

# Numerical Investigation on Energy Loss in Vertical Drop with Horizontal Serrated Edge



Reza Mirzaee<sup>1</sup>, Khosrow Hoseini<sup>2\*</sup>, Farhad Mousavi<sup>3</sup>

1- PhD student, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University.

2- Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University.

3- Professor, Department of Water and Hydraulic Structures Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University.

\* [khoseini@semnan.ac.ir](mailto:khoseini@semnan.ac.ir)

Received: 11 November 2020, Accepted: 21 March 2021   J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Due to the simplicity of construction, vertical drops are widely used to reduce the steep slope of the canal and the volume of earthworks in irrigation and drainage canals. The upstream regime of flow in structures can be subcritical or supercritical. Stilling basins are usually used to dissipate the energy and prevent the bed erosion. Due to the fact that concrete materials are used in the construction of the stilling basin, hydraulic engineers are always looking for a way to minimize the construction cost of downstream stilling basin and increase downstream energy loss of these structures. The dimensions of the downstream stilling basin depend on the geometry and hydraulic parameters of vertical drop. In the present study, the effect of serrated drop edge on energy dissipation is investigated numerically using Flow3D software.

**Methodology:** Computational fluid dynamics is a branch of fluid mechanics that uses computers to analyze and simulate complex fluid problems. Flow-3D software is one of the most widely used software in the field of computational fluid dynamics. One of the prominent features of this software is the ability to simulate free-surface flow by Volume of Fluid (VOF) method. The governing equations of fluid flow are continuity and momentum equations. In Flow 3D software, several turbulence models are implemented. In the present study, k-ε and RNG turbulence models were used to perform the simulation. An experimental vertical drop set up with a height of 25 cm, width of 46 cm and a relative critical depth ranging from 0.2 to 0.35 was used for simulation. Total relative energy loss was used to validate the numerical results. Afterwards, different arrangements of dented (serrated) edge were used to simulate the flow on a vertical drop. The squared shapes in plan were used. The dimensions of dented edges which distributed symmetrically along the width were 6.9 and 4.6 cm (0.15 and 0.1 times the width of the flume) and their thicknesses were 2 cm. So, the number of dented edges was 3 and 4, respectively. In present study simulations, the total number of meshes was considered to be 1237500. According to the dimensional analysis, the relative energy loss can be expressed as equation (1):

$$\frac{\Delta E}{E_u} = \varphi\left(\frac{y_c}{h}, n, \frac{T}{B} = \alpha\right) \quad (1)$$

where,  $y_c/h$  is the relative critical depth,  $n$  is the number of serrated edge and  $\alpha$  is the relative

dimensions of the serrated edge.

**Results and Discussion:** The RNG turbulence model showed a better agreement with laboratory values compared to the k- $\epsilon$  turbulence model. The results showed that use of dented vertical drop increases the energy loss for the same relative depth in downstream, length of falling jet and the turbulence intensity compared to the simple vertical drop. In the dented model, irregularities in the streamlines of downstream increased significantly. Increasing in dimensions of the dented edges and decreasing their number caused more irregularity in streamline and augmentation of the turbulence. So, the model with 3 dented edges (relative dimension of 0.15) performed the most turbulence and irregularity in the downstream streamlines. Energy losses in the vertical drop with 3 and 4 dented edges and ordinary vertical drop are compared. The average energy losses were 26, 38, 15 and 25 percent, respectively. Although the use of dented edges increases the length of falling jet, the stilling basin length for energy loss in the models with dented edges is less than the ordinary model.

**Conclusion:** According to the results of the present study, the vertical drop with 3 dented edges and relative dimension of 0.15 performs the highest energy loss as compared with the ordinary vertical drop and other models of the present study. In this study, the Froude number ranged from 3.7 to 4.5 in the ordinary vertical drop to 2.7 to 2.9. Since a stilling basin is usually constructed at the downstream of the vertical drop to dissipate the destructive kinetic energy of the flow and the dimensions of the stilling basin depends on the Froude number, so the use of dented edges in the vertical drop has such advantages as reduction in basin dimensions, augmentation in the energy loss and lower depth for tail-water to form the hydraulic jump. Therefore, considering the hydraulic and economic conditions of the design, it is possible to use the dented edges in practice to reduce the dimensions of the stilling basins and increasing the energy loss of flow in the downstream of vertical drops. Some other features and conditions are not considered in this study. So, it is suggested that the effect of angle of dented edges on energy loss and other hydraulic parameters would be investigated in future studies.

**Keyword:** Vertical drop, Energy loss, Flow3D, Serrated edges, Turbulence intensity.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# بررسی عددی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی

رضا میرزائی<sup>۱</sup>، خسرو حسینی<sup>۲\*</sup>، فرهاد موسوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

۳- استاد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

\* khhoseini@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۱ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** شیب‌شکن قائم سازه‌ای پرکاربرد در آبراهه‌های آبیاری و زهکشی بوده که به منظور کاهش شیب تند آبراهه استفاده می‌شود. پایین‌دست شیب‌شکن به حوضچه آرامش منتهی می‌شود که نقش استهلاک انرژی جریان را به‌عهده دارد. در این تحقیق سعی شده است تا اثر دندانه‌دار کردن لبه این سازه بر میزان استهلاک انرژی به صورت عددی ارزیابی شود. به همین منظور، دو تعداد لبه، با دو ابعاد نسبی، در نظر گرفته شده و محدوده عمق بحرانی نسبی نیز بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ انتخاب شده است. از نرم‌افزار Flow3D با دو مدل آشفتگی k-ε و RNG برای انجام مدل‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل آشفتگی k-ε سازگاری خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. همچنین، نتایج گویای آن است که استفاده از شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای افقی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین‌دست، طول ریزش جت و شدت آشفتگی ایجاد شده را افزایش می‌دهد. افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن‌ها نیز استهلاک انرژی جریان را افزایش داده و محدوده عدد فرود پایین‌دست را کاهش می‌دهد. شمار ۳ عدد لبه دندانه‌ای با ابعاد نسبی ۰/۱۵ بیشترین اغتشاش در خطوط جریان پایین‌دست ریزش جت را سبب شده و می‌تواند استهلاک انرژی، عمق ثانویه مورد نیاز برای تشکیل پرش هیدرولیکی و طول حوضچه آرامش را به ترتیب ۱۲، ۱۹ و ۱۵ درصد کاهش دهد.

**کلید واژگان:** شیب‌شکن قائم، استهلاک انرژی، Flow3D، لبه دندانه‌ای، شدت آشفتگی

## ۱- مقدمه

خود، زاویه ریزش جت شیب‌شکن را ارزیابی کرده و رابطه‌ای برای برآورد آن ارائه کرد. (Rajaratnam and Chamani (1995) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی محققین پیشین و آزمایش‌های خود رابطه‌ای برای پیش‌بینی استهلاک انرژی و عمق استخر شیب‌شکن قائم پیشنهاد کردند. (Esen et al. (2004 نشان دادند که در نظر گرفتن یک پله مربعی هم‌عرض آبراهه در دیواره شیب‌شکن قائم سبب افزایش استهلاک انرژی در مقایسه با مدل بدون پله می‌شود. به گونه‌ای که مدل‌های با ارتفاع نسبی پله ۰/۶ در مقایسه با شیب‌شکن قائم به طور میانگین سبب افزایش ۹۰ درصدی استهلاک انرژی جریان می‌شود. (Hong et al. (2010 نشان دادند که افزایش شیب بستر پایین‌دست باعث افزایش طول ریزش شیب‌شکن می‌شود. (Farouk and Elgamal (2012 به بررسی عددی شیب‌شکن قائم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. آنان در

