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. بررسی آزمایشگاهی تاثیر شیب معکوس با بستر زبر و المان‌های لوزی شکل، با درصد تراکم ۱۰/۶۷، دو ارتفاع زبری و دو شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در محدوده عدد فرود ۴/۷ تا ۱۲/۳ توسط پارسامهر و همکاران (۲۰۱۷) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که عمق ثانویه و طول پرش با افزایش ارتفاع المان‌های زبری و شیب معکوس کاهش می‌یابد. نصراصفهان‌ی و شفاعی بجستان (۲۰۱۲) تأثیر پارامترهای زبری مصنوعی با تراکم ۱۱/۶ درصد در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۱/۶۸ را بر پرش هیدرولیکی روی پله معکوس مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده افزایش طول زبری تأثیر زیادی در کاهش افت انرژی نداشته اما ارتفاع زبری در خصوصیات پرش هیدرولیکی تأثیر به‌سزایی دارد. پارسامهر و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از زبری‌های نیم‌استوانه‌ای، مشخصات پرش در حوضچه‌های آرامش را در محدوده عدد فرود ۴/۶ تا ۷/۳ با سه ارتفاع زبری و چهار فاصله متفاوت بین زبری‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عمق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر در مقایسه با بستر صاف بطور متوسط ۲۵/۳۵

به بررسی میزان تغییرات ضریب دبی با به کارگیری دریچه کشویی لبرانت با آستانه پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از دریچه کشویی لبرانت با افزایش در طول موثر دریچه، ضریب دبی را افزایش می دهد.

طراحی آستانه در زیر دریچه کشویی و مطالعه آن بر ضریب دبی تحت شرایط هیدرولیکی مختلف در تحقیقاتی از جمله سلماسی و نوروزی (۲۰۲۰)، کرمی و همکاران (۲۰۲۰)، دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲c، ۲۰۲۲b) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تأثیر آستانه در زیر دریچه کشویی بر عمق های مزدوج پرش، مطالعه پارامترهای مؤثر بر میزان استهلاك انرژی در بین مطالعات احساس می گردد. قرارگیری آستانه در موقعیت های مختلف دریچه کشویی با توجه به ایجاد تغییر در مشخصه های جریان، از جمله عمق اولیه پرش حائز اهمیت می باشد. تغییر در ابعاد و هندسه آستانه از جمله مهم ترین عوامل در این زمینه به شمار می آید. لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر آستانه در شکل های هندسی و عرض های متفاوت، بر میزان افت انرژی صورت پذیرفت.

#### مواد و روش ها

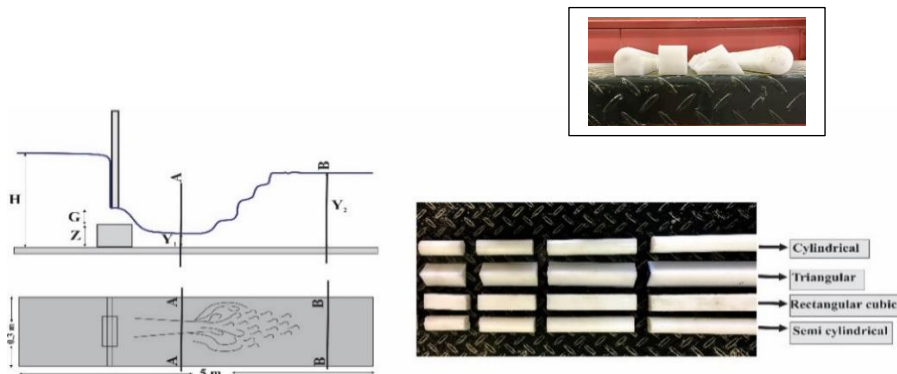
مشخصات فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر، به طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب ۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ متر می باشد (شکل ۱). دریچه کشویی به ضخامت ۱ سانتی متر در فاصله یک متری از ابتدای فلوم نصب شده است و دریچه انتهایی در انتهای فلوم جهت تثبیت پرش هیدرولیکی به کار گرفته شد. به منظور بررسی تأثیر هندسه، آستانه در اشکال نیم استوانه ای، استوانه ای، هرمی و مکعب مستطیلی انتخاب شد. آستانه های مذکور به منظور بررسی تأثیر عرض، در ابعاد ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی متر تهیه گردید. در مجموع ۱۶ مدل آزمایشگاهی آستانه مورد آزمایش قرار گرفت. در این

و ۳۸/۵ درصد کاهش و افت انرژی بطور متوسط ۱۸ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش پیدا می کند. نیسی و شفافی بستان (۲۰۱۳) به مطالعه مشخصات پرش بر روی بستر زبر با المان های غیر ممتد و با آرایش زیگزاگ در نسبت های واگرایی ۰/۶۷، ۰/۵ و ۰/۳۳ و محدوده عدد فرود ۲ تا ۱۰ پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت عمق مزدوج در بستر زبر ۱۶ تا ۲۰ درصد در مقایسه با بستر صاف کاهش یافته است. بررسی مطالعات پیشین نشان داد که استفاده از موانع و زبری، در پایین دست دریچه، به دو صورت شامل کاهش در عمق ثانویه پرش و افزایش در میزان استهلاك انرژی قابل توجیه می باشد. جلیل و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه ای آزمایشگاهی نخستین بار با تغییر در محل قرارگیری مانع و کاربرد آن در زیر دریچه کشویی، مشخصات پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان داد که قرارگیری آستانه هرمی در زیر دریچه کشویی استهلاك انرژی را به میزان ۱۰ درصد نسبت به حالت بدون آستانه افزایش می دهد.

دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲a) رفتار هیسترتیک جریان فوق بحرانی را که با دو رفتار متفاوت جریان در شرایط هیدرولیکی یکسان اتفاق می افتد، را به صورت آزمایشگاهی بررسی قرار دادند. آنها برای انجام آزمایش ها از سه آستانه با هندسه های متفاوت بهره گرفتند. نتایج نشان داد در جریان اولیه میزان این عمق ها بیانگر رژیم زیر بحرانی و در جریان ثانویه با تشکیل پدیده هیستریزس در برخی از دبی ها بیانگر رژیم فوق بحرانی می باشد. پدیده هیستریزس بسته به نوع جریان بر میزان استهلاك انرژی تاثیر متفاوتی دارد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۳a) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آستانه در اشکال هندسی مختلف بر تغییرات ضریب دبی و استهلاك انرژی با قرار دادن آستانه در زیر دریچه کشویی پرداختند. نتایج نشان داد به کارگیری آستانه در این موقعیت سبب افزایش ضریب دبی و استهلاك انرژی می گردد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۳b)

پژوهش دبی جریان در محدوده ۷۰۰ - ۹۰۰ لیتر بر دقیقه بر هر کدام از مدل‌ها اعمال گردید. در کل ۱۶۰ آزمایش

جهت بررسی تأثیر هندسه و عرض آستانه بر استهلاک انرژی در شرایط آزاد انجام شد.



شکل ۱- تصویر شماتیک فلوم آزمایشگاهی و آستانه‌های به‌کاررفته در تحقیق حاضر.

کرد. از تأثیر پارامترهای بدون بعد  $Z/Y_A$  و  $b/Y_A$  به دلیل ثابت بودن ارتفاع آستانه‌ها در تمامی آزمایش‌ها و عرض آستانه در بررسی تأثیر هندسه آستانه چشم‌پوشی شد و میزان استهلاک انرژی توسط عامل بدون بعد فرود ارزیابی شد. به‌منظور معنادار کردن پارامترها از طریق تقسیم آن‌ها، پارامترهای مؤثر تأثیرگذار بر استهلاک انرژی دریچه‌کشویی با آستانه به‌صورت رابطه ۳، تعریف و خلاصه گردید.

$$\frac{\Delta E_{AB}}{E_A}, \frac{\Delta E_{AB}}{E_B} = F_3(Fr_A, \frac{Y_B}{Y_A}) \quad [3]$$

که در آن  $\Delta E_{AB}/E_A$  و  $\Delta E_{AB}/E_B$  به‌ترتیب بیان‌گر میزان استهلاک انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست پرش می‌باشد.

### نتایج و بحث

#### حالت بدون آستانه

جهت بررسی میزان استهلاک انرژی دریچه‌کشویی در حالت شاهد (بدون آستانه)، دبی در محدوده ۷۰۰ - ۹۰۰ لیتر بر دقیقه در همه آزمایش‌ها

### آنالیز ابعادی

در تحقیق حاضر پارامترهای مؤثر بر استهلاک انرژی جریان را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ نشان داد.

$$f_1(Q, B, b, Z, G, E_A, E_B, Y_A, Y_B, g, \rho, \mu) = 0 \quad [1]$$

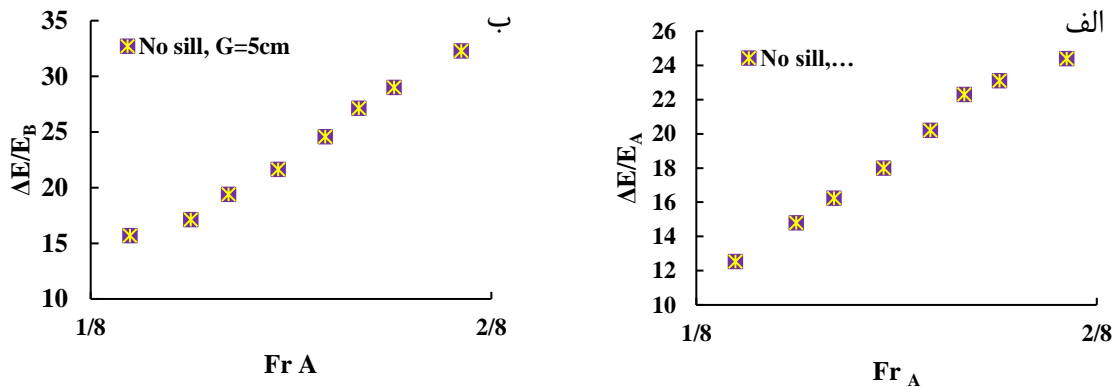
که در آن  $Q$  دبی جریان،  $B$  عرض کانال،  $b$  عرض آستانه،  $Z$  ارتفاع آستانه،  $G$  بازشدگی دریچه‌کشویی،  $Y_A$  و  $Y_B$  به‌ترتیب عمق آب در مقطع  $A$  و  $B$ ،  $E_A$  و  $E_B$  به‌ترتیب انرژی مخصوص در مقطع  $A$  و  $B$ ،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزوجت دینامیکی آب، بنابر قضیه پی-باکینگهام، کمیت‌های بی‌بعد برای دریچه با آستانه به‌صورت رابطه ۲، ارائه می‌شود:

$$f_2(Fr_A, \frac{B}{Y_A}, \frac{b}{Y_A}, \frac{Z}{Y_A}, \frac{E_A}{Y_A}, \frac{E_B}{Y_A}, \frac{Y_B}{Y_A}, Re_A) = 0 \quad [2]$$

در رابطه ۲،  $Fr_A$  و  $Re_A$  به‌ترتیب بیان‌گر عدد بی‌بعد فرود و رینولدز می‌باشد. چون عدد رینولدز جریان در بازه  $36886 < Re_A < 11286$  قرار گرفته است، لذا نوع جریان آشفته بوده و از تأثیر عدد رینولدز می‌توان صرف نظر

ترتیب بیان‌گر درصد استهلاك انرژی و پارامتر بدون بعد فرود در حالت بدون آستانه می‌باشد.

