

Investigating the hydrodynamic characteristics of the multiple rectangular lopac gates in submerged flow

Setare Fathi¹, Seyed Mohsen Sajadi^{*2}, Javad Ahadiyan³

1. M.Sc. of Hydraulic Structure, Dept. of Water Structure, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: setarefathi.98@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Structure, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sadjadi@scu.ac.ir
3. Professor, Dept. of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 04.29.2024
Revised: 06.23.2024
Accepted: 08.03.2024

Keywords:
Flow3d,
Lopac gates,
Maximum shear stress,
Shear stress distribution,
Vortex

ABSTRACT

Background and Objectives: Today, due to the reduction of water resources and the issue of excessive water consumption in the agricultural sector, for the purpose of distribution, delivery, and flow regulation to waterways, and to prevent water losses, novel structures with better efficiency and easier operation have been introduced by researchers. Lopac gates are one of the hydraulic structures for flow control and regulation, which have features such as the possibility of automation, open-channel flow, and easier installation and placement compared to other structures. In this study, a rectangular multi-lopac gate, which is one of the novel types of lopac gates, has been used. Considering the easier operation of smaller gates compared to larger gates, in this study, has been investigated the effect of two smaller gates instead of a single gate on the hydraulic characteristics in the submerged condition with 70%, 80%, and 90% submergence levels and with the aim of increasing efficiency and ease in design and construction.

Materials and Methods: In the present study, several simulations were performed to validate and select the turbulence model. After investigation the performed simulations, a mesh of 800,000 cells, the RNG turbulence model, and a time of 40 seconds for the flow to reach stability were selected. Then, to investigate the hydraulic parameters of maximum shear stress, maximum horizontal force acting on the gate, velocity distribution range, and shear stress in the rectangular lopac gate under submerged flow conditions, and compare it with the single gate case, simulations were performed at three discharges of 25, 35, and 45 liters per second, opening angles of 35, 40, and 45 degrees, and three submergence levels of 70%, 80%, and 90% in two different geometries, with a total of 54 simulations.

Results: The results showed that the maximum shear stress has an inverse relationship with submergence and opening angle, and the maximum horizontal force acting on the gate has a direct relationship with submergence and discharge. It was observed that all the investigated parameters in the two-gate case decreased compared to the single-gate case, and the amount of this decrease in the horizontal force acting on the gate was 33.5%, which was the highest decrease at a discharge of 25 liters per second, an opening angle of 45 degrees, and 90% submergence, and the lowest decrease was at a discharge of 25 liters per second, an opening

angle of 45 degrees, and 70% submergence. The reduction in the maximum shear stress in the two-gate case compared to the single-gate case was 13.25%, with the highest decrease of 23.29% occurring at a discharge of 45 liters per second, an opening angle of 45 degrees, and 90% submergence, and the lowest decrease of 6.21% occurring at a discharge of 45 liters per second, an opening angle of 35 degrees, and 80% submergence. It was also observed that the distribution range and elongation of velocity and shear stress on the flume bed increased with increasing discharge and opening angle, and in general, the distribution range and elongation of velocity and shear stress on the flume bed decreased in the two-gate case compared to the single-gate case.

Conclusion: According to the results, it can be stated that the distribution range of velocity and shear stress has a direct relationship with discharge and opening angle, and the elongation of the velocity and shear stress distribution in the two-gate case decreased compared to the single-gate case. The maximum shear stress has an inverse relationship with the opening angle and submergence, and it decreases by 13.26% compared to the single-gate case. This is due to the reduction of the area of vortices in the two-gate case. Investigating the maximum horizontal force acting on the gate showed that this parameter has a direct relationship with flow rate, opening angle, and submergence, and it decreases by 33.5% in the multi-gate cases compared to the single-gate case.

Cite this article: Fathi, Setare, Sajadi, Seyed Mohsen, Ahadiyan, Javad. 2024. Investigating the hydrodynamic characteristics of the multiple rectangular lopac gates in submerged flow. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 79-98.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22395.3728

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی دریاچه سالونی چندگانه مستطیلی در جریان مستغرق

ستاره فتحی^۱، سیدمحسن سجادی^{۲*}، جواد احدیان^۳

۱. کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: setarefathi.98@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir
۳. استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: امروزه به دلیل کاهش منابع آبی و مسأله مصرف عمده آب در حوزه کشاورزی به منظور توزیع، تحویل و تنظیم جریان در شبکه آبیاری و جلوگیری از تلفات آب، سازه‌هایی نوین با کارایی بهتر و بهره‌برداری ساده‌تر از جانب پژوهش‌گران معرفی شده است. دریاچه‌های سالونی از جمله سازه‌های هیدرولیکی تنظیم و کنترل جریان آب هستند که ویژگی‌هایی از جمله امکان خودکارسازی، روگذر بودن جریان و نصب و جانمایی آسان‌تر نسبت به دیگر سازه‌ها را دارند. در این پژوهش از دریاچه سالونی چندگانه مستطیلی که از انواع نوین دریاچه سالونی است استفاده شده است. با توجه به آسان‌تر بودن بهره‌برداری از دریاچه کوچک‌تر نسبت به دریاچه بزرگ، در این پژوهش تأثیر دو دریاچه کوچک‌تر به جای تک‌دریاچه بر خصوصیات هیدرولیکی در حالت مستغرق با میزان استغراق ۸۰،۷۰ و ۹۰ درصد و باهدف بالابردن کارایی و سهولت در طراحی و ساخت سازه، موردبررسی قرار گرفت.
واژه‌های کلیدی: بیشینه تنش برشی، توزیع تنش برشی، دریاچه سالونی، گردابه، Flow3D	مواد و روش‌ها: در پژوهش پیش‌رو به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی بیشینه تنش برشی، بیشینه نیروی افقی وارد بر دریاچه، گردابه‌های جریان، محدوده توزیع سرعت و تنش برشی در دریاچه سالونی مستطیلی در شرایط جریان مستغرق و مقایسه آن با حالت تک‌دریاچه شبیه‌سازی‌هایی در سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، زاویه بازشدگی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه و سه استغراق ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد در دو هندسه متفاوت و در مجموع ۵۴ شبیه‌سازی که در آن از تعداد ۸۰۰۰۰۰ سلول مش‌بندی، مدل آشفتگی RNG و مدت‌زمان ۴۰ ثانیه برای رسیدن جریان به پایداری استفاده شده است مدل‌سازی و بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیشینه تنش برشی با استغراق و میزان زاویه بازشدگی رابطه‌ای معکوس دارد و بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه با استغراق و دبی رابطه‌ای مستقیم دارد. مشاهده شد تمامی پارامترهای بررسی شده در حالت دو دریچه نسبت به تک‌دریچه کاهش یافته‌اند. مقدار کاهش نیروی افقی وارد بر دریچه چندگانه نسبت به حالت تک دریچه $33/5$ درصد بود که بیش‌ترین مقدار این کاهش در دبی 25 لیتر بر ثانیه، زاویه بازشدگی 45 درجه و استغراق 90 درصد بود و کم‌ترین میزان کاهش در دبی 25 لیتر بر ثانیه، زاویه بازشدگی 45 درجه و استغراق 70 درصد بود. میزان کاهش بیشینه تنش برشی در حالت دو دریچه نسبت به تک‌دریچه $13/3$ درصد بود؛ بیش‌ترین میزان این کاهش $23/3$ درصد بوده است که در دبی 45 لیتر بر ثانیه، زاویه بازشدگی 45 درجه و استغراق 90 درصد رخ داده است و هم‌چنین کم‌ترین میزان این کاهش $6/21$ درصد بوده که در دبی 45 لیتر بر ثانیه، زاویه بازشدگی 35 درجه و استغراق 80 درصد رخ داده است. هم‌چنین مشاهده شد که محدوده توزیع و کشیدگی سرعت و تنش برشی در کف فلوم در هر دو حالت تک‌دریچه و چندگانه با افزایش دبی و میزان زاویه بازشدگی افزایش می‌یابد و به‌طورکلی محدوده توزیع و کشیدگی سرعت و تنش برشی در کف فلوم در حالت چندگانه نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج می‌توان بیان کرد محدوده توزیع سرعت و تنش برشی با دبی و زاویه بازشدگی رابطه‌ای مستقیم دارند و هم‌چنین میزان کشیدگی توزیع سرعت و تنش برشی در حالت دو دریچه نسبت به تک‌دریچه کاهش یافت. این موضوع به دلیل کاهش سطح گردابه‌ها در حالت دو دریچه می‌باشد. بیشینه تنش برشی با زاویه بازشدگی و درصد استغراق رابطه عکس دارد و با کاهش سرعت قابل توجیه است. بنابراین نسبت به حالت تک‌دریچه $13/3$ درصد کاهش می‌یابد. بررسی بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه نشان داد که این پارامتر با دبی، زاویه بازشدگی و استغراق رابطه مستقیم دارد و هم‌چنین در حالت‌های چندگانه نسبت به حالت تک دریچه $33/5$ درصد کاهش می‌یابد.

