

## بررسی عددی جریان در سرریزهای پلکانی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

ساجده حاجی عزیزی<sup>1\*</sup>، آیلاز صمدی<sup>2</sup>، فرزین سلماسی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 93/06/03 تاریخ پذیرش: 94/11/12

<sup>1</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sajedahazizi@yahoo.com

### چکیده

سرریزهای پلکانی کاربردهای زیادی در ساختمان سدها، مهندسی رودخانه و حفاظت خاک دارند. استهلاك انرژی جریان عبوری از روی چنین سازه‌ای به علت وجود پله‌های متعدد زیاد بوده و در نتیجه هزینه‌های ساخت حوضچه‌های آرامش کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، امروزه مدل‌های عددی، روش‌های جدیدی برای تجزیه و تحلیل جریان هستند. از اهداف این پژوهش نیز بررسی عددی عبور جریان از روی سرریز پلکانی و محاسبه افت انرژی ناشی از آن هست. همچنین در این تحقیق تغییرات بردارهای سرعت و تنش برشی و فشار در حین عبور از هر پله مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور مدل فیزیکی از سرریز پلکانی با نسبت شیب 1:2 (افقی: عمودی) ساخته شده و با 10 دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی نیز با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل آشفتگی RNG k-ε، تحت شرایط مذکور انجام گرفته و نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل عددی با خطایی حدود 3% تطابق خوبی با مدل فیزیکی دارد و می‌توان به نتایج حاصل از آن در پیش‌بینی جریان‌های چرخشی و پیچیده در سرریزهای پلکانی اعتماد نمود.

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، بردار سرعت، تنش برشی، سرریز پلکانی، فشار، مدل عددی، نرم‌افزار فلوئنت

## Numerical Study of Flow on Stepped Spillway and Its Comparison with Experimental Results

S Haji Azizi<sup>1\*</sup>, A Samadi<sup>2</sup>, F Salmasi<sup>3</sup>

Received: 25 August 2014

Accepted: 01 February 2016

<sup>1, 2</sup> Former M.Sc. Student, Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Engin. Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

Corresponding Author, Email: [sajedehazizi@yahoo.com](mailto:sajedehazizi@yahoo.com)\*

### Abstract

Stepped spillways are frequently used in the structure of dams, river engineering and soil conservation. Energy dissipation on this structure due to the presence of several steps is high, so causes reduction in construction costs of stilling basin. On the other hand, nowadays numerical models are new methods for flow analysis. The purpose of this study was numerical investigation of the flow on the stepped spillway and calculation of the energy loss caused by it. Also, the fluctuations of velocity vectors, shear stress and pressure during the flow on the each step were compared. For this purpose, a physical model of the stepped spillway was built with a slope ratio of 2:1 (horizontal: vertical), and the experiments were performed with 10 different flow rates. The numerical simulations also performed under the same conditions by using FLUENT software and RNG k- $\epsilon$  turbulence model. Finally, the results of the numerical model were compared with experimental data. The results indicated that the numerical model with an error of about 3% had a good agreement with the physical model, so it could be trusted for anticipating complex rotational flows on the stepped spillways.

**Keywords:** Energy dissipation, FLUENT software, Numerical model, Pressure, Shear stress, Stepped spillway, Velocity vector

### مقدمه

سیال از آن عبور می‌کند. این کاهش سرعت خود باعث پراکنش قسمتی از انرژی جریان خواهد شد. بنابراین اگر بتوان با افزایش زبری، انرژی جریان عبوری از روی سرریز را به صورت یکنواخت و پیوسته پراکنده کرد؛ دیگر در پنجه سرریز نیازی به ایجاد تأسیسات کاهنده انرژی جریان نظیر حوضچه‌های آرامش (که انرژی در آن باید یکباره پراکنده شود) نخواهد بود و یا در صورت لزوم ابعاد این‌گونه سازه‌ها کاهش خواهد یافت. مطالعات انجام‌شده بر روی مدل هیدرولیکی سرریزهای پلکانی نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در

سرریزهای پلکانی به‌عنوان سازه‌های پراکنش انرژی در پایین‌دست سدها مطرح می‌باشند. پراکنش انرژی یکی از اصول موردتوجه در مطالعه وضعیت جریان در پایین‌دست سدهاست. بیشینه سرعت جریان در پایین‌دست سد با توجه به رابطه توریچلی برابر  $\sqrt{2gh}$  هست که  $h$  معادل ارتفاع آب هست. اما با توجه به اصطکاک سطحی، میزان سرعت از عدد فوق کمتر خواهد شد و در نهایت نسبت مقدار سرعت واقعی به بیشینه سرعت جریان بستگی به نوع مجرای دارد که

نتایج به دست آمده از روش عددی همخوانی مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

موسوی جهرمی و همکاران (2008) با کمک نرم افزار ANSYS و استفاده از روش اجزاء محدود جریان روی سرریز پلکانی را مدل نمودند و بیان داشتند که نتایج به دست آمده از روش عددی با نتایج آزمایشگاهی جهت استهلاك انرژی تنها 6 درصد اختلاف دارند.