اعمال شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان، افت انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست پرش‌هیدرولیکی افزایش می‌یابد. در شکل ۲ محورهای قائم و افقی به

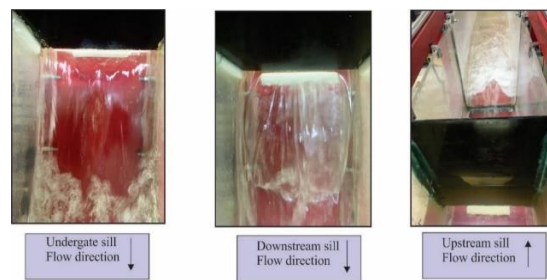


شکل ۲- تغییرات استهلاك انرژی در حالت بدون آستانه (الف) بالادست (ب) پایین‌دست.

بررسی استهلاك انرژی ناشی از کاربرد آستانه تأثیر قرار گیری آستانه در زیر، بالادست و پایین‌دست دریچه‌کشویی

در این تحقیق پارامتر تغییر در موقعیت قرارگیری آستانه نسبت به دریچه کشویی، عامل تأثیرگذار بر استهلاك انرژی مطرح گردید. به این منظور آستانه‌های مکعب‌مستطیلی، هرمی، استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای در عرض‌های ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در موقعیت‌های زیر دریچه‌کشویی، مماس بر بالادست و مماس بر پایین‌دست آن تعبیه شد. محدوده دبی اعمال شده در حالت با آستانه از ۷۰۰ تا ۹۰۰ لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد. بازشدگی دریچه‌کشویی مقدار ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شکل ۳، تصویر آزمایشگاهی تشکیل پرش‌هیدرولیکی با قرارگیری آستانه در موقعیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

شکل ۲ نتایج حاصل از میزان افت انرژی ناشی از افزایش دبی را برای حالت بدون آستانه نشان می‌دهد. تشکیل پرش‌هیدرولیکی با تبدیل جریان فوق بحرانی به زیربحرانی موجب افزایش در افت انرژی شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که افزایش دبی سبب افزایش در سرعت جریان و به تبع آن عدد فرود ناحیه فوق بحرانی شده است. در نتیجه عمق جریان در مقطع A کاهش یافته و استهلاك انرژی در پایین‌دست دریچه‌کشویی را موجب شده است. چراکه کاهش عمق اولیه و افزایش در عمق ثانویه پرش‌هیدرولیکی به‌عنوان عامل اصلی در افت انرژی می‌باشد. با توجه به شکل ۲، محدب و مقعر بودن نمودارها ناشی از بالا بودن انرژی مخصوص در مقطع A به دلیل رژیم فوق بحرانی جریان نسبت به مقطع B می‌باشد.



شکل ۳- تغییر موقعیت قرارگیری آستانه نسبت به دریچه کشویی.

بحرانی (مقطع A) و رژیم زیربحرانی (مقطع B) مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۱ نتایج حاصل از تغییرات عمق اولیه با کاربرد آستانه در موقعیت‌های مختلف و حالت شاهد را نشان می‌دهد.

جای‌گذاری آستانه در موقعیت‌های مختلف قرارگیری نسبت به دریچه کشویی نشان داد که مشخصه‌های جریان از جمله عمق در مقطع A و B تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به این منظور محدوده تغییرات عمق جریان در رژیم فوق

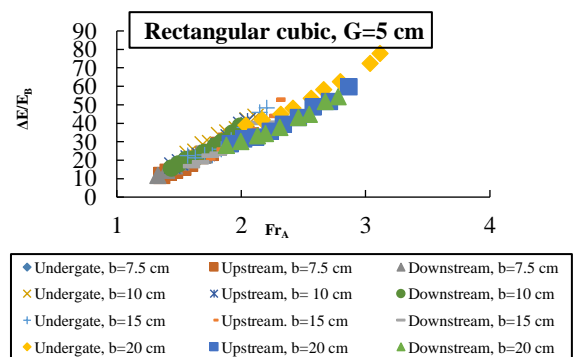
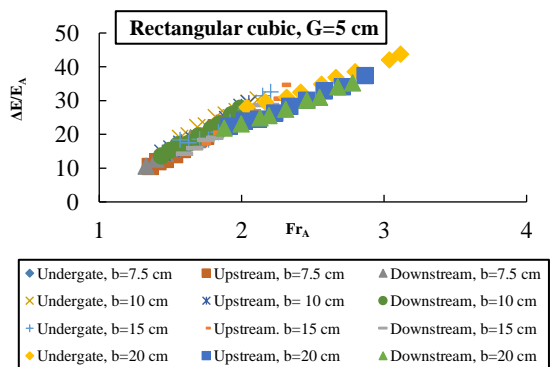
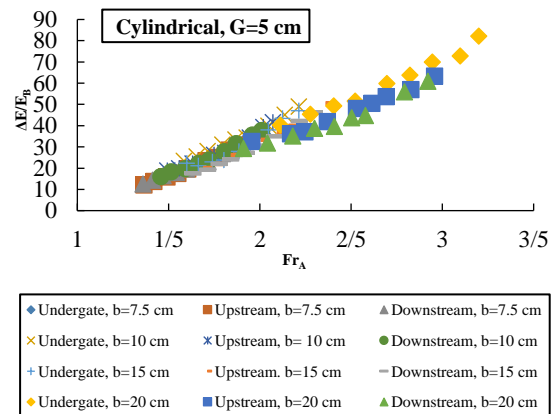
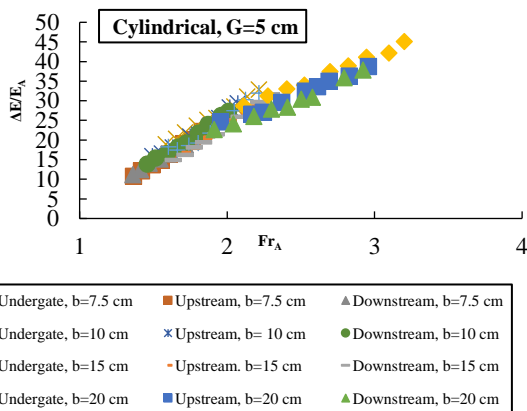
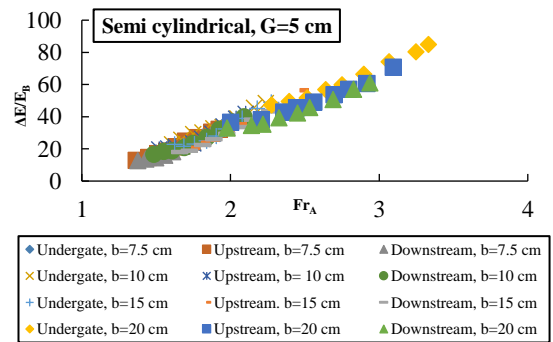
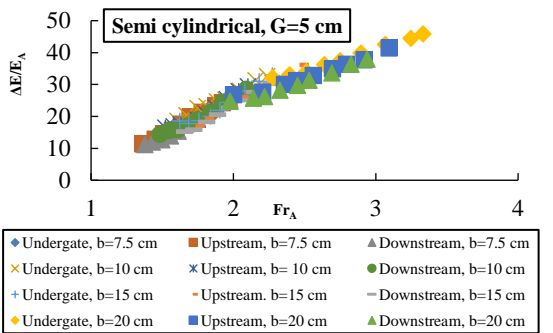
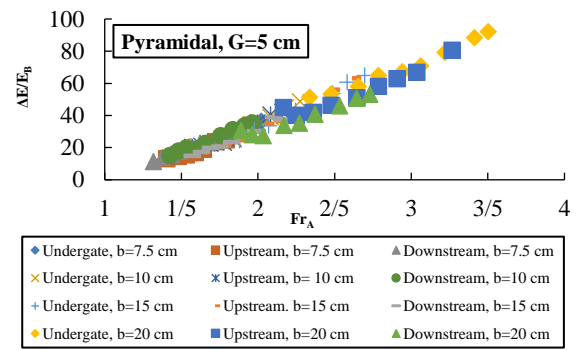
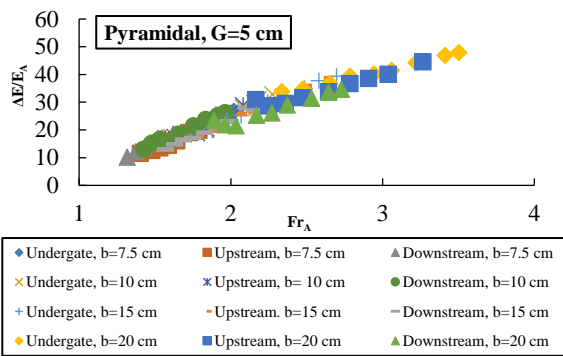
جدول ۱- تغییرات عمق جریان در مقطع A

