

## Research Paper

# Experimental Study of the Effect of the Location of a Continuous Porous Obstacle on the Bottom of a Stepped Spillway on the Characteristics of the Flow

Seyed Amin Asghari pari<sup>\*1</sup>, Azin Razmkhah<sup>2</sup>, Seyed Ali Asghari pari<sup>3</sup>, Mojtaba Kordnaeij<sup>4</sup>

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

2. M.sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

4. Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

Received: 2021/09/14

Revised: 2021/10/11

Accepted: 2021/12/21

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2023.28972.2338

### Keywords:

Stepped Spillway, 3D porous Obstacle, Energy Dissipation, BIV Technique

### Abstract

**Introduction:** In the present study, we investigated the effect of the location and height of a three-dimensional porous obstacle (with porosity in all three dimensions) which is located on the bottom of the steps in the width of the flume and the number of steps with this type of obstacle has been investigated on a stepped spillway.

**Methods:** The slope of the spillway was 1: 2 and had 8 steps, the total height was 87 cm and the width of the flume was 1.2 m. The measuring instruments in the present study were point gage, image processing technique and observations of the experiment.

**Findings:** In a continuous three-dimensional porous obstacle, according to the relative height, location and number of steps with an obstacle, the starting flow boundaries of the placement change compared to the flat step, so that by increasing the relative distance of the obstacle from the edge of the steps and decreasing the number of steps with continuous porous obstacle. The tendency of the flow to expand in the upper range of the transition flow (neighborhood with the skimming flow regime) increases.

**Conclusion:** In the nappe flow regime, the placement of a three-dimensional porous obstacle for the variables of the present study increases the energy dissipation by up to 5% more than in the flat step (control). For transitional and skimming flow regimes, in most cases, continuous porous obstacle placement has no positive depreciation effect. In addition, according to the size of the areas formed by BIV, it can be said that in conditions where the mixing area measured in two consecutive steps was more than the flat step, energy dissipation has also increased.

**Citation:** Asghari pari S A, Razmkhah, A, Asghari pari S A, Kordnaeij M. Experimental study of the effect of the location of a continuous porous obstacle on the bottom of a stepped spillway on the characteristics of the flow. Water Resources Engineering Journal. 2023; 16(56): 79-94

**\*Corresponding author:** Seyed Amin Asghari pari

**Address:** Dept. of Civil Engineering, Behbahan Khatam Al Anbia University of Technology, Behbahan, Iran

**Tell:** +989166000035

**Email:** [asghari\\_amin@bkatu.ac.ir](mailto:asghari_amin@bkatu.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

Stepped Spillways have a simple geometric structure, which reduces the cost of implementing these types of spillways and are economically viable; however, the complexities of the flow on this type of spillway are high and this has led to ongoing research in this area. In the last decade, many laboratory studies have been performed on stepped spillways with the focus on increasing energy dissipation and the process of air entry around the world for different slopes. This has led to the use of new and creative ideas in the structure of this type of spillway. Among the researches done in order to increase the spillway depreciation by using obstacles in different ways (3,4, 8, 10, 11, 12, 14, 17, 18, 29, 32-35) pointed out. In the present study, an attempt has been made to investigate the effect of a continuous three-dimensional porous obstacle on a stepped spillway.

### Materials and Methods

The flume has length, width and height of 10, 1.2 and 1 meter, respectively, with a maximum flow rate of 150 liters per second, which was measured using an ultrasonic flowmeter. The downstream depth after the spillway jump and the water depth at the upstream inlet on the spillway were performed using two depth gauges with an accuracy of  $\pm 1$ mm. The spillway has a height of 87 cm, 8 steps, a slope of 1: 2, a step length of 20.9 and a step height of 10.9 cm. Imaging was performed with the FS5 SONY camera along with 3 LED projectors for lighting at steps 6 and 7 and for maximum flow. The images were analyzed after calling in the image processing code of MATLAB software, PIV-Lab (31). The obstacle used in the present study has three-dimensional porosity. Relative heights ( $\frac{h_o}{h}$ ) of 0.38 and 0.19 and relative distances ( $\frac{L_o}{L}$ ) of 0.29-0.38 and 0.48 of the edge were examined. The discharge parameter range ( $\frac{d_c}{h}$ ) from 0.37 to 1.06 with 8 discharges was investigated.

### Conclusion

In the three-dimensional porous obstacle, according to the relative height, location and number of steps with the obstacle, the boundaries of the start of the regimes change according to the flat step (F.S). By moving the obstacle to the inner corner of the spillway (increasing the relative distance) and decreasing the number of steps with a porous obstacle, the flow increases transition boundary with the upstream constraint.

The inception point of free aeration (IP) location of a stepped spillway with a three-dimensional continuous porous obstacle at the relative distance and relative height studied is in most cases similar to the flat step (F.S), and in some arrangements, it oscillates and moves downwards.

In the nappe flow regime, the placement of a three-dimensional porous obstacle for the variables of the present study increases the energy dissipation compared to the flat step (F.S). For transition and skimming flow regimes in the form of continuous porous obstacle placement cases, it has no positive depreciation effect and according to the results of the relative distance arrangement of 0.48 starting from steps 4 and 5, the depreciation has more energy than the F.S and continuous obstacle.

The results of BIV analysis show that the dimensions of the formed areas change continuously under the influence of the relative height and relative distance of the porous obstacle. Moving the obstacle location from the edge to the inside of the steps prevents the formation of a pool mode (Rzp) and increases the dimensions of the mixing area.

The results of energy dissipation according to the size of the areas formed by BIV show that in conditions where the mixing area (Mz) measured in two consecutive steps has a higher value than the flat step (F.S), energy dissipation has also increased.

### **Ethical Considerations compliance with ethical guidelines**

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### **Funding**

No funding.

### **Authors' contributions**

Design and conceptualization: Seyed Amin Asghari pari, Mojtaba Kordnaeij, Azin Razmkhah;  
Methodology and data analysis: Seyed Amin Asghari pari, Seyed Ali Asghari pari, Azin Razmkhah;  
Supervision and final writing: Seyed Amin Asghari pari, Mojtaba Kordnaeij,

### **Conflicts of interest**

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بررسی آزمایشگاهی اثر محل قرارگیری مانع متخلخل پیوسته سه بعدی در کف پله سرریز پلکانی بر مشخصات جریان عبوری

سید امین اصغری پری<sup>۱\*</sup>، آذین رزمخواه<sup>۲</sup>، سید علی اصغری پری<sup>۳</sup>، مجتبی کردناجی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
۳. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
۴. مدرس گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران

## چکیده

**مقدمه:** در تحقیق حاضر به بررسی اثر محل قرارگیری و ارتفاع مانع متخلخل سه بعدی (دارای تخلخل در هر سه بعد) که به صورت پیوسته در عرض فلوم بر روی کف پله قرار گرفته است و همچنین اثر تعداد پله‌های دارای این نوع مانع متخلخل بر روی سرریز پلکانی پرداخته شده است.

**روش:** شیب سرریز ۱:۲ و دارای ۸ پله، ارتفاع کلی ۸۷ سانتی‌متر و عرض فلوم ۱،۲ متر بوده است. ابزارهای اندازه‌گیری در تحقیق حاضر عمق سنج، تکنیک پردازش تصویر و مشاهدات زمان انجام آزمایش بوده است.

**یافته‌ها:** در مانع متخلخل سه بعدی پیوسته با توجه به ارتفاع نسبی، محل قرارگیری و تعداد پله‌های دارای مانع، مرزهای شروع جریان قرارگیری نسبت به حالت شاهد تغییر می‌کند به طوری که با افزایش فاصله نسبی مانع از لبه پلکان و کاهش تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل پیوسته، تمایل جریان به گسترش در محدوده بالایی جریان انتقالی (همسایگی با جریان رویه‌ای) افزایش می‌یابد.

**نتیجه‌گیری:** در رژیم جریان ریزشی قرارگیری مانع متخلخل سه بعدی برای متغیرهای تحقیق حاضر سبب افزایش استهلاک انرژی تا ۵ درصد بیش تر نسبت به حالت شاهد می‌گردد. برای رژیم‌های جریان انتقالی و رویه‌ای در اکثر موارد قرارگیری مانع متخلخل پیوسته اثر استهلاکی مثبت ندارد. همچنین با توجه به اندازه‌های ناحیه‌های شکل گرفته حاصل از BIV می‌توان بیان کرد که در شرایطی که ناحیه اختلاط اندازه‌گیری شده در دو پله متوالی نسبت به حالت شاهد دارای مقدار بیش‌تری بوده است، استهلاک انرژی نیز افزایش یافته است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2023.28972.2338

## واژه‌های کلیدی:

سرریز پلکانی، مانع متخلخل سه بعدی، استهلاک انرژی، تکنیک BIV، استهلاک انرژی.

\* نویسنده مسئول: سید امین اصغری پری

نشانی: گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران.

