

بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب جریان در سرریزهای زیگزاگی سهموی شکل

نادر بنی تمیم و محمد حیدرنژاد

دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۳۸۶-۳۹۷

Vol. 7(3), Autumn 2021, 386-397

DOI: 10.22034/JEWE.2021.261054.1482

**Experimental and Numerical Study of the
Discharge Coefficient in Parabolic Labyrinth
Weirs**

Bani Tamim, N. and Heidarneshad, M.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

بنی تمیم، ن. و حیدرنژاد، م. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب جریان در سرریزهای زیگزاگی سهموی شکل. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۳، صفحات: ۳۸۶-۳۹۷.

Citing this paper: Bani Tamim, N. and Heidarneshad, M. (2021). Experimental and numerical study of the discharge coefficient in parabolic labyrinth weirs. Environ. Water Eng., 7(3), 386-397. DOI: 10.22034/JEWE.2021.261054.1482

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی و عددی ضریب جریان در سرریزهای زیگزاگی سهموی شکل

نادر بنی تمیم^۱ و محمد حیدر نژاد^{۲*}^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*نویسنده مسئول: m.heidarnejad@iauhvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۹/۱۸]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۱۱/۲۰]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۱۱/۲۶]

چکیده

افزایش ظرفیت هیدرولیکی انتقال جریان از روی سرریز به ازای ارتفاع سطح آب معین در بالادست سرریز، از طریق افزایش طول مؤثر تاج سرریز در واحد عرض مقطع جریان میسر است. در پژوهش حاضر به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیه‌سازی سه بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی قوسی (تک سیکل و دو سیکل) در محدوده نسبت بار هیدرولیکی (۰/۷۴ - ۰/۰۵) به کمک نرم افزار Flow3D از طریق تحلیل آماری و مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. سرریزهای مورد استفاده در این پژوهش، تعداد سه عدد (تک سیکل) با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۵ cm و سه عدد (دو سیکل) با ارتفاع‌های ۵، ۶ و ۷/۵ cm در یک فلوم مستطیلی به طول ۸/۴، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ m مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که داده‌های مدل عددی هماهنگی مناسبی با داده‌های مدل آزمایشگاهی داشتند. طبق نتایج، با افزایش ۵۰٪ ارتفاع سرریز، ضریب دبی حدود ۲۵/۵٪ افزایش نشان داد. همچنین ضریب دبی در سرریز زیگزاگی قوسی تک سیکل در نسبت‌های ارتفاع هیدرولیکی کوچک‌تر از ۰/۴ بیش‌تر از سرریز زیگزاگی قوسی دو سیکل بوده و این مقدار در ارتفاع‌های هیدرولیکی بالاتر، تقریباً مساوی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سرریز زیگزاگی قوسی؛ ضریب دبی؛ مدل عددی Flow3D

۱- مقدمه

یکی از اجزای مهم پروژه‌های آبی و سدسازی، سرریز است. سرریزها سازه‌های هیدرولیکی مهمی هستند که برای اهداف مختلفی ساخته می‌شوند. سرریزهای کنگره‌ای از سازه‌های هیدرولیکی مهم برای تنظیم سطح آب و کنترل جریان در کانال‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها به شمار می‌آیند (Falvey 2003). محور تاج این نوع سرریزها به صورت غیرخطی بوده و در یک عرض معین، طول تاج بیشتری نسبت به سرریزهای متداول خطی در پلان دارند، به طوری که در پلان، سرریز از دیواره‌های متصل به هم تشکیل یافته است و با هندسه مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی، قوسی و با تناوب در عرض جریان تکرار می‌شود. مبنای ساخت سرریز زیگزاگی این است که از طریق هندسه آن، بتوان به طور قابل توجهی طول تاج را مطابق با عرض کانال موردنظر و متناسب با یک سرریز خطی افزایش داد و تحت بار هیدرولیکی معادل، کلیه جریان یا قسمتی از آن را به نحوی کنترل و از خود عبور دهد. به طور کلی از نظر هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی در بارهای هیدرولیکی پایین عملکرد مطلوبی دارند ولی با افزایش ظرفیت آبدردی، به دلیل تداخل تیغه‌های جریان در دماغه سرریز، بازدهی آن‌ها کاهش می‌یابد (Montazemian et al. 2017). طبق نتایج (Bremer and Oertel 2017)، سرریز PKW با ضخامت دیوار 5 mm (حداقل ضخامت دیواره) در مقایسه با سرریز PKW با چهار برابر دیواره‌های ضخیم‌تر، در دبی‌های پایین به میزان 40٪ کارایی بیشتری دارد.

Ghanbari and Heidarnajad (2020) در پژوهشی به بررسی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی سه‌گوش و مستطیلی پرداختند. در این پژوهش اثر دماغه‌ی سه‌گوش بر روی ضریب دبی سرریز کلید پیانویی و همین‌طور به منظور بررسی هیدرولیک جریان و مقایسه دبی عبوری، شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان بر روی سرریزهای کلید پیانویی سه‌گوش و مستطیلی به کمک نرم‌افزار Flow3D به انجام رسید نتایج نشان داد که با تغییر در دماغه‌ی سرریز کلید پیانویی ضریب دبی حدود 85٪ افزایش می‌یابد. (Gharibvand et al. 2020) در پژوهشی به بررسی عددی هیدرولیک جریان در سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی دوزنقه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که داده‌های عددی تطابق بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی

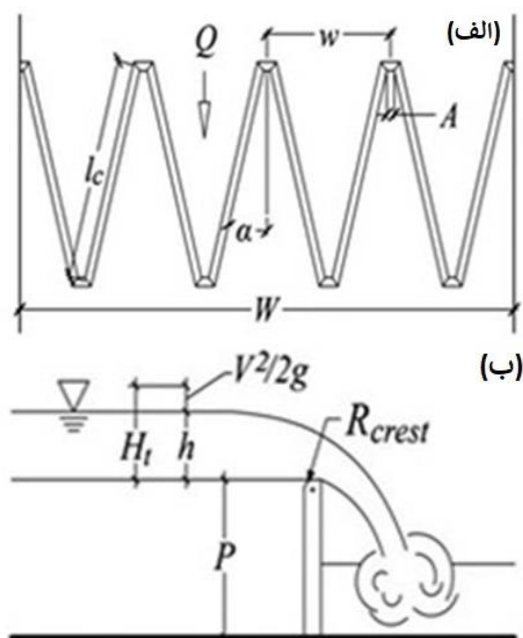
دارند و با افزایش ارتفاع 50٪ سرریزها، ضریب دبی به طور متوسط 25٪ افزایش می‌یابد. Karimi Chahartaghi et al. (2019) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی و عددی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با پلان قوسی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه به بررسی عددی و آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با پلان قوسی با نام اختصاری ATPKW¹ در شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی پرداختند. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر زاویه‌ی قوس روی عملکرد هیدرولیکی سرریزها بود. برای این منظور چهار مدل سرریز با پلان خطی (LRPKW²) و پلان قوسی (ATPKW) مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده برای مدل‌های ATPKW و LRPKW نشان داد که در هدهای بالا، مدل‌های ATPKW عملکرد هیدرولیکی بهتری نسبت به مدل‌های LRPKW ارائه می‌دهند. از طرف دیگر، مدل LRPKW عملکرد بهتری را در هدهای پایین از خود نشان می‌دهد. Mohammadrezapour Tabari and Omid (2019) در پژوهشی به شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریز کلید پیانویی با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D پرداختند. در این پژوهش، سرریز کلید پیانویی ساده با مدل آشفتگی k-ε در نرم‌افزار Flow3D و دبی 0/19، 0/142، 0/1، 0/06 m³/s مدل‌سازی شده است و پس از استخراج داده‌های نرم‌افزاری، نمودار دبی اشل، رسم و نتایج با مدل آزمایشگاهی اندرسون مقایسه شد که از دقت خوبی برخوردار بود. در پژوهشی (Dabbling et al. 2018) به بررسی سرریزهای زیگزاگی با زوایای مختلف جریان نزدیک شونده پرداختند. سه زاویه مختلف جریان نزدیک شونده آزمایش شد، شامل عمود با سرریز ($\beta = 0^\circ$); زاویه 15° ($\beta = 15^\circ$); و زاویه 45° ($\beta = 45^\circ$). نتایج نشان داد که با افزایش زاویه، ضریب دبی به میزان 11٪ کاهش یافت. et Bilhan al. (2018) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی و عددی سرریزهای زیگزاگی دایره‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که مدل عددی با درصد خطای کمتر از 4٪ قادر به شبیه‌سازی جریان بر روی سرریزهای زیگزاگی دایره‌ای است. در پژوهش دیگری (Belzner et al. 2017) به بررسی و مقایسه بین سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی در رودخانه‌های کشور آلمان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان

¹Arched Trapezoidal Piano Key Weir²Linear Rectangular Piano Key Weir

(2010) توسعه داده شدند می‌توانند برای نسبت بار هیدرولیکی تا مقدار ۲ و یا حتی بیش‌تر نیز قابل قبول باشند. در پژوهش حاضر با شبیه‌سازی هیدرولیک جریان سرریزهای زیگزاگی با پلان قوسی در سیکل‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار Flow3D به بررسی روند ضریب آبگذری، منحنی دی - اشل و نیز مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

متغیرهای هندسی برای طراحی سرریز زیگزاگی در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌طور کلی پارامترهای مربوط به خصوصیات هندسی، هیدرولیکی و شکل در سرریزهای زیگزاگی، شامل زاویه دیواره جانبی سرریز با جهت اصلی جریان (α) (برای این پارامتر، پلان سرریز می‌تواند از شکل مستطیل ($\alpha = 0$) به شکل دوزنقه‌ای ($\alpha \neq 0$) و به شکل مثلثی ($\alpha = \alpha_{max}$) و سرانجام به شکل قوسی تغییر یابد)، بزرگنمایی طولی یا نسبت طول به عرض کل سرریز، (L/Wt)، نسبت عرض سیکل به ارتفاع تاج (w/p) در سرریز زیگزاگی، نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع سرریز (H_0/P)، نسبت عرض داخلی دماغه به عرض سیکل (A/w)، ارتفاع تاج سرریز (P) و ضخامت دیواره سرریز (T) می‌باشند.



شکل ۱ - پارامترهای سرریزهای زیگزاگی: (الف) - هندسی و (ب) هیدرولیکی

Fig. 1 Parameters of labyrinth weirs: a) geometric and b) hydraulic

داد که میزان حساسیت استغراق برای سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای و مستطیلی در مقایسه با سرریز کلید پیانویی و سرریز زیگزاگی مثلثی کمی بیشتر است و سرریز زیگزاگی مثلثی کمترین کارایی را در بین تمامی سرریزها دارد. (2015) Delgado et al. با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب دی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را به‌وسیله نصب سازه‌های هیدرودینامیکی در قسمت دماغه‌های بالادست سرریز، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد سازه‌های مورد استفاده، به‌عنوان یک روش هیدرودینامیکی، بر روی ضریب دی و نیز میزان دی عبوری سرریز، تأثیر مثبت داشته‌اند. (2013) Paxson et al. در پژوهشی به بررسی و مقایسه بین سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی از لحاظ شرایط هیدرولیکی، هزینه، قابلیت اجرایی و عملکرد پرداختند. شبیه‌سازی سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی به‌منظور افزایش دی عبوری برای یک عرض معین صورت گرفت. طبق نتایج، برای سرریزهای کلید پیانویی به خاطر شکل آن‌ها نسبت به سرریزهای زیگزاگی در مکان‌هایی که فضای کافی (طول و یا عرض) برای جانمایی سرریز وجود نداشته باشد (به‌عنوان مثال، تاج سدهای بتنی وزنی)، مناسب‌تر هستند. برای کانال‌ها بدون محدودیت در جانمایی سرریز، ممکن است هر دو سرریز کلید پیانویی و زیگزاگی عملکرد مناسبی داشته باشند. Anderson and Tullis (2013) با مقایسه سرریزهای کلید پیانویی و زیگزاگی بیان نمودند، در پروژه‌هایی که در آن محدودیت فضای ساخت در طول پایه (Bb) و عرض (Wt) وجود دارد، سرریز کلید پیانویی دی عبوری بیشتری از خود نشان می‌دهد، در حالی که اگر محدودیت فضایی وجود نداشته باشد، سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای با زاویه دیواره جانبی (α) برابر با 7° و 12° می‌تواند راندمان آبگذری بالاتری نسبت به سرریز کلید پیانویی در همان عرض داشته باشد. Crookston et al. (2012) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی دوزنقه‌ای را برای نسبت‌های بار هیدرولیکی بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که نرم‌افزار (Flow3D) می‌تواند رابطه دی عبوری با بار هیدرولیکی سرریز زیگزاگی دوزنقه‌ای را که از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی به‌دست آمده از جمله بار هیدرولیکی در بالادست سرریز نسبت به تاج آن را به‌خوبی پیش‌بینی کند. علاوه بر این، منحنی‌های طراحی هیدرولیکی که توسط Crookston

