

## Research Article

# Comparison of Hydraulic Behavior of Flow Over Stepped Spillway and Chute Spillway

N. Mirzadeh<sup>1</sup>, M. Manafpour<sup>2\*</sup>

Received: November 8, 2021  
Accepted February 22, 2022

Received in Revised: February 8, 2022  
Published online: September 23, 2023

1-M.Sc., Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Urmia University, Iran.

2-Assist. Prof. of Civil Engineering, Hydraulic Structures, Urmia University, Iran

\*Corresponding Author, E-mail: m.manafpour@urmia.ac.ir

## Extended Abstract

### Background and Objectives

Stepped spillways are convenient and economical options for high dams compared to other types of spillways because of their special abilities such as construction procedure compatibility with the Roller Compacted Concrete Dams (RCC Dam) technology and the ability of self-aeration of flow and reduction the stilling basin dimensions at the downstream dam toe due to significant energy dissipation. Depending on the discharge rate, step height and slope, three flow regimes can be identified on stepped spillways: nappe, transition, and skimming flow. Nappe flow occurs for relatively low discharge rates and lower slopes. Transition flow with a range of intermediate flow rates has a chaotic flow motion with intense splashing. Skimming flow occurs for relatively higher discharge rates and steeper slopes, is characterized by a flow over the pseudo-bottom formed by small vortices between steps. On a stepped spillway, the steps act as macro roughness elements, contributing to enhanced energy dissipation and significant aeration. In a skimming flow, the upstream flow motion is nonaerated, and the free surface appears smooth and glossy up to the inception point of free-surface aeration. In this developing flow region, a turbulent boundary layer grows until the outer edge of the boundary layer interacts with the free surface and air entrainment takes place. In recent decades, much research has been done on various flow regimes over the stepped spillway, the way they dissipate energy and the impact of the geometry of the steps on flow structure. In this research, hydraulic performance of skimming flow over Zhavesh stepped spillway has been studied and qualitative and quantitative comparison of flow between stepped and chute spillways has been presented.

### Methodology

A 2D numerical models of spillway has prepared using FLUENT 6.3.26 software, k-e RNG turbulence model and Mixture multiphase flow method to simulate and calculate the hydraulic characteristics of the energy dissipation of spillways. The softwares to create the spillways geometry and mesh were SOLIDWORKS and GAMBIT respectively. The meshes in the tank section were quadrilateral and due to irregular geometry and the presence of stairs, meshes in the spillway and chute section were tri / pave. The boundary conditions were velocity inlet for inlet flow, free pressure inlet for free surface flow, outlet pressure for outflow and wall for floor and stairs. The numerical model has been calibrated applying experimental data extracted from the physical model of the Zhavesh spillway. It is stepped spillway with a height of 85 m and located on the Zaveh river at the junction of the Gavrood and Gheshlagh rivers at 35 km south of Sanandaj city. The spillway with a crest length of 55 m and a side slope of 1.2V:1H (50.19 degrees) located on the body of the Zhavesh dam.



**Findings**

The results indicated in addition to agreement between laboratory and numerical data, having steps alongside the chute spillway can reduce significantly the length of the boundary layer which is developed from the spillway crest and encountered with the flow surface from where the flow air entrainment is initiated. So the inception point related to air entrainment is located further upstream. Analysing the flow pattern indicated that due to aeration after the inception point, the flow depth and velocity in stepped spillway increases and decreases respectively compared to a chute spillway. Flow aeration causes the cavitation index to become much higher than the critical value (0.2) in the entire stepped spillway thus the risk of cavitation occurrence and the relevant damages are reduced considerably. While it was observed that the possibility of cavitation occurrence was high on the chute spillway (without steps) starting from 56 m downstream of the spillway crest. As a result, cavitation erosion was more likely expected on the chute spillway surface. Also for design discharge, the flow energy was effectively dissipated alongside the stepped spillway in comparison to chute spillway with a discrepancy of 46%.

**Conclusion**

The application of the stepped spillway would be more appropriate and economical than the chute spillway due to the various advantages mentioned above and also there is no risk of cavitation on the Zaveh stepped spillway, while in the end of the chute spillway Corresponding to it, we may encounter cavitation erosion.

**Keywords:** Chute spillway, FLUENT software, Hydraulic characteristics, Numerical modelling, Stepped spillway, Turbulence model.

## مقاله پژوهشی

# مطالعه مقایسه‌ای رفتار هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریز شوت پله‌ای و بدون پله

ناهید میری‌زاده<sup>۱</sup>، محمد مناف‌پور<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

تاریخ دریافت ویرایش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

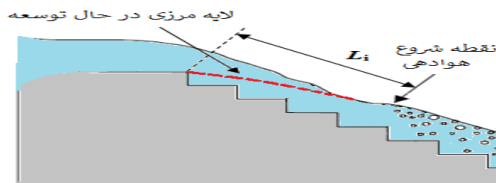
۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه ارومیه  
۲- استادیار گروه مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه ارومیه  
\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی [m.manafpour@urmia.ac.ir](mailto:m.manafpour@urmia.ac.ir)

## چکیده

سرریزهای پله‌ای در مقایسه با انواع دیگر سرریزها با داشتن قابلیت‌هایی همچون استهلاک قابل‌ملاحظه انرژی، تطبیق سازه‌ای آن‌ها با تکنولوژی سدهای بتن کوبیده غلتکی و هوادهی خود به خودی جریان، گزینه مناسب و اقتصادی برای سدهای بلند محسوب می‌شوند. در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی رژیم‌های مختلف جریان عبوری، نحوه استهلاک انرژی و تأثیر شکل هندسی پله‌ها روی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای پله‌ای به انجام رسیده است. در این تحقیق به بررسی عددی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در رژیم غیر ریزشی سرریز پله‌ای مورد نظر و مقایسه کمی و کیفی آن‌ها با جریان روی شوت بدون پله متناظر با شوت پله‌ای این تحقیق پرداخته شده است. با تهیه مدل‌های عددی از سرریز به کمک نرم‌افزار FLUENT و به‌کارگیری مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  و روش چندفازی MIXTURE به تحلیل هیدرولیکی جریان اقدام نموده و به‌منظور صحت سنجی عملکرد مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی مدل فیزیکی سرریز سد ژاوه استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که به دلیل وجود پله‌ها در طول شوت سرریز، با کاهش قابل‌ملاحظه طول لایه مرزی و امکان ورود هرچه زودتر هوا از سطح آزاد جریان سرریز و بالا بودن اندیس کاویتاسیون در کل طول سرریز از حد بحرانی، ریسک وقوع کاویتاسیون و در نتیجه تخریب ناشی از آن در سرریز پله‌ای مورد مطالعه مطرح نمی‌باشد در مقابل در سرریز شوت بدون پله احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون و خوردگی سطح سرریز ناشی از آن در محدوده ۵۶ متری از تاج سرریز به طرف پایین‌دست بسیار بالاست. همچنین به ازای دبی طراحی سرریز، اختلاف استهلاک انرژی بر روی سرریز پله‌ای و شوت بدون پله ۴۶٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز پله‌ای، سرریز شوت، مدل توربولانسی، مدل‌سازی عددی، مشخصات هیدرولیکی، نرم‌افزار FLUENT

جریان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل ۱ نمایش شماتیک توسعه لایه مرزی بر روی سرریز پله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نحوه توسعه لایه مرزی از تاج سرریز تا سطح آزاد آب.