استناد: فتحی، ستاره، سجادی، سیدمحسن، احدیان، جواد (۱۴۰۳). بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی دریچه سالونی چندگانه مستطیلی در جریان مستغرق. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۲)، ۹۸-۷۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2024.22395.3728



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

برای تنظیم سطح آب و یا کنترل دبی عبوری در کانال‌های آبیاری از سازه‌های کنترل‌کننده جریان استفاده می‌شود. این نوع از سازه‌ها انواع مختلفی داشته که یکی از مهم‌ترین آن‌ها دریچه‌های سالونی می‌باشند (۱).

دریچه‌های سالونی طرح نوینی از دریچه‌ها بوده که در سال ۱۹۸۹ توسط peter Langeman به جهت تنظیم و مدیریت نوسان‌های سطح آب طراحی شده است. این سازه با طرحی مشابه با درب‌های سالن طراحی شده است و صفحه‌های تشکیل‌دهنده آن به دیواره‌های کانال لولا شده و رقوم سطح آب بالادست خود را در دبی‌های مختلف، با افزایش و یا کاهش میزان بازشدگی در امتداد جریان تنظیم می‌نماید. تاکنون پروژه‌های موفقیت‌آمیزی در زمینه دریچه سالونی اجرایی شده که می‌توان به پروژه Middle Rio Grand در نیومکزیکو ایالات متحده اشاره نمود (۲).

آکوا سیستم (۲۰۰۰) جریان با درجه استغراق ۰٫۳ را آستانه استغراق معرفی کرده و معادلات دبی را در شرایط جریان آزاد و مستغرق برای این سازه ارائه نموده است. هنگامی که درجه استغراق کم‌تر از ۰٫۳ باشد، جریان عبوری از دریچه آزاد بوده و چنانچه این مقدار بیش‌تر از ۰٫۳ باشد جریان مستغرق خواهد بود (۳).

نجم و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عملکرد چند دریچه به‌جای یک دریچه بر روی الگوی سرعت در شرایط جریان مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد که الگوی سرعت به عدد فرود در ناحیه انقباض، عملکرد دریچه‌ها، نسبت استغراق و نوع آن (اصلی یا اضطراری) بستگی دارد (۴).

بدیعی و همکاران (۲۰۱۸) با کمک شبیه‌سازی عددی به بررسی خصوصیات هیدرولیکی دریچه‌های سالونی در جریان مستغرق پرداختند. نتایج حاصل نشانگر این بود که گردابه‌ها در پایین‌دست دریچه

ایجاد می‌شوند و یک حرکت سینوسی شکل در شبکه جریان تشکیل می‌دهند. همچنین مشاهده شد که تنش برشی در پایین‌دست دریچه بیش‌ترین مقدار خود را دارد (۵).

بابایی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر مشخصات هندسی و شرایط هیدرولیکی بر عملکرد دریچه سالونی-پارشال فلوم پرداختند. نتایج نشان داد جریان پایین‌دست مستغرق بر روی دریچه سالونی پارشال فلوم موجب افزایش افت انرژی در استغراق‌های ۶۰، ۷۰ و ۸۰٪ به ترتیب به مقدار ۴/۴، ۴/۷ و ۳۹/۱ درصد می‌گردد (۶).

شفاعی بجمستان و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه آزمایشگاهی ضریب دبی عبوری از دریچه سالونی بیضوی با ایجاد تبدیل تدریجی در شرایط مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد با نصب این سازه در بالادست دریچه، ضریب دبی ۹/۳۶٪ افزایش یافته و همچنین در تمامی استغراق‌ها و بازشدگی‌ها با افزایش زاویه تبدیل تدریجی، ضریب دبی نیز افزایش خواهد یافت (۷).

مبارک و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی عددی تأثیر نسبت‌های بیضوی متفاوت بر عملکرد هیدرولیکی دریچه سالونی بیضوی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت بیضوی استهلاک انرژی، از ۸ تا ۲۰٪ و سرعت جریان از ۲۲ تا ۵۴٪ کاهش پیدا کرده و همچنین در نسبت‌های بیضوی بزرگ‌تر از ۱ گردابه‌ها و انحراف جریان از مسیر کاهش می‌یابد (۸).

پیل‌بالا و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی باهدف بررسی عملکرد دریچه سالونی بیضوی در شرایط جریان مستغرق آغاز نمودند و مقادیر اتلاف انرژی، ضریب دبی و گردابه‌ها را در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف مورد بررسی قراردادند. نتایج حاصل نشان داد که بیش‌ترین ضریب دبی در نسبت بیضوی ۱ و کم‌ترین ضریب دبی در نسبت بیضوی ۰/۵ به‌دست آمده است (۹).

