

**R. Daneshfaraz\***

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

**e-mail:** daneshfaraz@maragheh.ac.ir

**A. Ghaderi**

Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

**e-mail:** amir\_ghaderi@znu.ac.ir

**A. R. Bagheri**

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran.

**e-mail:** alirezab57@yahoo.com

## **Experimental Study of Block Geometry on Aeration and Energy Dissipation at Baffled Chutes**

*In the present study, tests were performed on the chute with five different geometric shapes of baffles and at four different distances of baffles rows under different hydraulic conditions. The results showed that the baffles on the chute creates the flow resistance and with increasing turbulence causes the transfer of the inception point to the upstream of the chute and increases the rate of energy dissipation compare to the chute without baffles. Baffle chutes increased the aeration length by 5.8 times and increases the energy dissipation rate by 21 to 61 percent compared to the chute without baffles. In all models, the rate of energy dissipation in low discharges is higher and with increasing discharge, the energy dissipation decreases. By increasing the spaces between the baffles on the chute, the energy dissipation rate decreased in all models. In the M2 model as the superior model, increasing the spaces between the baffle reduces by 3.1% and 4.57% in the energy dissipation rate, respectively. The effect of longitudinal spaces between the baffles on the aeration and the energy dissipation rate is greater than its transverse spaces.*

**Keywords:** Baffled Chutes, Energy Dissipation, Inception point, Spaces between the baffles, Physical model.

---

\* Corresponding author

Received 03 April 2022, Revised 14 July 2022, Accepted 24 July 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.8061.1381

## بررسی آزمایشگاهی مشخصات هندسی بلوک‌ها بر هوادهی و نرخ استهلاک انرژی جریان عبوری از شوت مانع دار

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، به بررسی تاثیر مشخصات هندسی بلوک‌های روی شوت در میزان هوادهی و استهلاک انرژی جریان پرداخته شد. بدین منظور، آزمایش‌ها بر روی یک شوت و با پنج شکل هندسی مختلف از بلوک‌ها و در چهار فواصل طولی و عرضی مختلف نسبت به هم در شرایط هیدرولیکی مختلف انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که ایجاد بلوک بر روی شوت باعث ایجاد سطح مقاومتی در برابر جریان شده و با افزایش آشفتگی باعث انتقال نقطه شروع هوادهی به بالادست شوت و افزایش نرخ استهلاک انرژی نسبت به شوت بدون مانع می‌شود. بطور متوسط ایجاد بلوک بر روی شوت باعث افزایش  $5/8$  برابر طول اختلاط آب و هوا و افزایش  $21$  تا  $61$  درصدی در میزان نرخ استهلاک انرژی در مقایسه با شوت بدون مانع می‌گردد. در تمامی مدل‌ها میزان استهلاک انرژی در دی‌های کم، بیشتر بوده و با افزایش دی، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله طولی و عرضی بین بلوک بر روی شوت، میزان استهلاک انرژی در تمامی مدل‌ها کاهش یافت. بطوریکه در مدل M2 به عنوان مدل برتر، افزایش فاصله طولی و عرضی بین بلوک‌ها به ترتیب باعث کاهش  $3/1$  و  $4/57$  درصد در میزان نرخ استهلاک انرژی می‌گردد. تاثیر فاصله طولی در میزان اختلاط آب و هوا و نرخ استهلاک انرژی جریان عبوری از شوت مانع دار بیشتر از فاصله عرضی آن می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** شوت مانع دار، استهلاک انرژی، نقطه شروع هوادهی، فاصله بین بلوک‌ها، مدل آزمایشگاهی.

### رسول دانشفراز\*

استاد، گروه مهندسی عمران،  
دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

پست الکترونیک:  
[daneshfaraz@maragheh.ac.ir](mailto:daneshfaraz@maragheh.ac.ir)

### امیر قادری

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه  
زنجان، زنجان، ایران.

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

### علیرضا باقری

دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

پست الکترونیک:  
[alirezab57@yahoo.com](mailto:alirezab57@yahoo.com)

جریانی با انرژی جنبشی بالا و دارای قدرت تخریب قابل توجهی است که ممکن است سازه هیدرولیکی مورد نظر را زیر سوال ببرد، بنابراین باید به طریقی انرژی جریان مذکور مستهلك شود [۱]. برای استهلاک انرژی، مستهلك‌کننده‌های مختلفی وجود دارد که از جمله می‌توان انواع حوضچه‌های آرامش و پرتاپ‌کننده جامی اشاره کرد. همچنین در صورتی که بخش عمده‌ای از انرژی در طول شوت سرریز و قبل از رسیدن به پنجه سرریز و رودخانه پایین‌دست آن، مستهلك شود، کاهش ابعادی مستهلك‌کننده‌های مذکور و یا حتی حذف آن را موجب خواهد شد که باعث ساده‌تر و کم هزینه‌تر شدن مسائل فنی و اقتصادی می‌شود [۱]. بطور کلی سازه‌های مستهلك‌کننده انرژی به دو دسته کلی

### ۱- مقدمه

شوت سرریزها برای عبور مطمئن و ایمن جریان پر انرژی آب طراحی می‌شوند. هنگامی که آب از هر نوع سرریزی، توسط شوت از ارتفاع بالا به پایین سرازیر می‌شوند، مقدار زیادی از انرژی پتانسیل آن در تاج سرریز به انرژی جنبشی در پنجه سرریز تبدیل می‌شود و هر چه اختلاف ارتفاع سرریز و پایاب بیشتر باشد، تبدیل انرژی شدیدتر و در نتیجه سرعت جریان بالاتر خواهد بود. چنین

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۴، بازنگری ۱۴۰۱/۰۴/۲۳، پذیرش ۱۴۰۱/۰۵/۰۲.  
DOI: [10.22091/cer.2022.8061.1381](https://doi.org/10.22091/cer.2022.8061.1381)

می‌شود. یکی از مستهلك‌کننده‌های نوع ضربه‌ای استفاده از شوتهای مانع دار است که کاربرد نسبتاً زیادی در شبکه‌های زهکشی روباز دارند [۳]. شکل ۱ نمایی از شوت مانع دار اجرا شده در کانال‌های آبیاری سد درودزن استان فارس را نشان می‌دهد.

مستهلك‌کننده‌های نوع پرش هیدرولیکی و مستهلك‌کننده‌های نوع ضربه‌ای تقسیم می‌شوند [۲]. کاتورانی و کاشفی‌پور، مستهلك‌کننده‌های نوع ضربه‌ای آب را به مانع‌هایی هدایت می‌کنند که باعث انحراف جریان از مسیر مستقیم خود شده و با ایجاد سطوح بالایی از آشفتگی در جریان باعث استهلاک انرژی جریان



شکل ۱- اجرای شوت مانع دار در سیستم آبیاری سد درودزن استان فارس، ایران

کاتورانی و کاشفی‌پور و عملکرد شوتهای همراه با بلوک‌های دندانه‌ای با سرریز پلکانی در میزان استهلاک انرژی جریان توسط جم و همکاران اشاره کرد [۱، ۲ و ۱۱].