روابط ارائه شده برای محاسبه نقطه شروع هوادهی طبق نظر چانسون (۱۹۹۵) برای سرریز پله‌ای عبارت است از:

$$\frac{L_i}{h \cos \alpha} = 9.719 (\sin \alpha)^{0.0796} F_*^{0.713} \quad [1]$$

$$F_* = \frac{q_w}{\sqrt{g \sin \alpha (h \cos \alpha)^3}} \quad [2]$$

مجموعه روابط بالا در سیستم SI بوده، که در آن  $L_i$  فاصله از تاج سرریز تا نقطه شروع هوادهی،  $\alpha$  زاویه شیب سرریز،  $F_*$  فرود معادل زبری،  $q_w$  دبی در واحد عرض سرریز،  $g$  شتاب گرانشی و  $h$  ارتفاع پله است. برای سرریز بدون پله نیز این رابطه با جایگذاری ارتفاع زبری بتن یا  $k_s$  به جای رابطه  $h \cos \alpha$  به کار می‌رود.

برای شناخت هیدرولیک جریان روی سرریزهای پلکانی، تحقیقات زیادی با استفاده از مدل‌های فیزیکی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات کریستودولو (۱۹۹۳) و چانسون (۱۹۹۴) اشاره نمود. به موازات این تحقیقات و به دلیل هزینه بالای کارهای آزمایشگاهی و محدودیت‌های کاربردی آن‌ها مطالعات به سمت استفاده از مدل‌های ریاضی و عددی سوق داده شده است. در زمینه مطالعات عددی می‌توان به تحقیقات چن و همکاران (۲۰۰۲)، تابارا و همکاران (۲۰۰۵)، نادری راد (۲۰۰۷)، میناتور و همکاران (۲۰۱۱)، لویز (۲۰۱۷) و کائوچی (۲۰۲۱) اشاره کرد.

اسری (۱۹۷۱) و سورنسن (۱۹۸۵) رفتار جریان

روی سرریزهای پله‌ای را توسط مدل‌های فیزیکی برای

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها طی سال‌های اخیر در زمینه تکنولوژی ساخت سدها استفاده از بتن غلطکی کوبیده می‌باشد، روشی که باعث شد سدهای بتنی، بسیار کم‌هزینه‌تر و با سرعت بالایی اجرا گردد. سدهای بتنی غلطکی کوبیده (RCC) به دلیل ارتفاع بیشتری که نسبت به سدهای خاکی می‌توانند داشته باشند نیازمند سرریزها و سیستم‌های استهلاک انرژی کارآمدتری هستند. سازگاری ساخت سرریزهای پله‌ای با سدهای بتن غلطکی، استهلاک بیشتر انرژی به دلیل وجود پله‌ها در این نوع سرریزها و

مزایای دیگر باعث شده که سرریز پله‌ای مورد توجه محققین و مهندسين صنعت سدسازی قرار گیرد.

به دلیل آشفتگی شدید جریان، ورود هوا به داخل جریان و تشکیل جریان دوفازی آب و هوا با رژیم‌های مختلف، هیدرولیک حاکم بر جریان این سرریزها بسیار پیچیده بوده و با وجود تحقیقات متعدد در این زمینه، همچنان نیاز به بررسی و درک صحیح پدیده‌های هیدرولیکی در سرریزهای پله‌ای احساس می‌شود.

با توجه به اینکه در مجاری جریان، حرکت سیال واقعی به شدت متأثر از حضور مرز جامد می‌باشد به طوری که ذراتی از سیال که در تماس با مرز جامد هستند ساکن باقی می‌مانند، بنابراین در مجاورت مرز جامد ناحیه‌ای به وجود می‌آید که در آن گرادیان سرعت بزرگ می‌باشد و این ناحیه لایه مرزی نامیده می‌شود. عامل رشد لایه مرزی زبری بستر سرریز است و در سرریزهای پله‌ای مقدار زبری به علت وجود پله‌ها نسبت به سرریزهای ساده بیشتر می‌باشد. طبق نظریه‌های موجود در سرریزها محل برخورد لایه مرزی به سطح آزاد آب نقطه شروع هوادهی خودبه‌خودی می‌باشد و وجود حباب‌های هوا در جریان‌های سریع ریسک تخریب ناشی از وقوع پدیده کاویتاسیون را کاهش می‌دهد یا از بین می‌برد؛ بنابراین اطلاع از نحوه توسعه لایه مرزی و موقعیت آغاز هوادهی از سطح آزاد

محدوده وسیعی از هندسه پله و شرایط جریان بررسی کردند. اثرات دبی، شیب سرریز، اندازه پله و شیب پله روی نوع جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مشخص شد که جریان روی سرریزهای پله‌ای به دو نوع غیرریزشی و ریزشی تقسیم می‌شود. نتیجه مطالعه نشان داد که جریان غیرریزشی زمانی که نسبت عمق بحرانی جریان بر ارتفاع پله از مقدار  $0/8$  بیشتر می‌شود، شروع می‌گردد.

راجارتنام (۱۹۹۰) بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌های اسری و هورنر (۱۹۷۱) و در محدوده شیب‌های پله  $0.4-0.9$  که در آن  $l$  طول افقی پله و  $h$  ارتفاع پله است، به ارائه معیاری برای توصیف شروع رژیم غیرریزشی پرداخت. شرط شروع رژیم جریان غیرریزشی را  $d_c/h > 0.8$  ذکر نمود که در آن  $d_c$  عمق بحرانی جریان و  $h$  ارتفاع پله می‌باشد.

فلدر و چانسون (۲۰۱۲) به مطالعه فیزیکی سه شکل مختلف سرریز پله‌ای شامل سرریز پله‌ای ساده، استخری و سرریز پله‌ای با تناوب پله‌های استخری و ساده در مدلی با شیب طولی  $8/9$  درجه و ارتفاع پله  $0/05$  متر پرداختند. مقایسه مشخصه‌های هیدرولیکی جریان آب- هوا در این سه هندسه برخی تفاوت‌ها را در رفتار جریان نشان می‌داد. توزیع دانسیته حباب‌های هوا روی سرریز پله‌ای استخری و سرریز پله‌ای ساده تقریباً با هم مطابقت داشته در حالی که سرریز پله‌ای با ترکیب پله‌های استخری و ساده، هوادهی قوی‌تری را برای نرخ دبی مشابه به همراه داشت. بیشترین مقدار اتلاف انرژی مربوط به سرریز پله‌ای با تناوب پله‌های استخری و ساده بوده اما این هندسه به دلیل بروز ناپایداری‌های شدید جریان در آن به عنوان طرحی بهیته توصیه نشده است.

