

Research Paper

Numerical Study of the Effect of Height of Vertical Screens on Vertical Drop Energy Dissipation

Majid Pasbani Khiavi ^{1*}, Vadoud Hasanniya Giglou²

¹ Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Ph. D. Student of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran



10.22125/IWE.2022.162566

Received:

June 19, 2022

Accepted:

October 23, 2022

Available online:

December 11, 2022

Keywords:

Screens, Vertical drop, Relative height, Froude number, Energy dissipation

Abstract

Vertical screens are energy dissipaters that can be used downstream of small hydraulic structures such as vertical drops. In the present study, the effect of the height of the screens on the downstream of the vertical drop has been investigated numerically. For this purpose, three relative heights of 0.2, 0.4 and 0.6 for the screens and the relative critical depth range between 0.12 and 0.42 have been selected. For numerical modeling, Flow-3D software with two turbulence models $k - \varepsilon$ and $k - \varepsilon(RNG)$ and three types of meshing has been used. The results showed that the $k - \varepsilon(RNG)$ turbulence model was better performance than $k - \varepsilon$ model in comparison with experimental results. Also, the results of using screens with different heights in the downstream of the vertical drop showed that these plates increase the relative energy dissipation and relative depth of the downstream by 176% and 94% respectively compared to the simple vertical drop. Investigating of the increase in energy dissipation efficiency, it can be seen that the screens with relative heights of 0.4 and 0.6 dissipates more energy by reducing the immersion rate of the hydraulic jump compared to the overall mesh plate. Finally, the vertical drop equipped with screen with a relative height of 0.4 with a decrease of 66.3 and 10.3 percent of the Froude number of downstream and an increase of 187 and 2.8 percent relative energy consumption, had the best performance compared to the simple drop and vertical drop equipped with an overall screen, respectively.

1. Introduction

Vertical drops are one of the common structures used in irrigation, drainage, and surface water harvesting channel. By transferring water from the upstream to the downstream, these structures convert the upstream subcritical flow into the downstream supercritical flow. Research in the field of vertical drops is usually focused on determining the behavior of hydraulic parameters of vertical drops with subcritical and supercritical flow in the upstream. Some studies have also proposed methods to increase energy dissipation in the downstream of vertical drops. Screens are one of the structures that have been used in recent years to dissipate energy and Hydraulic jump control in downstream small hydraulic structures. Also, studies on the hydraulic performance of Screens in the process of energy dissipation of flow have been done. Therefore, in the present study, with the aim of developing design methods for further use of these dissipaters, the effect of Screens height on energy dissipation in vertical drops has been numerically investigated.

2. Methodology

In the present study, Flow-3D software was used to simulate the effect of screens on the energy dissipation of vertical drops. The flow equations in this software include mass conservation equation, momentum equation, and fluid free surface profile equation. The characteristics of the numerical model and the dimensions of the solution domain have been selected similar to the laboratory model of Daneshfaraz et al. (2022).

Table (1) shows the general characteristics of the physical model for validation of the numerical model of the present study.

| Model Description | Discharge (Lit/min) range | Vertical Drop | | | | Screen | |
|-------------------|---------------------------|---------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|
| | | Height (cm) | Length (cm) | Width (cm) | Porosity (%) | Width (cm) | Height (cm) |
| Experimental | 150-850 | 15 | 120 | 30 | 40 | 30 | 45 |
| Numerical | 150-850 | 15 | 120 | 30 | 40 | 30 | 3-6-9-45 |

3. Results

In the present study, with the aim of increasing the energy dissipation efficiency in screens, the effect of the height of vertical screens in the downstream of the vertical drop was investigated using computational fluid dynamics. The results showed that the use of screens at all heights increases the relative depth of the downstream and the relative energy dissipation and decreases the Froude number of downstream. A comparison of the effect of the relative height of the screens to the overall screens in the downstream of the vertical drop showed that the screens with a relative height of 0.4 with a decrease of 10.3% and the screens with a relative height of 0.2 with an increase of 14.8 % of Froude number of downstream presented the best and worst performance, respectively. Screens with a relative height of 0.4, with the highest possible energy dissipation at the relative critical depth of 0.12 to 0.42, have the best performance in the energy dissipation of vertical drops.

4. Discussion and Conclusion

Considering that the reduction of energy in the downstream of drop structures is one of the most important capability of these structures, based on the result of this research and dimensional similarity it is possible to design screens with suitable height. It also seems that by overtopping of the flow through the screens, the problem of blockage of the screens by the rubbish in the flow will be solved.

5. Six important references

- 1) Bakhmeteff, M.W. (1932). *Hydraulics of open channels, New York and London, McGraw-Hill book company, Inc.*
- 2) Chamani, M., & Beirami, M. K. (2002). Flow characteristics at drops. *Journal of hydraulic engineering*, 128(8), 788-791.
- 3) Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S. & Hasanniya, V. (2020). Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(7), 431-434.
- 4) Daneshfaraz, R. Sadeghfam, S., Hasanniya, V., Abraham, J. & Norouzi, R. (2022). Experimental Investigation on Hydraulic Efficiency of Vertical Drop Equipped with Vertical Screens. *Teknik Dergi*, 33 (5). DOI: 10.18400/tekderg.755938
- 5) Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- 6) Rajaratnam, N., & Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی عددی تاثیر ارتفاع صفحات مشبک قائم در استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم

مجید پاسبانی خیاوی^{۱*}، ودود حسن‌نیا گیگلو^۲

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

مقاله پژوهشی

چکیده

صفحات مشبک قائم از جمله مستهلک‌کننده‌های انرژی می‌باشند که می‌توان از آن‌ها در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک نظیر شیب‌شکن‌های قائم استفاده نمود. در تحقیق حاضر به بررسی عددی تاثیر ارتفاع صفحات مشبک در پایین‌دست شیب‌شکن قائم پرداخته شده است. برای این منظور سه ارتفاع نسبی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ برای صفحات مشبک و محدوده عمق بحرانی نسبی بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۲ انتخاب شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم افزار Flow-3D با دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و $k-\varepsilon(RNG)$ و سه نوع مش بندی استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داد که مدل آشفتگی $k-\varepsilon(RNG)$ در مقایسه با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ مطابقت بهتری با مدل آزمایشگاهی داشت. همچنین نتایج استفاده از صفحات مشبک با ارتفاع‌های متنوع در پایین‌دست شیب‌شکن قائم نشان داد که این صفحات به ترتیب استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی پایین‌دست را نسبت به شیب‌شکن قائم ساده به طور متوسط ۱۷۶ و ۹۴ درصد افزایش می‌دهد. با بررسی میزان افزایش راندمان استهلاک انرژی می‌توان دریافت که صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ و ۰/۶ با کاهش میزان استغراق پرش هیدرولیکی نسبت به صفحه مشبک سرتاسری، انرژی بیشتری را مستهلک می‌کنند. در نهایت شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ با کاهش ۶۶/۳ و ۱۰/۳ درصدی عدد فرود پایین‌دست و افزایش ۱۸۷ و ۲/۸ درصدی استهلاک انرژی نسبی، به ترتیب نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک سرتاسری دارای بهترین عملکرد بود.

واژه‌های کلیدی: صفحه مشبک، شیب‌شکن قائم، ارتفاع نسبی، عدد فرود، استهلاک انرژی

۱. استاد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، pasbani@uma.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی دکترا، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مقدمه

شیب‌شکن‌های قائم یکی از سازه‌های رایج مورد استفاده در کانال‌های آبیاری، زهکشی و جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌باشند. این سازه‌ها با کاهش شیب زمین و انتقال آب از سراب به پایاب باعث تبدیل جریان زیر بحرانی بالادست به جریان فوق بحرانی در پایین‌دست می‌شود که یکی از مشکلات استفاده از این سازه‌ها به شمار می‌رود (راجاراتنام و چمنی، ۱۹۹۵).

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه شیب‌شکن‌های قائم، معمولاً معطوف به تعیین رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست می‌باشند (بخمتف، ۱۹۳۲)، (رند، ۱۹۵۵)، (گیل و همکاران، ۱۹۷۹)، راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵) و (چمنی و همکاران، ۲۰۰۸) و فوق بحرانی در بالادست می‌باشد (چمنی و همکاران، ۲۰۰۲) و دانشفراز و همکاران، (۱۳۹۹). اولین مطالعه در زمینه شیب‌شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست توسط بخمتف (۱۹۳۲) انجام شد. مور (۱۹۴۳) با اندازه‌گیری‌های واقعی سرعت در پایین‌دست شیب‌شکن قائم نشان داد که استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم تابعی از عمق بحرانی نسبی می‌باشد که عمده انرژی جریان در اثر برخورد جت ریزشی به کف کانال مستهلک می‌شود. این در حالی است که وایت (۱۹۴۳) دلیل استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم را آشفتگی در داخل استخر زیر جت بیان کرد. راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵) با مطالعه تحلیلی و تجربی، روابطی را برای پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی استخر ارائه دادند. همچنین این محققین وجود جریان برگشتی به سمت دیواره شیب‌شکن را دلیل اصلی ایجاد عمق داخل استخر معرفی کردند. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با ایجاد شیب مثبت در بالادست شیب‌شکن قائم نشان دادند که با افزایش شیب عمق لبه شیب‌شکن و عمق استخر کاهش پیدا می‌کند.