منصوری و همکاران (2011) نیز جریان روی سرریز پلکانی با پله‌های توأمآ آستانه‌دار و شیب‌دار را به کمک نرم افزار فلوئنت و با استفاده از روش حجم محدود و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی نموده و افت انرژی حاصل از نتایج عددی را با افت انرژی به دست آمده از آزمایش‌ها مقایسه نمودند که بیان‌گر اختلاف قابل قبولی با یکدیگر بوده‌اند.

اولین کسانی که مدل  $k-\epsilon$  را ارائه نمودند لاندرو اسپالدینگ (1972) بودند. در سال‌های اخیر نیز مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  به عنوان روشی مناسب و قابل قبول در شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای پلکانی شناخته شده است. این حقیقت در تمامی تحقیقات انجام گرفته نیز قابل مشاهده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر نیز از این مدل آشفتگی استفاده گردیده است.

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای پلکانی با استفاده از نرم افزار فلوئنت است. این پژوهش به طور جامع مؤلفه‌های مختلف را برای انواع دبی‌ها، مورد ارزیابی قرار داده است که از جمله این پارامترها می‌توان به تخمین استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی، مطالعه رفتار چرخشی جریان بین پله‌ها، تنش برشی و فشارهای وارده بر پله‌ها اشاره کرد.

در حالت کلی و با بررسی مطالعات دیگر محققان می‌توان نتیجه گرفت که، این انسجام و همبستگی در

پنجه سرریزهای پلکانی تا 84% بوده است (معصومی اصفهانی 1385). سرریز پلکانی علاوه بر مزیت بالا بودن میزان اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش که منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌شود، باعث کاهش فشار برکنش نیز می‌گردد. با تغییرات دبی سه نوع رژیم جریان در سرریزهای پلکانی دیده می‌شود. رژیم جریان تیغه‌ای در دبی‌های پایین رخ داده و با افزایش دبی، رژیم جریان تبدیلی و با افزایش بیشتر دبی، رژیم جریان رویه‌ای مشاهده می‌گردد. سورنسن (1985) از جمله افرادی بود که تحقیقاتی را در زمینه هیدرولیک سرریزهای پلکانی انجام داد. چانسون (2001) و همچنین چمنی و راجاراتنام (1994) تحقیقات زیادی را بر روی رژیم جریان تیغه‌ای انجام داده و روابطی را نیز جهت تعیین میزان افت انرژی در این نوع از رژیم جریان ارائه نمودند. در جریان‌های رویه‌ای نیز چانسون (2001) و چمنی و راجاراتنام (1994) روابطی را جهت تعیین افت انرژی ارائه نمودند. در تحقیقات انجام گرفته به روش‌های عددی، از جمله اولین محققانی که از معادله لاپلاس و حل آن از روش تفاضل محدود جهت تحلیل جریان بر روی سرریزهای اوجی استفاده نمود، کاسیدی (1965) بوده است. وی با استفاده از نظریه جریان پتانسیل، پروفیل سطح آزاد آب و توزیع فشار روی تاج را که از مدل عددی حاصل شده بود، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود و تطابق مناسبی بین آن‌ها به دست آورد.

چن و همکاران (2002) جریان در سرریزهای پلکانی را با استفاده از نرم افزار فلوئنت و به روش حجم محدود تحلیل نموده و از مدل  $k-\epsilon$  جهت تعیین آشفتگی میدان جریان استفاده نمودند. آن‌ها شاهد تطابق مناسبی بین هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی بودند.

تاپارا و همکاران (2005) نیز با استفاده از نرم افزار ADINA، جریان عبوری از روی سرریز پلکانی را با روش اجزاء محدود تحلیل نموده و جهت تعیین آشفتگی جریان از مدل Standard  $k-\epsilon$  استفاده نمودند.

هوا هست. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. در این پژوهش منظور از پارامتر  $q$ ، دبی در واحد عرض است.

جدول 1- میزان خطای برآورد استهلاک انرژی برای

$$q = 0.0945 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$$

میزان خطا در مقایسه با مدل فیزیکی	
VOF	% 3
Mixture	% 3/6

مشخصات مدل فیزیکی کانال و سرریز مورد استفاده

مشخصات مدل فیزیکی کانال و سرریز موجود در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز (سلماسی 1388) که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است به شرح زیر هست:

آزمایش‌ها روی یک کانال مستطیلی با جنس فلزی- شیشه‌ای به طول 9 متر، عرض 25 سانتی‌متر و ارتفاع 50 سانتی‌متر انجام شده است. عرض مدل فیزیکی ساخته شده از سرریز پلکانی، 25 سانتی‌متر و ارتفاع آن 30 سانتی‌متر است. تعداد پله‌ها در سرریز 3 عدد با شیب 1:2 (افقی : عمودی) در نظر گرفته شده است، لذا ارتفاع هر پله 10 سانتی‌متر و طول آن 20 سانتی‌متر است.

مشخصات مدل عددی مربوط به سرریز

در این تحقیق برای رسم شکل هندسی مدل و تعریف شرایط مرزی برای آن از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده است. در نرم‌افزار گمبیت، گزینه‌های مختلفی برای شبکه‌بندی صفحه وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به Tri (مثلثی)، Quad (مربعی) و Quad Tri / (مربعی - مثلثی) اشاره کرد. لازم به ذکر است که، در کلیه مدل‌های موجود در این پژوهش برای شبکه‌بندی میدان جریان از جزء Quad استفاده شده است. شکل 1 شبکه محاسباتی را در مدل‌ها نشان می‌دهد. همچنین به

بررسی مؤلفه‌های مختلف در سایر تحقیقات وجود ندارد.

