

## بررسی عددی عملکرد دریاچه‌های کشویی متوالی در تنظیم دبی جریان در کانال‌ها

فروغ اشکان<sup>۱\*</sup>، رسول دانشفراز<sup>۲</sup>، علیرضا غفاری نیک<sup>۳</sup>، علی قهرمانزاده<sup>۴</sup>، عمر مینایی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷

۱- هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۳- دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

۵- دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ashkan@maragheh.ac.ir

### چکیده

دریاچه‌های کشویی متوالی با هدف تحویل مقدار نسبتاً ثابت دبی جریان برای دامنه‌ای از تغییرات سطح آب در بالادست کانال‌های توزیع آب، بکار برده می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D جریان از دریاچه‌های کشویی متوالی در ۴ مدل متفاوت برای ۵ عمق جریان ورودی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ملاحظه گردید تفاوت دبی‌های خروجی همواره کمتر از ۱۰ درصد بوده است. بنابراین دقت شبیه‌سازی مدل قابل قبول است. پس از صحت‌سنجی مدل، دبی خروجی برای مدل‌ها محاسبه و با مقدار دبی طراحی مقایسه شد. مقایسه دبی خروجی مدل‌ها با دبی طراحی نشان داد در همه حالت‌های مورد بررسی، در حدود ۸ درصد اختلاف وجود دارد. بنابراین سازه دریاچه‌های کشویی متوالی در تحویل دبی جریان تقریباً ثابت به ازای تغییرات عمق آب در بالادست کانال با دقت قابل قبولی عمل می‌کند. همچنین بررسی میزان استهلاك انرژی در مدل‌ها نشان داد برای حالتی که تنها دریاچه اول فعال است، اتلاف انرژی قابل صرف نظر کردن می‌باشد. ولی با افزایش عمق جریان ورودی و فعال شدن دریاچه‌های بعدی، میزان استهلاك انرژی ناشی از جریان از دریاچه‌های کشویی متوالی افزایش یافته و به حدود ۱۵ تا ۲۲ درصد می‌رسد. بنابراین این سازه علاوه بر تنظیم دقیق جریان، در استهلاك انرژی برای عمق‌های زیاد جریان ورودی نیز موثر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، دبی خروجی، دریاچه‌های کشویی متوالی، عمق جریان ورودی، نرم‌افزار FLOW-3D

## Numerical Investigation of the Successive Sluice Gates Performance in Regulating Flow Rate through Channels Using Flow-3D Software

F Ashkan<sup>1\*</sup>, R Daneshfaraz<sup>2</sup>, AR Ghaffarinik<sup>3</sup>, A Qahramanzadeh<sup>4</sup>, O Minaei<sup>5</sup>

Received: September 5, 2017 Accepted: June 17, 2019

<sup>1</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Prof., Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>3</sup>M.sc. Graduate of Civil- Water Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

<sup>4</sup>M.sc. Graduate of Civil- Water Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>5</sup>M.sc. Graduate of Civil- Water Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

\*Corresponding Author, Email: ashkan@maragheh.ac.ir

### Abstract

Successive sluice gates are utilized to deliver a relatively constant amount of flow rate for a range of water levels variations at the upstream of the water distribution channels. In this study, the flow through successive sluice gates in four different models with five input flow depths were simulated and investigated using FLOW-3D software. Comparison between the numerical and experimental results indicated that the differences of the output flow rates were less than 10%. Therefore, the accuracy of simulated models was desirable. After validation of models, the output flow rate was calculated for each model and compared with design flow rate. Comparing the output flow rates of models with the design flow rate indicated that in the all investigated cases, there was an approximate difference of 8 percent. Therefore, the successive sluice gates showed acceptable accuracy in delivery of constant flow rate during variation of water depth at upstream of the channel. Also, the evaluation of energy dissipation in the models showed that the energy dissipation was negligible when just the first gate was active. But by increasing the depth of input flow and utilization of the next gates, the rate of energy dissipation caused by the flow through successive sluice gates was increased to about 15-22 percent. Therefore, in addition to precise flow regulation, this structure was also effective in energy dissipation if input flow depths were high.

**Keywords:** Energy dissipation, FLOW-3D software, Input flow depth, Output flow rate, Successive sluice gates

### مقدمه

با توجه به اینکه بخش کشاورزی سهم غالبی از مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد و قسمت عمده از این آب، همواره در کانال‌ها در جریان است بایستی جهت جلوگیری از تشدید بحران آب و استفاده مطلوب از منابع آب، میزان مصرف آب ساماندهی گردد. در همین راستا امروزه متخصصین علم هیدرولیک در تلاشند با طراحی و اجرای سازه‌های تنظیم کننده مانند دریچه، این امر را محقق نمایند.

پرکاربردترین رابطه‌ای که برای محاسبه دبی جریان از دریچه قائم در شرایط جریان آزاد ارائه شده، رابطه راجاراتنام و سوبرامانیا (۱۹۶۷) می‌باشد که در رابطه ۱ آورده شده است:

$$Q = C_d w b \sqrt{2g y_0} \quad [1]$$

که در آن:  $Q$  دبی جریان،  $C_d$  ضریب دبی جریان،  $w$  ارتفاع بازشدگی دریچه،  $b$  عرض دریچه،  $g$  شتاب ثقل و  $y_0$  عمق آب در بالادست دریچه می‌باشد (راجاراتنام و سوبرامانیا، ۱۹۶۷). رابطه فوق نشان می‌دهد میزان

دبی جریان در واحد عرض علاوه بر ارتفاع بازشدگی، ضریب دبی جریان و شتاب ثقل به مقدار عمق آب در بالادست دریچه نیز وابسته بوده، بنابراین با تغییر این عمق میزان دبی جریان نیز تغییر می‌کند. دریچه‌ها در برخی موارد به عنوان تنظیم‌کننده دبی جریان بکار گرفته می‌شوند. به همین منظور و به جهت کاهش انحراف دبی پایین‌دست از دبی طراحی و به عبارتی تنظیم بهتر جریان، بکارگیری دریچه‌های کشویی متوالی معرفی شد.

