

Numerical Simulation of Flow Characteristics in Vertical and Inclined Rectangular Drops Using RNG k- ϵ

Mahdis Aghvami^{1*} , Akram Abbaspour², Davood Farsadizadeh², Farzin Salmasi³

1- M.Sc. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

2-Assistant Professor, Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

Received: May 21, 2025

Accepted: September 22, 2025

Revised: September 7, 2025

Published online: September 20, 2025

* Corresponding Author's Email: akabbaspour@yahoo.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Energy dissipation,
Inclined drop,
Numerical simulation,
Turbulence model,
Vertical drop

Introduction

This study employs computational fluid dynamics (CFD) to investigate the hydraulic behavior and energy dissipation efficiency of rectangular drop structures, encompassing both vertical and inclined configurations. Drop structures are integral to irrigation and flood control systems, serving to reduce water velocity and mitigate channel bed erosion. Vertical drop structures promote significant energy loss through the formation of hydraulic jumps, whereas inclined drops enable smoother flow transitions. Hydraulic jumps facilitate a reduction in the total energy of a moving fluid, thereby preventing scouring of channel banks and converting a portion of the fluid's kinetic energy to stabilize downstream flow conditions. The primary objective of this research is to numerically evaluate flow patterns and energy dissipation rates in vertical and inclined rectangular drop structures, with an emphasis on the influence of slope angle and geometric configuration. The study aims to provide practical insights for optimizing drop structure design to maximize energy dissipation with minimal construction costs. To validate the reliability of the CFD models, experimental data from prior studies are utilized. The flow characteristics, including water depth, energy loss, and jump length, are compared between both vertical and inclined drop structures.

Materials and Methods

The computational domain for the simulation geometry, comprising a rectangular channel with an integrated drop structure, was developed and meshed using GAMBIT (ANSYS). The length of the rectangular channel (L) was set to 2 m. The simulations were performed using ANSYS FLUENT software, employing the finite volume method (FVM) for numerical analysis. The RNG k- ϵ turbulence model was selected due to its established accuracy in simulating turbulent open-channel flows. A structured mesh was generated for the computational domain of both vertical and inclined drop geometries to ensure accurate numerical simulations. Boundary conditions were established to simulate steady-state, incompressible turbulent flow, incorporating the assumption of free-surface flow with air-water interaction. The Volume of Fluid (VOF) model was employed to precisely capture and track the free surface in the simulations. The investigated geometries encompassed drop heights of 4 cm, 8 cm, and 12 cm, with inclined drops configured at slope ratios of 1.5:1 and 2:1. The simulations encompassed a range of flow discharges and drop configurations to thoroughly evaluate hydraulic behavior. Inlet flow depth (H) and approach flow velocity (V) were determined, with the Reynolds number ranging from 9000 to 28000. A mesh sensitivity analysis was conducted to verify the accuracy and reliability of the numerical results. The numerical model was validated by comparing the simulation results with experimental data reported by Sholichin and Akib (2010). Accordingly, a mesh consisting of approximately 20000-30000 elements was determined to be optimal for all developed models to effectively capture the flow characteristics. Boundary conditions were specified for all models. Pressure inlet and outlet boundary conditions were applied at the channel inlet and outlet,

How to cite:

Aghvami, M., Abbaspour, A., Farsadizadeh, D., Salmasi, F. *Numerical Simulation of Flow Characteristics in Vertical and Inclined Rectangular Drops Using RNG k- ϵ* . Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (3):37-49.

<https://doi.org/10.22034/hws.2025.67753.1028>



This is an open-access article under the CC BY-NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)



respectively. For the free surface, a symmetry boundary condition was applied, while wall boundary conditions were assigned to the channel bed, and the drop structure. Principal parameters, including velocity vectors, flow depths before and after the hydraulic jump, energy dissipation percentage, and turbulence, intensity were computed and analyzed. The numerical model demonstrated strong agreement with experimental results, exhibiting error margins within 9.8%, thereby validating the model accuracy. The comparison between simulated secondary depth values and experimental data revealed that the relative error for secondary flow depths across all stilling basins ranges from 0% to 9.5%. This demonstrates the satisfactory accuracy of the conducted simulations.

Findings

Numerical simulations reveal that the velocity vector patterns in vertical and inclined drop structures vary depending on the slope angle. The inclined drop structures exhibited a more uniform velocity distribution and reduced energy dissipation compared to vertical drop structures. Vertical drop structures produced more intense vortices at the onset of the hydraulic jump, resulting in greater localized energy loss. The RNG k- ϵ model effectively captured the turbulent characteristics and flow separation phenomena. Water surface profiles and energy loss values closely aligned with experimental measurements, with the average relative error for predicted secondary flow depths remaining below 9.5 % across all configurations. Energy loss in drop structures decreases with increasing drop number, as higher flow discharges result in hydraulic jumps characterized by weaker vortices. The highest energy dissipation efficiency was observed in vertical drops with larger step heights.

Conclusion

The results indicate that the RNG k- ϵ turbulence model, combined with the VOF method, is well-suited for predicting energy dissipation in both vertical and inclined drop structures. Vertical rectangular drop structures exhibit enhanced energy dissipation effectiveness relative to inclined drops under similar hydraulic conditions. The validated CFD model serves as a reliable tool for optimizing the design of energy dissipation structures. Choosing an optimal slope improves flow control and enhances the structural safety of the system.



شبیه سازی عددی خصوصیات جریان در شیب شکن های مستطیلی قائم و مایل با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG)

مهندس اقوامی^{۱*}، اکرم عباسپور^۲، داود فرسادی زاده^۲، فرزین سلماسی^۲

۱- دانش اموخته کارشناسی ارشد، سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

* نویسنده مسؤل: akabbaspour@yahoo.com

چکیده

شیب شکن های مستطیلی از سازه های مؤثر در کنترل جریان و استهلاک انرژی در کانال های آبیاری و زهکشی به شمار می روند. این سازه ها با تغییر شیب کانال از حالت تند به ملایم، از طریق قرار گرفتن در امتداد مسیر جریان، سرعت بیشینه و فرسایش ناشی از آن را مهار می کنند. از منظر هندسی، شیب شکن ها به سه گروه لوله ای، قائم و مایل مستطیلی طبقه بندی می شوند و هدف اصلی در ساخت آن ها، استهلاک انرژی مازاد جریان است. در این پژوهش، ۳۶ مدل عددی از شیب شکن های قائم و مایل با ارتفاع ها و دبی های مختلف شبیه سازی شد و نتایج با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. پارامترهای جریان شامل عمق اولیه در حوضچه آرامش، طول پرش هیدرولیکی، توزیع سرعت، الگوی جریان، عمق آب و میزان افت انرژی بودند. همچنین، اثر زاویه شیب و ارتفاع پله بر رفتار جریان و استهلاک انرژی به طور دقیق تحلیل شد. نوآوری پژوهش حاضر در شبیه سازی همزمان ۳۶ مدل عددی از شیب شکن های قائم و مایل با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) و روش VOF، بررسی روندهای نسبی تغییرات جریان و اتلاف انرژی، و اعتبارسنجی دقیق با داده های آزمایشگاهی نهفته است. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) در پیش بینی جریان های آشسته بر روی شیب شکن ها کارایی بالاتری دارد و قادر است الگوی جریان و استهلاک انرژی را با دقت قابل قبولی شبیه سازی کند. در شیب شکن های مایل، به دلیل توزیع یکنواخت تر سرعت اتلاف انرژی کمتر است؛ در مقابل، در شیب شکن های قائم، تشکیل گردابه های قوی تر در ناحیه ریزش جریان به حوضچه آرامش، منجر به استهلاک انرژی بیشتری می شود.