دورسان<sup>۴</sup> و همکاران با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، روابطی را برای پیش‌بینی طول نقطه شروع هوادهی بر روی شوتهای همراه با مانع ارائه دادند. نتایج آنان نشان داد که ناحیه هوادهی بر روی شوت همراه با مانع نسبت به سرریز پلکانی بزرگ‌تر بوده و اختلاط آب و هوای بیشتری اتفاق می‌افتد [۱۲]. گرگر<sup>۵</sup> و همکاران با استفاده از چند مدل پیشرفتۀ محاسبات نرم، سعی در پیش‌بینی طول نقطه شروع هوادهی بر روی شوتهای همراه با بلوک در اشکال مختلف از طریق داده‌های آزمایشگاهی داشتند. نتایج آنان نشان داد که تقریباً اکثر مدل‌های محاسبات نرم می‌تواند بعنوان ابزاری کارآمد در پیش‌بینی ویژگی‌های هوادهی بر روی شوتهای مانع دار باشند [۱۳]. راشکی قلعه‌نو و همکاران، استهلاک انرژی در تندا آب همراه با موانع استوانه‌ای مستغرق را بررسی

طراحی فعلی شوتهای مانع دار مبتنی بر مدل‌های فیزیکی توسعه یافته در سال‌های ۱۹۶۰ توسط سازمان احیای اراضی آمریکا و مشاهده پروژه‌های تکمیل شده در طول ۶۰ سال گذشته می‌باشد. با این حال می‌توان با استفاده از روش‌های نوین محاسبات نرم، به طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی و شوتهای مانع دار پرداخت [۴-۸]. اولین مطالعات انجام شده بر روی شوتهای مانع دار توسط پیترکا و رهون<sup>۶</sup> انجام گردید. مطالعات آنان نشان داد ساختار و ابعاد هر بلوک می‌تواند مقدار دبی در واحد عرض طراحی را کنترل کند و منحنی‌های طراحی برای ابعاد بلوک‌های روی شوت ارائه دادند [۹ و ۱۰]. در دهه اخیر نیز مطالعاتی بر روی این نوع از شوتهای مانع دار انجام شده است که می‌توان به بررسی تغییرات فشارهای هیدرولاستاتیکی در شیب‌شکن‌های مایل همراه با بلوک توسط صمدی‌رحیم و همکاران، میزان هوادهی ایجاد شده ناشی از برخورد جریان با بلوک‌های تعییشده بر روی شوت توسط کایا و امیراوغلو<sup>۷</sup>، تاثیر فاصله بلوک‌های تعییشده بر روی شوت بر میزان استهلاک انرژی توسط

<sup>4</sup> Dursun

<sup>5</sup> Gerger

<sup>2</sup> Peterka and Rhone

<sup>3</sup> Kaya and Emiroglu

بلوکهایی بر روی شیب شکن، عمق پایین دست و میزان استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد. همچنین عدد فرود ورودی به حوضچه آرامش از محدوده ۷/۵-۴/۷ به ۱/۴۵ کاهش می‌یابد [۱۸].

با بررسی تحقیقات پیشین انجام شده در خصوص شوت‌ها و شیب‌شکن‌های مایل و ضرورت کاربرد این نوع سازه‌ها در کانال‌های آبیاری و زهکشی برای تبدیل شیب تند زمین به شیب طراحی، می‌توان گفت یکی از معایب این سازه‌ها افزایش انرژی جنبشی در پایین دست آن‌ها می‌باشد. لذا ایجاد بلوک بر روی کف این نوع از سازه‌ها می‌تواند عملکرد آن‌ها را در برابر افزایش میزان استهلاک انرژی بهبود بخشد. آنچه در طراحی شوت‌های منع‌دار مهم است، بررسی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی موثر بر عملکرد این نوع از سازه‌ها می‌باشد که متاسفانه توجه کمی در این موضوع انجام شده است و اکثر توجه طراحان به نمودارهای طراحی ارائه شده در دهه‌های گذشته می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر تاثیر اشکال مختلفی از بلوک‌ها در فواصل مختلف طولی و عرضی شوت بر مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از شوت منع‌دار بررسی گردید. هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان استهلاک انرژی و نقطه شروع هواده‌ی بر روی شوت‌های منع‌دار با در نظر گرفتن اشکال مختلفی از بلوک‌ها در فواصل مختلف طولی و عرضی شوت و در دیهای مختلف جریان می‌باشد.

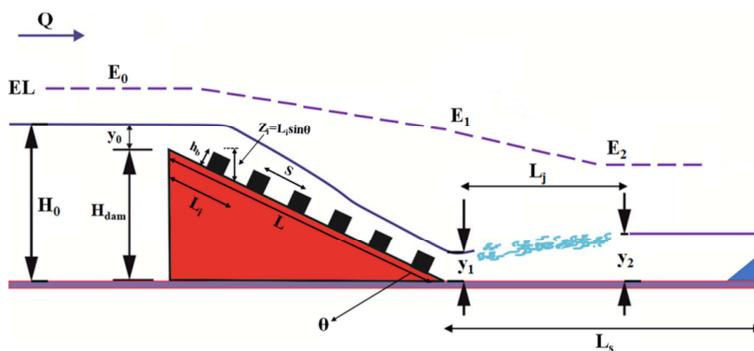
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای مؤثر بر استهلاک انرژی جریان در پایین دست شوت منع‌دار اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی، شامل پارامترهای بدون بعد استخراج شد. در شکل (۲) پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر استهلاک انرژی شوت منع‌دار ارائه شده است.

کردند. نتایج آنان نشان داد که مقدار افت انرژی در همه شیب‌های تندا آب با افزایش عمق نسبی بحرانی دارای روند نزولی می‌باشد. همچنین در مدل‌های با موانع بستر، میزان استهلاک انرژی از ۱۶ تا ۳۹ درصد نسبت به مدل شاهد افزایش داشته است [۱۴]. نوگرهو<sup>۶</sup> و همکاران با تغییر در محل بلوک‌ها در راستای طولی شوت، مقدار استهلاک انرژی جریان را نسبت به شوت بدون مانع بررسی و مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که ایجاد مانع بر روی شوت، باعث ایجاد آشفتگی زیاد در طول شوت می‌شود. میزان استهلاک انرژی جریان بر روی شوت منع‌دار در مقایسه با شوت بدون مانع بیشتر است. بیشترین استهلاک انرژی زمانی اتفاق می‌افتد که عمق جریان برابر با ارتفاع بلوک‌ها باشد. طول پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شوت منع‌دار بین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۵]. کریمی چهار طاقی تاثیر زاویه دیواره شوت بافل دار در میزان استهلاک انرژی جریان و مقدار آبستگی در پایین دست شوت پرداختند. مشاهده کردند که با افزایش زاویه دیواره شوت، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد فرود، مقدار عمق آبستگی در پایین دست برای تمامی زوایای دیواره افزایش می‌یابد [۱۶]. دانشفراز و همکاران تاثیر ایجاد المان‌های ایجاد شده بر روی شیب‌شکن مایل را بر مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از آن بررسی کردند. مشاهده کردند که ایجاد المان بر روی شیب‌شکن مایل تا ۸۸ درصد میزان انرژی جریان عبوری را مستهلك می‌کند. همچنین با افزایش عمق نسبی بحرانی، عمق پایاب و طول پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب‌شکن مایل همراه با المان افزایش می‌یابد [۱۷]. همچنین محققان بصورت عددی تاثیر پارامترهای هندسی بلوک‌های تعییه شده بر روی شیب‌شکن مایل را در میزان استهلاک انرژی جریان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با تعییه