می‌شود برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب استفاده می‌شود و روش VOF از تحلیل هم‌زمان معادلات ناویر-استوکس جریان متلاطم و از طریق سعی و خطا و با انواع روش‌های، CFD باهدف نمایش رفتار سیال در سطوح آزاد استفاده می‌گردد. هم‌چنین این نرم‌افزار شامل مدل‌های آشفتگی مختلفی بوده که با توجه به تعداد معادلات دیفرانسیل به جهت ارتباط تنش‌های تلاطم با سرعت‌های متوسط‌گیری شده یا گرادیان آن‌ها شامل، مدل‌های صفر معادله‌ای (طول اختلاط پراختل)، مدل‌های تک‌معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای، مدل‌های دارای معادله تنش، مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ که متداول‌ترین آن‌ها در بحث سازه‌های هیدرولیکی مدل‌های $k-\varepsilon$ و $K-\omega$ و RNG می‌باشند.

مشخصات مدل آزمایشگاهی و هندسه مدل عددی:

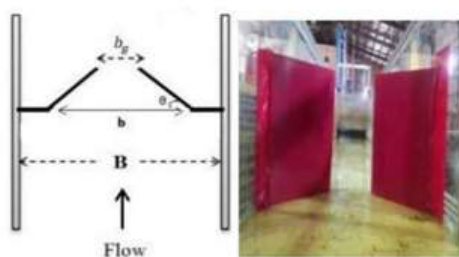
برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی از نتایج آزمایشگاهی پیل‌بالا و همکاران (۲۰۲۱) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی متشکل از یک کانال مستطیلی باز به طول ۱۰ متر است. عرض و ارتفاع کانال اصلی برابر ۸ متر بوده و شیب بستر کانال مستطیلی افقی است و دو لنگه دریچه مستطیلی به طول ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر در محل موردنظر نصب شده است. در مدل آزمایشگاهی پیل‌بالا و همکاران، در مجموع ۴۵ آزمایش با در نظر گرفتن سه دبی (۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه)، سه زاویه بازشدگی (۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه) و سه نسبت استغراق (۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد) انجام شد. هم‌چنین به‌منظور مدل‌سازی کانال آزمایشگاهی و طراحی دریچه موردبررسی از نرم‌افزار AutoCAD استفاده شد و پس از ترسیم آن به‌صورت سه‌بعدی، در قالب فایل STL تهیه و به نرم‌افزار FLOW3D معرفی شد. طرح کلی مدل پیل‌بالا و همکاران و دریچه چندگانه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

فتحی و همکاران (۲۰۲۳) پژوهشی باهدف مدل‌سازی دریچه‌های سالونی چندگانه مستطیلی در شرایط مستغرق با نرم‌افزار FLOW3D آغاز کردند. نتایج حاصل نشان‌دهنده این بود که بیشینه سرعت و بیشینه انرژی متلاطم با میزان استغراق رابطه معکوس داشته‌اند و با بررسی کیفی گردابه‌های جریان نتایج حاصل نشان داد که با افزایش استغراق، کشیدگی و قدرت گردابه‌ها کاهش می‌یابند. هم‌چنین با مقایسه دریچه سالونی چندگانه نسبت حالت تک‌دریچه مشاهده شد که بیشینه سرعت و بیشینه انرژی متلاطم در حالت چندگانه کاهش یافته است که مقدار این کاهش به ترتیب ۷/۷۸ و ۱۳ درصد بوده است (۱۰).

با توجه به مطالعات اخیر، تاکنون تمامی بررسی‌های مرتبط با دریچه سالونی به‌طور عمده در حالت تک‌دریچه انجام شده و تأثیر استفاده از دو دریچه به‌جای تک‌دریچه مورد مطالعه قرار نگرفته است. این پژوهش تأثیر کاربرد دو دریچه کوچک‌تر به‌جای تک‌دریچه بر خصوصیت هیدرولیکی جریان شامل بیشینه تنش برشی، نیرو، توزیع تنش برشی و توزیع سرعت باهدف افزایش کارایی و هم‌چنین ارتقاء و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه انتقال آب مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مدل معرفی جریان سه‌بعدی FLOW3D: در این پژوهش، به جهت مدل‌سازی جریان عبوری از دو دریچه سالونی مستطیلی بر روی کانال از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده است. این نرم‌افزار حل معادلات سه‌بعدی حرکت سیال را در مسائل چندفازی سهولت بخشیده و با به‌کارگیری از تکنیک TruVOF برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان به مدل‌سازی خواهد پرداخت. در این نرم‌افزار از دو روش مدل‌سازی استفاده خواهد شد. روش FAVOR که به‌عنوان روش نماینده کسر مساحت-حجم معرفی

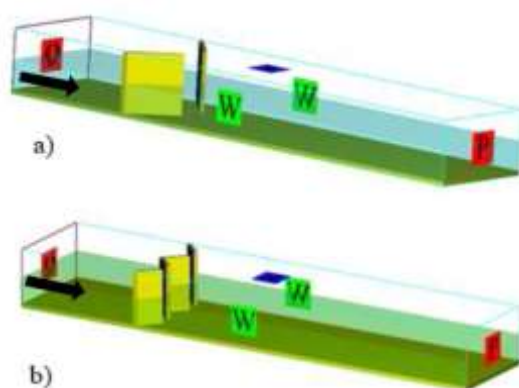


شکل ۱- نمای دریچه سالونی مستطیلی آزمایشگاهی پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱).

Figure 1. General view of the rectangular lopac gate used in the laboratory Pilbala et al. (2021).

دیواره‌های جانبی شبکه سلول‌های محاسباتی و هم‌چنین کف بلوک مش‌بندی در حالت Wall تنظیم شده و سقف این بلوک نیز به علت وجود هوا به صورت شرط مرزی symmetry در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی شرایط مرزی: در پژوهش پیش‌رو با توجه به شکل ۲ یک بلوک مش‌بندی استفاده شده که در آن شرایط مختلف مرزبندی شبکه سلول محاسباتی در مرز ورودی به صورت volume flow rate، مرز خروجی Specified pressure نیز انتخاب گردید.



شکل ۲- شرایط مرزی مدل دریچه سالونی در حالت تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).

Figure 2. boundary conditions lopac gate in state (a) single gate (b) Multiple gate.

زمان شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مدت‌زمان موردنیاز برای رسیدن جریان عبوری از دریچه به پایداری ۴۰ ثانیه انتخاب شده است (جدول ۱). نتایج نشان داد با افزایش تعداد سلول مش‌بندی و افزایش زمان شبیه‌سازی خطای محاسباتی کاهش بسیار جزئی داشته و مدت‌زمان شبیه‌سازی در نرم‌افزار افزایش قابل‌توجهی خواهد داشت.