شیب‌شکن‌های قائم به جهت سادگی ساخت، برای کاهش شیب تند آبراهه و حجم عملیات خاکی در آبراهه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد گسترده‌ای دارند. جریان در بالادست این سازه‌ها می‌تواند به دو صورت زیربحرانی و فرا بحرانی باشد. در بررسی‌های چندی، فراسنجه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با جریان زیربحرانی در بالادست مورد بررسی قرار گرفته است. (Bakhmeteff (1932 با استفاده از معادله انرژی و با فرض توزیع فشار آب ایستایی و سرعت یکنواخت، رابطه‌ای برای برآورد عمق پایین‌دست شیب‌شکن ارائه کرد. (Moore (1943 در نتایج بررسی خود نشان داد که استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم تابعی از ارتفاع نسبی شیب‌شکن یا عمق بحرانی نسبی است. (Rand (1955 با تعریف عدد بی‌بعد شیب‌شکن، همه فراسنجه‌های هیدرولیکی شیب‌شکن قائم را تابعی از آن بیان کرد. (Gil (1973 در بررسی

مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم را بر میزان استهلاك انرژی جریان در مقایسه با حالت افقی صفحه گزارش کردند. بررسی‌های مربوط به سازه‌های مولد جریان فرابحرانی همچون شیب‌شکن‌های قائم نشان می‌دهد که محققان و مهندسان هیدرولیک همواره به دنبال راهکاری هستند تا استهلاك انرژی در پایین‌دست این سازه‌ها افزایش یافته و هزینه ساخت سازه‌های حوضچه آرامش به کمترین مقدار برسد. با توجه به این که عامل موثر در استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم، تلاطم و آشفتگی ایجادشده در درون استخر آن می‌باشد، لذا در نظر گرفتن دندان‌های افقی در لبه آن، می‌تواند با عبور دادن جریان از رو و مابین دندان‌ها بر آشفتگی و تلاطم ایجاد شده در استخر و استهلاك انرژی پایین‌دست آن موثر شود. به همین منظور، در این تحقیق سعی شده است تا با در نظر گرفتن لبه‌های دندان‌های افقی، تأثیر آن بر استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار Flow3D بررسی شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل ابعادی

بنابر شکل ۱ استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندان‌های افقی را می‌توان متأثر از پارامترهای دبی در عرض واحد ( $q$ )، عرض فلوم ( $B$ )، ارتفاع شیب‌شکن ( $h$ )، کشش سطحی ( $\sigma$ ) شتاب گرانش ( $g$ )، چگالی آب ( $\rho$ )، گرانیوی آب ( $\mu$ ) عمق بحرانی ( $y_c$ )، شمار دندان ( $n$ ) و طول و عرض دندان‌ها ( $T$ ) در نظر گرفت.

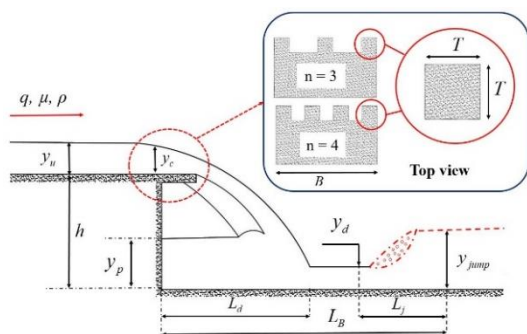


Fig. 1 Schematic of the flow on a vertical drop with serrated edge

شکل ۱ نمای کلی جریان روی شیب‌شکن قائم با لبه دندان‌های افقی

نتایج نشان دادند که با افزایش دبی، عمق استخر افزایش می‌یابد. (Mansouri and Ziaei 2014) نیز با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، افزایش استهلاك انرژی شیب‌شکن قائم مجهز به آستانه انتهایی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده را گزارش کردند. Liu et al. (2014) تأثیر شیب بالادست شیب‌شکن قائم را بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش شیب بستر بالادست، عمق استخر کاهش می‌یابد. (Chiu et al. 2016) با در نظر گرفتن یک گودال مستطیلی در پای شیب‌شکن (در استخر) و در نظر گرفتن ابعاد متفاوت برای آن، به بررسی عددی جریان بر روی آن پرداختند. آنان در نتایج نشان دادند سه نوع رژیم جریان بر روی این سازه ایجاد می‌گردد. این سه نوع رژیم عبارت‌اند از رویه‌ای یا سطحی<sup>۱</sup>، ریزشی<sup>۲</sup> و جریان‌های نوسانی متناوب<sup>۳</sup>. تشکیل این نوع رژیم‌ها در مدل عددی مورد بررسی به هندسه و دبی جریان وابسته است.

(Kabiri-Samani et al. 2017) جریان روی شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده شبکه‌ای را بررسی کردند. آنان در نتایج نشان دادند که به‌کارگیری این صفحه‌ها باعث کاهش طول حوضچه در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده در حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد می‌شود. (Sharif and Kabiri-Samani 2018) نیز نشان دادند که با افزایش عمق پایاب در پایین‌دست شیب‌شکن قائم مجهز به مستهلک‌کننده شبکه‌ای، تداخل آب و هوا کاهش می‌یابد. (Ghaderi et al. 2019) با در نظر گرفتن تنگ‌شدگی‌های قائم در لبه شیب‌شکن به بررسی عددی فراسنجه‌های آن پرداخته و نشان دادند که در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، استهلاك انرژی ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. (Daneshfaraz et al. 2020a) شیب‌شکن قائم مجهز به صفحه‌های مشبک افقی دوگانه را بررسی و نشان دادند که استفاده از این صفحه‌ها، در مقایسه با صفحه مشبک تکی، تأثیری بر استهلاك انرژی جریان ندارد. (Daneshfaraz et al. 2020b) نشان دادند که صفحه‌های مشبک افقی در لبه شیب‌شکن قائم با زیربحرانی کردن جریان پایین‌دست شیب‌شکن، سبب افزایش ۱۹۷ درصدی استهلاك انرژی می‌شود. همچنین ایشان بی تأثیری شیب قرارگیری صفحات

<sup>3</sup> Periodic oscillatory flows

<sup>1</sup> skimming

<sup>2</sup> nappe

است. از جمله ویژگی‌های بارز این نرم‌افزار، توانایی شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد به روش VOF است. نرم افزار Flow3D رویکرد اویلری - اویلری برای شبیه‌سازی جریان استفاده و معادله‌ها را به صورت صریح و ضمنی حل می‌کند. همچنین این نرم‌افزار قابلیت استفاده از شبکه‌های متشکل از عنصرهای مستطیلی را دارد. قانون‌های حاکم بر جریان آشفته دائمی یک سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط معادله‌های پیوستگی و مومنتم (ناویر-استوکس) به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j}) + g_i \quad (5)$$

در رابطه‌های بالا،  $u_i$  و  $u'_i$  به ترتیب برابر سرعت میانگین و سرعت نوسانی در راستای  $x_i$ ، فشار جنبشی (سینماتیک) و  $g_i$  نیروی وزن می‌باشند. برای سه راستای عمود بر هم در مختصات دکارتی  $(i=1,2,3)$ ،  $(x_i = x, y, z)$ ،  $(u_i = u, v, w)$  و  $(u'_i = u', v', w')$  می‌باشند. یک مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی عبارت تنش رینولدز  $(\overline{u'_i u'_j})$  در معادله (۶) مورد نیاز است. نرم‌افزار Flow3D از مدل‌های طول اختلاط پیرانتل، یک معادله انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده<sup>۱</sup> و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی آشفتگی استفاده می‌کند. در این تحقیق نیز از دو مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  و RNG برای انجام شبیه‌سازی استفاده گردید.