کلمات کلیدی: استهلاک انرژی، شبیه سازی عددی، شیب شکن قائم، شیب شکن مایل، مدل آشفتگی

۱- مقدمه

شیب شکن ها به عنوان سازه هایی کارآمد در مهار جریان های آبی و حفاظت از زیرساخت ها، نقش برجسته ای در کاهش پیامدهای زیان بار سیلاب ها و مدیریت بهینه منابع آب ایفا می کنند. این سازه ها به ویژه در طرح های آبیاری و مهندسی کنترل سیلاب، برای پیشگیری از فرسایش خاک و کاهش سرعت جریان، کاربرد گسترده ای دارند. از میان انواع متداول شیب شکن ها، می توان به شیب شکن های مستطیلی قائم و مایل اشاره نمود. شیب شکن های مستطیلی قائم و مایل، به دلیل ویژگی های عملکردی و هندسی متمایز، تأثیرات متفاوتی بر رفتار جریان آب اعمال می کنند. این تفاوت ها بر اهمیت بررسی دقیق خصوصیات جریان می افزایند. (بیرامی ۱۳۹۰).

رند (۱۹۶۵) به بررسی جریان آب بر روی شیب شکن قائم در کانال باز پرداخته است. این پژوهش به مطالعه شرایط خاصی از جریان می پردازد که شامل فاصله ای معین میان دو ناحیه جریان است؛ ناحیه بالادست، جایی که جریان فوق بحرانی بوده و پرش هیدرولیکی آغاز می شود، و ناحیه پایین دست، که جریان در آن به حالت زیر بحرانی و یکنواخت تبدیل می شود. حبیب و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی نظری، پرش های هیدرولیکی در پله های منفی در حوضچه های آرامش مجهز به آستانه انتهایی را مدل سازی کرده و مدل های نظری جدیدی برای پیش بینی نسبت عمق پرش هیدرولیکی در حضور پله های منفی درون این حوضچه ها ارائه نموده اند. این مدل ها بر پایه معادلات یک بعدی پیوستگی بنا شده اند و نسبت های عمق مورد نیاز برای طراحی ابعاد حوضچه ها را با دقت بالا محاسبه می کنند. نتایج نشان داد که مدل های نظری با داده های تجربی همخوانی بالایی دارند. صادقی و همکاران (۱۳۸۶)، در تحقیقی با بهره گیری از مطالعات صحرایی و نرم افزار Hec-Ras، نقش شیب شکن را در تغییر عمق و تراز سیلاب در بخشی از رودخانه کن تهران بررسی کرده اند. نتایج این پژوهش بر تأثیر کلی شیب شکن ها در کاهش تراز و عمق سیل گیری در نواحی بالادست و پایین دست شیب شکن تأکید دارد. چمنی و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی اتلاف انرژی در جریان های آشفته بر روی شیب شکن های قائم پرداخته اند. یافته ها نشان داد که با افزایش شدت آشفته گی جریان، انرژی بیشتری تلف می شود و همچنین هرچه ارتفاع پله بیشتر باشد، میزان افت انرژی افزایش می یابد.

پرش هیدرولیکی به عنوان یکی از پدیده های بنیادین در مهندسی هیدرولیک، نقش کلیدی در کنترل و اتلاف انرژی جریان های فوق بحرانی ایفا می کند. این پدیده، که با تبدیل ناگهانی جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی همراه است، با افزایش چشمگیر عمق و کاهش سرعت جریان، انرژی جنبشی را عمدتاً به گرما تبدیل می نماید. ایجاد آشفته گی شدید و اتلاف انرژی در پرش هیدرولیکی، کاربرد حوضچه های آرامش را برای

تثبیت این پدیده در سازه های هیدرولیکی نظیر سرریزها، دریچه ها و کانال های انتقال آب ضروری می سازد. طراحی بهینه حوضچه های آرامش نه تنها هزینه های ساخت و نگهداری را کاهش می دهد، بلکه کارایی هیدرولیکی سازه را نیز ارتقا می بخشد.

شولچین و آکیب (۲۰۱۰)، عملکرد شیب شکن های مایل و قائم را در استهلاك انرژی به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده اند. در این تحقیق، تغییرات طول و عمق نسبی پرش به ازای عدد بی بعد دراپ به دست آمد. آزمایش های هیدرولیکی با استفاده از مدل های فیزیکی و ایجاد جریان های آبی مختلف در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و اثرات آنها بر سرعت جریان، فشار جریان و استهلاك انرژی اندازه گیری گردید. نتایج نشان داد که عدد دراپ (D) در پیش بینی طول حوضچه شیب شکن (Ld) و طول پرش هیدرولیکی (Lj) کارایی مطلوبی دارد. مرادی سبزوکی و همکاران (۱۳۹۰)، میزان استهلاك انرژی را برای سه نوع رایج شیب شکن قائم، مایل مستطیلی و پلکانی با ساخت مدل های فیزیکی در دو ارتفاع، دو شیب متفاوت، تعداد پله های گوناگون و دبی های مختلف بررسی کردند. تأثیر شرایط هندسی و هیدرولیکی شیب شکن ها بر میزان استهلاك انرژی ارزیابی شد و استهلاك انرژی در شیب شکن های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. یافته ها حاکی از آن است که بیشترین استهلاك انرژی در محدوده مشترک متغیرهای بررسی شده، به شیب شکن قائم تعلق دارد.