تلفن: ۰۹۱۶۶۰۰۰۳۵

پست الکترونیکی: asghari\_amin@bkatu.ac.ir

## مقدمه

فیزیکی و شرایط جریان امکان استفاده از هر کدام وجود دارد. برای مثال در سرریزهای پلکانی برای نواحی قبل از هواگیری طبیعی سرریز می‌توان از تکنیک (Particle Image Velocimetry: PIV) استفاده نمود و برای محدوده‌های دارای حباب هوا شامل ناحیه بعد از هواگیری طبیعی سرریز به سمت پایین دست و پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین دست سرریز می‌توان از تکنیک (Bubble Image Velocimetry: BIV) استفاده نمود. برای مثال آمادور و همکاران (۲) توانستند برای بخش‌های هوادهی نشده جریان بر روی سرریز پلکانی با استفاده از PIV مشخصات جریان را بررسی نمایند. برای بخش‌های هوادهی شده می‌توان به تحقیقات (۷-۴، ۱۶، ۲۱، ۲۴، ۲۵، ۲۹) بر روی سرریز پلکانی برای حالت‌های بدون مانع و دارای مانع اشاره کرد. از نتایج این تحقیقات می‌توان به متفاوت بودن ابعاد ناحیه‌های شکل گرفته در دو سرریز با شیب متفاوت (۵) اشاره نمود. در این راستا می‌توان به تحقیق عمادزاده و چپو (۹) اشاره نمود که از هر دو تکنیک PIV و BIV برای بررسی مکانیزم پرش هیدرولیکی استفاده نمودند. با توجه به موارد اشاره شده در خصوص تحقیقات قبلی در ارتباط با افزایش استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی، در تحقیق حاضر تلاش شده است تا اثر مانع متخلخل سه بعدی پیوسته در محل‌های مختلف بر روی کف پله با ارتفاع‌های مختلف و تعداد پله‌های مختلف دارای مانع، به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از تکنیک BIV بررسی گردد.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل ابعادی

استهلاک انرژی در این تحقیق ناشی از محل مانع متخلخل بر روی کف پله، شروع پله دارای مانع و ارتفاع مانع متخلخل سه بعدی در کف پله سرریز پلکانی تحت تأثیر دبی جریان (q)، طول (l) و ارتفاع پله‌ها (h)، عرض سرریز (w)، شتاب ثقل (g)، عمق بحرانی جریان در ورودی سرریز (dc)، دانسیته سیال (ρ)، کشش سطحی (σ)، لزجت دینامیکی سیال (μ)، تعداد پله‌های سرریز (No)، ارتفاع مانع متخلخل (ho)، فاصله مانع متخلخل از لبه پله (lo) و شروع پله دارای مانع متخلخل (St) می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که عمق آب پایین دست به نحوی با درجه تنظیم شده است که در کلیه آزمایش‌های این تحقیق پرش هیدرولیکی درست در پایین دست سرریز و از نوع آزاد باشد و با توجه به محدودیت اندازه‌گیری عمق اولیه پرش، از رابطه بلنجر جهت محاسبه عمق اولیه پرش استفاده گردید. برای محاسبه افت نسبی انرژی از رابطه ۱ استفاده گردید.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} = 1 - \frac{[V_1 + \frac{V_1^2}{2g}]}{(1.5d_c + P)} \quad (1)$$

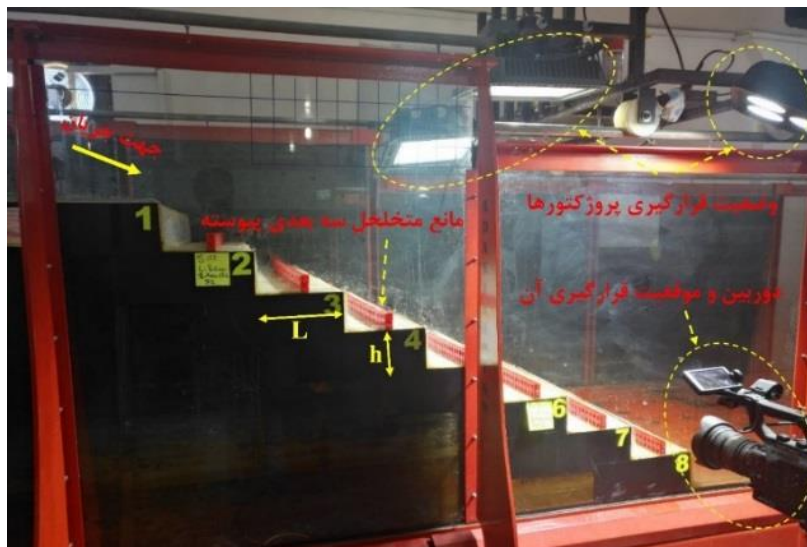
که در این رابطه  $E_0$  انرژی در بالادست سرریز و  $E_1$  انرژی در پایین دست سرریز می‌باشد.

از روش پی باکینگهام جهت به دست آوردن پارامترهای بی بعد استفاده گردید. در ادامه پارامترهای موثر بر افت انرژی برای شرایط بیان شده تابعی از متغیرهای بیان شده به صورت زیر می‌باشد:

$$F = f(\Delta E_r, q, l, h, w, g, d_c, \rho, \sigma, \mu, h_o, l_o, St, No) \quad (2)$$

سرریزهای پلکانی ساختار هندسی ساده دارند که این ویژگی هزینه اجرای این نوع از سرریزها را کاهش داده و لذا از لحاظ اجرایی اقتصادی می‌باشند؛ ولی پیچیدگی‌های جریان عبوری بر روی این نوع سرریز زیاد می‌باشد و این امر سبب شده تا تحقیقات در این زمینه توسط محققین انجام گیرد. در دهه اخیر مطالعات آزمایشگاهی بسیاری در خصوص سرریزهای پلکانی با محوریت افزایش استهلاک انرژی و فرآیند ورود هوا در سراسر دنیا برای شیب‌های مختلفی انجام شده است (۱۱). از سوی دیگر محققین تلاش کرده‌اند تا با ایده‌های نوین و خلاقیت در ساختار این نوع سرریز، استهلاک انرژی را افزایش دهند. در این راستا در برخی از تحقیقات به بررسی تأثیر تغییرات در هندسه اولیه سرریز بر جریان پرداخته شده است (۱، ۱۴، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۳۰ و ۳۶) دیگر محققان (۳، ۴، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۷، ۱۸، ۲۹، ۳۲-۳۵) تأثیر ایجاد مانع مختلف را جهت افزایش استهلاک انرژی بر روی سرریز پلکانی بررسی نمودند که در برخی از موارد این تغییرات موثر بوده و در برخی از موارد نیز اثر استهلاکی مثبت نبوده است. اثر مثبت یا منفی در بررسی استهلاک انرژی به پارامترهای مختلفی نظیر شیب سرریز، تعداد پله‌ها، رژیم جریان بررسی شده و محدوده ارتفاعی و نحوه قرار گیری مانع بررسی شده بستگی دارد. برای مثال نتایج کردنائیچ و اصغری پری (۱۸) نشان داد که ایجاد مانع پیوسته در لبه سرریز با شیب ۱:۳ سبب افزایش استهلاک انرژی در هر سه رژیم جریان می‌گردد در حالی که ایجاد همان مانع در شیب ۱:۲ و در شرایط دبی و هندسه فلوم مشابه، توسط اصغری-پری و کردنائیچ (۵) نشان داد که فقط در رژیم ریزشی اثر استهلاکی مثبت دارد. از سوی دیگر در خصوص رژیم جریان و زبری در کف پله، نتایج تریابی و همکاران (۳۴) نشان داد قرارگیری زبری در کف پله برای رژیم جریان ریزشی اثر استهلاکی مثبت دارد و بررسی اصغری پری و کردنائیچ (۵) نیز نشان داد که استفاده از زبری در کف پله در جریان ریزشی اثر مثبت دارد ولی در رژیم‌های انتقالی و رویه‌ای اثر منفی دارد. برای سرریز پلکانی شبیه‌سازی‌های نرم افزاری از یک سو و بهره‌مندی از تکنیک‌های نوین اندازه‌گیری میدان جریان باعث شده تا بخش‌هایی از پیچیدگی‌های رژیم جریان در این نوع سرریز شناخته شود. برای شبیه سازی نرم افزاری از بین مطالعات بسیاری که انجام شده می‌توان به نتایج لوپیز و همکاران (۲۴) اشاره نمود که نشان دادند که در شرایط یکسان پارامتر دبی، نواحی شکل گرفته بر روی کف پله سرریز با توجه به عرض فلوم متفاوت می‌باشند. همچنین شبیه سازی نرم افزاری نشان داد که با افزایش شیب سرریز محل هواگیری طبیعی در این نوع سرریز به سمت پایین دست منتقل می‌شود و در واقع فاصله هواگیری افزایش می‌یابد (۲۸). از طرفی مدل سازی اثر زاویه پله نشان داد که افزایش تعداد پله‌ها سبب افزایش سرعت در انتهای شوت می‌گردد و با افزایش دبی نیز میزان استهلاک انرژی در همه‌ی زوایای مورد بررسی کاهش می‌یابد (۲۳). همچنین نتایج لی و ژانگ (۲۲) و قادری و همکاران (۱۳) نشان داد که مانع غیریوسته ایجاد شده در لبه سرریز به اختلاط بیش تر و ایجاد نواحی جدید منجر می‌شود. در راستای گسترش تکنیک‌های جدید اندازه‌گیری برای شناخت بهتر جریان می‌توان به تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر اشاره نمود که بسته به شرایط هیدرولیکی مدل