## ۲-۳- مشخصات مدل آزمایشگاهی و صحت‌سنجی مدل

### عددی

با استفاده از نرم‌افزار اتوکد، شکل سه‌بعدی سازه هندسی شیب‌شکن قائم با دندانه افقی طراحی شد. آنگاه با فرمت STL خروجی گرفته شده و وارد نرم‌افزار Flow3D شد. برای صحت‌سنجی از نتایج مدل آزمایشگاهی Rajaratnam and Chamani (1995) استفاده شد. بنابر نتایج بررسی‌های آنان، شیب‌شکن قائم با ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر به عرض ۴۶ سانتی‌متر و محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۲ تا ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. از استهلاک انرژی نسبی کل برای صحت‌سنجی نتایج عددی با

$$\Delta E = \varphi_1(q, B, h, \sigma, \rho, \mu, g, y_c, T, n) \quad (1)$$

با انتخاب  $g$  و  $h$  به عنوان فراسنجه‌های تکرار شونده و استفاده از نظریه پی باکینگهام فراسنجه‌های بی‌بعد به صورت رابطه (۲) درآمد:

$$\frac{\Delta E}{h} = \varphi_2\left(\frac{q}{h\sqrt{gh}}, \frac{q\rho}{\mu}, \frac{\sigma}{\rho h^2 g}, \frac{y_c}{h}, \frac{B}{h}, n, \frac{T}{h}\right) \quad (2)$$

در رابطه بالا،  $(q/h)/\sqrt{gh}$  از نظر ابعادی بیانگر عدد فرود در بالادست شیب‌شکن  $(Fr_u)$ ، فراسنجه  $q\rho/\mu$  عدد رینولدز  $(Re)$ ، فراسنجه  $\sigma/\rho h^2 g$  عدد وبر  $(We)$  و  $y_c/h$  عمق بحرانی نسبی می‌باشد. با توجه به زیربحرانی بودن جریان در بالادست شیب‌شکن و بحرانی بودن عمق در نزدیکی لبه سقوط، از عدد فرود بالادست صرف نظر شده و عمق بحرانی نسبی (عدد شیب‌شکن) در نظر گرفته می‌شود (Rand, 1955). به دلیل آشفتگی بودن جریان در طول مدل  $(Re \geq 35021)$  و ناچیز بودن کشش سطحی به دلیل کافی بودن عمق جریان در مدل، از تاثیر عدد رینولدز و وبر نیز صرف نظر می‌شود (Mahmoudi and Farhoudi, 2018). همچنین، نسبت  $B/h$  در این تحقیق ثابت در نظر گرفته شده است (Chiu et al., 2018; Ghaderi et al., 2016)، لذا با تقسیم فراسنجه بی‌بعد  $T/h$  بر آن، می‌توان ابعاد نسبی لبه‌های دندانه‌ای را به صورت  $T/B = \alpha$  در نظر گرفت. از آنجایی که استهلاک انرژی نسبی کل شیب‌شکن قائم به صورت اختلاف انرژی مخصوص (انرژی کل) بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن به انرژی کل بالادست آن  $(\Delta E/E_u)$  بیان می‌شود (Rajaratnam and Chamani, 1995)، لذا به جای  $\Delta E/h$  در رابطه (۲) از  $\Delta E/E_u$  استفاده می‌شود. بنابراین رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_u} = \varphi_3\left(\frac{y_c}{h}, n, \frac{T}{B} = \alpha\right) \quad (3)$$

در رابطه بالا، محدوده تغییرپذیری‌های عمق بحرانی نسبی از ۰/۲ تا ۰/۳۵، شمار دندانه‌ها ۳ و ۴ و ابعاد نسبی لبه‌های دندانه‌ای نیز ۰/۱ و ۰/۱۵ می‌باشد  $(T = (0.1-0.15)B)$ .

## ۲-۲- معادله‌های حاکم و مدل آشفتگی

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی عددی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی، از نرم‌افزار Flow3D (نسخه 11.2) استفاده شده

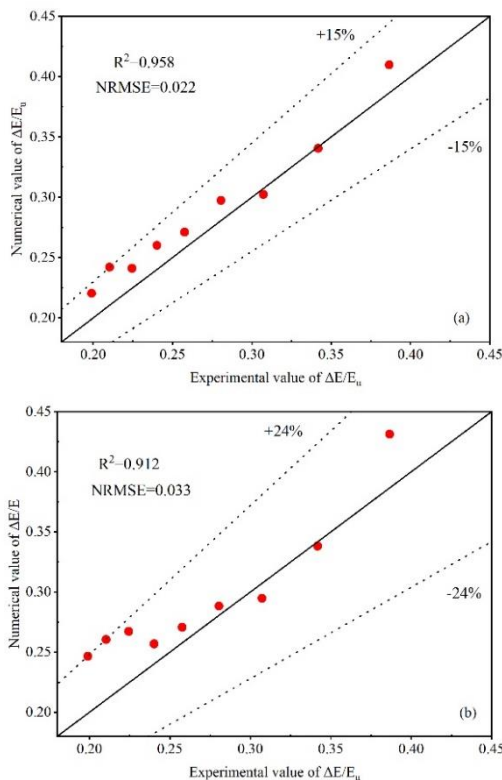
<sup>2</sup> LES

<sup>1</sup> RNG

به دلیل عملکرد خوب مدل آشفتگی RNG در شبیه‌سازی بهتر جداولی جریان در برابر انحنای ناگهانی خطوط جریان می‌باشد. بنابراین برای کاهش اثر شبکه محاسباتی در نتایج شبیه‌سازی، برای همه مدل‌های هیدرولیکی این تحقیق، این تعداد اندازه شبکه با مدل آشفتگی RNG در نظر گرفته شد. علاوه بر این حداکثر مقدار سرعت جریان برای مقاطع مشخص شده در شکل ۴، در عمق بحرانی نسبی ۰/۲ برای مدل آزمایشگاهی و عددی با مدل آشفتگی RNG نیز در جدول ۱ به همراه خطای نسبی ارائه شده است.

با دقت در میزان‌های جدول ۱ و مقایسه خطای ایجاد شده، ملاحظه می‌شود که شبیه‌سازی انجام شده سازگاری خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و ضمن این که توسعه یافتن جریان در مدل عددی را تصدیق می‌کند.

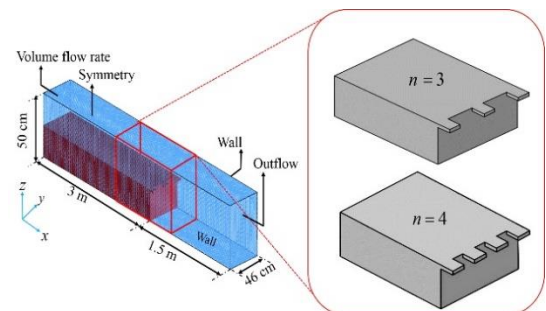
ویژگی‌های جریان و هندسه شیب‌شکن قائم با لبه ناممتد با جریان زیربحرانی در بالادست در جدول ۲ ارائه شده است.



**Fig. 3** Comparison of experimental and numerical values of total relative energy loss: a) RNG turbulence model and b) k-ε turbulence model

**شکل ۳** مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی نسبی کل: (a) مدل آشفتگی RNG و (b) مدل آشفتگی k-ε

آزمایشگاهی استفاده گردید. برای شبیه‌سازی جریان روی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی با شمار دندانه‌های ۳ و ۴ استفاده شد. دندانه‌ها به شکل مربعی، به ابعاد ۶/۹ و ۴/۶ سانتی‌متر (۰/۱۵ و ۰/۱ برابر عرض فلوم) و ضخامت دو سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شیب‌شکن قائم با دندانه‌های افقی و شمار دندانه ۳ و ۴ به صورت متقارن در لبه شیب‌شکن قرار داده شد، به گونه‌ای که فاصله عرضی بین لبه‌ها برابر باشد. در ورودی از شرط مرزی دبی مشخص<sup>۱</sup>، در پایین‌دست از شرط مرزی خروجی<sup>۲</sup>، برای دیواره‌ها و کف از شرط مرزی دیواره<sup>۳</sup> و در مرز بالایی نیز از شرط مرزی تقارن<sup>۴</sup> برای اعمال شرایط مرزی استفاده شد. بر مبنای نتایج بررسی Dean (1978) طول مورد نیاز برای توسعه یافتن جریان ۵۵ برابر عمق جریان است. بنابراین با توجه به داده‌های این تحقیق، کمترین طول برای توسعه یافتن جریان و نیز کاهش شمار شبکه و زمان محاسباتی ۳ متر انتخاب شد. شکل ۲ شرایط مرزی مدل عددی را نشان می‌دهد.