۱-۲- مدل آزمایشگاهی

دبی جریان توسط یک دستگاه دبی سنج دیجیتالی با درصد خطای ۰/۵٪ تعیین شد. به منظور آرام نمودن جریان بالادست سرریز و کاهش نوسانات سطح آب، در ورودی فلوم از یونولیت از جنس ورق PVC استفاده گردید. در مجموع در این پژوهش، تعداد ۴۱ دبی، در حالت جریان آزاد و حالت مستغرق و از نظر مقدارهای دبی‌های مذکور (در حالت جریان آزاد و مستغرق)، دبی‌های $1/4 - 19/5 \text{ m}^3/\text{hr}$ در فلوم برقرار شد. یادآور می‌شود که با توجه به در نظر گرفتن سیستم تخلیه فلوم، انجام تمام آزمایش‌ها، بدون کنترل پایین دست صورت گرفت.

مطالعات آزمایشگاهی پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک کاربردی گروه آبیاری مجتمع عالی آموزش صنعت آب و برق خوزستان- اهواز انجام گرفته است. فلوم آزمایشگاهی دارای مقطع مستطیلی، طول $8/4 \text{ m}$ و عرض 30 cm است (شکل ۲). پس از استقرار مدل‌های آزمایشی، آب از طریق مخزن تأمین آب و پمپ به فلوم آزمایشگاهی منتقل می‌شود و اندازه‌گیری‌ها شامل قرائت ارتفاع سطح آب و دبی انجام می‌گیرد. ارتفاع سطح آب بالادست سرریز، قبل از افت سطح آب، به وسیله عمق سنج با دقت $\pm 1 \text{ mm}$ و



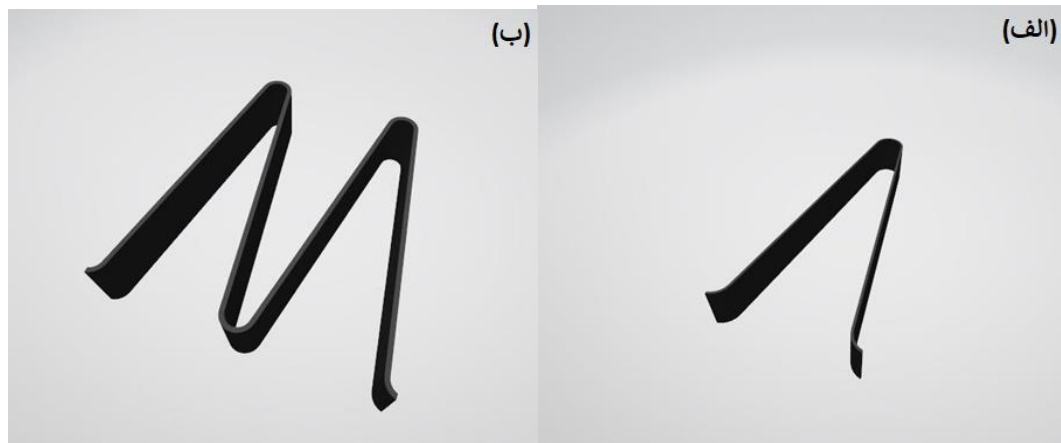
شکل ۲- نمای کلی از تجهیزات و فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه: (الف)- سرریزهای زیگزاگی قوسی تک سیکل و دو سیکل و (ب)- فلوم آزمایشگاهی مستطیلی

Fig. 2 Overview of laboratory equipment and flume used in the laboratory a) One and Two-cycle arched labyrinth weir b) Rectangular laboratory flume

به‌طور کلی طراحی و ساخت سرریزهای مورد استفاده در این پژوهش بر اساس توصیه پژوهش‌گران پیشین بوده است (Zeraat et al. 2019) لذا بر همین اساس از ۶ عدد سرریز زیگزاگی قوسی (تک سیکل و دو سیکل) جهت انجام

شدند. لازم به ذکر است که در هنگام نصب سرریزها، تراز بودن تاج آن‌ها با استفاده از تراز بنایی کنترل شد. ضمناً عمود بودن دیواره سرریز بر روی کف فلوم، هم در مرحله نصب و هم بعد از قرار گرفتن آب در پشت سرریز، با استفاده از گونیا کنترل شد. شبیه‌سازی‌های مختلف برای ۶ مدل سرریز زیگزاگی قوسی پژوهش حاضر مطابق جدول (۱) به انجام رسید.

آزمایش‌ها استفاده شد. سرریزهای مورد استفاده در این پژوهش، تعداد سه عدد (تک سیکل) با ارتفاع‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۵ cm و سه عدد (دو سیکل) با ارتفاع‌های ۵، ۶ و ۷/۵ بودند. شکل (۳) نمایی از ابعاد سرریزهای پژوهش حاضر ساخته شده را در تعداد سیکل‌های مختلف و جدول (۱) مشخصات مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهند. سرریزهای مذکور از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۵ mm ساخته



شکل ۳- طرح و ابعاد مدل سرریزهای زیگزاگی قوسی مورد آزمایش در پژوهش حاضر: الف)- سرریز زیگزاگی قوسی تک سیکل و ب)- سرریز زیگزاگی قوسی دو سیکل

Fig. 3 Design and dimensions of the arc labyrinth weirs tested in this study: a) One-cycle arched labyrinth weir; b) Two-cycle arched labyrinth weir

جدول ۱ ویژگی‌های سرریزهای زیگزاگی قوسی مورد استفاده در این مطالعه

Table 1 Specifications of the arc labyrinth weirs used in this study

Model	Total height of the weir crest P (cm)	Total length of the weir crest L (cm)	Total width of the weir crest W (cm)	Total length of the weir crest / Total width of the weir crest L/W	No. of cycles
W ₁ -30-10	10	148	30	4.93	1
W ₁ -30-12	12	148	30	4.93	1
W ₁ -30-15	15	148	30	4.93	1
W ₂ -15-5	5	148	15	9.87	2
W ₂ -15-6	6	148	15	9.87	2
W ₂ -15-7.5	7.5	148	15	9.87	2

کارایی هیدرولیکی سرریزهای ریزشی آزاد برای یک هد ثابت، ارتباط مستقیم با طول سرریز داشته و ضریب دبی (C_d) این نوع سرریزها با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود (Falvey 2003).