میری‌زاده و مناف‌پور (۲۰۱۶) به شبیه‌سازی عددی جریان دوفازی عبوری از سرریز پلکانی سد ژاوه با استفاده از مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  RNG و روش چندفازی MIXTURE اقدام نموده و به بررسی مشخصات

هیدرولیکی جریان بر روی سرریز پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از تطابق خوب بین نتایج مدل عددی با مقادیر نظیر مدل فیزیکی و دقت بالای شبیه‌سازی می‌باشد. نمودارهای سرعت جریان نشان‌دهنده افزایش مقدار سرعت با افزایش دبی جریان و تمایل مقدار سرعت به یک سرعت ثابت در ناحیه جریان یکنواخت می‌باشد. با بررسی تغییرات فشار استاتیکی در کف و دیواره قائم پله‌ها موقعیت بروز فشارهای منفی بر روی سرریز که احتمال وقوع کاویتاسیون در آن‌ها می‌رود مشخص گردید.

رئییسی و همکاران (۲۰۱۵) به کمک روش عددی اثر زاویه همگرایی دیواره های سرریز شوت را بر خصوصیات جریان توسط نرم افزار Flow-3D بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه همگرایی دیواره، مقادیر عمق و سرعت در امتداد شوت افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی شاخص کاویتاسیون مشخص شد که با افزایش زاویه همگرایی، شاخص کاویتاسیون افزایش یافته و بیشترین خطر کاویتاسیون برای مدل با حداقل همگرایی است.

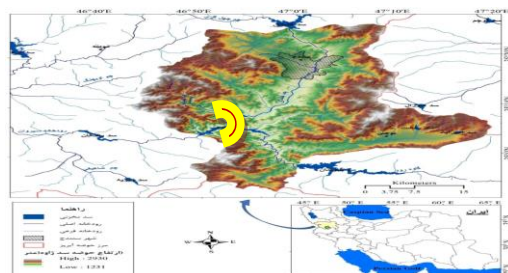
ژانگ و چانسون (۲۰۱۸) اثرات شکلهای کاویتی و لبه پله را توسط مطالعات آزمایشگاهی روی اتلاف انرژی و هوادهی جریان غیر ریزشی در سرریزهای پله ای بررسی کردند. با توجه به کاهش قابل توجه فاکتور اصطکاک در لبه های پخ زده پله نسبت به لبه های تیز و کاهش مقاومت جریان مشخص شد که لبه های تیز نسبت به لبه‌های پخ‌زده پله‌ها عملکرد بهتری در هوادهی جریان و اتلاف انرژی و نقطه شروع هوادهی داشته به طوری که در پله‌هایی با لبه پخ زده نقطه شروع هوادهی به سمت پایین دست کشیده می‌شود. همچنین انسداد جزئی کاویتی پله‌ها در کنج پله که همراه با افزایش بی ثباتی و آشفتگی بر روی سرریز و کاهش حفاظت دو طرفه بین پله‌های مجاور می‌باشد مقاومت جریان را بهبود بخشیده و منجر به شروع هوادهی زودتر از سطح آزاد شود.

کاویتاسیون و استهلاک انرژی و نحوه توسعه لایه مرزی با مقادیر نظیر در سرریز بدون پله پرداخته شده است.

### مواد و روش ها

#### شرایط مرزی

در این تحقیق از سرریز پلکانی سد ژاوه به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. این سد از نوع بتنی غلطکی (RCC) با ارتفاع ۸۵ متر در ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان سنندج بر روی رودخانه ژاوه در محل تلاقی رودخانه گاو رود و قشلاق واقع است. سرریز با طول تاج ۵۵ متر و شیب شوت  $1H:2.7V$  (۱۹/۵۰ درجه) روی بدنه سد جانمایی گردیده است. در این تحقیق مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی شامل، عمق متوسط جریان، سرعت و فشار متوسط در کف به ازای چهار دبی مختلف ۴۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰ و ۹۷۰ مترمکعب بر ثانیه (از دبی پایین تا دبی طرح) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل عددی با مقادیر نظیر مدل فیزیکی سرریز مقایسه گردید. قابل ذکر است که اندازه گیری عمق جریان توسط خطکش های روی مدل فیزیکی در ده مقطع عرضی و به صورت عمود بر کف پله، سرعت متوسط در آزمایشگاه توسط لوله پیتوت در  $1/6$  عمق از سطح آزاد آب و اندازه گیری فشار توسط پیزومترهای نصب شده در کف پله انجام شده است. شکل ۲ مقطع طولی سرریز و شکل هندسی پله ها، شکل ۳ موقعیت سد ژاوه در ایران و جدول ۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز سد ژاوه را نشان می دهد.

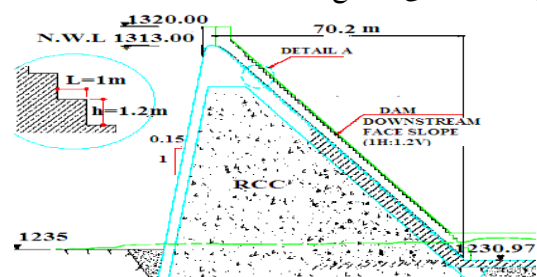


شکل ۳- موقعیت سد ژاوه در ایران.

وویی و همکاران (۲۰۱۹) اثر ارتفاع و هندسه پله سرریز پله ای را روی موقعیت نقطه ورود هوا توسط مدل عددی و با استفاده از روش VOF و K-e Relizable بررسی کردند. در این مطالعه با به کار بردن اشکال صاف، استخری و گرد لبه پله ها نتیجه گرفتند که هوادهی جریان از سطح آزاد نسبت به تاج سرریز به ترتیب در شکل گرد پله، نزدیکتر از استخری و در استخری نزدیکتر از لبه صاف است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دبی، کاهش ارتفاع پله و در پی آن افزایش تعداد پله ها، موقعیت نقطه ورود هوا به سمت پایین دست حرکت کرده و بنابراین طول ناحیه بدون هوا روی سرریز افزایش می یابد.