در بین سازه‌های آبگیر، دریچه‌های متوالی به دلیل تحویل مقدار نسبتاً ثابت دبی جریان برای محدوده‌ای از تغییرات عمق آب در کانال تغذیه کننده، که به دامنه مدولار معروف است مورد توجه طراحان قرار گرفته‌اند. پیشنهاد استفاده از دریچه‌های متوالی برای اولین بار توسط لارسن و میشر (۱۹۹۰) مطرح شد، این سازه متشکل از ۳ تیغه قائم و ثابت است که ارتفاع آنها به ترتیب در سمت پایین دست افزایش و میزان بازشدگی - شان کاهش می‌یابد. میشر و همکاران (۱۹۹۰) به منظور بررسی عملکرد دریچه‌های متوالی اقدام به طراحی دریچه سه تیغه‌ای کردند. آنها ارتفاع اولین تیغه را برابر با حداقل ارتفاع آب طراحی در نظر گرفتند، این امر با توجه به فرض ایشان مبنی بر اینکه با رسیدن ارتفاع آب به بالای هر تیغه تنظیم کننده جریان به تیغه بعد منتقل می‌شود، انجام گرفت ولی این امر باعث شد تا اولین تیغه در روش طراحی آنها عملاً تاثیری در تنظیم کننده جریان نداشته باشد. انور (۱۹۹۹) در تکمیل روش طراحی میشر و همکاران (۱۹۹۰) با استفاده از رابطه ضریب جریان ارائه شده توسط سوامی (۱۹۹۲) برای دریچه کشویی قائم، دریچه سه تیغه را طوری طراحی نمود که ارتفاع اولین تیغه بیشتر از حداقل مقدار ارتفاع آب طراحی بود تا اولین تیغه نیز در تنظیم دبی جریان موثر بوده و میزان انحراف دبی جریان از دبی طراحی کاهش یابد. بی‌جن‌خان و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مفهوم حساسیت هیدرولیکی و با ایجاد منحنی‌های دبی

اشل برای بازشدگی‌های مختلف یک دریچه کشویی قائم، اقدام به طراحی دریچه سه تیغه‌ای نمودند و روشی برای طراحی این سازه با حداقل انحراف دبی از نظر تئوری ارائه کردند. بی‌جن‌خان و کوچکزاده (۲۰۱۰) اصول طراحی دریچه‌های متوالی بر اساس مفهوم حساسیت هیدرولیکی را برای طراحی سازه دو تیغه‌ای توسعه دادند. یاری‌زاده و کوچکزاده (۲۰۱۱) عملکرد هیدرولیکی مدول‌ها را هنگام مواجه شدن با مواد شناوری که قادر به ایجاد انسداد در سازه هستند، به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج این محققین حاکی از آن است که چنین انسدادی می‌تواند قسمت فوقانی سازه، یعنی فاصله میان تیغه‌ها و یا میزان بازشدگی تحتانی تیغه‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. برقی خضولو و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از رابطه بقای انرژی و روشی نوین به ارائه تخمین ضریب دبی دریچه‌های کشویی در شرایط جریان آزاد و مستغرق نمودند. نتایج نشان داد دخالت ضریب افت انرژی در رابطه پیشنهادی سبب کاهش متوسط قدرمطلق خطای نسبی در حدود ۰/۴ درصد و ۲/۶ درصد به ترتیب برای شرایط جریان آزاد و مستغرق می‌شود. مهرزاد و همکاران (۲۰۱۴) دریچه‌های تیغه‌ای را به صورت مزدوج در کانال نصب و بررسی کردند و سپس برای طراحی دریچه‌های تیغه‌ای بصورت موازی روشی معرفی کردند که در روش پیشنهادی آنها انحراف دبی عبوری از دبی طراحی در دامنه گسترده‌ای از تغییرات عمق آب از حدود متوسط ۸٪ برای روش‌های قبلی به حدود ۱٪ کاهش یافت.

در این بخش جهت بررسی کارایی روش CFD در شبیه‌سازی انواع مدل‌های هیدرولیکی و دقت نتایج آنها به تحقیقات مشابه اشاره شده است.

کیم (۲۰۰۷) جریان از زیر دریچه کشویی قائم را با حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای محاسبه ضرایب انقباض، تخلیه و توزیع فشار پشت دریچه بررسی و نتایج حل عددی FLOW-3D را با داده‌های تئوری و

فشار برای انواع شکل لبه دریچه‌ها یکسان بوده ولی مقادیر آنها با یکدیگر متفاوت است.

مرور مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد دریچه‌های متوالی کمتر بررسی شده است، لذا در این تحقیق سعی شده دریچه‌های متوالی به عنوان یک سازه تنظیم کننده با بازدهی بالا نسبت به سایر انواع دریچه‌ها، با بهره‌گیری از روش حل عددی مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به کارائی بالای نرم‌افزار FLOW-3D در زمینه‌های تحقیقات مهندسی آب، نتایج میثرا و همکاران (۱۹۹۰) جهت صحت سنجی شبیه سازی شد و در نهایت با ایجاد مدل‌های مختلف در شرایط هیدرولیکی متفاوت جریان مورد بحث و تحلیل قرار گرفت.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت شبیه سازی عددی جریان از دریچه‌های متوالی در ۴ مدل متفاوت با تغییر فواصل بین دریچه‌ها از نرم‌افزار FLOW-3D به ترتیب زیراستفاده شده است.