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H_t^{3/2} \quad (1)$$

که، C_d ضریب دبی، g شتاب ثقل، H_t مجموع هد بالادست سرریز (ارتفاع پیزومتریک (H) تاج سرریز به علاوه انرژی جنبشی (V²/2g)، L طول تاج است. به‌طور کلی کمیت‌های مؤثر در ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) ارائه نمود (Falvey 2003).

۲-۲- تحلیل ابعادی سرریزهای زیگزاگی قوسی

یکی از ابزارهای اولیه برای انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی، تحلیل ابعادی است که هدف از آن تعیین نسبت‌های بدون بعد است. بدین منظور در اولین گام باید متغیرهای مؤثر بر میزان آبگذری سرریزهای زیگزاگی قوسی مشخص شود و سپس با استفاده از تئوری π باکینگهام، پارامترهای بدون بعد تعیین گردند. پس از تعیین پارامترهای بدون بعد، می‌توان نحوه تأثیرگذاری آن‌ها بر میزان آبگذری سرریزها را مورد بررسی قرار داد.

$$f(W_c, H_c, L_c, S_c, A_c, n_c, D, P, L_1, w, W_t, n_1, T, \alpha, Se, b, Q, V_m, y_m, g, H_0, \mu, \rho, \sigma, \nu) = 0 \quad (2)$$

موانع داخل میدان را در سلول‌های محاسباتی به صورت مقدار جزئی بین صفر و ۱ در نظر می‌گیرد. به نحوی که اگر کل سلول توسط مانع پر شده باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر یک خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود. عبارتهای سرعت و فشار به صورت ضمنی و با استفاده از مقادیر فشار و سرعت زمان‌های سابق در پیوستگی و مومنتم کوپل می‌شوند (Sangsefidi et al. 2015). در این نرم‌افزار، معادلات شبه ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از فن‌های معادلات تخفیف حل می‌شوند که در این مقاله از فن GMRES به عنوان حل‌گر ضمنی فشار استفاده شد.

۲-۳-۱- مش بندی

مدل عددی Flow3D یک شبکه ساختاری سه‌بعدی، متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی برای میدان موردنظر ایجاد می‌کند. به همین منظور و با استفاده از نرم‌افزار Autocad ابتدا یک مدل سه‌بعدی منطبق بر مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی تولید شد و سپس نتایج حاصل به نرم‌افزار Flow3D برای تولید شبکه با به کارگیری دو ابزار مناسب VOF و FAVOR و تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی شد. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزهای کانال اصلی و فرعی، محدوده موردنظر با استفاده از روش‌های VOF و FAVOR شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکه میدان به گونه‌ای تنظیم شد که خطوط شبکه متعام باشند.

در این پژوهش برای انجام محاسبات، در قسمت‌هایی از سرریز که برداشت داده انجام می‌شد اندازه مش‌ها ریزتر و در قسمت‌هایی که نیاز به برداشت داده نبود محدوده مش‌بندی درشت‌تر انتخاب گردید. با توجه به ابعاد مدل فیزیکی طول کانال برای مدل عددی برابر ۱۲۵ cm و ارتفاع آن حداکثر ۲۵ cm بود که مش‌بندی بر این اساس انجام گرفت. به طور میانگین در مجموع تعداد مش‌بندی ایجاد شده در جهت X تعداد ۱۵۸۳۶۰۶، در جهت Y تعداد ۱۵۷۹۰۵۴ و در جهت Z تعداد ۸۲۰۹۰ برای مدل‌ها می‌باشد. پس از تولید شبکه محاسباتی، شرط مرزی و شرایط اولیه، شبیه‌سازی جریان آب انجام شد (شکل ۴).

پارامترهای مؤثر در هندسه کانال شامل W_c عرض کانال، H_c عمق کانال، L_c طول کانال، S_c شیب کانال، A_c سطح مقطع کانال، n_c زبری کانال می‌باشند و پارامترهای هندسی سرریز عبارت‌اند از: D ارتفاع سرریز از تاج تا کف در پایین دست آن، P ارتفاع سرریز از تاج تا کف در بالادست آن، L_1 طول تاج سرریز، w عرض یک سیکل سرریز، W_t عرض کل سرریز، n_1 تعداد سیکل، T ضخامت تاج سرریز، α زاویه دیواره جانبی سرریز با جهت اصلی جریان، S_e فاکتور شکل سرریز، b طول دیواره جانبی. پارامترهای مربوط به خصوصیات جریان و شامل Q ظرفیت آبگذری، V_m سرعت متوسط جریان، y_m عمق نرمال جریان، H_0 بار هیدرولیکی کل جریان بر روی سرریز در بالادست آن و پارامترهای مربوط به سیال نیز شامل g شتاب گرانشی، μ لزجت دینامیکی، ν لزجت سینماتیکی، ρ جرم مخصوص، σ کشش سطحی می‌باشند. با به کارگیری فن تحلیل ابعادی و تلفیق پارامترهای رابطه (۲) رابطه نهایی پارامترهای بدون بعد مؤثر بر ضریب دبی سرریزهای زیگزاگی در این پژوهش به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$C_d = f\left(\frac{H_0}{P}, n_1, \frac{W}{P}\right) \quad (3)$$

۲-۳-۲- مدل عددی

نرم‌افزار Flow3D یک مدل مناسب با بازه کاربرد وسیع برای تحلیل مسائل پیچیده سیالات از جمله جریان‌های سه‌بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند، می‌باشد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود (Marusi et al. 2014). به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده، نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود (Burns 1987). در این پژوهش از مدل RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است. برای حل عددی از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده و معادلات غیر دائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی شده‌اند. در این نرم‌افزار الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود بکار رفته است (Fadaei-Kermani and Barani 2014). این الگوریتم

مقایسه دقیق و بهتر انتخاب و مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. تعداد شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی صورت گرفته برای این پژوهش ۳۴ آزمایش می‌باشد. بعد از ساخت هندسه سرریزها و انتقال به نرم‌افزار Flow3D اقدام به مش‌بندی و تعیین شرایط مرزی و همین‌طور شرایط ورودی شد. برای این منظور تعداد ۸۱ آزمایش در شرایط مدل فیزیکی و ۳۴ شبیه‌سازی در شرایط مدل عددی انجام شد (در مجموع ۱۱۵).