حالت	تغییرات عمق جریان در رژیم فوق بحرانی	
حالت بدون آستانه	$2/2 \leq Y_A \leq 3/9$	
آستانه در زیر دریچه کشویی	هرمی	$2/1 \leq Y_A \leq 2/7$
	نیم‌استوانه‌ای	$2/2 \leq Y_A \leq 2/9$
	استوانه‌ای	$2/5 \leq Y_A \leq 3/1$
	مکعب‌مسطبی	$2/6 \leq Y_A \leq 3/4$
آستانه مماس بر بالادست دریچه کشویی	هرمی	$2/4 \leq Y_A \leq 2/9$
	نیم‌استوانه‌ای	$2/6 \leq Y_A \leq 3/2$
	استوانه‌ای	$2/7 \leq Y_A \leq 3/2$
	مکعب‌مسطبی	$2/9 \leq Y_A \leq 3/4$
آستانه مماس بر پایین‌دست دریچه کشویی	هرمی	$2/9 \leq Y_A \leq 3/4$
	نیم‌استوانه‌ای	$2/7 \leq Y_A \leq 3/1$
	استوانه‌ای	$2/7 \leq Y_A \leq 3/1$
	مکعب‌مسطبی	$2/7 \leq Y_A \leq 3/3$

میزان افت انرژی با قرارگیری آستانه در هندسه و عرض‌های متفاوت در موقعیت‌های مذکور پرداخته شده است. شکل ۴ میزان استهلاک انرژی نسبت به بالادست و پایین‌دست پرش‌هیدرولیکی را در بازشدگی ۵ سانتی‌متر دریچه کشویی نشان می‌دهد.

با توجه به محدوده تغییرات عمق جریان در مقطع A تأثیر هندسه و موقعیت آستانه بر عمق اولیه پرش‌هیدرولیکی استنباط می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که قرارگیری آستانه در موقعیت‌های زیر دریچه، مماس بر بالادست و مماس بر پایین‌دست آن الگوی جریان متمایزی را ایجاد می‌کند (شکل ۳). در ادامه به بررسی





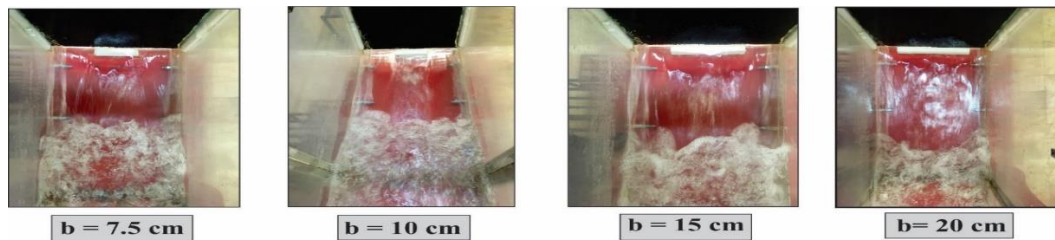
شکل ۴- تغییرات استهلاك انرژی نسبت به مقطع A و B با تغییر در موقعیت آستانه با هندسه‌های متفاوت.

شامل آستانه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی در موقعیت زیر دریچه دارای بیشینه افت انرژی شدند.