صحت‌سنجی مش: برای دستیابی به یک مش‌بندی مناسب و بهینه از یک مدل از آزمایش‌های پیل‌بالا و همکاران (۲۰۲۱) با ابعاد مختلف سلول مش‌بندی استفاده شده و نتایج خطای عمق در آن موردبررسی و ارزیابی قرار گرفته است. پس از بررسی مش‌بندی‌های مختلف در نهایت برای تمامی شبیه‌سازی‌ها تعداد ۸۰۰۰۰۰ سلول مش در نظر گرفته شده و هم‌چنین

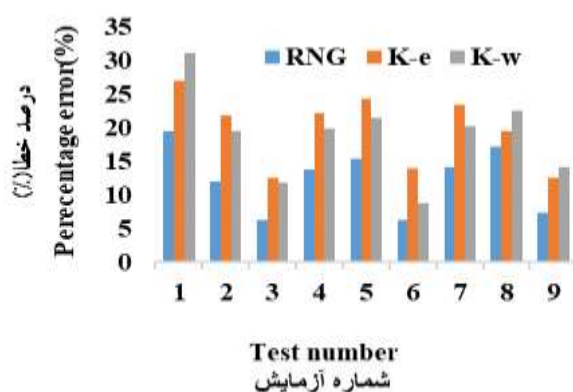
جدول ۱- نتایج آنالیز مش‌بندی مطلوب.

Table 1. Results of the analysis of the number of mesh cells suitable for simulation.

تعداد سلول‌های مش The number of mesh cells	خطای عمق (%) Depth error(%)
200000	7.78
600000	5.59
800000	3.86

بالادست به‌دست‌آمده از مدل عددی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی، با توجه به شکل ۳ مشخص شد مقادیر به‌دست‌آمده در مدل عددی با استفاده از مدل آشفتگی RNG خطای MAPE کم‌تری نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی داشته و از عملکرد بهتری برخوردار بوده است.

انتخاب مدل آشفتگی: گام دوم در مدل‌سازی عددی انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب بوده که دارای نزدیک‌ترین جواب در مقایسه با مدل آزمایشگاهی باشد. به این منظور ۹ آزمایش از پژوهش پیل‌بالا و همکاران (۲۰۲۱) با سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و RNG در مجموع ۲۷ شبیه‌سازی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. با بررسی مقادیر عمق آب



شکل ۳- مقادیر خطای عمق بالادست محاسبه‌شده نسبت به مقادیر آزمایشگاهی برای مدل‌های مختلف آشفتگی.

Figure 3. Calculated upstream depth error values compared to laboratory values for different turbulence models.

پارامتر عمق آب بالادست در نتیجه استفاده‌شده است. به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی که مهم‌ترین گام در انجام یک شبیه‌سازی است ۹ مدل متفاوت نسبت به گام دوم از آزمایش‌های پیل‌بالا و همکاران با تعداد مش‌بندی و مدل آشفتگی مشخص‌شده در گام‌های پیشین شبیه‌سازی و به ارزیابی نتایج آن و مقایسه

صحت‌سنجی مدل عددی: برای صحت‌سنجی مدل عددی و کاهش خطاهای نرم‌افزاری، به انتخاب مش‌بندی بهینه و مدل آشفتگی مناسب برای مدل شبیه‌سازی پرداخته که به این منظور از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی با اطلاعات مدل پیل‌بالا و همکاران (۲۰۲۱) استفاده‌شده که برای این مقایسه از

بوده که در جدول ۲ آمده است. لازم به ذکر است که در جدول ۲، Q دبی عبوری از دریچه، θ زاویه بازشدگی دریچه، S نسبت عمق پایین دست به بالادست دریچه و بیانگر استغراق است.

مقادیر به دست آمده با مدل آزمایشگاهی پرداخته شد. پس از بررسی ها و ارزیابی نتایج و محاسبه درصد خطا مشخص شد که مدل سازی های انجام شده در نرم افزار FLOW3D تفاوت چندانی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نداشته و از درصد خطای کمی برخوردار

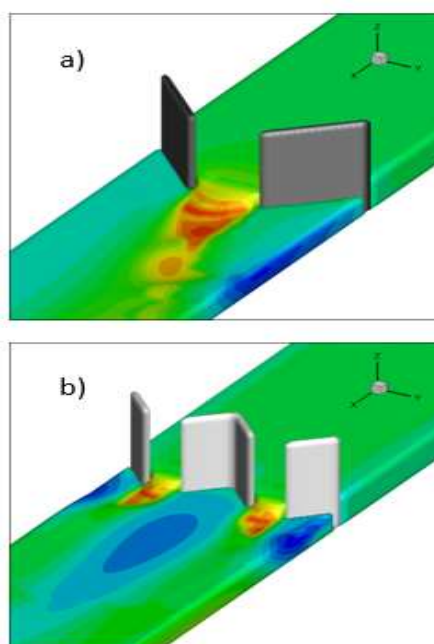
جدول ۲- نتایج صحت سنجی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی.

Table 2. Final validation results of the numerical model compared to the laboratory model.

مشخصات مدل آزمایشگاهی Specifications of the laboratory model				خطای اندازه گیری Measurement error		
Q	S (%)	θ	مدل آشفتگی Confusion model	عمق بالادست آزمایشگاهی Y (up) Laboratory	عمق بالادست عددی Y (up) Numerical	MAPE (%)
25	70	35	RNG	0.1735	0.1589	
25	80	35	RNG	0.187	0.1741	
25	90	35	RNG	0.235	0.2242	
35	70	35	RNG	0.2125	0.1931	
35	80	35	RNG	0.229	0.2144	7.0037
35	90	35	RNG	0.2798	0.2628	
45	70	35	RNG	0.2478	0.2244	
45	80	35	RNG	0.2694	0.2482	
45	90	35	RNG	0.3238	0.3101	

سه دبی متفاوت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و سه درصد استغراق ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد و بررسی پارامتر هیدرولیکی بیشینه تنش برشی، بیشینه نیرو، توزیع تنش برشی و توزیع سرعت است. در شکل ۴ نمای دریچه سالونی مستطیلی در حالت تک دریچه و چندگانه، بر روی کانال مورد بررسی نشان داده شده است.

شبه سازی: تاکنون تمامی پژوهش های صورت گرفته در زمینه هیدرولیک دریچه به طور عمده در حالت تک دریچه انجام شده است. هدف بررسی هیدرولیکی استفاده از دو دریچه به صورت هم زمان، با ابعاد صفحات کوچک تر و با ارتفاع و عرض به ترتیب ۴۵ و ۲۰ سانتی متر و مقایسه آن ها با حالت تک دریچه با صفحاتی به ارتفاع ۴۵ و عرض ۴۰ سانتی متر در سه میزان بازشدگی مختلف ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه و



شکل ۴- مدل شبیه‌سازی شده دریچه سالونی در حالت تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).

Figure 4. Simulated model of lopac gate in state (a) single gate (b) Multiple gate.