ابعاد کانال و یکی از مدل‌های مورد بررسی به منظور صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده از مدل آزمایشگاهی میثرا و همکاران (۱۹۹۰) گرفته شده و ۳ مدل دیگر با تغییر فواصل بین دریچه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه مدولار (دامنه تغییرات عمق بالادست) برای همه مدل‌ها یکسان و ۱۵ الی ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. هر مدل برای عمق‌های ورودی جریان ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ سانتی‌متر شبیه‌سازی و بررسی شده است. ضخامت هر سه دریچه یکسان و برابر ۲ سانتی‌متر بوده ولی طول و مقدار بازشدگی آنها با یکدیگر متفاوت است بطوریکه در جهت جریان مقدار بازشدگی کاهش و طول دریچه‌ها بیشتر می‌شود.

مطابق داده‌های آزمایشگاهی میثرا و همکاران (۱۹۹۰) دریچه‌ها در کانالی به طول ۱۰۰، عرض ۱۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، در فاصله ۳۲ سانتی‌متری بالادست در نظر

آزمایشگاهی مقایسه کرد. نتایج کیم (۲۰۰۷) نشان داد این نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان دقت خوبی داشته و عملکرد آن و نتایج بدست آمده قابل قبول می‌باشد.

هلمی و جمال (۲۰۱۱) الگوی جریان و رفتار دریچه دو تیغه‌ای در شرایط جریان آزاد را با بهره‌گیری از روش CFD و با استفاده از نرم‌افزار Fuent شبیه‌سازی و بررسی کردند. آنها برای صحت سنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی سرعت در مدل فیزیکی استفاده کرده و نشان دادند روش CFD کارایی بالایی در شبیه‌سازی جریان از زیر دریچه‌های کشویی دارد.

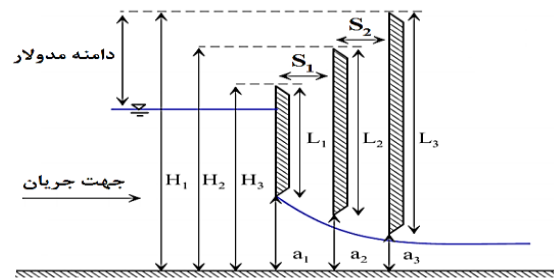
کاسان و بیلود (۲۰۱۲) برای بررسی مشخصات بالادست و پایین دست جریان از زیر دریچه کشویی قائم، با استفاده از حل عددی و به کمک نرم‌افزار Fluent به شبیه‌سازی جریان در کانالی به عرض ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و طول ۸ متر پرداخته‌اند. در این تحقیق پروفیل سطح آب، با داده‌های آزمایشگاهی آکاوز و همکاران (۲۰۰۹) صحت‌سنجی شده است. با توجه به وجود تغییر شکل نسبتاً زیاد در جریان زیر دریچه، آنها انتخاب مدل آشفتگی برای حل عددی را بسیار مهم دانسته و با بررسی مدل‌های آشفتگی  $K-\varepsilon\_standard$ ،  $K-\varepsilon\_RNG$  و  $K-\omega$  برای جریان مستغرق مدل آشفتگی  $K-\varepsilon\_RNG$  را از دقت بالایی برخوردار دانستند. نتایج این محققین نشان می‌دهد مقدار ضریب انقباض برای جریان مستغرق در بازشدگی‌های بزرگتر ثابت نبوده و برخلاف جریان آزاد انتخاب یک مقدار ثابت برای  $C_c$  صحیح نیست.

دانشفرز و همکاران (۲۰۱۶) به منظور مطالعه خصوصیات جریان از زیر دریچه قائم، با بهره‌گیری از نرم‌افزار FLOW-3D جریان را برای ۵ شکل لبه متفاوت شبیه‌سازی و بررسی کردند. تحلیل جریان در مدل‌ها برای ۶ عمق پشت دریچه متفاوت انجام گرفت و ضرایب انقباض و ضریب دبی، توزیع فشار پشت دریچه و فشار کف کانال در نزدیکی دریچه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این محققین نشان می‌دهد محل ماکزیمم

۱ و جدول ۱ نشان داده شده است.

می‌باشد. به منظور عدم تاثیرگذاری تعداد مش‌ها بر روی نتایج برای هر ۴ مدل با ایجاد تعداد مش‌های برابر، از هر ۰/۰۰۲۵ متر شبکه‌بندی مدل‌ها انجام شده است. برای شبکه‌بندی مدل مورد بررسی از ۱۳۴۴۰۰۰ تعداد مش استفاده شده است.

گرفته شده‌اند. مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی در شکل ۱ از جدول ۱ مشاهده می‌شود. مقادیر بازشدگی و طول دریچه‌ها در مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده ولی فاصله بین دریچه‌ها به منظور بررسی تاثیر این پارامتر بر عملکرد سازه در دامنه مدولار مشخص متغیر می‌باشد.



شکل ۱- شکل شماتیک سازه دریچه‌های متوالی.

مدل	مقادیر بازشدگی (cm)			طول دریچه‌ها (cm)			فاصله بین دریچه‌ها (cm)	
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$S_1$	$S_2$
۱	۵/۵	۴/۷	۴/۱	۹/۵	۱۴/۷	۲۰/۹	۲	۲
۲	۵/۵	۴/۷	۴/۱	۹/۵	۱۴/۷	۲۰/۹	۲	۴
۳	۵/۵	۴/۷	۴/۱	۹/۵	۱۴/۷	۲۰/۹	۴	۲
۴	۵/۵	۴/۷	۴/۱	۹/۵	۱۴/۷	۲۰/۹	۴	۴

پس از شبکه‌بندی مدل، شرایط مرزی بر مدل اعمال شد. شکل ۲ شبکه محاسباتی با مدل دریچه‌های متوالی را برای مدل  $S_{42}$  و شرایط مرزی اعمال شده بر مدل را نشان می‌دهد.