شماره‌گذاری پله‌های سرریز از بالادست (ورودی جریان به سرریز) انجام شده است. جهت استفاده از بررسی جریان با استفاده از تکنیک پردازش تصویر از تصویربرداری با دوربین FS5 SONY به‌همراه ۳ عدد پروژکتور ۱۵۰ وات (جهت روشنایی جریان و ثبت بهتر حباب‌های هوا) در محل پله‌های ۶ و ۷ و برای دبی حداکثر انجام گردید. محل قرارگیری دوربین عمود بر راستای طولی فلوم در فاصله ۵۰ سانتی‌متری دیواره بوده است و با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری در این روش، تصاویر در فاصله حدود ۳ میلی‌متر از شیشه فلوم ثبت گردید (۹ و ۶). تصاویر پس از فراخوانی در کد پردازش تصویر نرم افزار متلب، PIV-Lab (۳۱) آنالیز گردیدند. در شکل ۱ نمای کلی از وضعیت سرریز، ریل حرکتی، موقعیت دوربین و پروژکتورها در فلوم نشان داده شده است. مانع استفاده شده در تحقیق حاضر یک مانع متخلخل سه بعدی (دارای تخلخل در سه بعد، در هر شش وجه مکعب) می‌باشد و نتایج کاردنایج و همکاران (۱۹) و (۲۰) برای استفاده از این نوع مانع برای کنترل جریان غلیظ نشان داد که عملکرد مثبت در کنترل جریان عبوری در مقایسه با صفحه متخلخل دو بعدی دارد. در ادامه در استفاده از این نوع مانع در کف پله سرریز پلکانی (۵) به‌صورت پوشش کامل و زیگزاک استفاده گردید. از این رو در تحقیق حاضر نیز از این نوع مانع با توجه به عملکرد گردش جریان در درون تخلخل‌ها و امکان ایجاد استهلاک بیش‌تر احتمالی در جریان، استفاده گردید. از موانع با دو ارتفاع‌های نسبی  $(\frac{h_0}{h})$  ۰/۳۸ و ۰/۱۹ و در فاصله‌های نسبی  $(\frac{L}{L_0})$  ۰ - ۰/۲۹ - ۰/۳۸ و ۰/۴۸ از لبه پلکان سرریز استفاده شده است. همچنین آرایش قرارگیری موانع نیز برای تمامی پله‌ها (شروع قرارگیری مانع از پله ۲)، شروع از پله ۳، ۴ و ۵ بوده است تا اثر تعداد پله‌های دارای مانع بر مشخصات جریان نیز مشخص گردد. در شکل ۲ شماتیک آرایش‌های بررسی شده در تحقیق حاضر آورده شده است.



شکل ۱- نمایی از سرریز پلکانی و تجهیزات اندازه‌گیری

پس از انجام آنالیز ابعادی به روش پی باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به‌صورت رابطه (۳) می‌باشند:

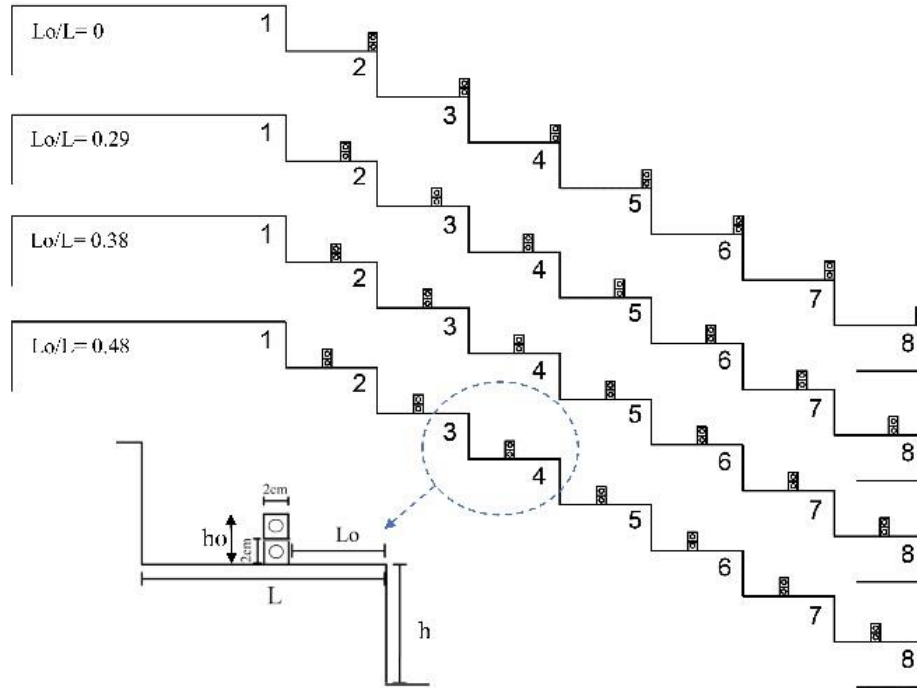
$$f = \left( \frac{L_0}{L}, \frac{h_0}{h}, \frac{h}{L}, \frac{d_c}{h}, \frac{w}{L}, \Delta E_r, We, Fr, Re, St, No \right) = 0 \quad (3)$$

برای اعداد بی‌بعد رینولدز و وبر، چو (۱۹۵۹) بیان نمود در صورت بیش‌تر بودن عدد رینولدز از ۲۰۰۰ و بیش‌تر بودن عمق جریان عبوری از ۳-۴ سانتی‌متر، می‌توان به‌ترتیب از اثرات عدد رینولدز و وبر صرف‌نظر نمود. عدد رینولدز تحقیق حاضر در محدوده ۳۴۵۰۰ تا ۱۰۵۰۰۰ و ارتفاع آب در ورودی سرریز برای دبی حداقل بیش از ۴ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین از اثر هر دو عدد صرف‌نظر می‌شود. همچنین شیب، تعداد پله‌ها و عرض پله ثابت می‌باشد که از اثر آن‌ها نیز صرف‌نظر می‌شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f \left( \frac{h_0}{h}, \frac{L_0}{L}, \frac{d_c}{h}, Fr, St \right) = 0 \quad (4)$$

### روش انجام آزمایش و سناریوها

آزمایش‌های این تحقیق در فلوم مرکز تحقیقات پیشرفته جوار دانشگاهی دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان انجام شده است. فلوم استفاده شده در تحقیق حاضر دارای طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۱۰، ۱،۲ و ۱ متر بوده که در ۳ متر ابتدایی فلوم، ارتفاع فلوم ۱،۲ متر بود. دبی جریان در فلوم تا ۱۵۰ لیتر بر ثانیه بوده که با استفاده از دبی‌سنج التراسونیک اندازه‌گیری می‌گردید. جهت کاهش نوسانات جریان ورودی به فلوم، از یک مخزن ورودی در ابتدای فلوم با تراز کف ۱،۵ متر پایین‌تر از کف فلوم، دو ردیف شبکه عمودی توری فلزی در ورودی به فلوم و در ادامه یک عدد یونولیت بر روی سطح جریان در قسمت ورودی جریان به فلوم استفاده گردید. اندازه‌گیری عمق پایاب بعد از پرش پایین‌دست سرریز و عمق آب در ورودی بالادست روی سرریز با استفاده از دو عدد عمق‌سنج با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر انجام گردید. ارتفاع کلی سرریز استفاده شده ۸۷ سانتی‌متر و دارای ۸ پله، دارای شیب ۱:۲ که ارتفاع پله‌ها ۱۰،۹ سانتی‌متر و طول پله‌ها ۲۰،۹ سانتی‌متر بوده است.



شکل ۲- شماتیک سناریوهای تحقیق حاضر

مقایسه نتایج مانع متخلخل و پر در این محدوده نشان می‌دهد که در شرایط یکسان متغیرهای بررسی شده، مانع متخلخل سه بعدی پیوسته از مانع پر پیوسته استهلاک انرژی بیشتری در هر دو ارتفاع نسبی و فواصل نسبی مختلف داشته است (۲۹). برای مثال در دبی حداقل تحقیق حاضر استهلاک انرژی حالت شاهد  $83.26\%$  بوده که این مقدار برای مانع پیوسته پر با ارتفاع نسبی  $0.38$  در لبه  $85.9\%$  و برای مانع متخلخل سه بعدی پیوسته در لبه به  $90.29\%$  می‌رسد. همچنین در این رژیم بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که اثر استهلاکی مانع متخلخل با فاصله گرفتن از لبه و حرکت به سمت داخل پله، کاهش می‌یابد که این اثر با توجه به ماهیت متخلخل بودن مانع، در اثر کاهش برخورد موثر می‌باشد. افزایش ارتفاع نسبی مانع متخلخل سه بعدی پیوسته از  $0.19$  به  $0.38$  به طور متوسط افزایش استهلاک انرژی حدود  $1\%$  را ایجاد می‌کند.