<sup>۶</sup> Nugroho



شکل ۲- پارامترهای هندسی و هیدرولیکی شوت مانع دار

در این رابطه،  $Fr$  عدد فرود بالادست شوت می‌باشد. برای محاسبه استهلاک انرژی، می‌بایست انرژی مخصوص در مقاطع مختلف جریان (i) محاسبه شود. که براساس رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$E_i = y_i + \frac{(V_i^2)}{2g} \quad (3)$$

در این رابطه،  $E_i$  انرژی مخصوص (متر)،  $V_i$  سرعت آب (متر بر ثانیه) و از رابطه  $V_i = \frac{q}{A}$  قابل محاسبه است،  $y_i$  عمق آب و  $g$  شتاب گرانش (متر بر مجدور ثانیه) می‌باشد. همچنین برای محاسبه عمق آب در پایین دست شوت، از طریق روابط بین اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش و برای محاسبه عدد فرود در پنجه شوت از روابط زیر استفاده گردید [۲۱].

$$E_0 = H_{dam} + 1.5y_c \quad (4)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr_2^2} - 1) \quad (5)$$

$$Fr_1 = \frac{q}{y_1\sqrt{gy_1}} \quad (6)$$

رابطه (۷) نشان‌دهنده میزان استهلاک انرژی ناشی از بلوک‌های روی شوت می‌باشد.

$$\Delta E_0 = E_0 - E_1 \quad (7)$$

## ۲-۲- مدل‌ها و تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها این تحقیق در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۱۲، عرض ۱/۲، ارتفاع ۰/۸ متر

در این شکل (Q) دبی جریان (لیتر بر ثانیه)، ( $y_c$ ) عمق بحرانی (متر)، ( $H_{dam}$ ) ارتفاع شوت (متر)، ( $L$ ) طول شوت (متر)، ( $H$ ) ارتفاع بلوک (متر)، ( $S$ ) فاصله طولی بلوک‌ها (متر)، ( $S_w$ ) فاصله عرضی بلوک (متر)، ( $E_0$ ) انرژی در بالادست شوت (متر)، ( $E_1$ ) انرژی جریان در پنجه شوت (متر)، ( $\theta$ ) زاویه شوت سریز،  $\sigma$  کشش سطحی (نیوتن بر مترمربع)، ( $p$ ) چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، ( $\mu$ ) لزوجت دینامیکی (مترمربع بر ثانیه) و (g) شتاب گرانش زمین (متر بر مجدور ثانیه) می‌باشد. با استفاده از روش پی-باکینگهام تحلیل ابعادی صورت گرفت. سه پارامتر ( $y_c$ ) عمق آب پایین‌دست سریز، ( $\mu$ ) لزوجت دینامیکی و (g) شتاب گرانش زمین به عنوان پارامتر تکراری انتخاب شدند و معادله بدون بعد زیر، حاصل گردید.

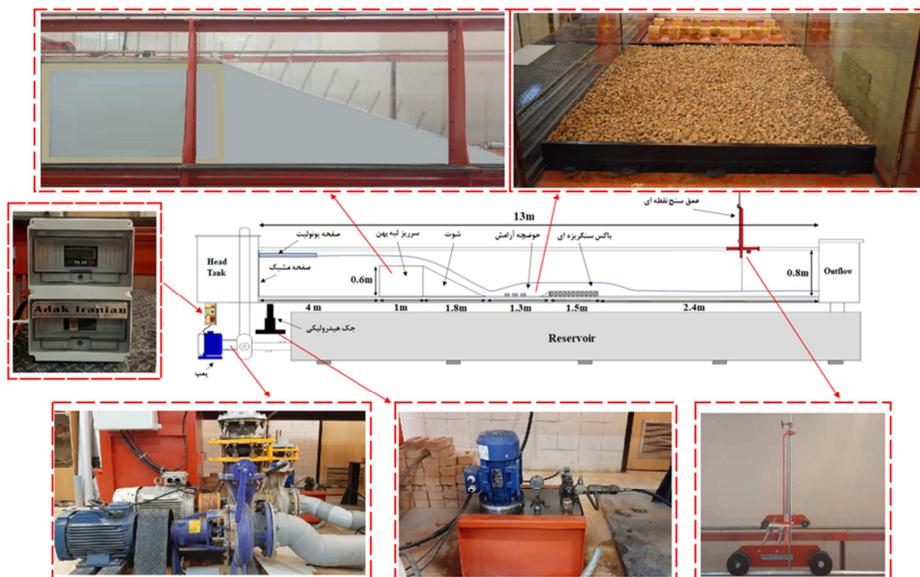
$$f_2\left(\frac{\Delta E}{E_1}, \frac{H_{dam}}{y_c}, \frac{L}{y_c}, \frac{H}{y_c}, \frac{S_l}{y_c}, \frac{S_w}{y_c}, Fr, Re, We, \theta\right) = 0 \quad (1)$$

با توجه به اینکه زاویه شوت، طول شوت و ارتفاع بلوک‌ها در تحقیق حاضر ثابت می‌باشد، می‌توان از رابطه بالا حذف شوند. همچنین با توجه به اینکه ارتفاع آب بر روی لبه شوت در تمامی مدل‌ها بیشتر از ۴ سانتی‌متر می‌باشد، از تاثیر کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر می‌توان صرف‌نظر کرد [۱۹ و ۲۰]. به دلیل ماهیت آشفته جریان از تاثیر لرجت نیز صرف‌نظر می‌شود. لذا رابطه (۱) به رابطه (۲) خلاصه می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_3(Fr, \frac{H_{dam}}{y_c}, \frac{S_l}{y_c}, \frac{S_w}{y_c}) \quad (2)$$

شده در ابتدای فلوم استفاده شد. عمق جریان توسط عمق سنج نقطه‌ای با دقت  $0/1$  میلی‌متر و دبی جریان ورودی کanal توسط دبی‌سنج التراسونیک با دقت  $0/01$  لیتر بر ثانیه که بر روی لوله ورودی جریان به فلوم نصب شده بود اندازه‌گیری شد.