جریان یک حرکت سینوسی ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود در حالت دو دریچه میدان سرعت به سمت هر دو دیواره فلوم منحرف می‌شود. مقدار و محدوده توزیع سرعت در حالت دو دریچه نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش یافته است که این روند در تمام دبی‌ها، بازشدگی‌ها و استغراق‌ها مشابه است و تکرار می‌شود. با توجه به شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده می‌شود با افزایش دبی در فلوم، مقدار و محدوده توزیع سرعت نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش میزان زاویه بازشدگی دریچه، مقدار و محدوده توزیع سرعت نیز افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر دبی و زاویه بازشدگی بر توزیع تنش برشی کف: در این مطالعه توزیع تنش برشی کف در سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، سه زاویه بازشدگی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد توسط نرم‌افزار tecplot رسم شده است و به مقایسه و بررسی آن در حالت تک‌دریچه و دو دریچه پرداخته

نتایج و بحث

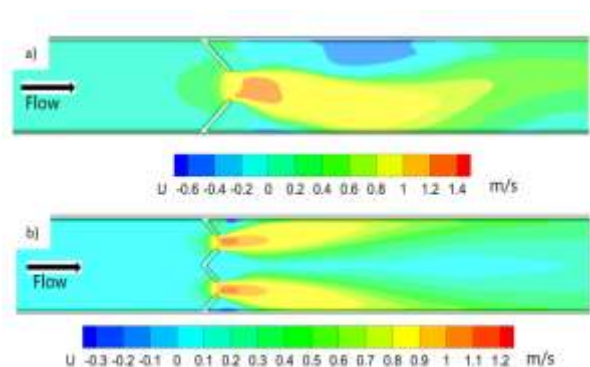
در این بخش به مقایسه کاربرد دریچه سالونی چندگانه مستطیلی نسبت به حالت تک‌دریچه پرداخته می‌شود. ابتدا توسط نرم‌افزار (Flowsight) مقادیر عددی بیشینه تنش برشی، بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه را برداشت کرده و تحلیل می‌شود با استفاده از نرم‌افزار tecplot محدوده توزیع تنش برشی و توزیع سرعت استخراج و تحلیل می‌شود.

بررسی تأثیر دبی و زاویه بازشدگی بر توزیع سرعت در کف: توزیع سرعت در سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، سه زاویه بازشدگی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد در کف فلوم، توسط نرم‌افزار tecplot رسم شده و به مقایسه و بررسی آن در حالت تک‌دریچه و دو دریچه پرداخته شد.

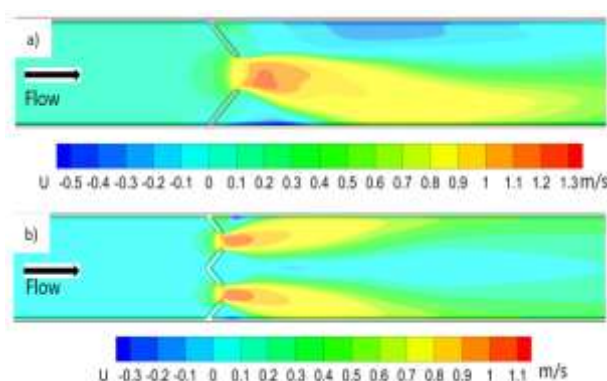
با توجه به شکل‌های ۵ تا ۹ مشاهده می‌شود که طیف رنگی ایجاد شده نشان‌دهنده توزیع میدان سرعت در کف فلوم است. در حالت تک‌دریچه میدان سرعت به سمت یک دیواره فلوم منحرف می‌شود و در شبکه

رابطه مستقیم دارد و با افزایش میزان دبی، محدوده و میزان توزیع تنش برشی در کف افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ قابل مشاهده است که محدوده توزیع تنش برشی با زاویه بازشدگی هم رابطه مستقیم دارد به گونه‌ای که با افزایش میزان زاویه بازشدگی، محدوده و مقدار توزیع تنش برشی افزایش یافته است. هم‌چنین در تمام دبی‌ها و بازشدگی و استغراق‌ها محدوده توزیع تنش برشی در حالت دو دریچه نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش یافته است.

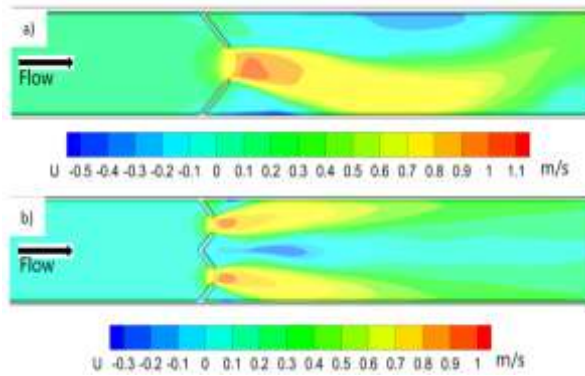
شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ مشاهده می‌شود طیف رنگی ایجادشده نشان‌دهنده توزیع میدان تنش برشی در قسمت‌های مختلف فلوم است و در حالت تک‌دریچه میدان تنش برشی به سمت یک دیواره در حالت دو دریچه میدان تنش برشی به سمت هر دو دیواره فلوم منحرف شده است و حرکت سینوسی شکل در شبکه جریان دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود توزیع تنش برشی روندی کاملاً مشابه با توزیع سرعت دارد. محدوده توزیع تنش برشی با دبی



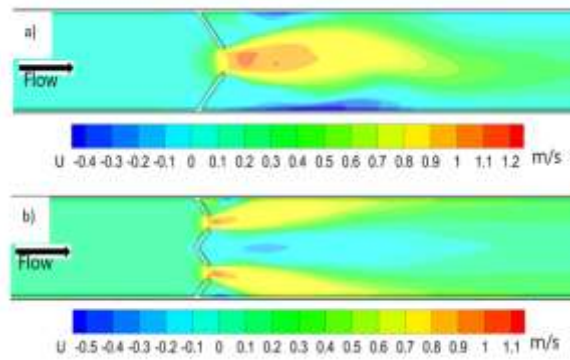
شکل ۵- توزیع سرعت در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 5. Velocity distribution at a flow rate of 45 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



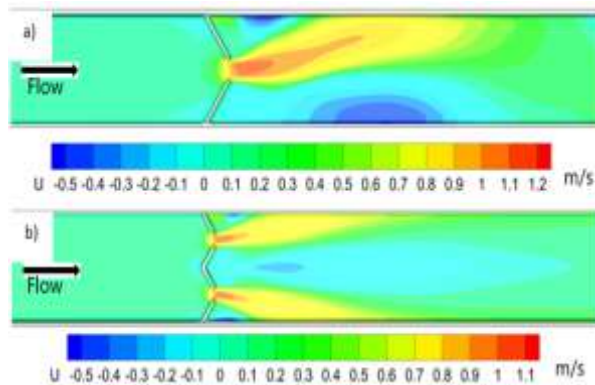
شکل ۶- توزیع سرعت در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 6. Velocity distribution at a flow rate of 35 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



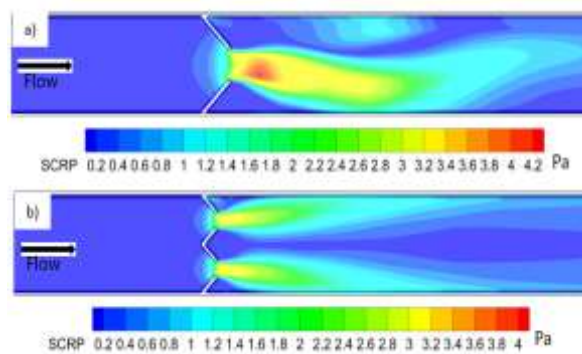
شکل ۷- توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 7. Velocity distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