منصوری و ضیائی (۱۳۹۰)، الگوی جریان در شیب شکن قائم را با در نظر گرفتن شرایط مرزی و شبکه بندی های مختلف، با استفاده از نرم افزار فلوئنت ۱ به صورت عددی شبیه سازی کردند. در این تحقیق، روش حجم سیال (VOF) برای شبیه سازی سطح آزاد جریان به کار گرفته شد. بررسی های انجام شده نشان داد که مقادیر عمق آب به دست آمده از مدل آشفته گی، با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بیشتری دارد. همچنین، افت انرژی ناشی از وجود شیب شکن قائم با بهره گیری از مدل عددی ارزیابی گردید. منصوری و ضیائی (۱۳۹۵)، خصوصیات هیدرولیکی جریان در انواع شیب شکن قائم را با استفاده از نرم افزار آنسیس فلوئنت بررسی کردند. مشخصات هندسی شیب شکن های قائم با پایاب های متفاوت در پایین دست (شیب شکن قائم ساده، شیب شکن قائم با شیب معکوس کف و شیب شکن قائم با آستانه انتهایی) به صورت عددی شبیه سازی شد. خصوصیات جریان شامل عمق های جریان در نقاط مختلف، افت انرژی، پروفیل سطح آب، پروفیل سرعت، توزیع فشار و تنش برشی در بستر حوضچه بود که با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در یافته های عددی، شیب شکن قائم ساده کمترین افت انرژی را نشان داد، در حالی که شیب شکن قائم با آستانه انتهایی بیشترین افت انرژی را به خود اختصاص داد.

لطف الهی یقین و نصیری (۱۳۹۵)، در پژوهشی عددی، اثر امواج سونامی بر سازه های ساحلی را با بهره گیری از مدل آشفته گی k-ε

شیب‌شکن‌ها، می‌تواند مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

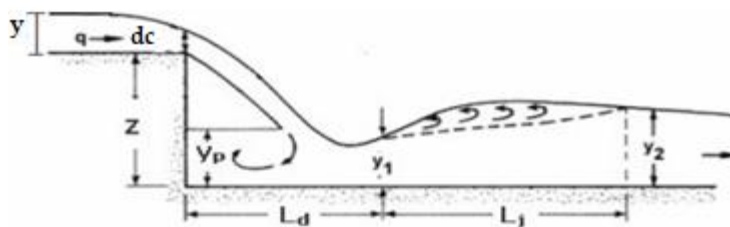
در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر بلوک‌های مثلی قائم‌الزاویه بر مشخصات هیدرولیکی پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی، از فلوم مستطیلی آزمایشگاه هیدرولیک بخش آب دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان با ابعاد ۶ متر طول، ۰/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع استفاده شد. کف فلوم از جنس فولاد و دیواره‌ها از پلکسی‌گلاس شفاف بود تا مشاهده پروفیل سطح آب و الگوی جریان امکان‌پذیر باشد. تأمین جریان از سیستم چرخشی شامل سه مخزن صورت گرفت. مخزن زیرین مجهز به پمپ سانتریفیوژ، آب را به مخزن بالایی پمپاژ می‌کرد. مخزن هوایی (قطر ۰/۵ متر و ارتفاع ۲/۱ متر) پشت دریچه کشویی، هد ثابت آب را تأمین می‌نمود. آب پس از عبور از دریچه به فلوم وارد و در نهایت به مخزن انتهایی تخلیه می‌شد. این چیدمان، دبی و ارتفاع آب را در طول آزمایش‌ها ثابت نگه داشت. دبی جریان با فلومتر اولتراسونیک اندازه‌گیری شد. برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی و تنظیم عمق اولیه جریان، دریچه لبه‌تیز فلزی با عرض ۰/۵ متر و طول ۰/۶ متر در ابتدای فلوم نصب گردید (شکل ۱). بازشدگی دریچه در تمام آزمایش‌ها ۱/۵ سانتی‌متر ثابت در نظر گرفته شد تا عمق اولیه جریان در تمام آزمایش‌ها یکسان باشد. کنترل محل پرش هیدرولیکی با موانع لوله‌ای پلی‌پروپیلن (قطرهای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر، طول ۰/۵ متر) در انتهای فلوم انجام شد.

این تحقیق به صورت عددی به بررسی ویژگی‌های جریان در شیب‌شکن‌های مستطیلی قائم و مایل می‌پردازد. در این راستا، شبیه‌سازی عددی جریان آب در این شیب‌شکن‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تحلیل و مدل‌سازی عددی صورت خواهد گرفت. هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی دقیق رفتار جریان در این شیب‌شکن‌ها و مقایسه نتایج به دست آمده برای دستیابی به درک بهتر از تأثیرات هیدرولیکی بر جریان آب و ارائه توصیه‌های بهینه در طراحی این سازه‌ها است. در این مطالعه، مطابق شکل ۱ از داده‌های آزمایشگاهی شولیچین و آکیب (۲۰۱۰) استفاده شده است و مدل CFD مورد استفاده، نرم‌افزار ANSYS FLUENT می‌باشد.

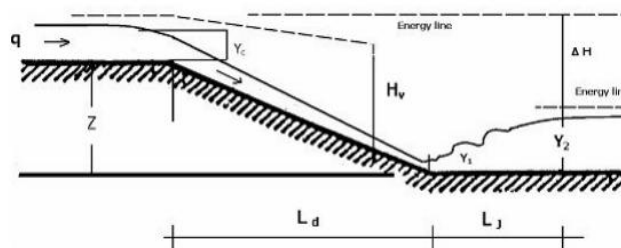
(RNG) بررسی کردند. در این مطالعه، پارامترهای هیدرولیکی جریان شامل عمق آب، سرعت جریان و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل $k-\epsilon$ RNG قادر است رفتار پیچیده امواج و تغییرات فشار بر سازه‌های ساحلی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. همچنین یافته‌ها حاکی از آن بود که شکل و ابعاد سازه‌ها تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار و نیروی وارده دارند، و این مطالعه زمینه‌ای برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر سونامی فراهم آورد. این مطالعه با پژوهش حاضر مرتبط است، زیرا از همان مدل آشفتگی (RNG) $k-\epsilon$ استفاده کرده و نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده و بررسی استهلاك انرژی در سازه‌ها قابل اعتماد باشد.

