

Experimental Study of Flow Characteristics in a Stepped Spillway with the Installation of a Continuous Obstacle with Different Geometric Characteristics

Seyed Amin Asghari Pari^{1*}, Mojtaba Kordnaeij², Azin Razmkhah³

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

2- Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

3- Msc student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

* asghari_amin@bkatu.ac.ir

Received: 1 January 2024

Accepted: 16 May 2024

Discussion: 22 June 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In the context of energy dissipation in stepped spillways, various geometric and hydraulic parameters play a role. These include the flow rate, step height, number of steps, inception point of free aeration, and width of the spillway. Researchers have explored different approaches to enhance energy dissipation in the stepped spillways. These approaches involve modifying the spillways' geometry and structure, as well as introducing obstacles and roughness on the bottom and edges of the steps. Previous research has not specifically investigated the location and shape of obstacles on the steps to assess their impact on flow characteristics.

Methodology: In this research, a flume with dimensions of 10 meters in length, 1.2 meters in width, and 1 meter in height was used. The first 3 meters of the flume had a height of 1.2 meters. The maximum flow rate of the flume was 150 liters per second, and the flow rate parameter (dc/h) ranged from 0.37 to 1.06 to cover all three flow regimes in the stepped spillway. Two depth gauges with a measurement accuracy of ± 1 mm was used to measure the depth of the spillway downstream and the depth of water upstream at the entrance of the spillway. The spillway had a total height of 87 cm, 8 steps, with a step height of 10.9 cm and a step length of 20.9 cm. The obstacles used in this research included a continuous obstacle with a square cross-section (CO), a right-angled triangle with a chord in the upstream (TU) and downstream (TD), an isosceles triangle (IT), and a combination of a square and a triangular barrier in the upstream direction (MTU) and downstream (MTD). The relative heights (h_o/h) ranged from 0.19 to 0.56, and the relative edge distance (L_o/L) ranged from 0.19 to 0.48. The obstacles were placed on all the steps, and in some of the experiments, obstacles were placed only on the step 5.

Results and Discussion: The placement of continuous obstacles with varying shapes, heights, and positions affects the initial flow boundaries, as also noted by Kökpınar (2004) and Asghari Pari & Kordnaeij (2020, 2021). This study confirms that such configurations alter the onset of flow and promote flow expansion and stability in the transitional regime. As shown in Figure

1, in the nappe flow regime, all tested arrangements increased energy dissipation compared to the control. In transitional and skimming regimes, most configurations showed no significant change, except for the MTU and MTD combinations, where energy dissipation did not increase.

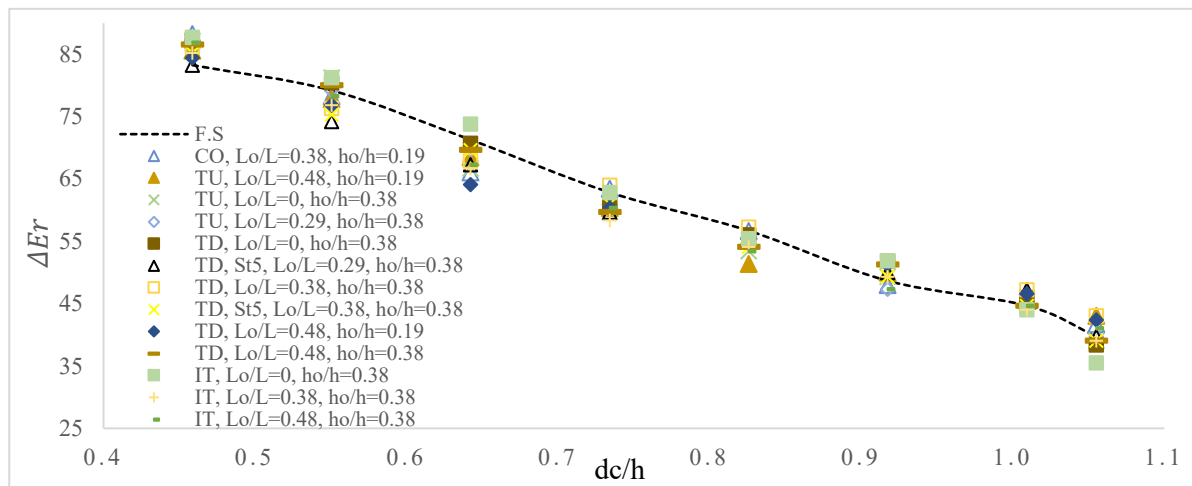


Fig. 1 Energy dissipation of some selected arrangements

Conclusion: - The placement of a continuous obstacle with different cross-sectional shapes, heights, and locations on the bottom of the step spillway changes the beginning of the flow boundaries compared to the flat step (F.S) and generally increases the flow's tendency to expand and persist longer in the transition range.

- The use of square obstacles (CO) has moved the inception point of free aeration (IP) to the downstream side compared to the flat step (F.S), but the triangular obstacles (TU, TD, IT) have moved the IP unchanged or to the upstream side compared to the F.S.. In the combined triangle and square obstacles (MTU, MTD), the IP has not changed compared to the F.S.. Also, all the arrangements that have been able to move the IP upstream compared to the F.S. have created more energy dissipation in the skimming flow regime than the F.S.

- For the nappe flow regime, the energy dissipation results show the effectiveness of placing the obstacle with different shapes and heights in different places on the steps, but in the transition and skimming flow regimes, according to the arrangement used, energy dissipation has three modes of no change, increase and or had a decrease in energy dissipation.

- The results of BIV analysis show that according to the shape of the obstacle, the height of the obstacle and the location of the obstacle, the dimensions of the formed areas are different compared to the F.S. At a slope of 1:2, if a continuous barrier is placed on the edge of the step, only a rotating zone. is formed on the step, but with the distance of the barrier from the edge of the step in the range of lo/l 0.38 and 0.48, in addition to the rotating zone, the mixing zone is also formed. Is.

- Based on the results of energy dissipation and BIV from experiments, it seems that, in addition to the shape of the obstacle, the obstacle can increase energy dissipation at the bottom of the steps, particularly at the boundary of the MZ and the RZ. On the other hand, the height of the obstacle should be lower than the pseudo bottoms due to the location of the obstacle, in order to allow the passing stream to hit the floor of the steps more effectively.

Keywords: Energy dissipation, Step spillway, BIV Technique, Relative height of obstacle, Relative distance of obstacle.

بررسی آزمایشگاهی مشخصات جریان در سرریز پلکانی با نصب مانع پیوسته با ویژگی‌های متفاوت هندسی

سید امین اصغری پری^{۱*}، مجتبی کردنائیج^۲، آذین رزمخواه^۳

۱- دانشیار گروه عمران دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان.

۲- مدرس گروه عمران دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان.

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان.

* asghari_amin@bkatu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: در تحقیق حاضر اثر شکل مقطع مانع پیوسته شامل مربعی، مثلث قائم الزاویه و متساوی الساقین، ارتفاع و محل قرارگیری موانع بر روی کف پله در سرریز پلکانی برای شیب ۱:۲ بررسی گردید. عرض و ارتفاع سرریز به ترتیب ۱.۲ و ۰.۸۷ متر بوده است. محدوده دبی واحد عرض از ۰.۰۲۹ تا ۰.۱۲۵ متر مکعب بر ثانیه متر جهت بررسی هر سه رژیم جریان ریزشی، انتقالی و رویه‌ای بوده است. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده پارامترهای بررسی شده در تحقیق حاضر، قرارگیری مانع پیوسته با شکل مقطع و ارتفاع‌های متفاوت و همچنین محل متفاوت قرارگیری در کف پله سرریز، سبب تغییر شروع مرزهای جریان نسبت به حالت شاهد می‌گردند و به‌طور کلی قرارگیری مانع بر روی کف پله‌ها، سبب تمایل جریان به گسترش و ماندگاری بیش‌تر در محدوده انتقالی نسبت به حالت شاهد می‌گردد. نتایج شروع هواگیری طبیعی نشان می‌دهد در حالت‌هایی که در اثر ایجاد مانع مرزهای جریان در دبی‌های بالا از رژیم جریان رویه‌ای به حالت انتقالی تبدیل شده، محل هواگیری نیز نسبت به شاهد، یک پله به سمت بالادست حرکت کرده است. در محدوده آزمایش‌های تحقیق حاضر برای رژیم جریان رویه‌ای در مقایسه با حالت شاهد، بر اساس نتایج پردازش تصویر، افزایش استهلاک انرژی؛ علاوه بر شکل مانع به عدم قرارگیری مانع در ناحیه اختلاط و پایین بودن ارتفاع مانع نسبت به خط کف کاذب جهت جهت برخورد موثرتر با کف پله، بستگی دارد.

کلیدواژگان: استهلاک انرژی، سرریز پلکانی، تکنیک BIV، ارتفاع نسبی مانع، فاصله نسبی مانع، شکل مانع.

۱- مقدمه

سرریز نیز با توجه به دبی عبوری به سه حالت ریزشی^۱، انتقالی^۲ و رویه‌ای^۳ دسته‌بندی می‌شود. پژوهش انجام شده با محوریت سرریز پلکانی را به‌طور کلی می‌توان در دو بخش دسته‌بندی کرد. بخش اول شامل پژوهش مربوط به شناخت فراسنجه‌های جریان و هندسه سرریز از جمله تأثیر شیب سرریز، شمار پله‌ها، دبی جریان و تأثیر آن‌ها بر محدوده مرزهای جریان تشکیل شده و آغاز هواگیری طبیعی جریان است. از جمله نتیجه این تحقیقات، افزون بر شناخت بهتر ویژگی‌های جریان، می‌توان به ارائه

سرریزهای پلکانی از جمله اجزای مهم در طراحی سدها، سازه‌های آبی و سامانه‌های آبیاری هستند. اهمیت این سرریزها در مهار جریان، استهلاک انرژی و کاهش سرعت است. در سرریزهای پلکانی وجود پله سبب افت استهلاکی قابل توجه بوده و سبب می‌شود که در پایین‌دست سرریز، طول حوضچه و ارتفاع دیواره‌ها کاهش یابد (Chanson, 2001). از جمله فراسنجه‌های هندسی و هیدرولیکی موثر بر استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی می‌توان به دبی جریان، ارتفاع پله، شمار پله، محل ورود هوا به درون جریان و عرض سرریز اشاره کرد. رژیم جریان عبوری از

1. Nappe flow
2. Transition flow
3. Skimming flow

و شکل‌گیری ناحیه‌ها جدید مانند ناحیه برگشتی جریان در اثر برخورد با مانع^۴ (Rf) (Zare & Doering, 2012) و یا حالت استخری^۵ (Rz_p) ناشی از افزایش ارتفاع مانع (Asghari Pari & Kordnaeij, 2020) خواهد شد.