### نتایج و بحث

در این تحقیق جریان از دریچه‌های متوالی در ۴ مدل متفاوت شبیه‌سازی و بررسی شده است. وظیفه اصلی این سازه، تحویل دبی تقریباً ثابت در پایین‌دست، به ازای تغییرات عمق آب در بالادست جریان می‌باشد. بدین صورت که سازه دریچه‌های متوالی با بازشدگی-های مشخص برای یک دبی خروجی طراحی می‌شوند و انتظار می‌رود با تغییر عمق جریان در بازه دامنه مدولار، دبی خروجی نوسانات زیادی نداشته و نزدیک به دبی طراحی باشد. در این تحقیق از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی میشر و همکاران (۱۹۹۰) برای شبیه‌سازی مدل‌ها استفاده شده است.

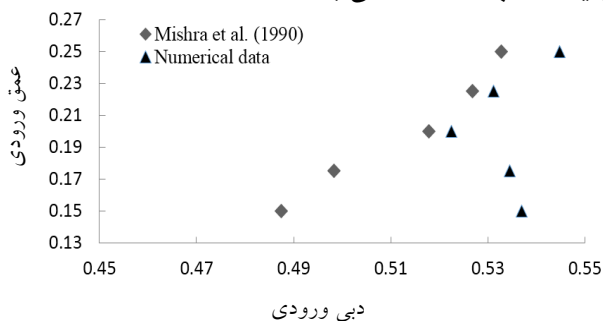
حال به مراحل شبیه‌سازی مدل‌ها می‌پردازیم. لازم بذکر است تمامی این مراحل برای ۴ مدل یکی بوده و بدین ترتیب نامگذاری مدل‌ها بر همین اساس صورت گرفته است. بدین صورت که هر مدل با حرف بزرگ  $S$  با دو اندیس نشان داده می‌شود که اندیس اول بیانگر فاصله بین دریچه اول و دوم، و اندیس دوم بیانگر فاصله بین دریچه دوم و سوم می‌باشد. بنابراین نامگذاری مدل‌ها به ترتیب  $S_{22}$ ،  $S_{24}$ ،  $S_{42}$  و  $S_{44}$  خواهد بود. تنها در هر مدل با تغییر محل قرارگیری دریچه‌های دوم و سوم، فواصل بین دریچه‌ها تغییر می‌کند. در این بخش در انتخاب مدل آشفستگی برای شبیه‌سازی مدل مورد بررسی، با توجه به بررسی مطالعات انجام شده توسط محققینی چون دانشفراز و قادری (۲۰۱۷)، دانشفراز و همکاران (۲۰۱۹) و قادری و همکاران (۲۰۱۹) و مطالعه انواع مدل‌های آشفستگی مدل  $K-\epsilon-RNG$  نتایج دقیق‌تری بدست می‌دهد بر همین اساس برای حل آشفستگی در مدل‌سازی جریان از مدل آشفستگی  $RNG$  استفاده شده است. برای مدل مورد بررسی طول و عرض کانال برابر ۱۰۰ و ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۵۰ سانتی‌متر

## جدول ۲- محاسبه درصد خطای نسبی مقادیر دبی خروجی

در واحد عرض نتایج حل عددی و آزمایشگاهی.

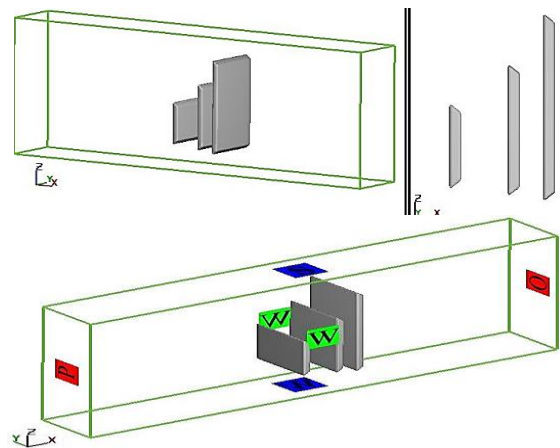
عمق ورودی جریان (cm)	نتایج حل عددی	نتایج آزمایشگاهی میشرا و همکاران	محاسبه درصد خطا
۵	۰/۵۳۶۹	۰/۴۸۷۵	۹/۲۰۳
۱۷/۵	۰/۵۳۴۶	۰/۴۹۸۳	۶/۷۸۵
۲۰	۰/۵۲۲۵	۰/۵۱۷۸	۰/۸۹۵
۲۲/۵	۰/۵۳۱۲	۰/۵۲۶۹	۰/۸۰۹
۲۵	۰/۵۴۴۸	۰/۵۳۲۸	۲/۲۰۴

نکته قابل توجه در این داده‌ها این است که برای نتایج حل عددی برخلاف داده‌های آزمایشگاهی در همه عمق‌های ورودی جریان، دبی خروجی بیشتر از دبی طراحی بدست آمده است. همچنین درصد خطای مثبت نشانگر این است که در مطالعه حاضر داده‌های عددی همواره بزرگتر از داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد که می‌تواند به دلیل مش بندی شبکه حل و نحوه تعیین پروفیل سطح جریان در نرم‌افزار و همچنین استفاده از شرایط مرزی و یا انتخاب مدل آشفتگی باشد.



شکل ۳- مقایسه نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مدل  $S_{22}$ .

شکل ۳ نشان می‌دهد درصد اختلاف داده‌های حل عددی با نتایج آزمایشگاهی می‌شرا و همکاران (۱۹۹۰) در عمق‌های ورودی پایین بیشتر بوده، ولی با افزایش عمق ورودی جریان نتایج حل عددی به داده‌های آزمایشگاهی نزدیکتر شده و درصد خطای مدل کمتر می‌گردد.



شکل ۲- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده برای مدل دریاچه‌های متوالی  $S_{42}$ .

