



Numerical study of the effect of non-continuous step on the residual energy of a vertical drop

Samira Mazrouei^{1*}, Reza Mirzaee², Shamsa Basirat³, Vadoud Hasanniya⁴

¹ Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

² Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

³ Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Najafabad, Isfahan, Iran.

⁴ Department of Water Engineering and Hydraulic Structure, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author email: samira.mazrooi@gmail.com

© The Author(s) 2023

Received: 03 July 2023

Accepted: 01 Aug 2023

Published: 04 Sept 2023

Abstract

In drainage and irrigation channels, vertical drop structures are commonly used to transfer water from a higher elevation to a lower one. At the downstream end of these structures, measures are taken to prevent channel bed erosion and reduce the destructive kinetic energy. In the present study, the effect of a non-extended step on the relative energy of the vertical drop structure was investigated using the FLOW-3D software and RNG turbulence model. Two relative heights and three relative widths for the step were considered, and the relative critical depth range was chosen between 0.2 and 0.5. The results indicate that the computed values of downstream relative depth show good agreement with experimental data. Additionally, both extended and non-extended step configurations yielded similar results, with an increase in the relative height of the step resulting in a reduction in the relative remaining energy. In other words, at a constant relative height of the step, for all critical relative depth values, the drop and turbulence generated in the plunge pool are the same for both extended and non-extended step models. Furthermore, employing a tranquility basin downstream reduced the wall height and length of the tranquility basin by more than 12% compared to the model without a step.

Keywords: Downstream depth, Energy loss, non-Extended step, Turbulence, Vertical drop.



بررسی عددی تأثیر پله غیر ممتد بر انرژی نسبی باقی مانده شیب‌شکن قائم

سمیرا مزروعی^{۱*}، رضا میرزائی^۲، شمس‌بصیرت^۳، ودود حسن‌نیا^۴

۱. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.
۲. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۳. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد نجف‌آباد، اصفهان، ایران.
۴. گروه مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

*ایمیل نویسنده مسئول: samira.mazrooi@gmail.com

© The Author(s) 2023

چاپ: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

چکیده

در کانال‌های زهکشی و آبیاری معمولاً برای انتقال آب از یک ارتفاع بالاتر به ارتفاع پایین‌تر از شیب‌شکن‌های قائم استفاده می‌شود. در پایین‌دست این سازه‌ها، جهت جلوگیری از فرسایش بستر کانال و کاهش انرژی جنبشی مخرب آن، تمهیداتی در نظر گرفته می‌شود. در تحقیق حاضر نیز تأثیر پله غیرممتد بر انرژی نسبی باقی‌مانده شیب‌شکن قائم به کمک نرم افزار FLOW-3D و مدل آشفتگی RNG بررسی شد. انرژی نسبی باقی‌مانده تابعی از ارتفاع نسبی پله، عرض نسبی پله و عمق بحرانی نسبی در نظر گرفته شد. دو ارتفاع نسبی و سه عرض نسبی برای پله در نظر گرفته شده و محدوده عمق بحرانی نسبی نیز بین ۰/۲ تا ۰/۵ انتخاب شد. نتایج حاکی از آن است که مقادیر عمق نسبی پایین‌دست حاصل از نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. همچنین به‌کارگیری پله به‌صورت ممتد و غیر ممتد نتایج مشابهی را داشته و با افزایش ارتفاع نسبی پله انرژی نسبی باقی‌مانده کاهش می‌یابد. به عبارتی، در یک ارتفاع نسبی پله ثابت، به‌ازای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، افت و تلاطم ایجاد شده در پشت جت ریزشی در مدل با پله ممتد و غیرممتد یکسان است. علاوه‌براین، در صورت به‌کارگیری حوضچه آرامش در پایین‌دست، مدل دارای پله در مقایسه با مدل بدون پله، ارتفاع دیواره و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آشفتگی، انرژی نسبی باقی‌مانده، پله غیرممتد، شیب‌شکن قائم، عمق پایین‌دست.

۱-مقدمه

گاهی در بخشی از مسیر انتخابی برای احداث کانال و زمانی که شیب طبیعی زمین از شیب لازم برای طراحی کف کانال تندتر است؛ معمولاً برای انتقال آب از سطح بالاتر به پایین تر از سازه شیب شکن قائم استفاده می‌گردد. این سازه‌ها علاوه بر کنترل شیب، سبب کاهش حجم عملیات خاکی نیز می‌شوند. آزمایش‌ها و مطالعات زیادی در خصوص تأثیر پارامترهای عدد شیب شکن و زاویه ریزش جت بر هیدرولیک جریان عبوری از روی شیب شکن قائم با رژیم جریان زیر بحرانی در بالادست انجام شده است (Rand, 1995; Gill, 1997; Rajaratnam & Chamani, 1995; Chamani et al., 2008).

Esen et al. (2004) با انجام آزمایش‌هایی بر روی شیب شکن قائم به تأثیر وجود پله ممتد در عرض کانال با ابعاد مختلف پی بردند. در انتها روابطی را برای عمق نسبی پایین دست برای حالت بدون پله و با پله و عمق نسبی استخر ارائه نمودند. نشان دادند که وجود پله سبب افزایش اتلاف انرژی می‌شود. (Hong et al. (2010 نشان دادند که با افزایش شیب بستر پایین دست شیب شکن، نیروی برخورد و طول شیب شکن افزایش می‌یابد. (Farouk & Elgamal (2012 نیز با استفاده از نرم افزار فلونت به بررسی شیب شکن قائم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دبی سبب افزایش عمق استخر و عمق پایین دست می‌گردد. (Mansouri & Ziaei (2014 با استفاده از نرم افزار فلونت نشان دادند که شیب شکن قائم با آستانه انتهایی در مقایسه با شیب شکن قائم ساده، اتلاف انرژی بیشتری دارد.