**Fig. 2** Boundary conditions and mesh block of numerical model

**شکل ۲** شرایط مرزی و شبکه‌بندی مدل عددی

تعداد کل شبکه ۱۲۳۷۵۰۰ عدد با بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین اندازه شبکه به ترتیب ۱/۱۹ و ۰/۸۳۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. خطاها و معیارهای ارزیابی برای داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در هر دو مدل آشفتگی برای استهلاک انرژی نسبی کل در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که شمار کل شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل عددی نتایج قابل قبولی را در مقایسه با مدل آزمایشگاهی ارائه می‌دهد و مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل آشفتگی k-ε دارای خطای کمتری است. این امر

<sup>3</sup> Wall

<sup>4</sup> Symmetry

<sup>1</sup> Volume flow rate

<sup>2</sup> Outflow

پایین دست استفاده شده است و برای در محاسبه ویژگی‌های پرش هیدرولیکی از رابطه‌های زیر استفاده گردید (شکل ۱).

$$\frac{y_{2,jump}}{y_d} = 0.5(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_d^2}) \quad (6)$$

$$L_j = 5(y_{2,jump} - y_d) \quad (7)$$

که در آن،  $y_{2,jump}$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی،  $y_d$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی یا عمق پایین دست شیب‌شکن،  $Fr_d$  عدد فرود در پنجه پرش یا عدد فرود پایین دست شیب‌شکن و  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی می‌باشد (Daneshfaraz et al., 2019, 2020c).

### ۳-۱- معادله‌های حاکم و مدل آشفتگی

استهلاک انرژی ایجاد شده در شیب‌شکن‌های قائم در نتیجه آشفتگی ایجاد شده ناشی از جریان برگشتی به استخر آن می‌باشد (White, 1943). بدین منظور، بررسی شدت آشفتگی در نتیجه ریزش جت سقوطی شیب‌شکن قائم می‌تواند حائز اهمیت باشد.

افزایش شدت آشفتگی در پایین‌دست شیب‌شکن منجر به اغتشاش بیشتر در جریان و استهلاک بیشتر انرژی می‌شود. این اغتشاش در خطوط جریان نیز تأثیرگذار می‌باشد. شکل ۵، تراز شدت آشفتگی به صورت سه‌بعدی و پشت جت ریزشی و همچنین خطوط جریان پایین‌دست ریزش در حالت‌های مختلف مدل‌های این بررسی برای عمق بحرانی نسبی ۰/۳ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، وجود لبه‌های دندانه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، بیشترین شدت آشفتگی ایجاد شده در پشت جت ریزشی را افزایش داده است. با افزایش شمار دندانه‌ها، بیشترین شدت آشفتگی افزایش یافته و برای هر دو شمار دندانه، بیشترین شدت آشفتگی ایجاد شده در ابعاد نسبی لبه ۰/۱۵، کمتر از میزان متناظر آن در بعد نسبی لبه ۰/۱ است. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل‌های با ۳ دندانه، در مقایسه با ۴ دندانه، باعث افزایش انتقال شدت آشفتگی ایجاد شده در پشت جت ریزشی به پایین‌دست آن شده و لذا روی برهم‌خوردگی خطوط جریان نیز مؤثرتر هستند. برهم‌خوردگی خطوط جریان پایین‌دست جت برای مدل‌های دارای لبه دندانه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده مشهود بوده که این عامل در نتیجه انتقال آشفتگی

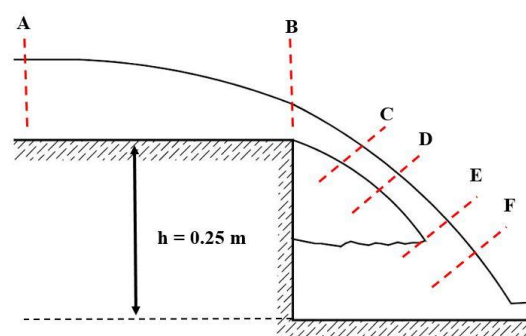


Fig. 4 defined sections for measuring maximum velocity at  $y_c/h=0.2$

شکل ۴ مقاطع مشخص شده برای اندازه‌گیری سرعت حداکثر در عمق بحرانی نسبی ۰/۲

جدول ۱ مقایسه بیشترین سرعت آزمایشگاهی و عددی در مقاطع مختلف

Table 1 Comparison of experimental and numerical maximum velocity in different sections

مقاطع	سرعت (m/s)		خطا (%)
	آزمایشگاهی	عددی	
A	0.69	0.7008	1.5
B	1.11	1.18	6.3
C	1.39	1.34	3.6
D	1.72	1.83	6.4
E	2.17	2.27	4.6
F	2.19	2.27	3.6

جدول ۲ ویژگی‌های جریان و هندسه مدل در این بررسی  
Table 2 Flow characteristics and model geometry in the present study

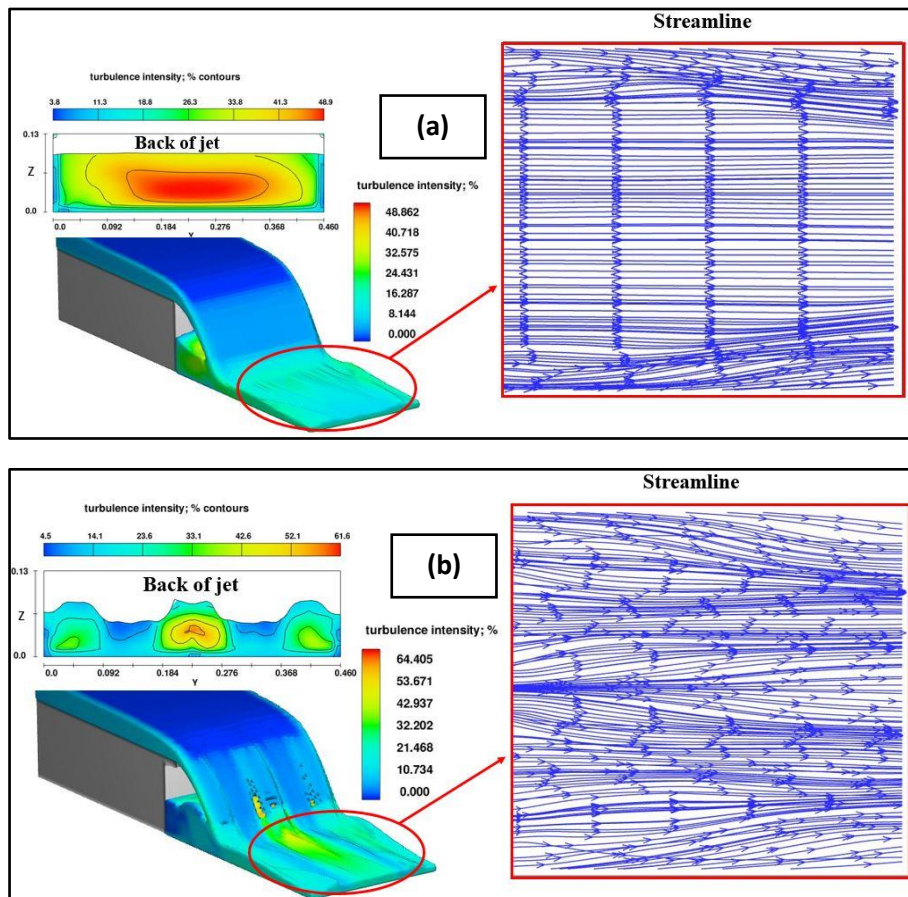
$Q(L/s)$	$y_u(cm)$	$y_c(cm)$	$h(cm)$	$B(cm)$	$y_c/h$
16.11	5.62	5	25	46	0.2
19.22	6.24	5.625	25	46	0.225
22.51	6.63	6.25	25	46	0.25
25.97	7.19	6.875	25	46	0.275
29.6	7.66	7.5	25	46	0.3
33.37	8.32	8.125	25	46	0.325
37.3	9.03	8.75	25	46	0.35