و با کف فلزی و دیواره‌هایی از جنس شیشه به ضخامت  $1$  سانتی‌متر که رفتار جریان به خوبی قابل مشاهده و عکس‌برداری باشد، انجام شد. جریان مورد نیاز توسط پمپی با توان  $55$  لیتر بر ثانیه از مخزن اصلی به کanal هدایت می‌شود. برای جلوگیری از تلاطم جریان در مقطع ورودی به کanal از چند لایه صفحه مشبک (توری) تعییه



شکل ۳- شماتیک کلی از فلوم آزمایشگاهی و جاگذاری شوت مانع‌دار در داخل آن

جلوگیری از فرسایش در پایین‌دست حوضچه آرامش و ایجاد پرش در داخل حوضچه آرامش از یک باکس سنگریزهای به طول  $1/5$  متر طول و عرض  $1/2$  متر و با ضخامت  $0/08$  متر پر شده از ذرات با قطر متوسط  $50\text{d}$  برابر  $0/025$  متر در نظر گرفته شد [۲۴]. آزمایش‌ها در  $5$  مدل شوت مانع‌دار و در دو فاصله طولی و عرضی مختلف و براساس نسبتی از ارتفاع بلوك (H) انجام گردید و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۴ نمایی از مدل‌های بلوك تعییه شده بر روی شوت و نحوه چیدمان آن‌ها را نشان می‌دهد. مشخصات هیدرولیکی جریان در آزمایش‌ها تحقیق حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

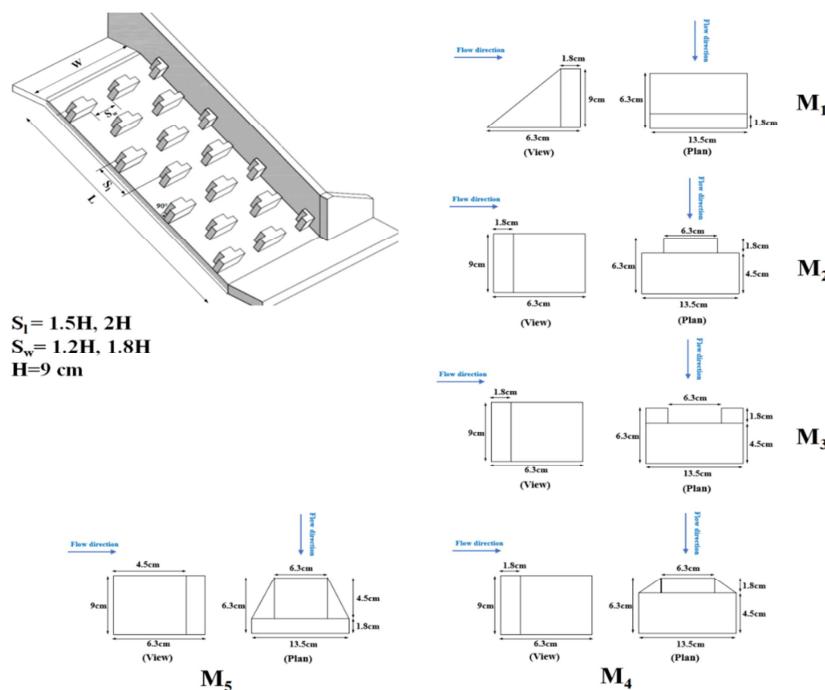
### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۱-۳- مشخصات هواهدی بر روی شوت مانع‌دار

تمامی آزمایش‌ها بر روی مدل یک شوت با شیب  $26/6$  درجه و ارتفاع و طول به ترتیب  $0/6$  و  $1/34$  متر ساخته شده از جنس فوم فشرده نسبتاً سخت (به دلیل امکان برش دقیق و راحت) با ضخامت  $0/015$  متر انجام شد. سرریز لبه‌پهن به طول و ارتفاع به ترتیب  $1$  و  $0/6$  متر و هم عرض کanal برای کنترل دبی استفاده شد [۲۲]. برای تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین‌دست مدل‌های شوت مانع‌دار، یک حوضچه آرامش تیپ ۳ براساس معیارهای طراحی USBR و برای جریان ورودی با عدد  $1/3$  فرود  $8$  طراحی شد. از این رو حوضچه آرامش دارای  $1/2$  متر عرض و با سه ردیف بلوك‌های  $0/045$  متر طول،  $1/2$  متر عرض و با سه ردیف بلوك‌های غیرممتد مکعبی شکل از جنس چوب به ارتفاع  $0/08$  متر (در ردیف‌های اول و سوم هفت بلوك و در دریف دوم شش بلوك) در یک شیب افقی و با آب‌پایه‌ای انتهایی مثلثی شکل به ارتفاع  $0/08$  متر انجام گردید [۲۳]. جهت

شوت، همواره بر روی شوت نواحی اختلاط آب و هوا (جريان دو فازی) وجود دارد.

با توجه به عملکرد مستهلك کننده‌های نوع ضربه‌ای مانند شوت‌های مانع‌دار و انحراف جريان عبوری از روی شوت در اثر برخورد به بلوک‌های تعبييیه شده بر روی کف



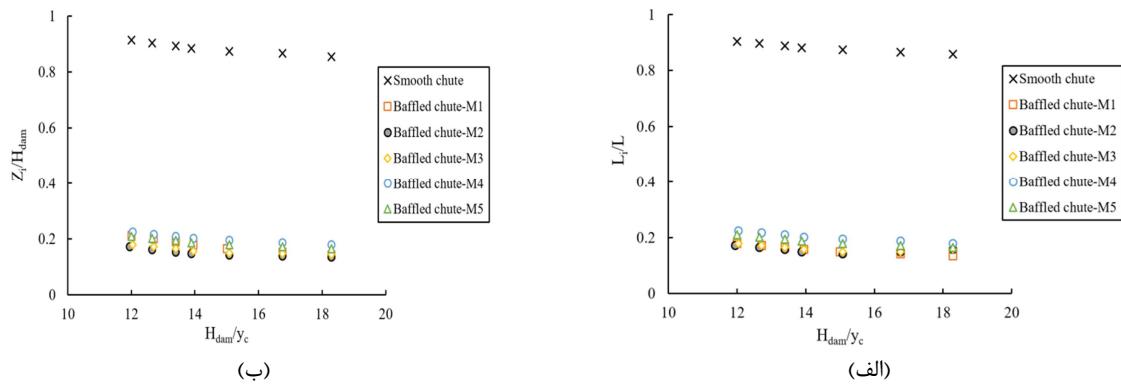
شکل ۴- مدل‌های بلوک استفاده شده بر روی شوت تحقیق حاضر

جدول ۱- پارامترهای مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شده در تحقیق حاضر

شماره مدل	دی (Q-Lit/s)	شيب شوت (-θ)	(y <sub>c</sub> -m)	عمق بالادست (H <sub>l-m</sub> )	عدد فرود (Fr)	فواصل طولی بلوک‌ها (S <sub>l-m</sub> )	فواصل عرضی بلوک‌ها (S <sub>w-m</sub> )
M1 M5	۵۳ ۲۵	۲۶/۶	۰/۰۵ تا ۰/۰۲۸	۰/۱۰۴ تا ۰/۰۶۲	۱۰/۷ تا ۳/۱	۰/۱۳۵ تا ۰/۱۸ و ۰/۱۶۲	۰/۱۰۸ و ۰/۱۶۲

بعد  $L_i/L$  برای تعیین طول شروع هوادهی و پارامتر بدون بعد  $Z_i/H_{\text{dam}}$  برای تعیین فاصله قائم با تاج شوت نسبت به پارامتر بدون بعد  $(H_{\text{dam}}/y_c)$  استفاده کرد.  $Z_i$  فاصله قائم نقطه شروع هوادهی از تاج شوت،  $H_{\text{dam}}$  ارتفاع شوت و  $y_c$  عمق بحرانی می‌باشد. در شکل ۵ نتایج برداشت شده داده‌های مربوط به نقطه شروع هوادهی برای شوت‌های با مانع و شوت بدون مانع ارائه گردید. مشاهده می‌شود که برای تمامی مدل‌ها، نسبت  $L_i/L$  و  $Z_i/H_{\text{dam}}$  با افزایش دبی (افزایش  $y_c$ ) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش دبی، نقطه شروع هوادهی به سمت پایین دست شوت کشیده می‌شود.