**تأثیر هندسه و عرض آستانه بر استهلاک انرژی در موقعیت‌های مختلف قرارگیری نسبت به دریچه‌کشویی**

در بخش دوم آزمایش‌ها، تأثیر هندسه و عرض آستانه بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور آستانه‌های مکعب‌مستطیلی، هرمی، استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای در عرض‌های ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در موقعیت‌های مختلف نسبت به دریچه‌کشویی تعبیه شد. شکل ۵ تصاویر آزمایشگاهی تشکیل پرش هیدرولیکی با قرارگیری آستانه در زیر دریچه‌کشویی در عرض‌های متفاوت را نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که میزان استهلاک انرژی از جای‌گذاری آستانه در موقعیت‌های مختلف نسبت به دریچه‌کشویی تأثیر می‌پذیرد. این تغییر به‌گونه‌ای است که قرارگیری آستانه سبب تغییر در مشخصات جریان از جمله عمق اولیه و ثانویه پرش می‌گردد. بررسی میزان افت انرژی در آستانه با شکل‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و مکعب‌مستطیلی صورت گرفت. نتایج نشان داد که جای‌گذاری آستانه در هر سه موقعیت زیر دریچه، مماس بر بالادست و مماس بر پایین‌دست آن افت انرژی را در مقطع A و B نسبت به حالت بدون آستانه افزایش می‌دهد. نتایج حاصل از تغییر موقعیت آستانه حاکی از این است که قرارگیری آستانه در موقعیت زیر دریچه، مماس بر بالادست و پایین‌دست آن به‌ترتیب بیشترین میزان افت انرژی را دارد. این امر در تمامی هندسه‌ها و عرض‌های مختلف به‌کارگرفته شده در تحقیق حاضر مشاهده گردید. به‌طوری‌که هر چهار هندسه

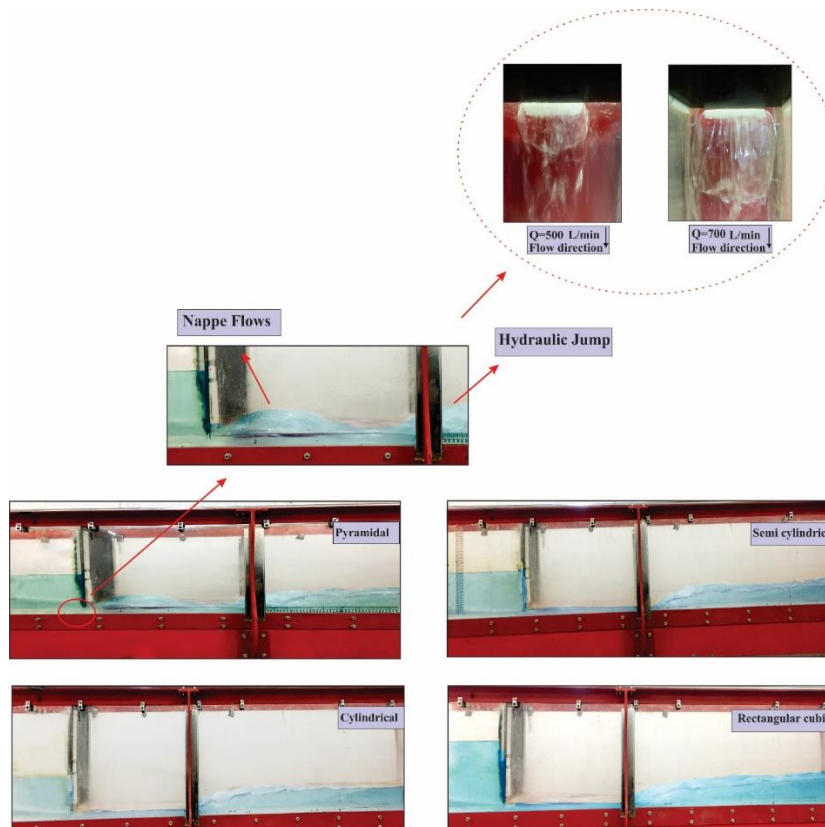


شکل ۵- تصاویر آزمایشگاهی از تشکیل پرش هیدرولیکی با آستانه در عرض‌های متفاوت در موقعیت آستانه زیر دریچه‌کشویی.

مکعب‌مستطیلی در موقعیت مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی نصب گردید. پروفیل طولی جریان در هندسه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ الگوی جریان در پایین‌دست دریچه‌کشویی با آستانه در حالت مماس بر پایین‌دست را نشان می‌دهد.

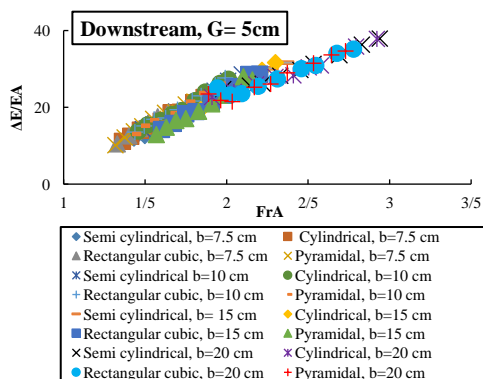
**آستانه در موقعیت مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی**

به‌منظور بررسی تأثیر هندسه و عرض، آستانه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، هرمی و

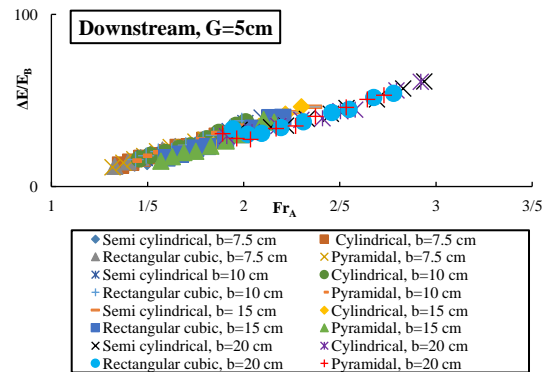


شکل ۶- پروفیل طولی جریان در حالت به کارگیری آستانه در عرض ثابت ۱۵ سانتی متر در موقعیت مماس بر پایین دست.