ابزار اندازه‌گیری در راستای شناخت پدیده‌ها و جریان‌های سرریز پلکانی به‌طور عمده شامل عمق‌سنج، دستگاه سرعت‌سنج برای بخش‌های هواگیری نشده و دستگاه اندازه‌گیر حباب هوا برای بخش‌های هواگیری شده می‌باشد. از سوی دیگر استفاده از ابزارهای نوین مانند فناوری تکنیک‌های پردازش تصویر سبب شده تا درک بهتری از پدیده‌ها در اندازه‌گیری سرعت جریان صورت پذیرد (Leandro et al., 2014; Bung & Valero, 2015; Lopes et al., 2015; Buhler et al., 2015; Emadzadeh & Chiew, 2017; Kramer & Chanson, 2018; Zhang & Chanson, 2018; Asghari Pari & Sánchez et al 2022; Kordnaeij, 2021a&b; Nina et al., 2021).

با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته در زمینه تأثیر شکل، ارتفاع و محل قرارگیری مانع بر روی کف پله‌های سرریز پلکانی و تأثیر آن بر ویژگی‌های جریان و استهلاك انرژی بررسی و ارزیابی جامعی صورت نگرفته است، از این‌رو انجام این تحقیق ضرورت پیدا می‌کند. همچنین در این تحقیق از روش و فن پردازش تصویر در کنار دیگر ابزار اندازه‌گیری برای شناخت بهتر مشخصه‌های جریان استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تحلیل ابعادی

به‌منظور بررسی فراسنجه‌های تأثیرگذار بر استهلاك انرژی بر اثر تغییر محل مانع بر روی پله‌های سرریز پلکانی با شکل‌ها و ارتفاع‌های مختلف، از روش پی باکینگهام برای به‌دست آوردن فراسنجه‌های بی‌بعد موثر استفاده شد. برای محاسبه استهلاك انرژی با توجه به ابزار اندازه‌گیری رابطه‌های متفاوتی وجود دارد. برای مثال در صورتی که دستگاه اندازه‌گیر حباب هوا استفاده شود، با داشتن رخ نمای سرعت جریان، می‌توان از رابطه‌های میزان انرژی مانده در انتهای سرریز استفاده کرد. به‌طور عمومی

رابطه‌ها برای مرزهای جریان و رابطه پیش‌بینی آغاز محل هواگیری طبیعی سرریز اشاره کرد. در این راستا می‌توان به تحقیقات (Chanson, 2002; André, 2004; Chanson et al., 2015; Hunt & Kadavy, 2011 & 2013; Novakoski et al., 2020) اشاره کرد. بخش دوم تلاش محققان جهت بررسی بازده استهلاك انرژی جریان بر روی سرریز پلکانی است. برای این حالت نیز دو بخش تغییر هندسه و ساختار سرریز و یا الحاق موانع و زبری در کف و لبه پله را می‌توان در نظر گرفت. برای تغییر هندسه می‌توان به تغییر زاویه سرریز، تغییر زاویه کف پله و تغییر عرضی شیب پله را نام برد که تحقیقات Hamedi et al. (2014), Ostad Mirza et al. (2016), Ali & Yousif, Peng et al. (2019), Chanson (2018) در این راستا می‌باشند. برای قرارگیری شکل‌های مختلف مانع و زبری با شرایط مختلف در محل‌های مختلف پله‌های سرریز نیز نتایج بررسی‌ها منجر به شناخت بهتر ویژگی‌ها و پدیده‌های حاکم بر سرریز پلکانی از جمله اثر بخش نبودن زبری در کف برای افزایش استهلاك انرژی، نیازمند بودن دیواره‌های بلندتر کنار سرریز و شکل‌گیری ناحیه‌های جدید را نام برد (Kökpinar, 2004; Bung & Schlenkhoff, 2010; Zare & Doering 2012; Guenher et al., 2013; Wuthrich & Chanson, 2015; Torabi et al., 2018; Asghari Pari & Kordnaeij, 2021a&b; Razmkhah et al., 2021; Akhgar Roshangar, 2019; Roshangar & Akhgar, 2021; Ghaderi & Abbasi, 2021; Ghaderi et al. (2021); Kordnaeij et al., 2023).

در زمینه شناسایی نواحی جریان عبوری در سرریزهای پلکانی (حالت شاهد) در رژیم جریان روبه‌ای و در زیر خط کف کاذب جریان^۱، بر روی پله دو ناحیه چرخشی^۲ (Rz) و ناحیه اختلاط^۳ (Mz) شکل می‌گیرد (Boes & Hager, 2003 a & b). ابعاد این ناحیه‌ها شکل گرفته در دو پله متوالی تحت تأثیر عرض سرریز (Lopes et al., 2017) و شیب سرریز (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021a) می‌باشند. همچنین قرارگیری موانع با شکل‌ها و آرایش‌های مختلف بر روی پله‌های سرریز پلکانی سبب تغییر ابعاد و اندازه‌های ناحیه‌ها نسبت به حالت بدون مانع

1. Pesido bottom
2. Recirculation Zone
3. Mixing Zone

4. Redirected Flow
5. Pooled Step

کرد. برای عدد رینولدز محدوده ۳۴۵۰۰ تا ۱۰۵۰۰۰ و ارتفاع آب در ورودی سرریز برای دبی کمینه بیش از ۴ سانتی متر است. از این رو از اعداد رینولدز و وبر صرف نظر می شود. در این تحقیق از یک شیب (۱:۲) برای انجام آزمایش ها استفاده شد و شمار پله ها و عرض پله ثابت می باشد و قابل صرف نظر کردن می باشند. از این رو شکل نهایی رابطه استهلاک انرژی بر اثر متغیرهای شناخته شده به صورت رابطه (۴) است.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{h_0}{h}, \frac{l_0}{l}, \frac{d_c}{h}, Fr, N, sh\right) = 0 \quad (4)$$

بنابراین ارتفاع نسبی مانع (ho/h)، فاصله نسبی مانع (lo/l)، فراسنجه دبی (dc/h)، عدد فرود (Fr)، شمار پله های دارای مانع (N) و شکل مقطع مانع (sh) از جمله فراسنجه های موثر در محدوده تحقیق می باشند.

۲-۲- روش انجام آزمایش و پیش فرض ها

آزمایش ها در فلوم مرکز تحقیقاتی هیدرولیک جوار دانشگاهی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان انجام شد. طول، عرض و ارتفاع فلوم استفاده شده به ترتیب ۱۰، ۱/۲ و ۱ متر بوده است. در ۳ متر ابتدایی فلوم، ارتفاع فلوم ۱/۲ متر بوده است. عرض ۱/۲ متری فلوم امکان تشکیل جریان های عرضی را فراهم می کند (Lopes et al., 2017). دبی بیشینه فلوم تا ۱۵۰ لیتر بر ثانیه بوده و دبی با دبی سنج التراسونیک و عمق پایاب با عمق سنج با دقت اندازه گیری ± 1 میلی متر اندازه گیری شد. سرریز استفاده شده دارای ارتفاع کلی ۸۷ سانتی متر، ۸ پله، ارتفاع پله ۱۰/۹ سانتی متر و طول پله ۲۰/۹ سانتی متر بوده است. طول ورودی سرریز برای توسعه جریان، ۵۸ سانتی متر بوده است (Kramer & Chanson, 2018).

در این تحقیق به منظور بررسی و شناخت بیشتر تأثیر متغیرهای تحقیق بر وضعیت جریان عبوری در رژیم جریان رویه ای، تصویربرداری انجام شد. جریان به طور کلی برای شرایط مختلف آزمایش از پله ۴ به سمت پایین دست دارای توسعه یافتگی شده و هواگیری طبیعی رخ داده است و از این رو در محل پله های ۶ و ۷ تصویربرداری انجام شد. محل استقرار دوربین با توجه به ویژگی های جریان

استهلاک انرژی از اختلاف انرژی در بالادست و پایین دست سرریز محاسبه می شود. در این تحقیق نیز از این روش استفاده شد و از این رو رابطه های ارائه شده برای این نوع اندازه گیری در ادامه به کار گرفته شده است. برای همه آزمایش ها در تحقیق حاضر، درجه انتهای فلوم به گونه ای تنظیم شد که پرش هیدرولیکی آزاد در پنجه سرریز تشکیل شود. با توجه به این موضوع و محدودیت های اندازه گیری عمق اولیه پرش، از رابطه بلنجر برای محاسبه عمق اولیه پرش استفاده شد. برای محاسبه افت نسبی انرژی از رابطه ۱ که اختلاف انرژی در بالادست (Eo) و پایین دست (E1) است، استفاده شد.

(1)

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} = 1 - \frac{[y_1 + \frac{v_1^2}{2g}]}{(1.5d_c + P)}$$

در ادامه فراسنجه های موثر بر افت انرژی در سرریز پلکانی با مانع پیوسته دارای شکل، ارتفاع و محل قرارگیری مختلف بر روی کف پله برابر است با: دبی جریان (q)، طول (l) و ارتفاع پله ها (h)، عرض سرریز (w)، شتاب ثقل (g)، عمق بحرانی جریان در ورودی سرریز (dc)، چگالی سیال (ρ)، کشش سطحی (σ)، گرانشی دینامیکی سیال (μ)، شمار پله های سرریز (No)، ارتفاع مانع (ho)، فاصله مانع از لبه پله (lo)، شمار پله های دارای مانع (N) و نوع مانع (sh). میزان افت انرژی تابعی از متغیرهای بیان شده به صورت رابطه (۲) است.

(2)

$$F = f(\Delta E_r, q, l, h, w, g, d_c, \rho, \sigma, \mu, h_0, l_0, N, sh, No)$$

پس از انجام تحلیل ابعادی به روش پی باکینگهام، فراسنجه های بدون بعد در رابطه (۳) قرار گرفتند.