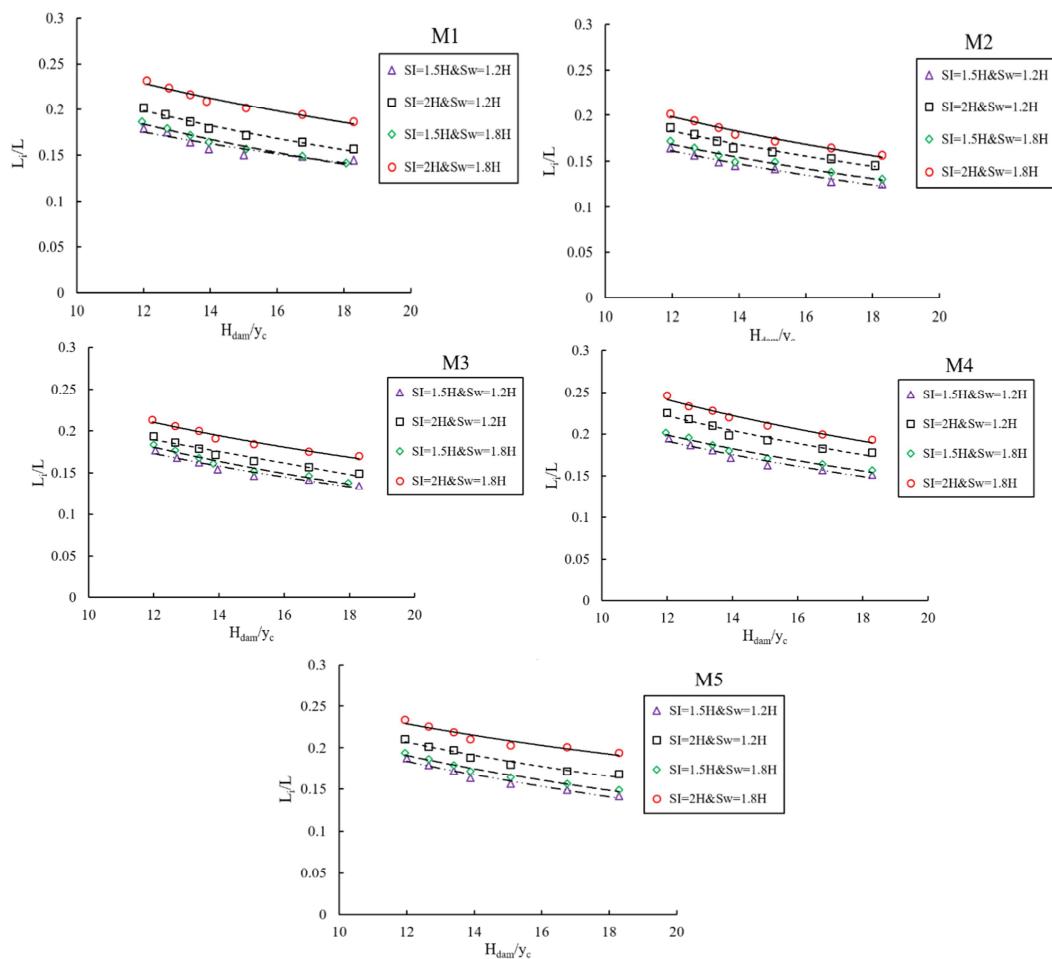
وجود نواحی دوفازی از ایجاد پدیده مخرب کاویتاسیون بر روی شوت و اطراف بلوک‌ها جلوگیری می‌کند. طول شوت ( $L$ ) را می‌توان به دو بخش: بخش اول طول هوادهی نشده ( $L_i$ ) و بخش دوم طول هوادهی شده ( $L_a$ ) تقسیم کرد. مرز بین این دو بخش از طریق نقطه شروع هوادهی تعیین می‌گردد. نقطه‌ای که حباب‌های هوا در داخل جريان قابل مشاهده می‌باشد. شناسایی طولی از شوت که اختلاط آب و هوا در آن محل اتفاق نمی‌افتد، برای جلوگیری از احتمال پدیده کاویتاسیون امری مهم می‌باشد [۲۵]. برای بررسی نقطه شروع هوادهی جريان عبوری از مدل‌های شوت مانع‌دار، می‌توان از پارامتر بدون



شکل ۵- تغییرات نسبت بی بعد (الف) طول و (ب) ارتفاع هوادهی نشده به ارتفاع نسبی شوت

هوادهی را در بین مدل‌ها دارد. در شکل ۶ تاثیر فواصل طولی و عرضی بلوک‌های روی شوت را بر روی نقطه شروع هوادهی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای تمامی مدل‌ها و در یک فاصله عرضی ثابت از بلوک‌ها، با افزایش فاصله طولی بین بلوک‌ها، نقطه شروع هوادهی به پایین‌دست شوت کشیده می‌شود.

همچنین بر روی شوت بدون مانع، نقطه شروع هوادهی تقریباً در انتهای آن آغاز می‌شود. بطور متوسط ایجاد بلوک بر روی شوت باعث افزایش  $5/8$  برابری طول اختلاط آب و هوا بر روی شوت می‌گردد. در بین مدل‌های شوت همراه با مانع، مدل  $M_2$  نسبت به مدل‌های دیگر باعث اختلاط بیشتری از آب و هوا در طول شوت شده است. این در حالی است که مدل  $M_4$  کمترین طول



