

## بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر هندسه پله ها بر جریان روی یک سرریز پلکانی در کانال روباز

آمینه سعیدی<sup>\*</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ameneh\_saeedi@semnan.ac.ir

روح الله رفعی<sup>\*</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، rafee@semnan.ac.ir

### چکیده

یکی از راهکارهای موثر برای اتلاف انرژی در سازه های هیدرولیکی مانند سرریز ها ایجاد سرریز پلکانی است. در این مقاله ویژگی های الگوی جریان سطح آزاد بر روی سرریز پلکانی برای ۸ هندسه مختلف پله در یک کانال مستطیلی بررسی شده است. برای این منظور نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده است. از روش حجم سیال (VOF) برای مدلسازی سطح آزاد استفاده شده است. نتایج مدل های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\omega$  استاندارد و SST  $k-\omega$  با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. با مقایسه پروفیل سطح آزاد آب و مقدار اتلاف انرژی به دست آمده از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی، این نتیجه حاصل شد که مدل SST  $k-\omega$  به نتایج آزمایشها نزدیک تر است. کارکرد این مدل در تعیین اتلاف انرژی و وضعیت سطح آزاد آب در پنج دبی مختلف بررسی شده است و بهترین هندسه، پله شیبدار می باشد که در دبی یکسان دارای بیشترین اتلاف انرژی است. **واژه های کلیدی:** اتلاف انرژی، سرریز پلکانی، شبیه سازی عددی، مدل VOF، جریان آشفته، کانال روباز.

## Numerical and Experimental Study on the Effects of Step Shape on the Flow Over a Step Spillway in an Open Channel

A. Saeedi  
R. Rafee

Faculty of Mechanical Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran  
Faculty of Mechanical Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

### Abstract

One of the most effective mechanisms for energy dissipation over the hydraulic structures is the step spillway. In this paper, free-surface flow patterns over a spillway with 8 different geometries of the steps in a rectangular channel are investigated. For this purpose, the simulation results and laboratory measurements were compared. The volume of fluid (VOF) method was used to simulate the free surface flow. The results of the standard  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  standard, and SST  $k-\omega$  models for determination of the free surface and energy dissipation are compared with experimental data. It was concluded that the amount of energy dissipation and free surface profiles in the experiments were closer to the outputs of the SST  $k-\omega$  model. Performance of this model has been investigated for prediction of the free surface and energy dissipation in five different discharge flow rates. The best step geometry is the sloping step geometry which has the highest energy loss for the same flow rate.

**Keywords:** Energy dissipation, Step Spillway, Numerical Simulation, VOF model, Turbulent Flow, Open Channel.

از روش عددی و بر پایه داده های جمع آوری شده از مدل فیزیکی، سرریز پلکانی را مدل سازی کردند و مقدار اتلاف انرژی تحت تاثیر هندسه پله سرریز را محاسبه کردند. آنها دریافتند که با افزایش شیب و تعداد پله های سرریز، نرخ اتلاف انرژی افزایش می یابد. همچنین پی بردند که ارتفاع سرریز رابطه مستقیمی با نرخ اتلاف انرژی دارد و مقدار آن را افزایش می دهد. محمد رضاپور تباری و توکلی [۲] در راستای بررسی تاثیر پارامترهای مختلفی چون تعداد پله ها ارتفاع و طول آنها در اتلاف انرژی مدل سه بعدی از جریان انجام داده اند و ارتباط بین اتلاف انرژی و عمق بحرانی جریان در سرریز پلکانی تحقیق نمودند. عبدل و همکاران [۳] در مطالعه خود، در رژیم جریان ریزشی، رویه ای و انتقالی در سرریزهای پلکانی و اثر آن روی اتلاف انرژی را بررسی کردند. آنها مدل های فیزیکی برای ۴ پله در سرریز پلکانی ارائه کردند، نتایج تحقیقات نشان داد که قرار دادن پله ها در سرریز پلکانی اتلاف انرژی را افزایش می دهند.