افزایش در میزان دبی ورودی و همچنین عرض آستانه تشکیل جریان‌های پرتابی را تشدید می‌کند. نتایج نشان داد که استفاده از آستانه در عرض‌های بزرگتر جریان‌های پرتابی را افزایش می‌دهد. شکل ۷ میزان افت انرژی را نسبت به مقطع A و B در مقابل عدد فرود برای بازشدگی ۵ سانتی متر را نشان می‌دهد.



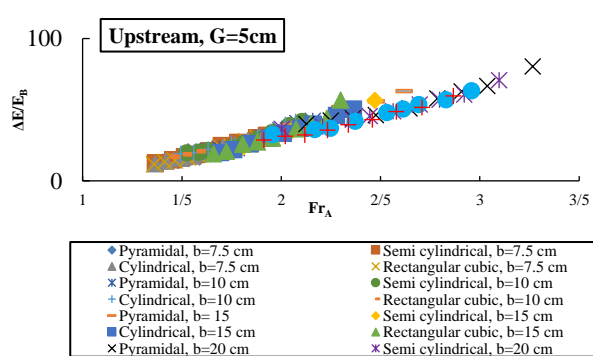
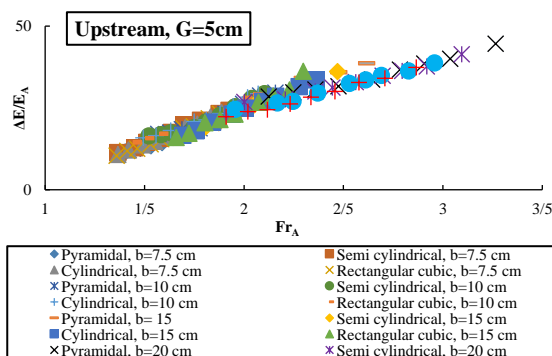
با توجه به پروفیل طولی جریان تأثیر آستانه در هندسه‌های متفاوت ملاحظه می‌گردد. به طوری که افزایش جریان‌های پرتابی در اثر کاربرد آستانه هرمی در موقعیت مماس بر پایین دست دریچه مشهود می‌باشد (شکل ۶). این جریان‌ها به دلیل تأثیر ضلع بالادست آستانه هرمی در مقابل دریچه کشویی اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- تغییرات استهلاك انرژی با آستانه در هندسه‌های مختلف در حالت مماس بر پایین دست دریچه.

علت باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. بررسی تصاویر آزمایشگاهی از تعبیه آستانه هرمی در موقعیت مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی نشان داد که این آستانه با تشدید در تشکیل جریان‌های پرتابی، سبب افزایش قابل توجه عمق جریان در مقطع A می‌گردد. لذا میزان افت ناشی از پرش هیدرولیکی در این آستانه نسبت به سایر هندسه‌ها کمتر برآورد گردید.

**آستانه در موقعیت مماس بر بالادست دریچه‌کشویی**  
با تغییر موقعیت آستانه از حالت مماس بر پایین‌دست به حالت مماس بر بالادست دریچه‌کشویی، تأثیر هندسه آستانه در عرض‌های مختلف مورد آزمایش قرارگرفت. در شکل ۸ میزان استهلاک انرژی نسبت به مقطع A و B مقایسه و ارزیابی شده است.



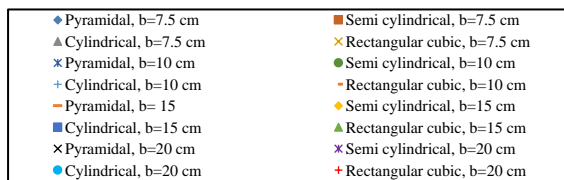
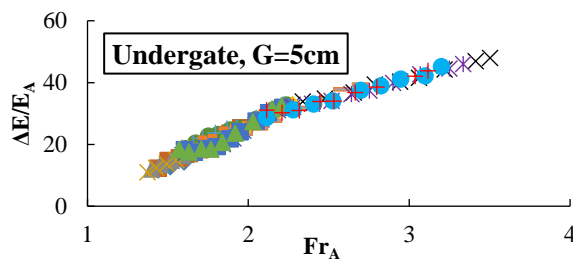
شکل ۸- تغییرات افت انرژی نسبت به مقطع A و B با هندسه‌های مختلف آستانه در حالت مماس بر بالادست دریچه‌کشویی.

یکنواخت شدن خطوط جریان بر روی ضلع پایین‌دست آستانه هرمی سبب افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق جریان در مقطع A و به تبع آن افزایش در عمق ثانویه جریان شده است. نتایج نشان داد که بیشترین میزان افت انرژی پس از آستانه هرمی مربوط به آستانه‌های مدور می‌باشد. استفاده از آستانه مکعب‌مستطیلی در موقعیت مماس بر بالادست به دلیل ایجاد گرادیان منفی سرعت در زیر دریچه‌کشویی، کاهش

بررسی نتایج حاصل از نصب آستانه در موقعیت مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی، نشان داد که مشخصات پرش هیدرولیکی از شکل آستانه تأثیر می‌پذیرد. به طوری که بیشترین میزان افت انرژی در این حالت به ترتیب به آستانه با هندسه‌های نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، مکعب‌مستطیلی و هرمی اختصاص یافت. استفاده از آستانه با هندسه نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای، مکعب‌مستطیلی و هرمی استهلاک انرژی را در بیشترین عرض به میزان ۱۰۳، ۱۱۰، ۱۲۱ و ۱۳۲ درصد نسبت به عمق ثانویه پرش در حالت شاهد افزایش داده است. همچنین نتایج نشان داد که قرارگیری آستانه‌های مدور شامل نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای در پایین‌دست دریچه‌کشویی، یکنواختی خطوط جریان را باعث می‌شوند. لذا عمق جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی نسبت به آستانه‌های چند ضلعی کاهش می‌یابد. همین

نتایج حاصل از تعبیه آستانه‌ها در حالت مماس بر بالادست دریچه‌کشویی نشان داد که در این حالت نیز مشخصه‌های پرش هیدرولیکی از هندسه آستانه تأثیر می‌پذیرد. به طوری که بیشترین میزان افت انرژی بر خلاف حالت آستانه مماس بر پایین‌دست دریچه‌کشویی به آستانه با هندسه هرمی اختصاص یافت. دلیل هیدرولیکی این امر عبور خطوط منظم جریان از شیب آستانه هرمی قبل از عبور از دریچه‌کشویی می‌باشد.

