



## The Effects of Modifying the Geometric Shapes of steps in Stepped Spillway on Hydraulic Parameters and Energy Dissipation

Amir Ghaderi<sup>✉1</sup>, Saeed Abbasi<sup>2</sup>

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Email: [amir\\_ghaderi@znu.ac.ir](mailto:amir_ghaderi@znu.ac.ir)

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email:

[abbasi.saeed@znu.ac.ir](mailto:abbasi.saeed@znu.ac.ir)

---

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** May. 1, 2022

**Received:** May. 29, 2022

**Accepted:** May. 30, 2022

**Published online:** July. 23, 2022

**Keywords:**

Modified stepped spillway,  
Step elements,  
Energy dissipation,  
Hydraulic jump characteristics,  
Siah-Bisheh stepped spillway.

### ABSTRACT

Stepped spillways are a common structure for energy dissipation since they create turbulence and frictional resistance to flow through the steps, which increases energy dissipation along the structure. In this study, by performing a series of tests, the effect of modifying the shape of steps by simultaneously applying elements on the steps and their edge on the flow pattern, inception point on the spillway, hydraulic jump characteristics in the downstream, and energy dissipation were investigated. The pool edge elements were of two types (height and notch), and the elements placed on the steps were different arrangements. Their results were compared to the flat stepped spillway. Finally, by applying these elements on an operational spillway, the effect of step modifications on the flow characteristic was evaluated. The results showed that the simultaneous application of elements on the steps and the edge caused some turbulence and instabilities on the flow surface with fluctuations and had little effect on the flow regime. Turbulence flow due to colliding with elements affects the inception point, causing it to be transferred upstream of the stepped spillway. Step modification reduces the sequent depth and jump length by 26.29 and 34.24%, respectively, and increases the energy dissipation rate by 14.38%. The effect of additional elements on the performance of the stepped spillway is high at low discharges. Modification of Siah-Bisheh stepped spillway by applying elements on the steps reduces the flow velocity by 9.8% downstream of the spillway, increases turbulent kinetic energy (TKE) by 63%, and enhances the energy dissipation rate by 11.32%.

---

Cite this article: Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2022). The Effects of Modifying the Geometric Shapes of Steps in Stepped Spillway on Hydraulic Parameters and Energy Dissipation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1035-1055.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342428.669257>



## تأثیر اصلاح فرم هندسی پله‌های سرریز پلکانی بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی جریان

امیر قادری<sup>۱</sup> و سعید عباسی<sup>۲</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ایمیل: [amir\\_ghaderi@znu.ac.ir](mailto:amir_ghaderi@znu.ac.ir)۲. گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ایمیل: [abbasi.saeed@znu.ac.ir](mailto:abbasi.saeed@znu.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های متداول به‌منظور استهلاک انرژی بوده که از طریق پله‌ها با ایجاد آشفتگی و مقاومت اصطکاکی بیشتر در برابر جریان، استهلاک انرژی در طول سازه را افزایش می‌دهد. در این تحقیق، با انجام یکسری آزمایشات، تأثیر اصلاح فرم پله‌ها با اعمال همزمان المان‌هایی بر روی پله و لبه آن بر روی الگوی جریان، نقطه شروع هوادهی بر روی سرریز، مشخصات پرش هیدرولیکی در پایین دست و میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از مدل‌های سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. المان‌های لبه بصورت ممتد و برش خورده و المان‌های روی پله در آرایش‌های مختلف روی پله قرار گرفتند و نتایج با حالت سرریز پلکانی ساده مقایسه شدند. در نهایت با اعمال این المان‌ها بر روی یکی از سرریزهای مورد بهره‌برداری شده، تأثیر اصلاح پله‌ها بر مشخصه جریان ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که بکارگیری همزمان المان‌های روی پله و لبه باعث برخی تلاطم و نوسانات بر روی سطح جریان شده اما بر روی رژیم جریان تأثیر چندانی ندارد. اختلاط جریان پس از برخورد با موانع بر روی نقطه شروع هوادهی تأثیر می‌گذارد و باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود. اصلاح پله‌ها باعث کاهش عمق ثانویه و طول پرش به ترتیب ۲۶/۲۹ و ۳۴/۲۴ درصد و افزایش ۱۴/۳۸ درصدی در میزان اصلاح انرژی جریان می‌گردد. تأثیر المان‌های الحاقی در عملکرد مدل‌های اصلاحی در دبی‌های پایین بیشتر است. اصلاح پله‌های سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا با الحاق المان‌ها بر روی پله و لبه آن باعث کاهش ۹/۸ درصدی سرعت جریان در پایین دست سرریز، افزایش ۶۳ درصدی انرژی آشفته و افزایش ۱۱/۳۲ درصدی در میزان استهلاک انرژی جریان می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۵/۱

## واژه‌های کلیدی:

سرریز پلکانی اصلاح شده،  
المان‌های روی پله،  
استهلاک انرژی،  
مشخصات پرش،  
سرریز سیاه‌بیشه

استناد: قادری، امیر؛ و عباسی، سعید (۱۴۰۱). تأثیر اصلاح فرم هندسی پله‌های سرریز پلکانی بر پارامترهای هیدرولیکی و استهلاک انرژی جریان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۵)، ۱۰۵۵-۱۰۳۵.DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342428.669257>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

به منظور عبور ایمن جریان سیلابی از بالادست به پایین دست سدها از سازه سرریز استفاده می‌شود. یکی از اهداف طراحی و احداث سرریزهای پلکانی افزایش استهلاک انرژی جریان در طول سرریز در اثر انتقال آن به پایین دست و کاهش ابعاد سازه‌های مستهلک‌کننده پایین دست سرریز است. پله‌ها بر روی سرریز پلکانی، نقش مهمی در بهبود عملکرد و افزایش استهلاک انرژی جریان از طریق ایجاد زبری بر روی شوت ایفا می‌کنند. تلاش‌های زیادی توسط (Rajaratnam (1990), Rice and Kadavy (1996), Chanson and Toombes (2001) و (Gonzalez and Chanson (2004) برای افزایش کارایی این سرریزها از طریق کاهش سرعت جریان در انتقال به پایین دست سد و افزایش بازده استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی شده است (Ghaderi and Abbasi, 2020). تحقیقات متعدد دیگری به صورت آزمایشگاهی توسط محققینی چون (Hamedi et al. (2011), Felder et al. (2012), Felder and Chanson (2014), Nohani et al. (2015) و (Daneshfaraz et al. (2021a) به ترتیب تأثیر شیب معکوس، تأثیر هندسه‌ی پله‌های سرریز، تأثیر ایجاد لبه در انتهای پله‌های سرریز و اثر زبری در سطح پله‌های سرریز پلکانی را در جهت افزایش میزان استهلاک انرژی انجام دادند. همچنین Heydari Orojlo et al. (2010), al. (2014), Jam et al. (2014), Mero and Mitchell (2017), Felder et al. (2019), Sohrahi et al. (2020) و Ghaderi et al. (2021) به ترتیب تأثیر شیب بر تعداد پله‌های سرریز پلکانی، استهلاک انرژی روی سرریز دندانه‌دار بلوکی، تأثیر اثر مقیاس، تأثیر تغییر هندسه پله‌ها، موقعیت نقطه شروع هوادهی در سرریزهای استخری و ویژگی‌های جریان دوفازی آب و هوا در رژیم جریان ریزشی را مورد ارزیابی قرار دادند.

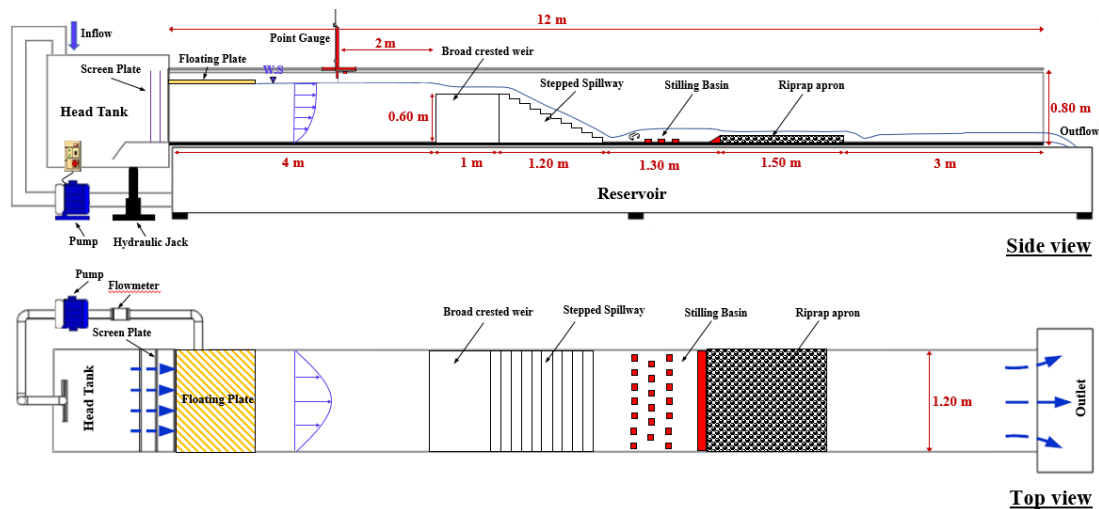
Ghaderi et al. (2020) تأثیر ایجاد شکل کنگره‌ای پله‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی را با کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی کردند. ایشان مشاهده کردند که اصلاح شکل هندسی پله‌ها باعث بهبود عملکرد سرریز پلکانی در افزایش میزان استهلاک انرژی جریان شده و سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای انرژی باقی‌مانده کم‌تری نسبت به سرریزهای پلکانی ساده دارند. Akhgar and Roushangar (2020) تأثیر المان‌های گوه‌ای شکل را بر ضریب زبری و استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که افزودن المان‌های گوه‌ای روی پله ضریب زبری را افزایش داده و موجب افزایش استهلاک انرژی جریان می‌گردد. (Torkaman Sarabi et al. (2020) اثر اندازه مصالح سنگی بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریزهای پلکانی گابیونی را مورد بررسی قرار دادند. آنان مشاهده کردند که در بین ذرات ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر، سرریز گابیونی با دانه‌بندی قطر ۴ سانتی‌متر میزان اتلاف انرژی بیش‌تری نسبت به سایر دانه‌بندی دارد. (Sarkamaryan et al. (2020) با استفاده از نرم‌افزار انسیس میزان استهلاک انرژی تحت تأثیر پارامترهای هندسی پله‌ها شامل تعداد پله‌ها و شیب شوت و دبی عبوری جریان از روی سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش تعداد پله‌ها و شیب شوت سرریز، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. هم‌چنین به ازای ثابت بودن شیب شوت، با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. (Roushangar and Akhgar (2019) مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر ایجاد حفره بر روی پله‌های سرریز پلکانی بر میزان استهلاک انرژی جریان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد، ایجاد حفره روی پله موجب کاهش سرعت تا حدود ۸۲ درصد و کاهش ارتفاع آب در پایین دست سرریز تا حدود ۳۳ درصد می‌گردد و میزان استهلاک انرژی روی سرریز پلکانی تا حدود ۴ برابر افزایش می‌یابد. (Ghaderi and Abbasi (2021b) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی تأثیر الحاق المان‌های روی پله‌های سرریز پلکانی بر روی میزان استهلاک انرژی جریان و نقطه شروع هوادهی پرداختند. نتایج آنان نشان داد که وجود المان‌ها بر روی پله‌ها و در آرایش‌های مختلف، باعث افزایش زبری و افزایش تلاطم و نوسانات سطح جریان عبوری از روی پله‌ها شده و در نتیجه میزان استهلاک انرژی به‌طور متوسط ۷/۲ درصد افزایش می‌یابد. وجود المان‌ها بر روی پله‌ها باعث انتقال محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود.