برخی از مطالعات نیز به ارائه روش‌هایی برای افزایش استهلاک انرژی در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم پرداختند. برای اولین بار اسن و همکاران (۲۰۰۴) با قرار دادن یک پله در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم نشان دادند که استفاده از پله باعث افزایش استهلاک انرژی

می‌شود. بعد از آن تاثیر استفاده از مستهلک کننده شبکه‌ای و شیاری به صورت افقی در لبه شیب‌شکن توسط کبیری سامانی و همکاران (۲۰۱۷) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این مستهلک کننده‌ها با ایجاد تلاطم داخل استخر زیر جت باعث افزایش استهلاک انرژی به میزان ۳۳ درصد نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌شود. به طور سنتی، پرش هیدرولیکی و حوضچه‌های آرامش مستهلک کننده‌های انرژی هستند که به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (یو اس بی آر، ۱۹۸۷). صفحات مشبک یکی از انواع سازه‌هایی هستند که در سال‌های اخیر به منظور استهلاک انرژی و کنترل پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (راجاراتنام و هورتیگ، ۲۰۰۰). این سازه‌ها جایگزین حوضچه‌های آرامش نمی‌باشند، اما در مواقعی که استفاده از حوضچه‌های آرامش از لحاظ فنی و موقعیت توپوگرافی امکان‌پذیر نباشد، استفاده از این صفحات می‌تواند کاربرد داشته باشد. نتایج مطالعات راجاراتنام و هورتیگ (۲۰۰۰) بر روی تاثیر استفاده از صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصد نشان داد که استفاده از صفحات مشبک در مقایسه با پرش هیدرولیکی انرژی بیشتری را مستهلک می‌کند. چاکیر (۲۰۰۳) با بررسی آزمایشگاهی بر روی تاثیر ضخامت صفحات مشبک بر روی استهلاک انرژی نشان داد که ضخامت این صفحات تاثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی ندارد. بالکیش (۲۰۰۴) با مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که شیب صفحات مشبک تاثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی ندارد.

در سال‌های اخیر نیز مطالعاتی در زمینه عملکرد هیدرولیکی صفحات مشبک بر روی روند استهلاک انرژی جریان انجام گرفته است. دانشفراز و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی عددی تاثیر بلوک‌های میانی بر روی عملکرد صفحات مشبک نشان دادند که استفاده از این بلوک‌ها باعث افزایش عملکرد کل مجموعه در استهلاک انرژی می‌شود. دانشفراز و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست نشان دادند که استفاده از این صفحات در لبه شیب‌شکن قائم می‌تواند باعث تبدیل جریان فوق بحرانی به

داد که استفاده از لبه با بالا بردن شدت آشفتگی باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود.

یکی از مشکلات اساسی سازه‌های مولد جریان فوق بحرانی نظیر شیب‌شکن‌های قائم، استهلاک انرژی جریان و انتخاب نوع مستهلک کننده در پایین دست این سازه‌ها می‌باشد. مطالعات گذشته در زمینه صفحات مشبک نشان می‌دهد که استفاده از این صفحات به صورت قائم در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی کوچک با ایجاد پرش هیدرولیکی و ایجاد آشفتگی ناشی از عبور جریان از داخل این صفحات می‌تواند به افزایش استهلاک انرژی منجر گردد. مطالعات در زمینه تاثیر ارتفاع صفحات مشبک بر استهلاک انرژی کم می‌باشد، لذا در تحقیق حاضر، با هدف توسعه روش‌های طراحی برای استفاده بیشتر از این مستهلک کننده‌ها تاثیر ارتفاع صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی در شیب‌شکن‌های قائم مورد بررسی عددی قرار گرفته است.

معرفی نرم افزار و معادلات حاکم بر جریان

به طور کلی، استفاده از روش‌های محاسباتی برای پیش‌بینی تداخل آب با هوا در جریان‌های دو فازی سطوح آزاد ضروری می‌باشد. ایجاد پرش هیدرولیکی ناشی از حضور صفحات مشبک و عبور جریان از داخل این صفحات، یک منطقه با جریان دو فازی را تشکیل می‌دهد. در تحقیق حاضر از نرم افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی تاثیر صفحات مشبک در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم استفاده شده‌است. معادلات حاکم بر جریان در این نرم افزار شامل معادله بقای جرم، معادله مومنتم و معادله پروفیل سطح آزاد سیال می‌باشد. با فرض سیال تراکم ناپذیر، معادله بقای جرم به صورت زیر بیان می‌شود (وایت، ۲۰۰۶).

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنتم از حل معادلات ناویر-استوکس به وسیله روابط ۲ تا ۴ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (3)$$

جریان زیر بحرانی در پایین دست گردد. در ادامه حسن‌نیا و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از صفحات مشبک ترکیبی (افقی و قائم) در شیب‌شکن‌های قائم نشان دادند که استفاده از این نوع ترکیب باعث افزایش راندمان استهلاک انرژی به میزان ۱۳۳ درصد می‌شود. همچنین نتایج این محققین نشان داد که با افزایش عمق بحرانی نسبی پارامترهای طول نسبی خیس شده صفحات مشبک، طول نسبی تلاطم و عمق نسبی استخر افزایش و استهلاک انرژی نسبی کاهش پیدا می‌کند.

به منظور استهلاک انرژی بیشتر در شیب‌شکن‌های قائم، دانشفراز و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تاثیر استفاده از صفحات مشبک افقی در لبه شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از این صفحات استهلاک انرژی نسبی را نسبت به مدل شیب‌شکن قائم ساده به میزان چشم‌گیری افزایش داده است. همچنین نتایج نشان داد که تداخل صفحات مشبک تاثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی جریان نداشته است. در ادامه نوروزی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ارزیابی توانایی مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک افقی پرداختند. نتایج این محققین نشان داد که مدل مبتنی بر ANFIS (سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار) نسبت به سایر روش‌های هوش مصنوعی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. همچنین این محققان با انجام آنالیز حساسیت روی پارامترهای تاثیرگذار دریافتند که عمق بحرانی نسبی موثرترین پارامتر در پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی می‌باشد. دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) با قرار دادن صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب‌شکن قائم با فواصل مختلف نشان دادند که استفاده از صفحات مشبک قائم با ایجاد پرش هیدرولیکی و عبور جریان از داخل خود باعث افزایش پارامترهای استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی استخر شده است. میرزایی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل عددی Flow-3D به بررسی تاثیر دندان‌های کردن لبه سازه شیب‌شکن قائم بر روی پارامتر استهلاک انرژی پرداختند. نتایج حاصله از مدل عددی این محققین نشان

مشخصات مدل عددی و ابعاد دامنه حل مشابه با مدل آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) انتخاب شده است. در مدل دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲)، فلوم آزمایشگاهی اصلی به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر و مشخصات مدل آزمایشگاهی مورد استفاده شامل شیب‌شکن قائم با ارتفاع ۰/۱۵ متر، طول ۱/۲ متر و عرض ۰/۳ متر و صفحه مشبک قائم با درصد تخلخل ۴۰ و فاصله ۰/۹ متر از لبه شیب‌شکن می‌باشد. لازم به ذکر است آزمایش‌ها با ۸ دبی مختلف با محدوده ۱۵۰ تا ۸۵۰ لیتر بر دقیقه (۲/۵ تا ۱۴/۱۶ لیتر بر ثانیه) انجام شد. در مدل عددی با توجه به محدوده دبی‌ها، برای بررسی تاثیر ارتفاع صفحه مشبک در استهلاک انرژی جریان در پایین‌دست شیب‌شکن قائم، از سه ارتفاع مختلف ۳، ۶ و ۹ سانتیمتری استفاده شده است (شکل ۱). در جدول (۱) مشخصات کلی مدل فیزیکی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) جهت صحت سنجی و مدل عددی تحقیق حاضر نشان داده شده است.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z \quad (4)$$