### ۳- نتایج و بحث

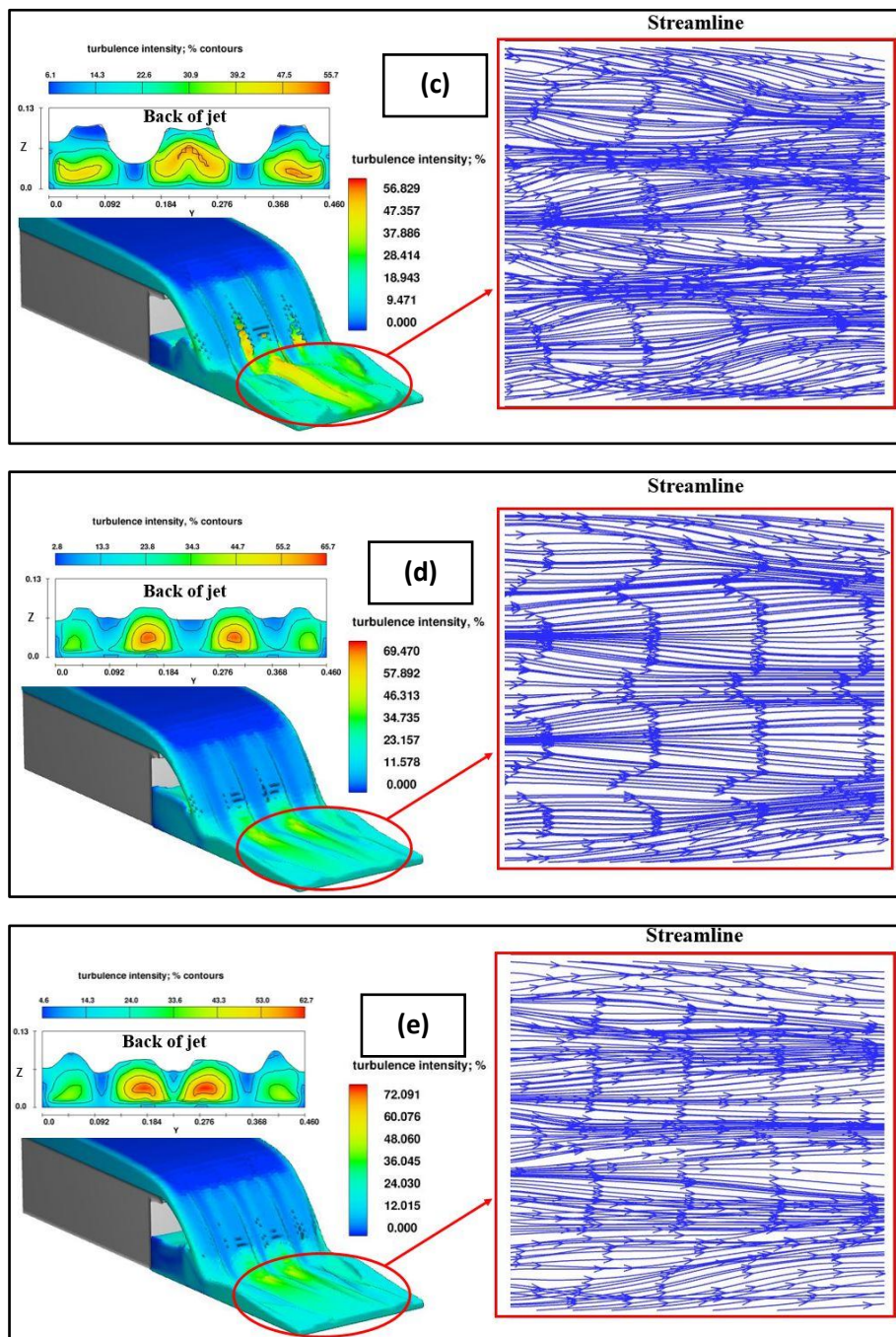
در این تحقیق حاضر، جریان روی شیب‌شکن قائم مجهز به لبه‌های دندانه‌ای افقی با جریان زیربحرانی در بالادست آن به صورت عددی بررسی شد. استهلاک انرژی و دیگر نتایج بدست آمده از آن در ادامه به تفصیل ارائه شده است. لازم به یادآوری است که در مدل عددی این تحقیق از شرط مرزی خروجی در

و همانند همدیگر به نظر می‌رسد. برای شکل 5b با توجه به اینکه شمار دندان‌ها ۳ بوده و ابعاد لبه‌ها ۰/۱ می‌باشد، فاصله بین لبه‌ها بیشتر است. بنابراین توان و شدت جریان ریزشی از بین لبه‌ها بیشتر از روی آن‌ها می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل کوچک بودن ابعاد لبه، جت ریزشی آن‌ها را پوشانده و کامل دربر می‌گیرد و جریان کمی توسط لبه‌ها منحرف می‌شود. برای شکل 5e که مربوط به مدل با شمار دندان‌ها ۴ و ابعاد ۰/۱۵ می‌باشد، افزایش دندان‌ها و ابعاد باعث کاهش فاصله بین لبه‌ها شده و شدت جریان ریزشی از روی لبه‌ها افزایش می‌یابد. در هر دو مدل مذکور، شدت و توان ریزش یک جریان نسبت به دیگری برتری داشته و همین امر سبب نزدیکی نتایج شده است. به عبارتی عملکرد دو مدل تا حدودی یکسان می‌باشد و تنها تفاوت در توان ریزش جریان میان لبه‌ای و رو لبه‌ای می‌باشد. افزون بر این تفاوت دیگر دو مدل در این است که مدل‌های با دندان‌ها ۴ و ابعاد ۰/۱۵، در مقایسه با دندان‌ها ۳ و ابعاد ۰/۱، باعث ریزش جریان به فاصله دورتری نسبت به لبه شیب‌شکن می‌شوند.

ایجاد شده از پشت جت ریزشی به پایین دست آن می‌باشد. با دقت در خطوط جریان پایین دست جت ریزشی، ملاحظه می‌شود که مدل با ۳ دندان‌ها به ابعاد نسبی ۰/۱۵ دارای بیشترین نامنظمی و آشفتگی در خطوط جریان بوده و مدل دارای ۴ دندان‌ها به ابعاد ۰/۱ کمترین میزان نامنظمی در خطوط جریان است. افزایش شمار لبه‌ها و به دنبال آن افزایش ابعاد آن‌ها سبب می‌شود بخش عمده‌ای از جریان عبوری، از روی لبه‌ها ریزش کند و جریان عبوری از مابین لبه‌ها کاهش یابد. همین امر موجب می‌شود تا خطوط جریان مدل با دندان‌ها ۴ تایی همانند حالت بدون دندان‌ها باشد. تداخل دو جریان ریزشی از روی لبه‌ها و مابین آن‌ها نقش بسزایی در افزایش تلاطم ایجاد شده دارد. در مدل‌های با شمار دندان‌ها ۳، تداخل ایجاد شده بین دو جریان ریزشی، در مقایسه با مدل با شمار دندان‌ها ۴ بیشتر است و همین امر موجب افزایش تلاطم و بی‌نظمی بیشتر در خطوط جریان می‌گردد. لازم به یادآوری است که آشفتگی و نامنظمی ایجاد شده در خطوط جریان برای دو مدل دیگر (شکل 5e و 5b) بسیار نزدیک