در یک جمع‌بندی و طبق کارهایی که انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل مهم و مؤثر در بهبود عملکرد هیدرولیکی سرریزهای پلکانی در استهلاک انرژی و سایر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان، ایجاد تغییرات در فرم هندسی و ابعاد پله‌های سرریز پلکانی می‌باشد. هدف از این تحقیق، تأثیر افزودن المان‌هایی بر روی پله و لبه پله‌های سرریز پلکانی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل عمق نسبی مزدوج و طول پرش بعد از سرریز، مشخصات هوادهی و موقعیت شروع هوادهی جریان بر روی سرریز و میزان استهلاک انرژی جریان می‌باشد. در نهایت مدل پیشنهادی فرم تغییر یافته پله، بر روی سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بصورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D اعمال شده و میزان اختلاط استهلاک انرژی جریان در مقایسه با فرم ساده پله‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## مواد و روش

### مدل‌های آزمایشگاهی

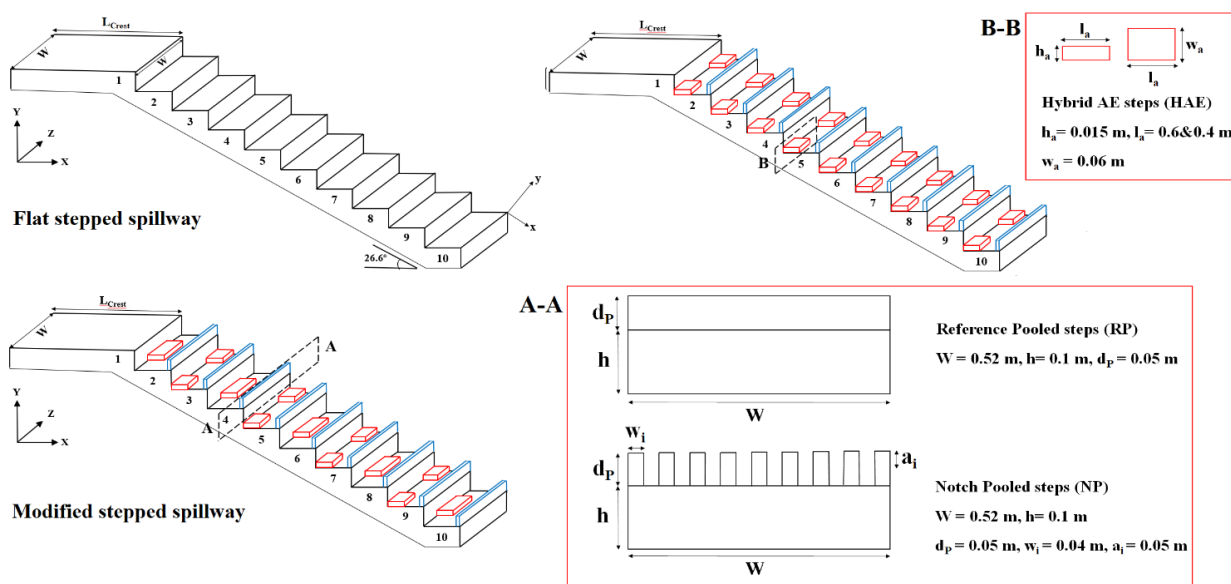
برای انجام آزمایش‌ها، از فلومی با مقطع مستطیلی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۱/۲ و ۰/۸ متر با کف فلزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلس شفاف به ضخامت ۱ سانتی‌متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه استفاده شد (شکل ۱). اندازه‌گیری دبی جریان ورودی کانال توسط دبی‌سنج التراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه که بر روی لوله ورودی جریان به فلوم نصب شده بود، اندازه‌گیری شد. دبی مورد نیاز توسط پمپی با حداکثر ظرفیت ۵۵ لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کانال هدایت می‌شود. به منظور جلوگیری از تلاطم جریان در ابتدای کانال به‌ویژه در دبی‌های بالا از یک عدد صفحه شناور روی سطح آب استفاده شد. جریان آب پس از عبور از طول کانال به مخزنی در انتهای کانال تخلیه می‌شود. عمق جریان آب توسط عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نقاط برداشت اعماق در فاصله‌ی ۲ متری از بالادست سرریز پلکانی و بعد از پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز پلکانی انجام گردید. از یک سرریز لبه‌پهن به طول و ارتفاع به ترتیب ۱ متر و ۰/۶ متر و هم عرض کانال برای کنترل دبی استفاده شد. (Ghaderi and Abbasi, 2021a)



شکل ۱- طرح شماتیک فلوم آزمایشگاهی

با استفاده از یک مدل سرریز پلکانی با شیب شوت ۲۶/۶ درجه و متشکل از ۱۰ پله با ارتفاع و طول به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۱۲ متر چهار آرایش و چیدمان المان‌ها بر روی پله‌ها و لبه آن مورد آزمایش قرار گرفت. سرریز پلکانی و المان‌های ساخته‌شده از جنس فوم فشرده نسبتاً سخت با ضخامت ۰/۰۱۵ متر ساخته شدند. المان‌ها به صورت همزمان و در دو حالت بکار رفته‌اند. در لبه پله‌ها که اصطلاحاً مدل استخری<sup>۱</sup> نام‌گذاری شده‌اند و بر روی پله‌ها قرار گرفتند. المان‌های روی لبه بصورت ممتد و برش خورده و المان‌های روی پله در دو نوع آرایش مختلف ترکیبی و دوطرفه انتخاب شدند. علت انتخاب این نوع مدل‌ها و آرایش، از روی مطالعات انجام شده توسط Ghaderi and Abbasi (2021a, b) انجام شده‌اند که در دو تحقیق انجام شده توسط آنان هر یک بصورت مجزا بررسی شدند و بعنوان مدل‌های منتخب انتخاب شدند. در این تحقیق تأثیر بکارگیری همزمان این المان‌ها بر روی پله مدنظر بوده است. برای هر مدل ۷ دبی در محدوده ۲۵ تا ۵۴

لیتر بر ثانیه و برای سه رژیم جریان ریزشی (دبی‌های ۲۵ و ۳۰)، رژیم انتقالی (دبی‌های ۳۵) و رژیم غیرریزشی (دبی‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۴) مورد آزمایش قرار گرفت. در پایین‌دست مدل‌های سرریز پلکانی، یک حوضچه آرامش تپ III براساس معیارهای طراحی USBR و برای جریان ورودی با عدد فرود ۸ طراحی شد. از این رو حوضچه آرامش دارای ۱/۳ متر طول، ۱/۲ متر عرض و با سه ردیف بلوک‌های غیرممتد مکعبی شکل از جنس چوب به ارتفاع ۰/۰۴۵ متر انجام گردید. جهت جلوگیری از فرسایش در پایین‌دست حوضچه آرامش و ایجاد پرش در داخل حوضچه آرامش از یک باکس سنگریزه‌ای به طول ۱/۵ متر و عرض ۱/۲ متر و با ضخامت ۰/۰۸ متر پر شده از ذرات با قطر متوسط d50 برابر ۰/۲۵ متر استفاده گردید (Ghaderi and Abbasi, 2021a). شکل‌های (۲) و (۳) مشخصات و نمایی از مدل‌های سرریز پلکانی ساخته‌شده را نشان می‌دهند.



شکل ۲- مدل‌های سرریز پلکانی همراه با تغییراتی بر روی پله‌ها



مدل تمام استخر برش خورده + المان‌های دوطرفه

شکل ۳- معرفی مدل‌های سرریزهای پلکانی همراه با المان روی پله و لبه آن

### مدل عددی

در این تحقیق از نرم‌افزار FLOW-3D برای مدل‌سازی سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا و بررسی تأثیر ایجاد همزمان المان‌های روی پله و لبه آن بر میزان سرعت جریان، آشفتگی و استهلاک انرژی جریان استفاده شد. سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در ۱۰ کیلومتری شمال کندوان در جاده چالوس بر روی رودخانه چالوس قرار گرفته است. این پروژه شامل دو سد خاکی بالا و پایین با اختلاف ارتفاع ۵۰۰ متر است که انتقال جریان از سد بالا به پایین توسط تونل انتقال آب انجام می‌گیرد (شکل ۴). شکل (۵) نمایی از سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۴- جانمایی سرریزهای پلکانی بالا و پایین در سد سیاه‌بیشه



شکل ۵- نمایی از سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا

مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد بالا با مقیاس ۱:۱۵ در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو طراحی و ساخته شده است. تعداد پله‌های مدل در تندآب پلکانی قسمت اول ۶۰ عدد و زاویه شوت سرریز ۱۸/۴۳ درجه می‌باشد. ارتفاع پله‌های اول و دوم ۵ سانتی‌متر و مابقی پله‌ها ۴/۶۶ سانتی‌متر است. طول کف پله‌ها ۱۴ سانتی‌متر و عرض سرریز ۱/۳۳ متر در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) مشخصه جریان مدنظر برای سرریز پلکانی سیاه‌بیشه نشان داده شده است.