در رژیم جریان انتقالی، در برخی از آرایش‌ها مانند  $(P, \frac{L_o}{L} = 0.19, \frac{h_o}{h} = 0.29)$ ،  $(P, \frac{L_o}{L} = 0.19, \frac{h_o}{h} = 0.29)$  و  $(P, \frac{L_o}{L} = 0.48, \frac{h_o}{h} = 0.19)$ ،  $(0.48, \frac{h_o}{h} = 0.38, S_{t4})$  اثر استهلاکی برای این مرز نسبت به حالت شاهد بیشتر بوده و در برخی از آزمایش‌ها نیز تنها در برخی از دبی‌ها، اثر مثبت بوده است. به طور کلی در اکثر دبی‌های این رژیم، اثر استهلاکی نسبت به شاهد افزایشی نبوده و نزدیک به حالت شاهد بوده است. در رژیم جریان رویه‌ای، در بیش‌تر موارد قرارگیری مانع متخلخل سه بعدی پیوسته نسبت به شاهد نه تنها اثر استهلاکی افزایشی نداشته است، بلکه کاهش نیز بوده است. فقط در سه آزمایش  $(P, \frac{L_o}{L} = 0.19, \frac{h_o}{h} = 0.29)$ ،  $(P, L_o/L = 0.48, h_o/h = 0.38, S_{t4})$ ،  $(0.48, \frac{h_o}{h} = 0.19)$

جهت بررسی هر سه رژیم جریان (رژیم ریزشی، انتقالی و رویه‌ای)، محدوده پارامتر دبی  $(\frac{d_c}{h})$  از  $0.37$  تا  $1.06$  و با  $8$  دبی بررسی گردید. جهت اختصار در بیان مشخصات هر آزمایش در ادامه نام‌گذاری مدل‌ها بدین صورت در نظر گرفته شده است که F.S معرف حالت شاهد بدون مانع، P معرف مانع متخلخل سه بعدی و CO معرف مانع پیوسته پر با مقطع مربعی می‌باشد. جهت مشخص شدن شماره پله شروع قرارگیری مانع نیز از حرف St استفاده شده است که عدد پس از آن بیان‌گر شماره پله ای است که شروع قرارگیری مانع از آنجا بوده است. از این‌رو آرایش مانع متخلخل سه بعدی پیوسته با ارتفاع مانع  $4$  سانتی‌متر و به فاصله  $8$  سانتی‌متر از لبه با شروع مانع‌گذاری از پله  $4$  به صورت  $(P, 4)$  نمایش داده می‌شود. تعداد  $136$  آزمایش در تحقیق حاضر و  $72$  آزمایش از سایر محققین (۲۹ و ۵) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

## نتایج

### استهلاک انرژی

استهلاک انرژی بر اساس اختلاف انرژی در بالادست و پایین‌دست سرریز و قبل از پرش بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردیده و نتایج در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به رژیم‌های شکل گرفته جریان شامل ریزشی، انتقالی و رویه‌ای، عملکرد استهلاکی آرایش‌ها متفاوت می‌باشد. در محدوده رژیم ریزشی قرارگیری مانع متخلخل سه بعدی پیوسته سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد برای تمامی فواصل نسبی و هر دو ارتفاع نسبی بررسی شده می‌گردد.

جدول ۱- میزان استهلاک انرژی

Model name/ (dc/h)	$\Delta E_r$							
	1.06	1.01	0.92	0.83	0.73	0.64	0.55	0.46
F.S	39.74	44.68	48.67	56.69	62.85	71.29	79.2	83.26
P, Lo/L=0, ho/h=0.19, St2	38.37	42.01	51.27	56.06	62.85	67.9	78.3	89.38
P, Lo/L=0, ho/h=0.38, St2	37.67	40.62	46.63	49.24	56.29	65.42	78.75	90.29
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.19, St2	36.97	43.36	49.98	58.53	65.75	72.33	80.47	86.55
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St2	33.33	39.92	40.05	52.09	60.35	70.75	80.06	86.86
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St3	32.58	37.03	41.57	54.77	62.85	71.29	79.63	86.23
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St4	32.58	42.01	45.93	53.45	60.35	69.64	81.65	87.72
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St5	34.81	42.69	46.63	52.09	61	70.75	78.3	86.86
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.19, St2	37.67	45.33	48	55.42	57.69	70.2	80.47	88.24
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St2	33.33	40.62	44.51	53.45	57.69	67.9	78.75	86.86
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St3	31.06	39.21	47.32	51.39	61	66.69	79.2	85.2
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St4	32.58	40.62	43.06	50.68	61	69.08	78.75	85.9
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St5	34.07	41.32	45.93	52.77	61.62	69.64	77.83	86.23
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.19, St2	41.75	46.61	51.9	55.42	62.85	71.81	78.3	87.72
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St2	36.97	40.62	47.32	51.39	61.62	68.5	79.2	88.24
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St3	36.26	42.69	46.63	52.09	58.37	65.42	77.35	87.15
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St4	39.74	45.97	50.63	57.32	64.04	67.9	78.75	87.72
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St5	39.06	45.97	49.33	54.77	61	67.3	77.83	85.9

Air Pocket مشخص گردید). حفره هوا در گوشه پله از مشخصه‌های جریان ریزشی و انتقالی می‌باشد و با توجه به محل قرارگیری مانع در کف پله، ابعاد حفره و تعداد پله‌های دارای حفره متفاوت می‌باشد. با افزایش دبی حفره برای حد بالای انتقالی حالت نوسانی پیدا می‌کند و در نهایت در حالت جریان رویه‌ای حفره از بین می‌رود. برای حالت مانع پیوسته پر در لبه، جریان پس از برخورد با مانع دچار تلاطم و نوسانات سطحی بیش‌تری نسبت به حالت شاهد می‌گردد. در حالی که برای مانع متخلخل پیوسته وجود تخلخل در مانع سبب شده است که بخشی از جریان از داخل مانع عبور کند که در این حالت در ادامه جت خروجی از مانع شکل می‌گیرد که با افزایش ارتفاع نسبی مانع متخلخل و افزایش دبی، اثر این جت‌های خروجی شدیدتر می‌شود و طول پرتابی خروجی جت‌ها افزایش می‌یابد. از این‌رو نوسانات سطحی نسبت به حالت مانع پیوسته پر کم‌تر می‌باشد. وضعیت جریان عبوری برای تحقیق حاضر در دو حالت اثر محل مانع متخلخل بر روی کف و اثر تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. در رژیم ریزشی و حد پایین انتقالی، با افزایش فاصله نسبی مانع متخلخل از لبه، مانع ایجاد شده کم‌تر جریان عبوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از این‌رو جریان عبوری به حالت شاهد نزدیک می‌شود. این اثر در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که مانع متخلخل در لبه نوسانات و تلاطم بیش‌تری در سطح نسبت به سایر فواصل نسبی در دبی یکسان داشته و همچنین جت خروجی از تخلخل‌ها دارای طول بیش‌تری می‌باشد.

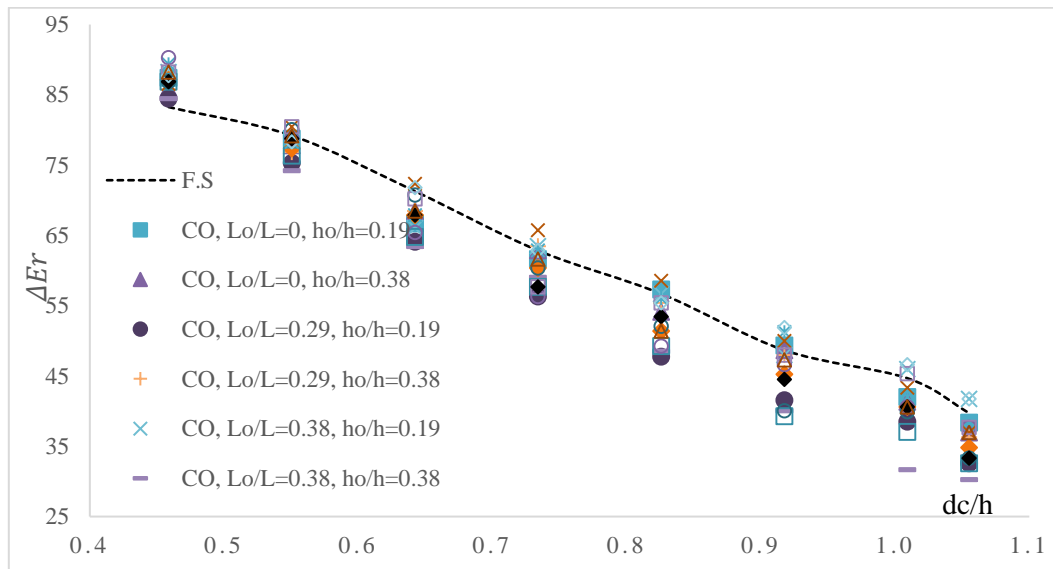
و ( $P, \frac{L_o}{L} = 0.48, \frac{h_o}{h} = 0.38, S_{E5}$ ) در رژیم جریان رویه‌ای اثر استهلاکی نسبت به حالت شاهد افزایشی بوده است.