## مواد و روش‌ها

### مدل‌سازی عددی

در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریز پلکانی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. مدل‌سازی عددی شامل حل معادلات ناویر استوکس است که بر پایه قوانین بقای جرم و مومنت برای هر سیال در حال حرکت استوار می‌باشند. معادلات پیوستگی و مومنتوم به ترتیب در روابط 1 و 2 به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - u'_i u'_j) \quad [2]$$

در روابط فوق  $\bar{u}_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$ ،  $v$  لزجت سینماتیکی،  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $g_{x_i}$  مؤلفه شتاب ثقل در جهت  $i$  و  $\bar{p}$  ترم فشار در هر نقطه از سیال است. پارامتر  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  همان تنش‌های رینولدز است که بر سیال عمل کرده و اثر گردابه‌های آشفتگی را در سیال اعمال می‌کند. به منظور تعیین پارامتر تنش رینولدز از انواع مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به کار گرفته شده است.

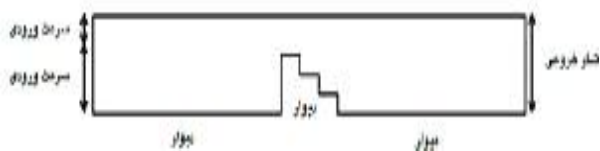
جهت تعیین بهترین مدل برای بررسی سطح آزاد جریان، مقایساتی انجام گردید و طبق نتایج حاصل از جدول 1، مدل  $VOF^1$  (مدل حجم سیال) انتخاب شد. در این روش از یک تابع متغیر به نام  $\alpha$  استفاده می‌شود که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. اگر  $\alpha$  برابر 1 باشد، نشان‌دهنده پر بودن سلول از آب هست و اگر  $\alpha$ ، صفر باشد یعنی سلول پر از هوا است. در حالتی که  $0 < \alpha < 1$  است، درصدی از سلول آب و درصدی از آن

<sup>1</sup>-Volume of Fluid

## جدول 2- بررسی تأثیر تعداد شبکه‌های مختلف.

تعداد شبکه	RMSE (mm)
23000	9/18
44000	6/51
60000	1/67
71000	2/71

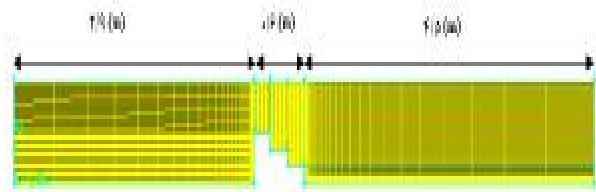
شکل 3 دامنه حل مسئله و شرایط مرزی تعریف شده برای مدل را نشان می‌دهد. در این پژوهش برای دیواره‌های کانال و سرریز شرط مرزی دیواره، برای ارتفاع آب ورودی و ارتفاع آزاد کانال شرط سرعت ورودی و برای صفحه خروجی جریان از شرط فشار خروجی استفاده شده است. جهت اعمال اثرات دیوار بر جریان از تابع دیواره استاندارد (Standard Walls Function) در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود جریان‌های چرخشی بر روی سرریز، مدل آشفتگی  $k-\epsilon^2$  RNG برای مدل‌سازی انتخاب گردید. مدل RNG برای جریان‌های چرخشی و انحنا دار مناسب هست (بی‌نام، 2005).



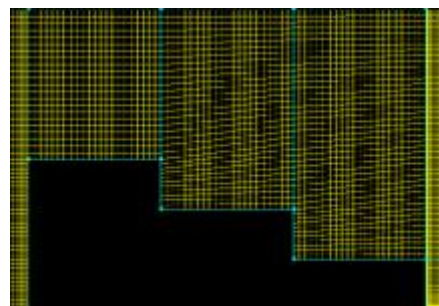
شکل 3- شرایط مرزی اعمال شده در مدل.

جهت تکمیل فرآیند آماده‌سازی مدل عددی، از طرح گسسته‌سازی معادله فشار به روش Body Force Weighted استفاده گردید. روش گسسته‌سازی Body Force Weighted در این مسئله بهترین همگرایی را نشان می‌داد. با توجه به اینکه جریان به صورت غیرماندگار مدل‌سازی می‌گردد از الگوریتم کوپل کننده فشار- سرعت به روش PISO که برای جریان‌های غیرماندگار توصیه شده، استفاده

دلیل حساسیت بالای جریان سعی شده است که تراکم شبکه‌ها در نزدیکی دیواره‌ها و روی سطح سرریز افزایش داده شود. شکل 2 شبکه‌بندی اعمال شده بر روی سرریز پلکانی را نشان می‌دهد.



شکل 1- شبکه محاسباتی در کلیه مدل‌ها.



شکل 2- شبکه‌بندی اعمال شده بر روی سرریز پلکانی.