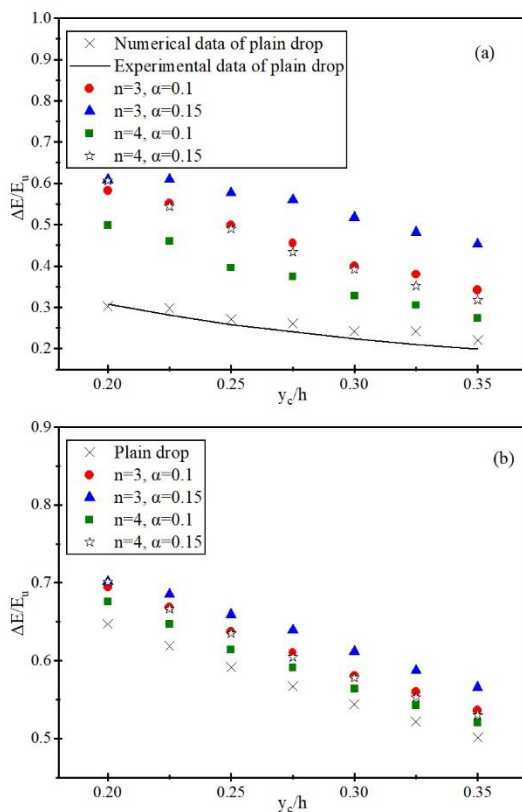
**Fig. 5** Turbulence intensity contour in flow surface and cross section behind the jet and streamlines for relative critical depth of 0.3 (a) Plain vertical drop (b)  $n = 3, \alpha = 0.1$  (c)  $n = 3, \alpha = 0.15$ , (d)  $n = 4, \alpha = 0.1$ , (e)  $n = 4, \alpha = 0.15$

شکل ۵ تراز شدت آشفتگی در رویه جریان و مقطع عرضی پشت جت و خطوط جریان برای عمق بحرانی نسبی  $\frac{1}{3}$ ؛ (a) شیب‌شکن قائم ساده (b)  $n = 3, \alpha = 0.1$  (c)  $n = 3, \alpha = 0.15$  (d)  $n = 4, \alpha = 0.1$  (e)  $n = 4, \alpha = 0.15$

میزان‌های مربوط به استهلاک انرژی نسبی برای همه مدل‌های این بررسی با و بدون پرش هیدرولیکی در پایین دست در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد و در شکل ۶a نیز مشاهده می‌شود، استهلاک انرژی نسبی در شیب‌شکن قائم ساده مربوط به این بررسی با نتایج بدست آمده از بررسی Rajaratnam and Chamani (1995) همخوانی دارد.

### ۲-۳- معادله‌های حاکم و مدل آشفتگی

نسبت اختلاف انرژی کل بالادست و انرژی مخصوص پایین دست سازه ( $\Delta E$ ) به انرژی در بالادست سازه ( $E_{II}$ )، استهلاک انرژی نسبی شیب‌شکن قائم در در نظر گرفته می‌شود. مطابق مطالعه Bakhmeteff (1932) نیز انرژی کل بالادست به صورت  $E_{II} = h + 1.5y_c$  بیان می‌شود.



**Fig. 6** Changes in relative energy loss versus relative critical depth: a) without hydraulic jump and b) with hydraulic jump

شکل ۶ تغییرپذیری‌های استهلاک انرژی نسبی در برابر عمق بحرانی نسبی: الف) بدون پرش هیدرولیکی و ب) با پرش هیدرولیکی

7a برای طول ریزش جت، مشاهده می‌شود که میزان‌های عددی این تحقیق سازگاری خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین ملاحظه می‌شود با توجه به این که وجود لبه‌های دندانه‌ای افقی باعث ریزش جت به فاصله‌ای دورتر از لبه شیب‌شکن می‌شود، در نتیجه باعث افزایش طول ریزش شده است. افزایش ابعاد لبه و شمار آن نیز باعث افزایش طول ریزش می‌شود. با افزایش ابعاد لبه و شمار آن، حجم جریان عبوری از روی آن‌ها افزایش یافته و لذا طول ریزش افزایش می‌یابد.

در شکل 7b برای طول حوضچه که از مجموع طول ریزش و طول پرش هیدرولیکی به دست می‌آید، مشاهده می‌شود با این که لبه‌های دندانه‌ای باعث افزایش طول ریزش می‌شوند با این وجود بیشترین مقادیر طول حوضچه مربوط به شیب‌شکن قائم ساده بدون لبه می‌باشد. چرا که به کارگیری لبه دندانه‌ای افقی سبب افزایش تلاطم و برهم خوردگی خطوط جریان شده و

همچنین، ملاحظه می‌شود که در همه مدل‌های این تحقیق، استهلاک انرژی نسبی در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده افزایش یافته است که به دلیل افزایش شدت تلاطم و برهم خوردگی خطوط جریان در پایین دست جت ریزشی می‌باشد. با افزایش ابعاد لبه‌ها و کاهش شمار آن‌ها نیز استهلاک انرژی افزایش یافته است، به گونه‌ای که به ازای همه میزان‌های عمق بحرانی نسبی، مدل با ۳ لبه و ابعاد نسبی ۰/۱۵، دارای بیشترین میزان بوده و مدل با ۴ لبه با ابعاد نسبی ۰/۱ کمترین میزان استهلاک انرژی را داراست. همچنین به نظر می‌رسد که مدل با ۳ لبه و ابعاد نسبی ۰/۱، در مقایسه با مدل با ۴ دندانه و ابعاد نسبی ۰/۱۵ دارای نتایج نزدیک بهم و همانندی در استهلاک انرژی است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، مدل با ۳ دندانه و ابعاد نسبی ۰/۱۵ دارای بیشترین نامنظمی در خطوط جریان بوده و سبب انتقال شدت آشفتگی به پایین دست می‌شود. لذا همین امر باعث استهلاک انرژی در این مدل نسبت به دیگر مدل‌های تحقیق حاضر شده است. شیب‌شکن قائم مجهز به لبه دندانه‌ای با ۳ و ۴ لبه و به ابعاد ۰/۱ و ۰/۱۵، در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده استهلاک انرژی را به ترتیب و به طور میانگین ۲۶، ۳۸، ۱۵ و ۲۵ درصد افزایش می‌دهد.

در شکل 6b، در صورت رخداد پرش هیدرولیکی برای مستهلک کردن انرژی نیز مشاهده می‌شود که استهلاک انرژی ایجاد شده توسط شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده بیشتر بوده و مدل‌های با ۳ دندانه، در مقایسه با مدل‌های با ۴ دندانه، بیشترین استهلاک انرژی را سبب می‌شوند. بدین ترتیب مدل‌های با شمار ۳ دندانه به ابعاد ۰/۱ و ۰/۱۵ در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، باعث افزایش ۸ تا ۱۲ درصدی استهلاک انرژی می‌گردند.