همچنین در آزمایش‌های ( $P, \frac{L_o}{L} = 0, \frac{h_o}{h} = 0.19$ )، ( $P, \frac{L_o}{L} = 0.48, \frac{h_o}{h} = 0.19, S_{E5}$ ) نیز فقط در مرز پایین جریان رویه‌ای اثر استهلاکی انرژی مثبت بوده است و در مرزهای بالا، نسبت به شاهد کاهش یافت. از این‌رو با توجه به نتایج در رژیم جریان رویه‌ای می‌توان بیان داشت که اثر همزمان فاصله گرفتن از لبه پلکان و شروع قرارگیری مانع‌های متخلخل از پله‌های پایین‌تر در رژیم جریان رویه‌ای به‌طور کلی سبب افزایش استهلاک انرژی نمی‌گردد و فقط در برخی شرایط اثر مثبت دارد. با کاهش تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل در تمامی فاصله‌های نسبی برای ارتفاع نسبی ۰.۳۸، مشاهده می‌شود که این اثر (کاهش تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل)، به افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با حالت شاهد، منجر نمی‌گردد. نتایج رزم‌خواه و همکاران (۲۹) برای مانع پر پیوسته در محل‌های مختلف در کف پله نیز نشان داد که در رژیم انتقالی و رویه‌ای به‌طور کلی اثر استهلاکی نسبت به حالت شاهد کاهشی می‌باشد. از طرفی مقایسه نتایج تحقیق حاضر با شرایط مشابه با آزمایش‌های رزم‌خواه و همکاران (شکل ۳) نشان می‌دهد که مانع متخلخل پیوسته عملکرد استهلاکی بهتری نسبت به مانع پیوسته پر در شرایط یکسان دارد.

### وضعیت جریان‌های عبوری

در دبی پایین و برای محدوده ریزشی و حد پایین انتقالی، جریان پس از برخورد با کف پله حالت پرش پیدا می‌کند که این امر سبب می‌شود در گوشه پله حفره هوا شکل بگیرد (در شکل‌های ۴ و ۵ با نام





شکل ۳- مقایسه استهلاک انرژی مانع پر پیوسته (رزم خواه و همکاران، ۱۳۹۹) و متخلخل پیوسته (نتایج تحقیق حاضر) در هر سه رژیم جریان برای فواصل و ارتفاع نسبی مختلف با شروع مانع گذاری از پله ۲

نتایج شروع هواگیری طبیعی سرریز مشاهده می‌گردد که محل هواگیری طبیعی آرایش‌های دارای مانع متخلخل سه بعدی پیوسته در محل‌های مختلف در کف پله با ارتفاع نسبی متفاوت نسبت به حالت شاهد در بسیاری از آرایش‌های بررسی شده تغییر نکرده و در برخی از آرایش‌ها حالت نوسانی و حرکت به سمت پله پایین دست داشته است. این در حالی است که در شرایط مشابه دبی و محل و ارتفاع نسبی، مانع پر پیوسته (۲۹) محل هواگیری طبیعی سرریز نسبت به حالت شاهد یک پله به سمت پایین دست حرکت کرده است.

قرارگیری موانع پیوسته و غیرپیوسته با شکل‌های مختلف و در محل‌های مختلف بر روی کف پله در سرریز پلکانی با ایجاد تغییر در جریان سطحی عبوری، سبب تغییر در مرزهای جریان می‌شوند (۱۹، ۴۵، ۲۰). در این حالت آرایش‌های جدید موجب می‌گردند که روابط قبلی ارائه شده در تعیین محدوده مرزها دارای دقت مناسب نباشند و از این رو در شرایط اشاره شده قابل استفاده نمی‌باشند. در تحقیق حاضر قرارگیری مانع متخلخل پیوسته در محل‌های مختلف در کف پله نیز سبب جابجایی شروع مرزهای جریان نسبت به حالت شاهد می‌گردد که در جدول ۲ نتایج حاصل از مشاهدات بصری ثبت شده در زمان انجام آزمایش‌ها آورده شده است. در این جدول حالت ریزشی با NAP، حالت انتقالی با TRA و حالت رویه‌ای با SKI نشان داده شده است.

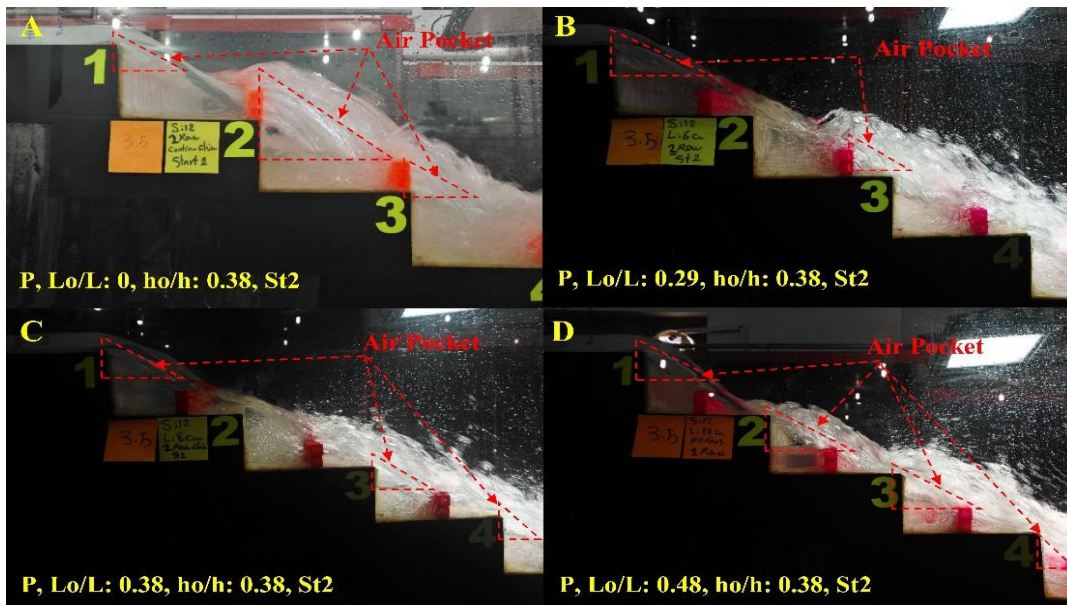
در ادامه برای اثر تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل مشاهده می‌شود که با توجه به فاصله نسبی مانع، شروع مرزها متفاوت می‌باشد. بدین صورت که برای فواصل نسبی ۰٫۲۹ و ۰٫۳۸، مرزهای جریان برای آرایش‌های شروع از پله ۲ تا پله ۴ مشابه می‌باشد و برای آرایش شروع از پله ۵ جریان نسبت به حالت شاهد در دبی پایین تر به حالت انتقالی تبدیل می‌شود ولی برای مرز جریان رویه‌ای مشابه با شاهد می‌باشد

در این شرایط ارتفاع نسبی ۰٫۳۸ در برخی از فواصل نسبی توانسته تا جریان را تحت تأثیر قرار دهد ولی ارتفاع نسبی ۰٫۱۹ تأثیری در وضعیت جریان عبوری خصوصاً در فواصل نسبی ۰٫۳۸ و ۰٫۴۸ نداشته است. با افزایش دبی و رسیدن به حد بالای انتقالی و رویه‌ای، حفره هوا از بین می‌رود و از این رو جت خروجی نیز قابل مشاهده نمی‌باشد ولی اثر آن برقرار می‌باشد. در دبی حداکثر، جریان سطحی برای تمامی فواصل نسبی تقریباً مشابه می‌باشد و فقط در حالت مانع متخلخل در لبه قدری ارتفاع آب نسبت به حالت شاهد و سایر فواصل نسبی بالاتر می‌باشد. با کاهش تعداد پله‌های دارای مانع (شروع قرارگیری موانع از پله‌های پایین تر)، برای جریان ریزشی و حد پایین انتقالی برای پله‌های بدون مانع متخلخل جریان عبوری مشابه با حالت شاهد می‌باشد که این اثر در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش دبی و تغییر شرایط جریان به حالت رویه‌ای، در پله بالایی دارای مانع متخلخل اثر تغییر زاویه سطح آب مشاهده می‌شود که این اثر با انتقال پله دارای مانع به سمت پایین دست و برای فاصله نسبی کم تر نسبت به حالت شاهد مشهودتر می‌باشد.