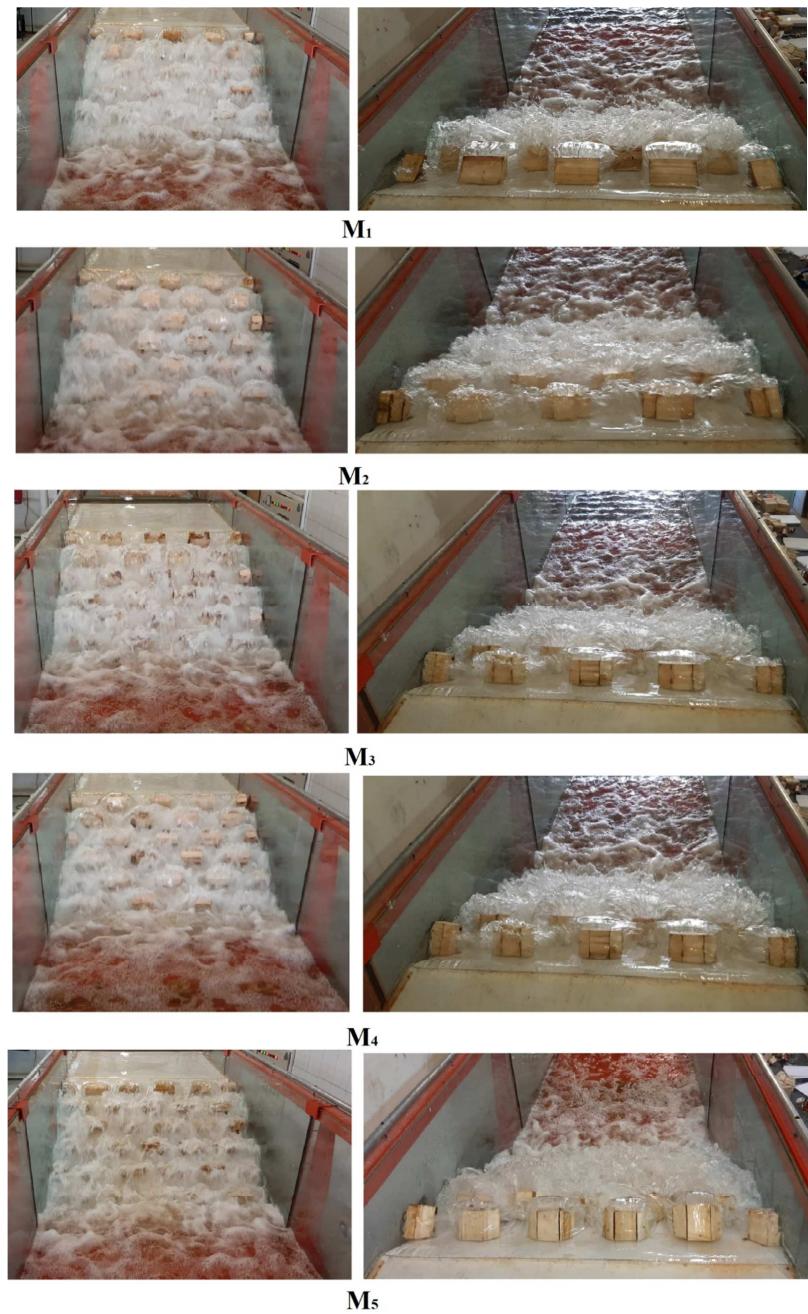
شکل ۶- مقایسه تاثیر فواصلی طولی و عرضی بلوک‌ها بر مشخصات هوادهی جریان روی شوت

M4 که در بین مدل‌ها کمترین طول اختلاط آب و هوا را دارد، افزایش می‌یابد. در تمامی مدل‌ها با افزایش دبی، نقطه شروع هوادهی به پایین‌دست شوت کشیده می‌شود.

### ۲-۳- استهلاک انرژی بر روی شوت مانع دار

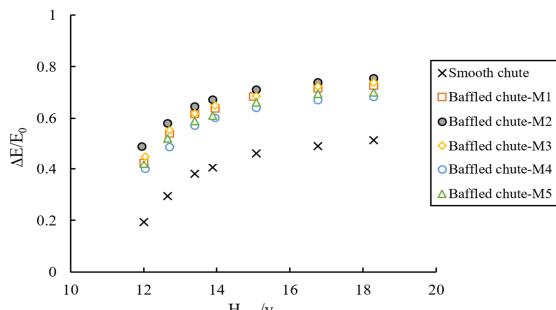
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ایجاد بلوک بر روی شوت، باعث برخورد جریان با یلوک‌ها شده و در نتیجه شدت آشفتگی و اختلاط آب و هوا را در طول شوت افزایش می‌دهد.

به عبارت دیگر، با افزایش فاصله طولی بین بلوک‌ها، طول ناحیه هوادهی نشده افزایش می‌یابد. همچنین برای یک فاصله طولی ثابت بین بلوک‌ها، با افزایش فاصله عرضی بین آن‌ها، طول هوادهی بر روی شوت کاهش می‌یابد. برای یک مدل از شکل‌های بلوک‌ها، تاثیر فاصله بلوک‌های طولی بر طول اختلاط آب و هوا بیشتر از فاصله عرضی می‌باشد. در بین مدل‌ها، مدل M2 بیشتر از سایر مدل‌ها باعث اختلاط آب و هوا می‌گردد. بطوریکه در مدل M2 طول اختلاط آب و هوا ۱۸/۵۵ درصد نسبت به مدل



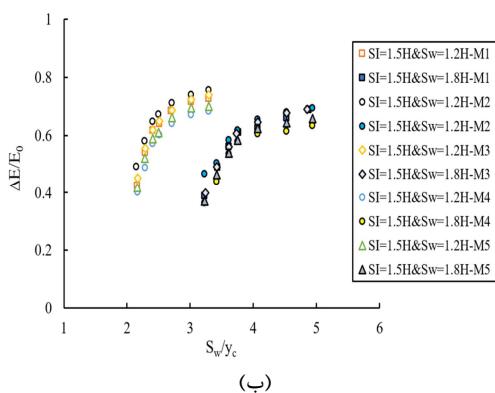
شکل ۷- جریان عبوری از مدل‌های شوت مانع دار و اختلاط آبی و هوا بر روی شوت و حوضچه آرامش

بهترین عملکرد و مدل M4 ضعیفتر از سایر مدل‌ها در استهلاک انرژی جریان عبوری از روی شوت نقش داشتند.



شکل ۸- مقایسه میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از مدل‌های شوت مانع دار و شوت بدون مانع

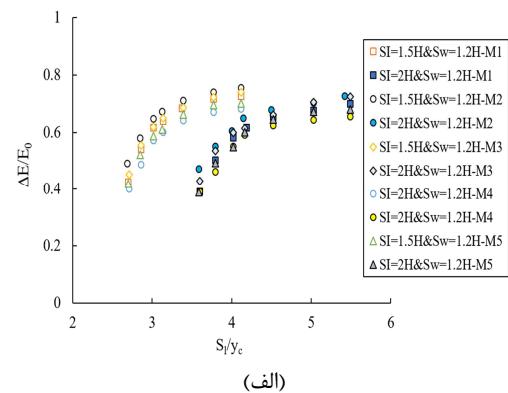
در شکل ۹ تاثیر فاصله‌های عرضی و طولی بلوک‌های روی شوت را بر روی استهلاک انرژی جریان نشان می‌دهد. در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله بین بلوک‌ها در راستای طولی، میزان استهلاک انرژی برای تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. علت آن می‌تواند کاهش تعداد بلوک‌ها با افزایش فاصله آن‌ها در یک طول مشخص و کاهش سطح برخورد جریان با مدل‌ها باشد. برای مثال برای مدل‌های M1 و M5 افزایش فاصله طولی بلوک‌ها از  $H = 2H$  (به  $2H + 1.5H$  بلوک) میزان استهلاک انرژی جریان به ترتیب  $5/33$  و  $4/28$  درصد کاهش یافت. با مشاهده شکل ۹-ب می‌توان گفت که برای یک فاصله ثابت طولی بین بلوک‌ها، با افزایش فاصله عرضی میان آنها، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. نرخ کاهش استهلاک انرژی با افزایش دبی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقایسه استهلاک انرژی مدل‌های شوت مانع دار فواصل (الف) طولی و (ب) عرضی مختلف