یکی از مباحث مهم در استفاده از مدل عددی، بحث استقلال مدل از شبکه هست. به این منظور تراکم شبکه‌ها در مدل تغییر داده شده و پس از بررسی میزان دقت شبکه‌های مختلف، شبکه بهینه (مناسب‌ترین شبکه) انتخاب می‌گردد. نتایج بررسی این پارامتر در جدول 2 ارائه گردیده است. در این جدول میزان معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به شبکه‌های مختلف در تعیین عمق جریان محاسبه و تعداد 60000 شبکه به عنوان شبکه (مش) بهینه انتخاب گردیده است. لازم به ذکر است که مقدار جذر میانگین مربعات خطا از رابطه 3 محاسبه می‌شود که در آن  $y_{pi}$  و  $y_{ni}$  به ترتیب عمق آب حاصل از مدل فیزیکی و عمق آب حاصل از مدل عددی هست.

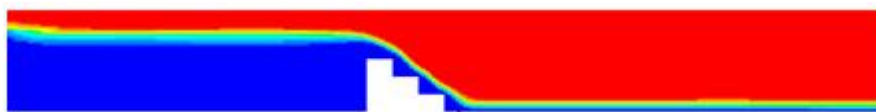
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{pi} - y_{ni})^2} \quad [3]$$

به صورت ساعت گرد شکل گرفته و همان طور که قابل مشاهده است در بالای آن جریان، ریزشی نبوده و به صورت جریان سطحی برقرار هست. مقادیر سرعت در جریان سطحی بیشتر از جریان چرخشی بر روی پله ها است. به دلیل اندرکنش جریان سطحی و جریان چرخشی در بالای آن، سرریز پلکانی به طور مؤثری قادر به پراکنش انرژی خواهد بود. اندازه مورد نیاز برای تلف کننده های انرژی (پله ها) می تواند بر اساس انرژی جریان در سرریز پلکانی طراحی گردد. نسبت انرژی یا انرژی باقی مانده می تواند بر اساس انرژی جنبشی و پتانسیل بالادست و پایین دست سرریز محاسبه گردد.

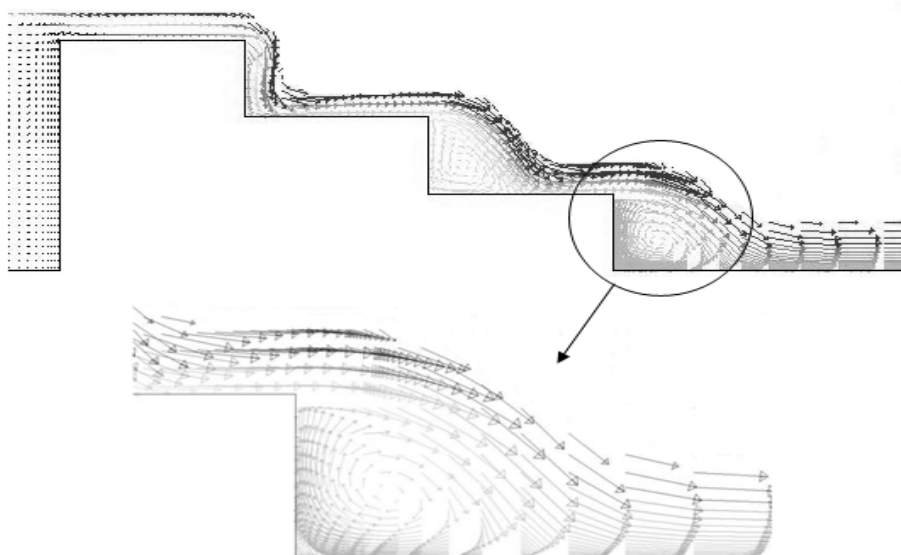
گردیده است. در این تحقیق گام زمانی برای حل مسئله 0/001 ثانیه در نظر گرفته شده است.

### نتایج و بحث بردارهای سرعت

شکل 4 یکی از خروجی های گرافیکی نرم افزار فلوئنت است که نحوه عبور جریان از روی سرریز پلکانی را نشان می دهد. در این شکل رنگ آبی معرف فاز هوا و رنگ سبز معرف فاز اختلاط هست. شکل 5 بردارهای سرعت جریان روی سرریز پلکانی را نشان می دهد. پیش تر نیز اشاره شد یکی از عوامل استهلاک انرژی در این سازه، جریان چرخشی ایجاد شده بعد از هر پله هست که این عامل در شکل 5 به وضوح دیده می شود. این جریان چرخشی در محل دیواره ها



شکل 4- جریان عبوری از روی سرریز پلکانی.



شکل 5- بردارهای سرعت جریان روی سرریز پلکانی.

مختلف در شکل های 6 و 7 به بررسی تأثیرات دبی بر عمق جریان در پایین دست و بالادست سرریز پلکانی پرداخته شده است. در این شکل ها نتایج حاصل از مدل

میزان استهلاک انرژی نسبی

جهت کنترل صحت نتایج مدل عددی و همچنین درک بهتر میزان استهلاک انرژی به ازای دبی های

در شکل 8 میزان استهلاك نسبی انرژی جریان به ازای مقادیر مختلف دبی در واحد عرض سرریز پلکانی، بین مدل فیزیکی و مدل عددی ارائه شده است. مقادیر استهلاك انرژی از رابطه 4 محاسبه گردیده است. در این رابطه،  $H_0$  ارتفاع (انرژی) آب بالادست تاج سرریز و  $H_1$  ارتفاع (انرژی) آب قبل از پرش هیدرولیکی هست.