نصیریایی و همکاران (۱۳۹۵)، شبیه‌سازی عددی امواج بلند (سونامی) بر موج‌شکن‌های کیسونی را انجام دادند. آنان با بررسی الگوی جریان، فشار هیدرودینامیکی و نیروهای وارده، کارایی مدل $k-\epsilon$ (RNG) را در پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی موج‌شکن‌ها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل $k-\epsilon$ (RNG) در شبیه‌سازی توزیع فشار و تغییرات سرعت در اطراف موج‌شکن‌ها عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر دارد. این مطالعه بر اهمیت تأثیر هندسه سازه و شرایط جریان بر پاسخ هیدرولیکی تأکید کرد و می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های مشابه تحت شرایط جریان‌های گوناگون به کار رود. ارتباط این پژوهش با کار حاضر در آن است که نشان می‌دهد مدل $k-\epsilon$ (RNG) برای پیش‌بینی جریان‌های پیچیده و استهلاك انرژی در سازه‌های قائم و مایل، قابل اعتماد است. سلماسی و همکاران (۲۰۲۲)، اتلاف انرژی در سرریزهای دراپ قائم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اتلاف انرژی با افزایش ارتفاع شیب‌شکن و کاهش دبی جریان به طور مستقیم افزایش می‌یابد. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر شناسایی شد و سه مدل آزمایشگاهی با ارتفاع‌های مختلف از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شد. اتلاف انرژی عمدتاً ناشی از اختلاط جت با حوضچه آرامش و تشکیل حباب‌های هوا در جریان است. یک مدل آماری توسعه یافته، رابطه غیرخطی میان پارامترهای مؤثر را برای پیش‌بینی اتلاف انرژی ارائه کرد. هدف اصلی پژوهش، بررسی خصوصیات هیدرولیکی شیب‌شکن‌ها و ارزیابی استهلاك انرژی در جریان بود.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی و تحلیل ۳۶ مدل عددی شیب‌شکن‌های قائم و مایل با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) و روش VOF می‌باشد. در این مطالعه، تأثیر زاویه شیب، ارتفاع پله و عدد دراپ بر رفتار جریان، عمق‌های اولیه و ثانویه و استهلاك انرژی به صورت سیستماتیک ارزیابی شد. همچنین، نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی شولیچین و آکیب (۲۰۱۰) به دقت اعتبارسنجی گردید. این پژوهش با ارائه روندهای نسبی نوین میان پارامترهای جریان و هندسه



(الف)



(ب)

شکل ۱- شماتیک هندسه شیب شکن ها: (الف) شیب شکن قائم و (ب) شیب شکن مایل (شولیچین و آکیب ۲۰۱۰)

E_1 انرژی کل جریان در بالادست شیب شکن، E_2 انرژی کل جریان در مقطع بعد از پرش، ΔE استهلاك انرژی بین دو مقطع می باشند (چامپین و همکاران ۲۰۱۷). پارامتر بی بعد دراپ (Dr)، سرعت متوسط جریان (V) و عمق بحرانی (d_c) از روابط هیدرولیکی زیر تعیین شدند:

$$V = \frac{Q}{b \times y} \quad (۴)$$

$$Dr = \frac{q^2}{g \times z^3} \quad (۵)$$

$$d_c = \left(\frac{Q^2}{g \times b^2} \right)^{1/3} \quad (۶)$$

که در روابط فوق، Q دبی جریان، q دبی جریان واحد عرض، b عرض کف کانال، و y عمق جریان در بالادست شیب شکن می باشند.

مدل سازی عددی

در این تحقیق، مدل عددی برای بررسی عملکرد

۲-۲- پارامترهای مؤثر در

شبیه سازی عددی با شیب شکن مایل

و قائم

مطابق پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱، انرژی کل در بالادست (E_1) و پایین دست (E_2) شیب شکن و افت نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) از روابط زیر محاسبه می گردد:

$$E_1 = z + y + \frac{V_1^2}{2g} \quad (۱)$$

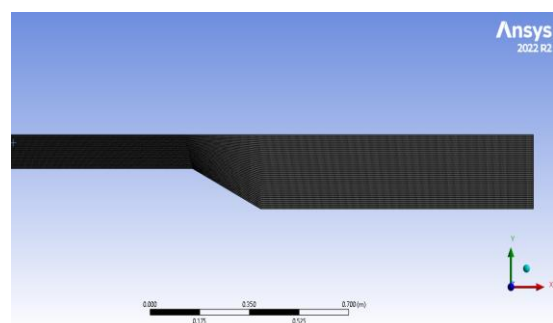
$$E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (۲)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{|E_2 - E_1|}{E_1} \quad (۳)$$

در این روابط، V_1 و V_2 سرعت متوسط جریان در بالادست و پایین دست شیب شکن، z ارتفاع شیب شکن، g شتاب گرانشی، y عمق اولیه جریان در بالادست شیب شکن، y_2 عمق ثانویه پرش هیدرولیکی،

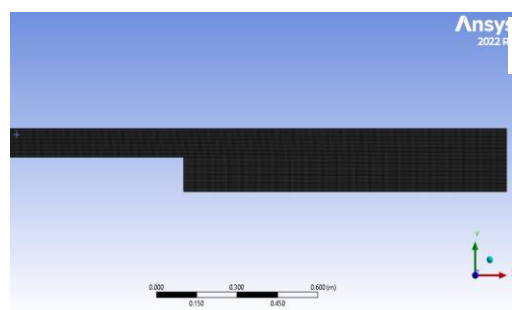
۱). در آزمایش‌های شولیچین و آکب (۲۰۱۰)، عمق جریان قبل و بعد از پرش، انرژی کل جریان و عمق بحرانی اندازه‌گیری گردید. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT انجام شد که بر پایه روش حجم محدود توسعه یافته است. جزئیات اجرای آن در ادامه تشریح شده است. تحلیل جریان‌های دو فاز با مدل آشفتگی RNG k-ε صورت گرفت. همچنین، از شبکه‌بندی دوبعدی با تعداد ۲۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ المان استفاده شد (شکل ۱).

هیدرولیکی شیب‌شکن‌ها با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی شولیچین و آکب (۲۰۱۰) شبیه‌سازی شد. دو نوع شیب‌شکن قائم با زاویه ۹۰ درجه و شیب‌شکن مایل با شیب‌های ۱/۵:۱ و ۲:۱ مورد بررسی قرار گرفت. هدف پژوهش، ارزیابی تأثیر دو نوع شیب و زاویه آن بر پارامترهای هیدرولیکی نظیر پرش هیدرولیکی، انرژی جریان و افت انرژی بود. شبیه‌سازی‌ها در کانالی مستطیلی به طول ۲ متر و با ارتفاع‌های گوناگون انجام شد و داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل عددی به‌کار گرفته شد (جدول



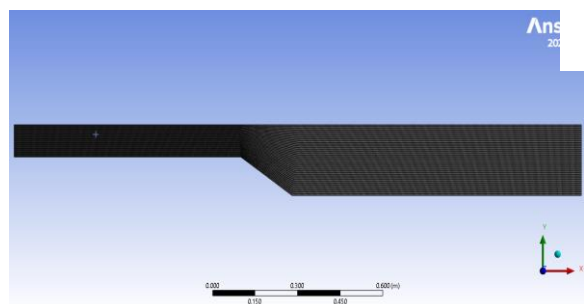
ب

-۲-۲-۲



الف

-۲-۲-۱



ج

-۲-۲-۳

شکل ۱- شبکه‌بندی مدل شیب‌شکن‌ها: الف) شیب‌شکن قائم، ب) شیب‌شکن مایل ۱/۵:۱، و ج) شیب‌شکن مایل ۲:۱.
-۲-۲-۴

جدول ۱- پارامترهای شبیه‌سازی عددی شیب‌شکن‌های قائم و مایل.
-۲-۲-۵

ردیف	پارامتر	مقادیر
۱	طول کانال (متر)	۲
	دبی جریان (Q بر حسب لیتر بر ثانیه)	۰/۷، ۰/۹۴، ۱/۲، ۲/۱۸۴
۲	ارتفاع شیب‌شکن (Z بر حسب متر)	۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲
۳	شیب شیب‌شکن	قائم، ۱/۵:۱ و ۲:۱

$$E(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N [E_{real} - E_{CFD}]}{\sum_{i=1}^N E_{real}} \times 100 \quad (7)$$

در این رابطه، E_{CFD} استهلاك انرژی حاصل از شبیه سازی عددی، E_{real} استهلاك انرژی آزمایشگاهی و N تعداد کل داده ها است. سپس با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت همگرایی جواب های حاصل، شبکه مناسب انتخاب گردید. شکل ۲، تغییرات خطای استهلاك انرژی شبیه سازی شده به مقادیر واقعی را برای تعداد مختلف شبکه محاسباتی نشان می دهد.