در روابط فوق (u, v, w) و (A_x, A_y, A_z) به ترتیب مقادیر سرعت و نسبت مساحت در راستای (x, y, z) ، زمان t ، V_f کسری از حجم مرتبط با جریان، ρ چگالی، P فشار و g_z شتاب ثقل وارد بر جریان می‌باشد. پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال $F(x, y, z)$ محاسبه می‌شود. همچنین این تابع قادر به نشان دادن مقادیر حجم سیال در همه سلول‌های محاسباتی می‌باشد که به وسیله معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

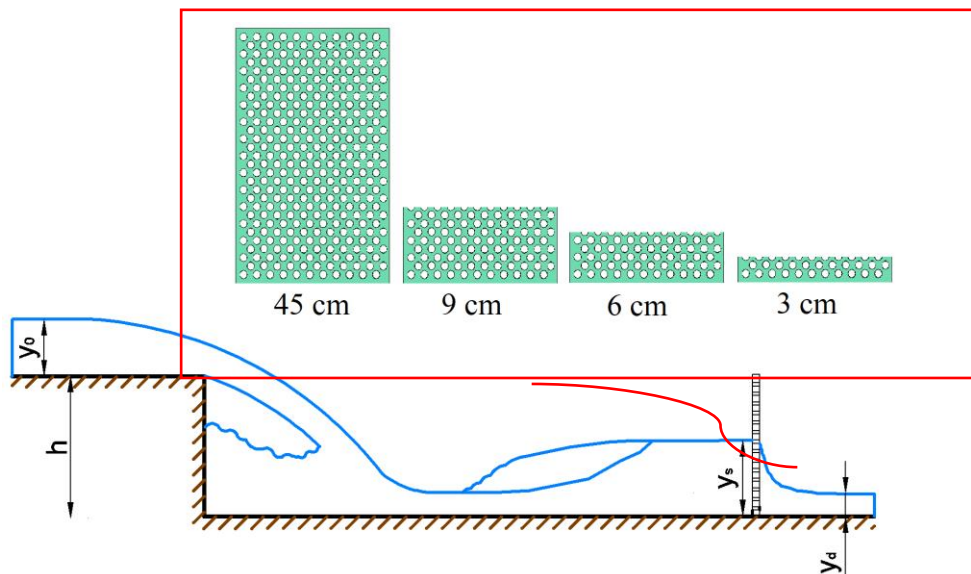
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right] = 0 \quad (5)$$

متغیر F مقادیری بین (۰ و ۱) می‌باشد. به طوریکه $F = 1$ بیانگر جمع حجم اشغال شده با سیال و $F = 0$ بیانگر مناطقی دارای حباب و حفره می‌باشد.

مشخصات مدل و شرایط مرزی

جدول (۱): مشخصات مدل آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) و مدل عددی تحقیق حاضر

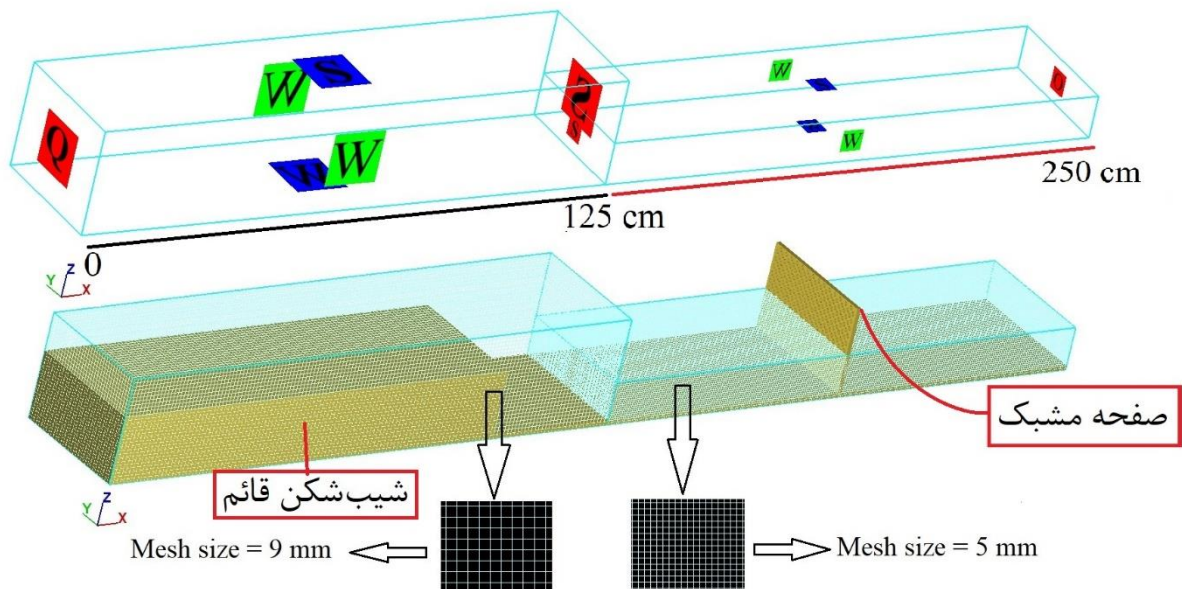
| نوع مدل | محدوده دبی (Lit/min) | شیب‌شکن قائم | | | صفحه مشبک | | |
|------------|----------------------|--------------|----------|----------|-----------|----------|-------------|
| | | ارتفاع (cm) | طول (cm) | عرض (cm) | تخلخل (%) | عرض (cm) | ارتفاع (cm) |
| آزمایشگاهی | ۸۵۰-۱۵۰ | ۱۵ | ۱۲۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۳۰ | ۴۵ |
| عددی | ۸۵۰-۱۵۰ | ۱۵ | ۱۲۰ | ۳۰ | ۴۰ | ۳۰ | ۴۵-۹-۶-۳ |



شکل (۱): پروفیل طولی مدل عددی

عمل می‌کند، استفاده شد. برای شبیه‌سازی بهتر کف کانال نیز یک لایه نازک یک سانتی‌متری از جنس شیب‌شکن انتخاب شد. لازم به ذکر است برای شبیه‌سازی بهتر صفحات مشبک و پرش هیدرولیکی، از شبکه‌بندی نامنظم و ابعاد دامنه حل مختلف استفاده شد. نمای شماتیک شرایط مرزی و شبکه‌بندی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم در شکل (۲) و در جدول (۲) ابعاد دامنه حل استفاده شده برای شبکه‌بندی مدل عددی آورده شده است.

به منظور کاهش حجم عملیات شبیه‌سازی از دو شبکه حل برای شبیه‌سازی جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک قائم استفاده شد. برای شبکه حل اول شرایط مرزی شدت جریان در مقطع ورودی، در مقطع خروجی شبکه حل اول و مقطع ورودی شبکه حل دوم از شرط مرزی ادامه‌دار، به منظور عدم تأثیرپذیری جریان در مقطع خروجی شبکه حل دوم شرایط مرزی خروجی انتخاب گردید. همچنین در هر دو شبکه حل از شرط مرزی تقارن برای سطح آزاد سیال و همچنین برای دیواره‌ها و کف از شرایط مرزی دیوار که همانند یک دیوار بدون لغزش



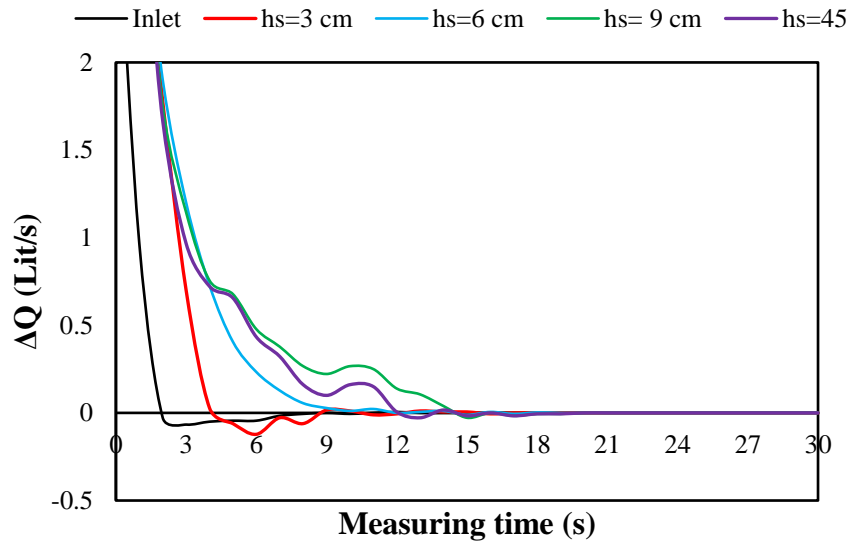
شکل (۲): نمایش شرایط مرزی و شبکه‌بندی مورد استفاده در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک قائم

جدول (۲): ابعاد دامنه حل استفاده شده برای صحت‌سنجی مدل عددی

| شماره مش | شبکه بندی قسمت شیب‌شکن (mm) | | شبکه‌بندی قسمت پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک | |
|----------|-----------------------------|----------|--|----------|
| | اندازه مش (mm) | تعداد مش | اندازه مش (mm) | تعداد مش |
| ۱ | ۱۱ | ۸۷۳۴۰ | ۷ | ۱۷۴۹۲۷ |
| ۲ | ۱۰ | ۱۱۶۲۴۹ | ۶ | ۲۷۷۷۷۷ |
| ۳ | ۹ | ۱۵۹۴۶۵ | ۵ | ۴۸۰۰۰۰ |

می‌دهد که تمامی مدل‌ها در زمان ۱۸ ثانیه به حالت پایدار می‌رسند. با این حال زمان شبیه‌سازی ۲۲ ثانیه انتخاب شد.