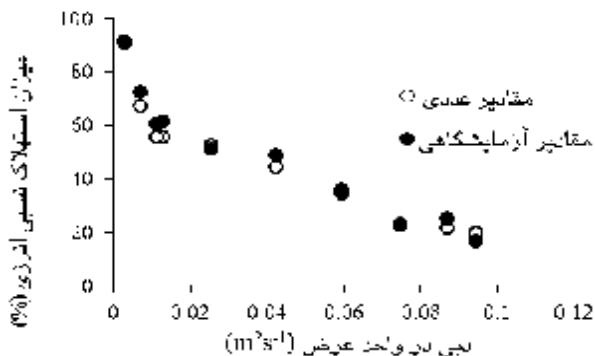
$$\frac{DH}{H_0} = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \cdot 100 \quad [4]$$

مقدار انرژی کل در بالادست تاج سرریز، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$H_0 = H + y + \frac{V_a^2}{2g} = H + y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad [5]$$

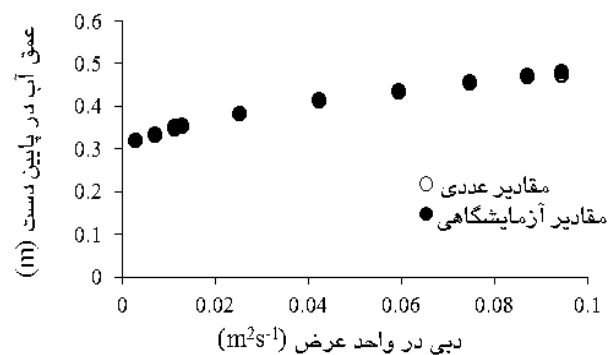
در رابطه 5،  $H_0$  انرژی کل بالادست،  $H$  ارتفاع کل سرریز،  $y$  مقدار عمق آب در فاصله ای حدود 60 سانتی متری در بالادست سرریز و  $V_a$  نیز مقدار سرعت نزدیک شدن آب به سرریز هست.

برای مقایسه استهلاك انرژی نسبی بین مدل فیزیکی و مدل عددی شکل 8 ارائه گردیده است. با توجه به این شکل می توان بیان نمود که استهلاك نسبی انرژی جریان با افزایش دبی کاهش می یابد. در این مرحله نیز خطای مدل عددی حدود 6 درصد محاسبه گردید که نسبتاً خطای ناچیزی بوده و بر کارایی هر چه بهتر مدل عددی حاضر دلالت دارد.

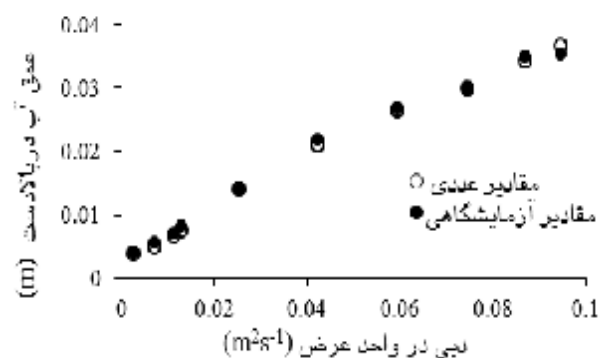


شکل 8- مقایسه تغییرات استهلاك نسبی انرژی در مقابل دبی در واحد عرض سرریز پلکانی.

عددی با نتایج آزمایشگاهی سلماسی (1388) مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در تحقیق مذکور آزمایش ها بر روی سرریزهای پلکانی گابیونی و صلب (نفوذناپذیر) انجام پذیرفته که در اینجا فقط از نتایج مربوط به سرریز صلب استفاده می گردد. همان طور که انتظار می رفت، با افزایش دبی در واحد عرض جریان، عمق جریان در مقاطع بالادست و پایین دست سرریز افزایش یافت. با توجه به شکل های 6 و 7 می توان نتیجه گرفت مدل عددی با خطایی حدود 3 درصد توانایی بالایی در بررسی این پدیده دارا هست. به عبارت دیگر نتایج حاصل از مدل عددی تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد. تأثیر دیواره های جانبی کانال، نیروهای ناشی از کشش سطحی و لزجت در دبی های کم و دقت اندازه گیری داده های آزمایشگاهی از جمله عواملی هستند که باعث بروز اختلاف بین داده های عددی و آزمایشگاهی شده است.

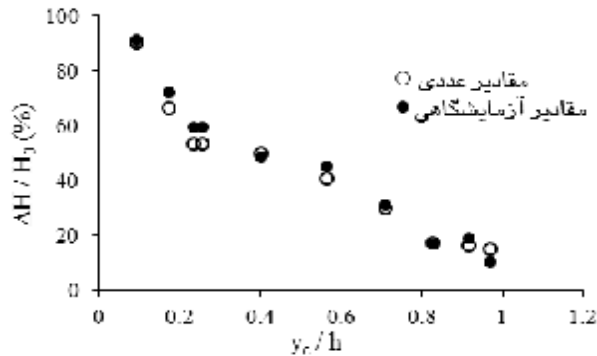


شکل 6- تغییرات عمق آب نسبت به دبی جریان در پایین دست سرریز.