Liu et al. (2014) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب بالادست شیب شکن قائم پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش دبی و شیب بستر بالادست، عمق استخر و زاویه برخورد جت کاهش می‌یابد. (Kabiri-Samani et al. (2017 به بررسی شیب شکن قائم مجهز به مستهلک کننده‌های افقی شبکه‌ای و شیاری در لبه شیب شکن قائم پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از این مستهلک کننده‌ها، اتلاف انرژی جریان و عمق پایین دست را افزایش می‌دهد. (Ghaderi et al. (2019 با استفاده از نرم افزار FLOW-3D تأثیر تنگ‌شدگی‌های قائم ورودی بر روی مشخصات هیدرولیکی شیب شکن قائم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود تنگ‌شدگی قائم ورودی باعث افزایش سرعت در لبه شیب شکن می‌شود و با افزایش تلاطم جریان در اثر سقوط جت‌های تقسیم شده جریان و ایجاد ناحیه بیشتری از اختلاط آب و هوا باعث کاهش انرژی جنبشی پایین دست می‌شود. تأثیر شیب قرارگیری صفحات مشبک افقی در لبه شیب شکن قائم نیز توسط Daneshfaraz et al. (2020a) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. این محققین نشان دادند که شیب صفحات مشبک افقی با این که در مقایسه با شیب شکن قائم ساده افزایش اتلاف انرژی را به دنبال دارد، ولی در مقایسه با صفحه مشبک افقی بدون شیب، تأثیری بر اتلاف انرژی جریان ندارد.

Daneshfaraz et al. (2020b) با بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم مجهز به صفحات مشبک افقی دوبل، نشان دادند که انرژی نسبی باقی مانده در مقایسه با شیب شکن قائم ساده افزایش چشم‌گیری می‌کند در مطالعه‌ای دیگر Mirzaee et al. (2021) با بررسی عددی شیب شکن قائم با لبه‌های دندان‌دانه‌ای نشان دادند که دندان‌دار کردن لبه شیب شکن سبب افزایش اتلاف انرژی شیب شکن قائم می‌گردد. به دنبال آن، (Bagherzadeh et al. (2022 با استفاده از یک بررسی

عددی و هوش مصنوعی نشان دادند که شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای در شرایطی که تعداد دندانه‌ها ۳ عدد باشد، در مقایسه با تعداد دندانه ۲ و ۴، اتلاف انرژی به مراتب بیشتری ایجاد می‌کند. (Younesi et al. (2023) نشان دادند که به موجب ایجاد حداکثر اتلاف انرژی جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی، زبر نمودن بستر پایین‌دست در مقایسه با بستر صاف، تأثیری بر اتلاف انرژی جریان نداشته و تنها سبب افزایش تداخل آب و هوا می‌گردد.

به‌کارگیری پله ممتد هم‌عرض کانال، چسبیده به دیواره شیب‌شکن قائم مطابق مطالعه (Esen et al. (2004 باعث افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی و افزایش اتلاف انرژی در مقایسه با مدل بدون پله می‌شود. از آنجایی که در نظر گرفتن پله به‌صورت غیرممتد می‌تواند هم به لحاظ اقتصادی به‌صرفه باشد و هم این که بر روی تلاطم در پشت جت ریزشی و اتلاف انرژی شیب‌شکن قائم مؤثر واقع گردد؛ لذا در تحقیق حاضر بررسی شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست پیشنهاد گردیده و سعی شده است تا اثر غیر ممتد بودن پله در پایین‌دست شیب‌شکن قائم به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش

۲-۱- آنالیز ابعادی

مطابق شکل (۱)، پارامترهای مؤثر شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست به صورت رابطه (۱) است.

شکل ۱. شماتیک شیب‌شکن قائم با پله غیرممتد در پایین‌دست

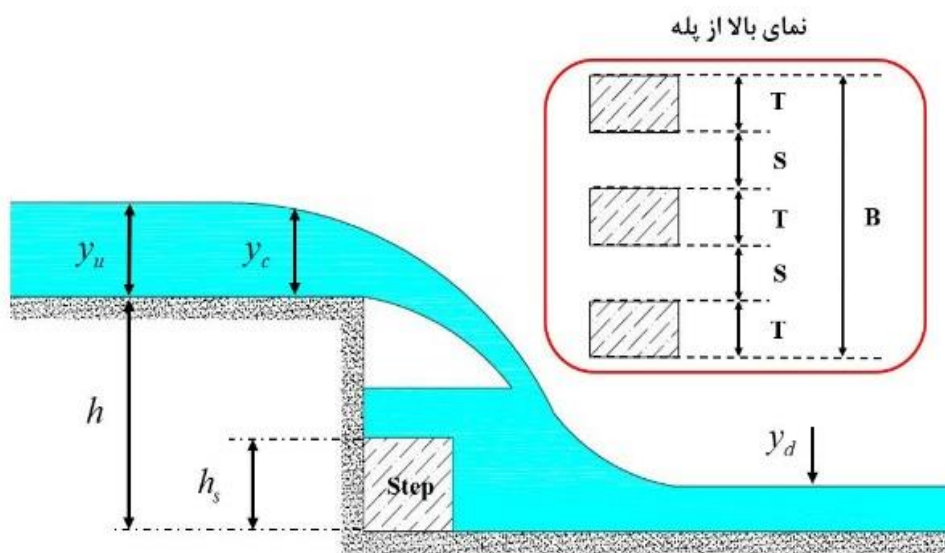


Fig 1. Schematic view of a vertical drop with a downstream non-continuous step

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f(h, h_s, q, y_c, B, \mu, \rho, S, T) \quad (1)$$