سلماسی و همکاران (۲۰۲۲) اثر شیب روی نرخ اتلاف انرژی در سرریزهای پله ای را به کمک مطالعات آزمایشگاهی و با ساخت نه مدل فیزیکی بررسی کردند. در این مطالعه با ساخت مدل هایی با شیب های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ و تعداد پله های متغیر مشخص شد که دو فاکتور بی بعد خیلی مهم روی اتلاف انرژی، عدد فرود و کمیت  $q^2/gH^3_{dam}$  بوده که در آن  $q$  دبی در واحد عرض شوت،  $g$  شتاب گرانش و  $H_{dam}$  ارتفاع سرریز می باشد. همچنین مشخص شد که شیب سرریز و تعداد پله اثر کمتری روی نرخ اتلاف انرژی داشته با این حال برای یک دبی ثابت روی سرریز، با افزایش شیب و تعداد پله اتلاف انرژی افزایش خواهد یافت.

در این تحقیق مدل عددی از سرریز پله ای سد ژاوه در ابعاد واقعی تهیه گردیده و به مقایسه مشخصه های هیدرولیکی جریان بر روی آن از جمله عمق جریان، پروفیل طولی سطح آزاد جریان، سرعت جریان، اندیس



شکل ۲- مقطع طولی سرریز پلکانی ژاوه.

### جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز پلکانی ژاوه.

نوع سرریز	اوجی آزاد با تنداب پلکانی
تعداد پله	۶۴
عرض تنداب پلکانی	۵۰ (m)
دبی طراحی سرریز سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله	۹۷۰ (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )

مدل سازی عددی ۲-D سرریز پلکانی سد ژاوه که شامل مخزن به طول ۲۵۰ متر، سرریز اوجی و قسمت تنداب می باشد توسط نرم افزار FLUENT 6.3.26 و در ابعاد واقعی سرریز انجام شده است. برای ایجاد هندسه سرریز از نرم افزار SOLIDWORKS و برای مش بندی سرریز از نرم افزار GAMBIT استفاده شده است. پس از سعی و خطای بسیار تعداد بهینه مش ۶۴۴۲۹۷۵ بدست آمد که کمترین زمان محاسباتی داشته و در عین حال با افزایش بیشتر از این مقدار، تغییر چندانی در پارامترهای صحت سنجی عمق و سرعت نداشت. مش های به کاررفته در قسمت مخزن از نوع ساختاریافته مربعی بوده و در قسمت سرریز و تنداب به دلیل هندسه نامنظم و وجود پله ها از مش نوع tri/pave استفاده شده است. این مش نوعی مش مثلثی بی سازمان می باشد که با کمک الگوریتم pave المان های مثلثی را با گره های مرزی ایجاد کرده و در ادامه لایه های مثلثی را به صورت تکراری در امتداد مرز دامنه اضافه می کند و با پیشرفت مش بندی این لایه ها در نهایت کل دامنه را پر می کند (رنز ۱۹۹۸). هندسه مدل سرریز، شرایط مرزی به کار رفته در مدل عددی و همچنین نحوه مش بندی در شکل های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. شرایط مرزی در بالادست مخزن برای ورود جریان آب و هوا به صورت ورودی سرعت<sup>۱</sup>، سطح آزاد مخزن و تنداب که با اتمسفر در ارتباط است ورودی فشار<sup>۲</sup>، در پایین دست سرریز برای خروجی جریان<sup>۳</sup> و برای قسمت های کف مخزن، پله ها و دیواره سرریز شرط

مرزی دیوار<sup>۴</sup> به کاررفته است. قابل ذکر است که از طریق حذف پله ها و حفظ شیب طولی سرریز، طول و بقیه مشخصات سرریز پله ای، هندسه سرریز بدون پله در مدل عددی ایجاد شده و برای سرریز بدون پله شرایط مرزی و داده های ورودی مشابه سرریز پله ای انتخاب شده تا مقایسه نتایج بین دو سرریز به طور مناسب صورت پذیرد، همچنین برای سرریز بدون پله نیاز از مدل توربولانسی  $k-\epsilon$  RNG استفاده شد که طبق مطالعه ورجاوند و همکاران (۲۰۱۰) در شبیه سازی پروفیل سطح آب مناسب تر بوده و در جریان های دارای مناطق برشی قوی (روی دیواره شوت) نتایج دقیق تری داشته است (بی نام ۲۰۱۲).

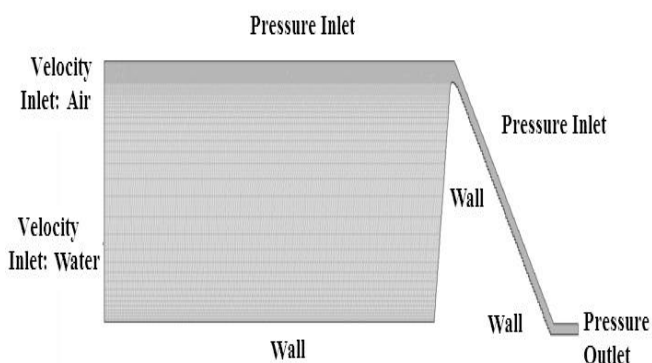
برای ارزیابی پتانسیل آسیب کاویتاسیون که موجب خسارات بسیار شدید بر سازه سرریز می شود از شاخص کاویتاسیون استفاده شده که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad [۳]$$

که در آن  $\sigma$  شاخص کاویتاسیون،  $P$  فشار سیال

در نقطه مورد نظر،  $P_v$  فشار بخار آب معادل ۲۴۵۰

پاسکال،  $V$  سرعت متوسط سیال،  $\rho$  چگالی آب است.



شکل ۴- هندسه مدل سرریز و شرایط مرزی به کار رفته در مدل سازی عددی.

<sup>2</sup> Pressure inlet

<sup>3</sup> Pressure outlet

<sup>4</sup> Wall

<sup>1</sup> Velocity inlet

در شکل مشخص شده در پایین دست سرریز تبدیل می‌شود که دارای عمق ثابت  $Y=1/13$  m به ترتیب در دبی‌های ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. با توجه به تفاوت اندک بین داده‌های عددی و آزمایشگاهی به دست آمده که در شکل ۸ توسط پارامتر آماری خطای نسبی رابطه ۴ نشان داده شده است و همچنین مقادیر ضریب تعیین  $R^2$  که از طریق رابطه ۵ محاسبه شده، می‌توان نتیجه گرفت که تطابق قابل قبولی بین داده‌ها وجود دارد. علت بالا نبودن مقدار ضریب تعیین را می‌توان به خطای نقطه دوم اندازه‌گیری نسبت داد که در مقایسه با نقاط دیگر اندکی بیشتر می‌باشد.

$$E = \frac{Exp - Num}{Exp} * 100$$

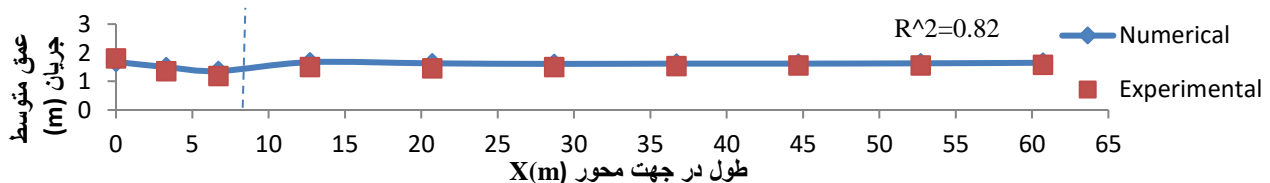
[۴]

که در آن Exp مقدار پارامتر آزمایشگاهی و Num مقدار پارامتر عددی بدست آمده می‌باشد.