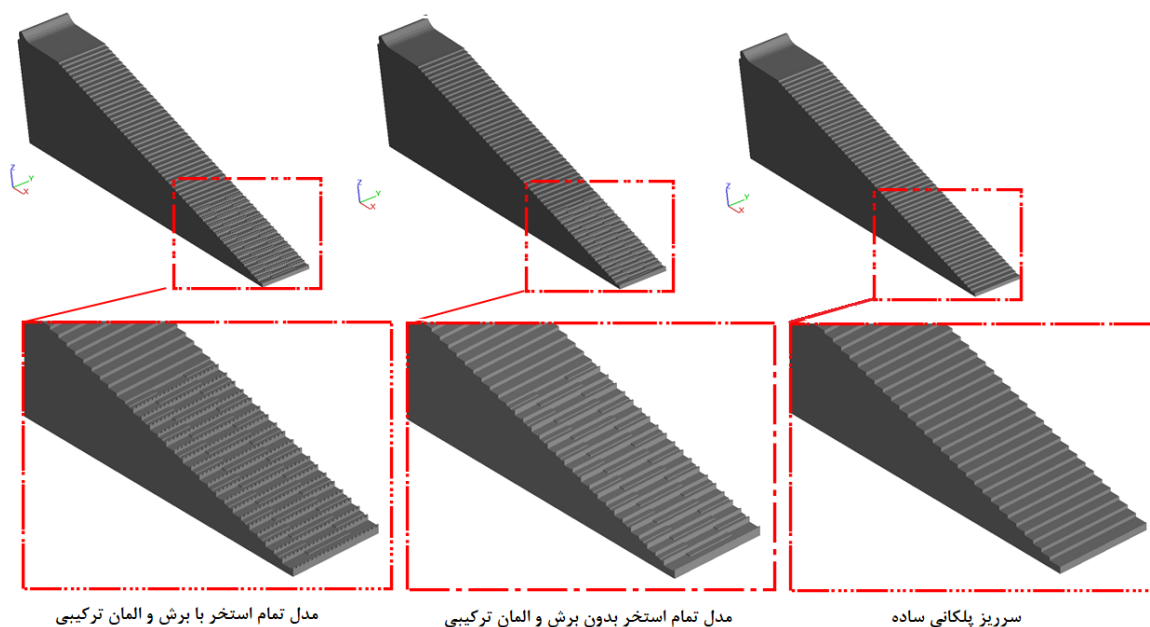
جدول ۱. رژیم جریان ایجاد شده بر روی سرریزهای پلکانی تحقیق حاضر

مدل	زاویه شوت (درجه)	دبی جریان (Lit/s)	$y_c$ (m)	$h/l$	$y_c/h$	نوع جریان
سیاه‌بیشه بالا	۱۸/۴۳	۱۵	۰/۰۲۳	۰/۳۳	۰/۵	ریزشی
		۲۵	۰/۰۳۳	۰/۳۳	۰/۷۱	ریزشی
		۳۵	۰/۰۲۷	۰/۳۳	۰/۸	انتقالی
		۴۰	۰/۰۴۵	۰/۳۳	۰/۹۷	انتقالی
		۸۰	۰/۰۷۱	۰/۳۳	۱/۵۳	غیرریزشی
		۹۰	۰/۰۷۷	۰/۳۳	۱/۶۶	غیرریزشی

با توجه به اهداف تحقیق و با داشتن اطلاعات هندسی مدل سرریز، سرریز پلکانی در مقیاس ۱:۱۵ در نرم‌افزار ترسیمی AUTOCAD ترسیم شده و به نرم‌افزار FLOW-3D فراخوان شد. با توجه به اینکه مدل سرریز سیاه‌بیشه بالا دارای ۶۰ پله می‌باشد، لذا با انتخاب ۲۰ پله آخر سرریز پلکانی بعنوان پله‌های اصلاح شده (شکل ۶)، المان‌ها بر روی پله و لبه آن قرار گرفتند و نتایج مربوطه نسبت به حالت بدون المان، باهم مقایسه شدند. مشخصات هیدرولیکی و هندسی مدل‌های مورد بررسی در این بخش در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مدل اصلاح شده سرریز پلکانی سد سیاه‌بیشه بالا

مدل	ارتفاع المان لبه (سانتی‌متر)	ارتفاع المان روی پله (سانتی‌متر)	ارتفاع برش لبه (سانتی‌متر)	تعداد پله اصلاح شده	ارتفاع پله (سانتی‌متر)	طول پله (سانتی‌متر)	محدوده دبی (لیتر بر ثانیه)
پلکانی ساده	-	-	-	۶۰	۴/۶۷	۱۴	۹۰-۱۵
مدل تمام استخر همراه با المان ترکیبی	۳	۱/۵	-	۲۰	۴/۶۷	۱۴	۹۰-۱۵
مدل تمام استخر با برش همراه با المان ترکیبی	۳	۱/۵	۳	۲۰	۴/۶۷	۱۴	۹۰-۱۵



شکل ۶. مدل‌های سرریز پلکانی اصلاح شده سیاه‌بیشه بالا

معادله‌های حاکم در این نرم‌افزار معادله‌های ناویر-استوکس و معادله‌ی بقای جرم می‌باشد. این نرم‌افزار برای تحلیل سه‌بعدی جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادله‌های ناویر-استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند. این معادله‌های در دستگاه مختصات کارتزین  $x$ ،  $y$ ،  $z$  به صورت زیر می‌باشند (Daneshfaraz et al., 2021b):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} + R_{DIF} \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad \text{رابطه ۴}$$

در این روابط،  $(u \ v \ w)$  مؤلفه‌های سرعت،  $A_x, A_y, A_z$  کسری از مساحت مرتبط با جریان،  $G_x, G_y, G_z$  شتاب جرمی و  $f_x, f_y, f_z$  شتاب لزجت در جهت‌های  $(x \ y \ z)$ ،  $\rho$  چگالی سیال،  $R_{SOR}$  منبع جرم، عبارت پخش آشفتگی،  $V_F$  کسری از حجم مرتبط با جریان و  $P$  فشار می‌باشند. برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد از روش جز حجم سیال (VOF) برای تعیین سطح مشترک دو سیال (آب و هوا) استفاده شد. یک مدل آشفتگی برای مدل‌سازی ترم تنش غیرخطی رینولدز بایستی اضافه شود. برای این منظور در این تحقیق با توجه به نتایج بررسی‌های عددی محققین چون (Morovati et al. (2016), Shahheydari et al. (2015), Ghaderi et al. (2020, 2021) مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ (RNG) برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان استفاده شده است. جهت شبکه‌بندی غیریکنواخت، روی تاج سرریز از مش ریزتر استفاده شد. یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی‌های عددی مش‌بندی و تعیین ابعاد مش‌های انتخابی جهت یافتن بهینه‌ترین مدل در قیاس با نتایج واقعی است. برای مدل سرریز پلکانی مورد بررسی تحقیق حاضر، با شبیه‌سازی مدل در ۳ حالت مختلف با اندازه‌ی مش‌های متفاوت و مقایسه افزایش دقت نتایج آن‌ها از روی داده‌های آزمایشگاهی در نهایت مش‌بندی بهینه برای مدل مذکور انتخاب شد. برای این کار طبق جدول (۳) نتایج سرعت جریان بر روی پله‌های ۳۷ و ۴۱ بدست آمده نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای هر یک محاسبه گردید. در رابطه (۵) نحوه محاسبه خطا ارائه شده است.

$$\text{RMSE (m/s)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\text{exp}} - X_{\text{num}})^2} \quad \text{رابطه ۵}$$

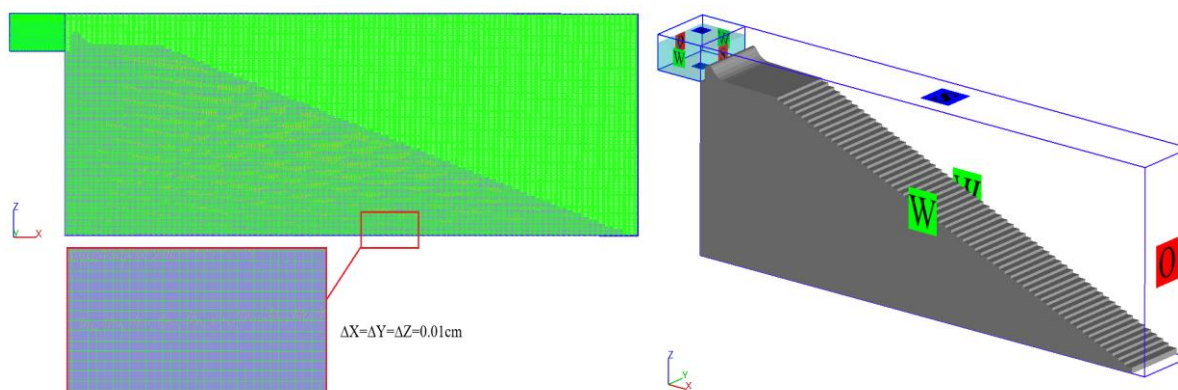
در این رابطه  $X_{\text{exp}}$ : مقدار داده‌های آزمایشگاهی،  $X_{\text{num}}$ : مقدار داده‌های عددی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

جدول ۳. آنالیز حساسیت مش‌بندی در شبکه محاسباتی تحقیق حاضر

حالت	تعداد مش	شماره پله	مقادیر سرعت جریان در نتایج آزمایشگاهی	مقادیر سرعت جریان در نتایج عددی	خطای جذر میانگین مربعات RMSE (m/s)
۱	۵۶۳۲۸۴۲	پله ۳۷	۲/۴۸	۲/۸۰	۰/۳۲
		پله ۴۱	۲/۵۸	۲/۹۲	۰/۳۴
۲	۸۱۲۵۴۲۶	پله ۳۷	۲/۴۸	۲/۷۳	۰/۲۵
		پله ۴۱	۲/۵۸	۲/۸۶	۰/۲۸
۳	۹۹۶۸۵۷۵	پله ۳۷	۲/۴۸	۲/۵۲	۰/۰۴
		پله ۴۱	۲/۵۸	۲/۶۵	۰/۰۷

با توجه به خطاهای بدست آمده، حالت ۳ به عنوان مش بهینه با تعداد کل ۱۰۲۰۷۸۵۶ تعداد سلول محاسباتی انتخاب گردید. مش‌های ایجاد شده در هر راستای کانال بصورت یکنواخت با اندازه‌ی ۰/۰۱ متر انتخاب شده‌اند تا با ارائه بیشترین دقت محاسباتی، بهینه‌ترین زمان شبیه‌سازی را ایجاد نمایند. برای اعمال شرایط مرزی، برای مرز  $Z_{\text{max}}$  شرط مرزی Specified Pressure همراه با Fluid fraction=0 اعمال گردید این نوع شرط مرزی شرایط بیرون شبکه‌ی حل را دقیقاً مشابه شرایط سطح آزاد یا فشار اتمسفر در نظر می‌گیرد. برای ورودی جریان از شرط مرزی دبی مشخص و برای مرز پایین‌دست نیز به منظور عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه‌ی حل از شرایط بیرون، از شرط مرزی خروجی استفاده شده است. برای دیوارها و کف کانال شرط مرزی Wall تعریف شده که همانند یک دیوار مجازی بدون اصطکاک عمل می‌کند. مرز بین مش بلاک‌ها و دیوارها شرط تقارن یا Symmetry در نظر گرفته شد (شکل ۷).