در این رابطه، h ارتفاع شیب شکن، h_s ارتفاع پله، q دبی در عرض واحد، y_c عمق بحرانی، y_d عمق پایین دست شیب شکن، B عرض فلوم، μ لزجت دینامیکی آب، ρ چگالی آب، E_d و E_u انرژی مخصوص در پایین دست و بالادست، S فاصله عرضی پله های غیر ممتد و T عرض پله های غیر ممتد هستند. با انتخاب h ، ρ و q به عنوان پارامترهای تکراری و استفاده از تئوری پی باکینگهام، پارامترهای بی بعد به صورت رابطه (۲) به دست آمد:

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{B}{h}, \frac{S}{h}, \frac{T}{h}, \frac{\rho h^2 q}{\mu}\right) \quad (2)$$

در رابطه بالا، $\frac{\rho h^2 q}{\mu}$ بیانگر عدد رینولدز (Re_u) است. از تأثیر پارامتر بدون بعد B/h به دلیل ثابت بودن عرض و ارتفاع شیب شکن، صرف نظر شد. با توجه به این که برای سادگی و کاهش تعداد پارامترهای بی بعد، در تحلیل های ابعادی، می توان پارامترهای حاصل را با هم ترکیب نمود؛ از این رو:

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{S}{B}, \frac{T}{B}, Re_u\right) \quad (3)$$

در تحقیق حاضر، فاصله عرضی پله غیر ممتد برابر عرض پله در نظر گرفته شده است ($S=T$). با توجه به این که محدوده عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ است؛ لذا می توان از تأثیر آن نیز صرف نظر کرد (Sumer & Fredsoe, 1991).

$$\left(\frac{y_d}{h}, \frac{E_d}{E_u}\right) = f\left(\frac{h_s}{h}, \frac{y_c}{h}, \frac{S}{B} = \frac{T}{B} = \beta\right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، y/h عمق بحرانی نسبی، h_s/h ارتفاع نسبی پله و β عرض نسبی پله غیر ممتد است. مقادیر مربوط به پارامترهای مستقل در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. محدوده متغیرهای مستقل تحقیق حاضر

Table 1. The range of independent variables of the current study

پارامترهای مستقل	محدوده
عمق بحرانی نسبی	۰/۲ تا ۰/۵
ارتفاع نسبی پله	۰/۳ و ۰/۴
عرض نسبی پله	۰/۲، ۰/۱۴۳ و ۰/۱۱

۲-۲- معرفی نرم افزار و مدل آشفتگی منتخب

نرم افزار FLOW-3D یک مدل سه بعدی در حل مسائل مکانیک سیالات و هیدرودینامیک به شمار می رود. معادلات حاکم در این نرم افزار معادلات ناویر-استوکس و معادله بقای جرم هستند (Ghaderi et al., 2019). این نرم افزار برای تحلیل سه بعدی

جریان در حالت تراکم‌ناپذیر معادلات ناویر-استوکس رینولدزی را با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک میدان شبکه‌بندی شده حل می‌کند.

شبیه‌سازی آشفتگی FLOW-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW-3D عبارتند از: طول اختلاط پراختل، مدل یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES). در این تحقیق برای شبیه‌سازی مشخصات جریان در شرایط جریان آشفته از مدل آشفتگی RNG به دلیل توانایی در شبیه‌سازی جریان با تعداد شبکه‌های محاسباتی بالا، نیاز به ثابت‌های تجربی کمتر در روابط خود و عملکرد خوب در شبیه‌سازی نواحی جداشدگی جریان، نتایج بهتری در مقابل کرنش و انحنا ناگهانی خطوط جریان و همچنین با توجه به نتایج مطالعه‌های عددی انتخاب گردیده است (Ghaderi et al., 2020).

۲-۳- مشخصات مدل شبیه‌سازی و شبکه محاسباتی

در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی عددی اثر پله غیرممتد در پایین‌دست شیب‌شکن قائم از آرایش‌های مختلف β استفاده گردید. مقادیر عرض پله‌های غیرممتد برابر $67/6$ ، $57/8$ و 12 سانتی‌متر در نظر گرفته شد ($\beta = 0.2, 0.11, 0.143$). شکل (۲) طرح سه‌بعدی شیب‌شکن قائم با پله ممتد و غیرممتد در مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. در کل ۴۲ شبیه‌سازی بر روی شیب‌شکن قائم مجهز به پله غیرممتد در سه عرض و دو ارتفاع نسبی پله انجام گرفت.

برای صحت‌سنجی مدل شیب‌شکن قائم با پله ممتد در پایین‌دست از نتایج آزمایشگاهی (Esen et al., 2004) استفاده شد. ایشان در یک فلوم آزمایشگاهی به عرض $6/0$ متر از سه ارتفاع شیب‌شکن و ۷ ارتفاع مختلف برای پله استفاده نمودند. در تحقیق حاضر، ارتفاع شیب‌شکن برابر ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و ارتفاع پله نیز $5/7$ و 10 سانتی‌متر انتخاب شد. طول بالادست و پایین‌دست مورد نیاز برای شبیه‌سازی نیز ۳ متر در نظر گرفته شد (Ghaderi et al., 2019). از عمق نسبی پایین‌دست شیب‌شکن نیز برای صحت‌سنجی استفاده گردید. شکل (۳) مشخصات هندسی شیب‌شکن قائم و شرایط مرزی را با حضور پله غیرممتد نشان می‌دهد. جهت اعمال شرایط مرزی، در ورودی از شرط مرزی دبی مشخص^۱، در پایین‌دست به دلیل عدم تأثیرپذیری جریان در شبکه حل از شرط خروجی^۲، برای دیواره‌ها و کف از شرط مرزی دیواره^۳ و در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن^۴ استفاده گردید. همچنین فشار به صورت هیدرواستاتیک در شرط اولیه جریان لحاظ شد. در ابتدا به منظور انجام شبیه‌سازی مدت زمان حل عددی ۳۰ ثانیه انتخاب شد و پس از بررسی‌های مربوطه و کنترل شرط پایداری جریان، زمان در نظر گرفته شده برای حل مدل عددی کفایت کرد. کنترل پایداری شرایط جریان نیز بر اساس اختصار نرم‌افزار مبنی بر این که در دو گام زمانی متوالی، اختلاف مقادیر محاسبه شده ناچیز است، صورت می‌گرفت. علاوه بر این با اندازه-

¹ Volume flow rate

² Outflow

³ Wall

⁴ Symmetry

گیری مقدار دبی ورودی به مدل در انتهای میدان حل و مقایسه آن با دبی اعمال شده به مدل در شرط مرزی، پایداری شرایط جریان کنترل می گردید. در نهایت هر شبیه سازی بطور تقریبی ۴ ساعت به طول انجامید.