شکل 7- تغییرات عمق آب نسبت به دبی جریان در بالادست سرریز.

$y_1$  استفاده شد که در آن  $y_1 = DH/H_w$  هست. منظور از  $H_w$ ، ارتفاع سرریز هست. نتیجه کار در شکل 9 نمایش داده شده است.

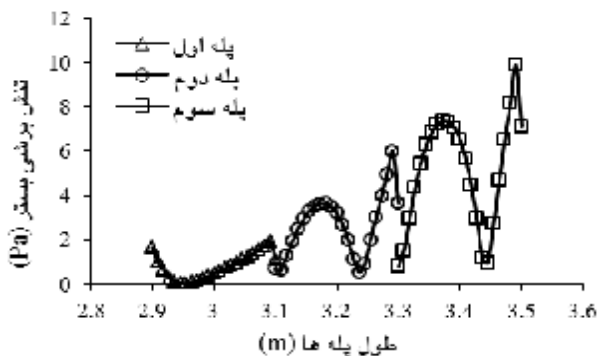


شکل 10- تأثیر پارامتر بی بعد  $y_c/h$  در مقابل افت انرژی نسبی جریان در طول سرریز پلکانی.

که باعث می‌گردد تأثیر پلکان‌ها (زبری) بر روی افت کاهش یابد.

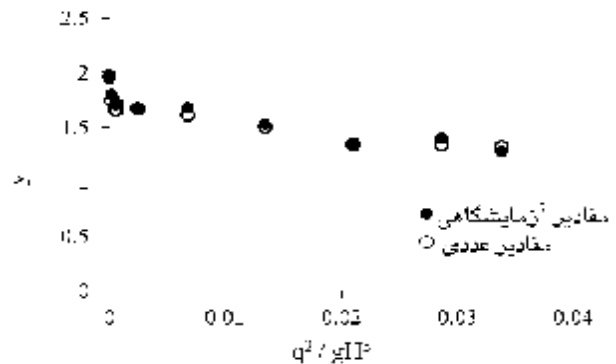
بررسی تنش برشی

در شکل‌های 11، 12 و 13 به ترتیب تغییرات تنش برشی در سه دبی بیشینه  $q = 0.0945 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ ، متوسط  $q = 0.0423 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$  و کمینه  $q = 0.0071 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$  در کف هر پله (سطوح افقی پله‌ها) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



شکل 11- تغییرات تنش برشی در دبی بیشینه  $q = 0.0945 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$

در ادامه برای درک بهتر و کسب اطلاعات بیشتر از شکل 8، اقدام به تغییر مقیاس محورهای شده است. بدین صورت که در محور افقی از پارامتر بی بعد  $q^2/gH^3$  و در محور عمودی از پارامتر بی بعد



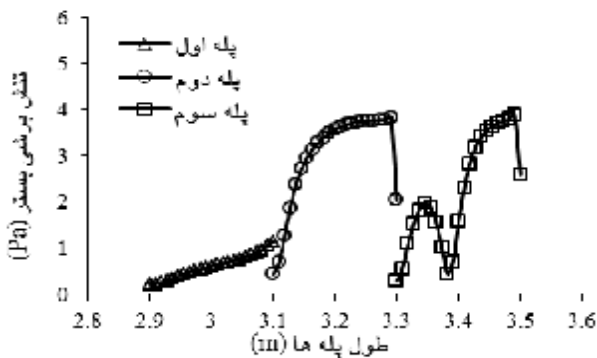
شکل 9- تغییرات استهلاک نسبی انرژی به صورت  $y_1 = \Delta H/H_w$  در مقابل  $q^2/gH^3$ .

مطابق شکل 9 مشاهده می‌شود که استهلاک انرژی در این سرریز در دبی‌های کم بیشتر از سایر دبی‌ها است. قابل ذکر است که در این مورد نیز با مقایسه مقادیر حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی، خطای مدل عددی در حدود 2 درصد برآورد گردید که خطای قابل قبولی هست.

جهت بررسی دقیق‌تر میزان افت انرژی نسبی صورت گرفته در طول سرریز، در شکل 10 میزان تغییرات این پارامتر در مقابل پارامتر بی بعد  $y_c/h$  مورد بررسی قرار گرفته است.  $h$  برابر با ارتفاع پله‌ها بوده و  $y_c$  از رابطه  $y_c = (q^2/g)^{1/3}$  محاسبه شده است.