جریان های پیچیده در شیب شکن ها را بهبود می بخشد؛ ضمن آنکه سرعت محاسباتی آن در مقایسه با مدل های پیچیده تر مانند LES یا RSM به طور قابل توجهی بالاتر است. برای حل مسئله، گام زمانی اولیه ۰/۰۰۰۵ ثانیه و پس از تشکیل پرش، ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شد. جریان به دلیل ماهیت دوفازی و غیرماندگار، به صورت غیرماندگار شبیه سازی گردید. در این شبیه سازی، جریان به صورت دوفازی با فاز اولیه (هوا) و فاز ثانویه (آب) تعریف گردید. جریان غیرقابل تراکم فرض گردید و تبادل حرارتی میان فازها نادیده گرفته شد. مشخصات فیزیکی آب و هوا در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برای شبیه سازی انتخاب شد. شرایط مرزی برای مدل ها به شرح زیر تعریف گردید:

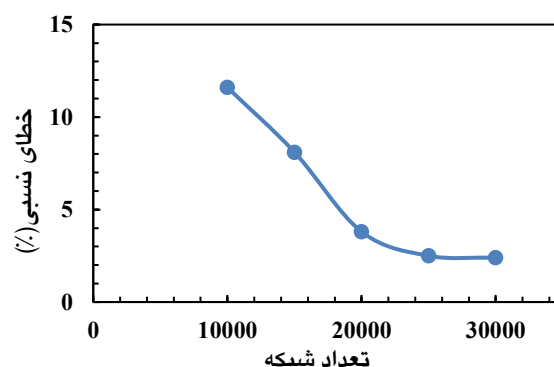
در شرط مرزی ورودی، ویژگی های جریان شامل شدت آشفتگی و عدد رینولدز انتخاب شد و به ترتیب از روابط زیر محاسبه گردید (گلشاهی فر ۱۳۸۷).

$$I = 0.16 \times Re^{-0.125} \quad (8)$$

$$Re = \frac{v \times y}{10^{-6}} \quad (9)$$

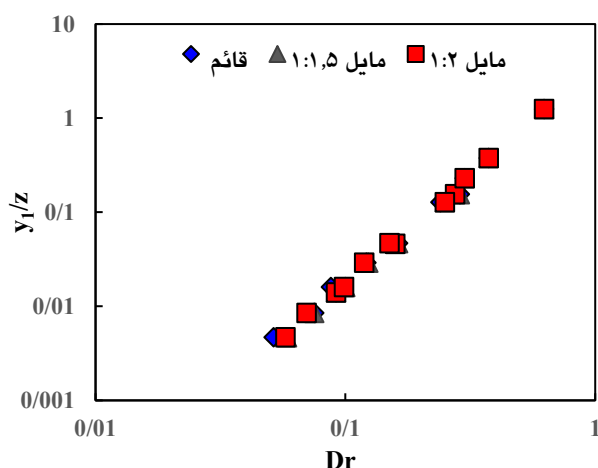
در مدل های شبیه سازی شده، عدد رینولدز (Re) در بازه ۹۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ و شدت آشفتگی (I) در بازه ۴ تا ۵ درصد قرار داشت. در بخش multiphase نرم افزار، تراز کف، تراز سطح آزاد آب و سرعت جریان وارد گردید. شرط مرزی خروجی جریان بر اساس داده های آزمایشگاهی، به صورت تراز سطح آزاد آب در پایین دست

تحلیل حساسیت شبکه بندی به معنای بررسی تغییرات نتایج شبیه سازی در پاسخ به تغییر در تعداد سلول ها و کیفیت شبکه است. اگر شبکه ای بیش از حد درشت باشد، ممکن است دقت نتایج را کاهش دهد. در حالی که، شبکه ای بیش از حد ریز، زمان و هزینه محاسباتی را به طور غیرضروری افزایش می دهد. برای اطمینان از استقلال نتایج اندازه سلول ها، چهار نوع شبکه بندی با ابعاد مختلف در نظر گرفته شد. به منظور ارزیابی حساسیت شبکه، روند تغییرات خطای نسبی استهلاك انرژی بررسی گردید. بدین منظور، از رابطه زیر استفاده شد:



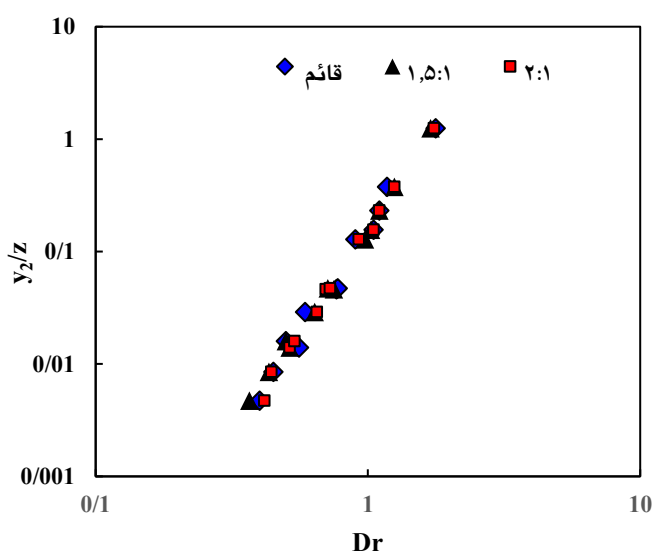
شکل ۲- روند تغییرات خطای نسبی استهلاك انرژی جریان به ازای تعداد شبکه محاسباتی مختلف در شیب شکن قائم.