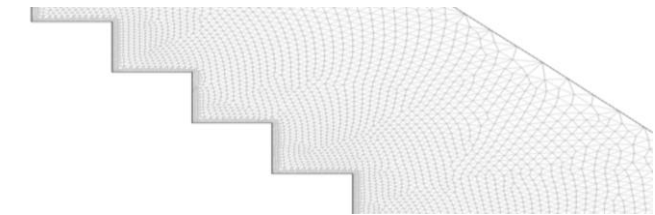
$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2$$

[۵]

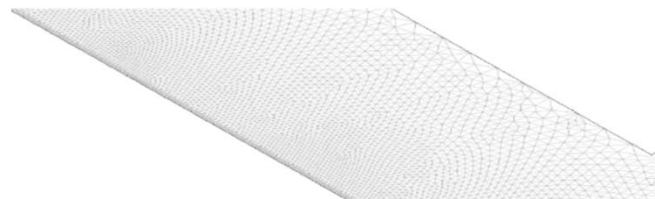
که در آن  $x$  متغیر در جهت افقی،  $x$  میانگین متغیر در جهت افقی،  $y$  متغیر در جهت عمودی،  $y$  میانگین متغیر در جهت عمودی نقطه شروع هوادهی بدست آمده از مدل عددی بر اساس فاصله افقی از تاج سرریز برای دبی  $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  در ۸ متری اتفاق می‌افتاد که در شکل ۶ با خط چین نشان داده شده است.



شکل ۷- عمق متوسط جریان در مقاطع مختلف در طول سرریز پله‌ای ( $Q=400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).



شکل ۵- نحوه مش بندی در قسمت تنداب برای سرریز پله‌ای.



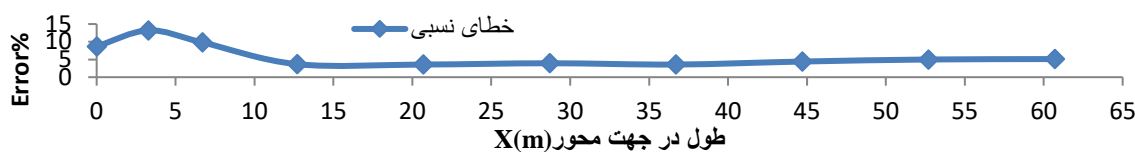
شکل ۶- نحوه مش بندی در قسمت تنداب برای سرریز بدون پله.

#### صحت سنجی

برای صحت سنجی عملکرد مدل عددی که براساس پارامترهای عمق و سرعت جریان و در دو دبی مختلف ۴۰۰ و ۹۷۰ مترمکعب بر ثانیه انجام شده است از داده‌های آزمایشگاهی مدل فیزیکی سرریز سد زاویه استفاده شد. پروفیل‌های طولی عمق، سرعت متوسط جریان، برای مقادیر آزمایشگاهی و عددی در دبی ۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه جهت صحت سنجی در شکل ۶ نشان داده شده است.

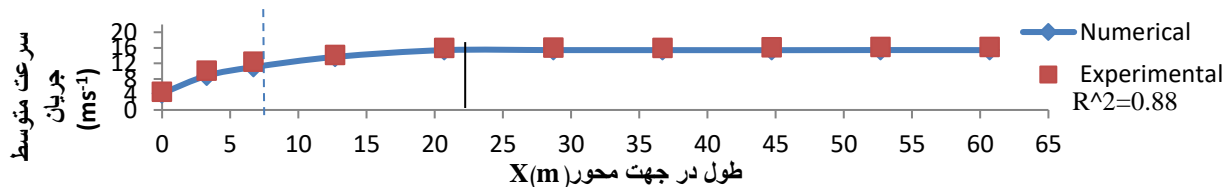
بعد از عبور جریان از روی تاج سرریز، جریان فوق بحرانی تشکیل شده و در دبی ثابت جریان، رفته‌رفته سرعت افزایش پیدا می‌کند، در مقابل عمق جریان تا نقطه شروع هوادهی (نقطه  $X=8$  m در شکل ۶) که با خط چین در شکل مشخص شده روند کاهشی داشته و بعد از این نقطه به دلیل ورود هوا از سطح آزاد به جریان آب و افزایش حجم سیال عمق جریان افزایش می‌یابد و نهایتاً به جریان یکنواخت (هوادهی توسعه یافته) که با خط ممتد





شکل ۸- مقایسه درصد خطای پروفیل سطح آب در مدل عددی و آزمایشگاهی سرریز پله ای (  $Q=400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ).

شدت افزایش سرعت کاسته شده و در ناحیه یکنواخت مقدار سرعت تثبیت می‌شود. ناحیه مابین خطوط خط چین و ممتد نشان داده شده در شکل ۹ ناحیه در حال توسعه به لحاظ هوادهی جریان می‌باشد که فاصله بین نقطه شروع هوادهی تا محلی است که جریان یکنواخت شده و عمق و سرعت جریان تغییرات نامحسوسی دارند.



شکل ۹- سرعت متوسط جریان در مقاطع مختلف در طول سرریز پله ای (  $Q=400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ).

های سرعت جریان در مقاطع مختلف در امتداد سرریز برای دبی  $970 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  استفاده شد و با توجه به تعریف لایه مرزی که پروفیل سرعت در داخل لایه مرزی تغییر کرده و در خارج لایه مرزی مقدار یکنواخت و منطبق بر سرعت خارجی لایه را دارا می‌باشد، مکان هایی روی پروفیل‌ها که در آن سرعت ثابت شد، به همدیگر متصل شده و رشد لایه مرزی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است با توجه به زبری قابل توجه ناشی از وجود پله‌ها در سرریز پله‌ای، رشد لایه مرزی در آن سریع‌تر صورت پذیرفته و زودتر به سطح آزاد جریان می‌رسد؛ در نتیجه موقعیت شروع هوادهی در این نوع سرریزها نسبت به سرریزهای شوت بدون پله به تاج سرریز نزدیک‌تر می‌باشد.