(3)

$$f = \left(\frac{l_0}{l}, \frac{h_0}{h}, \frac{h}{l}, \frac{d_c}{h}, \frac{w}{l}, \Delta E_r, We, Fr, Re, N, sh, No\right) = 0$$

بر مبنای پیشنهاد Chow (1959) در صورت بیشتر بودن عدد رینولدز از ۲۰۰۰ که نشان از آشفتگی جریان است و بیشتر بودن عمق جریان عبوری از ۳-۴ سانتی متر، می توان به ترتیب از گذاره های عدد رینولدز و وبر صرف نظر

متساوی الساقین (IT) و حالت ترکیب مانع مربعی و مثلثی در جهت بالادست (MTU) و پایین‌دست (MTD) است. در شکل ۲ شمای کلی مدل‌ها با نام‌گذاری نشان داده شده است. ارتفاع‌های نسبی ($\frac{h_o}{h}$) ۰/۰-۱۹/۰-۳۸/۵۶ و فاصله نسبی لبه ($\frac{L_o}{L}$) ۰/۱۹-۰/۳۸-۰/۴۸ بررسی شدند. موانع برای همه‌ی آرایش‌ها در همه پله‌ها و در برخی از آزمایش‌ها موانع از پله ۵ بر روی پله قرار گرفتند.

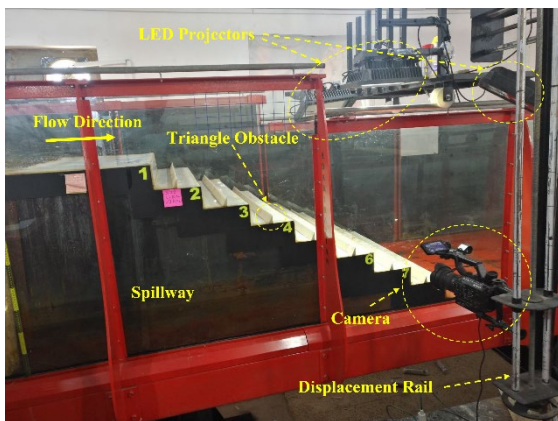


Fig. 1 Laboratory models and used equipment
شکل ۱ مدل آزمایشگاهی و تجهیزات استفاده شده

تحقیق و توصیه‌های بونگ و ولرو (Bung & Valero, 2015) و عمادزاده و چیو (Emadzadeh & Chiew, 2017)، در فاصله افقی ۵۰ سانتی‌متری از دیواره فلوم انتخاب شد. دوربین FS5 SONY به همراه ۳ عدد پروژکتور LED150 برای روشنایی محل ثبت تصویر استفاده شده است. برای جا به جایی و تنظیم محل دوربین، یک ریل با قابلیت حرکت در سه جهت طراحی و استفاده شد. با توجه به حساس بودن فاصله کانونی دوربین، در هر آزمایش فاصله کانونی پیش از انجام آزمایش، تنظیم می‌شد. برای این منظور از یک صفحه مشبک با ابعاد شبکه ۲ در ۲ سانتی‌متری استفاده شد. فیلم ثبت شده پس از تبدیل به عکس در نرم افزار متلب، PIV-Lab (Thielicke & Stamhuis, 2014) بازبینی و تجزیه و تحلیل شدند. در شکل ۱ نمای کلی از وضعیت سرریز، قرارگیری مانع، ریل حرکتی، موقعیت دوربین و پروژکتورها در فلوم نشان داده شده است.

موانع استفاده شده در تحقیق شامل حالت شاهد (F.S)، مانع پیوسته با مقطع مربعی (CO)، مثلث قائم الزاویه با وتر در جهت بالادست (TU) و پایین‌دست (TD)، مثلث

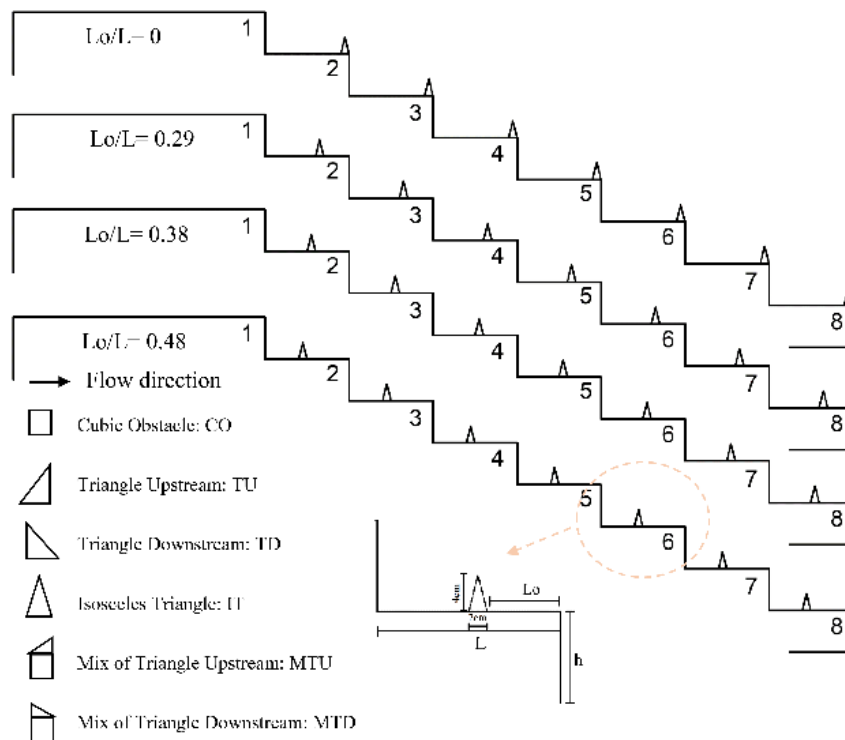


Fig. 2 Figures and names of the studied models
شکل ۲ شکل‌ها و نام‌گذاری‌های مدل‌های بررسی شده

(CO) به دلیل وجود عرض بیشتر مانع در سطح نسبت به دیگر آرایش‌ها، برخورد جریان با این قسمت باعث می‌شود که میزان پخشیدگی سطحی جریان نسبت به حالت‌های مثلثی بیشتر به نظر برسد. حفره‌های شکل گرفته در گوشه درونی پله‌ها با افزایش دبی به ترتیب از پله بالا به سمت پله‌های پایین دست پر می‌شود. برای محدوده جریان انتقالی با انتقال مانع از لبه به سمت گوشه درونی میزان آشفته‌گی سطحی جریان کاسته شد و با کاهش ارتفاع نسبی مانع، شدت نوسان‌ها نیز کاهش یافت. برای حالت شاهد (F.S) نتایج آغاز مرزهای جریان با رابطه‌های دیگر محققان در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که مرزهای شناسایی شده در این تحقیق با نتایج رابطه‌های ارائه شده توسط محققان همخوانی دارد. از نظر دیداری در رژیم جریان رویه‌ای، بین حالت کلی جریان برای همه‌ی آرایش‌ها به جز آرایش‌های آغاز مانع گذاری از پله ۵ (St5)، تفاوتی مشاهده نشد و شکل کلی جریان عبوری همانند حالت شاهد (F.S) در رژیم جریان

جدول ۱ مقایسه رابطه‌های آغاز مرزهای جریان

Reference	Equation	$h/l=0.52,$ $\theta=27.5$	Type
Chanson (1995)	$(\frac{d_c}{h})_{SK} = 1.057 - 0.465(\frac{h}{l})$	0.81	SKI
Chanson (2001)	$(\frac{d_c}{h})_{NA-TR} = 0.89 - 0.4(\frac{h}{l})$	0.68	TRA
Chanson (2001)	$(\frac{d_c}{h})_{TR-SK} = 1.2 - 0.325(\frac{h}{l})$	1.03	SKI
Chanson et al (2015)	$(\frac{d_c}{h})_{NA-TR} = \frac{0.593}{(\frac{h}{l} + 0.139)^{0.394}}$	0.7	TRA
Chanson et al (2015)	$(\frac{d_c}{h})_{TR-SK} = \frac{0.881}{(\frac{h}{l} + 0.149)^{0.317}}$	0.79	SKI

برای مثال آرایش مانع با مقطع متساوی الساقین، آغاز از پله ۵، فاصله از لبه ۸ سانتی‌متر و ارتفاع مانع ۴ سانتی‌متر به صورت IT, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38 نام‌گذاری می‌شود. آزمایش‌های حالت شاهد و مانع با مقطع مربعی برگرفته نتایج رزمخواه و همکاران (Razmkhah et al., 2021) می‌باشند. محدوده فراسنجه دبی $(\frac{d_c}{h})$ از ۰/۳۷ تا ۱/۰۶ برای بررسی هر سه رژیم جریان حاکم در سرریز پلکانی بوده با ۸ دبی بررسی شد. در این تحقیق در مجموع ۲۸۰ آزمایش تجزیه و تحلیل و ارزیابی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های جریان عبوری شامل شکل جریان، مرزهای شکل‌گیری و آغاز هواگیری طبیعی

در حالت شاهد (F.S) و برای رژیم جریان ریزشی، بر روی هر کدام از پله‌ها، جریان پس از برخورد با کف پله حالت پرش می‌گیرد که این امر سبب می‌شود تا در گوشه داخلی پله حفره هوا شکل گیرد (شکل ۳ A). قرارگیری مانع در لبه پله‌ها سبب می‌شود که جریان برخوردی با مانع در لبه آشفته‌گی و نوسان‌های سطحی بیشتری پیدا کند (شکل ۳ B). با جا به جایی مانع از لبه به سمت گوشه درونی از شدت برخورد جریان تا حدودی کاسته شده (شکل ۳ C) و در ادامه در فاصله نسبی ۰/۴۸ (شکل ۳ D) جریان عبوری چندان تحت تأثیر مانع قرار نمی‌گیرد و به حالت شاهد نزدیک می‌شود. در این فاصله نسبی، مانع در محدوده حفره گوشه درونی پله قرار می‌گیرد و از این رو بر روی جریان عبوری سطح تأثیری ندارد. تفاوت جریان ریزشی دارای مانع در فاصله نسبی ۰/۴۸ نسبت به حالت شاهد در نوسانی بودن شکل کلی جریان عبوری است. لازم به یادآوری است که در این حالت در مقایسه با حالت شاهد، ارتفاع آب در گوشه درونی پله به واسطه وجود مانع بیشتر است. اثر محل مانع بر روی جریان عبوری در رژیم ریزشی برای همه‌ی آرایش‌های بررسی شده در این تحقیق برقرار بوده است و تنها در حالت مانع با مقطع مربعی