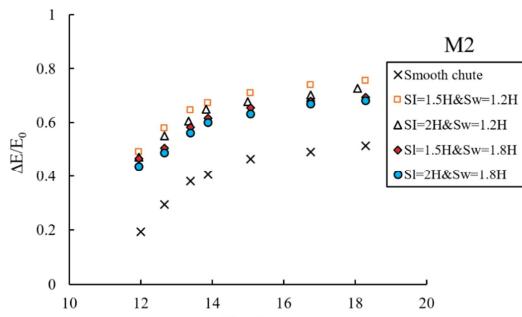
بطوریکه جریان به هنگام ورود به حوضچه آرامش همراه با حباب‌های هوا و کف می‌باشد. طبق نتایج مربوط به بخش هوادهی، تراکم و فواصل بین بلوک در راستای عرضی و طولی بر شدت هوادهی و اختلاط آب و هوا نقش مهمی دارد. لذا انتظار می‌رود که تراکم بین بلوک‌ها به عنوان عاملی در برابر جریان بر میزان استهلاک انرژی جریان عبوری از روی شوت مانع دار نیز تاثیرگذار باشد. لذا در این بخش ابتدا تاثیر ایجاد بلوک بر روی شوت در میزان استهلاک انرژی جریان با حالت شوت بدون مانع مقایسه می‌شود. سپس تاثیر فواصل عرضی و طولی بلوک‌ها بر عملکرد شوت‌های مانع دار در میزان استهلاک انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در شکل ۸، تغییرات مقدار استهلاک انرژی در برابر نسبت  $y_c/H_{\text{dam}}$  برای مدل شوت صاف و مدل‌های شوت مانع دار ارائه شده است. مشاهده می‌شود که ایجاد بلوک بر روی شوت باعث افزایش مقدار استهلاک انرژی نسبت به شوت بدون مانع می‌گردد. بطوریکه میزان اختلاف بین استهلاک انرژی مدل‌های شوت مانع دار با حالت بدون مانع، بین ۲۱ تا ۶۱ درصد متغیر می‌باشد. میزان استهلاک انرژی در دبی‌های کم، بیشتر بوده و با افزایش دبی (افزایش  $y_c$ ) میزان استهلاک انرژی در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. علت آن می‌تواند کاهش اثر بلوک‌ها بعنوان عاملی در برابر جریان و درنتیجه کاهش نیروی درگ باشد، که در نتیجه استهلاک کمتری اتفاق می‌افتد. با مقایسه اشکال مختلف بلوک‌ها بر روی شوت، مدل M2



(الف)

نشان می‌دهد. در این جدول می‌توان تاثیر ایجاد بلوک بر روی شوت و تاثیر هر کدام از فواصل طولی و عرضی بلوک‌ها را مشاهده کرد.



شکل ۱۰- مقایسه میزان استهلاک انرژی مدل شوت مانع دار برتر نسبت به شوت بدون مانع در فواصل طولی و عرضی مختلف

برای مثال، در مدل‌های M3 و M4 با افزایش فاصله عرضی بلوک‌ها از  $1.2H$  به  $1.8H$ ، میزان استهلاک انرژی جریان به ترتیب  $7/93$  و  $4/57$  درصد کاهش می‌یابد. با دقت در شکل ۱۰ می‌توان بیان کرد که تاثیر فاصله طولی در استهلاک انرژی جریان عبوری از شوت مانع دار بیشتر از فاصله عرضی آن می‌باشد. بطوریکه در مدل M2 بعنوان مدل برتر در استهلاک انرژی جریان نسبت به سایر مدل‌ها، کاهش فاصله طولی بلوک‌ها از  $2H$  به  $1.5H$  باعث کاهش  $3/1$  درصد و کاهش فاصله عرضی بلوک‌ها از  $1.2H$  به  $1.8H$  باعث کاهش  $4/57$  درصد در میزان استهلاک انرژی جریان دارد.

در جدول ۲ خلاصه نتایج درصد افزایش استهلاک انرژی نسبی مدل M2 را نسبت به مدل شوت بدون مانع

جدول ۲- افزایش استهلاک انرژی (درصد) در مدل شوت مانع دار برتر نسبت به مدل بدون مانع

دبی (لیتر بر ثانیه)							مدل M2
۵۴	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	
۶۱	۴۹/۳۱	۴۱/۰۹	۳۹/۷۷	۳۴/۶۳	۳۳/۵۰	۳۱/۹۷	$S_l=1.5H, S_w=1.2H$
۵۸/۸۸	۴۶/۶۳	۳۷	۳۷/۶۲	۳۱/۵۳	۳۰	۲۹/۲۶	$S_l=2H, S_w=1.2H$
۵۷/۸۴	۴۱/۷۵	۳۴/۶۸	۳۴/۲۸	۲۹	۲۷/۶۵	۲۵/۸۰	$S_l=1.5H, S_w=1.8H$
۵۵/۵۵	۳۹/۸۴	۳۲/۰۷	۳۲/۵۵	۵۰۲۶	۲۶/۴۱	۲۴/۶۰	$S_l=2H, S_w=1.8H$

#### افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. اهم نتایج تحقیق حاضر

به شرح زیر می‌باشد:

۱- نتایج مربوط به نقطه شروع هوادهی برای مدل‌های شوت با مانع و بدون مانع نشان داد که با افزایش دبی، نقطه شروع هوادهی به سمت پایین‌دست شوت کشیده می‌شود. همچنین بر روی شوت بدون مانع نقطه شروع هوای تقریبا در انتهای آن آغاز می‌شود. بطور متوسط ایجاد بلوک بر روی شوت باعث افزایش  $5/8$  برابر طول اختلاط آب و هوا بر روی شوت می‌گردد.

۲- با افزایش فاصله طولی و عرضی بین بلوک‌ها، طول ناحیه هوادهی نشده افزایش می‌یابد. در بین مدل‌ها، مدل M2 بیشتر از سایر مدل‌ها باعث اختلاط آب و هوا شد. بطوریکه در مدل M2

هدف از تحقیق حاضر بررسی و مقایسه اثر بلوک‌های روی شوت بر میزان استهلاک انرژی جریان در شرایطی هندسی و هیدرولیکی مختلف نسبت به شوت بدون مانع می‌باشد. آزمایش‌ها در ۵ مدل مختلف از شکل هندسی بلوک‌ها و در چهار فواصل طولی و عرضی مختلف بین بلوک‌ها و بر روی شوت انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بر روی مدل‌ها، نشان داد که ایجاد بلوک بر روی شوت باعث ایجاد سطح مقاومتی در برابر جریان شده و با برخورد جریان به بلوک‌ها و انحراف آن‌ها از مسیر موازی روی شوت، باعث افزایش آشفتگی و اختلاط آب و هوا می‌شود و در نتیجه نسبت به شوت بدون مانع نرخ استهلاک انرژی

#### ۴- نتیجه‌گیری

۵- با افزایش فاصله طولی و عرضی بین بلوك بر روی شوت، میزان استهلاک انرژی در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد. بطوریکه در مدل M2 به عنوان مدل برتر، افزایش فاصله طولی و عرضی بین بلوك‌ها به ترتیب باعث کاهش ۳/۱ و ۴/۵٪ درصد در میزان نرخ استهلاک انرژی می‌گردد. علت آن کاهش تعداد بلوك در راستای طولی و عرضی شوت بوده که سطح برخورد جریان با بلوك‌ها و مقاومت در برابر جریان را کاهش می‌دهد.