ژی یونگ و هان وی [۴] جریان در کانال پلکانی را با استفاده از مدل های آشفتگی براساس روش حجم سیالی (VOF) با استفاده از نم

### ۱- مقدمه

امروزه از سرریزهای پلکانی جهت افزایش اتلاف انرژی در پایین دست جریان بر روی سدا برای کاهش خسارات ناشی از سرعت بالای جریان در پایین سدها استفاده می شود. پرش هیدرولیکی که در پایین دست جریان اتفاق می افتد از نوع جریان سریعاً متغیر است که با تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی در جریان های با سطح آزاد تشکیل می شود. عمق جریان در فاصله کوتاهی به میزان زیادی تغییر می کند. این پدیده همراه با اختلاط هوا در جریان آب می باشد. در این پدیده مقدار قابل توجهی از انرژی جریان در محدوده پرش تلف می شود. از طرفی جریان هایی با عمق تدریجاً متغیر، بخش عمده ای از جریان در کانال های روباز را تشکیل می دهد به همین دلیل بررسی جریان های ترکیبی تدریجاً و سریعاً متغیر بر روی انواع هندسه پله سرریز پلکانی مهم است.

در سالهای گذشته مطالعات متعددی در زمینه بررسی جریان روی سرریز های پله ای انجام شده است. احدیان و آقامجیدی [۱] با استفاده

<sup>\*</sup> نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rafee@semnan.ac.ir

افزار Fluent شبیه سازی عددی نمودند. نتایج محاسبه شده نشان می دهد که ضریب اصطکاک در جریان کانال پله دار به طور قابل ملاحظه ای از جریان کانال صاف بیشتر است. مروتی و همکاران [۵] برای بررسی اثر تعداد زیادی از پله های استخری و تخلیه روی الگوی جریان به ویژه اتلاف انرژی، جریان روی سرریز پلکانی را به روش حجم سیالی (VOF) و با مدل آشفتگی k-ε شبیه سازی عددی نمودند و با داده های تجربی مقایسه کردند. آنها دریافتند کاهش تعداد پله در سرریز پلکانی استخری سرعت جریان را کاهش و اتلاف انرژی در انتهای سرریز و مقدار آشفتگی انرژی جنبشی را افزایش می دهد. شاه حیدری و همکاران [۶] جریان رویه ای بالای سرریز پلکانی به روش حجم سیالی (VOF) با مدل k-ε RNG در نرم افزار Flow 3D شبیه سازی عددی نمودند. مدل سازی توسط ۲ اندازه پله، ۶ پیکربندی، ۴ شیب سرریز متفاوت و ۴ نقطه تخلیه در آزمایشات عددی بررسی شد و نتایج مدل عددی سطح آب با پروفیل سطح آزاد آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها دریافتند ضریب تخلیه برای یک سرریز پلکانی در مقایسه با یک سرریز نرم معادل افزایش می یابد.

اقبال زاده و جوان [۷] جریان رویه ای بالای سرریزهای پلکانی برای بررسی توانایی مدل حجم سیالی (VOF) و مدل مخلوط توسط نرم افزار Fluent شبیه سازی نمودند و نتایج عددی شبیه سازی از سطح آزاد و سرعت هوا در آب و شرایط هوای ورودی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. آنها دریافتند که مدل مخلوط برای شبیه سازی سطح آزاد بهتر است. اوتان و همکاران [۸] مشخصات جریان روی سرریز پلکانی با هندسه پله متفاوت در آزمایشگاه مدل سازی نمودند و میزان جریان، نسبت عمق پی در پی و اتلاف انرژی در ناحیه غیر هوادهی بالای هر مدل از سرریز پلکانی را پیش بینی نمودند. موسوی جهرمی و همکاران [۹] برای محاسبه اتلاف انرژی جریان ریزشی را شبیه سازی عددی نمودند و با نتایج آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک برای چندین سرریز پلکانی کوچک و بزرگ مقایسه کردند. آنها متوجه شدند که در نتایج شبیه سازی عددی جریان خط حدود ۶٪ بر روی سرریز پلکانی با پله های کوچک و بزرگ (با شیب ۱۵ تا ۲۵ درجه) با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

رفعی و سعیدی و قوشچی [۱۰] الگوی جریان سطح آزاد تدریجاً متغیر و سریعاً متغیر را بر روی مانع شیبدار گوه ای شکل در کانال مستطیلی با مقایسه نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها با مقایسه نتایج پروفیل سطح آب به دست آمده از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی، یافتند که پروفیل سطح آب حاصل در آزمایشها به مدل k-ε استاندارد نزدیک تر است. همچنین کارکرد k-ε استاندارد در تعیین سطح آزاد آب در دبی های مختلف بررسی شده است.