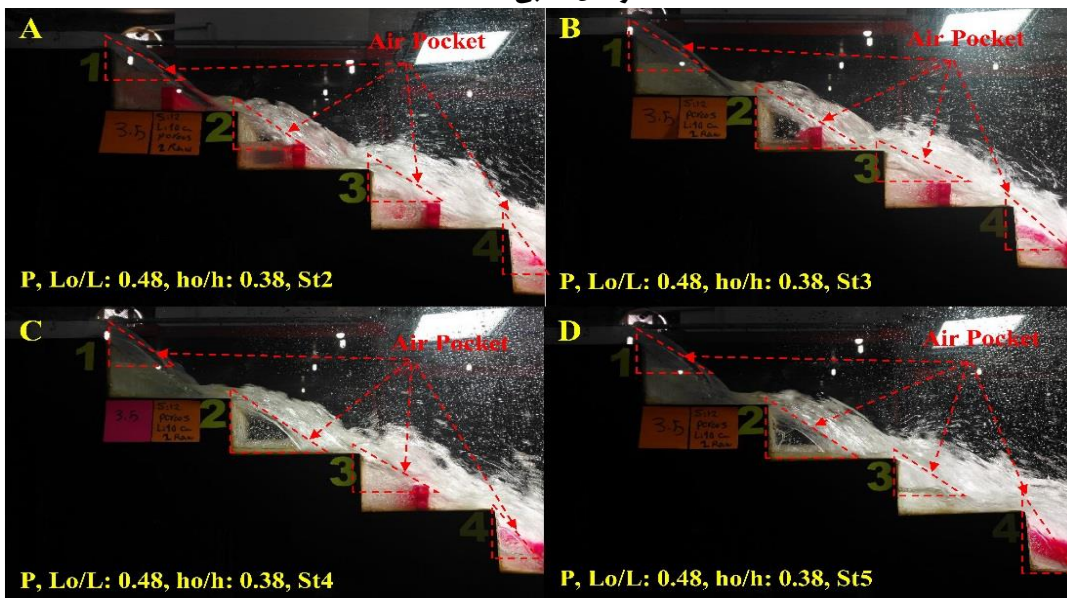
### هواگیری طبیعی و شروع مرزهای جریان

در سرریزهای پلکانی در رژیم جریان رویه‌ای پس از آن که جریان توسعه یافته شد، هوای سطح وارد جریان می‌شود که این محل را شروع هواگیری طبیعی سرریز (Inception Point of Free Aeration: IP) می‌نامند (شکل ۶).

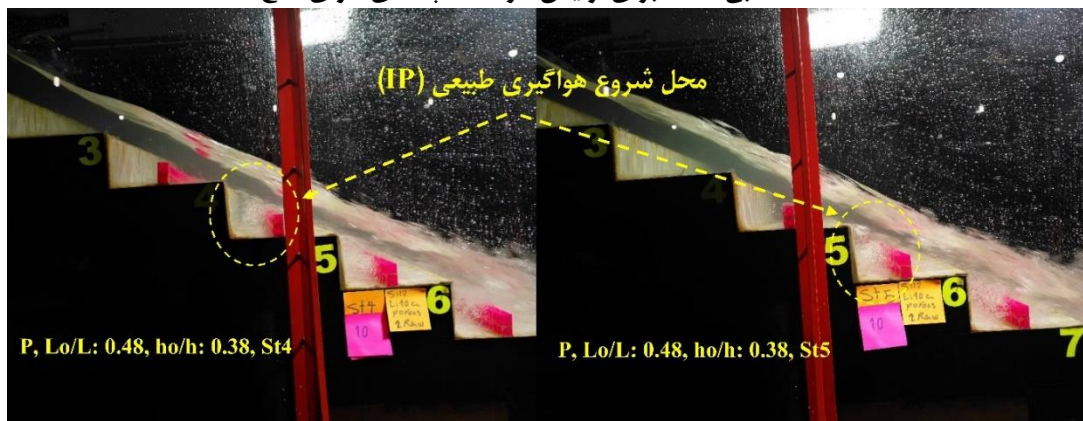
هر چقدر محل شروع هواگیری طبیعی سرریز در فاصله کوتاه‌تری از ورودی سرریز رخ دهد، خطر کاویتاسیون کاهش می‌یابد. نتایج شروع محل هواگیری طبیعی (IP) برای دبی حداکثر ( $\frac{d_c}{h} = 1.06$ ) در جدول ۲ آورده شده است. عدد نوشته شده در ستون مورد نظر شماره پله شروع هواگیری طبیعی می‌باشد. در برخی از آزمایش‌ها مشاهده گردید که محل هواگیری در پله نوسان داشته و ثابت نمی‌باشد و از این رو برای این حالت حرف O در جدول آورده شده است. به‌طور کلی با توجه به



شکل ۴- وضعیت جریان عبوری و حفره‌های هوا و جت خروجی از مانع متخلخل برای ارتفاع نسبی ۰٫۳۸ و فواصل نسبی مختلف



شکل ۵- وضعیت جریان عبوری و حفره‌های هوا و جت خروجی از مانع متخلخل برای ارتفاع نسبی ۰٫۳۸ و فاصله نسبی ۰٫۴۸ برای آرایش اثر تعداد پله‌های دارای مانع



شکل ۶- محل شروع هواگیری طبیعی (IP) برای دو آرایش P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St4&5 در دبی حداکثر

محدوده انتقالی بیش‌تری نسبت به مانع پر پیوسته دارد. این اثر می‌تواند ناشی از امکان خروج جریان از درون تخلخل‌ها باشد که با عبور جریان از جهت‌های مختلف حالت تلاطمی را افزایش می‌دهد در حالی که برای مانع پر پیوسته این امکان وجود ندارد.

این در حالی است که برای فاصله نسبی ۰,۴۸ برای شروع از پله‌های مختلف، مرز انتقالی نسبت به شاهد در دبی بالاتری به حالت روبه‌ای تبدیل می‌شود و تمایل جریان به گسترش مرز جریان در حد بالای انتقالی می‌باشد. در مقایسه با آرایش‌های مشابه مانع متخلخل سه بعدی پیوسته با مانع پر پیوسته (۲۹) مشاهده می‌شود که آرایش مانع متخلخل

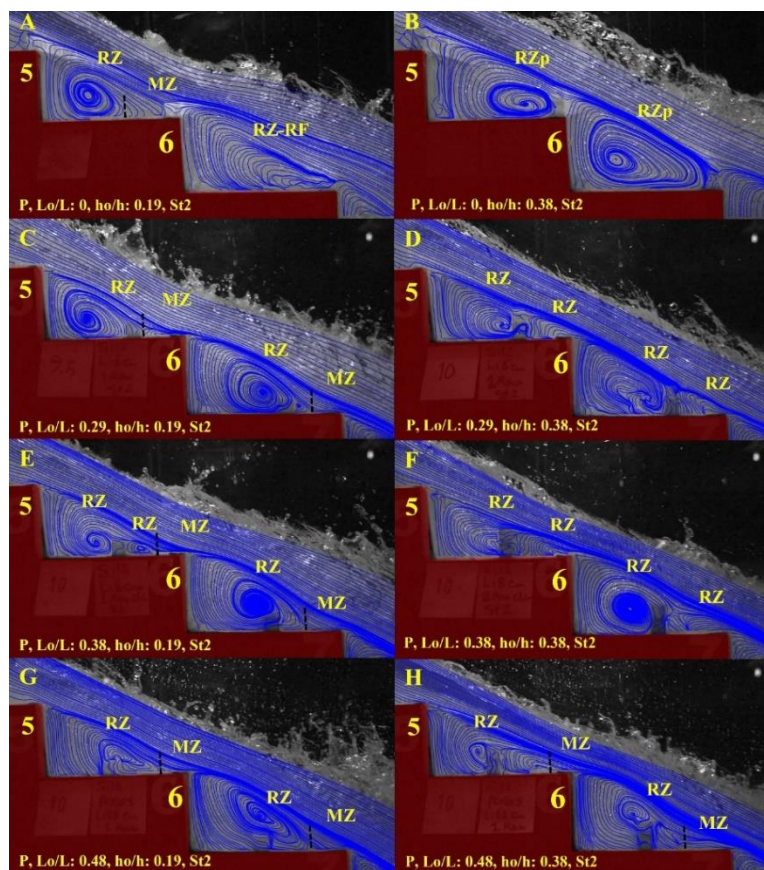
جدول ۲- نتایج شروع مرزهای جریان آزمایش‌ها و محل هواگیری طبیعی در دبی حداکثر

Model name/ (dc/h)	IP	dc/h							
		1.06	1.01	0.92	0.83	0.73	0.64	0.55	0.46
F.S	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0, ho/h=0.19, St2	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0, ho/h=0.38, St2	5	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.19, St2	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St2	50	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St3	50	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St4	6	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St5	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.19, St2	5	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St2	50	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St3	6	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St4	6	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St5	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.19, St2	5	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St2	5	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	TRA	NAP
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St3	5	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St4	5	SKI	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	NAP	NAP
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St5	6	SKI	SKI	SKI	TRA	TRA	TRA	NAP	NAP