## صحت‌سنجی مدل

در استفاده از روش‌های حل عددی برای بررسی پدیده‌ها، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحقیق اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی می‌باشد. به همین منظور نتایج حل عددی با داده‌های آزمایشگاهی در شرایط یکسان مقایسه می‌گردد. در این تحقیق نیز برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار، مقادیر دبی خروجی برای مدل  $S_{22}$  با داده‌های آزمایشگاهی می‌شرا و همکاران (۱۹۹۰) برای دبی طراحی ۰/۵ لیتر بر ثانیه در سانتی‌متر و فواصل دریاچه‌ها ۲ سانتی‌متر مقایسه شده است. در این بخش از مطالعه حاضر، مقادیر دبی خروجی بدست آمده برای مدل  $S_{22}$  به ازای عمق‌های ورودی مختلف، با داده‌های آزمایشگاهی متناظر می‌شرا و همکاران (۱۹۹۰) مقایسه شده است. جدول ۲ مقادیر عددی (نتایج مطالعه حاضر) و آزمایشگاهی دبی خروجی را برای دبی طراحی ۰/۵ لیتر بر ثانیه در سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

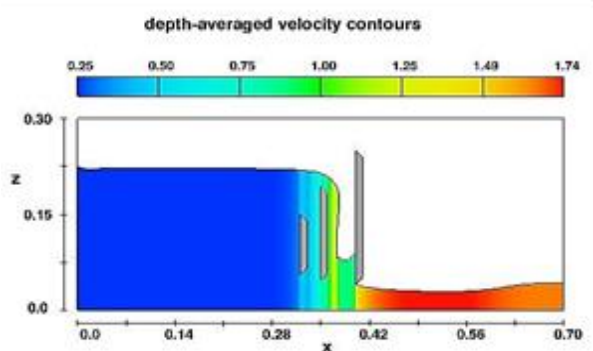
مشاهده می‌شود نتایج حل عددی نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی بوده و درصد خطای آن همواره کمتر از ۱۰ درصد بوده است بنابراین مدل شبیه‌سازی شده از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

### تحلیل نتایج حل عددی

با توجه به وظیفه اصلی سازه دریچه‌های متوالی که تحویل دبی تقریباً ثابت در پایین‌دست به ازای تغییرات عمق ورودی جریان می‌باشد، مهم‌ترین پارامتر قابل بررسی در این سازه دبی خروجی در پایین‌دست می‌باشد. دبی خروجی نهایی حاصل جمع دو دبی جریان سرریز شده از روی دریچه‌های ۱ و ۲، به اضافه دبی جریان عبوری از زیر دریچه سوم می‌باشد که به ترتیب با  $q_{sd}$  و  $q_w$  می‌توان نشان داد که در این بخش علی‌رغم سهم هر یک از  $q$ ها، کل دبی خروجی بررسی می‌شود.

### بررسی دبی خروجی در مدل $S_{24}$

در این بخش از تحقیق، با استفاده از داده‌های سرعت و عمق جریان در پایین‌دست مدل  $S_{24}$  دبی در واحد عرض محاسبه شده و با دبی طراحی ۰/۵ لیتر بر ثانیه در سانتی‌متر مقایسه شده است. شکل ۴ نمودارهای دوبعدی تغییرات عمق و سرعت جریان در طول کانال را برای مدل  $S_{24}$  نشان می‌دهد.



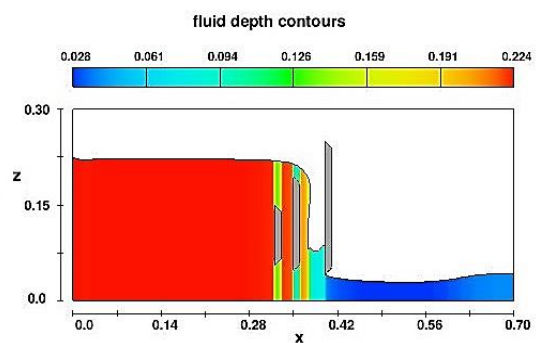
شکل ۴- نمودار دوبعدی تغییرات عمق و سرعت جریان جریان برای مدل با ورودی جریان ۲۲/۵ سانتی‌متر.

لازم بذکر است اعداد نشان داده شده در شکل‌های فوق برای تغییرات عمق و سرعت بر حسب متر و متر بر ثانیه می‌باشند. در محاسبه دبی خروجی مقادیر خروجی نرم‌افزار به واحدهای موردنظر تبدیل شده‌اند. جدول ۳ مقادیر دبی خروجی مدل  $S_{24}$  و درصد خطای آن با دبی طراحی را نشان می‌دهد.

مقادیر درصد خطا نشان می‌دهد دبی خروجی در مدل نزدیک به دبی طراحی بدست آمده و کمتر از ۷ درصد خطا دارد.

### بررسی دبی خروجی در مدل

همانند بخش‌های قبل، دبی خروجی برای مدل نیز، با استفاده از داده‌های عمق و سرعت خروجی نرم‌افزار محاسبه شده و با دبی طراحی مقایسه شده است. شکل ۵ مقادیر دبی را برای دو مدل و نشان می‌دهد. درصد خطای مدل با دبی طراحی در جدول ۴ آورده شده است.



جدول ۳- مقادیر دبی خروجی مدل  $S_{24}$  و درصد خطای آن با دبی طراحی.

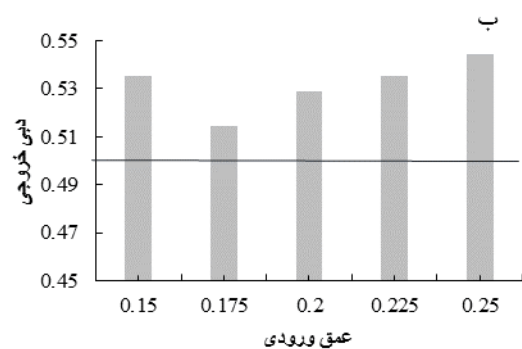
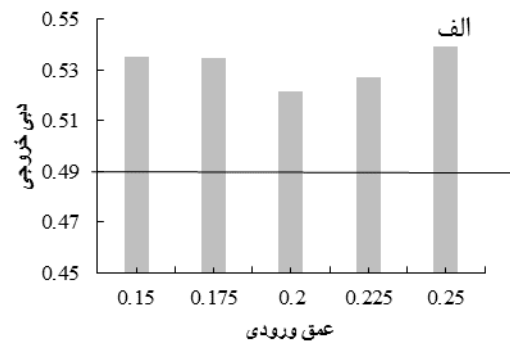
درصد خطای نسبی	دبی در واحد عرض طراحی	دبی در واحد عرض محاسباتی	سرعت متوسط جریان در مقطع خروجی	عمق خروجی جریان	عمق ورودی جریان