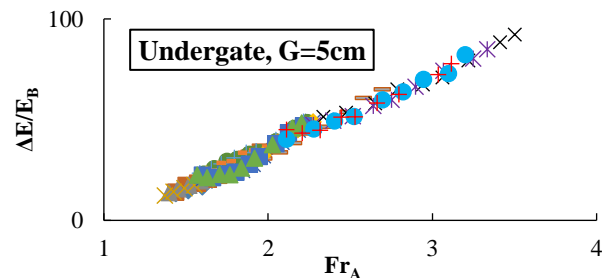
این حالت با منطبق نمودن مرکز آستانه بر مرکز دریچه کشویی، به بررسی استهلاك انرژی پرداخته شد. شکل ۹ میزان افت انرژی را در مقابل پارامتر بی بعد فروود نشان می‌دهد که در آن افت انرژی نسبت به مقطع بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفته است.



سرعت و در نتیجه افزایش عمق اولیه پرش را داشته است.

### آستانه در حالت زیر دریچه کشویی

در آخرین حالت از آزمایش‌های مربوط به هندسه، آستانه‌ها در زیر دریچه کشویی تعبیه گردید. در



شکل ۹- تغییرات استهلاك انرژی با هندسه‌های مختلف آستانه در حالت آستانه زیر دریچه کشویی.

جریان‌های پرتابی از روی آستانه، سبب تشکیل ناحیه‌ای با جریان‌های چرخشی شده است. در نتیجه می‌توان استنباط کرد که هندسه آستانه در زیر دریچه کشویی سبب شده است کمترین میزان عمق اولیه پرش یا به عبارتی عمق جریان در مقطع A به ترتیب مربوط به آستانه هرمی، نیم‌استوانه، استوانه‌ای و مکعب‌مستطیلی گردد. کاهش عمق اولیه جریان و به تبع آن افزایش در عمق ثانویه پرش مهم‌ترین عامل در افزایش افت انرژی مطرح است. لذا با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی، بیشترین استهلاك انرژی به ترتیب به آستانه با هندسه هرمی، نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب‌مستطیلی مربوط می‌گردد (جدول ۲).

نتایج نشان داد که بیشترین میزان استهلاك انرژی در حالت آستانه در زیر دریچه کشویی به ترتیب به آستانه با اشکال هرمی، نیم‌استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب‌مستطیلی مربوط می‌شود. علت هیدرولیکی این امر تأثیر هندسه آستانه بر عمق اولیه پرش هیدرولیکی مطرح می‌گردد. بررسی الگوی جریان در پایین دست آستانه با شکل‌های هندسی متفاوت نشان داد که آستانه هرمی به دلیل ضلع آن در جهت مثبت جریان، سبب افزایش چشمگیر سرعت در مقطع A می‌گردد. جای‌گذاری آستانه با سطوح مدور شامل نیم‌استوانه‌ای و استوانه‌ای از میزان یکنواختی خطوط جریان نسبت به آستانه هرمی می‌کاهد. کاربرد آستانه مکعبی در زیر دریچه کشویی، علاوه تشکیل

جدول ۲- درصد افزایش افت انرژی نسبت به حالت شاهد.

دبی ( $L \min^{-1}$ )	موقعیت	هندسه	b = 7.5 cm		b = 20 cm	
			$\Delta E/E_A$	$\Delta E/E_B$	$\Delta E/E_A$	$\Delta E/E_B$
G=5 cm Q= 800 L min <sup>-1</sup>	زیر دریچه کشویی	هرمی	۱۵	۲۲	۹۹	۱۸۰
		نیم استوانه‌ای	۲۰	۳۱	۱۱۲	۲۱۵
		استوانه‌ای	۱۷	۲۷	۱۰۳	۱۹۰
		مکعب مستطیلی	۱۲	۲۶	۹۳	۱۶۵
	مماس بر بالا دست دریچه کشویی	هرمی	۱۷.۱	۲۸	۹۷	۱۷۵
		نیم استوانه‌ای	۱۵.۳	۲۳	۸۳	۱۴۲
		استوانه‌ای	۱۳	۲۲	۷۶	۱۳۶
		مکعب مستطیلی	۱۰	۲۱	۶۹	۱۲۸
	مماس بر پایین دست دریچه کشویی	هرمی	۱۵	۲۵	۸۲	۱۳۲
		نیم استوانه‌ای	۱۴	۲۲	۷۶	۱۲۱
		استوانه‌ای	۱۱	۲۰	۶۵	۱۱۰
		مکعب مستطیلی	۹.۳	۱۹	۴۴	۱۰۳

## نتیجه‌گیری کلی

هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر جای‌گذاری آستانه در موقعیت‌های مختلف قرارگیری نسبت به دریچه کشویی بر میزان افت انرژی می‌باشد. به این منظور آستانه در اشکال هندسی هرمی، نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب مستطیلی در عرض‌های ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر در زیر دریچه کشویی تعبیه گردید. نتایج نشان داد که مشخصات پرش هیدرولیکی متأثر از قرارگیری آستانه می‌باشد. به طوری که میزان افت انرژی نسبت به بالادست و پایین دست پرش هیدرولیکی نسبت به حالت بدون آستانه افزایش یافت. نتایج نشان داد که با افزایش در عرض آستانه میزان افت انرژی افزایش می‌یابد. علت این امر کاهش چشمگیر عمق اولیه جریان با افزایش عرض آستانه بیان می‌گردد. نتایج حاصل از به کارگیری آستانه با هندسه‌های متفاوت در زیر دریچه کشویی نشان داد که آستانه هرمی به دلیل دارا بودن شیب ضلع پایین دست هم جهت با جریان، سرعت جریان را افزایش و لذا سبب کاهش در عمق اولیه جریان