که در حالت قرارگیری مانع و با افزایش ارتفاع نسبی مانع، ناحیه استخری (Recirculation Pooled: Rzp) نیز شکل می‌گیرد. همچنین نتایج نشان داد که ابعاد ناحیه‌های شکل گرفته در دو پله متوالی با یکدیگر متفاوت می‌باشند و برای شیب‌های مختلف نیز ابعاد متفاوت می‌باشد (۵). از طرفی برای آرایش مانع متخلخل با ارتفاع نسبی ۰,۱۹ نیز در پله ۷ حالت ترکیبی بین اختلاط و چرخش شکل گرفته است که این حالت توسط اصغری پری و کردنائیج (۵) گزارش شده است و در دسته ناحیه چرخشی قرار می‌گیرد و فقط ناحیه اطراف مانع به اندازه عرض مانع برای ناحیه اختلاط در نظر گرفته شده است. اثر کاهش سرعت و انحراف جریان در برخورد و عبور از داخل مانع متخلخل و اثر آن بر جت خروجی از درون مانع متخلخل، در کناره به‌حالت انحنا قابل رویت می‌باشد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که ابعاد نواحی شکل گرفته تحت تأثیر ارتفاع نسبی و محل نسبی مانع متخلخل تغییر می‌کند. بدین‌صورت که با افزایش ارتفاع نسبی مانع در لبه پله، حالت استخری (Rzp) شکل می‌گیرد. در همین شرایط ارتفاع نسبی (ارتفاع نسبی ۰,۳۸) با حرکت مانع به‌سمت گوشه داخلی پله اثر حالت استخری از بین می‌رود و ابعاد ناحیه اختلاط حالت افزایشی پیدا می‌کند. از طرفی مقایسه نواحی شکل گرفته برای مانع متخلخل پیوسته با مانع پیوسته پر (۲۹) نشان می‌دهد که در هر

### تحلیل نواحی شکل گرفته بر اساس پردازش تصویر

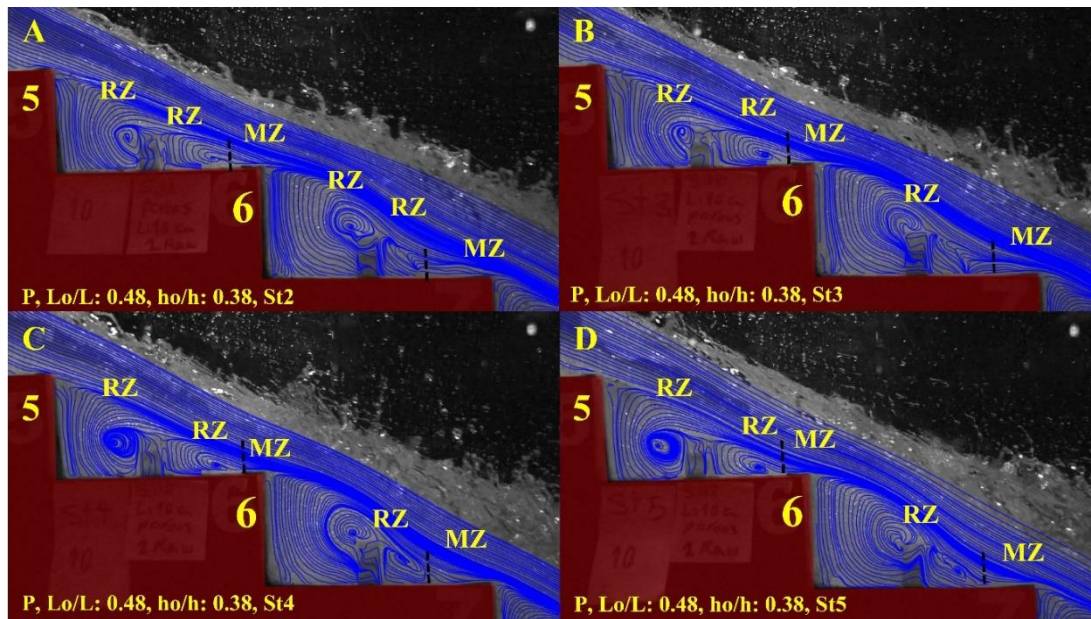
برای تصویر نهایی آزمایش‌ها که برآیند رهگیری ۸ ثانیه حرکت حباب با ۲۴۰ تصویر بر ثانیه می‌باشد، نواحی شکل گرفته برای هر یک از دو پله اندازه‌گیری و به‌صورت جداگانه تفکیک گردید و در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به تعداد بالای آزمایش‌ها تصاویر BIV برای دو حالت آورده شده است. در شکل ۷ فاصله نسبی و ارتفاع نسبی موانع متخلخل سه بعدی پیوسته و در شکل ۸ اثر محل شروع مانع متخلخل سه بعدی پیوسته برای طول نسبی ۰,۴۸ آورده شده است. در تکنیک‌های پردازش تصویر، تصویربرداری از یک صفحه دو بعدی مشخص انجام می‌گیرد. با فاصله گرفتن صفحه اندازه‌گیری از دیواره فلوم، میزان ذرات عبوری در بین دوربین و صفحه مورد نظر افزایش می‌یابد. این اثر برای تکنیک‌هایی که ذره به‌داخل سیستم تزریق می‌کنند با تزریق در عمق یا سطح مورد نظر تا حدودی کاهش می‌یابد، ولی در پدیده‌هایی که حباب هوا در جریان وجود دارد، اندازه‌گیری فقط محدود به سطح و دیواره فلوم می‌گردد. از طرفی با توجه به پیوسته بودن مانع در عرض فلوم و نتایج (۲۱) انتظار می‌رود که مقایسه ابعادی نواحی شکل گرفته در کناره فلوم برای سایر بخش‌های عرضی فلوم نیز معتبر باشد. در حالت شاهد به‌طور کلی نواحی اختلاط (Mixing Zone: Mz) و چرخشی (Recirculation Zone: Rz) بر روی پله‌ها شکل می‌گیرند



شکل ۷- محل شروع هواگیری طبیعی (IP) برای دو آرایش 5 و 4 St،  $ho/h=0.38$ ،  $Lo/L=0.48$ ،  $P$  در دبی حداکثر

جدول ۳- مقادیر ناحیه‌های شکل گرفته بر روی دو پله متوالی در رژیم جریان روبه‌ای برای تمامی آزمایش‌ها

Model name	Sum		Step 7		Step 6		$\Delta Er$
	Mz (cm)	Rz (cm)	Mz (cm)	Rz (cm)	Mz (cm)	Rz (cm)	
F.S	39.74	9.9	31.9	4.1	16.8	5.8	15.1
P, Lo/L=0, ho/h=0.19, St2	38.37	8.6	33.2	0	20.8	8.6	12.3
P, Lo/L=0, ho/h=0.38, St2	37.67	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.19, St2	36.97	9.8	32	3.7	17.2	6.1	14.8
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St2	33.33	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St3	32.58	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St4	32.58	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.29, ho/h=0.38, St5	34.81	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.19, St2	37.67	9	32.8	4.6	16.3	4.4	16.5
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St2	33.33	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St3	31.06	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St4	32.58	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.38, ho/h=0.38, St5	34.07	0	41.8	0	20.9	0	20.9
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.19, St2	41.75	10.3	31.5	5.1	15.8	5.2	14.9
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St2	36.97	7.8	34	3	17.9	4.8	16.1
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St3	36.26	6.4	35.4	3.9	17	2.5	18.4
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St4	39.74	9.8	32	5.8	15.1	4	16.9
P, Lo/L=0.48, ho/h=0.38, St5	39.06	9.9	31.9	5.4	15.5	4.5	16.4



شکل ۸- نواحی شکل گرفته دو پله متوالی جریان رویه‌ای برای فاصله نسبی ۰,۴۸ و ارتفاع نسبی ۰,۳۸ با شروع مانع از پله‌های مختلف

دارای مانع نیز بررسی گردید. ابزار اندازه‌گیری در تحقیق حاضر شامل مشاهده‌های حین آزمایش، عمق‌سنج در بالادست و پایین‌دست سرریز و دوربین فیلم‌برداری جهت استفاده از تکنیک پردازش تصویر بوده است. از این رو نتایج زیر در محدوده پارامترهای تحقیق حاضر معتبر می‌باشند و برای سایر شرایط هیدرولیکی و سازه‌ای نیازمند تحقیق و مطالعه بیشتر می‌باشد.

- کاهش تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل پیوسته و جابجایی مانع از لبه یک پله به سمت میانه آن پله سبب می‌شود که جریان تحت تأثیر هندسه ایجاد شده دارای انحنا و در نتیجه تلاطم بیشتر نسبت به سایر آرایش‌ها گردد که این اثر برای رژیم انتقالی بیش‌تر بوده است.

- در مانع متخلخل سه بعدی پیوسته با توجه به ارتفاع نسبی، محل قرارگیری مانع بر روی پله و تعداد پله‌های دارای مانع، مرزهای شروع رژیم‌های مختلف جریان، نسبت به حالت شاهد تغییر می‌کند. با جابجایی مانع به سمت گوشه داخلی سرریز (افزایش فاصله نسبی) و کاهش تعداد پله‌های دارای مانع متخلخل، تمایل جریان به گسترش مرز انتقالی در بالادست (مرز بین انتقالی و رویه‌ای) افزایش می‌یابد.