در این مقاله جریان کانال روباز مستطیلی با ۸ هندسه پله مختلف به صورت دو بعدی مدل سازی شده است و مقدار اتلاف انرژی محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. مدل سازی بر اساس معادلات دینامیک سیالات محاسباتی مانند بقای جرم و بقای مومنوم می باشد. برای این منظور از روش حجم سیالی (VOF) برای حل معادلات حاکم و تعیین مرزهای مایع و هوا استفاده شده است. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج و بررسی کارکرد مدلها، ابتدا مدلهای آشفتگی مختلف برای شبیه سازی جریان در نرم افزار مورد استفاده

قرار گرفته است با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و سپس در پنج دبی مختلف برای ۸ هندسه شبیه سازی انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

## ۲- معرفی روش عددی و آزمایشگاهی ۱-۲ روش عددی

مدل حجم سیالی (VOF) برای کاربردهایی نظیر جریان در کانال روباز که در آن دو سیال غیر قابل اختلاط فرض می شوند، مناسب است. در این مدل، معادله کسر حجمی هر فاز  $(\alpha_q)$  (معادله ۱) حل می شود. خواص سیال معادل در هر سلول محاسباتی با استفاده از معادلاتی مانند معادله (۲) تعیین می شود و از این خواص برای ادامه محاسبات استفاده می شود. یعنی چنانچه در یک سلول کسر حجمی مربوط به آب صفر باشد، خواص هوا برای آن سلول در نظر گرفته می شود. معادله کسر حجمی فاز q ام مختلف در مدل حجم سیال (VOF) به صورت زیر داده می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق فرض شده است که در فصل مشترک مایع و گاز تبخیر رخ ندهد.  $\alpha_q$  کسر حجمی فاز q است و برای محاسبه خواص سیال می توان نوشت:

$$(\rho = \alpha_w \rho_w + \alpha_a \rho_a) \quad (2)$$

$$(\mu = \alpha_w \mu_w + \alpha_a \mu_a) \quad (3)$$

در معادله فوق مقدار  $\alpha_w$  کسر حجمی آب و  $\alpha_a$  کسر حجمی هوا هستند که با استفاده از معادلات (۱) تعیین می شوند. معادله پیوستگی بصورت زیر بیان می شود:

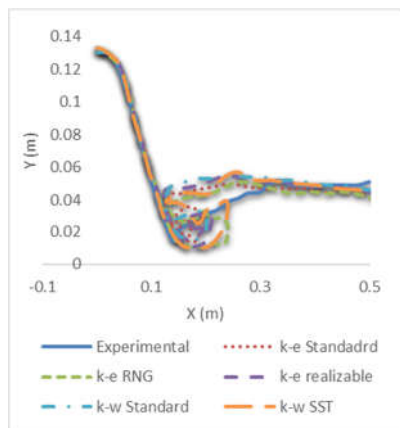
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \rho g_i + F_i \quad (4)$$

$F_i$  مولفه های نیروهای بدنی غیر از وزن را نشان می دهد. در سلولهای مرز بین آب و هوا، بردار نیروی بین سطوح مایع و هوا بصورت نیروی کشش سطحی با معادله زیر بیان می شود [۱۱]