با توجه به شکل ۲، با افزایش تعداد سلول های محاسباتی، مقدار خطا کاهش می یابد و در نهایت به سطحی تقریباً پایدار می رسد. بنابراین، تعداد بهینه سلول ها برای حل عددی انتخاب شد تا از افزایش مقدار خطا جلوگیری شود. در این پژوهش، شبیه سازی جریان در نرم افزار FLUENT به صورت دوفازی و آشفتگی انجام شد. تنظیمات اصلی شامل حالت غیرماندگار (unsteady)، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) و روش Volume of Fluid (VOF) می باشد. مدل $k-\epsilon$ (RNG) برای شبیه سازی جریان های آشفتگی در شیب شکن های مستطیلی انتخاب گردید؛ زیرا قادر است پرش های هیدرولیکی، توزیع سرعت و اتلاف انرژی را با دقت بالا پیش بینی کند و عملکرد آن با داده های آزمایشگاهی تأیید شده است. این مدل نسبت به نسخه استاندارد، اصلاحاتی در نرخ های آشفتگی بالا و ریزگرداب ها دارد که دقت پیش بینی



شکل ۳- تغییرات $\frac{y_1}{z}$ به ازای Dr در شیب‌شکن‌های قائم و مایل

(سه ارتفاع شیب‌شکن ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر به ازای دبی‌های مختلف).



شکل ۴- تغییرات y_2/z به ازای Dr در شیب‌شکن‌های قائم و مایل

(سه ارتفاع شیب‌شکن ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر به ازای دبی‌های مختلف).

در شکل ۴، تغییرات عمق ثانویه نسبی جریان ($\frac{y_2}{z}$) برای تمام مدل‌های شیب‌شکن قائم و مایل به ازای عدد دراپ نشان داده شده است. با افزایش عدد دراپ، عمق نسبی ثانویه جریان افزایش می‌یابد؛ زیرا این افزایش عمدتاً

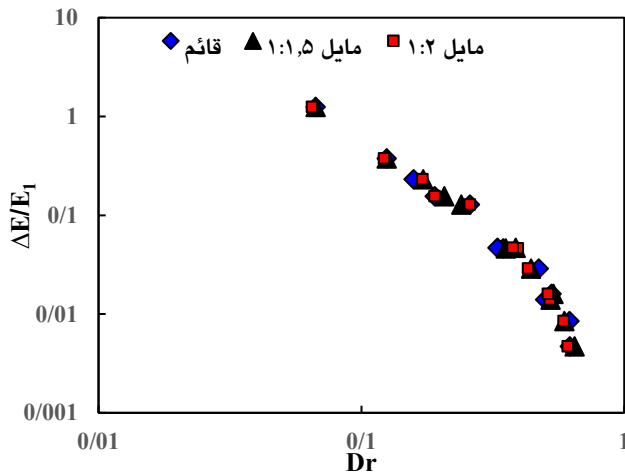
شیب‌شکن برای مدل‌های مختلف تعیین گردید. شرط مرزی سقف جریان به منظور ساده‌سازی تحلیل، symmetry در نظر گرفته شد و فرض بر یکسان بودن جریان در دو طرف بود. برای کف جریان، شرط مرزی دیواره به منظور مدل‌سازی تعامل سیال با سطوح دیواره کانال و شیب‌شکن‌ها تعریف شد. در گسسته‌سازی معادلات، الگوریتم‌های حل پارامترهای سرعت، فشار و مومنتم مشخص گردید و شبیه‌سازی برای ۳۶ مدل اجرا شد. مدت زمان هر شبیه‌سازی بین ۱۰ تا ۱۴ ساعت بود. مدل عددی حاضر با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی شولیچین و آکیب (۲۰۱۰) برای پارامترهای مختلف جریان، شامل عمق اولیه و ثانویه، طول پرش و اتلاف انرژی اعتبارسنجی شد. نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان داد، به طوری که خطای نسبی در تمامی پارامترها کمتر از ۹ درصد بود. بنابراین، مدل $k-\varepsilon$ (RNG) و روش VOF قادر است رفتار جریان در شیب‌شکن‌های قائم و مایل را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. عدد فرود در بازه ۲/۲۶ تا ۵/۸۶ قرار دارد که بر اساس طبقه‌بندی پرش هیدرولیکی، برای اعداد فرود ۱/۷ تا ۲/۵ پرش ضعیف، ۲/۵ تا ۴/۵ پرش نوسانی و ۴/۵ تا ۹ پرش قوی است.

۳- نتایج و بحث

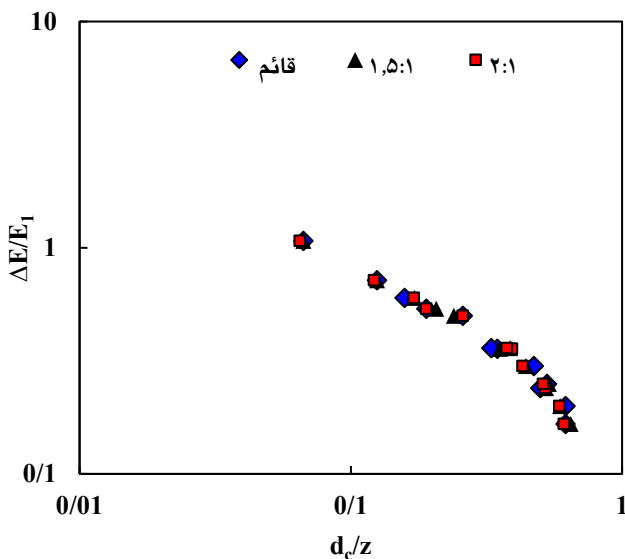
در این بخش، ابتدا پارامترهای موثر بر استهلاك انرژی جریان بررسی شده و سپس با استفاده از نتایج مدل عددی شامل عمق و سرعت جریان، مقادیر استهلاك انرژی نسبی برای مدل‌ها محاسبه گردید.

عمق نسبی اولیه و ثانویه جریان

با توجه به شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد دراپ، عمق نسبی اولیه جریان ($\frac{y_1}{z}$) افزایش می‌یابد؛ زیرا این افزایش ناشی از افزایش دبی جریان است که مستقیماً عمق اولیه جریان را افزایش می‌دهد. همچنین، مقایسه مقادیر مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی مطلوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات مقادیر عددی استهلاک نسبی انرژی به ازای عدد دراپ در شیب شکن های قائم و مایل (سه ارتفاع شیب شکن ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر به ازای دبی های مختلف).