۳- یافته‌ها و بحث

بعد از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، به‌منظور تجزیه و تحلیل دبی عبوری سرریزهای زیگزاگی قوسی، از معادله عمومی سرریزها، رابطه (۱) استفاده شد. از داده‌های اندازه‌گیری شده، به‌منظور تعیین دبی عبوری و بار هیدرولیکی کل برای سرریزهای قرارگرفته در داخل کانال استفاده شد.

۳-۱- عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی قوسی

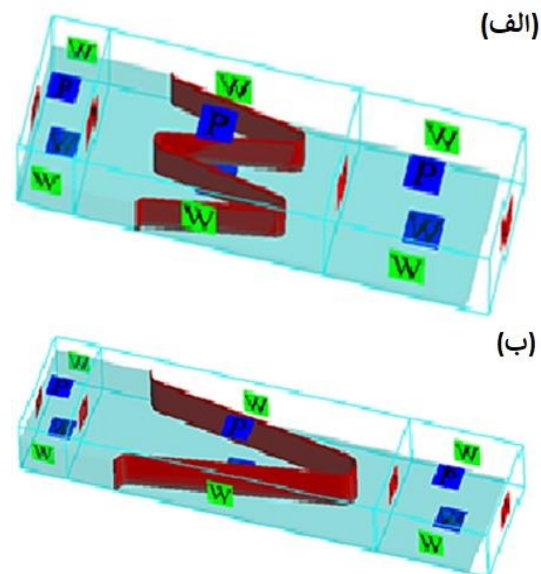
در این پژوهش عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی پلان قوسی با تعداد سیکل‌های مختلف به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مقایسه‌های انجام‌شده نشان داد که در کلیه موارد مورد بررسی، با افزایش بار هیدرولیکی سرریز، ضریب جریان ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است آستانه استغراق موضعی در محدوده $HT/P > 0.48$ رخ داده است.

شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) منحنی ضریب آبگذری سرریزهای زیگزاگی قوسی تک سیکل و دو سیکل مورد آزمایش را نشان می‌دهند و مشاهده می‌شود که با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری در تمامی سرریزها سیر نزولی به خود می‌گیرد. در بررسی اثر افزایش ارتفاع سرریز، از طریق این نمودارها می‌توان دریافت که در محدوده (H_0/P) مورد مطالعه، افزایش ارتفاع در سرریزهای زیگزاگی قوسی، در بار هیدرولیکی پایین، موجب افزایش ضریب آبگذری می‌گردد.

بررسی شکل (۵-الف) از نظر ارتفاع تاج سرریز در سرریزهای تک سیکل نشان می‌دهد که با افزایش بار هیدرولیکی، ضریب آبگذری سیر نزولی به خود می‌گیرد و کاهش می‌یابد، با در نظر گرفتن سرریزهای زیگزاگی قوسی در نسبت‌های بار هیدرولیکی $(0.3 - 0.1)$ ، مشاهده می‌شود که هر دو سرریز از

۲-۳- مدل‌های آشفته‌گی و شرایط مرزی

در این پژوهش شبکه میدان به‌صورت یکنواخت و ابعاد شبکه تا حدی ریز در نظر گرفته شد که علاوه بر نزدیکی نتایج به مقادیر آزمایشگاهی، از طولانی شدن زمان انجام محاسبات جلوگیری شود. لازم به ذکر است متوسط زمان برای شبیه‌سازی هر دبی به‌طور متوسط ۲۴ hr بوده است که با توجه به در اختیار داشتن سیستم پیشرفته این زمان به حدود ۸ ساعت تقلیل پیدا کرد. به‌منظور حل معادلات ناویر استوکس از مدل آشفته‌گی-RNG استفاده شد. شرایط مرزی همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، به‌صورت زیر تعریف شد: شرط مرزی بالا: pressure، شرط مرزی پایین: دیوار wall، شرط مرزی ورودی: دبی در واحد عرض که به‌صورت volume flow rate و شرط مرزی خروجی: outflow در نظر گرفته شد، همچنین دیواره جریان در چپ و راست wall انتخاب شد.



شکل ۴- شرایط مرزی ایجادشده برای سرریزهای زیگزاگی قوسی مورد استفاده در این پژوهش: الف- سرریز زیگزاگی قوسی دو سیکل با ارتفاع ۷/۵ cm و ب- سرریز زیگزاگی قوسی تک سیکل با ارتفاع ۱۰ cm

Fig. 4 Boundary conditions generated for arched labyrinth weirs utilized in this study; a) Two-cycle arched labyrinth weir with a height of 7.5 cm and b) Arched labyrinth weir with a height of 10 cm