شکل ۷. شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی

## نتایج و بحث

### الگوی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی همراه با مانع

نتایج مربوط به مشاهدات پروفیل سطح آب بر روی این مدل‌های ترکیبی المان در روی پله و لبه آن در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، الگوهای جریان عبوری از مدل‌های سرریز پلکانی برای دبی‌های کم  $y/h \leq 0.74$  جت جریان عبوری از روی سرریز پلکانی با سقوط بر روی پله‌ها به پایین دست انتقال می‌یابد و رفتار رژیم جریان غیرریزشی را نشان می‌دهد. با افزایش دبی و در بازه  $0.87 < y/h < 0.74$ ، نوسانات جریان پایدارتر شده و رفتار رژیم جریان انتقالی را نشان می‌دهد برای  $y/h > 0.87$  رژیم جریان غیرریزشی با برخی گردابه چرخشی در داخل پله‌های پایین دست مشاهده گردید.

آنچه که مشهود است، وجود همزمان المان‌ها بر روی پله و لبه آن باعث تداخل بیشتر جت‌های جریان عبوری از سرریز پلکانی شده، که این امر در شرایط وجود المان‌های برش خورده در لبه پله، تشدیدتر می‌شود. تداخل بیشتر جت‌های جریان عبوری با هم، میزان اختلاط آب و هوا را بیشتر کرده و شروع ناحیه جریان دو فازی (نقطه شروع هوادهی) در نواحی بالادست سرریز پلکانی اتفاق می‌افتد. با مقایسه بین مدل‌های ترکیبی المان‌های روی پله و لبه آن، مشاهده گردید که مدل تمام استخر با ارتفاع برش ۳ سانتی متر المان در لبه پله به همراه وجود المان‌های روی پله در آرایش ترکیبی، بیشترین ناحیه تداخل خطوط جریان از سطح شوت سرریز پلکانی را به خود اختصاص داده است.

### تأثیر المان‌های روی پله بر تغییرات عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش

برای بررسی اثر استفاده همزمان از المان‌های روی پله و لبه پله بر مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست مدل‌های سرریزهای پلکانی، نسبت اعماق مزدوج در مدل‌های سرریز پلکانی با آرایش‌های مختلف المان‌ها بر روی پله در دبی‌های مختلف محاسبه گردید. شکل (۹) اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی در پایین دست مدل‌های سرریز پلکانی همراه با استفاده همزمان المان‌های روی پله و لبه آن را نشان می‌دهد. در این شکل مشخص است که در شرایط هیدرولیکی یکسان، بکارگیری همزمان المان‌های روی پله و لبه باعث کاهش عمق ثانویه پرش می‌گردد. در این بین، آرایش المان‌های روی پله و برش لبه‌های پله نیز بر روی کاهش عمق ثانویه تأثیر داشته، بطوریکه بیشترین کاهش عمق ثانویه در مدل تمام استخر با ارتفاع برش ۳ سانتی متر المان در لبه پله به همراه وجود المان‌های روی پله در آرایش ترکیبی اتفاق می‌افتد. ایجاد آشفستگی بیشتر بر روی پله‌ها، تحت آرایش المان‌های روی پله و تداخل بیشتر جریان در عبور از بالا و لابه‌لای قسمت‌های برش خورده المان‌های روی لبه، باعث کاهش عمق ثانویه پرش در پایین دست سرریزهای پلکانی همراه با مانع می‌شود.

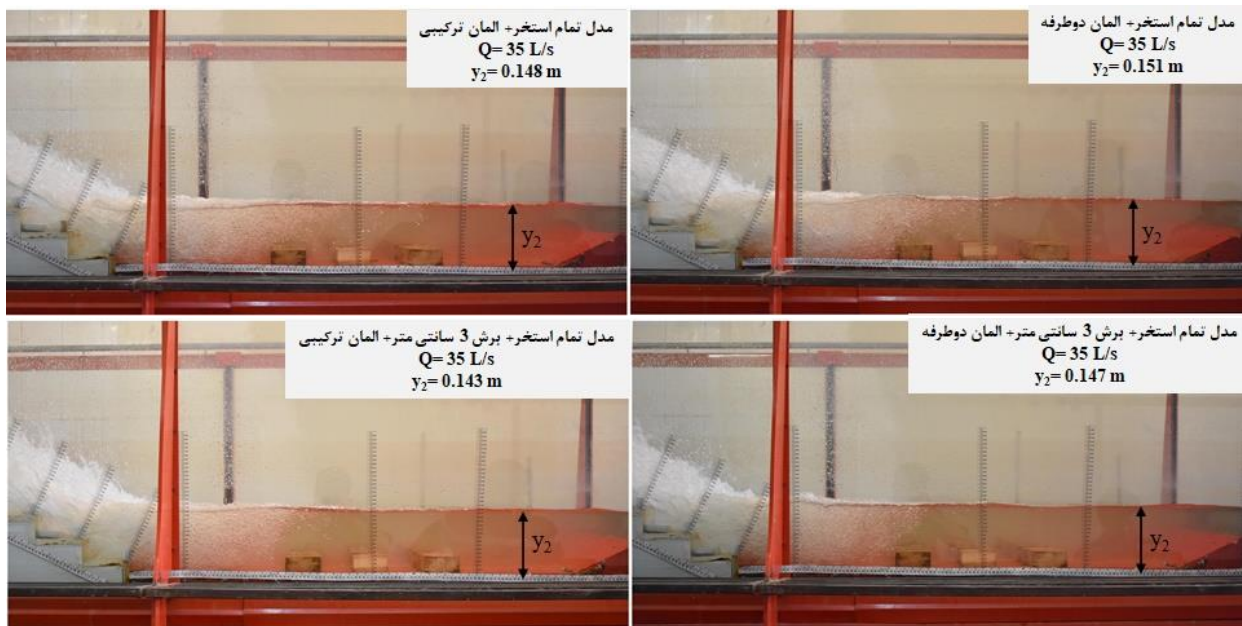


(الف)



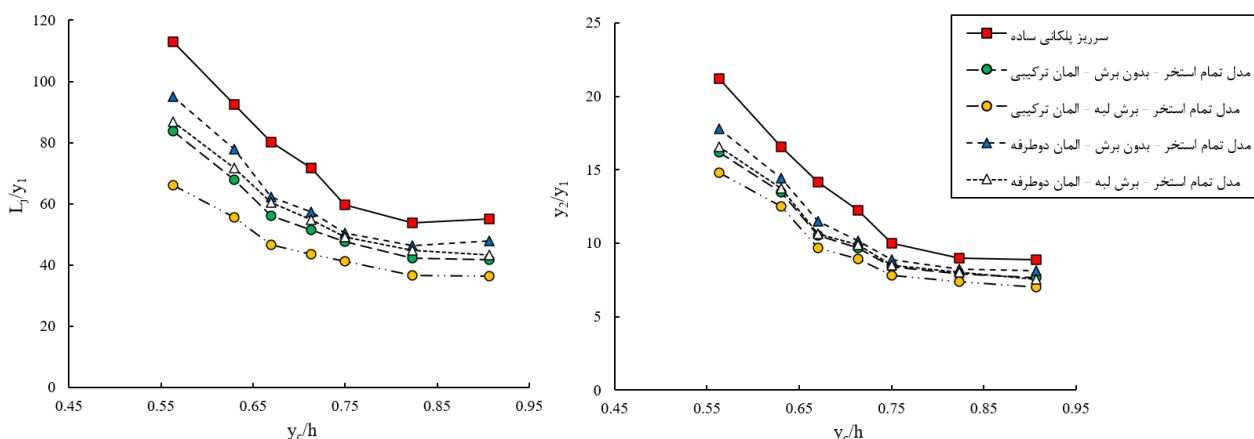
(ب)

شکل ۸. الگوی جریان عبوری از ترکیبی تمام استخر و برش لبه (شیب شوت  $\theta=26/6$ )  
الف: مدل المان‌های ترکیبی روی پله ب: مدل المان‌های دوطرفه روی پله



شکل ۹. اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی در پایین دست مدل‌های ترکیبی همزمان روی پله و روی لبه پله

با دقت در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد که ایجاد همزمان مانع بر روی پله و لبه‌ها باعث کاهش نسبت اعماق ثانویه پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز پلکانی می‌شود. همچنین با افزایش نسبت  $y_c/h$  اختلاف بین مقادیر کم می‌شود. بطور میانگین مدل تمام استخر و مدل استخر دو طرفه با ارتفاع برش ۳ سانتی متر المان در لبه پله به همراه وجود المان‌های روی پله در آرایش ترکیبی به ترتیب باعث کاهش در مقادیر نسبت اعماق مزدوج به میزان ۲۶/۲۹ درصد و ۱۵/۹۷ درصد و کاهش در طول نسبی پرش به میزان ۳۴/۲۴ درصد و ۲۳/۳۳ درصد نسبت به مدل سرریز پلکانی ساده می‌شوند.



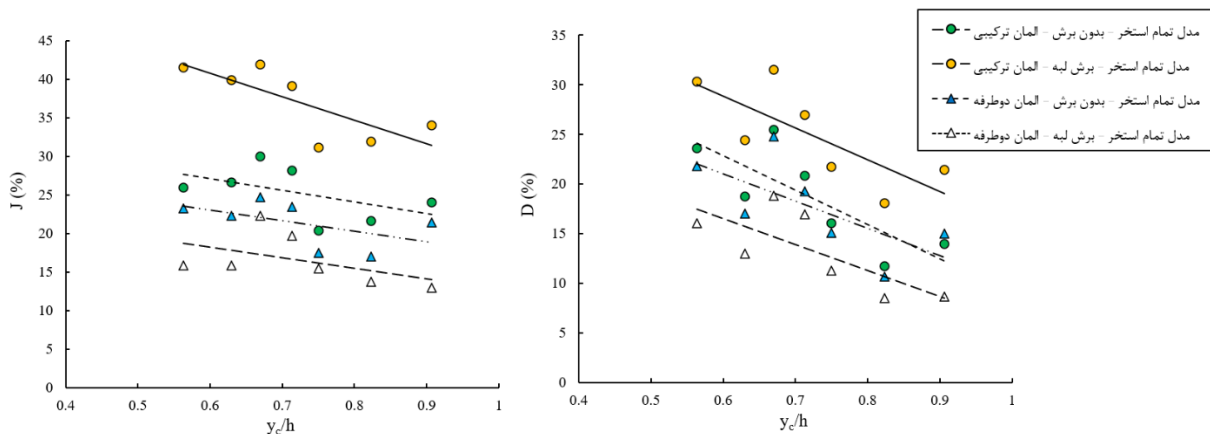
شکل ۱۰. نسبت اعماق ثانویه و طول نسبی پرش در مدل‌های سرریز پلکانی همزمان المان‌ها در روی پله و لبه آن

برای نشان دادن میزان اختلاف بین عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در پایین دست مدل سرریز پلکانی ساده با مدل‌های پلکانی اصلاح شده، از یک ضریب بدون بعد به نام ضریب کاهش عمق و طول نسبی استفاده شده که توسط Tokyay (2005) ارائه شده است و به صورت روابط زیر تعیین می‌شود.