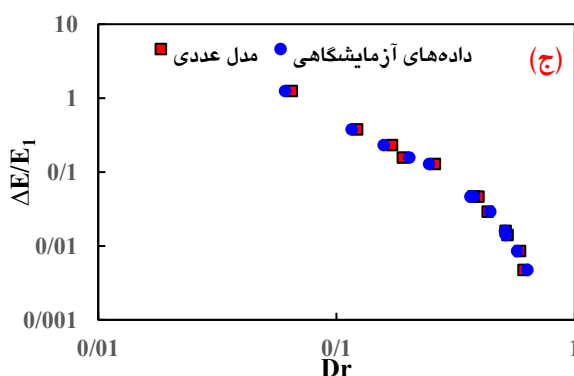
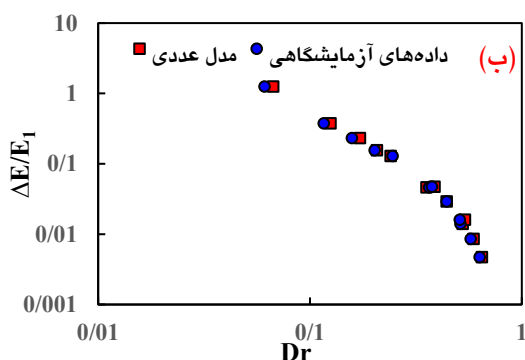
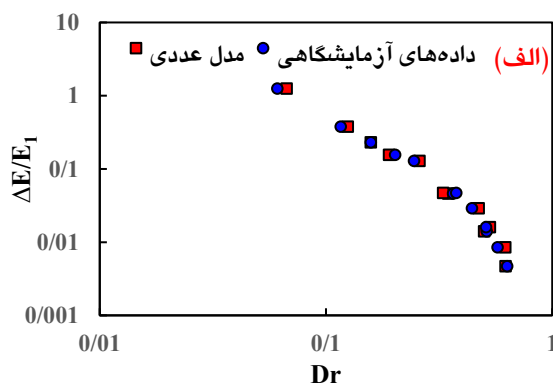
شکل ۶- تغییرات مقادیر عددی استهلاک نسبی انرژی به ازای d_c/z در شیب شکن های قائم و مایل (سه ارتفاع شیب شکن ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر به ازای دبی های مختلف).

ناشی از افزایش دبی جریان است که سرعت در پای شیب شکن را بالا می برد و در نتیجه پرش هیدرولیکی قوی تری با عمق ثانویه بزرگتر تشکیل می شود. خطای نسبی مقادیر عددی عمق ثانویه با داده های آزمایشگاهی در بازه صفر تا ۹/۵ درصد قرار دارد.

استهلاک نسبی انرژی

در شکل ۵، تغییرات مقابل استهلاک نسبی انرژی در مدل های عددی شیب شکن قائم و مایل به ازای دبی های مختلف نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عدد دراپ، افت انرژی در شیب شکن ها کاهش می یابد؛ زیرا افزایش دبی، پرش های با گردابه های ضعیف تر ایجاد می کند و جریان یکنواخت تر می شود. بنابراین، شیب شکن قائم افت انرژی بیشتری به همراه دارد و برای مواردی که حداکثر استهلاک انرژی مورد نیاز است، مناسب تر است. در مقابل، شیب شکن مایل برای دستیابی به جریان یکنواخت تر و افت انرژی کمتر، مانند کاهش فرسایش بستر و دیواره های کانال گزینه بهتری به شمار می رود.

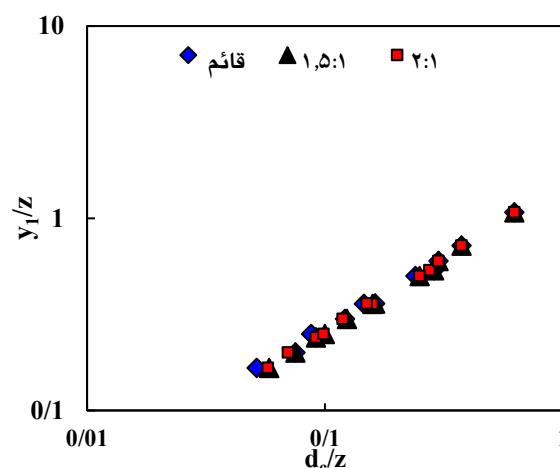
در شکل ۶ تغییرات استهلاک نسبی انرژی مدل عددی به ازای نسبت $\frac{d_c}{z}$ در شیب شکن های قائم و مایل برای دبی های مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در همه شیب شکن ها، با افزایش $\frac{d_c}{z}$ ، استهلاک نسبی انرژی کاهش می یابد؛ زیرا افزایش دبی جریان و عمق بحرانی، پرش های هیدرولیکی با گردابه های ضعیف تر ایجاد می کند و در نتیجه اتلاف انرژی کاهش می یابد. این روند کاهشی در همه مدل ها مشابه است. در شکل ۷، مقادیر $\frac{y_1}{z}$ به دست آمده از مدل عددی و داده های آزمایشگاهی به ازای $\frac{d_c}{z}$ مقایسه شده است. با افزایش دبی جریان و $\frac{d_c}{z}$ ، عمق نسبی اولیه جریان ($\frac{y_1}{z}$) افزایش می یابد. این امر منجر به کاهش عدد فرود اولیه جریان (Fr_1) و تشکیل پرش هیدرولیکی ضعیف تر می شود.



شکل ۸- مقایسه مقادیر استهلاك نسبی انرژی به دست آمده از مدل عددی و داده های آزمایشگاهی: (الف) شیب شکن قائم، (ب) شیب شکن مایل ۱/۵:۱ و (ج) شیب شکن مایل ۲:۱

۴- نتیجه گیری نهایی

مدل آشفتگی (RNG) $k-\varepsilon$ بهترین عملکرد را در شبیه سازی جریان های آشفته بر روی شیب شکن ها از خود نشان داد و توانست استهلاك انرژی و الگوی جریان را با دقت بالاتری پیش بینی کند. شبیه سازی های عددی حاکی از آن بود که الگوی بردارهای سرعت در شیب شکن های قائم و مایل، بسته به زاویه شیب، متفاوت



شکل ۷- مقایسه مقادیر y_1/z به دست آمده از مدل عددی به ازای d_c/z در شیب شکن های قائم و مایل (سه ارتفاع شیب شکن ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر به ازای دبی های مختلف).

در شکل ۸، تغییرات استهلاك نسبی انرژی ($\frac{\Delta E}{E_1}$) به دست آمده از مدل عددی و داده های آزمایشگاهی به ازای عدد دراپ برای تمامی مدل های شیب شکن قائم و مایل با سه ارتفاع پله ۰/۰۴، ۰/۰۸ و ۰/۱۲ متر و به ازای دبی های ۲/۱۸۴، ۱/۲، ۰/۹۴ و ۰/۷ متر لیتر بر ثانیه مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد دراپ، استهلاك نسبی انرژی کاهش می یابد. همچنین، مقادیر $\frac{\Delta E}{E_1}$ حاصل از مدل عددی با داده های آزمایشگاهی همخوانی مطلوبی دارند و خطای نسبی شبیه سازی در بازه صفر تا ۹/۸ درصد می باشد.

است. در شیب شکن های مایل، جریان آب بر سطح شیب دار موجب تشکیل گردابه های ضعیف تر در حوضچه آرامش می گردد؛ در نتیجه، استهلاك انرژی کاهش می یابد و بردارهای سرعت یکنواخت تر هستند. در مقابل، در شیب شکن قائم، برخورد عمودی جریان با بستر، گردابه ها و آشفتگی بیشتری ایجاد می کند و در نتیجه اتلاف انرژی افزایش می یابد.