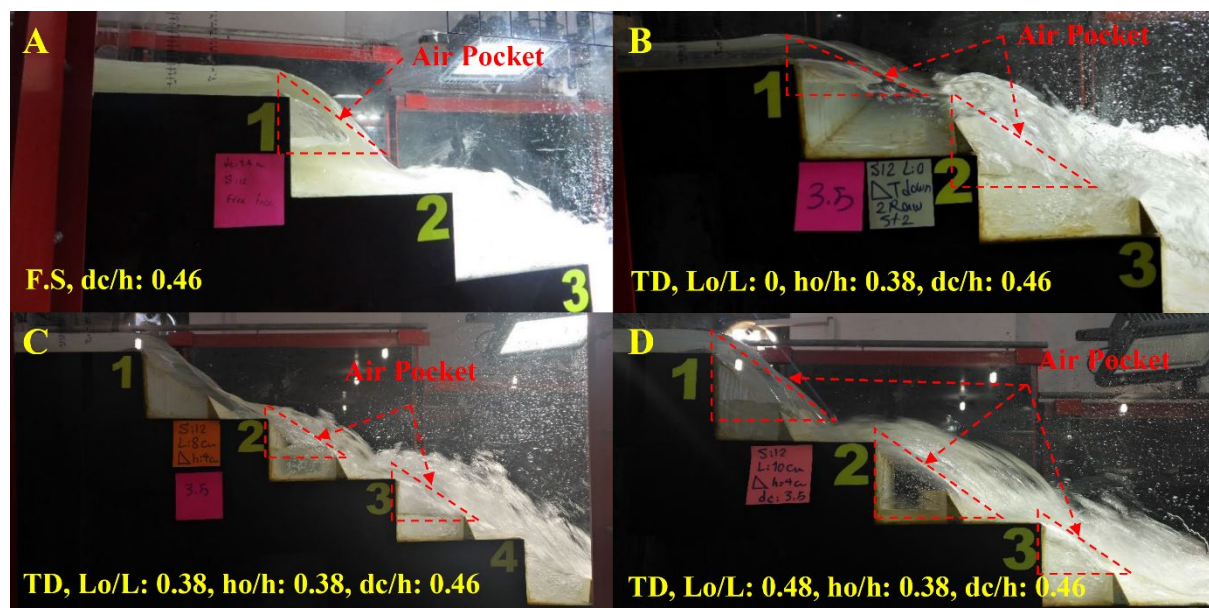


Fig. 3 Formed airpocket at nappe flow regimes for different arrangement of locating of obstacle

شکل ۳ حفره هوا شکل گرفته در رژیم جریان ریزشی برای محل‌های مختلف قرارگیری مانع

جدول ۲ آغاز مرزهای جریان برای آرایش‌های مختلف

Table 2 Onset of boundry of different arrangement

Model name	IP	dc/h							
		0.46	0.55	0.64	0.73	0.83	0.92	1.01	1.06
Flat Step: F.S	5	NAP	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0, ho/h=0.19	6	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0, ho/h=0.38	6	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0, ho/h=0.56	6	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.19, ho/h=0.19	6	NAP	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.19	50	NAP	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	50	NAP	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.19	5	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	50	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	50	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
TU, Lo/L=0, ho/h=0.38	40	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
TU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	40	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
TU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	50	NAP	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
TU, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI
TD, Lo/L=0, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI
TD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
TD, St5, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
TD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	4	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
TD, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	5	NAP	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
IT, Lo/L=0, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
IT, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
IT, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
IT, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
IT, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	4	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI
MTU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI
MTU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
MTU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI
MTD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	6	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
MTD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
MTD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	5	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI

Asghari (2004) و اصغری‌پری و کردنائیج (Kökpinar, 2004) و کردنائیج (Asghari & Kordnaeij, 2020 & 2021) نیز گزارش شد. با توجه به نتایج تحقیق می‌توان بیان کرد که قرارگیری مانع پیوسته با شکل‌های مقطع متفاوت با ارتفاع و محل متفاوت قرارگیری در کف پله سرریز در محدوده بررسی شده، نیز سبب تغییر آغاز مرزهای جریان نسبت به حالت شاهد می‌شود و به‌طور عمومی گرایش جریان را به گسترش و ماندگاری بیشتر در محدوده انتقالی است.

از دیگر فراسنجه‌ها که در آرایش‌های مختلف در سرریز پلکانی متفاوت است، محل آغاز هواگیری طبیعی^۱ سرریز است. قرارگیری مانع بر روی کف پله با شکل، ارتفاع و محل قرارگیری متفاوت، سبب جا به جایی محل آغاز هواگیری به سمت بالادست یا پایین‌دست در مقایسه با حالت شاهد می‌گردد. در جدول ۲ شماره پله محل شروع هواگیری طبیعی سرریز پلکانی در دبی بیشینه ($=1.06 \frac{d_c}{h}$) برای همه‌ی آزمایش‌ها در ستون IP آورده شده است. در ادامه در شکل ۴ برای برخی از آزمایش‌ها محل آغاز هواگیری آورده شده است. انتخاب این دبی به دلیل رویه‌ای بودن جریان برای همه‌ی آزمایش‌های تحقیق و شکل‌گیری هواگیری طبیعی بوده تا امکان مقایسه بین نتایج در این حالت وجود داشته باشد. لازم به یادآوری است که در برخی از آزمایش‌ها مشاهده شد که محل هواگیری در پله حالت نوسانی^۲ داشته و در جدول با حرف O مشخص شده است. حالت هواگیری طبیعی نوسانی به دلیل وجود مانع بر روی پله بوده است. به‌طور کلی نتایج آغاز هواگیری با محوریت حالت شاهد نشان می‌دهد که با توجه به نوع و محل مانع، محل هواگیری نسبت به شاهد یا تغییر نکرده و یا به سمت بالادست و پایین‌دست حرکت کرده است. با توجه به نتایج مرزهای جریان، نتایج آغاز هواگیری طبیعی نشان می‌دهد که در حالت‌هایی که مرزهای جریان در دبی‌های بالا از رژیم رویه‌ای به حالت انتقالی تبدیل شده، محل هواگیری نسبت به شاهد، یک پله به سمت بالادست حرکت کرده است. در حالت‌هایی که جریان در دبی پایین‌تر نسبت به حالت شاهد به حالت

رویه‌ای بوده است. برای آرایش آغاز مانع از پله ۵، در محل پله ۵ قدری انحنا در محل مانع دیده شد که ناشی از تغییر زاویه جریان عبوری در این محل به علت وجود مانع می‌باشد.

تغییرپذیری‌های اشاره شده برای جریان‌های عبوری در سطح نسبت به حالت شاهد تحت تأثیر موانع استفاده شده سبب شده تا مرزهای آغاز جریان نیز نسبت به حالت شاهد متفاوت باشند. از این‌رو با توجه به نوع، ارتفاع و محل قرارگیری مانع، مرزهای جریان به سمت رویه‌ای شدن در دبی‌های پایین و یا ماندگاری در محدوده انتقالی عملکرد متفاوتی دارند که نتایج آغاز مرزهای جریان برای همه‌ی آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

در این جدول NAP بیانگر جریان ریزشی، TRA برای جریان انتقالی، SKI برای جریان رویه‌ای و S-T حالتی بین جریان انتقالی و رویه‌ای است که تحت تأثیر مانع پیوسته به وجود آمده است. در این حالت تا نیمه سرریز از ورودی جریان به‌طور کامل رویه‌ای بوده و در ادامه حالت انتقالی داشته است. از این‌رو این رژیم، رویه‌ای-انتقالی نام‌گذاری شد. در حالت جریان توسعه یافته پس از توسعه یافتگی، هوا وارد جریان می‌شود ولی در این آرایش‌ها موانع سبب می‌شوند که این حالت رخ ندهد و جریان انتقالی شکل بگیرد. برای مثال برای آرایش مانع مثلث متساوی الساقین ($IT, ho/h:0.38, Lo/L:0.48$)، جریان نسبت به حالت شاهد در دبی پایین‌تر به حالت انتقالی تبدیل شده و در ادامه نیز در دبی بالاتری نسبت به شاهد به جریان رویه‌ای تبدیل شد و از این‌رو در این شرایط گرایش جریان به ماندگاری در محدوده انتقالی بوده است. از سویی دیگر برای آرایش ترکیبی ($MTU, ho/h:0.38, Lo/L:0.48$)، جریان ریزشی تشکیل نشده و جریان از دبی آغازین ($=0.55 \frac{d_c}{h}$) به حالت رویه‌ای تبدیل شد.

با توجه به نتایج مرزهای جریان مشاهده می‌شود که قرارگیری مانع پیوسته با شکل و ارتفاع‌های مختلف در محل‌های مختلف با توجه به متغیر بودن فراسنجه‌های اشاره شده، سبب جا به جایی مرزهای آغاز جریان می‌شوند. تغییر مرزهای جریان تحت تأثیر مانع (پیوسته و ناپیوسته) در لبه سرریز پلکانی توسط کاکپینار

1. Inception Point of Free Aeration: IP
2. Oscillating

رویه‌ای تبدیل شده است، نقطه هواگیری یا در پله مورد نظر نوسانی شده و یا به سمت پایین دست حرکت کرده است. قرارگیری مانع پیوسته در لبه و کف پله با شکل‌های مختلف و تغییر محل هواگیری طبیعی توسط اصغری پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2020 & 2021a&b) گزارش شده است. همچنین می‌توان بیان کرد که به طور کلی مانع مربعی (CO) محل هواگیری را نسبت به حالت شاهد به سمت پایین دست منتقل کرده، موانع مثلثی (TU, TD, IT) محل هواگیری را نسبت به حالت شاهد بدون تغییر یا به سمت بالادست منتقل و در موانع ترکیبی مثلث و مربع (MTU, MTD) محل هواگیری نسبت به حالت شاهد تغییری نداشته است.