همچنین برای محاسبه زمان اتمام شبیه‌سازی، تغییرات دبی در ورودی و خروجی کانال در طول شبیه‌سازی برای هر چهار ارتفاع صفحات مشبک کنترل شد. شکل (۳) نشان

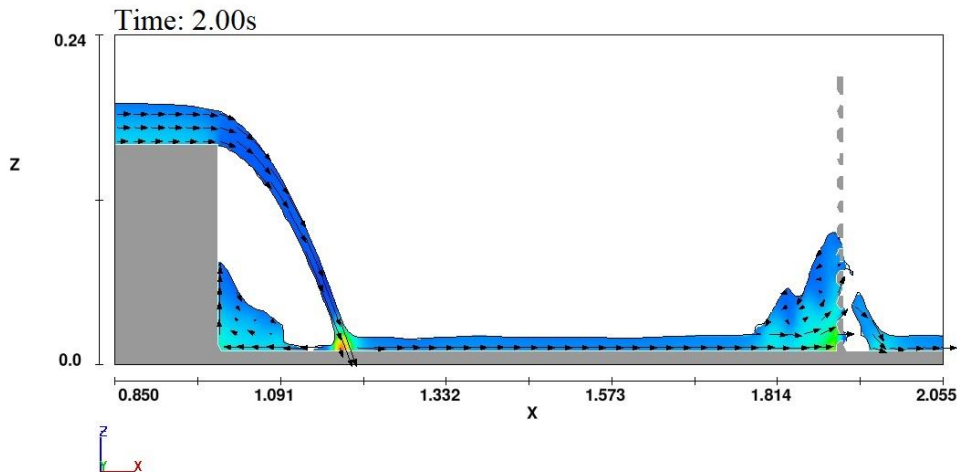


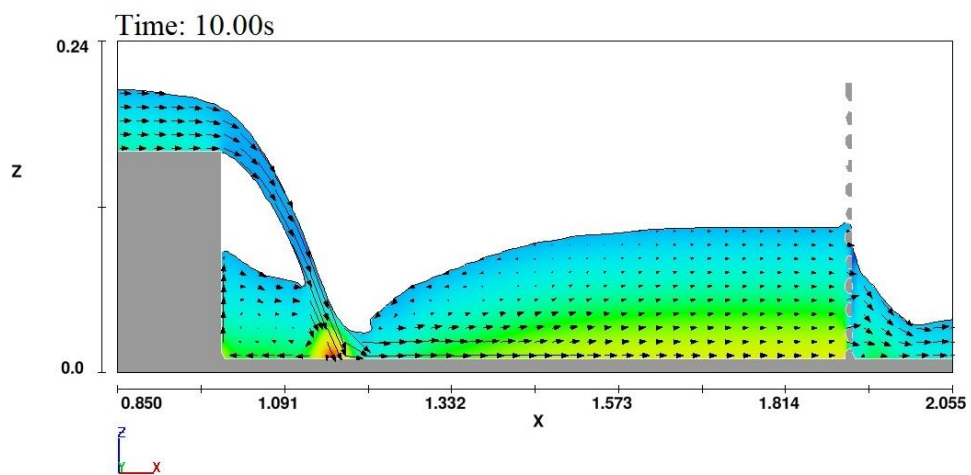
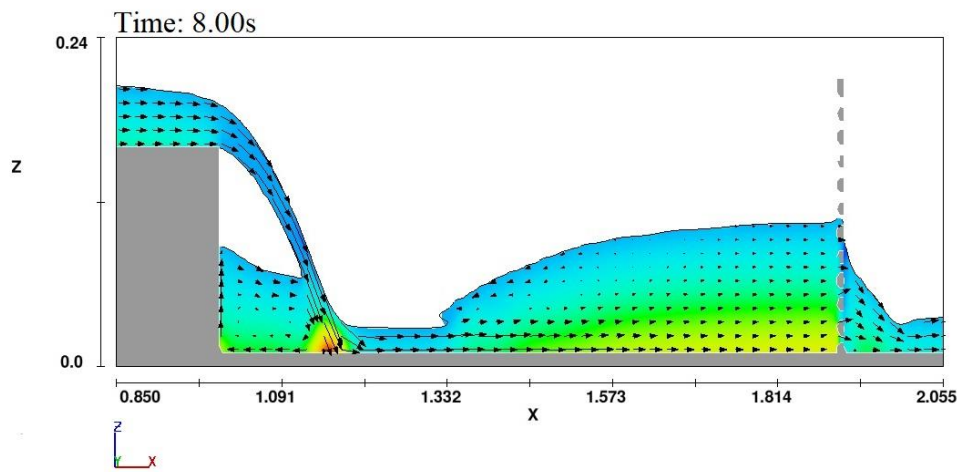
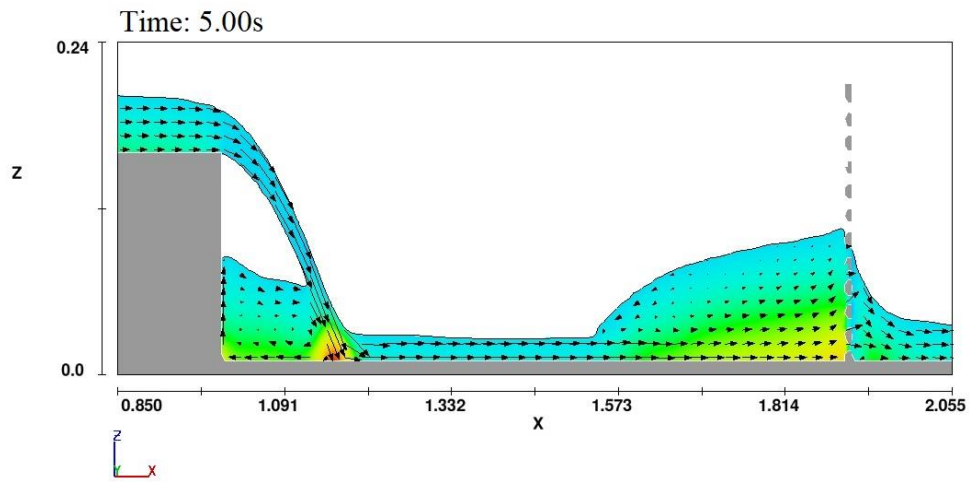
شکل (۳): بررسی همگرایی زمانی دبی جریان