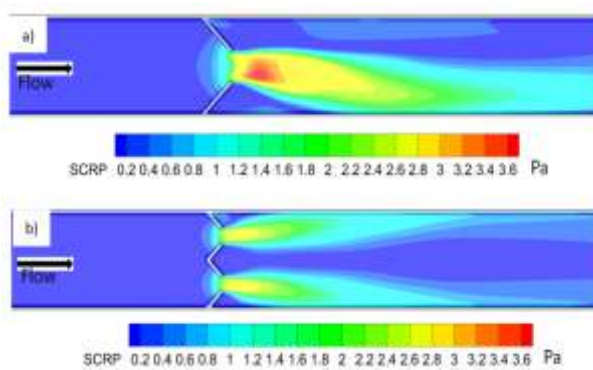
شکل ۸- توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۰ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 8. Velocity distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 40 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



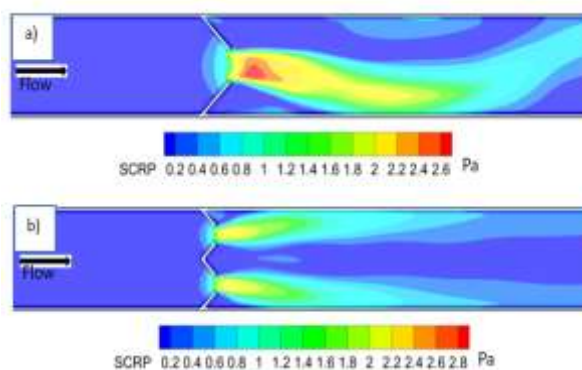
شکل ۹- توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 9. Velocity distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 35 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



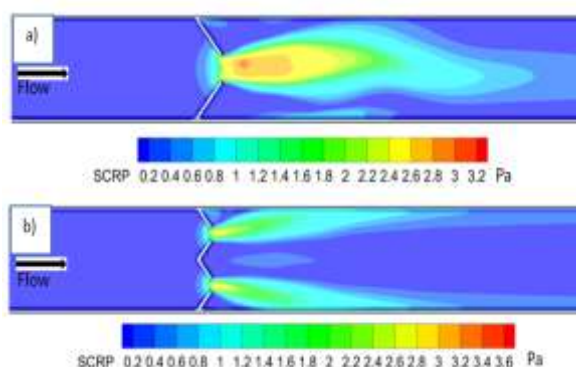
شکل ۱۰- توزیع تنش برشی در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 10. shear stress distribution at a flow rate of 45 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



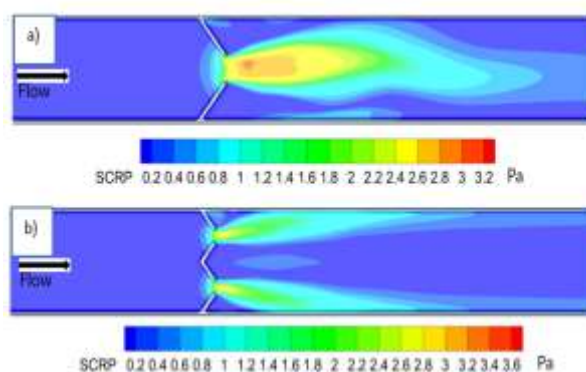
شکل ۱۱- توزیع تنش برشی در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 11. shear stress distribution at a flow rate of 35 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



شکل ۱۲- توزیع تنش برشی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک دریچه (a) و چندگانه (b).
 Figure 12. shear stress distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



شکل ۱۳- توزیع تنش برشی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۰ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 13. Shear stress distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 40 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



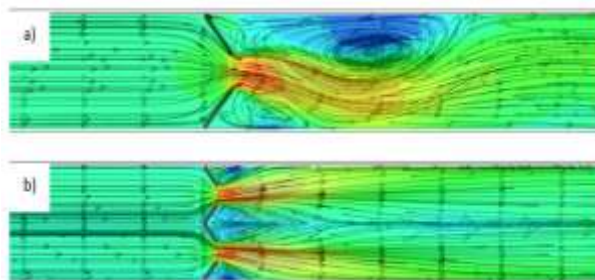
شکل ۱۴- توزیع تنش برشی در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 14. shear stress distribution at a flow rate of 25 lit/s, opening of 35 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.

است و در خلاف جهت آن گردابه ایجاد شده است و در حالت چندگانه (دو دریچه) میدان توزیع به سمت هر دو دیواره آبراهه منحرف می‌شود و گردابه‌های نسبتاً بزرگ در قسمت میانی دریچه و گردابه‌هایی کوچک‌تر در پشت دریچه‌ها ایجاد می‌شود. با توجه به این که سرعت در حالت چندگانه (دو دریچه) نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش می‌یابد در نتیجه شاهد کاهش قدرت و کشیدگی گردابه‌ها در حالت چندگانه هستیم. هرچه وسعت و کشیدگی گردابه‌ها بیشتر باشد در نتیجه مناطق رسوب‌گذاری و رشد گیاهان بیشتر می‌شود و با گذشت زمان باعث کاهش ضریب دبی عبوری از دریچه می‌شود.

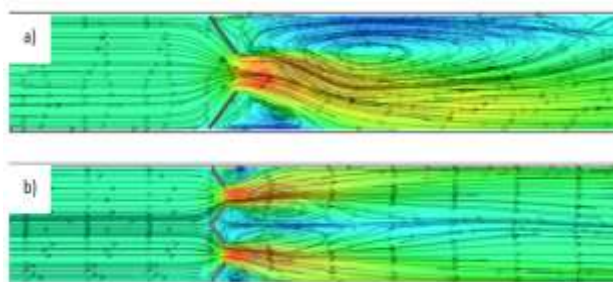
بررسی گردابه‌های جریان: به چرخش دایره‌ای قسمتی از سیال در حول یک محور ثابت، گردابه گفته می‌شود. این چرخش باعث مکیده شدن اجزایی می‌شود که در اطراف سیال در حال چرخش هستند. در این مطالعه گردابه‌های جریان در سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، سه بازشدگی ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد در حالت چندگانه (دو دریچه) و حالت تک‌دریچه توسط نرم‌افزار tecplot رسم و مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ رنگ‌بندی قرمز، سبز، زرد و نارنجی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده محدوده توزیع سرعت هست. هم‌چنین مشاهده می‌شود در حالت تک‌دریچه میدان توزیع سرعت به سمت یک دیواره آبراهه منحرف شده

می‌شود که گردابه‌ها با زاویه بازشدگی رابطه معکوسی دارند به گونه‌ای که با افزایش زاویه بازشدگی کشیدگی گردابه‌ها کم‌تر می‌شود.