۳-۲- استهلاک انرژی آرایش‌های مختلف

استهلاک انرژی بر مبنای رابطه ۱ محاسبه شد و نتایج در جدول ۲ برای همه‌ی دبی‌ها و آرایش‌ها آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در همه‌ی آرایش‌های تحقیق در

رژیم ریزشی قرارگیری مانع با شکل‌ها، ارتفاع و محل‌های مختلف در کف پله سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد می‌گردند. به‌طور کلی در این رژیم، میزان استهلاک انرژی برای موانعی که در لبه پله قرار داشتند بیشتر بوده است و همچنین در آرایش‌هایی که مانع از پله ۵ قرار گرفتند نسبت به آرایش‌های همانندی که در همه‌ی پله‌ها مانع وجود داشت، تفاوت معنی‌دار در استهلاک انرژی مشاهده نشد. در دبی‌های انتقالی و رویه‌ای هر سه حالت نبود تغییر، افزایش و کاهش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد رخ داده است. در رژیم جریان رویه‌ای و انتقالی، افزایش استهلاک انرژی تنها مشاهده نشد و در MTD و MTU در آرایش‌های ترکیبی دیگر آرایش‌ها با توجه به ارتفاع و محل قرارگیری مانع متفاوت بوده است. به‌طور کلی از بین همه‌ی آزمایش‌های

(CO, Lo/L: 0.38, ho/h: 0.19), (TU, Lo/L: 0.48, ho/h: 0.19), (TD, Lo/L: 0, ho/h: 0.38), (TD, Lo/L: 0.38, ho/h: 0.38), (TD, Lo/L: 0.48, ho/h: 0.19), (IT, Lo/L: 0.48, ho/h: 0.38)

۱ محاسبه شد و نتایج در جدول ۲ برای همه‌ی دبی‌ها و آرایش‌ها آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در همه‌ی آرایش‌های تحقیق در

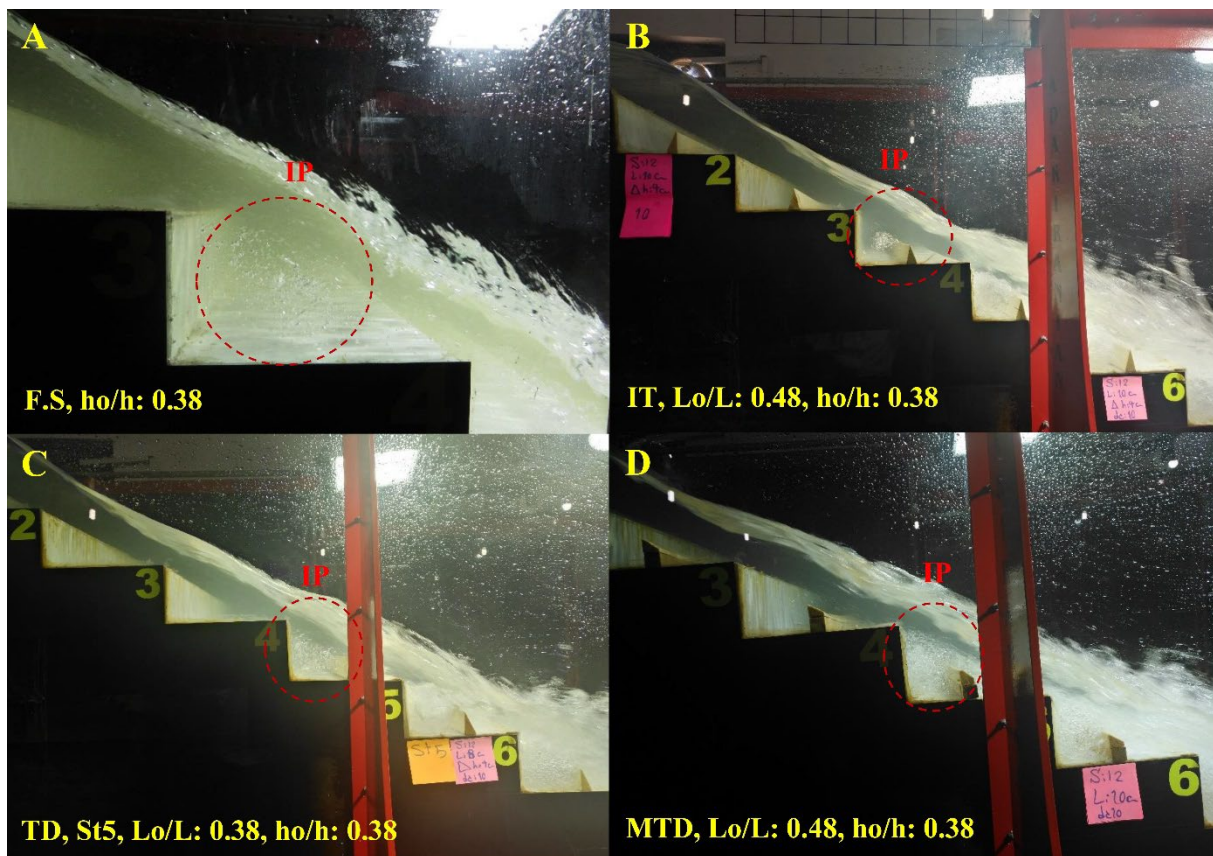


Fig. 4 Inception point of free aeration in some of the arrangements of the present study

شکل ۴ هواگیری طبیعی در برخی از آرایش‌های این تحقیق

شکل گرفته در محل دو پله متوالی ۶ و ۷ به صورت جداسازی شده و مجموع ناحیه‌های در دو پله متوالی در جدول ۳ آورده شده است. جدول ۳ و نتایج تحلیل BIV شکل‌های ۵ تا ۸ برای متغیرهای این تحقیق نشان می‌دهند که با توجه به شکل مانع، ارتفاع مانع و محل قرارگیری آن، ابعاد ناحیه‌های شکل گرفته متفاوت می‌باشند. در این راستا، برای موانعی که در لبه قرار گرفته‌اند، در ارتفاع نسبی ۰/۱۹، هر دو ناحیه اختلاط و چرخشی شکل می‌گیرد ولی با افزایش ارتفاع نسبی مانع به ۰/۳۸، تنها حالت استخری برای همه آرایش‌های بررسی شده برقرار می‌شود (شکل ۵). البته در این حالت اختلاط‌های سطحی آرایش‌های مختلف متفاوت بوده است و این اختلاف برای آرایش‌های با آغاز از پله ۵ مشهودتر است. برای آرایش CO در پله دوم (پله شماره ۷) حالتی شکل می‌گیرد که جداسازی بین محدوده انتقال و چرخشی میسر نیست و همه‌ی این محدوده به نام (Rz-Rf) نامیده شده و در دستبندی جزو ناحیه‌های Rz قرار می‌گیرد. با انتقال مانع از لبه به فاصله ۰/۳۸ و ایجاد فضای بیشتر برای شکل‌گیری ناحیه اختلاط، شمار آرایش‌هایی که پس از برخورد با مانع دارای ناحیه اختلاط می‌باشند، افزایش می‌یابند (شکل ۷). در ادامه در فاصله نسبی ۰/۴۸،

استهلاک انرژی نسبت به شاهد تا حدودی در همه‌ی دبی‌ها افزایشی بوده است. در آرایش‌های دیگری مانند (TU, Lo/L: 0.29, ho/h: 0.38), (TD, Lo/L: 0.48, ho/h: 0.38), (IT, Lo/L: 0.38, ho/h: 0.38) نیز در برخی از رژیم‌های انتقالی اثر استهلاکی مثبت نسبت به شاهد بوده است ولی در رژیم رویه‌ای و به ویژه حد بالای رویه‌ای، این مقدار محسوس نبوده و همانند با حالت شاهد بوده است. در دیگر آرایش‌های تحقیق استهلاک انرژی در رژیم انتقالی و رویه‌ای از حالت شاهد کمتر بوده است. به‌طور کلی در شیب ۱:۲ تنها موانع پیوسته‌ای در حالت جریان رویه‌ای توانسته‌اند باعث افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد شوند که در آن‌ها مانع در محدوده Lo/L: 0.38 تا 0.48 قرار گرفته باشند و در محدوده شرایط این تحقیق قراگیری مانع در لبه پلکان و تا پیش از محدوده یاد شده، نه تنها تاثیر مثبتی در افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد نداشته؛ بلکه باعث کاهش استهلاک انرژی در حالت جریان رویه‌ای شده است.

۳-۳- نتایج BIV در محل پله‌ها

خطوط جریان در کف پله بر مبنای حرکت حباب هوا برای میانگین ۸ ثانیه ترسیم شدند. محدودیت در تصویربرداری عرض فلوم سبب شده که تنها ناحیه‌های مجاور شیشه در دو پله متوالی و برای دبی بیشینه بررسی شد. ناحیه‌های

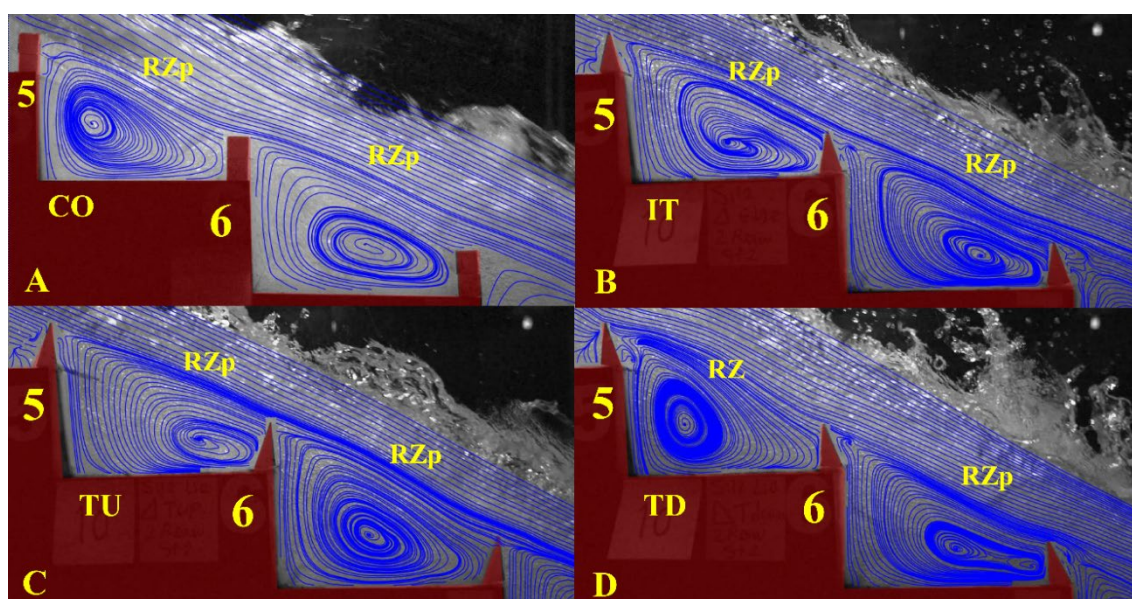


Fig. 5 Areas formed for different arrangements in maximum discharge, Lo/L=0, ho/h=0.38
شکل ۵ ناحیه‌های شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف در دبی بیشینه، Lo/L=0, ho/h=0.38