شکل ۲. طرح سه بعدی از شیب شکن قائم مجهز به پله ممتد و غیر ممتد

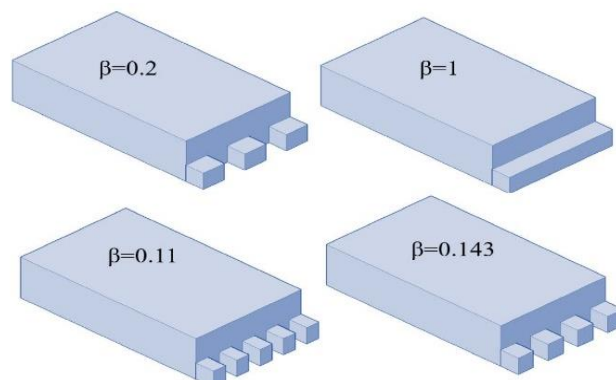


Fig 2. Three-dimensional view of a vertical drop equipped with continuous and non-continuous steps

شکل ۳. مشخصات هندسی شیب شکن قائم و شرایط مرزی با حضور پله غیر ممتد در تحقیق حاضر

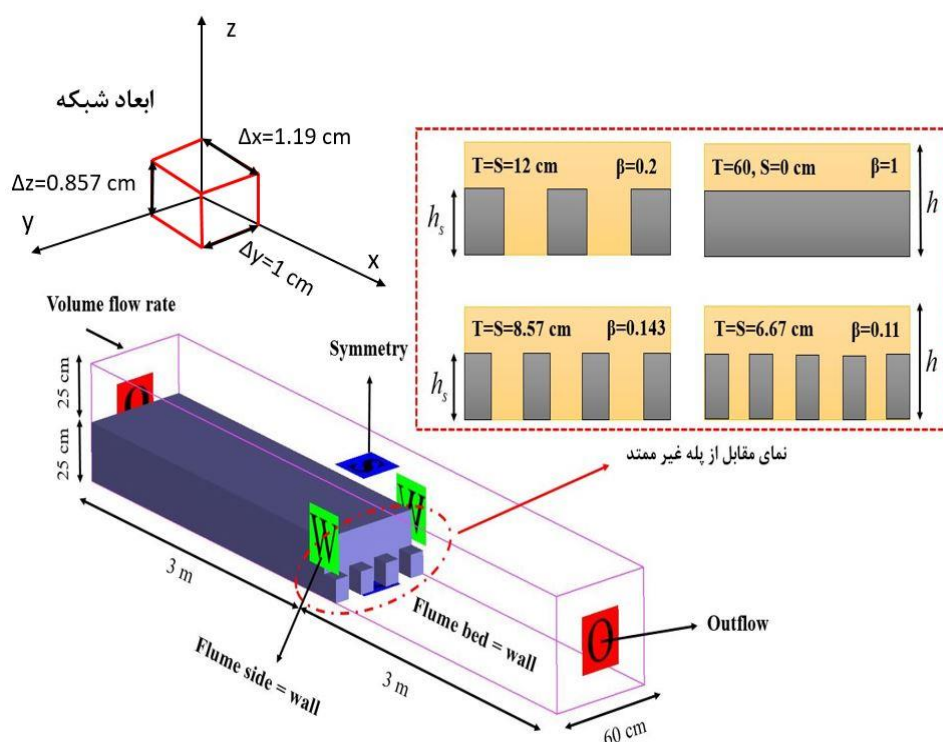


Fig 3. Geometric characteristics of vertical drop and boundary conditions with the presence of non-continuous step in the present study

۲-۴- صحت‌سنجی مدل فیزیکی

در تحقیق حاضر مدل‌های متفاوتی جهت انتخاب اندازه شبکه بهینه شبیه‌سازی گردید. همچنین آنالیز حساسیت اندازه شبکه تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر و دارای اختلاف خطای کم بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام شد. آنالیز حساسیت اندازه شبکه به همراه خطاها در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که از شبکه‌های مستطیلی برای شبکه‌بندی مدل و میدان حل استفاده شده است که در آن برای تمامی حالات جدول (۲)، اندازه شبکه در راستای محور عرضی برابر یک سانتی‌متر لحاظ شده و در راستای محور طولی، اندازه شبکه بزرگ‌تر از راستای قائم انتخاب شده است.

جدول ۲. آنالیز حساسیت اندازه شبکه در تحقیق حاضر

Table 2. Mesh size sensitivity analysis in the present study

ردیف	کوچکترین اندازه شبکه (cm)	بزرگترین اندازه شبکه (cm)	تعداد کل شبکه	متوسط خطای نسبی (%)	خطای جذر میانگین مربعات
۱	۱/۳۹	۱/۸۲	۴۹۶۶۵۰	۱۴/۶۴	۰/۰۲۴
۲	۱/۲	۱/۵	۸۴۰۰۰۰	۱۰/۵	۰/۰۱۹
۳	۰/۸۵۷	۱/۱۹	۱۷۵۰۰۰۰	۳/۷	۰/۰۰۵۵
۴	۰/۶	۱	۳۰۰۰۰۰۰	۲/۹۷	۰/۰۰۴۹