می‌گردد. آستانه‌های مدور شامل نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب مستطیلی به ترتیب بیشترین عمق اولیه را شامل شدند. با جای‌گذاری آستانه در حالت مماس بر بالادست دریچه، نتایج حاصل از تأثیر هندسه مطابق حالت آستانه در زیر دریچه کشویی برآورد گردید. با تغییر موقعیت آستانه به حالت مماس بر پایین دست دریچه کشویی، بیشترین میزان افت انرژی به ترتیب به آستانه‌های نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای، مکعب مستطیلی و هرمی اختصاص یافت. نصب آستانه‌های هرمی، نیم استوانه‌ای، استوانه‌ای و مکعب مستطیلی در زیر دریچه کشویی میزان افت انرژی نسبت به پایین دست پرش هیدرولیکی را در بیشترین عرض آستانه به ترتیب به میزان ۱۸۰، ۲۱۵، ۱۹۰ و ۱۶۵ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش داد. با تغییر موقعیت آستانه به صورت مماس بر بالادست مقادیر ذکر شده به ترتیب به ۱۷۵، ۱۴۳، ۱۳۶ و ۱۲۸ درصد و در موقعیت آستانه مماس بر پایین دست دریچه کشویی به ۱۳۲، ۱۲۱، ۱۱۰ و ۱۰۳ کاهش یافت.

## منابع مورد استفاده

- Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadizadeh D and Sadraddini AA, 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Hydro-environment Research* 3(2):109-117. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.05.003>
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Hydraulic Engineering* 128(7):656-663.
- Ellayn AF and Sun ZL, 2012. Hydraulic jump basins with wedge-shaped baffles. *Zhejiang University SCIENCE A* 13(7):519-525.
- Daneshfaraz R, Hasannia V, Norouzi R, Sihag P, Sadeghfam S and Abraham J, 2021. Investigating the effect of horizontal screen on hydraulic parameters of vertical drop. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 45: 1909-1917. <https://doi.org/10.1007/s41062-023>
- Daneshfaraz R, Aminvash E and Ebadzadeh P, 2022a. Experimental study of the effect of different sill geometry on hysteretic behavior of supercritical regime. *Irrigation Sciences and Engineering* doi:10.22055/jise.2022.40134.2017. (In Persian with English abstract).
- Daneshfaraz R, Norouzi R and Ebadzadeh P. 2022b. Experimental Investigation of non-suppressed sill effect with different geometry on flow pattern and discharge coefficient of sluice gate. *Journal of Hydraulics* 17(3):47-63. doi: 10.30482/jhyd.2022.316603.1566. (In Persian with English abstract).
- Daneshfaraz R, Norouzi R and Ebadzadeh P. 2022c. Experimental and numerical study of sluice gate flow pattern with non-suppressed sill and its effect on discharge coefficient in free-flow conditions. *Journal of Hydraulic Structures* 8(1):1-20. DOI: 10.22055/jhs.2022.40089.1201
- Daneshfaraz R, Norouzi R, Ebadzadeh P, Di Francesco S and Abraham JP, 2023a. Experimental Study of Geometric Shape and Size of Sill Effects on the Hydraulic Performance of Sluice Gates. *Water*. 15(2):314. <https://doi.org/10.3390/w15020314>.
- Daneshfaraz R, Norouzi R, Ebadzadeh P and Kuriqi A, 2023b. Influence of sill integration in labyrinth sluice gate hydraulic performance. *Innovative Infrastructure Solutions* 8(4):118. <https://doi.org/10.1007/s41062-023>
- Husain D, Alhamid AA and Negm AAM, 1994. Length and depth of hydraulic jump in sloping channels. *Hydraulic Research* 32(6):899-910. <https://doi.org/10.1080/00221689409498697>.
- Izadjoo F and Shafai-Bejestan M, 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Applied Sciences*, 7(8):1164-1169.
- Jalil SA, Sarhan SA and Yaseen MS, 2015. Hydraulic jump properties downstream a sluice gate with prismatic sill. *Applied Sciences Engineering and Technology*, 11(4): 447-453.
- Karami S, Heidari MM and Rad MHA, 2015. Investigation of free flow under the sluice gate with the sill using Flow-3D model. *Water and Soil Resources Conservation*, 4(4):317-324. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00310-x>.
- Nasr Esfahani MJ and Shafai Bejestan M, 2012. Design of stilling basins using artificial roughness. *Journal of Civil Engineering* 2(4): 159-163.
- Neisi K and Shafai BM, 2013. Characteristics of S-jump on roughened bed stilling basin. *Water Sciences Research* 5(2):25-34.
- Parsamehr P, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadi D and Abbaspour A, 2012. Influence of sill and artificial roughness over adverse bed slopes on hydraulic jump characteristics. *Water and Soil* 27(3):581-591. (In Persian with English abstract).
- Parsamehr P, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A, Abbaspour A and Nasr Esfahani MJ, 2017. Characteristics of hydraulic jump on the rough bed with the adverse slope. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* 23(3):301-307.
- Rajaratnam N, 1967. Hydraulic jumps. *Advances in Hydroscience* 4:197-280. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1313143>
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transaction of the Engineering Institute of Canada* 11 (A-2):1-8.
- Salmasi F and Norouzi Sarkarabad R, 2020. Investigation of different geometric shapes of sills on discharge coefficient of vertical sluice gate. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 52:21-36. DOI: 10.22060/ceej.