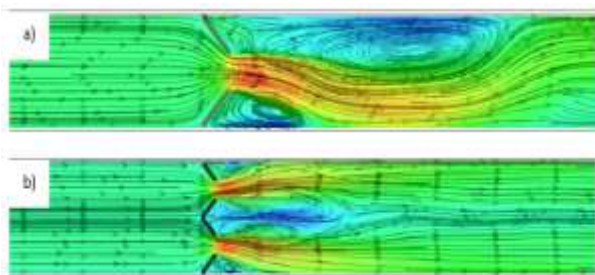
با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ مشاهده می‌شود که گردابه‌ها یک رابطه معکوس با دبی دارد به طوری که با افزایش دبی کشیدگی گردابه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ مشاهده



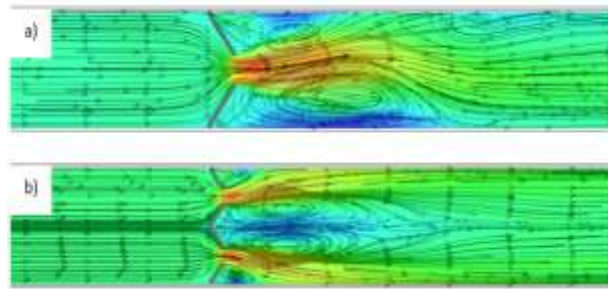
شکل ۱۵- توزیع سرعت در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 15. Streamline at a flow rate of 45 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



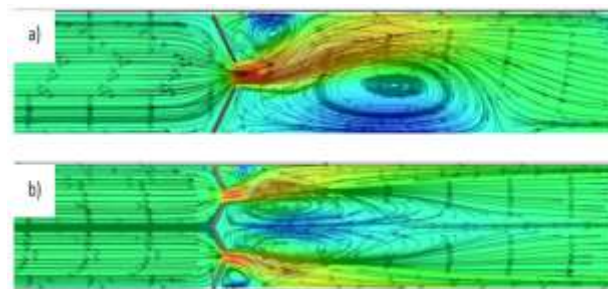
شکل ۱۶- توزیع سرعت در دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 16. Streamline at a flow rate of 35 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



شکل ۱۷- گردابه در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 17. Streamline at a flow rate of 25 lit/s, opening of 45 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



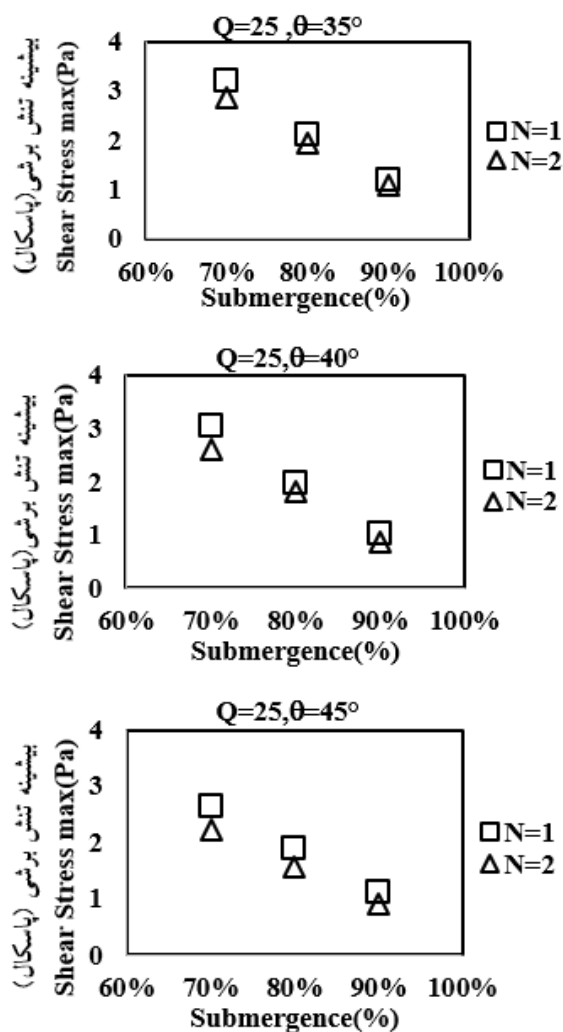
شکل ۱۸- توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۰ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 18. Streamline at a flow rate of 25 lit/s, opening of 40 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.



شکل ۱۹- توزیع سرعت در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و استغراق ۷۰٪ تک‌دریچه (a) و چندگانه (b).
Figure 19. Streamline at a flow rate of 25 lit/s, opening of 35 degrees and submergence of 70 Percent in two cases (a) single gate (b) Multiple gate.

دو دریچه بیشینه تنش برشی ۱۳/۲۵ درصد نسبت به زمانی که از تک‌دریچه استفاده می‌شود کاهش یافته است؛ که بیش‌ترین میزان این کاهش ۲۳/۲۹ درصد بوده است که در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۹۰ درصد رخ داده است و هم‌چنین کم‌ترین میزان این کاهش ۶/۲۱ درصد بوده که در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۳۵ درجه و استغراق ۸۰ درصد رخ داده است.

بررسی بیشینه تنش برشی: با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که بیشینه تنش برشی در هر دو حالت تک‌دریچه و دو دریچه با میزان زاویه بازشدگی و استغراق رابطه معکوس دارد به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه بازشدگی، بیشینه تنش برشی کاهش یافته و با افزایش درصد استغراق، مقادیر بیشینه تنش برشی کاهش می‌یابد و این روند در تمامی دبی‌ها تکرار می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود در زمان استفاده از

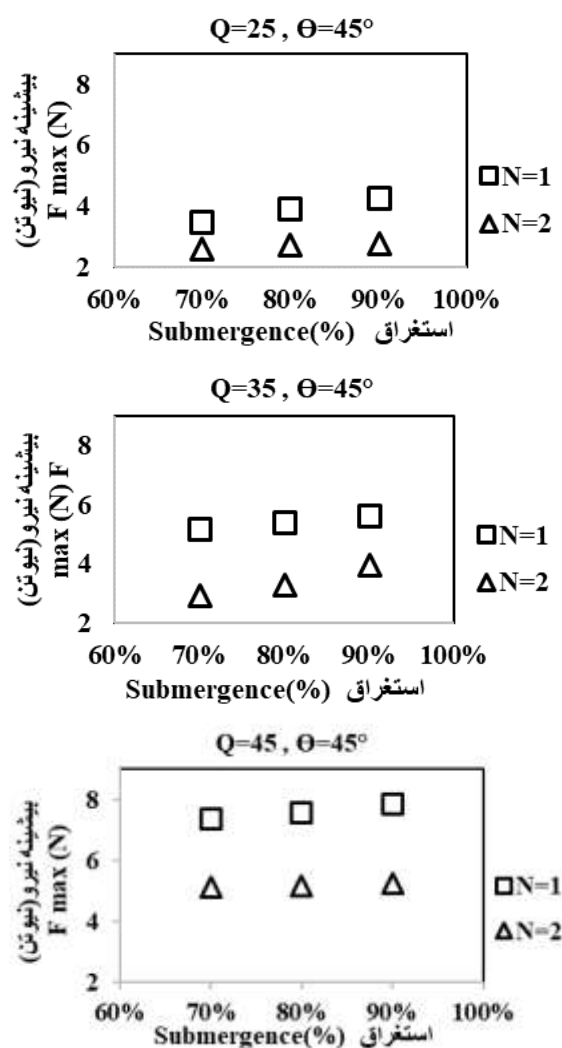


شکل ۲۰- نمودار تغییرات بیشینه تنش برشی در استغراق‌های مختلف.