در جدول (۲) همانگونه که ملاحظه می‌شود مدل با تعداد کل شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰۰ دارای معیارهای ارزیابی قابل قبول و نزدیک به هم بوده و با دقت خوبی نتایج آزمایشگاهی را شبیه‌سازی می‌کند. از آنجایی که برای تعداد اندازه شبکه ۳۰۰۰۰۰۰ زمان شبیه‌سازی بسار طولانی و زمان‌بر می‌شد؛ لذا جهت کاهش اثر شبکه محاسباتی در نتایج شبیه‌سازی، تعداد اندازه شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ در میدان حل برای تمامی مدل‌های تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است. نتایج اندازه شبکه منتخب در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) ملاحظه می‌گردد که مقادیر عمق نسبی پایین دست مدل عددی با تعداد کل شبکه ۱۷۵۰۰۰۰ در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی دارای خطای نسبی، خطای جذر میانگین مربعات و ضریب تعیین مناسبی بوده و صحت و دقت مدل‌سازی انجام شده را نشان می‌دهد. محدوده داده‌های مربوط به شبیه‌سازی انجام شده نیز در جدول (۳) ارائه شده است. محدوده داده‌های مربوط به شبیه‌سازی انجام شده نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. محدوده داده‌های شبیه‌سازی تحقیق حاضر

Table 3. Range of simulation data of the present study

محدوده پارامترها				h_s / h
$y_d (cm)$	$y_c (cm)$	$y_u (cm)$	$q (m^3 / s.m)$	
۵/۸-۱/۹۲				۰/۳
	۱۲/۶-۵	۱۱/۴-۵/۵۲	۰/۱۳۸-۰/۰۳۵	
۶-۲				۰/۴

شکل ۴. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی عمق نسبی پایین دست در اندازه شبکه منتخب

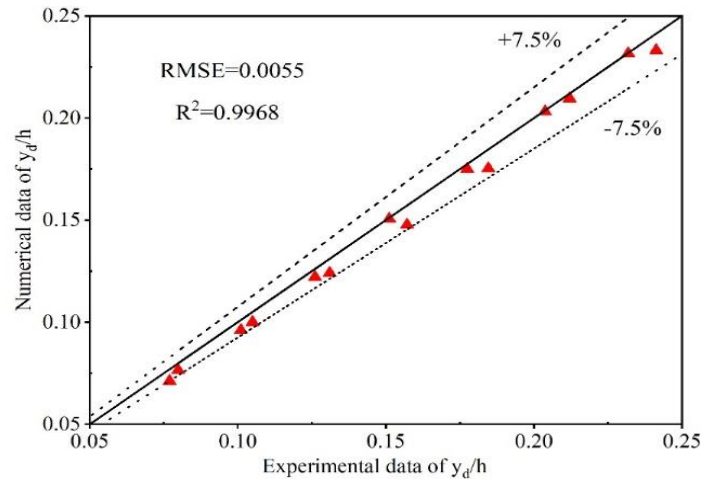


Fig 4. Comparison of experimental and numerical values of relative downstream depth in selected mesh size

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب جریان بر روی شیب شکن قائم با پله غیر ممتد در پایین دست به ازای فواصل عرضی متفاوت پله در ارتفاع نسبی پله $0/4$ و عمق بحرانی نسبی $0/403$ در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) قابل توجه است که پس از سقوط جت ریزشی شیب شکن، مقداری از دبی جریان به سمت دیواره شیب شکن قائم برگشته و سبب ایجاد تلاطم و آشفتگی در پشت جت سقوطی شده و مقداری از دبی جریان در مابین و روی پله غیر ممتد قرار می گیرد. همچنین مشاهده می شود که در تمامی مدل ها، به ازای ارتفاع نسبی پله و عمق بحرانی نسبی ثابت، با تغییر عرض نسبی پله تغییری در پروفیل جریان بر روی مدل های دارای پله غیر ممتد در مقایسه با مدل با پله ممتد ایجاد نمی شود.

شکل ۵. جریان بر روی شیب شکن قائم با پله ممتد و غیر ممتد در شبیه سازی عددی برای $y_0/h=h/h_s=0.4$

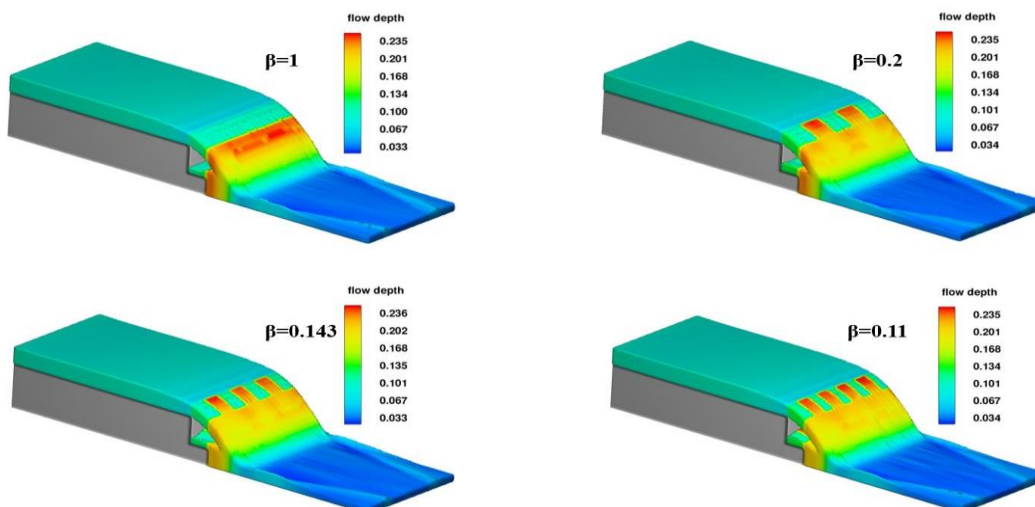


Fig 5. Flow over vertical drop with continuous and non-continuous step in numerical simulation for $y_0/h=h/h_s=0.4$