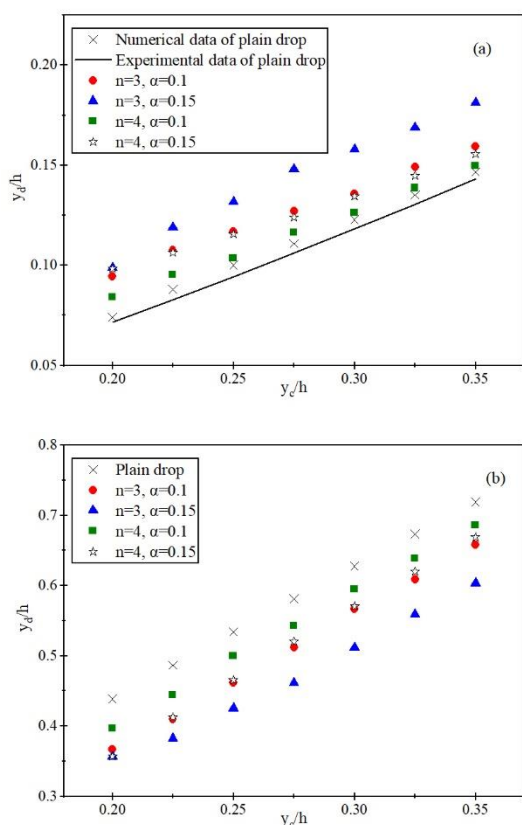
### ۳-۳- طول ریزش ( $L_d$ ) و طول حوضچه آرامش ( $L_B$ )

طول حوضچه آرامش برای مستهلک کردن انرژی در پایین دست شیب‌شکن قائم عبارت است از مجموع طول ریزش جت ( $L_d$ ) و طول پرش هیدرولیکی ( $L_j$ ) تشکیل یافته در پایین دست ریزش (Novak et al., 2007).

میزان‌های مربوط به طول ریزش جت و طول حوضچه آرامش برای شیب‌شکن قائم ساده و همه مدل‌های این تحقیق در برابر عمق بحرانی نسبی در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل

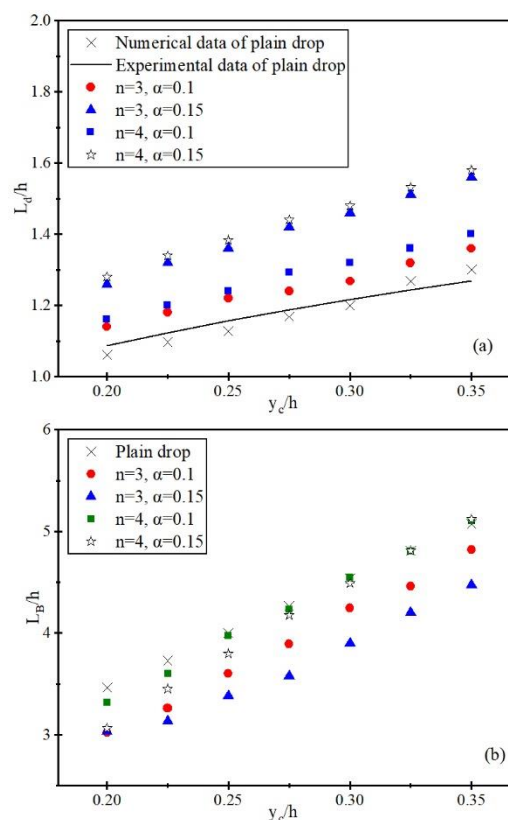
که داده‌های عددی این تحقیق نزدیکی خوبی با نتایج آزمایشگاهی Rajaratnam and Chamani (1995) دارد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ابعاد لبه‌ها و کاهش شمار دندانه‌ها، عمق نسبی پایین‌دست افزایش می‌یابد و مدل با شمار ۳ لبه دندانه‌ای دارای بیشترین میزان‌های عمق نسبی پایین‌دست می‌باشد. با توجه به شکل ۸a می‌توان استنباط کرد که بهینه‌ترین مدل در افزایش عمق نسبی پایین‌دست مربوط به ۳ لبه دندانه‌ای با ابعاد ۰/۱۵ بوده که در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده ۳۶ درصد سبب افزایش عمق پایین‌دست شده است. این افزایش عمق نسبی پایین‌دست سبب کاهش محدوده عدد فرود پایین‌دست از بازه ۳/۷ تا ۴/۵ در شیب‌شکن قائم ساده به ۲/۹ تا ۳/۷ در شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای شده است. در شکل ۸b مشاهده می‌شود که شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، به مراتب عمق

محدوده عدد فرود پایین‌دست را نسبت به شیب‌شکن قائم ساده کاهش داده است و این کاهش در عدد فرود موجب کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌های با ۴ دندانه، تا حدودی طول حوضچه‌ای برابر با شیب‌شکن قائم ساده ایجاد می‌کنند و مدل‌های با ۳ دندانه، در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، طول حوضچه را کاهش می‌دهند، به طوری که در ابعاد نسبی ۰/۱ و ۰/۱۵ به ترتیب و به‌طور میانگین ۱۰ و ۱۵ درصد طول حوضچه کاهش می‌یابد.



**Fig. 8** Changes of relative downstream depth versus the relative critical depth: a) without hydraulic jump and b) with hydraulic jump

شکل ۸ تغییرپذیری‌های عمق نسبی پایین‌دست در برابر عمق بحرانی نسبی (a) بدون پرش هیدرولیکی (b) با پرش هیدرولیکی



**Fig. 7** Changes of: a) length of falling jet and b) basin length versus relative critical depth

شکل ۷ تغییرپذیری‌های طول ریزش (a) و طول حوضچه (b) در برابر عمق بحرانی نسبی

### ۳-۴- عمق پایین‌دست (y<sub>a</sub>)

بررسی عمق پایین‌دست شیب‌شکن قائم از این جهت با اهمیت است که می‌توان با در اختیار داشتن آن، ابعاد حوضچه آرامش پایین‌دست را برآورد کرد. به همین منظور، عمق پایین‌دست شیب‌شکن برای دو حالت بدون رخداد پرش هیدرولیکی و با وجود پرش هیدرولیکی در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل ۸a، برای حالت بدون پرش هیدرولیکی، مشاهده می‌شود

عمق بحرانی نسبی ۰/۲ تا ۰/۳۵ پرداخته شد. شمار لبه‌ها ۳ و ۴ در نظر گرفته شده و ابعاد نسبی آن‌ها نیز ۰/۱ و ۰/۱۵ انتخاب شد. نتایج نشان داد که افزایش ابعاد دندانه‌ها و کاهش شمار آن استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین دست و برهم خوردگی خطوط جریان را افزایش می‌دهد. همچنین، با این که وجود لبه‌ها باعث افزایش طول ریزش شیب‌شکن شد، اما با این حال طول حوضچه برای استهلاک انرژی در مدل‌های دارای لبه دندانه‌ای افقی، کمتر از مدل بدون لبه دندانه‌ای می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق، شیب‌شکن قائم با شمار ۳ لبه و ابعاد نسبی ۰/۱۵ بیشترین استهلاک انرژی را نسبت به شیب‌شکن قائم ساده و دیگر مدل‌های مربوطه ایجاد کرده و محدوده عدد فرود را از بازه ۳/۷ تا ۴/۵ در شیب‌شکن قائم ساده به ۲/۷ تا ۲/۹ تغییر می‌دهد. در کل برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق مدل‌های با شمار دندانه ۴ در مقایسه با شمار دندانه ۳، نتایج بهتری ندارد. با این حال پرسشی که مطرح می‌گردد این است که آیا اگر تعداد دندانه ۲ باشد نتایج بهتر خواهد شد؟ بهتر است در راستای تحقیق، چند مدل با تعداد دندانه ۲ بررسی شود، تا نتایج دقیق‌تری به دست آید. برای مدل با تعداد دندانه ۲ آرایش متفاوتی اعم از آرایش متقارن و نامتقارن در عرض می‌توان در نظر گرفت. در آرایش متقارن اول این که می‌توان دندانه‌ها را چسبیده به دو دیواره فلوم در نظر گرفت و دوم، دندانه‌ها در وسط قرار گیرند (همانند حالت ۴ دندانه با این تفاوت که دو دندانه کناری یا وسطی حذف شود). افزون بر این می‌توان فاصله بین دو دندانه را متفاوت در نظر گرفت تا بهینه‌ترین حالت ممکن انتخاب شود. بنابراین برای تکمیل بررسی‌ها در زمینه استفاده از لبه‌های دندانه‌ای در شیب‌شکن قائم لازم است تا موارد اشاره شده در زمینه شمار دندانه ۲ بررسی شود.