Figure 20. Investigation of maximum shear stress in different submergences.

مستقیم دارد. قابل مشاهده است که بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه سالونی چندگانه نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش یافته است که مقدار این کاهش ۳۳/۵ درصد بوده است که بیش‌ترین مقدار کاهش در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۹۰ درصد بوده است و کم‌ترین میزان کاهش در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۴۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد بوده است. این روند در زوایای بازشدگی ۳۵ و ۴۰ درجه نیز مشابه است.

بررسی نیروی وارد بر دریچه: با توجه به شکل ۲۱ که در بازشدگی ثابت ۴۵ درجه و سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه با استغراق رابطه مستقیم دارد به‌گونه‌ای که با افزایش درصد استغراق، میزان بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه نیز افزایش پیدا می‌کند زیرا افزایش استغراق باعث افزایش نیروی هیدرواستاتیکی وارد بر دریچه می‌گردد و بنابراین نیروی کل وارد بر دریچه افزایش می‌یابد. هم‌چنین بیشینه نیروی افقی وارد بر دریچه با دبی نیز رابطه



شکل ۲۱- نمودار تغییرات نیروی افقی وارد بر دریچه در استغراق‌های مختلف.

Figure 21. Investigation of maximum force in different submergences.

تنش برشی کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج و بررسی‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان کاهش بیشینه تنش برشی ۲۳/۲۹ درصد بوده و کم‌ترین میزان کاهش این پارامتر ۲۱/۶ درصد بوده است. نتایج نشان می‌دهد در زمان استفاده از دو دریچه شده محدوده توزیع تنش برشی نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش یافته است. هم‌چنین با افزایش دبی و زاویه بازشدگی، محدوده توزیع تنش برشی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

در بخش بررسی توزیع سرعت نتایج نشان داد مقدار و محدوده توزیع سرعت با دبی و زاویه بازشدگی رابطه مستقیم دارد. هم‌چنین مقدار و محدوده توزیع سرعت در حالت چندگانه نسبت به تک‌دریچه کاهش می‌یابد. در بخش بررسی بیشینه تنش برشی مشاهده شد که این پارامتر با زاویه بازشدگی و درصد استغراق رابطه معکوس دارند به‌گونه‌ای که با افزایش زاویه بازشدگی، بیشینه تنش برشی کاهش یافته و با افزایش درصد استغراق، بیشینه

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد است و همه موارد پیاده‌سازی و مراحل کار با ایشان بوده است.

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه و مسئول مکاتبات که در مراحل انجام پژوهش مشارکت داشته‌اند.

نویسنده سوم: مشاور پایان‌نامه در همه موارد انجام پژوهش نظارت داشته‌اند.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مالی و معنوی معاونت آموزشی دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول برخوردار بوده است. مقاله حاضر بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی نویسنده اول است.

نتایج حاصل از بررسی نیروی افقی وارد بر دریچه نشان داد که نیروی افقی در حالت تک‌دریچه نسبت به حالت چندگانه بیش‌تر است. هم‌چنین این پارامتر با دبی، زاویه بازشدگی و درصد استغراق رابطه مستقیم دارد و با افزایش دبی و درصد استغراق، مقدار نیروی وارد بر دریچه نیز افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از بررسی کیفی گردابه‌ها نشان داد کشیدگی و قدرت گردابه‌ها در حالت چندگانه (دو دریچه) نسبت به حالت تک‌دریچه کاهش می‌یابد و محدوده رسوب‌گذاری و رشد گیاهان نسبت به حالت تک‌دریچه کم‌تر می‌شود. هم‌چنین با افزایش دبی و زاویه بازشدگی، کشیدگی گردابه‌ها کاهش یافتند. به‌کارگیری مشابه این پژوهش در کانال‌های اصلی با استفاده از داده‌های میدانی پیشنهاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت‌های مالی و معنوی بیان می‌دارد.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

در پژوهش حاضر که حاصل از پایان‌نامه کارشناسی ارشد است از داده‌های مطالعات دریچه سالونی در حالت تک‌دریچه در دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شده است. داده‌های خام با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

منابع

- Oad, R., & Kinzli, K. (2006). SCADA Employed in Middle Rio Grande Valley to Help Deliver Water Efficiently. Newsletter of the water center at Colorado state university.
- Langeman, P., Craig, K., Elser, P., & Allen, L. (2006). Irrigation gate system. US patent, 7, 114.
- Aqua Systems 2000 Incorporation (AS21). (2013) Leaders in Water Management and Control, Available from: <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate> [10september 2013]
- Negm, A. M., Abdelaal, G. M., Elfiky, M. M., Abdalla, Y. M., & Afifi, M. (2006). Effects of Multi-Gates Operations

- on Bottom Velocity Pattern Under Submerged Flow Conditions. Proc. IWTC10, 1, 217-280.
5. Badiie, S., & Sajadi, M. (2018). Numerical analysis of the hydraulic conditions of the Lopac gate using Fluent Software. In: Proceeding of International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran. TEHRAN, 9 December, University of Tehran. [In Persian]
 6. Babaei Faqih Mahaleh, R., Ismaili Varki, M., & Shafiee Sabet, B. (2018). Investigation of the effect of geometric characteristics and hydraulic conditions on the performance of the salon-partial flow flow adjustment structure. *Iranian Soil and Water Research*, 49 (4), 727-717. [In Persian]
 7. Shafai Bejestan, M., Zeinivand, M., & Tahmasebipoor, M. (2020). Discharge Coefficient of Elliptical Lopac Gate with Gradual Transition in Submergence Condition. *Journal of Hydraulics*, 15 (2), 67-80. doi: **10.30482/jhyd.2020.225028.1449**. [In Persian]
 8. Mobarak, F., sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Zeynivand, M. (2022). Numerical modeling of the effect of elliptical elongation on the hydraulic performance of an elliptical Lopac gate. *Water and Irrigation Management*, 12 (2), 263-275. doi: **10.22059/jwim.2022.335817.952**. [In Persian]
 9. Pilbala, A., Shafai Bejestan, M., Sajjadi, S. M., & Fraccarollo, L. (2023). Investigation of the Different Models of Elliptical-Lopac Gate Performance under Submerged Flow Conditions. *Water Resources Management*, 1-16.
 10. Fathi, S., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Parsaei, A. (2023). Numerical investigation of the effect of different plunges on the flow hydraulic parameters in multiple rectangular lopac gates by using Flow3D. *Water and Irrigation Management*, doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106. [In Persian]