۳-۲- عمق نسبی پایین دست

مقادیر عمق نسبی پایین دست به ازای دو ارتفاع و سه عرض نسبی پله در مقابل عمق بحرانی نسبی در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقادیر عمق نسبی پایین دست برای تمامی مدل‌ها افزایش می‌یابد. برای هر دو ارتفاع نسبی پله در شکل (۶) مشاهده می‌شود که مقادیر عمق نسبی پایین دست حاصل از نتایج عددی تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. مشخص شد که غیر ممتد شدن پله در مقایسه با پله ممتد، تأثیری بر عمق نسبی پایین دست ندارد. چنانچه وجود پله و افزایش ارتفاع نسبی آن در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، به دلیل افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی، باعث افزایش ۸ و ۱۳ درصدی عمق نسبی پایین دست در دو ارتفاع نسبی ۰/۳ و ۰/۴ شده است.

شکل ۶. تغییرات عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی الف) $h_s/h = 0.4$ ب) $h_s/h = 0.3$

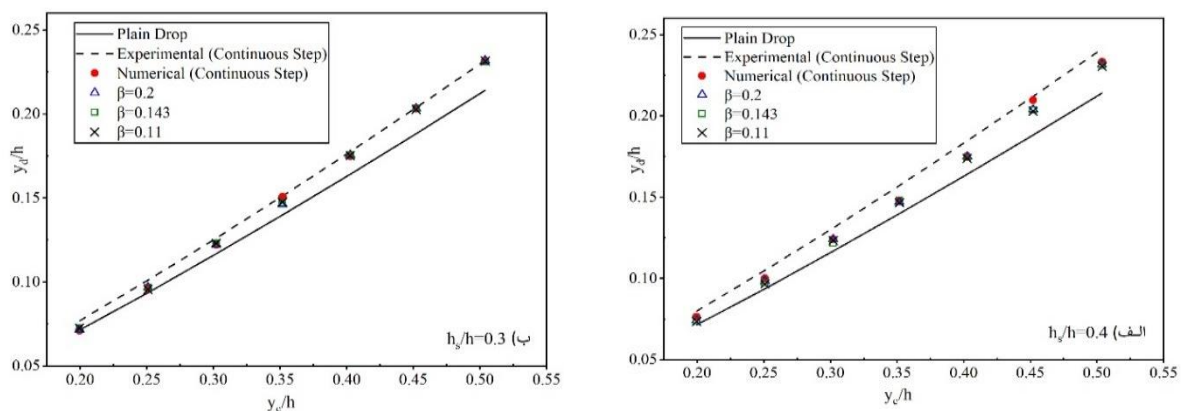


Fig 6. Changes in the relative downstream depth versus the relative critical depth a) $h_s/h=0.4$ b) $h_s/h=0.3$

استفاده از پله به صورت ممتد و غیر ممتد چسبیده به دیواره شیب‌شکن قائم، محدوده عدد فرود پایین دست را از ۳/۶ تا ۴/۷ در شیب‌شکن قائم ساده به محدوده ۳ تا ۴/۱۸ در شیب‌شکن قائم مجهز به پله در هر دو ارتفاع نسبی پله کاهش می‌دهد. در صورتی که در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم جهت اتلاف انرژی از حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع یک یا چهار (تفاوت تیپ ۴ و ۱ در مقدار عمق ثانویه بوده که به میزان ۱۰ درصد بیشتر در نظر گرفته می‌شود) استفاده گردد، میزان کاهش عدد فرود در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به پله می‌تواند ابعاد حوضچه آرامش را نیز کاهش دهد. در جدول (۴) میزان کاهش ابعاد حوضچه آرامش نوع یک یا به عبارت دیگر کفبند (ارتفاع دیواره و طول حوضچه) در پایین دست شیب‌شکن قائم مجهز به پله در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده بیان شده است. لازم به ذکر است که برای محاسبه مقادیر جدول (۴) ابتدا با استفاده از رابطه بلانگر، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک محاسبه شده و به عنوان ارتفاع دیواره در نظر گرفته شد و طول حوضچه نیز ۶ برابر عمق ثانویه محاسبه گردید (Younesi et al., 2023). سپس از رابطه (۵) برای محاسبه مقدار کاهش ابعاد حوضچه استفاده شد. متوسط مقادیر بدست آمده برای هر مدل در جدول (۴) ارائه شدند.

$$\omega = \frac{|\psi_p - \psi_{sp}|}{\psi_p} \quad (5)$$

که در رابطه بالا، ω مقدار کاهش ابعاد حوضچه، ψ_p ابعاد حوضچه در شرایط بدون وجود پله و ψ_{sp} ابعاد پله در شرایط وجود پله است.

جدول ۴. کاهش ابعاد حوضچه آرامش در پایین دست شیب شکن قائم مجهز به پله ممتد و غیر ممتد

Table 4. Decrease the dimensions of the downstream stilling basin of the vertical drop equipped with continuous and non-continuous steps

ارتفاع نسبی پله	کاهش ارتفاع دیواره (%)	کاهش طول حوضچه (%)
۰/۳	۱۲	۱۴/۵
۰/۴	۱۷/۴	۲۱

همانگونه که در جدول (۴) مشاهده می شود، در صورت استفاده از پله به صورت ممتد و غیر ممتد در دیواره شیب شکن قائم، ابعاد حوضچه آرامش نیز کاهش می یابد. به کارگیری پله در دیواره شیب شکن قائم برای ارتفاع نسبی پله بیش از ۰/۳، دیواره و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می دهد. نکته حائز اهمیت این است که از آنجایی که غیر ممتد بودن پله در مقایسه با پله ممتد مصالح کمتری برای ساخت نیاز دارد؛ لذا نسبت به آن صرفه اقتصادی داشته و می تواند در طراحی های مربوط به شیب شکن های قائم مدنظر مهندسین هیدرولیک قرار گیرد.