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

$$J = \frac{L_j^* - L_j}{L_j} \times 100 \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه  $y_2^*$  و  $L_j^*$  به ترتیب بیانگر عمق ثانویه و طول پرش در پایین دست سرریز پلکانی ساده و  $y_2$  و  $L_j$  به ترتیب بیانگر عمق ثانویه و طول پرش در پایین دست مدل‌های سرریز اصلاح شده در نسبت  $y_c/h$  یکسان می‌باشد. شکل (۱۱) نتایج حاصل از این پارامترها را در برابر نسبت  $y_c/h$  نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای تمامی مدل‌ها با افزایش دبی جریان (افزایش  $y_c$ ) ضریب کاهش عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، عملکرد مدل‌های سرریز اصلاح شده در کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در دبی کم، بهتر است. همچنین در مقایسه میان مدل‌های مختلف اصلاح شده سرریز پلکانی، می‌توان گفت که ضریب کاهش عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی مدل تمام استخر همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله نسبت به سایر مدل‌ها بیشترین مقدار را دارد. به طوریکه بیشترین مقدار ضریب کاهش عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی در نسبت  $y_c/h=0.67$  اتفاق می‌افتد که مقدار آن به ترتیب ۳۱/۵۰ و ۴۱/۹۵ درصد می‌باشد.



شکل ۱۱. ضریب کاهش عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی به ازای نسبت  $y_c/h$  در مدل‌های پلکانی اصلاح شده

### تأثیر المان‌های روی پله بر نقطه شروع هوادهی

وجود موانع بر روی پله و لبه آن، سبب اختلاط بیشتر جریان پس از برخورد با موانع و بالآمدگی جریان می‌گردد که این امر می‌تواند بر روی نقطه شروع هوادهی تأثیرگذار باشد. شکل‌های (۱۲ الف) و (۱۲ ب) نقطه شروع هوادهی در مدل سرریزهای ترکیبی تمام استخر را در شرایط لبه‌های ممتد و برش خورده به ترتیب برای دبی ۴۰ و ۵۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ایجاد برش در لبه المان‌های روی پله، اختلاط آب و هوای جریان عبوری از سرریزها افزایش یافته و نقطه شروع هوادهی بیشتر به بالادست سرریز کشیده می‌شود. بطوریکه برای مدل ترکیبی تمام استخر بدون برش و آرایش المان ترکیبی نقطه شروع هوادهی در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، در ابتدای پله شماره ۷ اتفاق می‌افتد، این در حالی است که برای مدل ترکیبی تمام استخر برش خورده و آرایش المان ترکیبی در اواسط پله شماره ۸ روی می‌دهد. همچنین با افزایش دبی، نقطه شروع هوادهی در تمامی مدل‌ها به سمت پایین دست کشیده می‌شوند.

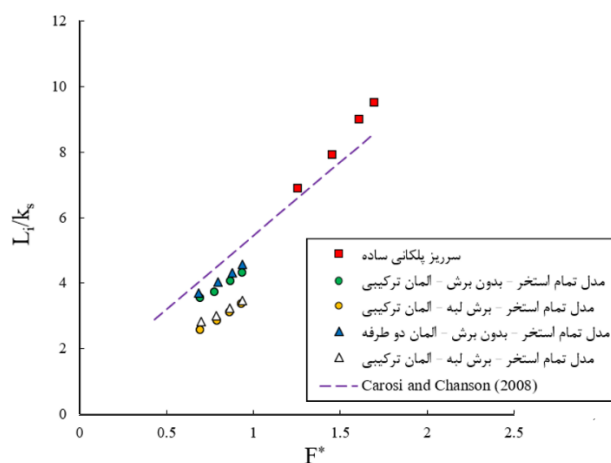
برای بررسی نقطه شروع هوادهی جریان عبوری از روی مدل‌های سرریز پلکانی، از پارامتر بدون بعد  $L_i/k_s$  نسبت به عدد فرود استفاده شد.  $L_i$  فاصله طولی نقطه شروع هوادهی تا لبه پله ۱۰م و  $k_s = h \times \cos \theta$  ارتفاع زبری پله می‌باشد. مقادیر  $k_s$  برای مدل‌های سرریز پلکانی برای بیشترین مقدار در بین مدل‌ها یعنی مقدار ۰/۰۸ انتخاب گردید. همچنین عدد فرود را می‌توان تابعی از زبری پله‌ها طبق رابطه (۸) بیان کرد.

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \times \sin \theta \times k_s^3}} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

در رابطه فوق،  $q$  دبی در واحد عرض،  $\theta$  شیب شوت سرریز می‌باشد. تمامی داده‌های برداشت شده از آزمایشات با رابطه خطی ارائه شده توسط Carosi and Chanson, (2008) بر روی سرریز پلکانی با شیب شوت ۲۶/۶ درجه مقایسه و در شکل (۱۳) ارائه گردید. در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که استفاده همزمان از المان‌های روی پله و لبه سرریز پلکانی با ایجاد نوسانات در سطح جریان و اختلاط بیشتر آب و هوا باعث انتقال هر چه بیشتر محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی شده و این امر در مدل‌های ترکیبی تمام استخر همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله افزایش می‌یابد.



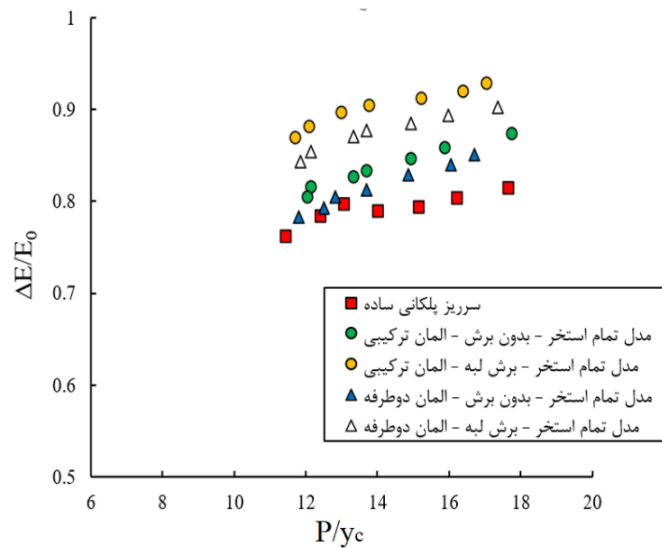
شکل ۱۲. نقطه شروع هوادهی جریان بر روی مدل‌های ترکیبی سرریز پلکانی تمام استخر  
الف: دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه ب: دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه



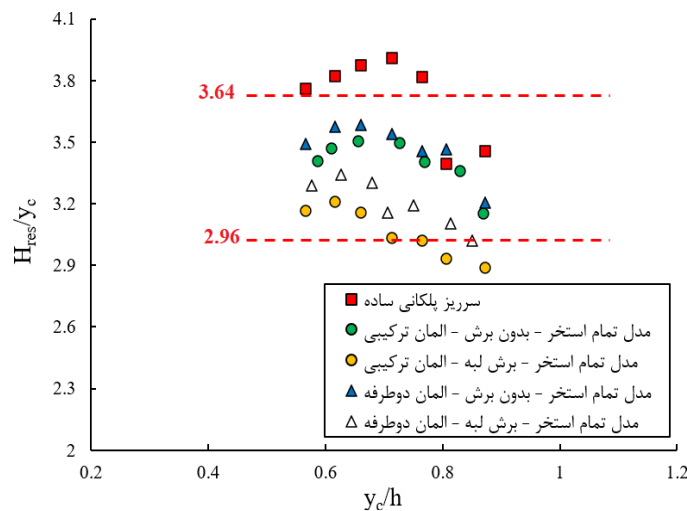
شکل ۱۳. نقاط شروع هوادهی بر روی مدل‌های سرریز پلکانی با بکارگیری همزمان المان‌ها در روی پله و لبه آن

**تأثیر المان‌های روی پله بر تغییرات استهلاک انرژی و انرژی باقی‌مانده**

میزان استهلاک انرژی ( $\Delta E/E_0$ ) و مقدار انرژی باقی‌مانده ( $H_{res}$ ) در لبه‌ی پله‌ی آخر همه‌ی مدل‌های ترکیبی المان‌های روی پله و لبه آن محاسبه و در اشکال (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است. بکارگیری همزمان مانع بر روی پله‌ها و لبه آن، باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. همچنین در رژیم جریان ریزشی (مقدار  $y_c$  کم) انرژی بیشتری مستهلک می‌شود. در بین سرریزهای پلکانی همراه با مانع‌های ترکیبی، مدل سرریز تمام استخر همراه با برش لبه و آرایش المان ترکیبی روی پله، به علت ایجاد بیشتر تداخل جریان و انحراف بیشتر جت‌ها از مسیر موازی خود بر روی سرریز پلکانی، بیشترین کارایی را در میزان استهلاک انرژی دارند. بطور متوسط مدل المان‌های ترکیبی باعث افزایش ۱۴/۳۸ درصدی در میزان استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده می‌گردد.



شکل ۱۴. تغییرات استهلاک انرژی به ازای نسبت  $P/y_c$  در سرریز پلکانی اصلاح شده



شکل ۱۵. انرژی باقی‌مانده به ازای نسبت  $y_c/h$  در سرریز پلکانی اصلاح شده

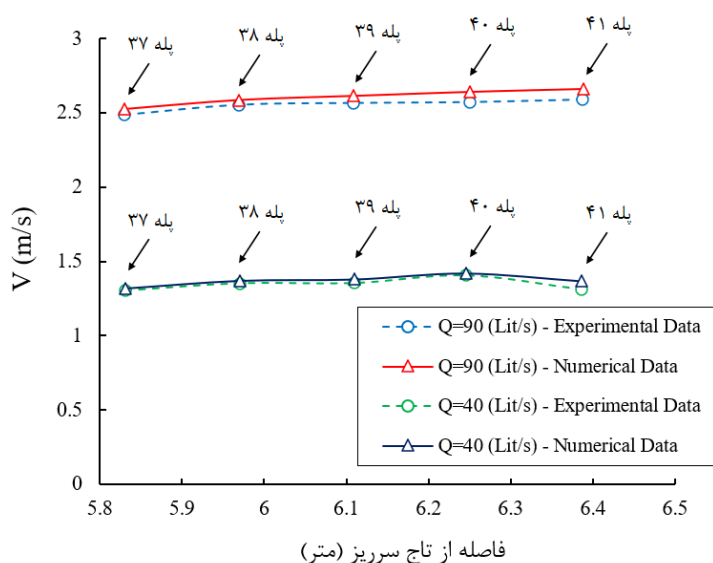
با دقت در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که با افزایش دبی جریان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بر روی تمامی مدل‌های سرریز کاهش می‌یابد. همچنین در شرایط جریان یکسان، مقادیر انرژی باقی‌مانده بی‌بعد شده برای مدل سرریز تمام استخر همراه با برش لبه و آرایش المان ترکیبی روی پله دارای کمترین مقدار نسبت به سایر مدل‌های سرریز و سرریز پلکانی ساده می‌باشد. می‌توان گفت، مقدار متوسط انرژی باقی‌مانده نسبی برای سرریز پلکانی ساده برابر  $H_{res}/y_c = 3/64$  می‌باشد. این در حالی است که میانگین این مقدار برای سرریزهای پلکانی همراه با موانع ترکیبی روی پله و لبه آن برابر  $H_{res}/y_c = 2/96$  می‌باشد.