- محل هواگیری طبیعی سرریز پلکانی با مانع متخلخل پیوسته سه بعدی در فاصله نسبی و ارتفاع نسبی بررسی شده در اکثر موارد مشابه با حالت شاهد می‌باشد و تنها در برخی از آرایش‌ها حالت نوسانی پیدا کرده و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند.

- در رژیم جریان ریزشی قرارگیری مانع متخلخل سه بعدی برای متغیرهای تحقیق حاضر به‌طور متوسط تا ۵٪ سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد می‌گردد. برای رژیم‌های جریان انتقالی و رویه‌ای در اغلب موارد قرارگیری مانع متخلخل پیوسته اثر استهلاکی مثبت ندارد. با توجه به نتایج، آرایش فاصله نسبی ۰,۴۸ با شروع از

در آرایش در ارتفاع نسبی ۰,۱۹ برای هر سه فاصله نسبی ۰,۳۸، ۰,۴۸ و ۰,۴۸، محل شکل‌گیری ناحیه چرخشی در پله ۶ در محدوده قبل از مانع و چسبیده به آن می‌باشد و برای پله ۷ در این ارتفاع نسبی ناحیه چرخشی از روی مانع عبور می‌کند. برای ارتفاع نسبی ۰,۳۸ در هر دو پله ناحیه چرخشی در محدوده قبل از مانع محصور می‌باشد ولی برای فاصله نسبی ۰,۴۸ ناحیه چرخشی از پله ۷ عبور می‌کند. ماهیت تخلخلی بودن مانع‌های استفاده شده در این تحقیق و کاهش تعداد پله‌های دارای مانع سبب شده است تا در سطح جریان در محل شروع مانع یک انحنای اولیه به‌وجود بیاید که این اثر برای آرایش‌های شروع از پله‌های ۴ و ۵ مشهود می‌گردد. برای آرایش‌های دارای تعداد مانع کم‌تر، در دبی‌های پایین با حرکت مانع به سمت گوشه داخلی پلکان، در اثر برخورد جریان با مانع‌ها در پله‌های ابتدایی تغییری در سطح جریان عبوری نسبت به آرایش دارای مانع‌های بیش‌تر ایجاد نمی‌کند ولی در دبی‌های بالاتر اثر مانع بر روی پله سبب ایجاد تغییر زاویه جریان در سطح و در محل شروع مانع می‌شود. در آرایش مانع پر پیوسته (۲۹) بهترین آرایش در محدوده بررسی شده آرایش (CO,  $Lo/L=0.38, ho/h=0.19$ ) بوده است که حالت بهینه برای آرایش مانع متخلخل سه بعدی پیوسته ( $P, Lo/L=0.48, ho/h=0.19$ ) می‌باشد. آرایش مانع متخلخل سه بعدی پیوسته میزان استهلاک بیش‌تری نسبت به مانع پر پیوسته داشته است که این اثر می‌تواند ناشی از عملکرد حالت تخلخلی باشد.

### بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر مانع متخلخل پیوسته سه بعدی در فاصله‌های مختلف بر روی کف پله با دو ارتفاع نسبی بر روی سرریز پلکانی در شیب ۱:۲ پرداخته شده است. همچنین اثر تعداد پله‌های

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: سید امین اصغری‌پری، آذین رزمخواه، مجتبی کردنائیج؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: سید علی اصغری‌پری، سید امین اصغری‌پری، آذین رزمخواه؛ نظارت و نگارش نهایی: سید امین اصغری‌پری، مجتبی کردنائیج.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### References

1. Akhgar, S., Roushangar, K. 2020. 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), 2043-2058. [In Persian].
2. Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. 2006. Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV
3. ANDRÉ, S. 2004. High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements. Ph.D. thesis, Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), EPFL, Lausanne, Switzerland, 272 pages.
4. 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].
5. Asghari Pari, S. A, Kordnaeij, M. 2021. 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.
6. Bung, D. B., & Valero, D. 2015, June. Image processing for bubble image velocimetry in self-aerated flows. In 36th IAHR World Congress (pp. 6594-6601).
7. Bung, D. B., & Valero, D. 2016. Optical flow estimation in aerated flows. *Journal of Hydraulic Research*, 54(5), 575-580.
8. Bung, D.B. and 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 1 st European IAHR Congress, Edinburgh, Flash-drive.*
9. 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.
10. Felder, S and Chanson, H. 2014. Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.140, No. 4, Paper 04014002, 11 pages.*
11. Felder, S, Ph. Guenther, and Chanson, H 2012. Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: A physical study of several pooled stepped configurations, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia. Report CH12/87.
12. Ghaderi, A., and Abbasi, S. 2021. Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendance

- Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Water*, 13(7), 957.
13. Ghaderi, A., Abbasi, S., and Di Francesco, S. 2021. Numerical Study on the Hydraulic Properties of Flow over Different Pooled Stepped Spillways. *Water*, 13(5), 710.
  14. Gonzalez, C. A., and Chanson, H. 2008. Turbulence and cavity recirculation in air-water skimming flows. *Journal of Hydraulic Research* 46.1 (2008): 65-72.
  15. Guenher, P., Felder, S., and Chanson, H. 2013. Flow Aeration, Cavity Processes and Energy Dissipation on Flat and Pooled Stepped Spillways for Embankments." *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 5, pp. 503-525 (DOI: 10.1007/s10652-013-9277-4).
  16. Habibi, K, Asghari Pari, S. A, and 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].
  17. KÖKPINAR, M.A. 2004. Flow over a Stepped Chute with and without Macro-Roughness Elements. *Can. JI of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 880-891.
  18. 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].
  19. Kordnaej, M, Asgharipari SA, Sajadi MS, and Shafaei Bajestan M. 2020. Laboratory investigation of the effect of thickness and two porous obstacles with a spacing in the Control the Turbidity Current. *Water Resources Engineering*, 13(44), 1-16. [In Persian].
  20. Kordnaej, M, Asgharipari SA, Sajadi MS, and Shafaei Bajestan M. 2017. Laboratory comparison of the effect of porous obstacle and porous stepped obstacle in the control of density current. *J Mar Sci Technol*. 2017;16(4):86-96. [In Persian].
  21. Leandro, J., Bung, D. B., and Carvalho, R. 2014. Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods. *Experiments in Fluids*, 55(5), 1732
  22. Li, S., Li, Q., and Yang, J. 2019. CFD Modelling of a Stepped Spillway with Various Step Layouts. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.
  23. Li, S., Yang, J., and Li, Q. 2020. Numerical Modelling of Air-Water Flows over a Stepped Spillway with Chamfers and Cavity Blockages. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 99-109.
  24. Lopes, P., Bung, D. B., Leandro, J., and Carvalho, R. F. 2015. The effect of cross-waves in physical stepped spillway models. In 36th IAHR world congress, The Hague.
  25. Lopes, P., Leandro, J., Carvalho, R. F., and Bung, D. B. 2017. Alternating skimming flow over a stepped spillway. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(2), 303-322.
  26. Novakoski, C. K., Ferla, R., Prá, M. D., Canellas, A. V. B., Marques, M. G., and Teixeira, E. D. 2020. Stepped spillway with pre-aeration by a deflector: flow characteristics. *RBRH*, 25.
  27. Ostad Mirza, M. J. 2016. Experimental study on the influence of abrupt slope changes on flow characteristics over stepped spillways (No. THESIS). EPFL.
  28. Raza, A., Wan, W., and Mehmood, K. (2021). Stepped Spillway Slope Effect on Air Entrainment and Inception Point Location. *Water*, 13(10), 1428. <https://doi.org/10.3390/w13101428>.
  29. Razmkhah, A, Asghari Pari, S. A, and 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].
  30. 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), 185-200. [In Persian].
31. Thielicke, W., & Stamhuis, E. 2014. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1).
  32. THORWARTH, J. 2008. *Hydraulisches Verhalten der Treppengerinne mit eingetieften Stufen -Selbstinduzierte Abflussinstationaritäten und Energiedissipation. (Hydraulics of Pooled Stepped Spillways - Self-induced Unsteady Flow and Energy Dissipation.)* Ph.D. thesis, University of Aachen, Germany (in German).
  33. THORWARTH, J. and KÖNGETER, J. (2006). "Physical Model Test on a Stepped Chute with Pooled Steps - Investigation of Flow Resistance and Flow Instabilities. In: *Recent Developments on Hydraulic Structures: From Hybrid Modelling to Operation and Repairs; Ciudad Guayana, Venezuela, October 2006. International symposium on Hydraulic Structures/Ed. by Arturo MARCANO et al., Caracas, Venezuela: Venezuelan Society of Hydraulic Engineering*, pp. 477 - 486 (ISBN 980-12-2177-1).
  34. 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.
  35. Zare, H. K., & Doering, J. C. 2012. Energy dissipation and flow characteristics of baffles and sills on stepped spillways. *Journal of hydraulic research*, 50(2), 192-199.
  36. 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. 55: 1732.