(cm)	(cm)	(cm s <sup>-1</sup> )	(L cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	(L cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	
۱۵	۳/۷۶	۱۴۲/۳	۰/۵۳۵	۰/۵	۶/۵۵
۱۷/۵	۳/۵۰	۱۵۲/۸	۰/۵۳۵	۰/۵	۶/۵۱
۲۰	۳/۱۳	۱۶۶/۷	۰/۵۲۲	۰/۵	۴/۱۷
۲۲/۵	۳/۱۵	۱۶۷/۴	۰/۵۲۷	۰/۵	۵/۱۷
۲۵	۲/۸۷	۱۸۷/۹	۰/۵۳۹	۰/۵	۷/۲۸

مقادیر درصد خطا در مدل  $S_{44}$  نزدیک به مدل‌های قبلی بدست آمده و حداکثر حدود ۸ درصد با دبی طرح اختلاف دارد. مقایسه دبی‌های خروجی ۴ مدل با یکدیگر نشان می‌دهد درصد خطاهای آن‌ها با دبی طرح تقریباً یکسان بوده است. لذا تاثیر فاصله بین دریچه‌های متوالی در عملکرد آنها ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد سازه دریچه‌های متوالی در هر ۴ حالت مطالعه شده در این تحقیق عملکرد بهتری در تنظیم جریان داشته و این سازه در شبکه‌های آبیاری قابل کاربرد می‌باشد. شکل ۶ مقایسه دبی‌های خروجی مدل‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که میزان دبی‌های خروجی با یکدیگر اختلاف چندانی نداشته و کارایی مدل‌های مورد بررسی نزدیک بهم می‌باشد.

**بررسی انرژی مخصوص جریان قبل و بعد از دریچه‌های متوالی**

دریچه‌های قائم در حالت پرکاربرد خود، که بصورت تکی بکار گرفته می‌شوند در استهلاک انرژی زیاد موثر نبوده و عموماً از اتلاف انرژی ناشی از جریان از زیر دریچه صرف نظر می‌شود.



شکل ۵- مقادیر دبی خروجی الف) مدل  $S_{24}$ ، ب) مدل  $S_{44}$ .

جدول ۴- مقادیر دبی خروجی مدل  $S_{44}$  و درصد خطای آن با دبی طراحی.

درصد خطای نسبی	دبی در واحد عرض طراحی (L cm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	دبی در واحد عرض محاسباتی (L)	عمق خروجی (cm)	عمق ورودی (cm)
۶/۵۵	۰/۵	۰/۵۳۵	۳/۷۶	۱۵
۲/۸۱	۰/۵	۰/۵۱۴	۳/۲۸	۱۷/۵
۵/۴۵	۰/۵	۰/۵۲۹	۳/۱۸	۲۰
۶/۵۷	۰/۵	۰/۵۳۵	۳/۰۱	۲۲/۵
۸/۱۴	۰/۵	۰/۵۴۴	۲/۷۷	۲۵

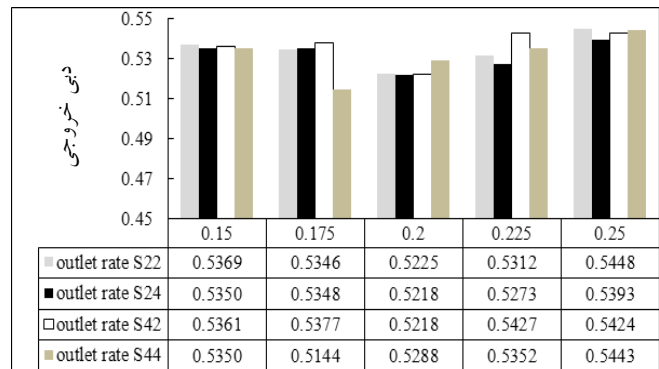


سازه دریچه‌های متوالی فعال است میزان استهلاك انرژی ۱۵ تا ۲۲ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد این سازه علاوه بر تنظیم جریان با دقت بالا در دامنه مدولار تعریف شده، در استهلاك انرژی جریان نیز موثر بوده و می‌توان اتلاف انرژی را به عنوان اثر دوم این سازه تعریف کرد.

جدول ۵- درصد استهلاك انرژی در مدل‌ها.

عمق ورودی جریان (cm)	درصد استهلاك انرژی			
	مدل S <sub>22</sub>	مدل S <sub>24</sub>	مدل S <sub>42</sub>	مدل S <sub>44</sub>
۱۵	۶/۴۵	۸/۱۵	۵/۸۵	۵/۸۲
۱۷/۵	۱۲/۷۸	۱۲/۴	۱۲/۰۲	۱۳/۴۵
۲۰	۱۵/۴۲	۱۳/۵۹	۱۳/۵۵	۱۳/۶۴
۲۲/۵	۲۱/۹۲	۲۲/۵	۱۵/۹۱	۱۴/۹۳
۲۵	۲۱/۵۴	۱۶/۵۱	۲۱/۷۵	۱۰/۱۶

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد میزان استهلاك انرژی با افزایش عمق ورودی جریان افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه میزان انرژی مستهلك شده در مدل‌ها نشان می‌دهد عملکرد آن‌ها در این مورد نیز تقریباً نزدیک بهم است ولی برای دریچه‌های با فاصله کم، این میزان اندکی از سایر مدل‌ها بیشتر می‌باشد. شکل ۷ نیز نشان می‌دهد با افزایش عمق ورودی جریان و فعال شدن تیغه‌های بعدی برای همه مدل‌ها میزان استهلاك انرژی بیشتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود درصد استهلاك انرژی مدل‌ها برای یک عمق ورودی ثابت نزدیک بهم بدست می‌آید.