۳-۳- انرژی نسبی باقی مانده

در شیب شکن های قائم، نسبت انرژی مخصوص در پایین دست به انرژی در بالادست، انرژی نسبی باقی مانده گفته می شود. مقادیر مربوط به انرژی نسبی باقی مانده شیب شکن قائم ساده و شیب شکن با پله ممتد و غیر ممتد به ازای دو ارتفاع نسبی و سه عرض نسبی پله در شکل (۷) نسبت به عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. مشاهده می گردد که برای تمامی مدل های تحقیق حاضر و شیب شکن قائم ساده با افزایش عمق بحرانی نسبی، انرژی نسبی باقی مانده به صورت یک تابع لگاریتمی افزایش می یابد.

شکل ۷. تغییرات انرژی نسبی باقی مانده در مقابل عمق بحرانی نسبی الف) $h_s/h=0.4$ ب) $h_s/h=0.3$

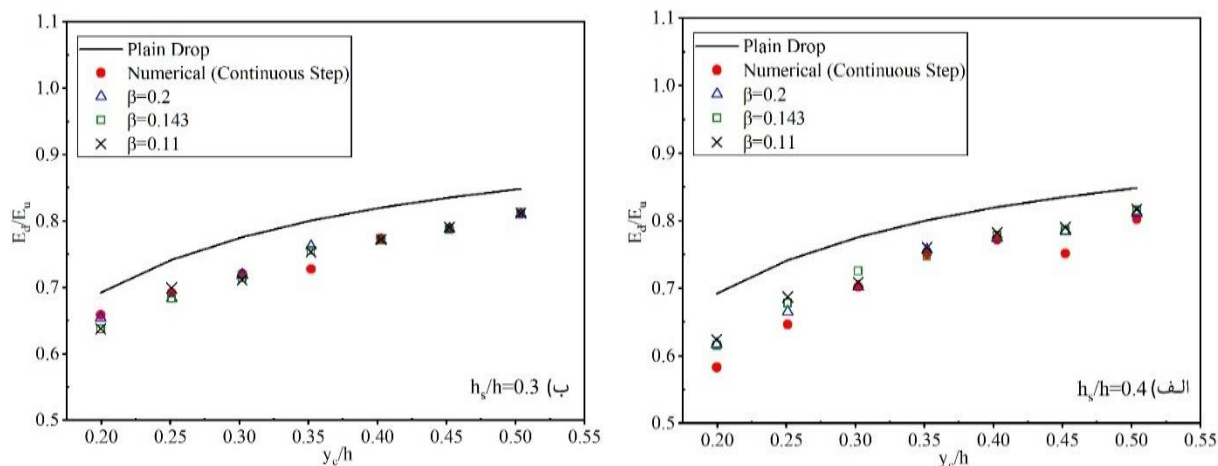


Fig 7. Changes in the relative residual energy versus the relative critical depth a) $h_s/h=0.4$ b) $h_s/h=0.3$

در شکل (۷) برای هر دو ارتفاع نسبی پله، انرژی نسبی باقی‌مانده در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش عمق نسبی پایین‌دست در اثر افزایش تلاطم در پشت جت ریزشی اتفاق افتاده است. ملاحظه می‌گردد که تأثیر عرض نسبی پله بر انرژی نسبی باقی‌مانده در هر دو ارتفاع نسبی پله ناچیز است. به این معنی است که پله غیرممتد همان کارایی پله ممتد در دیواره شیب‌شکن قائم را انجام می‌دهد، با این تفاوت که در پله غیر ممتد مصالح کمتری جهت ساخت در نظر گرفته شده و اقتصادی‌تر است. در نظر گرفتن حوضچه نوع یک (کفبند) در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مجهز به پله غیرممتد در ارتفاع نسبی پله $0/3$ و $0/4$ ، انرژی نسبی باقی‌مانده را در مقایسه با حالت بدون پله به ترتیب 4 و 6 درصد کاهش می‌یابد.

۳-۴- روابط رگرسیونی

در شکل (۸) تغییرات اتلاف آشفتگی در پشت جت ریزشی شیب‌شکن قائم با پله در پایین‌دست برای ارتفاع نسبی پله $0/4$ در مقابل عمق بحرانی نسبی نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که پله به صورت ممتد و غیر ممتد چسبیده به دیواره در تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی، اتلاف آشفتگی یکسانی در پشت جت ریزشی ایجاد می‌کند.

برای بررسی تأثیر پارامترهای مستقل و همچنین تخمین مقادیر عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده، روابط تجربی ارائه گردید. روابط در اکسل با استفاده از دستور Solver به دست آمد. برای ارائه رابطه، تعداد ۱۲ داده (حدود ۳۰ درصد داده‌ها) به صورت تصادفی برای آموزش در نظر گرفته شده و ۳۰ داده (حدود ۷۰ درصد داده‌ها) نیز به عنوان تست انتخاب شدند. روابط تجربی به همراه معیارهای ارزیابی در جدول (۵) ارائه شده است. روابط ارائه شده در جدول (۵) دارای معیارهای ارزیابی قابل قبولی بوده و می‌تواند تخمین درستی از داده‌های تحقیق حاضر را ارائه دهد. همچنین در هر دو روابط ارائه شده، پارامتر عرض نسبی پله دارای توانی نزدیک به صفر است؛ لذا تغییر این پارامتر تأثیری بر عمق نسبی پایین‌دست و انرژی نسبی باقی‌مانده نسبی ندارد.