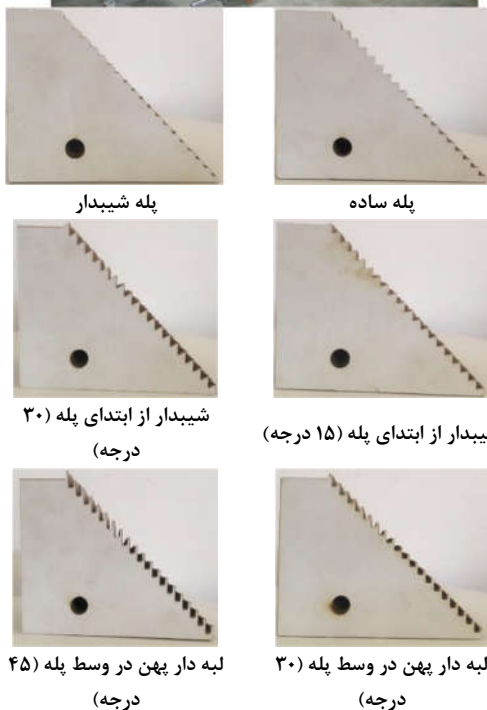
$$\vec{F} = \sigma_{wa} \frac{\alpha_w \rho_w \kappa_a \nabla \alpha_a + \alpha_a \rho_a \kappa_w \nabla \alpha_w}{0.5(\rho_w + \rho_a)} \quad (5)$$

در معادله فوق  $\vec{\nabla} \cdot \frac{\nabla \alpha_q}{|\nabla \alpha_q|}$  و  $\kappa_q$  اندیسهای  $\vec{a}$  و  $\vec{w}$  به هوا و آب اشاره دارد. برای مدلسازی تنشهای رینولدزی از مدلهای مختلف دو معادله ای نظیر SST k-ω و k-ε استفاده شده است. پرش هیدرولیکی در این مقاله به وسیله سرریز های پلکانی ایجاد شده است. ۸ هندسه سرریز پلکانی با ۲۰ پله با ارتفاع کلی ۰/۱۰۶ متر در کانال قرار داده شده است که ارتفاع ورودی آب در ورودی کانال در هر دبی به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. در این مطالعه، جریان به صورت غیردائم<sup>۱</sup> و با بازه های زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه حل شده است. دو فاز آب و هوا در جریان در نظر گرفته شده است. شبکه بندی میدان حل کانال در نرم افزار

<sup>1</sup>Transient



شکل ۱- پروفیل سطح آزاد پیش بینی شده برای دبی lit/s/۷۵۴



شکل ۲-نمایی از کانال روباز آزمایشگاهی و شکل برخی از سرریز های پلکانی به کار رفته

Gambit، شرایط مرزی توزیع سرعت در ورودی آب و توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی در ورودی هوا و خروجی در نظر گرفته شد و برای کف کانال نیز شرط مرزی دیواره قرار داده شد. سه شبکه بندی مختلف با تعداد ۲۶۰۲۲، ۱۰۳۸۹۲ و ۱۶۲۲۷۰ تولید شده است و میزان اتلاف انرژی در آنها با هم مقایسه شده است میزان اتلاف انرژی در شبکه ۱۰۳۸۹۲ و ۱۶۲۲۷۰ تقریباً بر هم منطبق هستند و لذا با شبکه ای با تعداد سلول ۱۰۳۸۹۲ می توان جوابهای مستقل از شبکه دست یافت. با اعمال شرایط مرزی، جریان مورد نظر در شبیه سازی گردید. نتایج عمق آب برحسب طول کانال و مقدار اتلاف انرژی حاصل از پنج مدل آشفتگی با هم مقایسه شد. در جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

جدول ۱- میزان اتلاف انرژی در هندسه پله ساده سرریز پلکانی در مدل های آشفتگی مختلف

مدل آشفتگی	ارتفاع در پایین دست (m)	سرعت در پایین دست (m/s)	اتلاف انرژی عددی (m)	اتلاف انرژی آزمایشگاهی (m)	درصد خطا اتلاف انرژی
k-ε Standard	۰/۰۱۹	۰/۶۸۸	۰/۰۹۵	۰/۱۰۱	٪ ۶/۳۱
k-ε RNG	۰/۰۱۵	۰/۹۳۱	۰/۰۷۹	۰/۱۰۱	٪ ۲۷/۸۴
k-ε Realizable	۰/۰۱۸	۰/۷۷۱	۰/۰۹۰	۰/۱۰۱	٪ ۱۲/۲۲
k-ω Standard	۰/۰۱۵	۰/۸۴۷	۰/۰۸۷	۰/۱۰۱	٪ ۱۶/۰۹
SST k-ω	۰/۰۱۴	۰/۷۱۳	۰/۰۹۸	۰/۱۰۱	٪ ۳/۰۶