شکل ۶- مقایسه مقادیر دبی خروجی مدل‌ها با یکدیگر.

اما در مورد سازه دریچه‌های متوالی به دلیل وجود سه تیغه قائم در مسیر آب، مقداری از انرژی جریان مستهلك شود بنابراین در این بخش از تحقیق حاضر با استفاده از رابطه ۲ انرژی مخصوص جریان بر حسب متر، در دو مقطع قبل و بعد از دریچه‌های متوالی (مقاطع A و B) محاسبه و میزان اتلاف انرژی در مدل‌ها بررسی می‌شود.

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad [۲]$$

برای محاسبه درصد استهلاك انرژی در مدل‌ها از رابطه ۳ استفاده شده است:

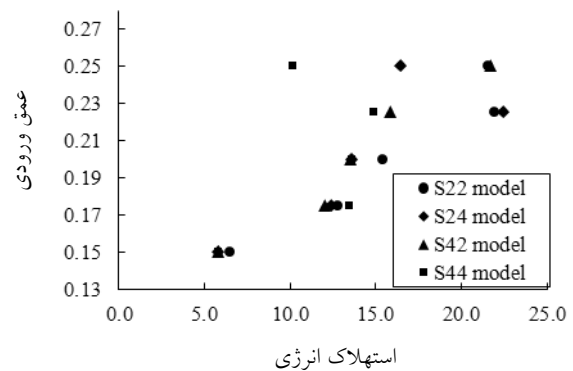
$$\text{درصد استهلاك انرژی} = \frac{E_A - E_B}{E_A} \times 100 \quad [۳]$$

که در آن  $E_A$ : انرژی مخصوص جریان قبل از دریچه-های متوالی و  $E_B$ : انرژی مخصوص جریان در پایین-دست دریچه‌ها است. جدول ۵ نشان می‌دهد برای مدل‌های مورد بررسی، در عمق ورودی ۱۵ سانتی‌متر، که تنها دریچه اول فعال است همانند دریچه‌های قائم تکی استهلاك انرژی زیادی صورت نگرفته و قابل صرف-نظر کردن است.

ملاحظه می‌گردد با افزایش عمق جریان ورودی و فعال شدن دریچه‌های بعدی، میزان اتلاف انرژی در جریان از دریچه‌ها افزایش پیدا کرده است بصورتی که برای عمق ورودی ۲۲/۵ سانتی‌متر که هر سه تیغه قائم در

و سوم به ۴ سانتی‌متر تغییر داده شد. برای مدل-های  $S_{42}$  به ترتیب فواصل دریاچه‌ها ۲ و ۴ سانتی‌متر و در مدل  $S_{44}$ ، ۴ و ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. جریان در هر ۴ مدل بیان شده، برای ۵ عمق آب جریان ورودی ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵ و ۲۵ سانتی‌متر شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. زمان شبیه‌سازی برای جریان به منظور پایدار شدن آن، برابر ۲۰ ثانیه به نرم-افزار داده شد و شبیه‌سازی جریان با انتخاب مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG انجام شده است. پس از شبیه‌سازی جریان در مدل‌ها، مقادیر دبی خروجی با دبی طراحی مقایسه شده و میزان استهلاك انرژی جریان در مدل‌ها بررسی شده است.

مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی در ارزیابی عملکرد سازه دریاچه‌های متوالی اختلاف دبی خروجی این سازه با دبی طراحی در عمق‌های جریان ورودی مختلف می‌باشد. با مقایسه نتایج حل عددی با دبی خروجی مدل  $S_{22}$ ، مقادیر متناظر آزمایشگاهی میثرا و همکاران (۱۹۹۰) ملاحظه گردید تفاوت دبی‌های خروجی عددی و آزمایشگاهی همواره کمتر از ۱۰ درصد بوده است. بنابراین مدل شبیه‌سازی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و نتایج حل عددی برای بررسی عملکرد مدل قابل کاربرد می‌باشد. دقت در نتایج حل عددی مدل  $S_{22}$  نشان داد برای تمامی عمق‌های جریان ورودی مورد بررسی در این تحقیق، مقدار دبی جریان خروجی بدست آمده از نرم‌افزار بیشتر از مقدار دبی آزمایشگاهی است که دلیل آن می‌تواند انتخاب مدل آشفتگی، نحوه تعیین پروفیل سطح جریان و یا شرایط مرزی باشد. پس از صحت‌سنجی مدل، مقادیر دبی خروجی برای هر ۴ مدل شبیه‌سازی شده با مقدار دبی طرح مقایسه گردید. محاسبه درصد اختلاف دبی خروجی مدل‌ها با دبی طراحی نشان داد در همه حالت‌های مورد بررسی (تمامی عمق‌های جریان ورودی برای هر ۴ مدل)، در حدود ۷ و یا ۸ درصد اختلاف وجود دارد بنابراین با اطمینان می‌توان گفت سازه