بررسی ها نشان داد که کمترین استهلاك انرژی به شیب شکن مایل با نسبت ۱:۲ تعلق دارد، در حالی که، شیب شکن قائم بیشترین میزان استهلاك انرژی را به خود اختصاص داد؛ زیرا در شیب های ملایم، تغییرات سرعت و شدت آشفتگی کمتر است. با افزایش دبی جریان، استهلاك انرژی نسبی در تمامی مدل ها کاهش یافت، اما این کاهش در شیب شکن های مایل نسبت به قائم، محسوس تر بود. مقایسه استهلاك نسبی انرژی به دست آمده از مدل های عددی این تحقیق با داده های آزمایشگاهی، همخوانی مطلوبی را نشان داد و خطای شبیه سازی در بازه صفر تا ۹/۸ درصد قرار داشت. بنابراین، روش های عددی برای پیش بینی عمق جریان در شیب شکن ها قابل اعتماد هستند. مقایسه نتایج شبیه سازی عمق ثانویه با داده های آزمایشگاهی نیز خطای نسبی را در محدوده صفر تا ۹/۵ درصد برای تمام شیب شکن ها آشکار ساخت که بیانگر

دقت بالای شبیه سازی هاست.

این تحقیق به وضوح نشان داد که هندسه شیب شکن و زاویه شیب آن تأثیر مستقیمی بر الگوی جریان و استهلاك انرژی دارد. شبیه سازی های عددی با استفاده از نرم افزار FLUENT و مدل های آشفتگی مناسب، رفتار جریان را با دقت بالایی پیش بینی کردند و نتایجی ارائه دادند که در طراحی و بهینه سازی شیب شکن ها کاربرد دارد. یافته های این مطالعه، پایه ای استوار برای تحقیقات آتی و توسعه روش های نوین در مهندسی هیدرولیک و طراحی سازه های آبی فراهم می آورد. نوآوری پژوهش حاضر در تحلیل همزمان ۳۶ مدل عددی شیب شکن های قائم و مایل با بهره گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) و روش VOF، بررسی روندهای نسبی تغییرات جریان و اتلاف انرژی، و اعتبارسنجی دقیق با داده های آزمایشگاهی نهفته است. محدودیت های این کار شامل بررسی صرفاً شیب شکن های مستطیلی قائم و مایل، دامنه محدود دبی ها و ارتفاع ها، مدل سازی دوبعدی و فرض جریان غیرقابل تراکم بدون تبادل حرارتی است. بنابراین، تعمیم نتایج به شیب شکن های دیگر، دبی ها و ارتفاع های خارج از محدوده بررسی شده و شرایط واقعی سه بعدی باید با احتیاط صورت گیرد.

فهرست نمادها

ردیف	نماد	توضیحات	واحد
۱	$\frac{\Delta E}{E_1}$	استهلاك نسبی انرژی بین دو مقطع	-
۲	E_1	انرژی کل جریان در بالادست شیب شکن	m
۳	E_2	انرژی کل جریان در پایین دست شیب شکن	m
۴	y_1	عمق اولیه جریان قبل از پرش	m
۵	y_2	عمق ثانویه جریان بعد از پرش	m
۶	d_c	عمق بحرانی	m
۷	Q	دبی جریان	(lit/s)

$(m^3/s)/m$	دبی جریان واحد عرض	q	۸
m	عرض کف کانال	b	۹
m	ارتفاع پله شیب شکن	Z	۱۰
m/s	سرعت متوسط جریان	V	۱۱
m	عمق ورودی جریان	y	۱۲
-	عدد رینولدز	Re	۱۳
-	شدت تلاطم	I	۱۴

منابع

- 15(56), 209-223, doi.org/10.1001.1.24763594.1390.15.56.16.6 (In Persian).
- Nassiraei H, Heidarzadeh M and Shafieefar M, 2016. Numerical simulation of long waves (Tsunami) forces on caisson breakwaters. Sharif Journal of Civil Engineering, 32(2), 3-12, doi.org/10.1001.1.26764768.1395.322.32.2.5 (In Persian with English abstract).
- Rand W, 1965. Flow over a vertical sill in an open channel. Journal of the Hydraulics Division, 91, 40-408, doi.org/10.1061/jycej.0001297.
- Sadeghi SHR, Haji Golizadeh M Vafakhah M and Motee H, 2007. Role of Drops on Inundation Depth and Area Variations in a Stretch of the Kan River.. Iran-Water Resources Research. 3(1), 84-87 (In Persian with English abstract).
- Salmasi F and Abraham J, 2022. Energy loss at the base of a free straight drop spillway. Current Overview on Science and Technology Research. 6, 24-42, doi.org/10.9734/bpi/costr/v6/4047A.
- Sholichin M and Akib S, 2010. Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure. [International Journal of the Physical Sciences](https://doi.org/10.5897/IJPS.9000170). 5(11), 1678-1687, doi.org/10.5897/IJPS.9000170.
- Beirami MK, 2011. Water Conveyance Structures, Tenth Edition. Isfahan, Isfahan University of Technology Press, (In Persian).
- Chamani MR, Rajaratnam N and Beirami MK, 2008. Turbulent jet energy dissipation at vertical drops. Journal of Hydraulic Engineering, 134(10), 1532-1535, [doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.000032](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.000032).
- Champagne TP, Barkdoll BD and González-Castro J, 2017. Experimental study of scour induced by temporally oscillating hydraulic jump in a still basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 143(12), [p.04017051, doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001273).
- GolshahiFar M. 2008. Practical FLUENT, Third Edition, Sanei Shahmirzadi Publishing, Tehran, (In Persian).
- Habib AA, Abdel-Aal GM, Negm AM and Owais TM, 2003. Theoretical modeling of hydraulic jumps in radial stilling basins ended with sills. 7th International Water Technology. Conference, 1-3 April, Egypt, 619-631.
- Lotfollahi-Yaghin MA and Nassiraei H, 2016. Numerical simulation of tsunami waves forces on coastal structures. Journal of Oceanography, 6(24), 23-30, doi.org/10.1001.1.15621057.1394.6.24.6.6.
- Mansouri R and Ziaei A, 2011. Two-dimensional numerical simulation of flow pattern in vertical stepped spillways considering boundary conditions and different meshing. 6th National Congress of Civil Engineering, 6-7 June, Semnan University, Semnan, Iran. (In Persian with English abstract).
- Mansouri R and Ziaei A, 2012. Numerical modeling of flow pattern and investigation of hydraulic parameters in vertical stepped spillways with reverse slope at the stilling basin. 9th International Congress of Civil Engineering, 19-21 April, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract).
- Moradi Sabzkoohi A, Kashfipour SM and Bina M, 2011. Experimental comparison of energy dissipation on Structures. Journal of Water and Soil Science,