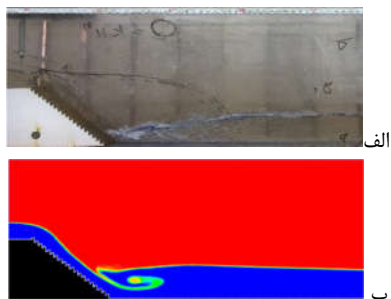
همانطور که در شکل ۱ دیده می شود در قسمت جریان تدریجاً متغیر اختلاف بین نتایج شبیه سازی با مدل های توربولانسی مختلف و نتایج آزمایشگاهی بسیار کم است لیکن در قسمتی که جریان دچار پرش هیدرولیکی می شود این اختلافها قابل ملاحظه خواهد بود. با توجه به شکل ۱ و جدول ۱، مدل آشفتگی SST k-ω نتایج نزدیک تری به پروفیل آزمایشگاهی دارد و درصد خطای اتلاف انرژی آزمایشگاهی و عددی در آن ۳/۰۶ درصد می باشد.

## ۲-۲- معرفی روش آزمایشگاهی

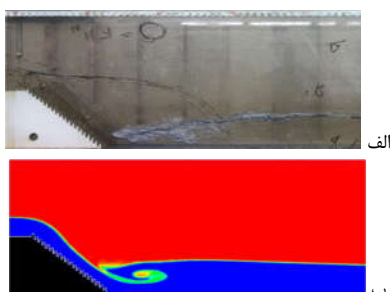
در این مطالعه از کانال مستطیلی به ابعاد ۵×۰/۲۵×۰/۰۷۵ متر در آزمایشگاه مکانیک سیالات دانشگاه سمنان استفاده شده است. نمایی از دستگاه و شکل برخی از پلکانها در شکل ۲ آورده شده است. برای بررسی جریان دو نقطه بر روی سرریز پلکانی انتخاب می شود. یکی بر روی سطح آزاد در قسمت ابتدای ورود به سرریز پلکانی است و دیگری بر روی سطح آزاد و قبل از ایجاد پرش هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. نقطه یک در ورودی آب بالای سرریز و نقطه دوم در انتهای پله ها و در نزدیکی پرش و در فاصله ۰/۱۴ متری از ابتدای کانال انتخاب شده است این کار برای هر هندسه، پنج دبی مختلف انجام شده است. برای هر دبی ابتدا عمق قسمت بالا دست و پایین دست کانال اندازه گیری شده است. سپس از وضعیت سطح آزاد آب عکس گرفته شد. نتایج با آنچه که از شبیه سازی عددی حاصل می شود مقایسه گردید.

### ۳- بررسی نتایج

پروفیل سطح آب حاصل از آزمایشگاه و کانتورهای چگالی جریان با استفاده از نرم افزار Fluent با مدل SST k- $\omega$  در دبی مرحله سوم بدست آمده است که در شکل‌های ۳ تا ۶ برخی از نتایج وضعیت سطح آزاد آب آمده است. پس از حل معادلات کسر حجمی، کانتور کسر حجمی هوا در این شکلها ترسیم شده است. کمترین مقدار این کانتور عدد صفر است (رنگ آبی) که بخش آب را در جریان نشان می دهد و بیشترین مقدار عدد یک (رنگ قرمز) است که بخش هوا را نشان می دهد. محل تغییر چگالی از چگالی آب به هوا، به عنوان فصل مشترک شناخته شده است. برای استخراج داده ها از تصویر از نرم افزار Get data استفاده شده است.