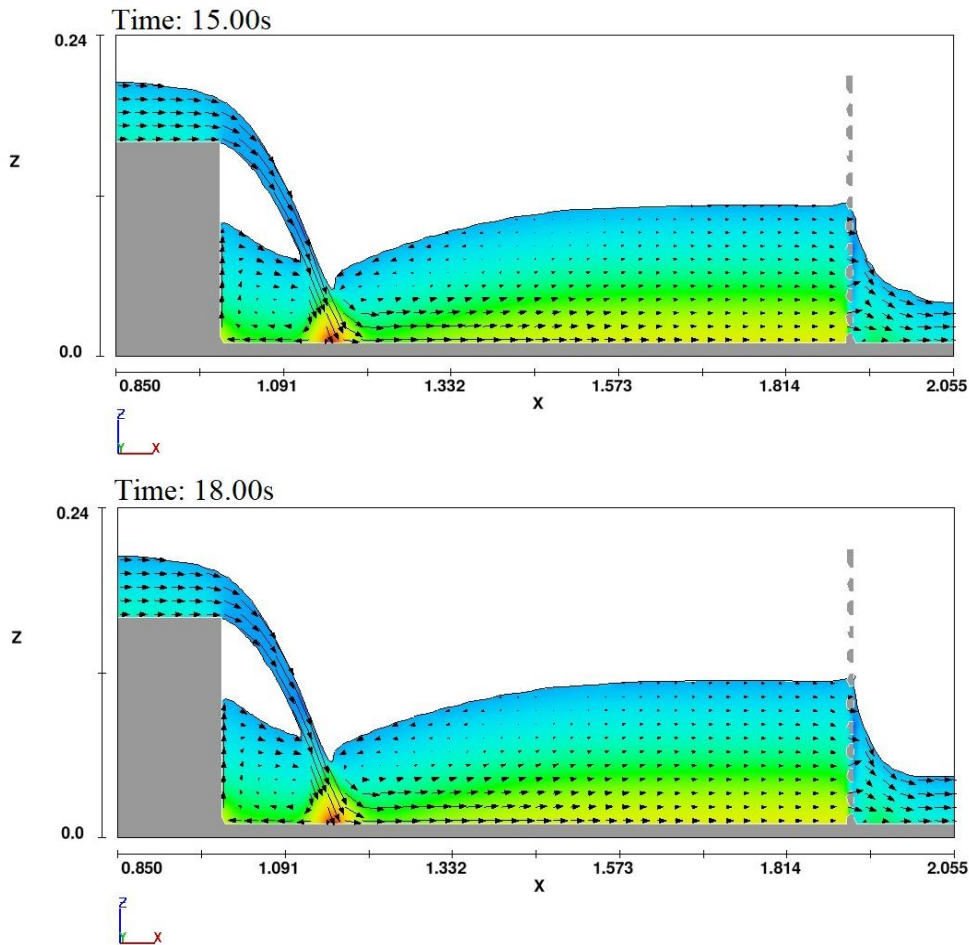
نتایج و بحث

هیدرولیکی بین شیب‌شکن و صفحه مشبک تشکیل می‌شود. با گذشت زمان پنجه پرش هیدرولیکی به سمت بالادست حرکت کرده و با رسیدن به محل برخورد جت به کف پایین دست باعث افزایش نسبی عمق استخر می‌گردد. حالت پایدار جریان در مدل فیزیکی تقریباً در زمان ۱۸ ثانیه اتفاق می‌افتاد. در زمان‌های بعد از حالت پایداری تغییرات عمق در کل مدل نسبت به زمان بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

روند شکل‌گیری جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با ارتفاع ۴۵ سانتی متر و دبی ۵۵۰ لیتر بر دقیقه به صورت دو بعدی (X-Z) و در $y/2$ مقطع عرضی در زمان‌های مختلف در شکل (۴) آورده شده است. مشاهده جریان در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که در لحظات ابتدایی و با عبور جریان از روی شیب‌شکن قائم و برخورد آن با صفحه مشبک قائم، عمق جریان افزایش یافته و پرش







شکل (۴): روند شکل‌گیری جریان در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم در دبی ۵۵۰ لیتر بر دقیقه

صحت‌سنجی مدل

حسب پارامترهای عمق نسبی پایین‌دست، استهلاک انرژی نسبی قبل و بعد از صفحه مشبک قائم با نتایج مدل عددی با مش بندی و مدل آشفتگی مختلف برای دبی ۳۵۰ لیتر بر دقیقه در جدول (۳) آورده شده است.

برای انتخاب بهترین مدل عددی از نظر ابعاد مش و مدل‌های آشفتگی مختلف $k-\varepsilon$ و $k-\varepsilon(RNG)$ مقایسه نتایج آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) بر

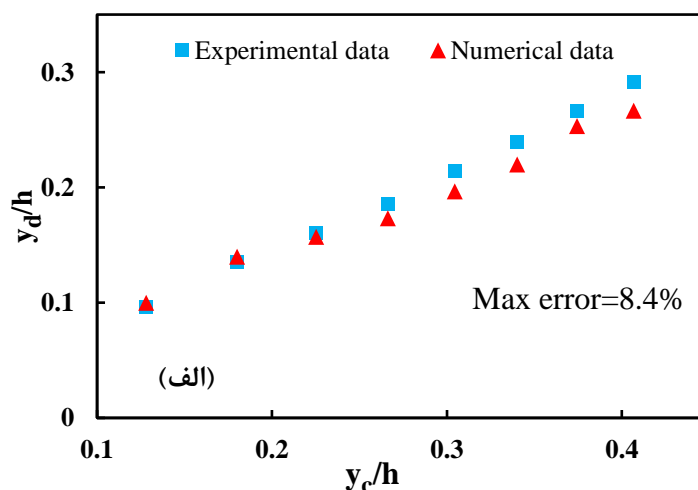
جدول (۳): مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) در دبی ۳۵۰ لیتر بر دقیقه

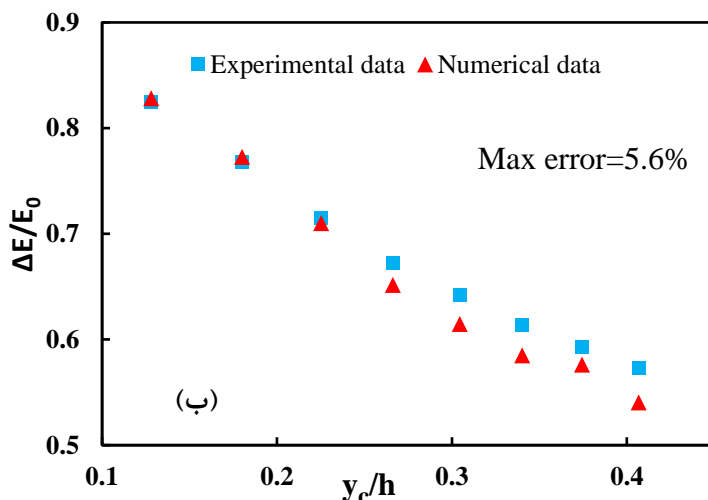
| شماره مش | مقادیر پارمترهای هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی و عددی | | | | | | |
|--------------------------|--|-------------------|-------|--------|------------------------|-------|-------|
| | Exp | $k - \varepsilon$ | | | $k - \varepsilon(RNG)$ | | |
| | - | ۱ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ |
| $\frac{y_d}{h}$ | ۰/۱۶ | ۰/۱۵۰۷ | ۰/۱۶۸ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵۳ | ۰/۱۶۷ | ۰/۱۵۵ |
| $\frac{\Delta E_s}{E_0}$ | ۰/۵۷۹ | ۰/۴۸ | ۰/۷۱۲ | ۰/۶۱۴۵ | ۰/۶۲ | ۰/۶۹۴ | ۰/۶۱ |
| $\frac{\Delta E_d}{E_0}$ | ۰/۷۱۴ | ۰/۵۸۶ | ۰/۸۰ | ۰/۷۰ | ۰/۷۰۴ | ۰/۸۱ | ۰/۷۱ |
| متوسط خطای نسبی (%) | - | ۰/۱۳۶ | ۰/۱۳۳ | ۰/۰۴۷ | ۰/۰۴۳ | ۰/۱۲۵ | ۰/۰۳ |

$Re = \frac{X_{Exp} - X_{Num}}{X_{Exp}}$
 y_d : عمق پایین دست، h : ارتفاع شیب شکن قائم، ΔE_s : استهلاک انرژی قبل از صفحه مشبک، E_0 : انرژی مخصوص بالادست، ΔE_d : استهلاک انرژی پایین دست، X_{Exp} : مقدار داده‌های آزمایشگاهی، X_{Num} : مقدار داده‌های عددی.

قبولی بود. همچنین عملکرد شماره مش ۱ در مدل آشفتگی $k - \varepsilon RNG$ با وجود خطای نسبی قابل قبول در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در پشت صفحه مشبک قائم به دلیل مش‌بندی نامناسب، ناموفق بود. در شکل (۵) مقادیر عددی و آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) دو پارامتر عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی ارائه شده است که بررسی نمودار نشان می‌دهد که مقادیر عددی مطابقت بسیار خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد.