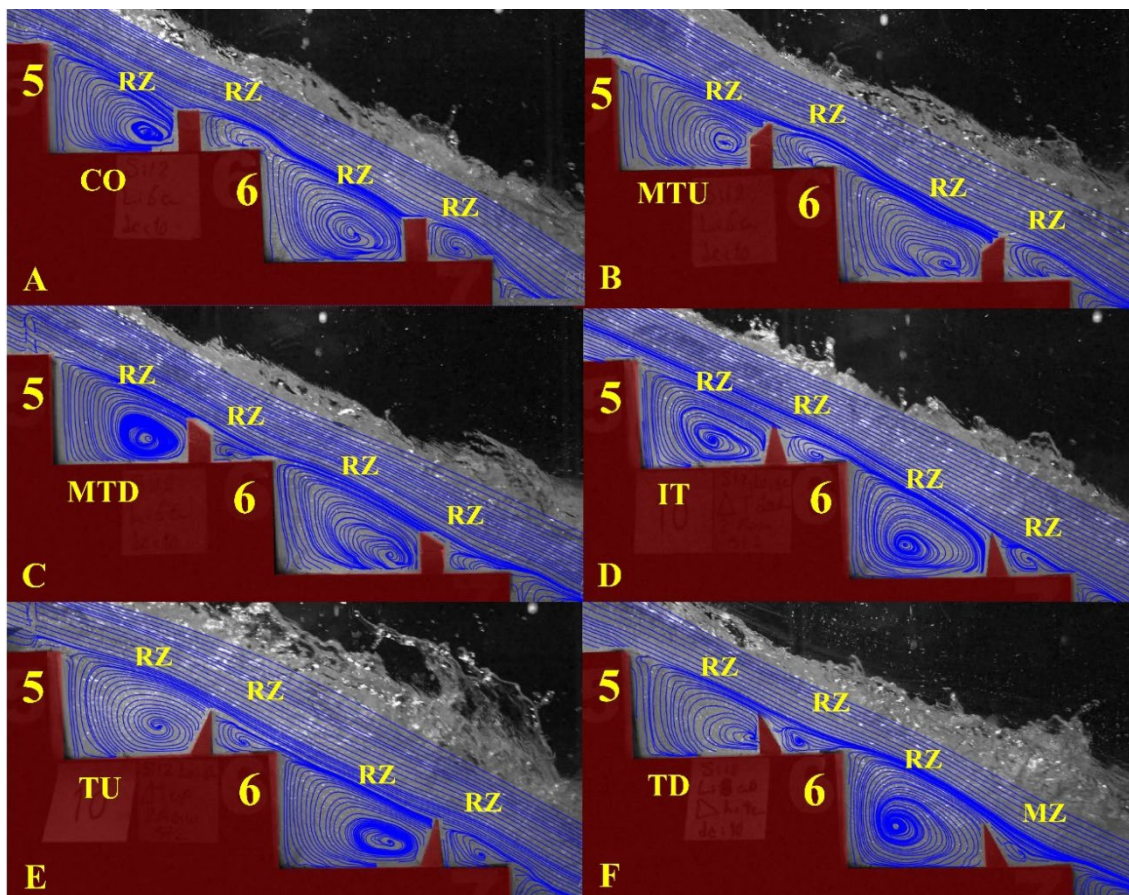


Fig. 6 Areas formed for different arrangements in maximum discharge, $Lo/L=0.29$, $ho/h=0.38$
 شکل ۶ ناحیه‌های شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف در دبی بیشینه، $Lo/L=0.29$, $ho/h=0.38$

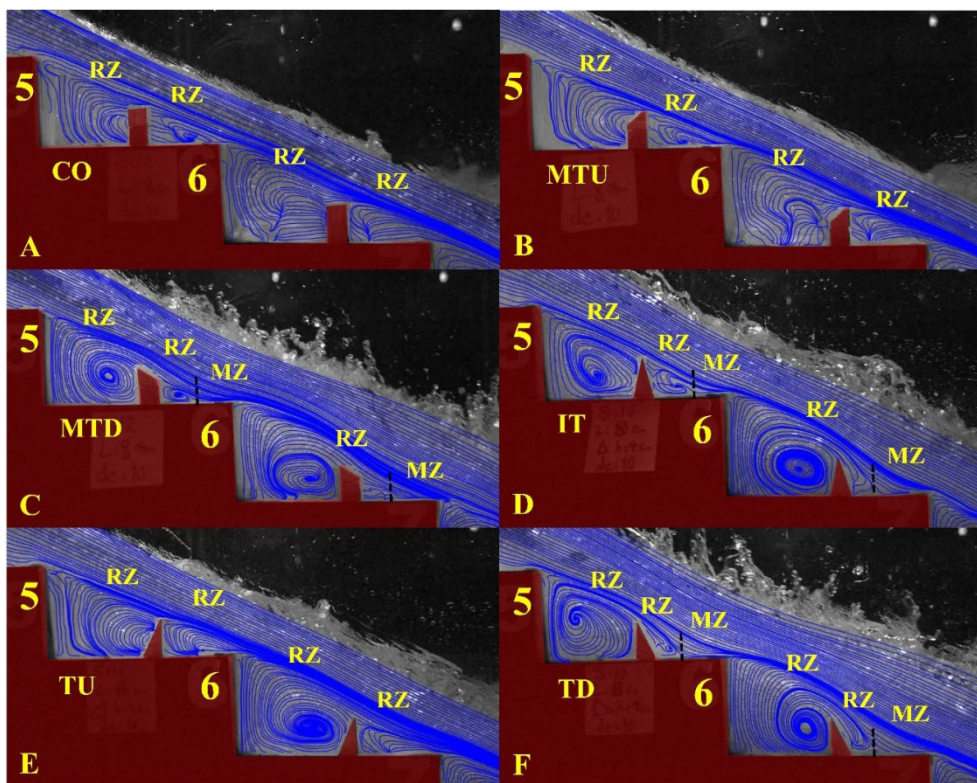


Fig. 7 Areas formed for different arrangements in maximum discharge, $Lo/L=0.38$, $ho/h=0.38$
 شکل ۷ ناحیه‌های شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف در دبی بیشینه، $Lo/L=0.38$, $ho/h=0.38$

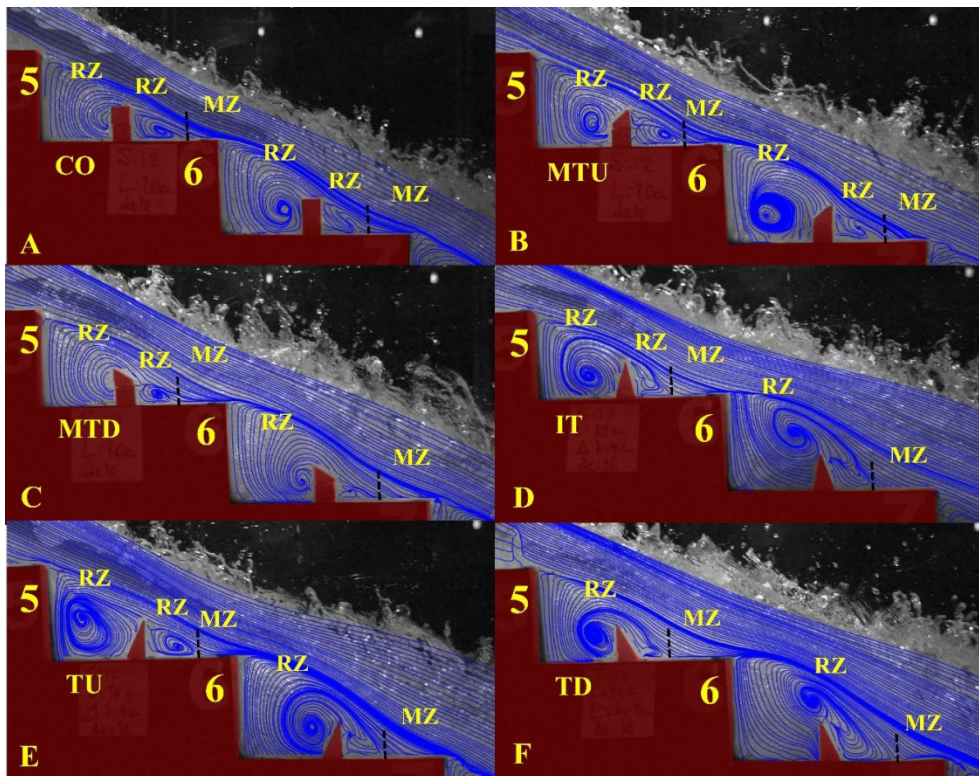


Fig. 8 Areas formed for different arrangements in maximum discharge, $Lo/L=0.48$, $ho/h=0.38$
 شکل ۸ ناحیه‌های شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف در دبی بیشینه، $Lo/L=0.48$, $ho/h=0.38$

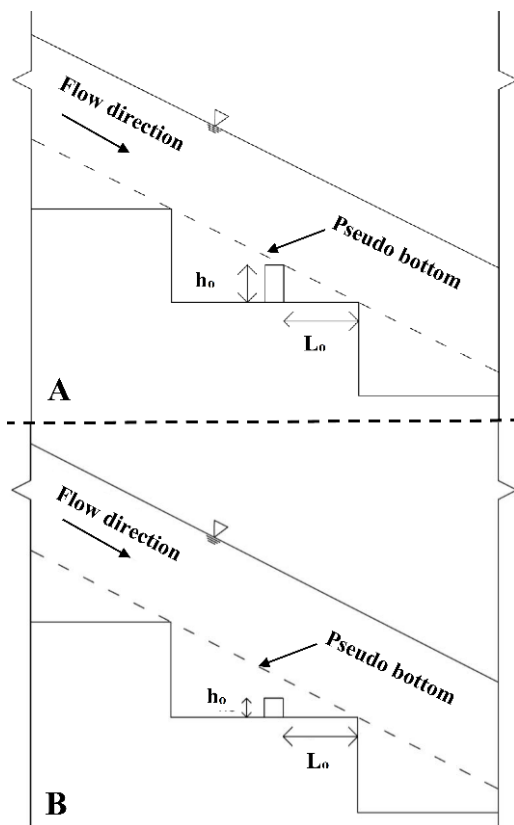


Fig. 9 Schematic of the height and location of the obstacle on the bottom of the step

شکل ۹ شمای کلی ارتفاع و محل قرارگیری مانع در کف پله

با توجه به فضای کافی پس از مانع، در همه‌ی آرایش‌ها پس از مانع ناحیه اختلاط شکل می‌گیرد و از این‌رو شکل‌گیری ناحیه‌ها به‌حالت تعادل می‌رسد (شکل ۸). در ارتباط با نواحی چرخشی شکل گرفته برای پیش و پس از مانع می‌توان بیان کرد که محدوده تحت تأثیر و قدرت گردابه‌ای ناحیه چرخشی در گوشه درونی پله از ناحیه چرخشی شکل گرفته پس از مانع بیشتر است.