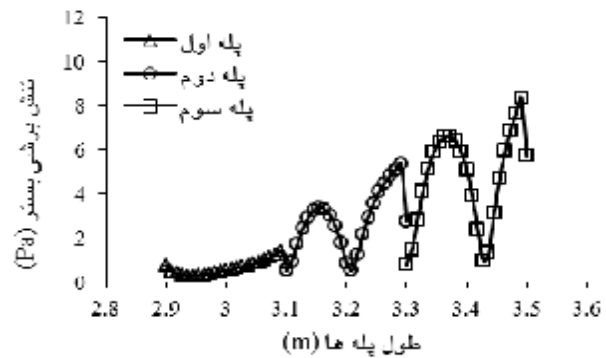
با دقت در شکل 10 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت  $y_c/h$ ، میزان افت نسبی انرژی کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش دبی جریان (افزایش سرعت و عدد فرود در جریان) و در نتیجه افزایش ضخامت جریان (عمق جریان) بر روی پلکان‌ها هست





شکل 13- تغییرات تنش برشی در دبی کمینه.

$$q = 0.0071 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$$



شکل 12- تغییرات تنش برشی در دبی متوسط

$$q = 0.0423 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$$

طول این پله در ابتدا تنش برشی کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد و در نهایت در کمترین دبی این روند نظم خاصی گرفته و حالت صعودی پیدا می‌کند. علت این امر را نیز می‌توان با چسبیدگی جریان بر روی سطح پله مرتبط دانست. زیرا در دبی‌های بیشتر، سرعت جریان بیشتر بوده و جریان دارای افتادگی کمتری بر روی سطح پله بوده که در نهایت منجر به کاهش تنش برشی می‌شود، درحالی‌که در دبی‌های کمتر شاهد چسبیدن جریان بر سطح پله و در نتیجه افزایش تنش برشی هستیم. در جدول 3 به بررسی کمی تنش برشی بستر در طول سرریز پلکانی پرداخته شده است.

قابل مشاهده است که با کاهش دبی، تنش برشی روی پله‌ها کاهش پیدا می‌کند. در بیشترین دبی روند تغییرات در پله دوم و سوم تقریباً یکسان هست. به‌نحوی که تا وسط این پله‌ها ابتدا تنش برشی افزایش یافته، سپس کاهش می‌یابد و در ادامه دوباره شاهد روندی افزایشی آن هستیم. در نهایت در لبه پله‌ها این مقدار دارای یک کاهش ناگهانی هست که آن را می‌توان به پرش جریان و جدایی آن از پله و در نهایت کاهش تنش برشی در این مقطع نسبت داد. این روند تقریباً در تمامی پله‌ها و در هر سه دبی مشاهده گردید. نکته دیگری که قابل ذکر است رفتار متفاوت تنش برشی بستر در پله اول نسبت به پله دوم و سوم هست. در

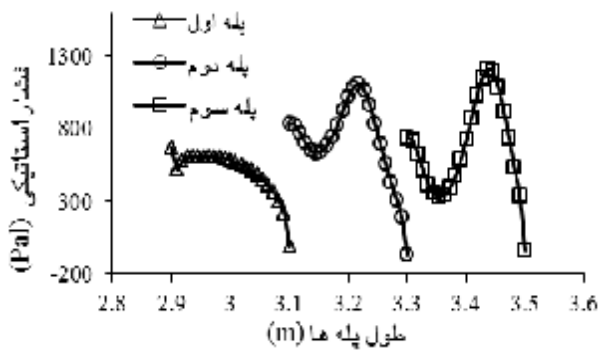
جدول 3- مقادیر بیشینه و کمینه تنش برشی بستر در پله‌های مختلف.

	دبی کمینه ( $0/0071 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ )			دبی متوسط ( $0/0423 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ )			دبی بیشینه ( $0/0945 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ )		
	پله اول	پله دوم	پله سوم	پله اول	پله دوم	پله سوم	پله اول	پله دوم	پله سوم
بیشینه تنش برشی (Pa)	1/152	3/825	3/883	1/381	5/360	8/297	1/937	5/963	9/888
کمینه تنش برشی (Pa)	0/216	0/433	0/287	0/282	0/510	0/787	0/048	0/526	0/797

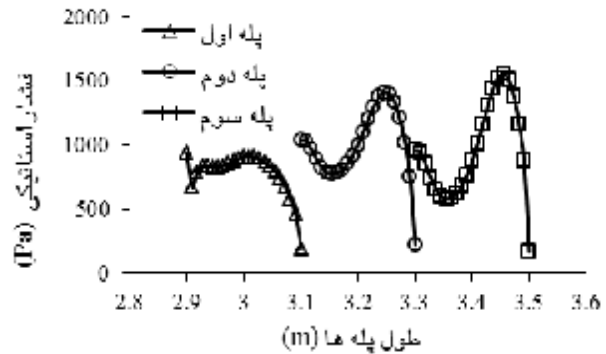
صعودی ذکر شده در دو حالت قبل کمتر بروز نمود. به‌نحوی که تقریباً یک روند نزولی در توزیع فشار مشاهده گردید. کمترین فشار محاسبه شده با شبیه‌سازی، یک مؤلفه مهم فشار پیوسته بوده و متوسط فشار کمینه جهت ارزیابی پتانسیل شکل‌گیری کاویتاسیون ضروری هست. در جدول 4 به بررسی کمی این پارامتر پرداخته شده است.