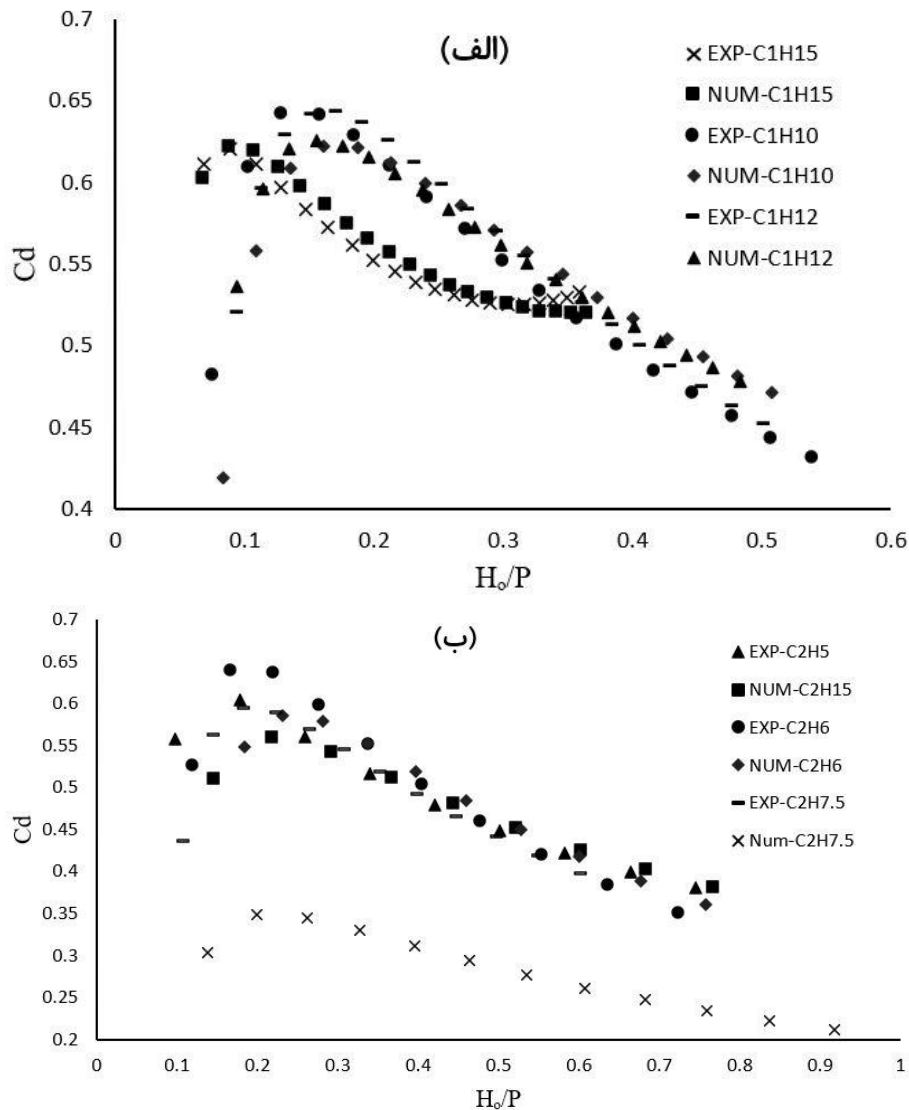
۲-۴- آزمایش‌ها

مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی انجام شد. از بین تمام مدل‌های آزمایش‌شده، بهترین مدل‌های سرریز از نظر میزان دبی عبوری و ضریب دبی و همین‌طور برخورداری بودن از یک معیار هندسی مشخص (ارتفاع سرریزها) برای

دو سیکل با ارتفاع تاج ۶ cm بیشترین ضریب آبدگزی را به ازای تمامی بارهای هیدرولیکی دارد. این در حالی است که با افزایش تدریجی بار هیدرولیکی، ضریب آبدگزی در تمامی سرریزها کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند تداخل تیغه‌های جریان، وقوع استغراق موضعی در سرریزها باشد. از اینرو این شرایط بر روی عملکرد سرریزهای زیگزاگی قوسی اثر منفی دارد. همچنین مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) به خوبی نشان می‌دهد که مدل عددی Flow3D با درصد خطای کم‌تر از ۱٪ قادر به شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای زیگزاگی قوسی می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در نمودارهای مقایسه‌ای در جدول (۲) نشان داده شده است.

نظر هیدرولیکی عملکرد یکسانی دارند. حال آنکه با افزایش بار هیدرولیکی از نسبت ۰/۳ به بعد، تأثیر عواملی همچون تداخل تیغه‌های جریان، توسعه ناحیه استغراق موضعی و نیز افت انرژی بر روی کاهش عملکرد هیدرولیکی (به‌طور خاص ضریب آبدگزی) سرریز زیگزاگی قوسی بیشتر به‌وضوح مشاهده می‌شود. این در حالی است که شدت تأثیر عوامل ذکر شده را می‌توان در اختلاف محسوس و معنی‌دار در کاهش ضریب آبدگزی به‌ازای تمامی بارهای هیدرولیکی در سرریز زیگزاگی قوسی تک سیکل با ارتفاع تاج ۱۵ cm نسبت به سایر سرریزها مشاهده نمود.

بررسی شکل (۵-ب) در سرریزهای دو سیکل نشان می‌دهد که در بارهای هیدرولیکی کم، ضریب آبدگزی سرریزها به بیشترین میزان خود می‌رسد که از این میان زیگزاگی قوسی

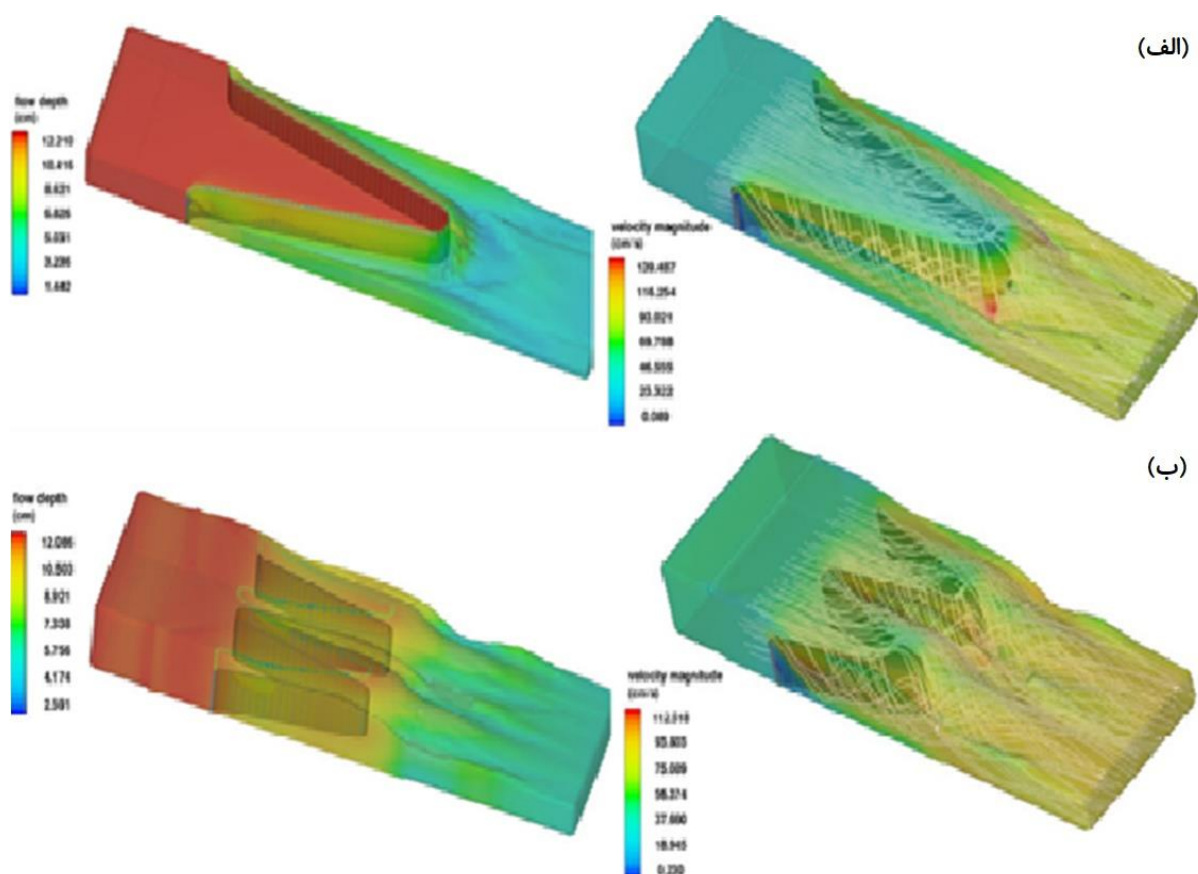


شکل ۵- منحنی ضریب دبی (Cd) در مقابل (H₀/P)، برای سرریزهای زیگزاگی قوسی (الف): در شرایط تک سیکل، (ب): دو سیکل.
Fig. 5 A curve depicting discharge coefficient (Cd) to (H₀/P) for arced labyrinth weirs; a) 1 Cycle, b) 2 Cycle