نتایج مربوط به مدل‌های آشفتگی در اندازه شبکه‌های مختلف در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل آشفتگی $k - \varepsilon RNG$ نسبت به مدل دیگر دارای نتایج بهتری بوده و شماره مش ۳ نسبت به دیگر مش‌بندی‌ها به دلیل شبیه‌سازی بهتر صفحه مشبک دارای خطای نسبی کمتری بودند. بنابراین در این تحقیق برای شبیه‌سازی مدل عددی از مدل آشفتگی $k - \varepsilon RNG$ با مشخصات شماره مش ۳ استفاده شد. لازم به ذکر است مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ نیز در شماره مش ۳ دارای نتایج قابل



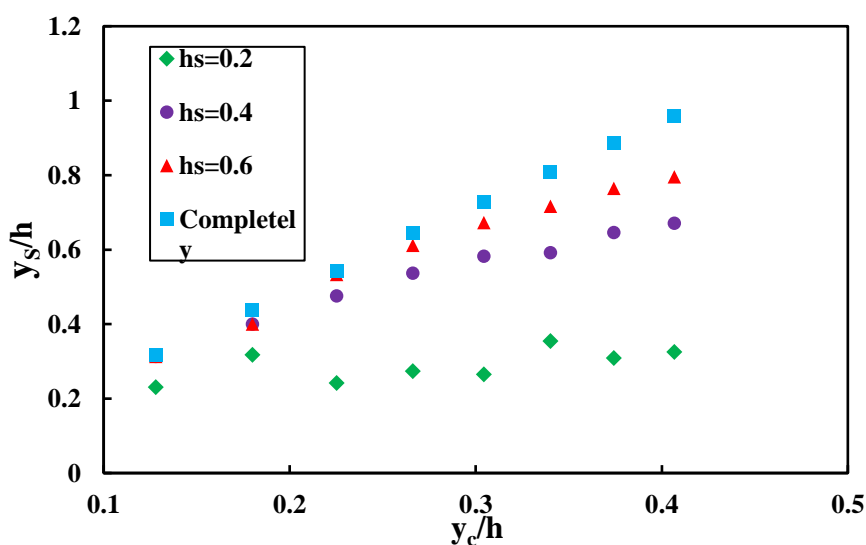


شکل (۵): مقادیر عددی و آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) دو پارامتر الف) عمق نسبی پایین دست و ب) استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی

عمق نسبی قبل از صفحه مشبک

تغییرات مربوط به عمق نسبی قبل از صفحه مشبک در مقابل عمق بحرانی نسبی برای ارتفاعهای مختلف صفحات مشبک شکل (۶) نشان داده شده است. مطابق شکل (۶) مشاهده می‌شود که مقادیر عمق نسبی قبل از صفحه مشبک برای شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با ارتفاع نسبی ۰/۲ تقریباً مقداری ثابت می‌باشد. دلیل این امر عدم تشکیل پرش هیدرولیکی و رسیدن جریان به

صورت فوق بحرانی به صفحه مشبک می‌باشد. همچنین مطابق شکل مشاهده می‌گردد برای عمق بحرانی نسبی کم به دلیل توگذری جریان از داخل صفحات مشبک با ارتفاع-های مختلف، عمق نسبی قبل از صفحه مشبک برای تمامی ارتفاعهای نسبی صفحات مشبک تقریباً برابر می‌باشد. این در حالی است که با افزایش عمق بحرانی نسبی و عبور مقداری از جریان از روی صفحات مشبک با ارتفاع نسبی کمتر مقدار عمق نسبی قبل از صفحه مشبک نسبت به صفحه مشبک با ارتفاع نسبی زیاد، کاهش پیدا می‌کند.

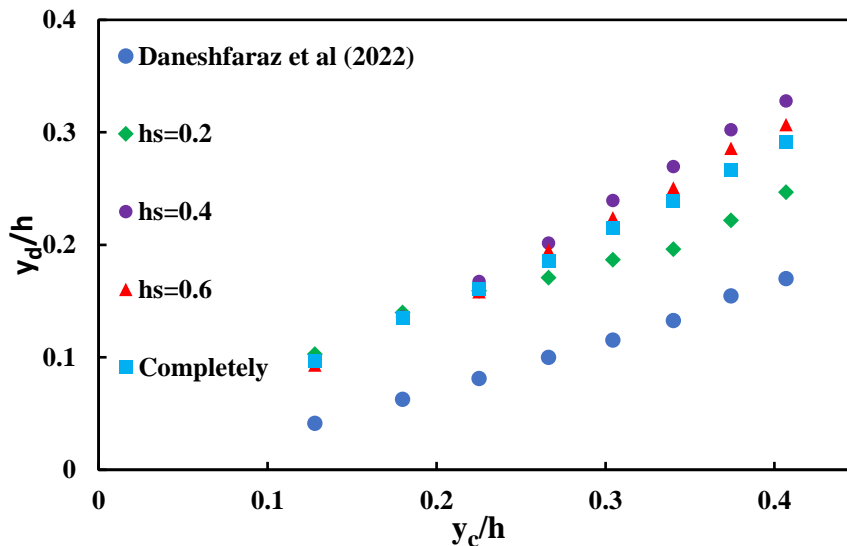


شکل (۶): تغییرات عمق نسبی قبل از صفحه مشبک در مقابل عمق بحرانی نسبی

نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش عمق بحرانی نسبی، عمق نسبی پایین دست افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از صفحات مشبک در پایین دست شیب‌شکن قائم باعث افزایش عمق نسبی پایین دست نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌شود.

تاثیر ارتفاع صفحات مشبک بر عمق نسبی پایین دست

شکل (۷) تاثیر استفاده از صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب‌شکن قائم بر روی عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی را نشان می‌دهد. مطابق این



شکل (۷): تغییرات عمق نسبی پایین دست در مقابل عمق بحرانی نسبی

صفحات مشبک قائم با ارتفاع‌های مختلف، عدد فرود پایین دست را نسبت به شیب‌شکن قائم ساده به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در جدول (۴) متوسط درصد کاهش عدد فرود پایین دست در ارتفاع‌های مختلف صفحات مشبک نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم سرتاسری آورده شده است.

مقایسه تاثیر ارتفاع صفحات مشبک در عمق نسبی پایین دست نشان می‌دهد که در عمق‌های بحرانی نسبی کم، مقادیر عمق نسبی پایین دست تقریباً مشابه هستند. این در حالی است که با افزایش عمق بحرانی نسبی میزان افزایش عمق نسبی پایین دست برای صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ مشهودتر است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از

جدول (۴): درصد کاهش عدد فرود پایین دست

| سرتاسری | ارتفاع نسبی صفحات مشبک | | |
|---------|------------------------|------|-------|
| | ۰/۶ | ۰/۴ | ۰/۲ |
| ۶۱/۹ | ۶۳/۶ | ۶۶/۳ | ۵۵/۴ |
| - | ۳/۷ | ۱۰/۳ | -۱۴/۸ |

درصد کاهش عدد فرود پایین دست نسبت به شیب‌شکن قائم ساده (دانشفرز و همکاران ۲۰۲۲)
درصد کاهش عدد فرود پایین دست نسبت به شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک سرتاسری

نشان می‌دهد که صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ با کاهش ۱۰/۳ درصدی عدد فرود و ارتفاع نسبی ۰/۲ با افزایش عدد فرود به میزان ۱۴/۸ درصدی به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را نسبت به صفحات مشبک سرتاسری داشتند. دلیل این امر عدم تشکیل پرش هیدرولیکی و کم

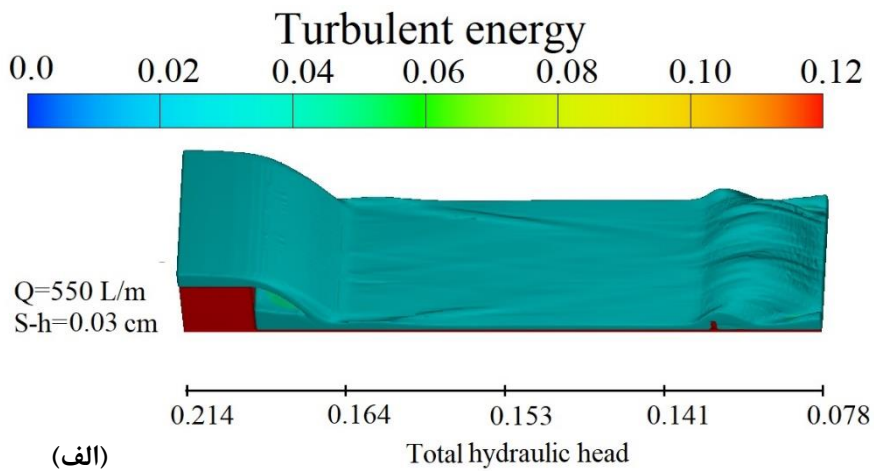
مطابق جدول (۴) مشاهده می‌شود که استفاده از صفحات مشبک قائم در تمامی ارتفاع‌ها باعث کاهش عدد فرود پایین دست نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌شوند. همچنین مقایسه نتایج تاثیر ارتفاع‌های نسبی ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۶ صفحات مشبک نسبت به صفحه مشبک سرتاسری