۶- تاثیر فاصله طولی در میزان اختلاط آب و هوا و نرخ استهلاک انرژی جریان عبوری از شوت مانع دار بیشتر از فاصله عرضی آن می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده فواصل طولی و عرضی موانع بر روی عملکرد هیدرولیکی شوت‌های مانع دار موثر هستند. لذا در مباحث بهینه‌سازی طراحی سازه‌های هیدرولیکی، می‌توان با بهره‌بردن از روش‌های نوین محاسبات نرم، فواصل طولی و عرضی بهینه بلوك‌ها، برای رسیدن به میزان استهلاک انرژی بیشتر جریان عبوری از شوت‌های مانع دار را در راستای ادامه تحقیق حاضر انجام داد.

طول اختلاط آب و هوا ۱۸/۵۵ درصد نسبت به مدل M4 که در بین مدل‌ها کمترین طول اختلاط آب و هوا را دارد، افزایش می‌یابد.

۳- در تمامی مدل‌های شوت همراه با مانع، استهلاک انرژی در تمامی دبی‌ها بیشتر از شوت بدون مانع بوده و اختلاف بین نرخ استهلاک انرژی در مدل‌های شوت با مانع نسبت به شوت بدون مانع، بین ۲۱ تا ۶۱ درصد می‌باشد. در تمامی مدل‌ها میزان استهلاک انرژی در دبی‌های کم، بیشتر بوده و با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

۴- برای هر مدل شوت همراه با مانع، اختلاف بیشتر بین نرخ استهلاک انرژی نسبت به شوت بدون مانع در دبی‌های بالا اتفاق می‌افتد. با مقایسه میزان استهلاک انرژی در بین اشکال هندسی مختلف بین بلوك‌ها، مدل M2 به دلیل موقعیت هندسی و جهت‌گیری بهتر در برابر جریان و با ایجاد مقاومت بیشتر در برابر جریان، بهترین عملکرد و مدل M4 ضعیف‌ترین عملکرد را از خود نشان دادند.

## مراجع

- [1] Kaya, N., and Emiroglu, M.E. (2010). Study of oxygen transfer efficiency at baffled chutes. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 163(9), 447-456.
- [2] Katorani, S., Kashefipoor, S. (2014). Effect of the Geometric Characteristics of Baffled and Bed Slopes of Drop on Hydraulic Flow Conditions in Baffled Apron Drop. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), 51-59.
- [3] Rafiei, H., Bazargan, J., Babakhani, A. (2020). Numerical Study of the Effective Parameters on the Energy Dissipation Rate of the Baffled Chutes. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(3), 796-806.
- [4] Shafagh, M., Dezvareh, R. (2021). Support vector machine for classification and regression of coastal sediment transport. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1-20.
- [5] Choubin, B., Darabi, H., Rahmati, O., Sajedi-Hosseini, F., Kløve, B. (2018). River suspended sediment modelling using the CART model: A comparative study of machine learning techniques. *Science of the Total Environment*, 615, 272-281.
- [6] Dezvareh, R. (2019). Application of Soft Computing in the Design and Optimization of Tuned Liquid Column–Gas Damper for Use in Offshore Wind Turbines. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 2(4), 47-57.
- [7] Dezvareh, R. (2019). Providing a new approach for estimation of wave set-up in Iran coasts. *Research in marine sciences*, 4(1), 438-448.
- [8] Shafagh, M., Dezvareh, R. (2020). Predicting the sediment rate of Nakhilo Port using artificial intelligence. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 4(2), 41-49.

- [9] Peterka, A. (1964). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Engineering Monograph No 25 U.S. *Department of Interior Bureau of Reclamation*, 154-188.
- [10] Rhone, L.J. (1971). Studies to Determine the Feasibility of a Baffled Apron Drop as a Spillway Energy Dissipator-Conconully Dam Spillway-Okanogan Project. Washington U.S. *Bureau of Reclamation Report REC-ERC-71-29*.
- [11] Jam, M., Talebbeydokhti, N., 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. doi: 10.30482/jhyd.2014.8548.
- [12] Dursun, O. F., Talu, M.F., Kaya, N., and Alcin, O.F. (2016). Length prediction of non-aerated region flow at baffled chutes using intelligent nonlinear regression methods. *Environmental Earth Sciences*, 75(8), 680.
- [13] Gerger, R., Kisi, O., Faruk Dursun, O., and Emin Emiroglu, M. (2017). Applicability of several soft computing approaches in modeling oxygen transfer efficiency at baffled chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(5), 04016085.
- [14] Rashki Ghaleno, M., Azhdary Moghadam, M., Azizyan, G., Khalifehei, K. (2018). Numerical Simulation of Chute Energy Dissipation with Submerged Cylindrical Obstacle using Flow 3D Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), 17-28. doi: 10.22055/jise.2018.13748
- [15] Nugroho, J., Soekarno, I., & Soeharno, A. W. H. (2019). Experimental Study of Energy Dissipation at Baffled Chute Spillway. *Jurnal Teoretik dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 26(1), 33-37.
- [16] Karimi Chahartaghi, M., Nazari, S., and Babarsad, M. S. (2020). Investigating the Effects of the Block Geometries and Sidewall Divergences on the Local Scour Downstream of Baffled Chute Spillways. *Advances in Civil Engineering*.
- [17] Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Kuriqi, A., Najibi, A., and Ricardo, A. M. (2021). Laboratory Investigation of Hydraulic Parameters on Inclined Drop Equipped with Fishway Elements. *Symmetry*, 13(9), 1643.
- [18] Daneshfaraz, R., Aminvash, E., Di Francesco, S., Najibi, A., and Abraham, J. (2021). Three-Dimensional Study of the Effect of Block Roughness Geometry on Inclined Drop. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(1), 1-9.
- [19] Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Torabi, M., Abraham, J., and Azamathulla, H. M. (2020). Experimental investigation on effective scouring parameters downstream from stepped spillways. *Water supply*, 20(5), 1988-1998.
- [20] Shishegaran, A., MohammadKhani, M., Tavakoli, M. (2020). Determination of Discharge Flow in Unit Width for the Distinction of Nappe and Skimming Flow in Stepped Spillway Using Flow 3d (Case Study: Siah Bishe Dam). *Civil Infrastructure Researches*, 5(2), 165-177.
- [21] Daneshfaraz, R., Majedi-Asl, M., Mortazavi, S., Bagherzadeh, M. (2022). Laboratory evaluation of energy dissipation in the combined structure of the vertical drop with gabion. *Civil Infrastructure Researches*, 8(1), doi: 10.22091/cer.2022.7720.1344
- [22] Ghaderi, A., Abbasi, S. (2021). Experimental Study of Energy Dissipation over Stepped Spillway with Appendage Elements on the Steps. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(3), 494-509.
- [23] 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*, (In press), (In Persian). doi: 10.22059/ijswr.2022.342428.669257
- [24] Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2021). Experimental and Numerical Study of the Effects of Geometric Appendage Elements on Energy Dissipation over Stepped Spillway. *Water*, 13(7), 957.
- [25] Boes R., and Hager, WH. (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 129(9): 661–670.