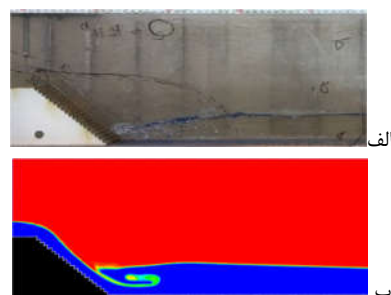


شکل ۸- وضعیت سطح آزاد آب برای پله دار پهن از وسط پله ۳۰ درجه (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی

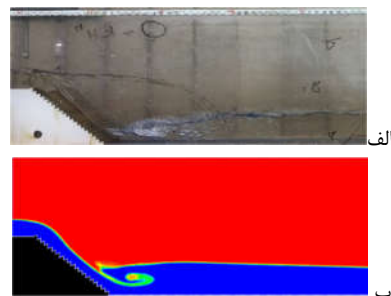


شکل ۶- وضعیت سطح آزاد آب در آزمایش برای پله دار پهن در وسط پله ۴۵ درجه (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی

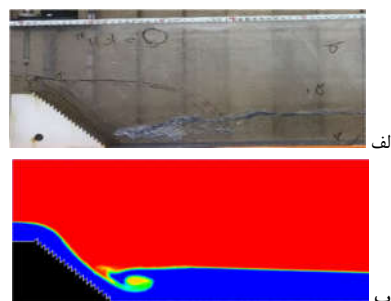
برای هر ۸ هندسه سرریز پلکانی در پنج دبی همانند شکل‌های ۳ تا ۶ آزمایش شد و با استفاده از نرم افزار Get data مختصات مکانی سطح آزاد استخراج شده و اتلاف انرژی ها مقایسه شد (شکل ۷ را ببینید). یکی از دلایل اختلاف بین میزان اتلاف انرژی شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی وجود زبری در کف کانال می باشد که در نرم افزار در نظر گرفته نشده است. برای انتخاب بهترین هندسه سرریز پلکانی که دارای بیشترین اتلاف انرژی می باشد، در شکل ۷ (الف و ب) نمودار مقدار اتلاف انرژی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی بر حسب دبی رسم شده است. کمترین درصد اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای افت هد به مقدار ۱/۱۲٪ برای پله شیبدار از ابتدای پله با زاویه ۳۰ درجه می باشد. بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی مربوط به سرعت ورودی ۰/۸۴۷ m/s بر روی سرریز پلکانی با هندسه پله لبه دار پهن در وسط پله با زاویه ۴۵ درجه به مقدار ۲۶/۵۰ درصد می باشد.



شکل ۳- وضعیت سطح آزاد آب برای پله شیبدار از ابتدا پله ۱۵ درجه (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی



شکل ۴- وضعیت سطح آزاد آب برای پله شیبدار از ابتدا پله ۳۰ درجه (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی



شکل ۵- وضعیت سطح آزاد آب برای پله شیبدار از ابتدا پله ۴۵ درجه (الف) آزمایشگاهی (ب) عددی

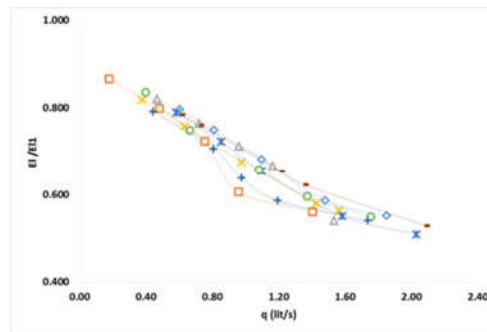
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
چگالی فاز q ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_q$
نرخ استهلاک بر واحد جرم ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )	$\epsilon$
نرخ مخصوص اتلاف (1/s)	$\omega$
انرژی جنبشی توربولانسی ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )	$k$
لزجت ( $\text{kg/m.s}$ )	$\mu$
مولفه های سرعت نوسانی (m/s)	$\dot{u}_i$
کسر حجمی فاز q	$\alpha_q$