جدول ۲- معرفی پارامترهای مورد استفاده در نمودارهای مقایسه‌ای

Table 2. Specifications of the Parameters used in comparison charts

Model	Introduction of parameters
EXP-C1H15	A single-cycle arced labyrinth weir, 15 cm in height at the experimental state
NUM-C1H15	A single-cycle arced labyrinth weir, 15 cm in height at the numerical state
EXP-C1H12	A single-cycle arced labyrinth weir, 12 cm in height at the experimental state
NUM-C1H12	A single-cycle arced labyrinth weir, 12 cm in height at the numerical state
EXP-C1H10	A single-cycle arced labyrinth weir, 10 cm in height at the experimental state
NUM-C1H10	A single-cycle arced labyrinth weir, 10 cm in height at the numerical state
EXP-C2H7.5	A single-cycle arced labyrinth weir, 7.5 cm in height at the experimental state
EXP-C2H7.5	A single-cycle arced labyrinth weir, 7.5 cm in height at the numerical state
EXP-C2H6	A single-cycle arced labyrinth weir, 6 cm in height at the experimental state
EXP-C2H6	A single-cycle arced labyrinth weir, 6 cm in height at the numerical state
EXP-C2H5	A single-cycle arced labyrinth weir, 5 cm in height at the experimental state
EXP-C2H5	A single-cycle arced labyrinth weir, 5 cm in height at the numerical state



شکل ۶- الگوی عمومی جریان شبیه‌سازی شده بر روی سرریزهای زیگزاگی قوسی (تک سیکل و دو سیکل): الف- سرریز زیگزاگی قوسی تک سیکل و ب- سرریز زیگزاگی قوسی دو سیکل

Fig 6. The general pattern of simulated flow on arced labyrinth weirs (single cycle and double-cycle):
a) One-cycle arched labyrinth weir and b) Two-cycle arched labyrinth weir.

می‌تواند رابطه ضریب دبی عبوری با بار هیدرولیکی سرریز زیگزاگی قوسی که از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی به دست آمده از جمله بار هیدرولیکی در بالادست سرریز نسبت به تاج آن را به خوبی پیش‌بینی کند. شکل‌های (۶-)

۲-۳- عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی قوسی در مدل عددی مقایسه بین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها به وسیله هر دو روش (آزمایشگاهی و عددی) نشان داد که نرم‌افزار Flow3D

(Se) مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین مقایسه بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی انجام شد. در ادامه نتایج حاصل از پژوهش ارائه شده است:

۱- در بررسی ضریب آبگذری نسبت به (H_0/P) ، سرریزهای قوسی دو سیکل نسبت به تک سیکل در نسبت‌های بار هیدرولیکی کم، ضریب جریان بیش‌تری دارند با افزایش نسبت بار هیدرولیکی دو سرریز شرایط یکسانی دارند.

۲- با افزایش بار هیدرولیکی سرریز، ضریب جریان ابتدا افزایش پیدا می‌کند و سپس کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است آستانه استغراق موضعی در محدوده $H_0/P > 0.4$ رخ داد.

۳- در تمامی سرریزها، با در نظر گرفتن فاکتور شکل و تعداد سیکل متفاوت، افزایش نسبت بار هیدرولیکی موجب کاهش ضریب آبگذری می‌گردد، که این امر در سرریزها به دلیل کاهش هوادهای تیغه‌های جریان، تداخل شدید لایه‌های جریان مربوط به آن‌ها می‌باشد.

۴- مقایسه بین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها به وسیله هر دو روش (آزمایشگاهی و عددی) نشان داد که نرم‌افزار Flow3D به خوبی می‌تواند رابطه دبی عبوری با بار هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی قوسی که از انجام آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی به دست آمده از جمله بار هیدرولیکی در بالادست سرریز نسبت به تاج آن را به خوبی پیش‌بینی کند.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مسئولین محترم سازمان آب و برق خوزستان به جهت در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی نمایند.

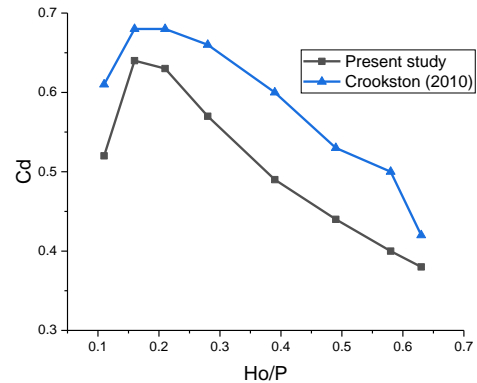
دسترسی به داده‌ها

داده‌ها حسب درخواست، از طرف نویسنده مسئول از طریق ایمیل قابل ارسال است.

References

Anderson R. M. and Tullis B. (2013). Piano Key Weir Hydraulics and Labyrinth Weir Comparison. *J. Irrig. Drain. Eng.*, (ASCE). 139(3), 246-253.

الف) و (ب-۶) الگوی عمومی جریان شبیه‌سازی شده بر روی سرریزهای زیگزاگی قوسی را نشان می‌دهند. ضمن آنکه در این شکل‌ها تداخل خطوط جریان عبوری از روی سرریز در هدهای هیدرولیکی بالا قابل مشاهده است که این امر به تدریج باعث ایجاد افت انرژی و کاهش راندمان هیدرولیکی سرریز می‌شود.