### بررسی پروفیل‌های فشار

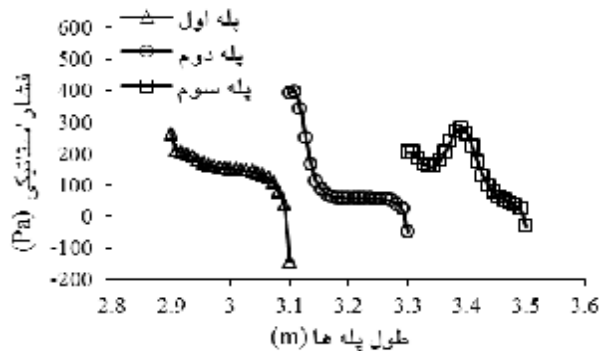
در شکل‌های 14، 15 و 16 پروفیل‌های فشار در سطوح افقی هر سه پله به ترتیب برای سه دبی بیشینه، متوسط و کمینه قابل مشاهده هست. در دو دبی بیشینه و متوسط فشار در سطح افقی پله‌ها ابتدا مقداری کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد و مجدداً در نوک پله کاهش می‌یابد. در دبی کمینه روند



شکل 15- توزیع فشار در روی سرریز پلکانی برای دبی متوسط.  $q=0.0423 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ .



شکل 14- توزیع فشار در روی سرریز پلکانی برای بیشترین دبی.  $q=0.0945 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ .



شکل 16- توزیع فشار در روی سرریز پلکانی برای کمترین دبی.  $q=0.0071 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ .

جدول 4- مقادیر کمینه فشار در پله‌های مختلف.

	دبی بیشینه $(0/0945 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$			دبی متوسط $(0/0423 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$			دبی کمینه $(0/0071 \text{ m}^2\text{s}^{-1})$		
	پله اول	پله دوم	پله سوم	پله اول	پله دوم	پله سوم	پله اول	پله دوم	پله سوم
بیشینه فشار (Pa)	933/724	1409/391	1549/723	667/212	1106/487	1212/962	262/883	396/516	281/209
کمینه فشار (Pa)	188/178	217/462	166/583	-12/853	-65/953	-41/071	-142/729	-47/567	-30/285

### نتیجه‌گیری کلی

و قابل قبول گزارش شده و با صحت‌سنجی انجام گرفته بر روی مدل عددی حاضر مشخص گردید که نرم‌افزار فلونت قابلیت نسبتاً بالایی در زمینه بررسی میزان اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی دارد. به نحوی که خطای آن در برآورد عمق جریان و به تبع آن میزان اتلاف انرژی، حدود 3 درصد محاسبه شده که خطای قابل قبولی هست. بنابراین استفاده از مدل عددی جهت شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز پلکانی، به دلیل

با مشاهدات مدل‌سازی انجام گرفته واضح است که با افزایش دبی جریان از میزان افت نسبی انرژی در طول سرریز کاسته می‌شود. در این زمینه استفاده از پارامترهای بی‌بعد مناسب، در تحلیل نتایج بسیار مفید است. با شبیه‌سازی عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سرریز، اختلاف به دست آمده بین نتایج حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از مدل عددی مناسب

گردید. همچنین در بررسی تنش برشی و فشار بر روی هر پله مشخص گردید که با افزایش دبی، تنش برشی بستر و فشار کاهش می‌یابد. در حالت کلی و با توجه به مقادیر درصد خطا می‌توان گفت، نتایج حاصل از این تحقیق نسبت به مطالعات سایر پژوهشگران از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین در این پژوهش تعداد پارامترهای بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است.

صرفه‌جویی در زمان و هزینه توصیه می‌شود. همچنین در این مطالعه، شبکه بهینه مورد بررسی قرار گرفته است، درحالی‌که در سایر پژوهش‌ها توجه چندانی به این مقوله نگردیده است. استفاده از شبکه بهینه و مدل دوفازی مناسب‌تر در این تحقیق باعث کمتر شدن درصد خطا نسبت به سایر مطالعات شده است. در ادامه به استخراج بردارهای سرعت در دبی‌های مختلف پرداخته شد و جریان چرخشی ایجاد شده که نشان‌گر ماهیت اصلی این نوع سرریز هست به‌وضوح مشاهده

#### منابع مورد استفاده

- سلماسی ف، 1388. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی گابیونی. دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی.
- معصومی اصفهانی ح، 1385. مطالعه ترکیبی عوامل مؤثر بر افت انرژی در سرریزهای پلکانی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- Anonymous, 2005. Fluent 6.2 User's Guide.
- Cassidy JJ, 1965. Rotational flow over spillway of finite height. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 91(6): 155-173.
- Chamani MR and Rajaratnam N, 1994. Jet flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121(2): 254-259.
- Chanson H, 2001. Hydraulic design of stepped spillway and downstream energy dissipaters. *Dam Engineering* 11(4): 205-242.
- Chen Q, Dai G and Liu H, 2002. Volume of fluid model for turbulent numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 128(70): 683-688.
- Lauder BE and Spalding DB, 1972. *Lectures in Mathematical Model of Turbulent*. Academic Press, London.
- Musavi Jahromi H, Bina M and Salmasi F, 2008. Physical and numerical modeling of the nappe flow in the stepped spillway. *Journal of Applied Science* 8(9): 1720-1725.
- Mansoori A, Hamed AM, 2011. Scrutinization of energy loss in stepped spillway equipped with inclined steps together with end sill by FLUENT numerical models. *World Renewable Energy Congress, Linkoping, Sweden, 8-11 May, 2011*.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 111(12): 1461-1472.
- Tabbara M, Chatila J and Awwad R, 2005. Computational simulation of flow over steeped spillway. *Journal of Computer and Structures* 83: 2215-2224.