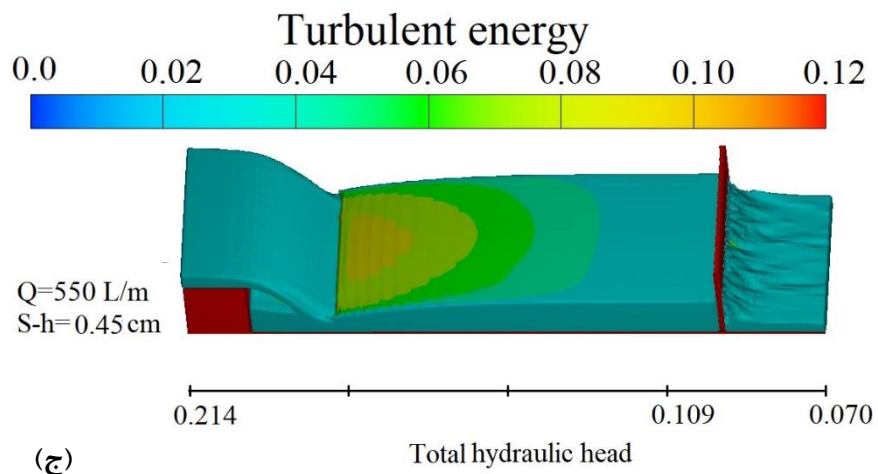
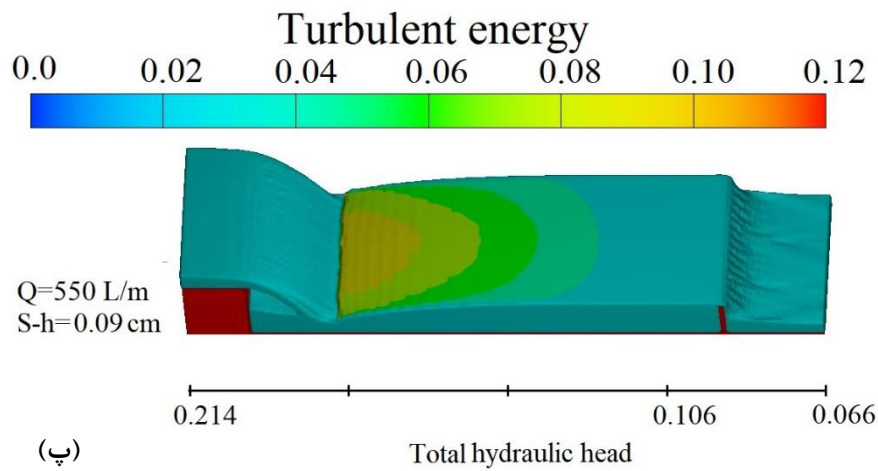
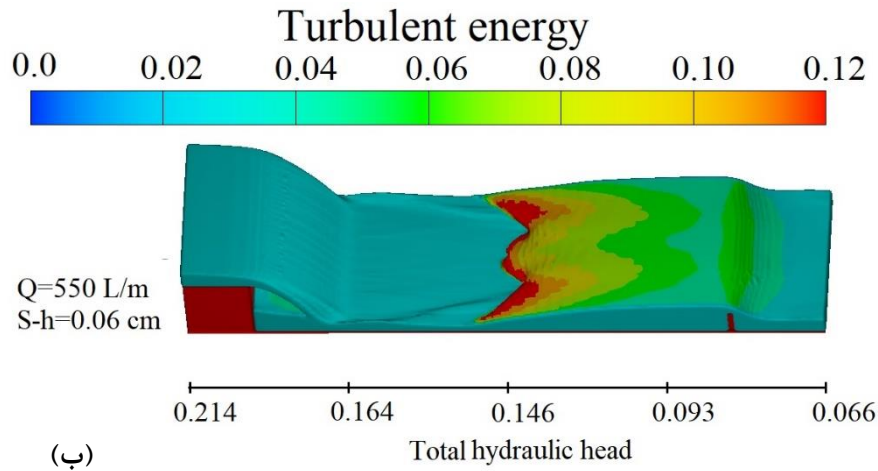
صفحه مشبک عبور می‌کند. این در حالی است که با افزایش ارتفاع صفحه مشبک پرش هیدرولیکی در پشت صفحات مشبک ایجاد شده و در صفحات مشبک با ارتفاع‌های نسبی ۰/۴ و ۰/۶ جریان از داخل و روی صفحات مشبک و در صفحه مشبک سرتاسری تماماً از داخل صفحات مشبک عبور می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که در صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ پرش هیدرولیکی آزاد و در صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۶ و سرتاسری پرش هیدرولیکی به صورت مستغرق تشکیل می‌یابد. لازم به ذکر است همانطور که از شکل (۸-الف) تا (۸-ج) می‌توان دریافت بیشترین و کمترین آشفتگی انرژی به ترتیب مربوط به شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۲ و ۰/۴ می‌باشد. این در حالی است که آشفتگی انرژی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک سرتاسری و ارتفاع نسبی ۰/۶ تقریباً برابر می‌باشد.

بودن آشفتگی انرژی در صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۲ و ایجاد پرش هیدرولیکی به صورت آزاد و داشتن بیشترین تلاطم در صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ می‌باشد.

تأثیر ارتفاع صفحات مشبک بر استهلاک انرژی نسبی

هدف اصلی استفاده از صفحات مشبک در سازه شیب‌شکن استهلاک بیشتر انرژی جریان در پایین‌دست این سازه می‌باشد. در شکل (۸) نمای کلی جریان و آشفتگی انرژی در شیب‌شکن‌های مجهز به صفحات مشبک قائم با ارتفاع‌های مختلف صفحه مشبک (دبی ۵۵۰ لیتر در دقیقه) ارائه شده است. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با ارتفاع نسبی ۰/۲ به دلیل تامین نشدن عمق مورد نیاز برای پرش هیدرولیکی جریان آب با برخورد به صفحه مشبک بدون تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت جت پرتابی از بالای





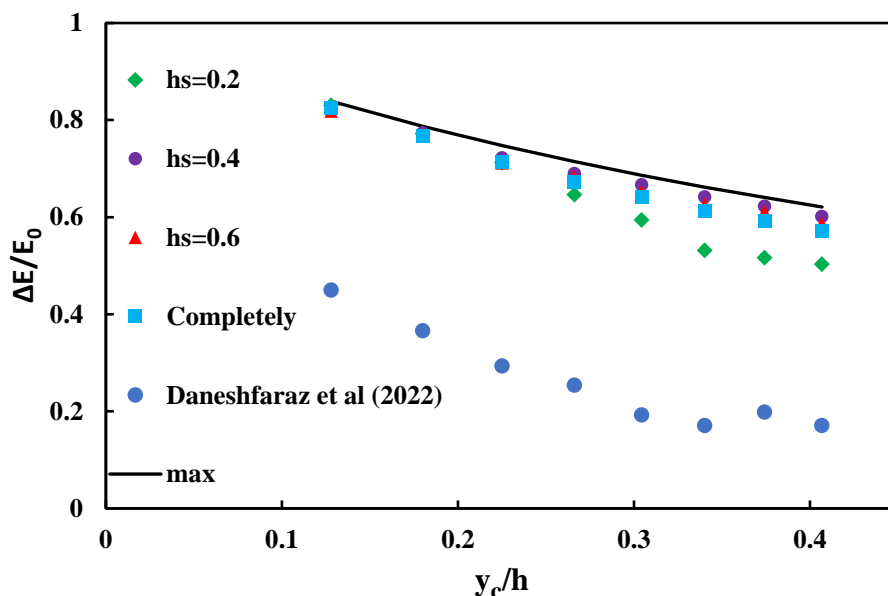
شکل (۸): نمای کلی جریان شبیه‌سازی شده در شیب‌شکن مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع‌های الف (۳، ب (۶، ج (۹ و د) ۴۵ سانتی‌متر برای دبی ثابت ۵۵۰ لیتر بر دقیقه

نسبی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان دریافت که با افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی در

شکل (۹) تاثیر ارتفاع صفحات مشبک در استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن‌های قائم در مقابل عمق بحرانی

ارتفاعها در پایین دست شیب‌شکن‌های قائم باعث افزایش استهلاک انرژی نسبی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده می‌شود.

شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک در تمامی ارتفاعها همانند شیب‌شکن قائم ساده کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از صفحات مشبک قائم در تمامی



شکل (۹): تغییرات استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی

افزایش استهلاک انرژی در شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع‌های نسبی ۰/۴ و ۰/۶ نسبت به صفحه مشبک سرتاسری، روگذری جریان از صفحه مشبک و کاهش حالت استغراق در پرش هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع‌های نسبی ۰/۴ و ۰/۶ نسبت به صفحه مشبک سرتاسری می‌باشد.