## ۵- مراجع

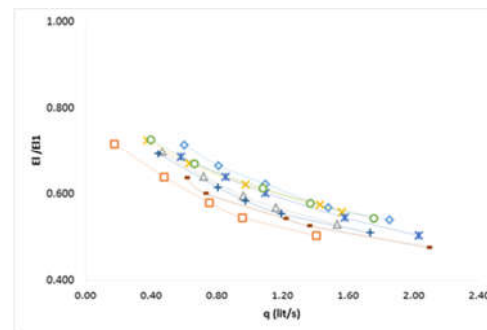
- [1] Ahadin J., Agha Majidi R., Investigation of Geometric Effect of Steps on Energy Dissipation on Stepped Spillway, Ambient Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 491-503, 2014.
- [2] Mohammad Rezapour Tabari M., Tavakoli S., Effect of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 41, pp. 1215-1224, 2016.
- [3] Abdel Aal G.M., Sobeah M., Helal E., El-Fooly M., Improving Energy Dissipation on Stepped Spillways Using Breakers, Ain Shams Engineers Journal, Vol. 9, N0. 4, pp. 1887-1896, 2018.
- [4] Zhi-Yong D., Hun-Wei L. J., Numerical Simulation of Skimming Flow Over Mild Stepped Channel, Journal of Hydrodynamics, Vol. 18, No.3, pp. 367-371, 2006.
- [5] Morovati K., Eghbalzadeh A., Soori S., Numerical Study of Dissipation of Pooled Stepped Spillways, Civil Engineering Journal, Vol. 2, No. 5, pp. 208-220, 2016.
- [6] Shahheydari, H., Nodoshan, E.J., Barati, R., Azhdary Moghadam M., Discharge coefficient and energy dissipation over stepped spillway under skimming flow regime, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 19, pp. 1174-1182, 2015.
- [7] Eghbalzadeh A., Javan M., Comparison of Mixture and VOF Models for Numerical Simulation of Air-entrainment in Skimming Flow over Stepped Spillways, 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering, Procedia Engineering, No. 28, pp. 657-660, 2012.
- [8] Otun J. A., Munta S., Adie D. B., Modelling Flow over Stepped Spillway with Varying Chute Geometry, Nigerian Journal of Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 206-212, 2012.
- [9] Musavi-Jahromi H., Bina M., Salmasi F., Physical and Numerical Modeling of the Nappe Flow in the Stepped Spillways, Journal of Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, pp. 1720-1725, 2008.

- [۱۰] سعیدی آ.، قوشچی آ.، رفعی ر.، بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان تدریجاً متغیر و سریعاً متغیر بر روی یک بستر شیب دار گوه ای شکل در کانال روباز، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۴۷، ش. ۴، ص. ۱۳۵-۱۴۲، ۱۳۹۶.
- [11] Fluent 6.3.26, User's Guide, Fluent Inc., 2006.

الف



ب



- - simple
- ◇ - sloping
- △ - sloping from the beginning of the step with a 15 degree angle
- × - sloping from the beginning of the step with a 30 degree angle
- - sloping from the beginning of the step with a 45 degree angle
- - Wide edges in the middle of the step with a 15 degree angle
- ⊕ - Wide edges in the middle of the step with a 30 degree angle
- ⊖ - Wide edges in the middle of the step with a 45 degree angle

شکل ۷- میزان اتلاف انرژی نسبت به انرژی اولیه در ۸ هندسه مختلف (الف) نتایج آزمایشگاهی (ب) نتایج عددی

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع مستطیلی با وجود ۸ هندسه سرریز پلکانی به صورت دو بعدی با استفاده از نرم افزار Fluent با بکارگیری پنج مدل مختلف آشفتگی انجام شد و پروفیل سطح آزاد آب و مقدار اتلاف انرژی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که مدل  $k-\omega$  SST وضعیت سطح آزاد آب را با دقت بهتری نسبت به مدل های آشفتگی دیگر شبیه سازی نموده است و درصد خطای کمتری نسبت به بقیه مدل های آشفتگی دارد. وضعیت سطح آزاد پیش بینی شده بر روی سرریز به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. در ناحیه ای که جریان سریعاً متغیر است و پرش هیدرولیکی اتفاق می افتد، به دلیل اعوجاج بالا و سریع، مدل های آشفتگی نمی توانند به خوبی شبیه سازی را انجام دهند.

## ۵- نمادها

$\bar{V}_q$  سرعت فاز q (m/s)