از آنجایی که در پایین دست شیب‌شکن قائم اغلب از حوضچه آرامش برای مستهلک کردن انرژی جنبشی زیان‌آور جریان استفاده می‌شود و ابعاد حوضچه یاد شده وابسته به عدد فرود می‌باشد، لذا استفاده از این دندانه‌های افقی در لبه شیب‌شکن قائم دارای برتری‌هایی چون کاهش ابعاد حوضچه، افزایش استهلاک انرژی و نیاز به عمق پایاب کمتر برای تشکیل پرش هیدرولیکی می‌باشد. بنابراین، با در نظر گرفتن شرایط

نسبی پایین دست کمتری را ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، عمق پایاب کمتری برای تشکیل پرش هیدرولیکی نیاز دارد، به طوری که در مقایسه با شیب‌شکن قائم ساده، در کمترین میزان تا ۷ درصد و بیشترین مقدار تا ۱۹ درصد کاهش می‌دهد. کاهش عمق نسبی پایین دست با وجود پرش هیدرولیکی به منزله کاهش ارتفاع دیواره حوضچه آرامش می‌باشد.

با در نظر گرفتن همه داده‌های مربوط به مدل‌سازی عددی این تحقیق و با استفاده از دستور Solver در اکسل، به صورت سعی و خطا، رابطه (۸) برای برآورد استهلاک انرژی نسبی، عمق نسبی پایین دست و طول ریزش شیب‌شکن قائم ساده و شیب‌شکن قائم با لبه‌های دندانه‌ای افقی بدون لحاظ کردن عمق پایاب و پرش هیدرولیکی ارائه شد.

$$f(x) = a \left( \frac{y_c}{h} \right)^b \left( \frac{1+\alpha}{1+n} \right)^c \quad (8)$$

در رابطه بالا،  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب ثابت بوده و به همراه ضریب تعیین ۱ و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌سازی شده ۲ برای هر کدام از فراسنجه‌های استهلاک انرژی، عمق نسبی پایین دست و طول ریزش در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رابطه‌های ارائه شده معیارهای ارزیابی قابل قبولی داشته و می‌توانند تخمین درستی از داده‌های این تحقیق ارائه دهند.

جدول ۳ ضرایب ثابت و معیارهای ارزیابی رابطه (۸)  
Table 3 Constant coefficients and evaluation criteria of equation (8)

$f(x)$	a	b	c	R <sup>2</sup>	NRMSE
$\frac{\Delta E}{E_u}$	0.14	-0.53	-0.43	0.95	0.06
$\frac{y_d}{h}$	0.448	1.1	-0.025	0.95	0.07
$\frac{L_d}{h}$	1.76	0.3	-0.009	0.93	0.035

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار Flow3D به بررسی عددی استهلاک انرژی شیب‌شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی در محدوده

<sup>2</sup> Normalized root-mean-square error (NRMSE)

<sup>1</sup> Correlation coefficient

### ۶- منابع

Abbasi, A. and Maleknejad yazdi, M. (2014). Effect of sill and submerged vanes on the flow containing sediment entering the lateral intakes. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 4(16), 104-116. (in Persian).

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

Chiu, C.L., Fan, C.M. and Tsung, S.C. (2017). Numerical modeling for periodic oscillation of free overfall in a vertical drop pool. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(1), 04016077.

Daneshfaraz, R., Mirzaee, R., Ghaderi, A. and Majedi Asl, M. (2019). The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. *AUT Journal of Civil Engineering*, 4(3), 8-8.

Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Razmi, S., Norouzi, R. and Abraham, J. (2020a). Experimental investigation of the effect of dual horizontal screens on the hydraulic performance of a vertical drop. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02622-x>.

Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaee, R. and Bazayr, A. (2020b). 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), 2499-250. (in Persian).

Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., Mirzaee, R. and Tayfur, G. (2020c). Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. *AUT Journal of Civil Engineering*, doi: 10.22060/ajce.2020.18227.5667.

Dean, R.B. (1978). Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow. *Journal of Fluids Engineering*, 100, 215-223.

Esen, I.I., Alhumoud, J.M. and Hannan, K.A. (2004). Energy loss at a drop structure with a step at the base. *Water International*, 29(4), 523-529.

Farouk, M. and 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.

Hong, Y.M., Huang, H.S. and Wan, S. (2010). Drop characteristics of free-falling nappe for aerated

هیدرولیکی و اقتصادی طرح، می‌توان از لبه‌های دندانه‌ای در پروژه‌های عملی برای کاهش ابعاد حوضچه و افزایش استهلاک انرژی جریان بهره جست. برای تکمیل بررسی‌ها در این زمینه نیز پیشنهاد می‌شود تا در بررسی‌های بعدی، تأثیر زاویه قرارگیری این لبه‌ها بر استهلاک انرژی و دیگر فراسنجه‌های هیدرولیکی جریان بررسی و ارزیابی شود.

### ۵- فهرست نشانه‌ها

$B$	عرض فلوم (m)
$E_u$	انرژی کل بالادست شیب‌شکن (m)
$Re$	عدد رینولدز (-)
$Fr_u$	عدد فرود بالادست (-)
$g$	شتاب گرانش ( $m.s^{-2}$ )
$h$	ارتفاع شیب‌شکن (m)
$L_B$	طول حوضچه (m)
$L_d$	طول ریزش جت (m)
$L_j$	طول پرش هیدرولیکی (m)
$n$	تعداد لبه دندانه‌ای (-)
$p$	فشار (Pa)
$q$	دبی در واحد عرض ( $m^3.s^{-1}.m^{-1}$ )
$Q$	دبی ( $m^3.s^{-1}$ )
$T$	طول و عرض لبه دندانه‌ای (m)
$u_i$	سرعت در راستای $i$ ( $ms^{-1}$ )
$u'_i$	سرعت نوسانی در راستای $i$ ( $ms^{-1}$ )
$x_j$	راستای محور مختصات
$y_c$	عمق بحرانی (m)
$y_u$	عمق بالادست (m)
$\mu$	گرانروی آب (Pa.s)
$\alpha$	بعد نسبی لبه (-)
$\rho$	چگالی آب ( $kg.m^{-3}$ )
$\Delta E$	اختلاف انرژی بالادست و پایین دست شیب‌شکن (m)
$y_{2, jump}$	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (m)
$y_d$	عمق پایین دست (m)
$Fr_d$	عدد فرود پایین دست (-)

straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 125-129.

Ghaderi, A., Dasineh, M. and Abbasi, S. (2019). Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (numerical investigation). *Journal of Hydraulics*, 13(4), 121-131. (in Persian).

Kabiri-Samani, A.R., Bakhshian, E. and 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. and 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.

Mahmoudi, B. and Farhoudi, J. (2018). Experimental Studies of flow from Flap Gate in circular open channel at free flow condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 159-170. (in Persian).

Mansouri, R. and Ziaei, A. (2014). Numerical modeling of flow in the vertical drop with inverse apron. 7th International Symposium on Environmental Hydraulics, Singapore.

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.

Novák, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. and Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures*. CRC Press.

Rajaratnam, N. and Chamani, M.R. (1995). Energy loss at drops. *Journal of Hydraulic Research*, 33(3), 373-384.

Rand, W. (1955, September). Flow geometry at straight drop spillways. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81(9), 1-13.

Sharif, M. and Kabiri-Samani, A. (2018). Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth. *Journal of Hydraulic Research*, 56(4), 505-516.

White, M.P. (1943). Discussion of Moore. *Transactions of ASCE*, 108, 1361-1364.