تأثیر اصلاح پله‌های سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا بر میزان استهلاک انرژی

نتایج سرعت جریان عبوری از سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا در دبی‌های ۴۰ و ۹۰ لیتر بر ثانیه برای مقایسه و صحت‌سنجی داده‌های عددی و آزمایشگاهی انجام شده در (Water Research Institute (2005) بکار گرفته شد. از این رو برای تعیین محدوده خطا از رابطه (۹) استفاده گردید.

$$E = \left( \frac{V_E - V_N}{V_E} \right) \times 100 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

در رابطه‌ی فوق E نشانگر درصد خطای نسبی،  $V_E$  سرعت جریان اندازه‌گیری شده و  $V_N$  سرعت جریان بدست آمده در حل عددی می‌باشد. شکل (۱۶) و جدول (۴) به ترتیب مقایسه مقادیر سرعت جریان عبوری از پله‌های ۳۷ تا ۴۱ سرریز پلکانی حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی و درصد خطای نسبی حاصل از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



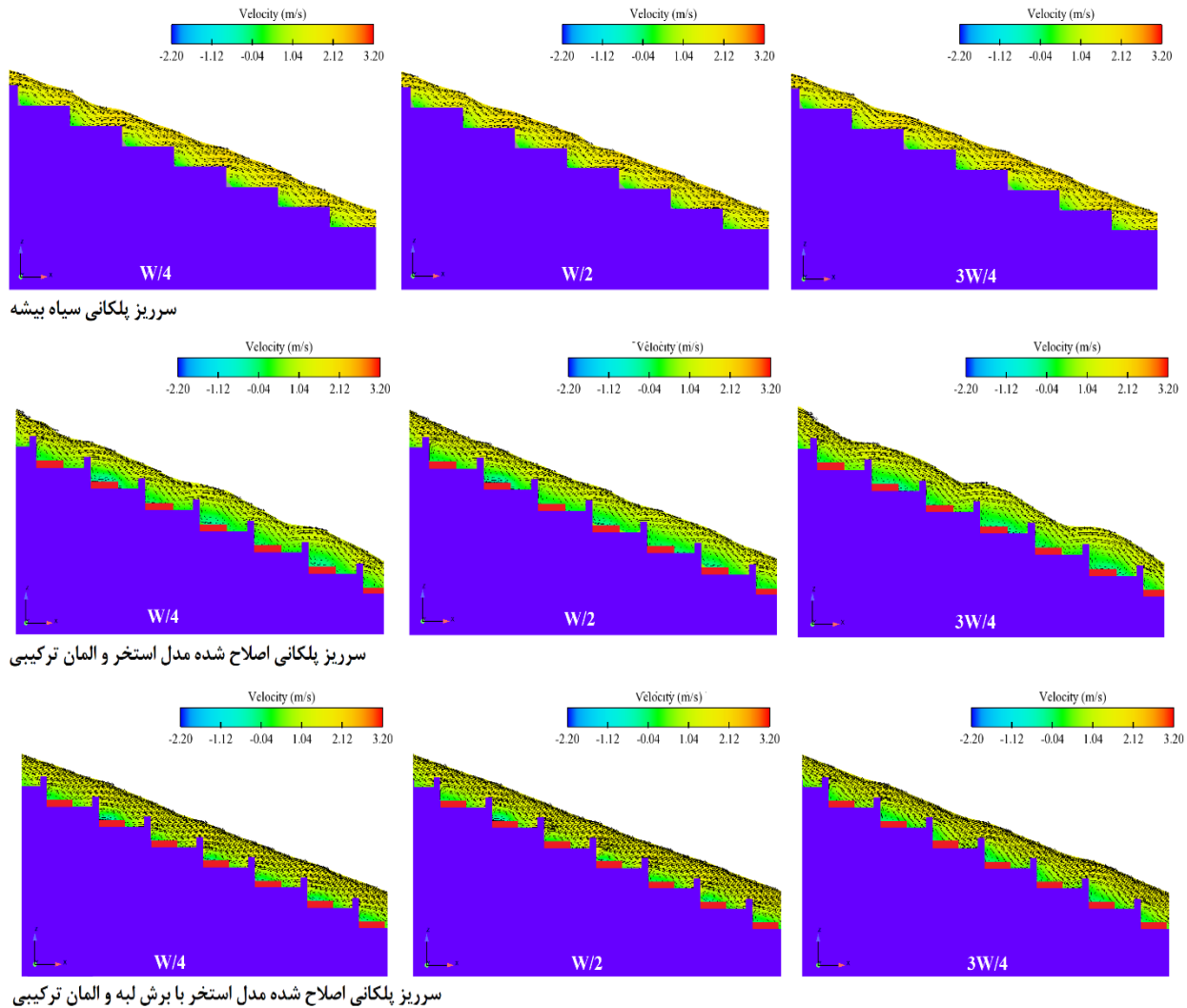
شکل ۱۶. مقایسه سرعت جریان عبوری از روی پله‌ها نتایج عددی و آزمایشگاهی سرریز پلکانی سیاه‌بیشه

جدول ۴. درصد خطای بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت جریان

RMSE (m/s)	درصد خطای نسبی (%)	سرعت جریان در نتایج آزمایشگاهی	سرعت جریان در نتایج عددی	شماره پله	دبی جریان (Lit/s)
۰/۰۲۰	۱/۵۳	۱/۳۰۱	۱/۳۲۱	۳۷	۴۰
۰/۰۱۹	۱/۴۰	۱/۳۵۱	۱/۳۷۰	۳۸	
۰/۰۲۴	۱/۷۷	۱/۳۵۲	۱/۳۷۶	۳۹	
۰/۰۲۴	۱/۷۰	۱/۴۰۵	۱/۴۲۹	۴۰	
۰/۰۳۶	۲/۷۳	۱/۳۰۸	۱/۳۴۴	۴۱	
۰/۰۴۲	۱/۷۰	۲/۴۸۴	۲/۵۲۶	۳۷	۹۰
۰/۰۳۳	۱/۲۳	۲/۵۵۲	۲/۵۸۶	۳۸	
۰/۰۴۸	۱/۹۰	۲/۵۶۴	۲/۶۱۳	۳۹	
۰/۰۶۸	۲/۶۷	۲/۵۷۰	۲/۶۳۹	۴۰	
۰/۰۷۰	۲/۷۳	۲/۵۸۷	۲/۶۵۸	۴۱	

با دقت در شکل (۱۶) مشاهده می‌گردد که روند سرعت جریان عبوری از پله‌ها حاصل از نتایج عددی همانند روند نتایج آزمایشگاهی (Water Research Institute (2005) می‌باشد. با مشاهده جدول (۳) حداکثر مقدار میانگین خطای نسبی سرعت جریان عبوری از پله‌ها نتایج حل عددی و مقدار خطای RMSE به ترتیب ۲/۷۳ درصد و ۰/۰۷۰ متر بر ثانیه و برای دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه در پله ۴۱م می‌باشد. شکل (۱۷) مقادیر توزیع سرعت جریان عبوری از روی مدل‌های سرریز پلکانی سیاه‌بیشه و مدل‌های اصلاح شده همراه با المان بر روی پله و لبه آن‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت جریان عبوری از مدل سرریز پلکانی ساده، بیشتر از مقادیر سرعت در

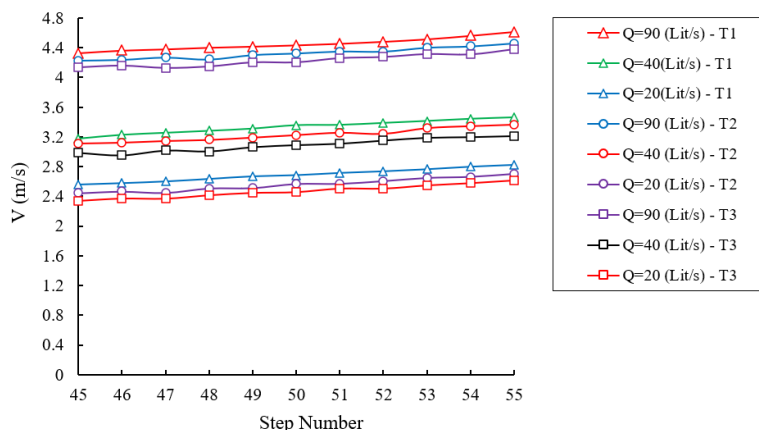
مدل‌های اصلاح شده است. به عبارت دیگر، الحاق المان‌ها بر روی پله و لبه آن، باعث کاهش سرعت جریان عبوری از سرریز در پله‌های پایین دست می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که در مدل اصلاح شده تمام استخر بدون برش لبه، نوساناتی در سطح جریان ایجاد می‌شود که با ایجاد برش در لبه، این نوسانات سطح جریان کاهش می‌یابد. منطقه جریان‌های چرخشی بر روی پله‌ها در مدل‌های اصلاح شده با المان‌های روی پله، بزرگتر از مدل سرریز پلکانی ساده می‌باشد. لذا هر چه این ناحیه گردابه‌های چرخشی در بین پله‌ها بزرگتر باشد، میزان استهلاک انرژی جریان بیشتر می‌گردد.