شکل ۸. تغییرات اتلاف آشفتگی پشت جت ریزشی در مقابل عمق بحرانی نسبی

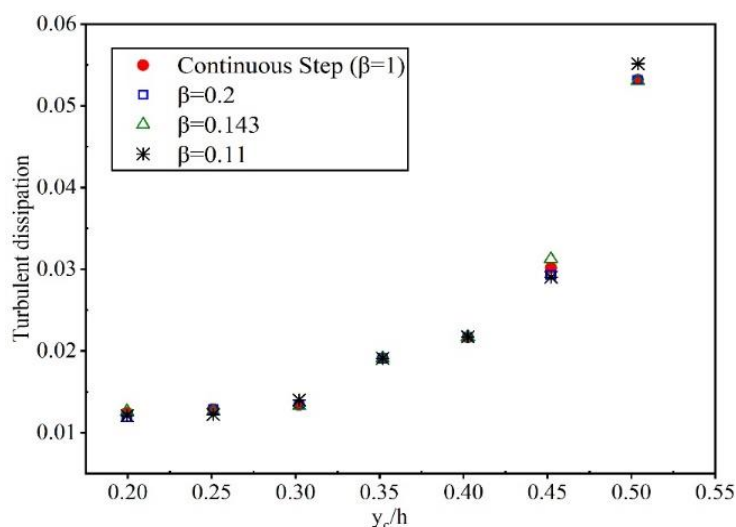


Fig 8. Changes of turbulence dissipation behind the falling jet versus relative critical depth

جدول ۵. روابط مربوط به عمق نسبی پایین دست و انرژی نسبی باقی مانده

Table 5. Downstream relative downstream depth and relative residual energy equations

روابط	معیارهای ارزیابی		پارامتر مستقل		
	ضریب تعیین	خطای جذر میانگین مربعات	y_c / h	h_s / h	β
$\frac{y_d}{h} = 0.545 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.25} \left(\frac{h_s}{h}\right)^{0.05} \beta^{-0.0006}$	۰/۹۹۸	۰/۰۰۸	مؤثر	مؤثر	بی تأثیر
$\frac{E_d}{E_u} = 0.955 \left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.26} \left(\frac{h_s}{h}\right)^{-0.035} \beta^{-0.0006}$	۰/۹۸	۰/۰۱۸	مؤثر	مؤثر	بی تأثیر

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر پله غیر ممتد بر روی انرژی نسبی باقی مانده نسبی شیب شکن قائم در دو ارتفاع و سه عرض نسبی پله به صورت عددی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای شبیه سازی سطح آزاد از روش VOF و برای مدل آشفتگی از RNG استفاده شد. نتایج نشان داد عمق نسبی پایین دست شیب شکن قائم مجهز به پله حاصل از نتایج عددی همبستگی مناسبی با داده های آزمایشگاهی دارد و کارایی پله به صورت غیر ممتد در مقایسه با پله ممتد در دیواره شیب شکن قائم یکسان بوده و عرض نسبی پله تأثیری بر عمق نسبی پایین دست و انرژی نسبی باقی مانده نسبی ندارد. همچنین افزایش ارتفاع نسبی پله سبب افزایش عمق نسبی پایین دست و کاهش انرژی نسبی باقی مانده می گردد. شیب شکن های قائم با پله غیر ممتد در مقایسه با حالت بدون پله، عمق نسبی پایین دست را افزایش داده و در پی آن، در صورت به کارگیری حوضچه آرامش، ارتفاع و طول حوضچه آرامش را بیش از ۱۲ درصد کاهش می دهند. از آنجایی که پله به صورت ممتد و غیر ممتد نتایج یکسانی را ارائه می دهد؛ لذا غیر ممتد بودن پله در مقایسه با پله ممتد مصالح کمتری برای ساخت نیاز دارد. بنابراین نسبت به پله ممتد از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بوده و قابل استفاده در پایین دست شیب شکن های قائم برای کاهش ابعاد حوضچه آرامش (کفبند) است.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- مراجع

- Bagherzadeh, M., Mousavi, F., Manafpour, M., Mirzaee, R., & Hoseini, K. (2022). Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4), 4676-4689. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.127>
- Chamani, M. R., Rajaratnam, N., & Beirami, M. K. (2008). Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. *Journal of hydraulic engineering*, 134(10), 1532-1535. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:10\(1532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1532))

- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R., & Bazyar, A. (2020a). Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2499-2509. (In Persian)
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R., & Abraham, J. (2020b). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2927-2936. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x>
- Esen, I. I., Alhumoud, J. M., & Hannan, K. A. (2004). Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water international*, 29(4), 523-529. <https://doi.org/10.1080/02508060408691816>
- Farouk, M., & Elgamal, M. (2012). Investigation of the performance of single and multi-drop hydraulic structures. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2(1), 48-74. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2012.045939>
- Ghaderi, A., Dasineh, M., & Abbasi, S. (2019). Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (numerical investigation). *Journal of Hydraulics*, 13(4), 121-131. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1112-8>
- Blaisdell, F. W. (1980). Hydraulics of rectangular vertical drop structures: *Journal of Hydraulic Research*, 17(4), 289-302.
- Hong, Y. M., Huang, H. S., & Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129. <https://doi.org/10.1080/00221680903568683>
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.11.002>
- Liu, S. I., Chen, J. Y., Hong, Y. M., Huang, H. S., & Raikar, R. V. (2014). Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(4), 9.
- Mansouri, R., & Ziaei, A. (2014). Numerical modeling of flow in the vertical drop with inverse apron. *11 th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014*, New York City, USA.
- Mirzaee, R., Hosseini, K., & Mousavi, F. (2021). Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*, 16(1), 23-36. (In Persian)
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384. <https://doi.org/10.1080/00221689509498578>
- Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13. ASCE.
- Sumer, B. M., & Fredsoe, J. (1991). Onset of scour below a pipeline exposed to waves. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- Yonesi, H. A., Daneshfaraz, R., Mirzaee, R., & Bagherzadeh, M. (2023). Maximum energy loss in a vertical drop equipped with horizontal screen with downstream rough and smooth bed. *Water Supply*, 23(2), 960-974. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.005>