محل دقیق نقطه شروع هوادهی با توجه به محل برخورد لایه مرزی در حال رشد با پروفیل سطح آزاد آب و افزایش طیف رنگی و متمایل شدن آن به سمت طیف رنگی مربوط به کسر حجمی هوا در مدل عددی می‌باشد. افزایش ناگهانی عمق به علت نفوذ هوا به داخل

در شکل ۹ مقادیر سرعت متوسط جریان در مقاطع مختلف از سرریز که در جهت عمود بر کف مجازی محاسبه شده با مقادیر نظیر آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. جریان پس از عبور از تاج سرریز به دلیل قرار گرفتن در شرایط جریان فوق بحرانی با افزایش سرعت و در نتیجه کاهش عمق روبرو می‌شود، پس از ورود هوا به جریان و در نتیجه افزایش عمق سیال از

بین مقادیر سرعت در مدل عددی و مقادیر نظیر آزمایشگاهی انطباق خوبی وجود داشته و مقدار اختلاف به دست آمده کمتر از ۱۰٪ می‌باشد بررسی ارتباط بین تغییرات عمق و سرعت به ترتیب نشان داده شده در شکل‌های ۷ و ۹ گویای آن است که از نقطه  $X=0$  تا خط چین جریان تک فازی متغیر سریع می‌باشد که در این ناحیه با کاهش عمق، سرعت جریان افزایش می‌یابد. در ناحیه بین خط چین تا خط ممتد جریان در حال توسعه دوفازی آب و هوا بوده که به علت ورود هوا و افزایش عمق، از شدت افزایش سرعت کاسته شده است و ناحیه پس از خط ممتد به نام جریان توسعه یافته دوفازی آب و هوا (جریان یکنواخت) محسوب می‌شود که در آن عمق و سرعت جریان تثبیت می‌شوند.

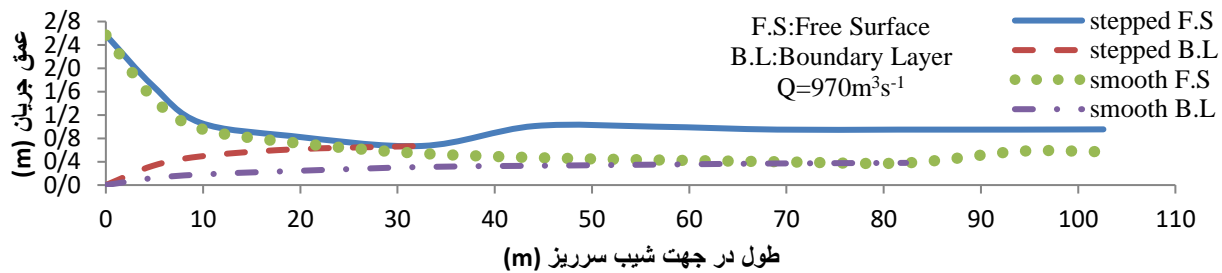
## نتایج و بحث

### نحوه توسعه لایه مرزی و نقطه شروع هوادهی

تغییرات عمق لایه مرزی و پروفیل سطح آزاد آب در روی سرریز پله‌ای و شوت بدون پله زاویه در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. برای تعیین لایه مرزی از پروفیل

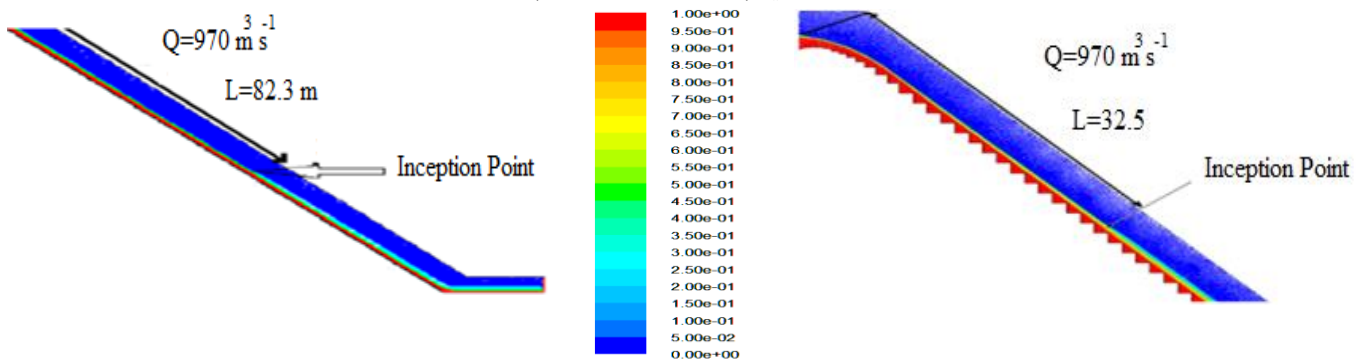
قرار دارد. جریان عبوری از سرریز شوت پله‌ای و بدون پله و موقعیت نقطه شروع هوادهی حاصل از مدل عددی به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است که بر اساس طیف رنگی، مقدار کسر حجمی آب در جریان دوفازی مشخص شده است.

آب نیز در این نقطه اتفاق می‌افتد و در نمودار شکل ۷ با اندکی خطا نشان داده شده است. با توجه موارد ذکر شده، در سرریز شوت بدون پله، محل شروع هوادهی از سطح آزاد جریان در نقطه‌ای به فاصله ۸۲.۳ متر از تاج سرریز در امتداد جریان بوده، در حالی که محل شروع هوادهی در سرریز پله‌ای در فاصله ۳۲.۵ متری از تاج



شکل ۱۰- تغییرات عمق لایه مرزی و پروفیل سطح آزاد آب در امتداد طولی.

#### سرریز پله‌ای و شوت بدون پله.



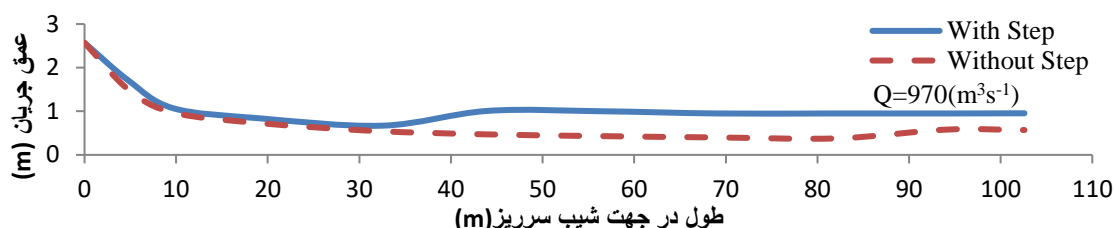
شکل ۱۲- جریان عبوری از روی سرریز بدون پله و موقعیت نقطه شروع هوادهی.

شکل ۱۱- جریان عبوری از روی سرریز پله‌ای و موقعیت نقطه شروع هوادهی.

افزایش حجم سیال عمق جریان در سرریز پله‌ای افزایش می‌یابد و لازم است ارتفاع دیواره‌های جانبی سرریز پله‌ای متناسب با آن افزایش یابد. نقطه شروع هوادهی در سرریز بدون پله در انتهای شوت ( $L=82/3$  m) بوده و بنابراین جریان توسعه یافته دوفازی (یکنواخت) به طور کامل در این سرریز شکل نمی‌گیرد.