بنابر نتایج استهلاک انرژی و پردازش تصویرهای حاصل از آزمایش‌ها به‌نظر می‌رسد افزودن بر شکل مانع، مانعی می‌تواند در کف پله سبب افزایش استهلاک انرژی شود که دو شرط همزمان برقرار باشد. اول آنکه مانع مورد نظر در مرز ناحیه اختلاط و ناحیه چرخشی حالت شاهد باشد و مانع در محدوده ناحیه اختلاط قرار نگیرد (در این تحقیق این محدوده بین lo/l ۰/۳۸ و ۰/۴۸ قرار دارد). شرط دوم آن است که ارتفاع مانع با توجه به محل قرارگیری آن نسبت به کف کاذب در ارتفاع پایین‌تری باشد تا به جریان عبوری امکان برخورد موثرتر با کف پله داده شود. شمای کلی این اثر در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج استهلاک انرژی برای آرایش‌های مختلف
Table 3 Energy dissipation result of different arrangement

Model name/ (dc/h)	ΔE_r							
	0.46	0.55	0.64	0.73	0.83	0.92	1.01	1.06
F.S	83.3	79.2	71.3	62.8	56.7	48.7	44.7	39.7
CO, Lo/L=0, ho/h=0.19	87.4	78.7	66.7	61.6	57.3	49.3	42	38.4
CO, Lo/L=0, ho/h=0.38	85.9	77.8	68.5	62.9	54.1	48.7	41.3	37
CO, Lo/L=0, ho/h=0.56	85.2	76.9	66.7	61.6	52.1	48.7	42	37
CO, Lo/L=0.19, ho/h=0.19	86.5	77.3	66.7	61.6	52.1	42.3	39.2	34.8
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.19	84.5	75.3	64.1	56.3	47.8	41.6	38.5	32.6
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	86.9	76.9	68.5	63.5	55.4	47.3	40.6	36.3
CO, Lo/L=0.38, ho/h=0.19	88.3	78.3	66.1	63.5	56.7	48	46	41.7
CO, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	84.5	74.2	63.4	59	48.5	40.1	31.7	30.3
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	87.1	77.3	67.9	60.3	51.4	45.2	40.6	34.8
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.9	76.3	67.8	57.7	49.2	39.3	37	32.6
TU, Lo/L=0, ho/h=0.38	87.1	81.3	66.7	59.7	53.6	49.3	45.3	39.0
TU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	85.6	79.2	69.6	62.9	56.1	47.3	45.3	39.7
TU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	85.2	75.3	67.0	58.4	48.5	45.2	40	31
TU, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	84.1	74.8	65.4	54.9	47	43.1	37.8	31.1
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	85.6	77.8	68.5	60.3	51.4	50	46	43.1
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.5	75.3	65.4	61	52.1	46.6	42	38.4
TD, Lo/L=0, ho/h=0.38	87.1	80.5	70.7	61	56.1	51.9	44.7	36.3
TD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	84.1	74.2	65.4	59.7	50.7	43.8	40	30.3
TD, St5, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	83.3	74.2	67.3	59.7	55.4	50	47.2	39.7
TD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	86.2	76.3	67.9	64	57.3	51.9	47.2	43.1
TD, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	85.2	75.3	69.6	61	54.1	49.3	44.7	39.1
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	84.5	76.9	64.1	60.3	55.4	51.3	46.6	42.4
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.5	80.1	69.6	59.7	54.1	51.3	44.7	39.1
IT, Lo/L=0, ho/h=0.38	87.7	81.3	73.8	62.9	55.4	51.9	44	35.5
IT, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	85.6	79.2	69.6	60.3	53.5	50.6	45.3	37
IT, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	85.2	76.9	66.7	58.4	54.1	49.3	44	39.1
IT, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	84.8	76.3	67.9	61.6	54.1	46.6	43.4	35.5
IT, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.9	78.3	67.3	60.3	53.4	49.3	44.7	41.1
MTU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	86.9	77.3	68.5	62.2	54.8	48.7	41.3	37
MTU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	85.6	73.1	62.1	55.6	47.0	36.1	34	21.2
MTU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.9	76.9	66.1	57.7	49.2	45.2	36.3	32.6
MTD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	84.8	75.3	64.8	59.7	51.4	44.5	35.5	31.8
MTD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	86.9	78.3	68.5	61.6	52.8	46.6	42	33.3
MTD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	86.2	79.2	70.7	62.2	53.4	48	42.7	37

جدول ۴ ابعاد ناحیه‌های شکل گرفته بر روی پله برای آرایش‌های مختلف

Table 4 Dimensions of the areas formed on the steps for different arrangements

Model name	Step 6		Step 7		Sum		ΔEr	IP
	Rz (cm)	Mz (cm)	Rz (cm)	Mz (cm)	Rz (cm)	Mz (cm)		
Flat Step: F.S	15.1	5.8	16.8	4.1	31.9	9.9	39.74	5
CO, Lo/L=0, ho/h=0.19	17	8.7	20.9	0	33.1	8.7	38.37	6
CO, Lo/L=0, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.97	6
CO, Lo/L=0, ho/h=0.56	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.97	6
CO, Lo/L=0.19, ho/h=0.19	18.6	2.3	18.6	2.3	37.2	4.6	34.81	6
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.19	15.3	5.6	18.6	2.3	33.9	7.9	32.58	50
CO, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.26	50
CO, Lo/L=0.38, ho/h=0.19	17.2	3.7	13.2	7.7	30.4	11.4	41.75	5
CO, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	30.28	50
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	16.7	4.2	16	4.9	32.7	9.1	34.81	5
CO, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	17.2	3.7	16.4	4.5	33.6	8.2	32.58	50
TU, Lo/L=0, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	39.06	5
TU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	39.74	40
TU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	31.06	50
TU, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	31.06	5
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	14.3	6.6	14.4	6.5	28.7	13.1	43.05	5
TU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	16.7	4.2	14.9	6	31.6	10.2	38.37	5
TD, Lo/L=0, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.26	5
TD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	14.6	6.3	35.5	6.3	30.28	5
TD, St5, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	17.8	3.1	17.9	3.2	35.5	6.3	39.74	5
TD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	15.7	5.2	15.3	5.6	31	10.8	43.05	4
TD, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	16	4.9	15.8	5.1	31.8	10	39.06	5
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.19	14.3	6.6	14.6	6.3	28.9	12.9	42.4	5
TD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	14.9	6	16.3	4.6	31.2	10.6	39.06	5
IT, Lo/L=0, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	35.54	5
IT, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.97	5
IT, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	17.2	3.7	15.3	5.6	32.5	9.3	39.06	5
IT, St5, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	17.8	3.1	16.3	4.6	34.1	7.7	35.54	5
IT, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	14.3	6.6	16.7	4.2	31	10.8	41.09	4
MTU, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	36.97	5
MTU, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	21.23	5
MTU, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	16.8	4.1	16.6	4.3	33.4	8.4	32.58	5
MTD, Lo/L=0.29, ho/h=0.38	20.9	0	20.9	0	41.8	0	31.82	6
MTD, Lo/L=0.38, ho/h=0.38	16.9	4	16.2	4.7	33.1	8.7	33.33	5
MTD, Lo/L=0.48, ho/h=0.38	16.1	4.8	16.2	4.7	32.3	9.5	36.97	5

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل و محل قرارگیری مانع پیوسته بر روی سرریز پلکانی در شیب ۱:۲ پرداخته شده است. به‌منظور اندازه‌گیری فراسنجه‌های آزمایش، افزون بر ژرفاسنج در بالادست و پایین‌دست سرریز، از روش و فن پردازش تصویر استفاده شده است. نتایج ارائه شده در محدوده فراسنجه‌های بررسی شده در تحقیق برقرار می‌باشند.

- قرارگیری مانع پیوسته با شکل‌های مقطع متفاوت با ارتفاع و محل متفاوت قرارگیری در کف پله سرریز سبب تغییر آغاز مرزهای جریان نسبت به حالت شاهد می‌گردد و به‌طور عمومی تمایل جریان به گسترش و ماندگاری بیشتر در محدوده انتقالی را افزایش می‌دهد.

- استفاده از موانع مربعی (CO) محل هواگیری را نسبت به حالت شاهد به سمت پایین‌دست برده است، اما موانع مثلثی (TU, TD, IT) محل هواگیری را نسبت به حالت شاهد بدون تغییر یا به سمت بالادست برده‌اند. در موانع ترکیبی مثلث و مربع (MTU, MTD) محل هواگیری نسبت به حالت شاهد تغییری نداشته است. همچنین همه آرایش‌هایی که توانسته‌اند محل هواگیری را نسبت به حالت شاهد به بالادست منتقل کنند در حالت رویه‌ای استهلاك انرژی بیشتری نسبت به حالت شاهد ایجاد کرده‌اند.

- برای رژیم جریان ریزشی، نتایج استهلاك انرژی نشان از موثر بودن قرارگیری مانع با شکل‌ها و ارتفاع‌های مختلف در محل‌های مختلف بر روی پله می‌باشد که میزان استهلاك انرژی در این رژیم به‌طور میانگین تا ۴ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش می‌یابد. در رژیم‌های جریان انتقالی و رویه‌ای با توجه به آرایش استفاده شده، استهلاك انرژی سه حالت نبود تغییر، افزایش تا ۳ درصد و یا کاهش استهلاك تا ۱۰ درصد را داشته است.