شکل ۷- مقایسه درصد استهلاك انرژی در مدل‌ها

### نتیجه گیری کلی

از میان سازه‌های آبگیر، دریاچه‌های متوالی با هدف تحویل مقدار نسبتاً ثابت دبی برای محدوده ای از تغییرات عمق آب در کانال تغذیه کننده، که به دامنه مدولار معروف است طراحی می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D جریان از دریاچه‌های متوالی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تاثیر فاصله بین تیغه‌ها در عملکرد این سازه ۴ مدل متفاوت شبیه‌سازی شد. ابعاد کانال و میزان بازشدگی دریاچه‌ها، ضخامت دریاچه‌ها، دامنه مدولار، دبی طراحی و موقعیت قرار گیری اولین دریاچه نسبت به بالادست کانال در مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شد. بطوریکه میزان بازشدگی دریاچه‌ها به ترتیب از بالادست برابر ۵/۵، ۴/۷ و ۴/۱ سانتی‌متر و دامنه مدولار (بازه تغییرات عمق جریان ورودی) در محدوده ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد و دبی طراحی برای بازشدگی‌های فوق برابر ۰/۵ لیتر بر ثانیه در سانتی‌متر است. این پارامترها از روی شرایط آزمایشگاهی میثرا و همکاران (۱۹۹۰) تعیین شده است. فاصله بین دریاچه‌ها برای اولین مدل مطابق مدل آزمایشگاهی برابر ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده، نتایج حل عددی این مدل با داده‌های آزمایشگاهی میثرا و همکاران (۱۹۹۰) مقایسه گردید. در دومین مدل شبیه‌سازی شده که در متن پژوهش حاضر  $S_{24}$  نامگذاری شده است فاصله بین دریاچه دوم

بررسی میزان استهلاک انرژی در مدل‌ها نشان داد برای حالتی که تنها دریچه اول فعال است و جریان سرریز نمی‌شود اتلاف انرژی قابل صرف نظر کردن می‌باشد ولی با افزایش عمق جریان ورودی و فعال شدن دریچه‌های بعدی، استهلاک انرژی ناشی از جریان از دریچه‌های متوالی افزایش یافته و به حدود ۱۵ تا ۲۲ درصد می‌رسد. بنابراین این سازه علاوه بر تنظیم دقیق جریان، در استهلاک انرژی برای عمق‌های ورودی زیاد نیز موثر بوده و برای این منظور نیز می‌تواند به کار گرفته شود. درصد استهلاک انرژی برای یک عمق ورودی ثابت، در صورتی که دریچه‌ها نزدیک بهم در نظر گرفته شود بیشتر است.

دریچه‌های متوالی در تحویل دبی تقریباً ثابت به ازای تغییرات عمق جریان در بالادست کانال با دقت قابل قبولی عمل می‌کند و این سازه می‌تواند برای شبکه‌های آبیاری با تغییرات عمق جریان ورودی در یک بازه مشخص، بکار گرفته شود.

مقایسه مقادیر دبی‌های خروجی مدل‌های بررسی شده با یکدیگر نشان داد میزان اختلاف هر ۴ مدل مورد بررسی با دبی طراحی تقریباً یکسان بوده و تاثیر فاصله بین دریچه‌ها در ارزیابی عملکرد این سازه قابل صرف نظر کردن می‌باشد و میزان دبی خروجی بیشتر به مقادیر بازشدگی دریچه وابسته است. همچنین با مطالعه عملکرد دریچه‌های متوالی نتیجه گرفته می‌شود دامنه مدولار به ارتفاع دریچه بستگی دارد.

#### منابع مورد استفاده

- Akoz M, Kirkgoz M and Oner A, 2009. Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow. *Journal of Hydraulic Research* 47(2): 167-176.
- Anwar AA, 1999. Baffle sluice modules with improved performance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 125(2): 91-95.
- Barghi Khezerloo A, Khalili Shayan H, Farhoudi j and Vatankhah A, 2016. Developing a new method for estimating discharge coefficient of sluice gates under free and submerged flow conditions, *Water and Soil Science-University of Tabriz* 26(4): 207-221. (In Farsi)
- Bijankhan M, Koochakzadeh S and Hoorfar A, 2010. Improving baffle sluice gate design based on hydraulic sensitivity concept of structures. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 40(2): 191-198. (In Farsi)
- Bijankhan M and Koochakzadeh S. 2010. Design of 2 baffles module based on hydraulic sensitivity concept of structures. *Journal of Water and Soil* 24(5): 864-873. (In Farsi)
- Cassan L and Belaud G, 2012. Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates. *Journal of Hydraulic Engineering* 138: 367-373.
- Daneshfaraz R, Ghahramanzadeh A, Ghaderi, A, Rezazadeh Joudi A and Abraham J, 2016. Investigation the effect of edge shape on characteristics of flow under vertical gates. *Journal-American Water Works Association* 108(8): 432-525.
- Daneshfaraz R and Ghaderi A, 2017. Numerical investigation of inverse curvature ogee spillway, *Civil Engineering Journal* 3(11): 1146-1156.
- Daneshfaraz R, Minaei O, Abraham J, Dadashi S and Ghaderi A, 2019. 3-D Numerical simulation of water flow over a broad-crested weir with openings, *ISH Journal of Hydraulic Engineering* doi.org/10.1080/09715010.2019.1581098: 1-9.
- Ghaderi A, Dasineh M and Abbasi S, 2019. Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop. *Journal of Hydraulics* 13(4): 121-131. (In Farsi)
- Helmi AM and El-Gamal MH, 2011. Experimental and numerical investigations of flow through free double baffled gates. *Water SA* 37(2): 245-254.
- Kim DG, 2007. Numerical analysis of free flow past a sluice gate. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(2): 127-132
- Larsen AP and Mishra PK, 1990. Constant discharge device for field irrigation. *Journal of Hydraulic Research* 28(4): 481-489.
- Mehrzad M, Kouchakzadeh S and Bijankhan M, 2014. Design criteria for parallel baffle modules. *Journal of Hydraulics* 9(2): 37-51. (In Farsi)

- Mishra PK, Larsen P and Satyanarayana T, 1990. Development of low-discharge baffle-slucice modules. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(3): 444-453.
- Rajaratnam N and Subramanya K, 1967. Flow equation for the sluice gate. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 93(3): 167-186.
- Swamee PK, 1992. Sluice-gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(1): 56-60.
- Yarizadeh G and Kouchakzadeh S, 2011. The effect of obstruction on hydraulic sensitivity concept of baffles module, 6<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering, April 26, Semnan University, Semnan, Iran. (In Farsi)