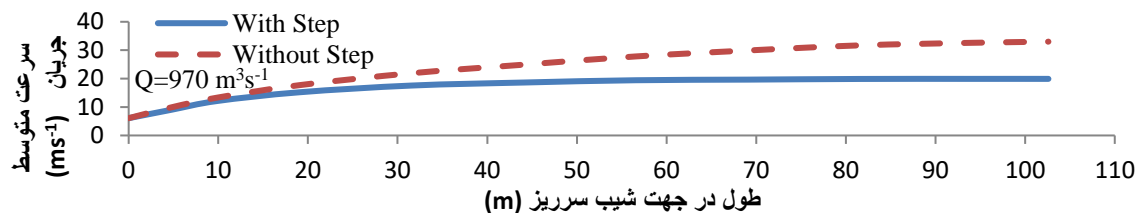
#### عمق و سرعت متوسط جریان

شکل ۱۳ پروفیل طولی عمق متوسط جریان در دو سرریز پله‌ای و شوت بدون پله را نشان می‌دهد. تا نقطه شروع هوادهی سرریز پله‌ای ( $L=32/5$  m) تفاوت اندکی بین عمق جریان در دو سرریز مشاهده می‌شود که ناشی از کاهش اندک سرعت جریان در سرریز پله‌ای نسبت به شوت بدون پله می‌باشد. بعد از ورود هوا با



شکل ۱۳- مقایسه پروفیل‌های طولی عمق متوسط جریان در سربیز پله‌ای و شوت بدون پله.

همچنان در حال افزایش بوده و نمودار روند صعودی خود را حفظ کرده است. با توجه به شکل ۹ در سربیز پله‌ای به علت کم شدن سرعت جریان نسبت به سربیز بدون پله، عمق جریان در ناحیه متغیر سریع بیشتر از سربیز بدون پله بوده و بعد از ورود هوا به جریان عمق در سربیز پله‌ای به شکل قابل ملاحظه‌ای بیشتر شده که باعث تفاوت زیاد بین نمودارهای سرعت در سربیز پله‌ای و بدون پله شده است. در شکل ۱۴ مشابه شکل ۹ در ناحیه‌ای که عمق جریان روی سربیز پله‌ای یکنواخت شده سرعت نیز به مقدار ثابتی رسیده است.



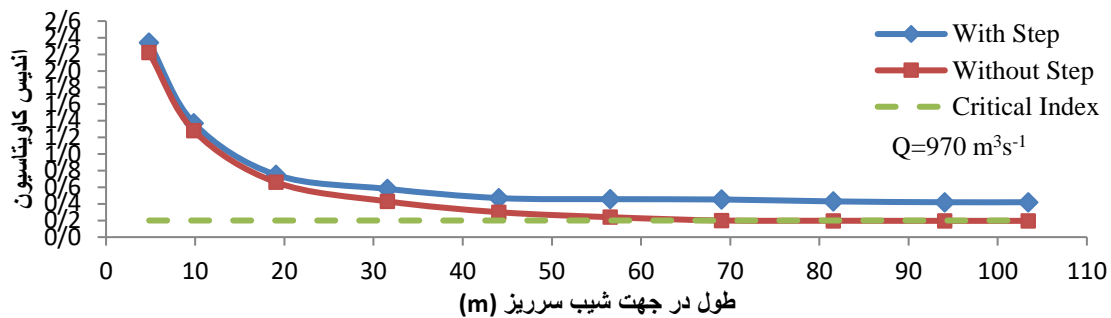
شکل ۱۴- مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت متوسط جریان در سربیز پله‌ای و شوت بدون پله.

۰/۵ و همواره بیشتر از مقدار بحرانی ( $\sigma_{cr} = 0$ ) می باشد (شکل ۱۵). بنابراین روی این سربیز کاویتاسیون اتفاق نمی‌افتد، درحالی‌که در سربیز شوت بدون پله بدلیل توسعه نیافتگی جریان روی شوت، سرعت جریان با شدت زیادی در حال افزایش بوده و تفاوت فاحشی با حالت سربیز پله‌ای در انتهای شوت دارد، به طوری که در فاصله ۵۶ متری از تاج سربیز اندیس کاویتاسیون به مقدار بحرانی خود رسیده و از این فاصله تا انتهای شوت، کف سربیز در معرض وقوع کاویتاسیون و تخریب‌های احتمالی ناشی از آن می‌باشد.

در شکل ۱۴ پروفیل‌های طولی سرعت متوسط جریان در دو سربیز پله‌ای و شوت بدون پله مقایسه شده‌اند که تفاوت اساسی این دو نمودار بعد از نقطه شروع هوادهی در سربیز پله‌ای، محسوس می‌باشد. همچنین جریان در سربیز پله‌ای در فاصله کوتاهی از نقطه شروع هوادهی به حالت توسعه‌یافته رسیده و سرعت متوسط آن تقریباً تثبیت شده است ( $m s^{-1}$ ). این در حالی است که به علت قرارگیری نقطه شروع هوادهی در انتهای سربیز بدون پله و در نتیجه عدم توسعه‌یافتگی جریان در آن سرعت تا انتهای پله

## کاویتاسیون

تغییرات اندیس کاویتاسیون کف سربیز در طول شوت به ازای دبی ثابت ۹۷۰ مترمکعب بر ثانیه برای دو سربیز بدون پله و پله‌ای در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در سربیز پله‌ای به علت تشکیل ناحیه توسعه یافته جریان از  $L = 45$  m به طرف پایین دست شوت، سرعت جریان ثابت باقی مانده (شکل ۱۴) و عمق جریان نیز تغییرات چندانی نداشته (شکل ۱۳) در نتیجه مقادیر اندیس کاویتاسیون نیز در این ناحیه تقریباً ثابت در حدود



شکل ۱۵- مقایسه تغییرات اندیس کاویتاسیون در طول سرریز پله‌ای و بدون پله.

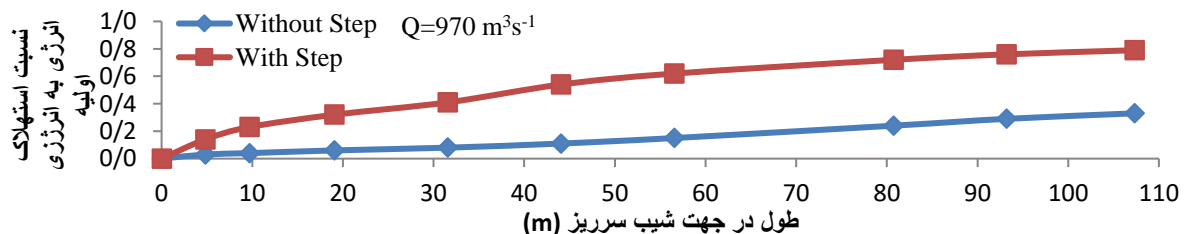
### استهلاک انرژی

انتهای سرریزها با استفاده از رابطه ۷ به ازای دبی طرح  $970 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  جهت سرریز شوت بدون پله با زبری سطح بتن  $0.3$  میلی متر، برابر  $33\%$  و برای سرریز پله‌ای  $79\%$  محاسبه گردیده است. لازم به ذکر است که مقدار انرژی بر اساس معادله زیر بدست آمده است:

$$H = y + \frac{V^2}{2g} \quad [6]$$

$$\frac{\Delta H}{H_i} = \frac{H_f - H_i}{H_i} * 100 \quad [7]$$

که در آن  $H_i$  انرژی در بالادست سرریز و  $H_f$  انرژی در پایین دست سرریز،  $y$  عمق جریان،  $V$  سرعت جریان و  $g$  شتاب گرانشی می‌باشد.