- نتایج تحلیل BIV نشان می‌دهد که با توجه به شکل مانع، ارتفاع مانع و محل قرارگیری آن، ابعاد ناحیه‌های شکل گرفته نسبت به حالت شاهد متفاوت است. در شیب ۱:۲ در صورت قرارگیری مانع پیوسته در لبه پله تنها ناحیه چرخشی بر روی پله شکل می‌گیرد اما با فاصله گرفتن مانع از لبه پله

در محدوده 0.38 l/s و 0.48 ، افزون بر ناحیه جریان چرخشی، ناحیه اختلاط نیز شکل گرفته است.

- بنابر نتایج استهلاك انرژی و پردازش تصویرهای حاصل از آزمایش‌ها به‌نظر می‌رسد افزون بر شکل مانع، مانعی می‌تواند در کف پله سبب افزایش استهلاك انرژی شود که هم در مرز ناحیه اختلاط و ناحیه چرخشی حالت شاهد باشد و مانع در محدوده ناحیه اختلاط قرار نگیرد. از سوی دیگر ارتفاع مانع با توجه به محل قرارگیری آن نسبت به کف کاذب در ارتفاع پایین‌تری باشد تا به جریان عبوری امکان برخورد موثرتر با کف پله داده شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

روش و فن پردازش تصویر حباب

BIV: Bubble Image Velocimetry

Dc عمق بحرانی جریان در ورودی (cm)

Fr عدد فرود

G شتاب ثقل (ms^{-2})

H ارتفاع پله (cm)

Ho ارتفاع مانع (cm)

ho/h ارتفاع نسبی مانع

dc/h فراسنجه دبی

L طول پله (cm)

Lo فاصله مانع از لبه پله (cm)

lo/l فاصله نسبی مانع از لبه

N شمار پله‌های دارای مانع

No شمار پله‌های سرریز

روش و فن پردازش تصویر ذرات

PIV: Particle Image Velocimetry

Re عدد رینولدز

V_1 سرعت جریان در پایین‌دست سرریز (ms^{-1})

sh شکل مانع استفاده شده

w عرض سرریز (m)

We عدد وبر

ΔE استهلاك انرژی (m)

ΔE_r استهلاك نسبی انرژی

y_1 عمق در پایین‌دست سرریز (m)

q دبی واحد عرض ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^1$)

نشانه‌های یونانی:

design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679.

Boes, R.M. & Hager, W.H. (2003b). Two-Phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.

Bühler, P., Leandro, J., Bung, D., Lopes, P. & Carvalho, R. (2015). Measuring void fraction of a stepped spillway with non-intrusive methods using different image resolutions. IWHS 2015, 41.

Bung, D. & Valero, D. (2015). Image Processing for Bubble Image Velocimetry in self-Aerated Flow, 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, Huges, Netherland.

Bung, D.B. (2013). Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 322–329.

Bung, D.B. (2011). Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 49(5), 639–648.

Bung, D.B. & Schlenkhoff, A. (2010). Self-aerated skimming flow on embankment stepped spillways: the effect of additional micro-roughness on energy dissipation and oxygen transfer. Proceedings of 1st European IAHR Congress, Edinburgh, Flash-drive.

Chanson, H. (2002). The hydraulics of stepped chute and spillways, Bulkema Publ., The Netherlands, 140-180.

Emadzadeh, A. & Chiew, Y.M. (2017), Bubble Dynamics and PIV Measurements in a Hydraulic Jump, The 37th IAHR World Congress August 13 – 18, Kuala Lumpur, Malaysia.

Felder, S. & Chanson, H. (2014). Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 140(4), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000858](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000858).

Ghaderi, A. & Abbasi, S. (2021). Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendage Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway, *Water*, 13(7), 957, <https://doi.org/10.3390/w13070957>.

Ghaderi, A., Abbasi, S. & Di Francesco, S. (2021). Numerical Study on the Hydraulic Properties of Flow over Different Pooled Stepped Spillways, *Water*, 13(5), 710, <https://doi.org/10.3390/w13050710>.

Gonzalez, C.A. & Chanson, H. (2008). Turbulence and cavity recirculation in air–water skimming flows, *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), 65-72.

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	گرانروی دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
σ	کشش سطحی (n/m)

زیرنویس‌ها:

محل هواگیری طبیعی سرریز

IP: Inception Point of Free Aeration

O: Oscillating نوسانی بودن جریان

R_F: Redirected Flow جریان برگشتی

M_z: Mixing Zone ناحیه اختلاط

R_z: Recirculation Zone ناحیه چرخشی

R_{zP}: Pooled Step حالت استخری بودن

۶- منبع‌ها

Akhgar, S. & Roushangar, K. (2019). Numerical and experimental study of pitched steps effects in stepped spillway on the hydraulic parameters and energy dissipation in the skimming flow. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(8), 1-12.

Ali, A.S. & Yousif, O.S.Q. (2019). Characterizations of flow over stepped spillways with steps having transverse slopes. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 344, 012019, DOI: 10.1088/1755-1315/344/1/012019.

André, S. (2004). High velocity aerated flows over stepped chutes with macro-roughness elements. Thesis No. 2993, EPFL, and Communication LCH No. 20, (Eds.), A.J. Schleiss, Lausanne, Switzerland.

Asghari Pari, S.A. & Kordnaeij, M. (2019). Investigating the Effect of eliminate of lateral discontinuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 18th Iranian Hydraulic Conference. Tehran, Iran. (In Persian)

Asghari Pari, S.A. & Kordnaeij, M. (2021a). Investigating the Effect of Different Arrangements of Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics and Energy Dissipation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(4), 33-49.

Asghari Pari, S.A. & Kordnaeij, M. (2021b). Laboratory examination of Comparison of the effect of the porous screen, continuous obstacle, and continuous porous obstacle on the edge of a stepped spillway. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 22(83), 121-140.

Boes, R.M. & Hager, W.H. (2003a). Hydraulic

- Novakoski, C.K., Ferla, R., Prá, M.D., Canellas, A. V.B., Marques, M.G. & Teixeira, E.D. (2020). Stepped spillway with pre-aeration by a deflector: flow characteristics. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, 25, e26, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190051>.
- Ostad Mirza, M.J., Matos, J., Pfister, M. & Schleiss, A.J. (2016). Effect of an abrupt slope change on air entrainment and flow depths at stepped spillways, *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 362-375.
- Peng, Y., Zhang, X., Yuan, H., Li, X., Xie, C., Yang, S. & Bai, Z. (2019). Energy Dissipation in Stepped Spillways with Different Horizontal Face Angles, *Energies*, 12(23), 4469, <https://doi.org/10.3390/en12234469>.
- Razmkhah, A, Asghari Pari, S.A. & Kordnaeij, M. (2021). Experimental investigating of the Effect of location of continuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 19th Iranian Hydraulic Conference. Mashhad, Iran. (In Persian)
- Roushangar, K. & Akhgar, S. (2021). Numerical and Experimental Study of Wedge Elements Influence on Hydraulic Parameters and Energy Dissipation over Stepped Spillway in Skimming Flow Regime. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(1), 12-12.
- Torabi, H., Parsaie, A., Yonesi, H. & Mozafari, E. (2018). Energy dissipation on rough stepped spillways. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 42(3), 325-330.
- Sánchez-Juny, M., Estrella, S., Matos, J., Bladé, E., Martínez-Gomariz, E. & Bonet Gil, E. (2022). Velocity Measurements in Highly Aerated Flow on a Stepped Chute without Sidewall Constraint Using a BIV Technique. *Water*, 14(16), 2587, <https://doi.org/10.3390/w14162587>.
- Wuthrich, D. & Chanson, H. (2015). Aeration performances of a gabion stepped weir with and without capping, *Environmental Fluid Mechanics*, 15(4), 711-730.
- Zare, H.K. & Doering J.C. (2012). Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(2), 140-153.
- Zhang, G. & Chanson, H. (2018). Air-water flow properties in stepped chutes with modified step and cavity geometries, *International Journal of Multiphase Flow*, 99, 423-436.
- Guenher, P., Felder, S. & Chanson, H. (2013). Flow Aeration, Cavity Processes and Energy Dissipation on Flat and Pooled Stepped Spillways for Embankments, *Environmental Fluid Mechanics*, 13(5), 503-525.
- Habibi, K, Asghari Pari, S.A. & Kordnaeij, M. (2021). Experimental investigating of the Effect of location of discontinuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 19th Iranian Hydraulic Conference. Mashhad, Iran. (In Persian)
- Hamed, A., Mansoori, A., Shamsai, A. & Amirahmadian, S. (2014). Effects of End Sill and Step Slope on Stepped Spillway Energy Dissipation, *J. Water Sci. Res.*, 6(1), 1-15.
- Hunt, S.L. & Kadavy, K.C. (2013). Inception point for embankment dam stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(9), 796-802.
- Hunt, S.L. & Kadavy, K.C. (2011). Inception point relationship for flat-slopped stepped spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(2), 262-266.
- Kökpınar, M.A. (2004). Flow over a stepped chute with and without macro-roughness elements, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(5), 880-891.
- Kordnaeij, M. & Asghari Pari, S.A. (2019). Experimental Investigating the Effect continuous Obstacle on the edge of Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing (BIV). 11th international River Engineering Conference, Ahwaz, Iran. (In Persian)
- Kordnaeij, M, Ostad Mirza, M.J., Asghari Pari, S. A. & Falahat, H. (2023). Energy Dissipation on Stepped Spillways: The Effect of Mounted Step Roughness. 40th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, Vienna, Austria.
- Leandro, J., Bung, D.B. & Carvalho, R. (2014). Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods, *Exp Fluids*, 55, 1732, <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1732-6>.
- Lopes, P., Leandro, J., Carvalho, R.F. & Bung, D. B. (2017). Alternating skimming flow over a stepped spillway, *Environmental Fluid Mechanics*, 17(2), 303-322.
- Nina, Y.A., Rui, S.H. I., Wüthrich, D. & Chanson, H. (2021). Intrusive and Non-Intrusive two-phase Air-Water Measurements on Stepped Spillways: A physical study. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 131, 110545, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110545>.



© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