در خاتمه برای مقایسه بهتر عملکرد صفحات مشبک با ارتفاع متغیر، نتایج راندمان افزایش استهلاک انرژی در ارتفاع‌های مختلف صفحات مشبک نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم سرتاسری با نتایج مربوط به مطالعه دانشفرز و همکاران (۲۰۲۲) در جدول (۵) مقایسه شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ به ترتیب با افزایش ۱۸۷ و ۲/۸ درصدی استهلاک انرژی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک سرتاسری بهترین مدل جهت استهلاک انرژی می‌باشد

با مقایسه تاثیر ارتفاع صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار استهلاک انرژی مربوط به ارتفاع نسبی ۰/۴ صفحات مشبک بوده که دلیل این امر ایجاد پرش هیدرولیکی آزاد در تمامی دبی‌ها می‌باشد. با مقایسه نتایج استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ با ماکزیمم استهلاک انرژی ممکن در سازه شیب‌شکن قائم مشاهده می‌شود که مقادیر این دو نمودار تفاوت بسیار ناچیزی با هم داشته و تقریباً استهلاک انرژی در این مدل بیشترین استهلاک انرژی ممکن را داشته است. این در حالی است که به دلیل ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق در صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۶ و سرتاسری در دبی‌های بالاتر، میزان استهلاک انرژی کمتر می‌باشد. همچنین دلیل کاهش استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۲ در دبی‌های بالاتر، تشکیل نشدن پرش هیدرولیکی ناشی از تامین نشدن عمق مورد نیاز پرش در پشت صفحه مشبک می‌باشد. لازم به ذکر است دلیل

جدول (۵): درصد افزایش راندمان استهلاک انرژی

| ارتفاع نسبی صفحات مشبک (cm) | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|
| سرتاسری | ۰/۶ | ۰/۴ | ۰/۲ |
| ۱۷۸ | ۱۸۲ | ۱۸۷ | ۱۵۸ |
| - | ۱/۲ | ۲/۸ | -۶ |

درصد افزایش راندمان استهلاک انرژی نسبت به شیب‌شکن قائم ساده (دانشفراز و همکاران، ۲۰۲۲)

درصد افزایش راندمان استهلاک انرژی نسبت به شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک سرتاسری

۲- مقایسه تاثیر ارتفاع نسبی صفحات مشبک نسبت به صفحه مشبک سرتاسری در پایین‌دست شیب‌شکن قائم نشان داد که صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ با کاهش ۱۰/۳ درصدی و صفحه مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۲ با افزایش ۱۴/۸ درصدی عدد فرود پایین‌دست به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را داشتند.

۳- شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه مشبک قائم با ارتفاع‌های نسبی ۰/۲ و ۰/۴ به دلیل کاهش اثر استغراق پرش هیدرولیکی در مقایسه با صفحه مشبک سرتاسری راندمان افزایش استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد.

۴- صفحات مشبک با ارتفاع نسبی ۰/۴ تقریباً با بیشترین استهلاک انرژی ممکن در عمق بحرانی ۰/۱۲ الی ۰/۴۲ دارای بهترین عملکرد در استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با هدف افزایش بهره‌وری استهلاک انرژی در صفحات مشبک، تاثیر ارتفاع صفحات مشبک قائم در پایین‌دست شیب‌شکن قائم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. جهت صحت سنجی مدل عددی از مدل آزمایشگاهی دانشفراز و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شد. همچنین نتایج حاصل از بررسی تاثیر ارتفاع نسبی صفحات مشبک (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶) در زیر ارائه شده است.

۱- استفاده از صفحات مشبک در تمامی ارتفاع‌ها باعث افزایش عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی نسبی و نیز کاهش عدد فرود پایین‌دست می‌گردد.

منابع

دانشفراز، رسول، صادق فام، سینا، حسن نیا، ودود. (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی تاثیر عدد فرود بر پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۷، صفحات ۱۷۶۵ تا ۱۷۸۲.

دانش فراز، رسول، صادق فام، سینا، حسن نیا، ودود (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در شیب شکن های قائم مجهز به صفحات مشبک افقی با جریان فوق بحرانی، تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، دوره ۵۰، شماره ۶، صفحات ۱۴۲۱ تا ۱۴۳۶.

حسن نیا، ودود، دانشفراز، رسول، صادق فام، سینا. (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن قائم مجهز به صفحات مشبک ترکیبی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۱۰، صفحات ۲۴۸۷ تا ۲۵۰۰.

میرزائی، رضا، حسینی، خسرو، موسوی، فرهاد. (۱۴۰۰). بررسی عددی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی. نشریه هیدرولیک، دوره ۱۶، شماره ۱، صفحات ۲۳ تا ۳۶.

Bakhmeteff, M.W. (1932). *Hydraulics of open channels, New York and London, McGraw-Hill book company, Inc.*

Balkış, G. (2004). *Experimental Investigation of Energy Dissipation through Inclined Screens (Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey).*



- Çakir, P. (2003). Experimental investigation of energy dissipation through screens (*Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey*).
- Chamani, M., & Beirami, M. K. (2002). Flow characteristics at drops. *Journal of hydraulic engineering*, 128(8), 788-791.
- Chamani, M. R., Rajaratnam, N., & Beirami, M. K. (2008). Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. *Journal of hydraulic engineering*, 134(10), 1532-1535.
- Daneshfaraz, R., Hasannia, V., Norouzi, R., Sihag, P., Sadeghfam, S., & Abraham, J. (2021). Investigating the Effect of Horizontal Screen on Hydraulic Parameters of Vertical Drop. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 1-9.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., & Ghahramanzadeh, A. (2017). Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(10), 850-859.
- Daneshfaraz, R., Sadeghfam, S., Hasanniya, V., Abraham, J. & Norouzi, R. (2022). Experimental Investigation on Hydraulic Efficiency of Vertical Drop Equipped with Vertical Screens. *Teknik Dergi*, 33 (5). DOI: 10.18400/tekderg.755938
- 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.
- Gill, M.A. (1979). Hydraulics of rectangular vertical drop structures. *Journal of Hydraulic Research*, 17(4), 289-302.
- Kabiri-Samani, A. R., Bakhshian, E., & Chamani, M. R. (2017). Flow characteristics of grid drop-type dissipators. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 298-306.
- 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), 476-486.
- Moore, W. L. (1943). Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), 1343-1360.
- Norouzi, R., Sihag, P., Daneshfaraz, R., Abraham, J., & Hasannia, V. (2021). Predicting relative energy dissipation for vertical drops equipped with a horizontal screen using soft computing techniques. *Water Supply*, 21(8), 4493-4513.
- Rajaratnam, N., & Chamani, M. R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.
- Rajaratnam, N., & Hurtig, K. I. (2000). Screen-type energy dissipator for hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 310-312.
- Rand, W. (1955). Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13.
- United States. Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- White, F. M., & Majdalani, J. (2006). *Viscous fluid flow* (Vol. 3, pp. 433-434). New York: McGraw-Hill.
- White, M.P. (1943). Discussion of Moore (1943), *ASCE*, 108, 1361-1364.



Numerical Study of the Effect of Height of Vertical Screens on Vertical Drop Energy Dissipation

Majid Pashani Khiavi ^{1*}, Vadoud Hasanniya Giglou²

Abstract

Vertical screens are energy dissipaters that can be used downstream of small hydraulic structures such as vertical drops. In the present study, the effect of the height of the screens on the downstream of the vertical drop has been investigated numerically. For this purpose, three relative heights of 0.2, 0.4 and 0.6 for the screens and the relative critical depth range between 0.12 and 0.42 have been selected. For numerical modeling, Flow-3D software with two turbulence models $k - \varepsilon$ and $k - \varepsilon$ (RNG) and three types of meshing has been used. The results showed that the $k - \varepsilon$ (RNG) turbulence model was better performance than $k - \varepsilon$ model in comparison with experimental results. Also, the results of using screens with different heights in the downstream of the vertical drop showed that these plates increase the relative energy dissipation and relative depth of the downstream by 176% and 94% respectively compared to the simple vertical drop. Investigating of the increase in energy dissipation efficiency, it can be seen that the screens with relative heights of 0.4 and 0.6 dissipates more energy by reducing the immersion rate of the hydraulic jump compared to the overall mesh plate. Finally, the vertical drop equipped with screen with a relative height of 0.4 with a decrease of 66.3 and 10.3 percent of the Froude number of downstream and an increase of 187 and 2.8 percent relative energy consumption, had the best performance compared to the simple drop and vertical drop equipped with an overall screen, respectively.

Keywords: Screens, Vertical drop, Relative height, Froude number, Energy dissipation

¹Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² Ph. D. Student of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran