

بررسی آزمایشگاهی مقایسه اثر صفحه متخلخل، مانع پیوسته و مانع متخلخل پیوسته در لبه سرریز پلکانی بر مشخصه‌های جریان

سید امین اصغری پری^{۱*} و مجتبی کردنائیج^۲

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و مدرس گروه عمران دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا بهبهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۱

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی اثر مانع پیوسته و متخلخل و صفحه متخلخل با ارتفاع‌های مختلف در لبه سرریز پلکانی به منظور شناخت مشخصات جریان پرداخته شده است. آزمایش‌ها روی سرریز پلکانی با دو شیب ۱:۳ و ۱:۲، ارتفاع پله ۱۰/۹ سانتی‌متر، طول پله‌ها ۳۱/۳ و ۲۰/۹ سانتی‌متر و عرض فلوم ۱/۲ متر اجرا گردید. برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان، از عمق‌سنج با دقت ± 1 میلی‌متر و روش پردازش تصویر حباب (BIV) استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که محل هواگیری طبیعی در حالتی که مانع پیوسته در لبه پله قرار گیرد، نسبت به حالت شاهد، در هر دو شیب یک پله به سمت پایین دست حرکت می‌کند. بر اساس نتایج پردازش تصویر و استهلاک انرژی، در مواردی که ناحیه اختلاط و ناحیه برگشتی جریان افزایش یابد، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. از بین موانع استفاده شده در تحقیق حاضر، صفحه متخلخل به دلیل دارا بودن ناحیه اختلاط بیشتر و داشتن امکان عبور جت آب از داخل تخلخل‌ها، بیشترین میزان استهلاک انرژی را نسبت به مانع متخلخل و مانع پیوسته داشته است و این مقدار، نسبت به حالت شاهد، در هر دو شیب نیز بیشتر بوده است. میزان استهلاک انرژی در شیب ۱:۳ در تمامی آزمایش‌ها بیشتر بوده است تا در شیب ۱:۲.

واژه‌های کلیدی

استهلاک انرژی، روش BIV، سرریز پلکانی، صفحه متخلخل، مانع پیوسته، مانع متخلخل

مقدمه

طول سرریز سبب می‌شود تا در انتها به حوضچه‌ای کوچک‌تر نیاز باشد که صرفه اقتصادی را به همراه دارد (Felder & Chanson, 2015). در چند دهه اخیر، محققان در خصوص شناخت نوع جریان، تأثیر ابعاد پلکان سرریز، شروع محل هواگیری، و مکانیزم استهلاک انرژی تحقیقاتی گسترده، اغلب با محوریت آزمایشگاهی، انجام داده‌اند (Amadore, 2006; Meireles & Matos, 2009; Hunt &

شوت‌های پلکانی، به‌عنوان سازه، به‌طور معمول در سدهای خاکی و سدهای بتنی وزنی به‌کار گرفته می‌شوند (Chanson, 2001). وجود پله در سرریز شوت، در مقایسه با شوت صاف، مانند زبری عمل می‌کند که سبب می‌شود میزان هوای وارده افزایش یابد و در نتیجه میزان استهلاک انرژی در راستای پلکان شوت بیشتر شود. استهلاک انرژی زیاد در

(Kordnaeij & Asghari Pari, 2019) بیان نمودند که در شیب ۱:۳ مانع اثر استهلاکی مثبت دارد. استفاده از روش‌های نوین شرایط اندازه‌گیری پارامترهای جریان را بدون ورود آن وسایل در مسیر جریان و ایجاد اختلال در شرایط جریان فراهم می‌کنند که می‌توان به روش‌های پردازش تصویر در هیدرولیک اشاره کرد. برخی از روش‌های پردازش تصویر برای شرایط هیدرولیکی متفاوت دچار محدودیت هستند. روش PIV^1 این امکان را می‌دهد که از آن به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری ساختار آشفتگی در شرایط مختلف استفاده و به برخی از مقیاس‌های آشفتگی دسترسی پیدا کرد (Geopfert *et al.*, 2004). از طرفی، VIP در حالت‌هایی که هوا وارد جریان شود و حباب هوا پدیدار گردد، دچار محدودیت اندازه‌گیری می‌شود و نمی‌توان از آن استفاده کرد (Chang & Liu, 1998). از روش BIV^2 نخستین بار ریو و همکاران (Ryu *et al.*, 2005) برای اندازه‌گیری و تحلیل برخورد موج و ورود هوا به درون آن استفاده کردند. عمادزاده و چیهو (Emadzadeh & Chiew, 2017) پرش هیدرولیکی را با استفاده از ترکیب PIV و BIV به‌ترتیب برای مناطق بدون حباب هوا و دارای حباب هوا بررسی کردند. از جمله تحقیقاتی که در ارتباط با سرریز پلکانی بدون وجود هر گونه مانع و زبری روی پله و با استفاده از روش‌های پردازش تصویر شده است می‌توان به تحقیقات لندرو و همکاران (Leandro *et al.*, 2014)، بولر و همکاران (Bühler *et al.*, 2015)، بونگ و ولرو (Bung & Valero, 2015)، لویز و همکاران (Lopes *et al.*, 2017)، ژانگ و چنسون (Zhang & Chanson, 2018) و کرامر و چنسون (Kramer & Chanson, 2018) اشاره کرد. در بخشی دیگر، کوردنائیج و اصغری‌پری (Kordnaeij &

Kadavy, 2010; Bung, 2011 & 2013; Frizell *et al.*, 2013) در تحقیقات تلاش شده است تا با قرار دادن موانع پیوسته و غیرپیوسته (Kökpınar, 2004; Felder & Chanson, 2014 & 2015; Kordnaeij & Asghari Pari, 2018; Asghari Pari & Kordnaeij, 2019; Razmkhah *et al.*, 2021; Habibi *et al.*, 2021) و زبری در کف پله (Gonzalez & Chanson, 2007; Takahashi *et al.*, 2006; Bung & Schlenkhoff, 2010; Wright, 2010; Torabi *et al.*, 2018; Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) در کف و لبه پله سرریز با انواع شکل‌ها و آرایش‌ها، تغییر شکل پله‌ها (Mero *et al.*, 2017; Ashoor *et al.*, 2019; Ali & Yousif, 2019)، ایجاد زاویه در طول سرریز (Ostad Mirza *et al.*, 2016)، ایجاد زاویه در کف پله و مانع لبه (Hamedi *et al.*, 2014)، هوادهی مصنوعی در پله (Novakoski *et al.*, 2020) شرایط هیدرولیکی را بررسی کنند. به‌طور کلی در برخی از موارد با توجه به ارتفاع مانع استفاده شده، شیب سرریز، دبی خروجی، نوع مانع و محل به‌کارگیری مانع، اثر استهلاکی مثبت یا منفی بوده است. برای مثال، گونهر و همکاران (Guenher *et al.*, 2013) با قرار دادن مانع در لبه سرریز با آرایش‌های پیوسته در کل عرض فلوم، آرایش زیگزاگ و یک طرف مانع بودن در کف سرریز بیان داشتند که مانع تأثیر چندانی در استهلاک انرژی ندارد ولی در حالت آرایش زیگزاگی آشفتگی و نوسان‌های سه بعدی در جریان شکل می‌گیرد. در تحقیق دیگری، فلدر و چنسون (Felder & Chanson, 2014) با بررسی اثر مانع با تخلخل دو بعدی نشان دادند که این نوع مانع اثر مثبت در استهلاک انرژی ندارد. این در حالی است که برای مانع پیوسته در لبه سرریز، کوردنائیج و اصغری‌پری

جریان نسبت به حالت شاهد و سایر حالت‌ها افزایش ابعادی داشته است.

به‌منظور افزایش اثر استهلاکی سرریز پلکانی با استفاده از مانع، در این تحقیق تلاش شده است تا اثر مانع پیوسته، مانع متخلخل و صفحه متخلخل با ارتفاع متفاوت در لبه سرریز برای دو شیب مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از روش BIV به‌منظور شناخت بیشتر وضعیت جریان عبوری در حالت‌های مختلف، استفاده شده است.

آنالیز ابعادی

پارامترهای تأثیرگذار بر استهلاک انرژی برای اثر شکل مختلف مانع پیوسته شامل مانع پر، مانع متخلخل و صفحه متخلخل روی پله با ارتفاع‌های مختلف، از روش پی‌باکینگهام به‌منظور به‌دست آوردن پارامترهای بی‌بعد موثر استفاده گردید. از این‌رو استهلاک انرژی از اختلاف انرژی در بالادست (رابطه ۱) و پایین‌دست سرریز (رابطه ۲) محاسبه شده است.

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (1)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2)$$

در این تحقیق، برای کلیه آزمایش‌ها دریچه انتهایی فلوم به‌گونه تنظیم شده است که پرش هیدرولیکی آزاد در پنجه سرریز تشکیل شود. از این‌رو با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری عمق اولیه پرش، از رابطه بلنجر برای محاسبه عمق اولیه پرش استفاده گردید. برای محاسبه افت نسبی، از رابطه ۳ استفاده شد.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = 1 - \frac{E_1}{E_0} = 1 - \frac{[y_1 + \frac{V_1^2}{2g}]}{(1.5d_c + P)} \quad (3)$$

(Asghari Pari, 2019)، اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2020 & 2021) و رزمخواه و همکاران (Razmkhah *et al.*, 2021) اثر قرارگیری مانع پیوسته، غیرپیوسته، زبری با شکل‌ها و آرایش‌های مختلف و محل قرارگیری مانع در کف پله را با استفاده از این روش بررسی کردند که بسته به شیب سرریز، نوع مانع و زبری اثر استهلاکی نسبت به شاهد مثبت یا منفی بوده است. تمامی تحقیقات اشاره شده با استفاده از روش پردازش تصویر توانستند توصیف بهتر و کامل‌تری از جریان عبوری از روی سرریز پلکانی ارائه دهند. لوپز و همکاران (Lopes *et al.*, 2017) با استفاده از روش BIV برای دو سرریز با عرض متفاوت نشان دادند که در سرریز با عرض کم نواحی شکل گرفته روی دو پله متوالی یکسان و از نوع چرخشی است در حالی‌که در سرریز با عرض بیشتر، علاوه بر ناحیه چرخشی، ناحیه اختلاط نیز شکل می‌گیرد. اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) می‌گویند علاوه بر عرض سرریز، با کاهش شیب سرریز، ابعاد ناحیه اختلاط افزایش می‌یابد و ناحیه چرخشی تقریباً ثابت می‌ماند. برای قرارگیری مانع نیز کردنائیج و اصغری‌پری (Kordnaeij & Asghari Pari, 2019) و اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2019 & 2021) نشان داده‌اند که قرارگیری مانع با توجه به پیوسته یا غیرپیوسته بودن مانع و ارتفاع مانع، ابعاد و نوع نواحی کاملاً متفاوت‌اند و در برخی شرایط نواحی اختلاطی جدید شکل می‌گیرد. رزمخواه و همکاران (Razmkhah *et al.*, 2021) نیز برای محل مانع یک فاصله و ارتفاع نسبی مانع پیوسته را تعیین کردند که در شرایط بهینه بیان شده، ناحیه اختلاط

که در آنها؛

V_1 = سرعت جریان در پنجه سرریز (m/s)؛ v_1 = عمق اولیه جریان بعد از سرریز (m)؛ d_c = عمق بحرانی جریان روی سرریز (m)؛ P = ارتفاع کل سرریز (m)؛ E_1 = انرژی در پنجه سرریز (m)؛ E_0 = انرژی کل بالادست (m)؛ و ΔE_r = افت نسبی انرژی.

به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر استهلاک انرژی، در تحقیق حاضر از روش پی باکینگهام برای به دست آوردن پارامترهای بی بعد استفاده شد. پارامترهای موثر بر افت انرژی در سرریز پلکانی با مانع کامل، متخلخل و صفحه متخلخل برابر است با 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)، لزوجت دینامیکی سیال (μ)، تعداد پله‌های سرریز (N_0)، ارتفاع مانع (h_0) و نوع مانع (sh). بنابراین میزان افت انرژی تابعی از متغیرهای بیان شده هستند که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$F = f(q, l, h, w, g, d_c, \rho, \sigma, \mu, h_0, \Delta E_r, sh, N_0) \quad (4)$$

پس از آنالیز ابعادی استفاده از روش پی باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر هستند:

$$f = \left(\frac{h_0}{h}, \frac{h}{l}, \frac{d_c}{h}, \frac{w}{l}, \Delta E_r, We, Fr, Re, sh, N_0 \right) = 0 \quad (5)$$

که در آن،

Re = عدد رینولدز؛ Fr = عدد فرود؛ و We = عدد وبر.

چاو (Chow, 1959) می‌گوید برای عدد رینولدز در صورت بیشتر بودن از ۲۰۰۰، و برای عدد وبر در صورتی که عمق آب بیشتر از ۳ تا ۴ سانتی‌متر باشد، می‌توان از اثرهای آن صرف‌نظر کرد. محدوده عدد رینولدز در تحقیق حاضر از ۳۴۵۰۰ تا ۱۰۵۰۰۰

است. همچنین ارتفاع آب در ورودی سرریز برای دبی حداقل بیش از ۴ سانتی‌متر است و از این رو عدد وبر نیز قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود. تعداد پله‌ها و عرض پله ثابت‌اند و قابل صرف‌نظر کردن هستند و از این رو خواهیم داشت:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{h_0}{h}, \frac{h}{l}, \frac{d_c}{h}, Fr, sh\right) = 0 \quad (6)$$

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در مرکز تحقیقاتی هیدرولیک دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان و در فلوم مستقیم با طول ۱۰ متر، عرض ۱/۲ متر و ارتفاع ۱ متر اجرا شده است. در ۳ متر ابتدایی مسیر ارتفاع فلوم ۱/۲ متر و کف فلوم در ارتفاع ۱/۵ متر نسبت سطح زمین است. در قسمت ورودی فلوم یک مخزن به ارتفاع حدود ۳ متر و عرض معادل فلوم نصب شد که ورودی پمپ‌ها به داخل این مخزن هدایت می‌شد تا نوسان‌های جریان ورودی کاهش یابد. فلوم دارای ۲ پمپ ۸ اینچ با دبی ۱۵۰ لیتر بر ثانیه بوده است. اندازه‌گیری دبی با دبی‌سنج التراسونیک بوده است. دیواره‌های فلوم از جنس شیشه سکوریت شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و کف آن فلزی با پوشش رنگ بوده است. برای اندازه‌گیری عمق پایاب بعد از پرش پایین دست سرریز و عمق آب در بالادست روی ورودی سرریز از دو عدد عمق‌سنج با دقت اندازه‌گیری ± 1 میلی‌متر استفاده گردید. برای کاهش تلاطم جریان ورودی به فلوم، در ورودی دو ردیف شبکه توری فلزی نصب گردید. یک عدد یونولیت روی ورودی ابتدایی اضافه گردید تا تلاطم جریان ورودی به حداقل برسد. سرریز در فاصله ۱/۵ متری از ابتدای فلوم نصب شد. مشخصات هندسی سرریزها در جدول ۱ آورده شده است. طول ورودی

در هر دو سرریز برای توسعه جریان بر اساس توصیه کرامر و چنسون (Kramer & Chanson, 2018)، ۵۸ سانتی‌متر است. شماره‌گذاری از لبه ورودی بوده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای پلکانی تحقیق

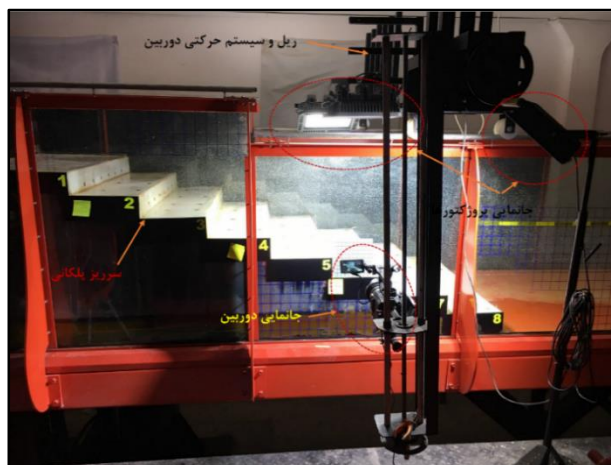
Table 1- Spillways Geometry of research

تعداد پله	ارتفاع پله	طول پله (cm)	ارتفاع سرریز	
(No)	(cm)		(cm)	
8	10.9	20.9	88	شیب 1:2
8	10.9	31.3	87	شیب 1:3

تعیین فاصله کانونی، از یک صفحه مشبک با ابعاد شبکه ۲ در ۲ سانتی‌متری استفاده شد که در هر آزمایش پیش از روشن کردن پمپ‌ها تنظیم می‌گردید. فیلم ثبت شده پس از تبدیل به عکس در کد PIV-Lab (Thielicke & Stamhuis, 2014) فراخوانی و آنالیز گردیدند. شکل ۱ نمای کلی از وضعیت سرریز، قرارگیری دوربین و پروژکتورها را در فلوم نشان می‌دهد.

با توجه به محدوده دبی در تحقیق حاضر، $(\frac{d_c}{h})$ برای تشکیل هر سه رژیم جریان ریزشی، انتقالی و رویه‌ای از ۰/۳۷ تا ۱/۰۶ بوده است. آزمایش‌های تحقیق حاضر در قالب ۳ نوع مانع متفاوت در لبه سرریز شامل مانع پیوسته، صفحه متخلخل و مانع متخلخل با ارتفاع‌های نسبی (ارتفاع مانع به ارتفاع پله، $(\frac{h_0}{h})$ ۰/۷۴-۰/۵۶-۰/۳۸-۰/۱۹) برای هر دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ اجرا شد. برای هر گروه، در جدول ۲ آزمایش‌ها با نام‌گذاری اختصاری آورده شده است.

برای تصویربرداری از دوربین SONY FS5 به همراه ۳ عدد پروژکتور LED150 برای تامین روشنایی محل ثبت تصویر استفاده شده است. زاویه قرارگیری پروژکتورها در بالا و کناره بیرون، به منظور روشنایی سطح محل برداشت، با سعی و خطا برای رسیدن به بهترین حالت نوری در ردیابی حباب‌ها به دست آمد. برای جابه‌جایی و تنظیم محل دوربین، از یک ریل با قابلیت حرکت در سه جهت استفاده شد. فاصله عرضی فلوم با دوربین بر اساس پیشنهاد بونگ و ولرو (Bung & Valero, 2015) و عمادزاده و چیو (Emadzadeh & Chiew, 2017) و شرایط آزمایش و دوربین، ۵۰ سانتی‌متر انتخاب شد. روش BIV در واقع تعیین مشخصه‌های جریان‌های دارای حباب هوا با استفاده از تصاویر ثبت شده در محل مورد نظر است. تصویربرداری در محل پله ۶ به ۷ انتخاب شد که جریان کاملاً توسعه یافته و ناحیه چرخشی حباب هوا کامل شکل گرفته است. برای



شکل ۱- نمایی از سرریز پلکانی و تجهیزات اندازه‌گیری (شیب ۱:۳)
Figure 1- Flume, spillway, LED, rail and location of camera, (slope 1:3)

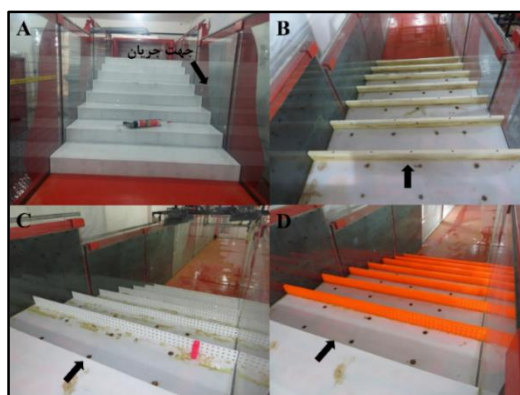
جدول ۲- نام‌گذاری مدل‌های تحقیق

Table 2- Naming research models

نام مدل	حالت شاهد	مانع پیوسته در لبه	صفحه پیوسته متخلخل در لبه	مانع متخلخل پیوسته در لبه
علامت اختصاری	FS	EO	ES	EP

تحقیق‌های اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) در مجموع ۱۶۰ آزمایش برای حالت‌های مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲ شکل‌های مختلف مانع برای شیب ۱:۳ آورده شده است و برای شیب ۱:۲ نیز شرایط مشابه است.

انتخاب مانع متخلخل بر اساس نتایج تحقیقات کردنائیج و همکاران (Kordnaeij *et al.*, 2017) در اثربخش بودن این نوع مانع در کنترل جریان غلیظ و شکل‌گیری جریان‌های چرخشی استهلاکی در درون تخلخل بوده است. آزمایش‌های مانع پیوسته و متخلخل برای ارتفاع نسبی ۰/۱۹ از نتایج



شکل ۲- سناریوهای آزمایش در شیب ۱:۳، A: شاهد (FS)، B: مانع پیوسته (EO)، C: صفحه متخلخل پیوسته (ES) و D: مانع متخلخل پیوسته (EP)

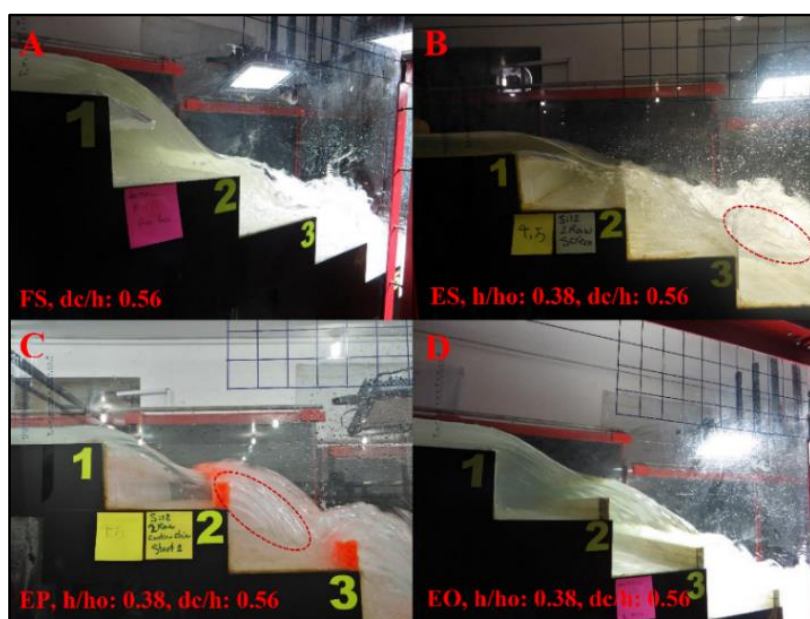
Figure 2- Model type, slope= 1:2, A: Flat Step (FS), B: Edge Obstacle (EO), C: Edge Screen (ES) & D: Edge Porous (EP)

نتایج و بحث

وضعیت جریان عبوری

نسبت به حالت شاهد، می‌شود. از طرفی، در مانع و صفحه متخلخل به دلیل عبور جریان آب از درون تخلخل‌ها و شکل‌گیری جت آب (که در شکل ۳ با خط چین مشخص شده است)، امکان اختلاط بیشتر در جریان زیر سطحی و ایجاد سطح دارای تلاطم بیشتر نسبت به مانع پیوسته پر در دو رژیم اشاره شده وجود دارد (شکل ۳).

قرارگیری مانع پیوسته در لبه پله در رژیم‌های مختلف عملکرد متفاوتی دارد. مشاهدات در زمان اجرای آزمایش نشان داد که مانع پیوسته در رژیم‌های ریزشی و حد پایین انتقالی سبب تلاطم بیشتر جریان و ورود هوای بیشتر به جریان عبوری،

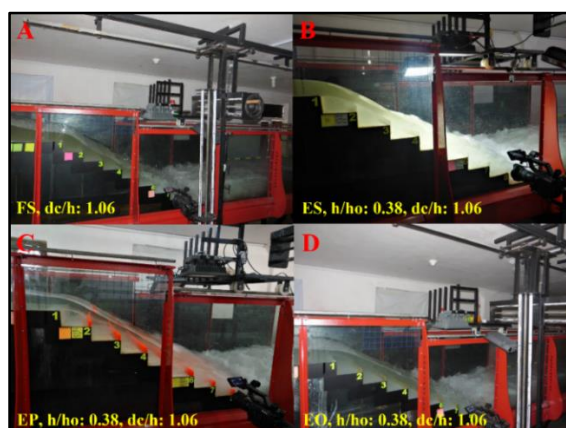


شکل ۳- وضعیت جریان عبوری در دبی و ارتفاع نسبی یکسان موانع در شیب ۱:۲

Figure 3- Passing flow in identical relative height of the obstacles on a slope of 1: 2

نوسان‌ها نسبت به مانع پر پیوسته در این حالت‌ها نیز بیشتر است. از طرفی دیگر، به‌طور کلی قرارگیری مانع پیوسته با هر سه آرایش در لبه سرریز، در تمامی رژیم‌های جریان سبب افزایش ارتفاع جریان عبوری نسبت به حالت شاهد می‌گردد (شکل ۴).

با افزایش دبی و برای حد بالای جریان انتقالی و جریان رویه‌ای، برای آرایش‌های دارای تخلخل (مانع و صفحه متخلخل) مشاهده جت خروجی به دلیل پر شدن حفره‌های گوشه از بین می‌رود، ولی اثر آنها وجود دارد و این اثر بر نواحی شکل گرفته در کف پله گذاشته می‌شود. در سطح نیز



شکل ۴- وضعیت جریان عبوری در دبی حداکثر (جریان رویه‌ای) و ارتفاع نسبی یکسان موانع در شیب ۱:۲

Figure 4- Passing flow at maximum discharge (skimming) and identical relative height of the obstacles, slope 1:2

مختلف سرریز پلکانی بدون مانع و زبری بوده است (Chanson, 1995 & 2001; Chanson *et al.*, 2015). نتایج تحقیق‌های اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) نشان داد که قرارگیری موانع متخلخل و شبکه تخلخلی با آرایش‌های مختلف در هر دو شیب ۱:۲ و ۱:۳، سبب می‌شوند تا مرزهای جریان نسبت به حالت شاهد در دبی پایین‌تر شروع شوند. نتایج حاصل از مشاهدات آزمایش‌های تحقیق حاضر در جدول ۳ آورده شده است.

رژیم جریان و نقطه هواگیری

به‌منظور تعیین مرزهای رژیم جریان شامل جریان ریزشی، انتقالی و رویه‌ای، مطالعات آزمایشگاهی بسیاری با در نظر گرفتن دو پارامتر عمق بحرانی نسبی ($\frac{d_c}{h}$) و شیب سرریز ($\frac{h}{L}$) اجرا شده است. ارزیابی بصری مطالعات موجب گردیده تا برای معیارهای ارزیابی تجربی پراکندگی در محدوده‌های اعلام شده شکل گیرد (Ostad Mirza, 2016). از طرفی دیگر، روابط ارائه شده تاکنون برای حالت‌های

جدول ۳- رژیم جریان شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف

Table 3- Onset of flow regimes on different type of models

نام مدل	ho/h	θ	dc/h							
			0.46	0.55	0.64	0.73	0.83	0.92	1.01	1.06
F.S	0	19.2	NAP	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
EO	0.19	19.2	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
EO	0.38	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
EO	0.56	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
EO	0.74	19.2	NAP	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
ES	0.19	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
ES	0.38	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI
ES	0.56	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
EP	0.19	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI

ادامه جدول ۳- رژیم جریان شکل گرفته برای آرایش‌های مختلف

Table 3- Onset of flow regimes on different type of models

نام مدل	ho/h	θ	dc/h							
			0.46	0.55	0.64	0.73	0.83	0.92	1.01	1.06
EP	0.38	19.2	NAP	NAP	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
EP	0.56	19.2	NAP	TRA	TRA	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI
F.S	0	27.5	NAP	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
EO	0.19	27.5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
EO	0.38	27.5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
EO	0.56	27.5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
ES	0.19	27.5	NAP	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI
ES	0.38	27.5	NAP	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI
ES	0.56	27.5	NAP	TRA	TRA	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI
EP	0.19	27.5	NAP	TRA	TRA	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI
EP	0.38	27.5	NAP	TRA	S-T	SKI	SKI	SKI	SKI	SKI

شاهد می‌شود به طوری که جریان در دبی پایین‌تر به حالت انتقالی و در ادامه نیز به حالت رویه‌ای تبدیل می‌گردد. اثرگذاری مانع بر جابه‌جایی مرز جریان برای شیب ۱:۲ نسبت به شیب ۱:۳ بیشتر است. شماره پله محل هواگیری طبیعی سرریز پلکانی برای هر دو شیب تحقیق حاضر در جدول ۴ آورده شده است.

مشابه با نتایج تحقیق‌های اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021)، در حالت شاهد با افزایش شیب سرریز از ۱:۳ به ۱:۲، فاصله مورد نیاز برای توسعه لایه مرزی افزایش می‌یابد به طوری که محل هواگیری در شرایط دبی یکسان ($\frac{d_c}{h}=1.06$) در حالت آزاد از پله ۴ در شیب ۱:۳ به پله ۵ در شیب ۱:۲ رسیده است. با توجه به نتایج ذکر شده در جدول ۴، به‌طور کلی مشاهده می‌شود که قرارگیری مانع پیوسته با شکل‌های مختلف در لبه سرریز در هر شیب مورد بررسی سبب شده که محل هواگیری یک پله به سمت پایین دست حرکت کند. در جدول ۴، N یعنی آزمایش اجرا نشده است.

در تحقیق حاضر، رژیم‌های جریان دسته‌بندی گردیدند که در این دسته‌بندی جریان ریزشی (NAP) برای حالت‌هایی که ریزش پلکانی بدون چرخش هوا بوده در نظر گرفته شده است. برای جریان انتقالی (TRA) حالتی در نظر گرفته شده است که هم چرخش هوا در ناحیه چرخشی و هم حفره هوا به همراه نوسان‌های مشاهده شده وجود داشته باشد. جریان رویه‌ای (SKI) برای حالتی که هیچ‌گونه حفره در پله وجود نداشته باشد و جریان چرخشی در کف کاذب تشکیل شده باشد در نظر گرفته شده است. وجود تخلخل در مانع متخلخل و صفحه متخلخل موجب گردیده تا بخشی از جریان از درون حفره‌ها عبور کند و در نتیجه در محدوده رژیم انتقالی به رویه‌ای حالتی شکل گیرد که جریان عبوری تا نیمه ابتدایی سرریز حالت رویه‌ای و در ادامه مشخصات جریان انتقالی را داشته باشد. از این‌رو، این حالت انتقالی - رویه‌ای (S-T) نام‌گذاری شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد به‌طور کلی قرارگیری مانع پیوسته در لبه سرریز با ارتفاع‌های مختلف سبب جابه‌جایی مرز جریان نسبت حالت

جدول ۴- شماره پله شروع محل هواگیری طبیعی سرریز پلکانی برای آرایش‌های مختلف

Table 4- Inception Point of free aeration (IP) in different types of model

نام مدل و شیب	EO, ho/h					EP, ho/h			ES, ho/h		
	FS	0.19	0.38	0.56	0.74	0.19	0.38	0.56	0.19	0.38	0.56
$\theta: 19.2$	4	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5
$\theta: 27.5$	5	6	6	6	N	6	6	N	6	6	6

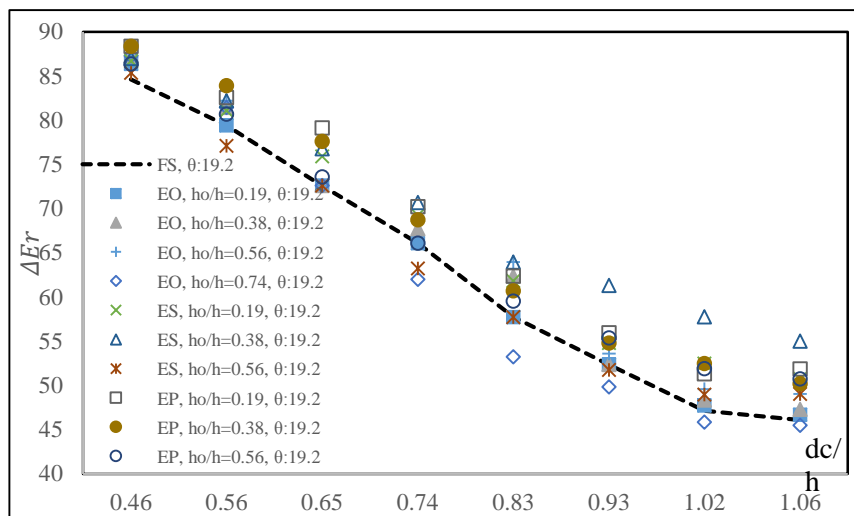
در شیب ۱:۳ در رژیم انتقالی نیز موانع به‌کار رفته اثر استهلاکی مثبت نسبت به حالت شاهد داشته است. در این شیب و رژیم جریان، مانع متخلخل (EP) اثر استهلاکی بیشتری به‌ترتیب نسبت به صفحه متخلخل (ES) و مانع پر (EO) دارد و در هر سه آرایش بیان شده (EO, ES, EP) در این رژیم ارتفاع نسبی ۰/۳۸ بیشترین میزان استهلاک را داشته است. برتری مانع متخلخل در این رژیم در استهلاک انرژی در اثر سه بعدی بودن مانع متخلخل است که انرژی جریان را مستهلک می‌کند. در رژیم رویه‌ای برای شیب ۱:۳ نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر سه آرایش استفاده شده استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد افزایش یافته است و در این حالت به‌ترتیب صفحه متخلخل (ES)، مانع متخلخل (EP) و مانع پر (EO) دارای بیشترین میزان استهلاک انرژی بوده‌اند. برای مثال در دبی حداکثر، میزان استهلاک انرژی حالت شاهد ۴۶ درصد است و این مقدار برای صفحه متخلخل (ES) ۵۵ درصد، مانع متخلخل (EP) ۵۲ درصد و برای مانع پر (EO) ۴۹ درصد است.

مقایسه استهلاک انرژی بر اساس پارامتر دبی

$$\left(\frac{d_c}{h}\right)$$

میزان استهلاک انرژی با توجه به رابطه ۲ برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه و نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ برای هر دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ بر اساس پارامتر دبی $\left(\frac{d_c}{h}\right)$ به‌صورت جداگانه آورده شده است. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که قرارگیری مانع پر، متخلخل و صفحه متخلخل در رژیم ریزشی در هر دو شیب بررسی شده سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد می‌شود. لازم است یادآوری شود که در رژیم ریزشی، بخش زیادی از انرژی جریان توسط سرریز پلکانی به‌دلیل ماهیت پلکانی آن مستهلک می‌شود.

به‌طوری‌که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، هر چند افزایش ارتفاع نسبی مانع در رژیم ریزشی سبب افزایش استهلاک انرژی در هر دو شیب شده است اما میزان افزایش استهلاک در اثر افزایش ارتفاع مانع کمتر از ۲ درصد است. با تغییر رژیم جریان از ریزشی به انتقالی، عملکرد موانع در استهلاک انرژی در دو شیب تغییر می‌کند.



شکل ۵- مقایسه استهلاک انرژی آرایش‌های مختلف در شیب ۱:۳

Figure 5- Comparison of different obstacle on energy dissipation, slope 1:3

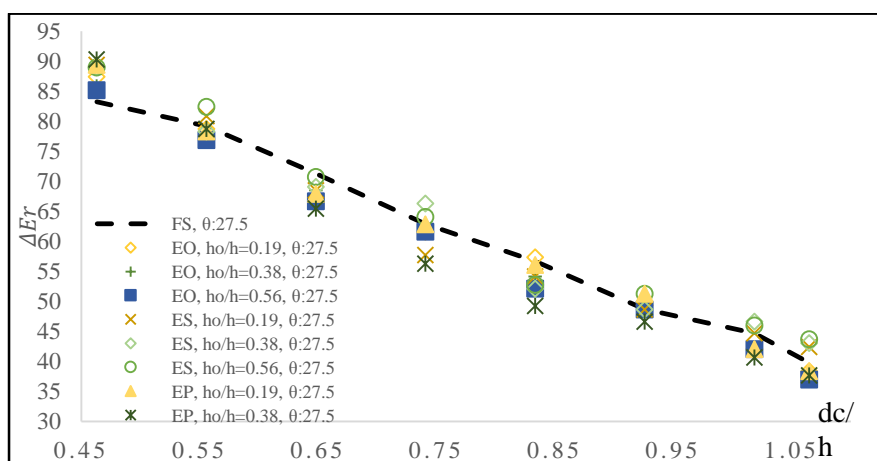
برای آرایش صفحه متخلخل فقط امکان شکل‌گیری جت آب خروجی از درون تخلخل و در نتیجه اندرکنش آن با جریان عبوری از روی مانع در محل کف پله وجود دارد و از این رو نسبت به مانع پر در این شیب عملکرد استهلاکی بهتری دارد. برای مانع متخلخل، علاوه بر جت خروجی و با توجه به ماهیت سه بعدی بودن جریان و امکان شکل‌گیری حالت گردابه‌ای در درون تخلخل‌ها (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) میزان استهلاک انرژی جریان، نسبت به صفحه متخلخل، نیز افزایش می‌یابد. برای آرایش‌های مانع متخلخل و صفحه متخلخل ارتفاع نسبی ۰/۳۸ بیشترین میزان استهلاک انرژی را داشته است و از این رو ارتفاع نسبی (ho/h=0.38) به‌عنوان ارتفاع بهینه در استهلاک انرژی در شیب ۱:۳ برای هر سه رژیم جریان برای این دو مانع در نظر گرفته شده است در حالی که برای مانع پر، ارتفاع نسبی ۰/۵۶ بیشترین میزان استهلاک انرژی را دارد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که برای ارتفاع بیشتر از حالت بهینه در برخی از موانع مانند مانع

پر (ho/h=0.74)، به‌علت تشکیل حالت حوضچه روی پلکان اثر استهلاکی مانع حتی نسبت به حالت شاهد نیز در رژیم‌های بالا کمتر می‌شود. افزایش ارتفاع مانع (بدون در نظر گرفتن نوع مانع) از یک ارتفاع نسبی بالاتر با توجه به نوع مانع، سبب می‌شود که جریان گردابه‌ای تشکیل شود که کل سطح پله را در بر می‌گیرد و در نتیجه در سطح پله از شدت نوسان‌ها و تلاطم‌های جریان سطحی کاسته می‌شود.

برای شیب ۱:۲ در رژیم انتقالی فقط صفحه متخلخل اثر استهلاکی مثبت (آن‌هم کمتر از ۳ درصد) نسبت به حالت شاهد داشته است در حالی که موانع پر و متخلخل اثر استهلاکی مثبت نداشته‌اند. در رژیم رویه‌ای نیز فقط صفحه متخلخل استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد افزایش داد و ارتفاع نسبی ۰/۳۸ به‌عنوان ارتفاع بهینه برای دو رژیم جریان انتقالی و رویه‌ای در این شیب انتخاب گردید. برای رژیم ریزشی ارتفاع نسبی ۰/۵۶ اثر استهلاکی بهتری داشته است. اگر چه در ارتفاع نسبی ۰/۵۶، برای رژیم جریان انتقالی و رویه‌ای نیز در برخی از موارد مانند dc/h=0.65 و dc/h=0.93،

گردید و بدین ترتیب ارتفاع نسبی ۰/۳۸ برای هر سه رژیم جریان برای صفحه متخلخل به‌عنوان ارتفاع بهینه (در محدوده متغیرهای بررسی شده تحقیق حاضر) در نظر گرفته شده است. مانع پر و متخلخل در رژیم‌های انتقالی و رویه-ای اثر استهلاکی منفی داشته‌اند به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع نسبی مانع، این تأثیر منفی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۶).

میزان استهلاک نسبت به ارتفاع نسبی ۰,۳۸ بیشتر بوده است ولی استفاده از مانع با ارتفاع نسبی ۰/۵۶ ضمن اینکه تأثیر بسزایی در استهلاک انرژی نداشته است، سبب افزایش ارتفاع تراز آب روی سرریز و در نتیجه افزایش ارتفاع دیواره کناری سرریز می‌شود، از این‌رو ارتفاع نسبی ۰/۳۸ به‌عنوان ارتفاع بهینه در نظر گرفته شده است. این اثر برای رژیم جریان ریزشی نیز اعمال



شکل ۶- مقایسه استهلاک انرژی آرایش‌های مختلف در شیب ۱:۲

Figure 6- Comparison of different obstacle on energy dissipation, slope 1:2

به شیب ۱:۲ بیشتر است و افزایش ابعادی ناحیه اختلاط را عامل افزایش استهلاک انرژی می‌دانند. برای حالت قرارگیری مانع پیوسته نیز می‌گویند که در برخورد جریان با مانع بخشی از جریان در ناحیه اختلاط و در نزدیکی مانع منحرف می‌شود که آن را ناحیه جریان برگشتی^۳ (RF) نامیده‌اند. با افزایش ارتفاع نسبی مانع پیوسته ناحیه چرخشی کل سطح پله را در برمی‌گیرد و به‌حالت استخری^۴ (RZ_p) تبدیل می‌شود. نواحی اشاره شده توسط اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) برای جریان رویه‌ای بوده است که برای آزمایش‌های تحقیق حاضر نیز نواحی اشاره شده مشاهده گردید.

خطوط جریان و نواحی ایجاد شده با استفاده از روش BIV

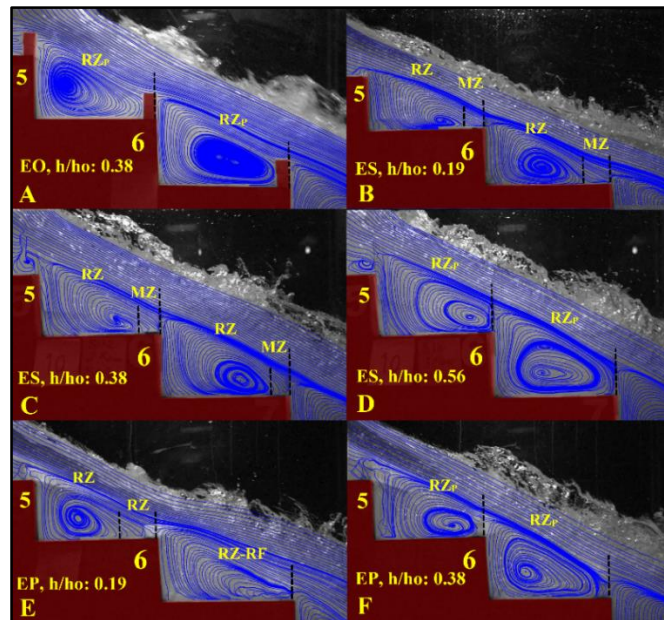
برای حالت بدون مانع، نتایج به‌کارگیری روش BIV در هر دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ ناحیه چرخشی^۱ (RZ) در زیر کف کاذب و ناحیه اختلاط^۲ (MZ) در قسمت لبه توسط اصغری‌پری و کردنائیج (Asghari Pari & Kordnaeij, 2021) گزارش گردید که این حالت را دیگر محققان (Zare & Doering, 2012; Boes & Hager, 2003 a & b) نیز گزارش کرده‌اند. محققان یاد شده همچنین اضافه می‌کنند که هم ابعاد و شکل ناحیه چرخشی در کف کاذب در دو پله متوالی و هم طول ناحیه اختلاط در شیب ۱:۳ نسبت

1- Recirculation zone
3- Redirected Flow

2- Mixing zone
4- Pooled Recirculation zone

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج مربوط به خطوط جریان برای آرایش‌های مختلف بررسی شده در تحقیق حاضر برای هر دو شیب در رژیم جریان رویه‌ای (دبی حداکثر) آورده شده است. افزایش ارتفاع نسبی مانع پیوسته بر سبب شکل‌گیری حالت استخری می‌شود که در تحقیق حاضر برای شیب ۱:۲ در ارتفاع نسبی ۰/۳۸ در هر دو پله شکل ۷ (A) و برای شیب ۱:۳ در ارتفاع نسبی ۰/۷۴ رخ داده است. در این حالت به علت طول بیشتر پله در شیب متفاوت‌اند.

در شکل‌های ۷ و ۸ نتایج مربوط به خطوط جریان برای آرایش‌های مختلف بررسی شده در تحقیق حاضر برای هر دو شیب در رژیم جریان رویه‌ای (دبی حداکثر) آورده شده است. افزایش ارتفاع نسبی مانع پیوسته بر سبب شکل‌گیری حالت استخری می‌شود که در تحقیق حاضر برای شیب ۱:۲ در ارتفاع نسبی ۰/۳۸ در هر دو پله شکل ۷ (A) و برای شیب ۱:۳ در ارتفاع نسبی ۰/۷۴ رخ داده است. در این حالت به علت طول بیشتر پله در شیب متفاوت‌اند.



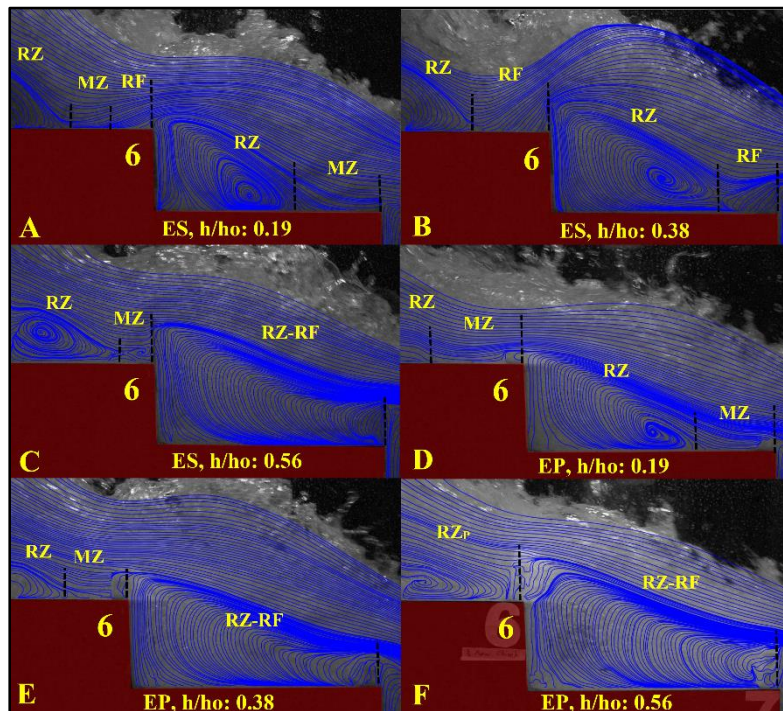
شکل ۷- مقایسه نواحی شکل گرفته بر روی دو پله ۶ و ۷ در جریان رویه‌ای در شیب ۱:۲

Figure 7- Comparison of the areas formed on two steps 6 and 7 in the skimming flow, slope 1:2

مقایسه نتایج به‌کارگیری روش BIV برای صفحه متخلخل (ES) در لبه سرریز در دو شیب نشان می‌دهد که در شیب ۱:۳ با افزایش ارتفاع نسبی ES از ۰/۱۹ به ۰/۳۸، علاوه بر گسترش ناحیه تحت تأثیر جریان‌های اختلاطی و برگشتی (MZ و RF)، میزان نوسان‌ها و پرتاب جریان نیز افزایش می‌یابد. زمانی که ارتفاع نسبی به ۰/۵۶ می‌رسد، شرایط جریان در پله پایین (شماره ۷) به حالت استخری نزدیک می‌شود و حالت جریان (RZ-RF) شکل می‌گیرد (شکل ۸ از A تا C). برای شیب ۱:۲ تا ارتفاع نسبی ۰/۳۸ شرایط مشابه با شرایط شاهد است ولی مجموع ناحیه MZ نسبت به شاهد افزایش می‌یابد.

در ارتفاع نسبی ۰/۵۶ به‌طور کامل حالت استخری (RZp) در هر دو پله متوالی شکل می‌گیرد (شکل ۸ از B تا D).

در ارتفاع نسبی ۰/۳۸ در هر دو پله در هر دو شیب مشابه هستند. هر چند در مورد جریان‌های سطحی عبوری در این حالت‌ها، متفاوت‌اند.



شکل ۸- مقایسه نواحی شکل گرفته روی دو پله ۶ و ۷ در جریان رویه‌ای در شیب ۱:۳

Figure 8- Comparison of the areas formed on two steps 6 and 7 in the skimming flow, slope 1:3

و این عامل سبب شده است تا مجموع نواحی اختلاط برای صفحه متخلخل بیشتر باشد.

مقایسه تغییرات نواحی شکل گرفته روی پله در هر دو شیب برای آرایش‌های مختلف با نتایج استهلاک نشان می‌دهد که افزایش نواحی اختلاط شامل نواحی اختلاطی و برگشتی (MZ و RF) سبب افزایش استهلاک انرژی می‌شوند در حالی که نواحی چرخشی (RZ) و حالت استتخری (RZp) اثر استهلاکی منفی دارند. برای حالت‌های انتقالی مانند ناحیه (RZ-RF) نیز اثر استهلاکی مثبت است ولی مانند اثر ناحیه اختلاط نیست.

وجود تخلخل در موانع (EP و ES) سبب می‌شود تا جت خروجی از موانع با جریان عبوری از روی موانع در میانه پله با یکدیگر برخورد داشته باشند که در نتیجه تلاطم سطحی بیشتر را به همراه دارد. اثر اندرکنش در جت و جریان عبوری در رژیم

مقایسه نواحی بین آرایش‌ها (بر اساس نتایج به‌کارگیری روش BIV) نشان می‌دهد که برای آرایش صفحه متخلخل (ES) مجموع نواحی (MZ و RF) در شرایط یکسان ارتفاع نسبی مانع به ترتیب بیشتر از آرایش مانع متخلخل (EP) و آرایش مانع پیوسته پر (EO) است. همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، ضخامت صفحه متخلخل (ES) ۳ میلی‌متر است که در لبه بیرونی پله کار گذاشته شد و از این‌رو در هر دو شیب اندازه طول پله تحت تأثیر مانع قرار نگرفته است. این در حالی است که برای آرایش‌های EP و EO مانع دارای طول تقریبی ۲ سانتی‌متر بوده است که این طول بخشی از لبه پله را در برمی‌گیرد. از طرفی لبه پله محل شکل‌گیری ناحیه اختلاط (MZ) است که این دو مانع (EP و EO) سبب کاهش ابعاد این ناحیه می‌شوند در حالی که برای صفحه متخلخل این اتفاق رخ نمی‌دهد

۴- بر اساس نتایج به کارگیری روش BIV و مقایسه استهلاک انرژی می توان گفت موانعی که بتوانند نواحی اختلاط (شامل MZ و RF) را گسترش دهند سبب افزایش استهلاک انرژی می شوند. در واقع ناحیه چرخشی، نسبت به ناحیه اختلاط، اثر استهلاکی کمتر دارد.

۵- ایجاد مانع متخلخل و صفحه متخلخل در هر دو شیب سبب افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با مانع پر و در هر سه رژیم جریان شده است. در شیب ۱:۳ برای رژیم ریزشی به طور متوسط ۲ درصد بیشتر بوده است تا برای شاهد که در رژیم رویه ای تا ۸ درصد نیز بیشتر از حالت شاهد بوده است. این مقدار برای شیب ۱:۲ در رژیم ریزشی به طور متوسط ۴ درصد بیشتر از شاهد و در رژیم رویه ای برای حالت های مثبت تا ۳,۵ درصد بهتر از شاهد بوده است؛ با افزایش ارتفاع نسبی مانع نیز تا زمانی که روی پلکان به حالت استخری نرسیده باشد بیشتر خواهد شد.

۶- ناحیه اختلاط ایجاد شده در شیب ۱:۳ در مقایسه با شیب ۱:۲ در حالت شاهد به دلیل طول بیشتر پله، از لحاظ اندازه طولی بزرگ تر است و از این رو ایجاد صفحه متخلخل در لبه پلکان در هر دو شیب ۱:۳ و ۱:۲ سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به حالت شاهد شده است. این در حالی است که مانع متخلخل و پیوسته تنها در شیب ۱:۳ اثر استهلاکی مثبت نسبت به حالت شاهد داشته است. ضخامت کم صفحه متخلخل و اشغال نشدن بخشی از فضای پلکان با صفحه متخلخل سبب شده است امکان برخورد موثر جریان با مانع فراهم آید.

ریزشی به دلیل ضعیف بودن جت کم است و در ادامه در حالت انتقالی این اثر شدت می یابد و برای رژیم های رویه ای مجدد کاهش می یابد. به طور کلی می توان گفت وجود اندرکنش میان جریان های عبوری سبب افزایش استهلاک انرژی شده است.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر موانع پیوسته با شکل و ارتفاع های مختلف در لبه سرریز پلکانی و با دبی های مختلف در دو شیب ۱:۲ و ۱:۳ بررسی شد که در این راستا برای بررسی و مقایسه بهتر خصوصیات جریان عبوری، از روش BIV نیز استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می دهد:

۱- قرارگیری مانع پیوسته در لبه سرریز پلکانی در هر دو شیب سبب می شود که جریان نسبت به حالت شاهد در هر دو شیب در دبی های پایین تر به حالت انتقالی و در ادامه به حالت رویه ای تبدیل شود و از این رو قرارگیری مانع به طور کلی سبب جابه جایی مرزهای رژیم جریان نسبت به حالت شاهد می گردد.

۲- قرارگیری مانع پیوسته (پر، متخلخل و صفحه متخلخل) در لبه سرریز پلکانی با ارتفاع های مختلف در هر دو شیب مورد بررسی نشان می دهد که محل هواگیری طبیعی سرریز با موانع بررسی شده در مقایسه با حالت شاهد، یک پله به سمت پایین دست حرکت می کند.

۳- به طور کلی بر اساس نتایج تحقیق حاضر، در حالت قرارگیری مانع پیوسته با شکل ها و ارتفاع های مختلف بررسی شده، با افزایش پارامتر بی بعد (dc/h)، میزان استهلاک انرژی کاهش می یابد.

مراجع

- Ali, A. S., & Yousif, O. S. Q. (2019, October). Characterizations of flow over stepped spillways with steps having transverse slopes. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 344, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- Amador, A., Sanchez-Juni M, Dolz J. (2006). Characterization of the non-aerated flow region in a stepped spillway by PIV. *J Fluid Eng ASME* 138(6):1266–1273.
- Asghari Pari, S. A, Kordnaeij, M. (2019). Investigating the Effect of eliminate of lateral discontinuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 18th Iranian Hydraulic Conference. Tehran, Iran. (In Persian)
- Asghari Pari, S. A, Kordnaeij, M. (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. doi: 10.22055/jise.2021.36213.1940
- Ashoor, A., & Riazi, A. (2019). Stepped Spillways and Energy Dissipation: A Non-Uniform Step Length Approach. *Applied Sciences*, 9(23), 5071.
- Boes, R. M. and Hager, W.H. (2003a). Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679.
- Boes, R. M. and Hager, W.H. (2003b). Two-Phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.
- Bühler, P., Leandro, J., Bung, D., Lopes, P. and Carvalho, R. (2015). Measuring void fraction of a stepped spillway with non-intrusive methods using different image resolutions. *IWHS 2015*, 41.
- Bung D and Valero D. (2015). Image Processing for Bubble Image Velocimetry in self Aerated Flow, 36th IAHR World Congress, 28 June – 3 July, Huges, Netherland.
- Bung, D. B. (2013). Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 322–329.
- Bung, D.B. (2011). Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 49(5), 639–648.
- Bung, D.B. 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.*
- Chang K-A and Liu P L-F. (1998). Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave. *Phys. Fluids* 10 327–9.
- Chanson, H. (1995). Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways.
- Chanson, H. (2001). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*, 11(4), 205-242
- Chanson, H. (2001). A transition flow regime on stepped spillways: the facts In: *Proceedings of the 29 The IAHR Congress. Beijing, China*, Pp: 490-498.
- Chanson, H., Bung, D. B., & Matos, J. (2015). Stepped spillways and cascades. *IAHR Monograph. School of Civil Engineering, University of Queensland, Brisbane, Australia.*
- Emadzadeh, A. CHiew, Y. M. (2017). Bubble Dynamics and PIV Measurements in a Hydraulic Jump. The 37th IAHR World Congress August 13 – 18, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Felder, S 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.
- Felder, S., & Chanson, H. (2015). Simple design criterion for residual energy on embankment dam stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(4), 04015062.

- Frizell, K. W., Renna, F. M., and Matos, J. (2013). Cavitation potential of flow on stepped spillways. *J. Hydraulic. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000715, 630–636.
- Goepfert, C., Marié, J. L. and Lance, M. (2004). Characterizing of an experimental device generating homogeneous and Isotropic turbulence by synthetic jets. The 9th French Congress of Laser Velocimetry. ULB. Sept.14-17. Brussels. Belgium. (In French)
- Gonzalez, C. A., & Chanson, H. (2007). Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators for embankment dams. *Dam Engineering*, 17(4), 223-244.
- 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).
- Habibi, K, Asghari Pari, S. A, Kordnaeij, M. (2021). Experimental investigating of the Effect of location of discontinuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 19th Iranian Hydraulic Conference. Mashhad, Iran. (In Persian)
- Hamed, A., Mansoori, A., Shamsai, A., & Amirahmadian, S. (2014). Effects of End Sill and Step Slope on Stepped Spillway Energy Dissipation. *J. Water Sci. Res*, 6(1), 1.
- Hunt, S. L., and Kadavy, K. C. (2010). "Energy dissipation on flat-sloped stepped spillways: Part 1. Upstream of the inception point." *Trans. ASABE*, 53(1), 103–109.
- Hussein, B. S. and S. A. Jalil. (2016). Hydraulic Comparison between Labyrinth and Plain Stepped Falls. *Journal of University of Duhok*, Vol. 19, No.1 (Pure and Eng. Sciences), Pp
- Kordnaeij, M., Asghari Pari, S., Sajjadi, S., Shafai Bajestan, M. (2017). Experimentally Comparisons of the Effect of Porous Sheets and 3D-Porous Obstacles in Controlling Turbidity Current. *Water and Soil Science*, 27(1), 43-54. (In Persian)
- 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)
- Kökpınar, M. A. (2004). Flow over a stepped chute with and without macro-roughness elements. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(5), 880-891.
- Kramer, M and Chanson, H. (2018). Transition flow regime on stepped spillways: air–water flow characteristics and step-cavity fluctuations, *Environ Fluid Mech* <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9575-y>.
- Leandro, J., Bung, D.B. & Carvalho, R. (2014). Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods. *Exp Fluids*
- Lopes, P., Leandro, J., Carvalho, R. F., & Bung, D. B. (2017). Alternating skimming flow over a stepped spillway. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(2), 303-322.
- Meireles, I. and Matos, J. (2009). Skimming flow in the non-aerated region of stepped spillways over embankment dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(8), 685-689.
- Mero, S., & Mitchell, S. (2017). Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways. *Water and environment journal*, 31(1), 127-137.
- Novakoski, C. K., Ferla, R., Prá, M. D., Canellas, A. V. B., Marques, M. G., & Teixeira, E. D. (2020). Stepped spillway with pre-aeration by a deflector: flow characteristics. *RBRH*, 25.
- Ostad Mirza, M. J. (2016). Experimental study on the influence of abrupt slope changes on flow characteristics over stepped spillways (No. THESIS). EPFL.
- Ostad Mirza, M. J., Matos, J., Pfister, M., & Schleiss, A. J. (2016). Effect of an abrupt slope change on air entrainment and flow depths at stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 362-375.
- Razmkhah, A, Asghari Pari, S. A, Kordnaeij, M. (2021). Experimental investigating of the Effect of location of continuous Obstacle on the Stepped Spillway on Flow Characteristics with image processing. 19th Iranian Hydraulic Conference. Mashhad, Iran. (In Persian)

- Ryu Y., Chang KA. and Lim HJ. (2005). Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated green water, *Meas. Sci. Technol.*, 16(10), 1945-1953.
- Takahashi, M, Gonzalez, CA., Chanson, H. (2006). Self-aeration and turbulence in a stepped channel Influence of cavity surface roughness. *International Journal of Multiphase Flow*, 32, 1370-1385.
- Thielicke, W and Stamhuis, E J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2: e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>.
- 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.
- Wright, H. J. (2010, May). Improved energy dissipation on stepped spillways with the addition of triangular protrusions. In 78th ICOLD Annual Meeting, Hanoi.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1732-6>.

Laboratory Examination of Comparison of The Effect of Porous Screen, Continuous Obstacle and Continuous Porous obstacle on The Edge of a Stepped Spillway

S. A. Asghari Pari* and M. Kordnaej

* Corresponding Author: Associated professor of civil engineering/Behbahan Khatam Alanbia university of technology, Behbahan, Iran. Email: asghari_amin@bkatu.ac.ir

Received: 26 May 2021, Accepted: 23 September 2021

Extended Abstract

Introduction

Step chutes as a structure are commonly used in earth dams and weighted concrete dams (Chanson, 2001). The presence of a step in the spillway acts like a roughness compared to a smooth chute, which causes the amount of air to enter and as a result, the amount of energy dissipation in the direction of the spillway step increases. In recent decades, extensive research, often laboratory-oriented, has been conducted by researchers to identify the type of flow, the effect of step dimensions, the onset of aeration, and the mechanism of energy dissipation. Further research has attempted to place continuous and discontinuous obstacles and roughness at the bottom of the steps in Floors and edges of step with a variety of shapes and arrangements, deformation of steps, creating angles along the spillway, creating angles in the floor of the steps and edge obstacle, artificial aeration in the steps investigated the hydraulic conditions. In general, in some cases, depending on the height of the obstacle used, the slope of the spillway, the outlet flow, the type of obstacles and the location of the obstacle, the depreciation effect has been positive or negative.

Methodology

The flume used was direct, with a length of 10 m, a width of 1.2 m and a height of 1.2 m in the first 2 m, and 1 m in length of the flume with maximum flow rate 150 liters per second. Measurement of water depth in the tail-water and upstream was carried out using a point gage with an accuracy of ± 1 mm. The spillway have 8 steps, where the vertical length of step (h) is 10.9 cm, the horizontal length of step (L) is 31.3 cm, and the total height is 87 cm, while at a 1:2 slope, the length of step is 20.9 cm and the total height is 88 cm. The image was recorded by Sony FS5 camera with 240 frames per and second, along with 3 LED150 projectors.

Results and Discussion

In the 1: 3 slope in the transition regime, the obstacles used had a positive dissipation effect compared to the flat step. In this slope and flow regime, the porous obstacle (EP) has a greater dissipation effect than the porous screen (ES) and the full obstacle (EO), respectively, and in all three expressed arrangements (EO, ES, EP) in this regime the relative height of 0.38 had the highest dissipation rate. The superiority of the porous obstacle in this regime in energy dissipation is due to the three-dimensionality of the porous obstacle, which depletes the flow energy. Then in the procedure regime for 1: 3 slope, the results show that all three arrangements used have increased energy dissipation compared to the flat step, in this case, respectively, porous screen (ES), porous obstacle (EP) and full obstacle (EO), respectively. Had the highest energy consumption. For example, at the maximum flow rate, the flat steep energy dissipation

rate is 46%, which is 55% for the porous screen (ES), 52% for the porous obstacle (EP) and 49% for the full obstacle (EO).

Conclusions

The present study compares the use of continuous obstacle, porous obstacle (3 dimensional) and screen obstacle (2 dimensional) with three heights at the edge of the step at two slopes of 1: 3 and 1: 2 in all three flows regime of nappe, transitional, and skimming.

1- The placement of continuous obstacle with different shape (filled continuous, porous obstacle and screen obstacle) at the edge of spillway for both slopes of this research causes the onset of the flow regime shift to the flat step and start of the inception point of free aeration (IP) was transmitted to a lower step toward the downstream relative to flat step on both slopes of the present research.

2- Based on the BIV results and a comparison of energy dissipation, it can be stated that continuous obstacles that can expand the mixing zones (including MZ and RF) increase energy dissipation. In fact, the recirculation zone has less dissipation effect than the mixing zone.

3- The creation of a porous obstacle and a porous screen on both slopes has increased energy dissipation compared to the full obstacle in all three flow regimes. This effect will increase with increasing the relative height of the obstacle until it reaches the pool (RZp) on the steps.

Keywords: Energy dissipation, BIV Technique, Step spillway, Screen obstacle, Continuous obstacle, Porous obstacle.