شکل ۱۶- مقایسه مقادیر استهلاک انرژی در طول سرریز پله‌ای و بدون پله.

### نتیجه‌گیری کلی

جریان توسعه یافته یکنواخت تشکیل می‌گردد در حالیکه در سرریز بدون پله، جریان در طول شوت همواره در حال توسعه توأم با افزایش سرعت جریان می‌باشد. ۴- در سرریز پله‌ای در تمام طول شوت عمق جریان از سرریز بدون پله بیشتر و سرعت جریان نسبت به آن کمتر می‌باشد.

۵- سرریز شوت بدون پله به ازای دبی طرح، از فاصله ۵۶ متری از تاج به طرف پایین دست به علت پایین بودن اندیس کاویتاسیون از مقدار بحرانی در معرض وقوع کاویتاسیون و تخریب ناشی از آن قرار داشته در

ویژگی بارز استفاده از سرریزهای پله‌ای استهلاک قابل‌ملاحظه انرژی در این سرریزها می‌باشد. شکل ۱۶ پروفیل‌های طولی استهلاک انرژی را برای دو سرریز پله‌ای و شوت بدون پله نمایش می‌دهد. از این لحاظ اختلاف فاحشی بین دو سرریز از ابتدا جریان مشاهده می‌شود و علت آن وجود پله‌ها در مسیر جریان سرریز پله‌ای و افت شدید انرژی توسط آن‌ها می‌باشد به طوری که سرعت جریان در سرریز شوت بدون پله در انتهای سرریز ( $36.13 \text{ m s}^{-1}$ ) بسیار بیشتر از سرریز پله‌ای ( $19.91 \text{ m s}^{-1}$ ) می‌باشد. نرخ استهلاک انرژی در

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱- عمق و سرعت متوسط جریان با افزایش دبی جریان سرریز پله‌ای افزایش می‌یابد.
- ۲- نقطه شروع هوادهی در سرریز بدون پله در مقایسه با سرریز پله‌ای در فاصله دورتری از تاج قرار داشته و نسبت فاصله نقطه شروع هوادهی از تاج در سرریز بدون پله به حالت پله‌ای  $2/5$  می‌باشد.
- ۳- از میانه شوت به طرف پایین دست، در سرریز پله‌ای،

سرریز پله‌ای سد ژاوه در ابعاد واقعی و به صورت مطالعه موردی است به عنوان نتایج کاربردی می‌توان از این تحقیق برای ساخت مدل فیزیکی از سرریز شوت ساده در ابعاد سرریز سد ژاوه استفاده کرد و جهت جلوگیری از وقوع کاویتاسیون به محل قرارگیری هواده در آن با استفاده از نتایج این تحقیق پی برد.

صورتی که در سرریز پله‌ای نظیر آن کاویتاسیون اتفاق نمی‌افتد.

۶- اختلاف استهلاك انرژی بر روی سرریز پله‌ای و شوت نظیر بدون پله ۴۶٪ می‌باشد که نشان دهنده موثر بودن وجود پله‌ها در استهلاك انرژی در شوت می‌باشد.

۷- با توجه به اینکه نوآوری تحقیق حاضر شبیه سازی

#### منابع مورد استفاده

- Anonymous, 2012. Flow 3D, User Manuel V.10.1.
- Chanson H, 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research* 32(2): 213-218.
- Chanson H, 1995. *Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways*. Pergamon, Oxford, UK, Jan, 292 pages.
- Chen Q, Dai G and Liu H, 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering* 128: 683-688.
- Christodoulou G, 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(5): 644-650.
- Essery ITS and Horner MW, 1971. The Hydraulic design of stepped spillway. Report 33, London.
- Felder S, Fromm C and Chanson H, 2012. Air entrainment and energy dissipation on a 8.9° slope stepped spillway with flat and pooled steps. *Hydraulic Model Report CH Series, CH86/12*, Brisbane.
- Kaouachi A, Carvalho R, Lopes P, Benmamar S and Gafsi M, 2021. Numerical investigation of alternating skimming flow over a stepped spillway. *Journal of Water Supply* 7: 3837-3859.
- Minator Y, Karimi R, Javan M and Eghbalzadeh A, 2011. Numerical study of air concentration in transition flow on stepped overflows. 10th Iranian Hydraulic Conference. 8 November, Rasht, Iran.
- Mirzadeh N and Manafpour M, 2016a. Numerical simulation of two-phase air-water flow over Zhavah stepped spillway. 9th National Congress of Civil Engineering. 10-11 May, Mashhad, Iran.
- Mirzadeh N and Manafpour M, 2016b. Study of hydraulic characteristics of flow over stepped spillways (Case study: Iran). MSc Thesis, University of Urmia, Iran. (In Persian with English abstract)
- Naderi Rad I, 2007. The comparison stepped spillway to ogee spillway on energy dissipation using VOF technique. 3th International Conference, 1-3 May, Tabriz, Iran.
- Rajaratnam N, 1990. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research* 116: 587-591.
- Rens B, Brokken D, Brekelmans W and Baaijens F, 1998. A two-dimensional paving mesh generator for triangles with controllable aspect ratio and quadrilaterals with high quality. *Engineering with Computers* 14: 248-259.
- Salmasi F and Abraham J, 2022. Effect of slope on energy dissipation for flow over a stepped spillway. *Water Supply* 22 (5): 5056-5069.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering* 111 (12):1461-1472.
- Tabbara M, Chatila J and Awwad R, 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers and Structures* 83:2215-2224.
- Varjavand P, Farsadizadeh D, Hosseinzadeh Dalir A and Sadraddini A, 2009. 3D simulation of flow in side spillway with k-ε turbulence model and comparing the results with physical model. *Water and Soil Science* 20/1(3):105-118. (In Persian with English abstract)
- Wuyi W and Awis R, 2019. Effect of height and geometry of stepped spillway on inception point location. *Journal of Applied Sciences* 9(10).
- Zhang G and Chanson H, 2018. Effects of step and cavity shapes on aeration and energy dissipation performances of stepped chutes. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(9), 04018060.