شکل ۷- مقایسه ضریب دبی پژوهش حاضر با (2010)

Crookston

Fig. 7 Comparison of present coefficient of discharge with Crookston (2010)

شکل (۷) نشان داد ضریب دبی پژوهش حاضر با نتایج پژوهش Crookston (2010) تطابق خوبی دارد. در این راستا مشاهده شد با افزایش هد هیدرولیکی از میزان ضریب دبی کاسته می‌شود. دامنه ضریب دبی در شکل (۷) از 0.38 تا 0.61 متغیر است. در یک نسبت مشخص هد هیدرولیکی، ضریب دبی در پژوهش Crookston (2010) به میزان 53% بیش‌تر از پژوهش حاضر است. در هر دو پژوهش، سرریزها عملکرد هیدرولیکی مطلوبی دارند به گونه‌ای که تمامی مراحل هیدرولیکی از جمله چسبندگی، هوادهای کامل، هوادهای جزئی و خفگی را طی نموده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد هیدرولیکی سرریزهای زیگزاگی قوسی (تک سیکل و دو سیکل) در داخل کانال به صورت آزمایشگاهی بررسی و نتایج با مدل عددی مقایسه گردید. در این راستا تأثیر سه پارامتر بی‌بعد نسبت بار هیدرولیکی به ارتفاع تاج سرریز (H_0/P) ، تعداد سیکل (n) و فاکتور شکل

Belzner, F., Merkel, J., Gebhardt, M. and Thorenz, C. (2017). Piano Key and Labyrinth Weir at German waterways: Recent and future research of the BAW, In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017*, 167–174.

- Bilhan, O., Aydin, M. C., Emiroglu, M. E. and Miller, C. J. (2018). Experimental and CFD analysis of circular labyrinth weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 144(6).
- Bremer, F. L. and Oertel, M. (2017). Numerical investigation of wall thickness influence on Piano Key Weir discharge coefficients: A preliminary study. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017*, 101 -108. CRC Press.
- Burns, A.D. (1987). *FLOW3D: The development and applications of release 2 originally published: UKAEA Atomic Energy Research, England.*
- Crookston, B. M. (2010). *Labyrinth Weirs. PhD Thesis, Utah State University, Logan, Utah.*
- Crookston, B. M., Paxson, G. S. and Savage, B. M. (2012). Hydraulic performance of labyrinth weirs for high headwater ratios. *Proc. 4th IAHR Int. Symp. Hydraul. Struct., Porto, Portugal.*
- Dabling, M. and Tullis, B. P. (2018). Labyrinth weirs with angled approach flow. *J. Hydraul. Eng.*, 144 (12).
- Delgado, F. G. A., Paulina, M. A. and Camino S. F. J. (2015). Discharge coefficients spillways labyrinth implementing hydrodynamic devices in the upstream side. *Proc. 36th IAHR World Congress. Hague, Netherlands.*
- Falvey, H. T. (2003). *Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press, Reston, VA, United States.*
- Ghanbari, R. and Heidarnejad, M. (2020). Experimental and numerical analysis of flow hydraulics in triangular and rectangular piano key weirs. *Water. Sci.*, 34(1), 32–38.
- Gharibvand, R., Heidarnejad, M., Kashkouli, H. A., Hasoonizadeh, H. and Kmanbedast, A. (2020). Numerical analysis of flow hydraulic in trapezoidal labyrinths and Piano Key Weirs. *J. Water Soil Sci.*, 24(1), 45-56 [In Persian].
- Karimi Chahartaghi, M., Nazari, S. and Mahmoodian Shooshtari, M. (2019). Experimental and numerical simulation of arced trapezoidal piano key weirs. *Flow. Meas. Instrum.* 68, 101576.
- Fadaei-Kermani, E. and Barani, G. A. (2014). Numerical simulation of flow over spillway based on the CFD method. *Sci. Iran.*, 21(1), 91-97.
- Marusi, M., Roshan, R. and Sarkardeh, H. (2014). Analysis and design with flow-3D software. First edition, Fadak Isatis Publication [In Persian].
- Mohammadrezapour Tabari, M. and Omidi Arjangi, M. (2019). Simulation of overflow the piano key weir using the Flow3D. *11th Int. River Eng. Con. Ahvaz, Iran [In Persian].*
- Montazemian, M. and Nohani, E. (2017). Investigation of geometric and hydraulic parameters affecting the performance of Labyrinth Weir. *Proc. Nat. Conf. on Water. Hydraul. Struct.*, 1 March, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran [in Persian].
- Paxson, G., Tullis, P. and Hertel, J. (2013). Comparison of piano key weirs with labyrinth and gated spillways: Hydraulics, cost, constructability and operations. In: *Labyrinth and Piano Key Weirs II*: 123 -130.
- Sangsefidi, Y., Mehraein, M and Ghodsian, M. (2015). Numerical simulation of flow over labyrinth spillways. *Sci. Iran.* 22(5), 1779-1787.
- Zeraat, B., Heidarnejad, M., Masjedi, A., Kamanbedast, A. and Hasoonizadeh, H. (2019). Laboratory studies into hydraulic coefficient in curved planform labyrinth weir and piano key weir. *Grđevinar* 71(5), 409-416.



Research Paper**Experimental and Numerical Study of the Discharge Coefficient in Parabolic Labyrinth Weirs****Nader Banitamim¹ and Mohammad Heidarnejad^{2*}**¹M.Sc. Alumni, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran²Assoc. Professor, Department of Water Science Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

*Corresponding author: m.heidarnejad@iauahvaz.ac.ir

Received: December 08, 2020**Revised:** February 08, 2021**Accepted:** February 14, 2021**Abstract**

An increase in the hydraulic capacity of flow conveyance over a weir per a given stage of a stream upstream of the weir is feasible by extending the effective length of the crest of the weir per unit width of flow section. In this work, in order to study the hydraulics of the flow and compare the values of the passing discharge, a 3-D simulation of the flow field on arced labyrinth weirs (single-cycle and double-cycle) was carried out in Flow3D software at the hydraulic loading rate of 0.05 to 0.74 by statistical analysis and the comparison of results obtained from numerical modeling of experimental data. Weirs utilized in this study were three single-cycle weirs (10, 12, and 15 cm in height) and three double-cycle weirs (5, 6, and 7.5 cm in height) examined in a rectangular flume having 8.4, 0.3, and 0.45 m length, width, and height, respectively. The results showed that the data of the numerical model were well conformed to the data of the experimental model. According to the results, a 50% increase in the weir's height will raise the discharge coefficient by 25.5%. Furthermore, the discharge coefficient in a single-cycle arced labyrinth weir at hydraulic loading rates less than 0.4 was higher than the discharge coefficient in a double-cycle arced labyrinth weir. Moreover, the corresponding values were nearly equal at higher hydraulic loading rates.

Keywords: Arced Labyrinth Weir; Discharge Coefficient; Numerical Model; Flow3D