شکل ۱۷. کانتور و بردارهای سرعت جریان عبوری از مدل‌های اصلاح شده سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا

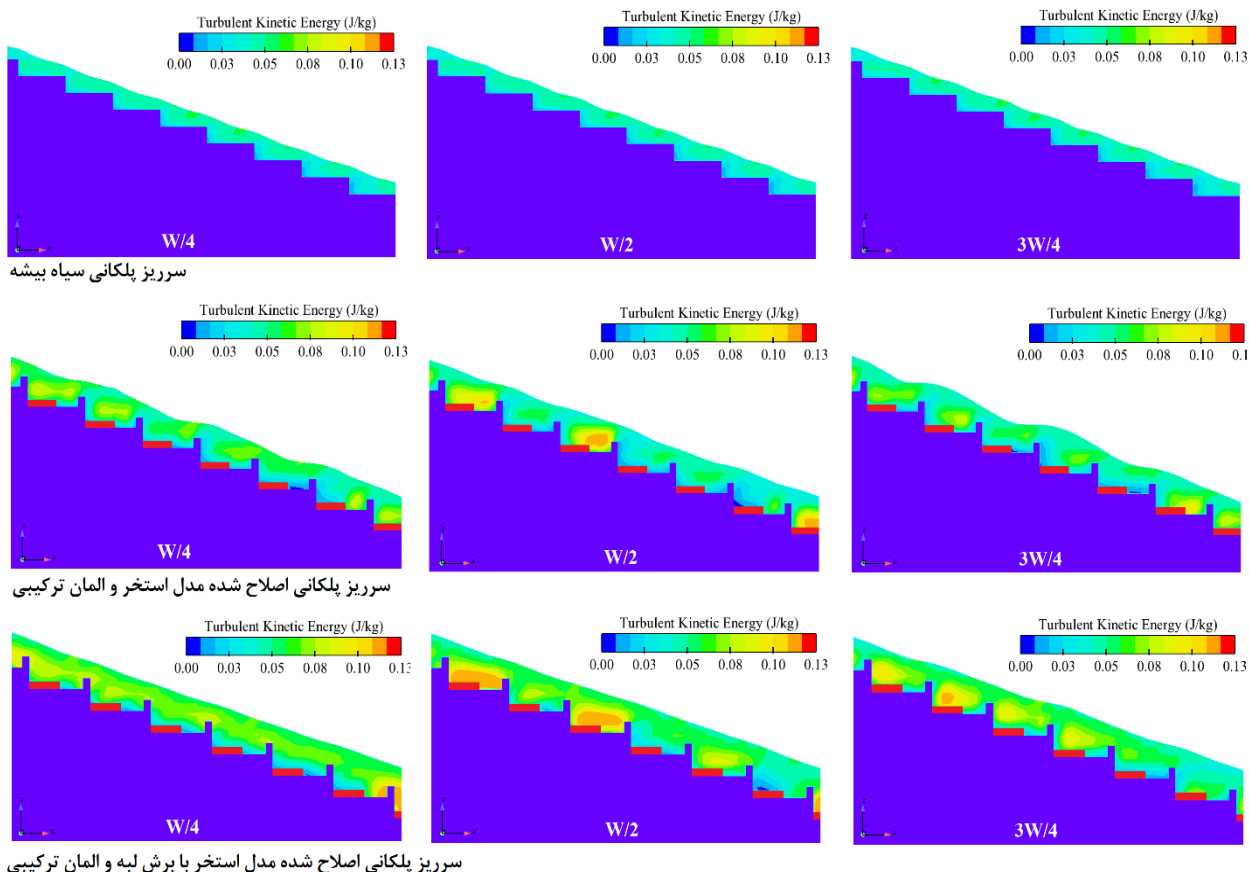
در شکل (۱۷) نمودار ماکزیمم سرعت جریان عبوری از روی پله‌های ۴۵ تا ۵۵ سرریز پلکانی در مدل‌های سرریز پلکانی سیاه‌بیشه (T1) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در یک دبی ثابت، با حرکت جریان به سمت پایین دست، سرعت جریان بر روی پله‌های مشخص سرریز افزایش می‌یابد. اصلاح پله‌ها با ایجاد المان‌ها بر روی پله و لبه آن، باعث کاهش سرعت جریان عبوری از سرریز در پایین دست آن می‌گردد. مدل اصلاح شده سرریز پلکانی تمام استخر همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی (T3) بهترین عملکرد را در کاهش سرعت جریان از خود نشان می‌دهد. سرعت جریان بطور میانگین در پایین دست سرریز پلکانی سیاه‌بیشه در اثر اصلاح پله‌ها در حالت تمام استخر بدون برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله (T2) و در حالت تمام استخر با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله (T3) دبی‌های ۲۵، ۴۰ و ۹۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۶/۱۲، ۴/۷۱، ۳/۹۸ درصد و ۹/۸، ۸/۱۲، ۵/۳۶ درصد کاهش می‌یابد. تأثیر المان‌های الحاقی در کاهش سرعت جریان عبوری از مدل‌های اصلاح شده در دبی‌های پایین بیشتر است.





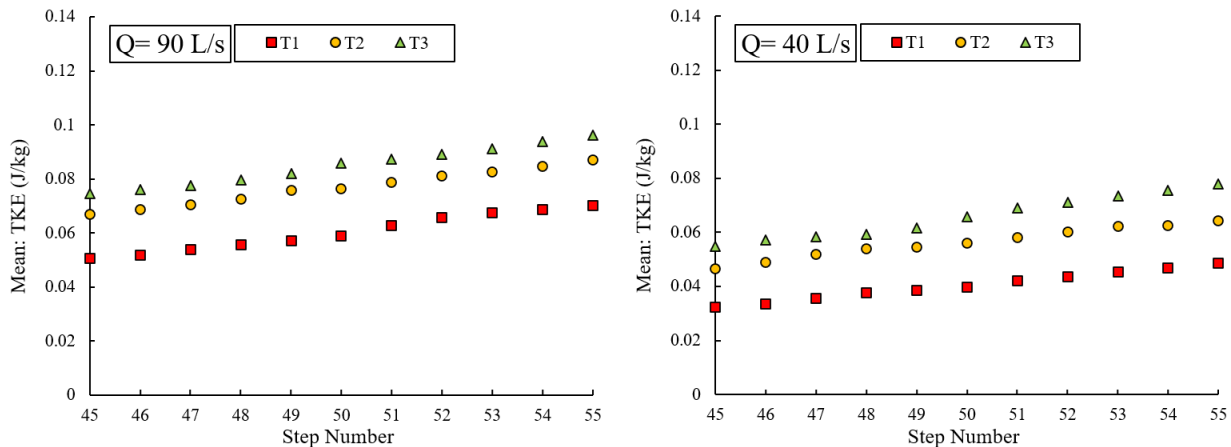
شکل ۱۸. نمودار سرعت جریان عبوری از روی پله‌های ۳۷ تا ۴۱ سرریز پلکانی با تعداد متفاوت پله

شکل (۱۹) تغییرات مقادیر انرژی جنبشی متلاطم بر روی مدل‌های سرریز پلکانی سیاه‌پیشه و مدل‌های اصلاح شده همراه با المان بر روی پله و لبه آن‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اصلاح پله از طریق ایجاد لبه بر روی پله‌ها باعث تشکیل ناحیه گردابه بزرگ‌تر روی پله‌ها و ایجاد المان‌ها بر روی پله، باعث تشدید برخورد جت‌های خطوط جریان با آن‌ها می‌گردد. با مقایسه بین مدل سرریز پلکانی ساده با مدل‌های اصلاح شده، می‌توان مشاهده کرد که شدت تلاطم و انرژی آشفتگی بین پله‌ها، در مدل اصلاح شده به علت برخورد بیشتر جت‌های جریان عبوری از روی پله‌ها با کف آن و تشکیل ناحیه بزرگ‌تر گردابه‌های چرخشی بیشتر از مدل سرریز پلکانی ساده می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در راستای طولی تمامی مدل‌های سرریز پلکانی، مقادیر انرژی تلاطم افزایش می‌یابد. ایجاد برش در المان‌های لبه پله‌ها باعث عبور خطوط جریان از لایه شکاف‌ها و تشدید گردابه‌های چرخشی در بین پله‌ها می‌گردد. در نتیجه شدت تلاطم بر روی پله‌ها در مدل تمام استخری همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی بیشتر از مدل اصلاح شده بدون برش در لبه می‌باشد.



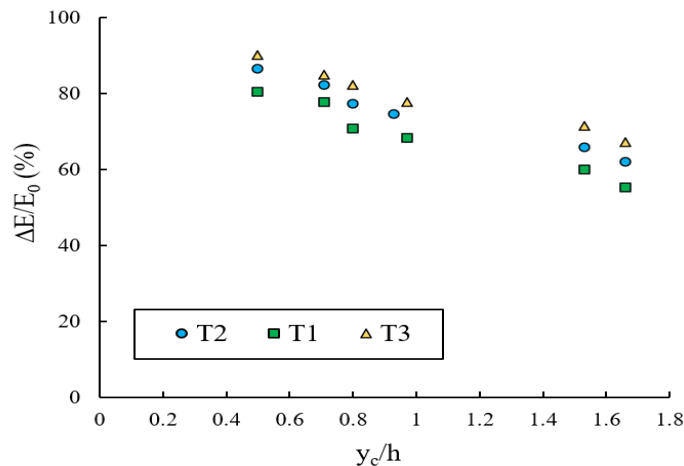
شکل ۱۹. مقادیر انرژی جنبشی متلاطم بر روی مدل‌های اصلاح شده سرریز پلکانی سیاه‌پیشه بالا

شکل (۲۰)، مقادیر متوسط انرژی جنبشی آشفته را بر روی پله‌های ۴۵ تا ۵۵ مدل‌های اصلاح شده سرریز پلکانی سیاه‌بیشه برای دو دبی ۴۰ و ۹۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. روند نمودار برای هر دو دبی تقریباً یکسان است. همچنین با افزایش دبی، مقادیر TKE، افزایش می‌یابد. در نمودارها مشخص است که مدل تمام استخری همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی بیشترین مقدار TKE را در بین مدل‌های دیگر دارد. ایجاد برش در لبه پله و قرار گرفتن المان‌های ترکیبی روی پله بطور متوسط باعث افزایش ۶۳ درصدی در میزان TKE بر روی مدل سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا می‌گردد. کاهش مقادیر TKE در دبی‌های کم، بیشتر اتفاق می‌افتد. همچنین هر چقدر جریان به پایین دست سرریز پلکانی انتقال یابد (از پله ۴۵ به پله ۵۵) مقادیر انرژی جنبشی آشفته افزایش می‌یابد.



شکل ۲۰. مقادیر متوسط انرژی جنبشی آشفته بر روی پله‌های سرریزهای اصلاح شده سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا

تغییرات استهلاک انرژی برای مدل‌های سرریز پلکانی اصلاح شده سیاه‌بیشه همراه با الحاق المان‌های روی پله در شکل (۲۱) ارائه شده است. اصلاح پله‌ها با قرارگیری موانع بر روی پله‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. با افزایش دبی جریان، میزان استهلاک انرژی در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. در بین مدل‌های سرریز پلکانی، مدل تمام استخری همراه با برش لبه و المان‌های ترکیبی، به علت ایجاد بیشتر تداخل جریان و انحراف بیشتر جت‌ها از مسیر موازی خود بر روی سرریز پلکانی، بیشترین کارایی را در میزان استهلاک انرژی دارند. بطور میانگین میزان استهلاک انرژی جریان در اثر اصلاح پله‌ها در حالت تمام استخر بدون برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله و در حالت تمام استخر با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله به ترتیب ۶/۴۴ و ۱۱/۳۲ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۲۱. تغییرات استهلاک انرژی برای سرریزهای اصلاح شده پلکانی سیاه‌بیشه بالا

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر بکارگیری همزمان المان‌هایی بر روی پله و لبه آن به منظور اصلاح فرم هندسی پله‌ها و بهبود عملکرد هیدرولیکی

سرریزهای پلکانی از طریق افزایش میزان استهلاک انرژی جریان انجام گردید. بررسی‌ها شامل الگوی جریان عبوری از مدل‌های اصلاح-شده، عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست، وضعیت هوادهی و نقطه شروع هوادهی بر روی سرریز و میزان استهلاک انرژی جریان در مدل‌های سرریز پلکانی اصلاح شده و مقایسه آن با مدل سرریز پلکانی ساده می‌باشد. در نهایت با مدل‌سازی عددی و پیاده‌سازی المان‌ها و اصلاح پله‌های یک سرریز مورد بهره‌برداری شده (سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا) تأثیر ایجاد المان‌های روی پله و لبه آن بر مشخصه‌های جریان و استهلاک انرژی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج زیر خلاصه‌ای کمی از ارزیابی تحقیق حاضر می‌باشد:

ایجاد المان‌های روی پله و لبه آن بر روی رژیم جریان شکل گرفته بر روی سرریزهای پلکانی تأثیر چندانی ندارد ولی وجود المان‌ها باعث تداخل بیشتر جت‌های جریان عبوری از سرریز پلکانی می‌شود. این امر در شرایط وجود المان‌های برش خورده در لبه پله، تشدیدتر می‌شود. وجود المان‌های روی لبه باعث افزایش ناحیه گردابه‌های چرخشی بر روی پله‌ها می‌گردد.

بکارگیری همزمان المان‌های روی پله و لبه بطور متوسط باعث کاهش  $26/29$  درصدی عمق ثانویه پرش و  $34/24$  درصد در طول پرش نسبت به مدل سرریز پلکانی ساده می‌گردد. عملکرد مدل‌های سرریز اصلاح شده در کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در دبی کم، بهتر است.

وجود موانع بر روی پله و لبه آن، سبب اختلاط بیشتر جریان پس از برخورد با موانع و بالآمدگی جریان می‌گردند که این امر بر روی نقطه شروع هوادهی تأثیرگذار می‌گذارد و باعث انتقال هر چه بیشتر محل نقطه شروع هوادهی به بالادست سرریز پلکانی می‌شود. بکارگیری همزمان موانع بر روی پله‌ها و لبه آن، باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. در بین سرریزهای پلکانی همراه با مانع‌های ترکیبی، مدل سرریز تمام استخر همراه با برش لبه و آرایش المان ترکیبی روی پله، بیشترین کارایی را در میزان استهلاک انرژی دارند. بطور متوسط مدل المان‌های ترکیبی باعث افزایش  $14/38$  درصدی در میزان استهلاک انرژی نسبت به سرریز پلکانی ساده می‌گردد. مقدار متوسط انرژی باقی‌مانده نسبی برای سرریزهای پلکانی همراه با موانع ترکیبی روی پله و لبه آن برابر  $H_{res}/y_c = 2/96$  می‌باشد.

اصلاح پله‌های سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا با الحاق المان‌ها بر روی پله و لبه آن، باعث کاهش سرعت جریان عبوری از سرریز در پله‌های پایین‌دست می‌گردد. سرعت جریان بطور میانگین در پایین‌دست سرریز پلکانی سیاه‌بیشه در اثر اصلاح پله‌ها در حالت تمام استخر بدون برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله و در حالت تمام استخر با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله بطور میانگین به ترتیب در  $6/12$  درصد و  $9/8$  درصد کاهش یافت. تأثیر المان‌های الحاقی در کاهش سرعت جریان عبوری از مدل‌های اصلاح شده در دبی‌های پایین بیشتر است.

شدت تلاطم و انرژی آشفتگی بین پله‌ها، در مدل اصلاح شده به علت برخورد بیشتر جت‌های جریان عبوری از روی پله‌ها با کف آن و تشکیل ناحیه بزرگتر گردابه‌های چرخشی بیشتر از مدل سرریز پلکانی ساده می‌باشد. ایجاد برش در لبه پله و قرار گرفتن المان‌های ترکیبی روی پله بطور متوسط باعث افزایش  $63$  درصدی در میزان TKE بر روی مدل سرریز پلکانی سیاه‌بیشه بالا می‌گردد. کاهش مقادیر TKE در دبی‌های کم، بیشتر اتفاق می‌افتد.

اصلاح پله‌ها با قرارگیری موانع بر روی پله‌ها باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد. بطور میانگین میزان استهلاک انرژی جریان در اثر اصلاح پله‌ها در حالت تمام استخر بدون برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله و در حالت تمام استخر با برش لبه و المان‌های ترکیبی روی پله به ترتیب  $6/44$  و  $11/32$  درصد افزایش یافت.

## سپاس‌گزاری

در تحقیق حاضر، از آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. بدین وسیله نویسندگان مقاله از آقای دکتر رسول دانشفراز، استاد گروه عمران دانشگاه مراغه مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- 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 Farsi)
- Carosi, G. and Chanson. H. 2008. Turbulence characteristics in skimming flows on stepped spillways,



*Canadian Journal of Civil Engineering*. 35 (9): 865–880.

- Chanson, H. and Toombes, L. (2001). Air–water flow down stepped chute: turbulence and end flow structure observations, *International Journal of multiphase Flow*. 28.
- Daneshfaraz, R. Bagherzadeh, M. Ghaderi, A. Di Francesco, S. and Asl, M. M. (2021a). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3451-3459.
- Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Ghaderi, A., Kuriqi, A., & Abraham, J. (2021b). Three-dimensional investigation of hydraulic properties of vertical drop in the presence of step and grid dissipators. *Symmetry*, 13(5), 895.
- Felder S. Guenther P. and Chanson. H. 2012. Air-Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: a Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations. Hydraulic Model Report No. CH87/12, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- 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*. 140 (4): 04014002
- Felder. S. Geuzaine. M. Dewals. B. and Erpicum. S. (2019). Nappe flows on a stepped chute with prototype-scale steps height: Observations of flow patterns, air-water flow properties, energy dissipation and dissolved oxygen. *Journal of Hydro-environment Research*. 27: 1-19.
- Ghaderi, A. Abbasi, S. Abraham, J. and Azamathulla, H.M. (2020). Efficiency of trapezoidal labyrinth shaped stepped spillways. *Flow Measurement and Instrumentation*, 72, 101711.
- Ghaderi, A.; Abbasi, S. and Di Francesco, S. (2021) . Numerical Study on the Hydraulic Properties of Flow over Different Pooled Stepped Spillways. *Water*, 13, 710.
- Ghaderi. A. and Abbasi. S. (2021a). Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendage Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Water*, 13, 957.
- Ghaderi, A., and Abbasi, S. (2021b). Experimental Study of Energy Dissipation over Stepped Spillway with Appendage Elements on the Steps. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(3), 494-509. (In Farsi)
- Gonzalez, C.A. and Chanson, H. (2004). Scale Effects in Moderate Slope Stepped Spillways Experimental Studies in Air-Water Flows, 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia. 560.
- Hamedi. A. Mansoori. A. Malekmohamadi. I. and Roshanaei. H. (2011). Estimating energy dissipation in stepped spillways with reverse inclined steps and end sill. World Environmental and Water Resources Congress. Bearing Knowl Sustain. ASCE.
- Heydari orojlo, S., Mousavi Jahromi, S., Adib, A. (2010). Influence of the steeped spillway slope on the number of optimal steps. *Irrigation Sciences and Engineering*, 33(2), 127-140. (In Farsi)
- Jam, M., Talebbeydokhti, N., and Mardashti, A. (2014). Evaluation of Energy Dissipation over Dentate Blocks Spillway and Comparing the Energy Dissipation with Stepped Spillway. *Journal of Hydraulics*, 9(2), 1-10. (In Farsi)
- Mero. S. and Mitchell. S. (2017). Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways. *Water and Environment Journal*, 31 (1): 127-137.
- Morovati, K. Eghbalzadeh, A. and Soori, S. (2016). Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways. *Civil Engineering Journal*. 2(5), 208-220.
- Nohani. E. bahadoribirgani. B. Jalili. D. and Mirazizi. S. (2015). Study The Effect of The Number of steps on Energy Dissipation of Stepped Spillways in Non-Nappe or Skimming Flow. *Journal of Novel Applied Sciences*. 4 (9): 932-939.
- Rajaratnam, N. (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116: 587–591.
- Rice, C.E. and Kadavy, K.C. (1996). Model study of roller compacted concrete stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASC., 122(6): 292-297.
- Roushangar, K., and Akhgar, S. (2019). Numerical and experimental Study of the influence of Wedge Elements on Roughness and Energy dissipation over stepped spillway. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(1), 78-88. (In Farsi)
- Shahheydari, H. Nodoshan, E. J. Barati, R., and Moghadam, M. A. (2015). Discharge coefficient and energy dissipation over stepped spillway under skimming flow regime. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 19(4), 1174-1182.
- Sohrabi, Z., Sarvarian, J., and Mamizadeh, J. (2020). Development a Two-objective Simulation - Optimization Model for Optimal Design of Geometric Dimensions and Slope of the Stepped Spillway of Upstream

- Siah-Bisheh Dam Using NSGA-II Algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2), 469-478. (In Farsi)
- Sarkamaryan, S. and Ahadiyan, J. (2020). Mathematical modeling of energy loss on Stepped Spillway Using ANSYS-CFX Numerical Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 43(1), 43-56. (In Farsi)
- Torkaman Sarabi, M., Rajaei, S., Gol Kar.Hamzehe Yazd, H. (2020). The Effect of Stone Aggregate Size on Energy loss in Gabion Stepped Spillway. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(4), 1175-1186. (In Farsi)
- Tokyay, N. D. (2005). Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Global Climate Change Conference, EWRI, May 15-19, Anchorage, Alaska, USA, 408(173), 408-416.
- Water Research Institute. (2005). Final report of the hydraulic model of the upper and lower Siah Bisheh dam reserves. Department of Hydraulic Structures, Water Institute, Ministry of Energy, First volume, Iran.