

## بررسی عددی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان عبوری از دریاچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با نرم‌افزار Flow 3D

محمد کرم دخت بهبهانی، سید محسن سجادی\*، جواد احدیان و عباس پارسائی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۱)

### چکیده

یکی از سازه‌های تنظیم سطح آب در مجراهای آبیاری و زهکشی، دریاچه‌های سالونی است که به‌عنوان سازه تنظیم و کنترل سطح جریان مطرح شده است. در این مطالعه طرح نوینی از این نوع سازه مطرح شده که در آن دریاچه‌ها به‌صورت جفت در کنار یکدیگر بوده و اصطلاحاً دریاچه‌های سالونی چندگانه نام گرفته‌اند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی پارامترهای مؤثر هیدرولیکی سازه مطرح شده و مقایسه آن در حالتی است که در شرایط یکسان از یک دریاچه استفاده شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها با ۳ بازشدگی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و ۳ دبی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D مدل‌سازی شده که در آن از تعداد سلول مش ۱۰۰۰۰۰۰ و مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. نتایج نشان داد که در زمان استفاده از دریاچه‌های سالونی چندگانه، تنش برشی بیشینه نسبت به حالت تک‌دریاچه در تمامی آزمایش‌ها در بازشدگی‌ها و دبی‌های مختلف به‌طور میانگین ۳۸ درصد کاهش یافته که بیشترین میزان این کاهش مربوط به بازشدگی ۴۵ درجه و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه با مقدار ۷۶ درصد است. همچنین نیروهای وارد بر دریاچه در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت به‌طور میانگین حدود ۱۵۰ درصد کاهش خواهد داشت. در بررسی کیفی گردابه‌های جریان نیز بررسی‌ها نشان داد، در زمان استفاده از دو دریاچه، وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن نسبت به حالت تک‌دریاچه کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک دریاچه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: دریاچه‌های سالونی چندگانه، تنش برشی، نیروی افقی، گردابه، Flow 3d

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.sadjadi@scu.ac.ir

## مقدمه

یکی از اقدامات لازم برای افزایش راندمان شبکه های آبیاری، استفاده از سازه های تنظیم و کنترل جریان کارآمد می باشد. از سوی دیگر، سازه هایی که در کانال های آبیاری نصب و اجرا می شوند، باید به گونه ای عمل کنند که علاوه بر تنظیم دقیق سطح آب در سطح مورد انتظار، تمامی آبگیرها به اندازه مورد نیاز از کانال آب دریافت کنند (۱۰). همواره تلاش پژوهشگران علوم آب بر این موضوع بوده است که با ساخت و نصب سازه های اندازه گیری و کنترل جریان بر روی کانال ها، دبی جریان عبوری را با دقت مناسبی اندازه گیری کنند (۸). در شبکه های آبیاری، از میان سازه های اندازه گیری، کنترل و انحراف جریان، دریچه ها و سرریزها به دلیل داشتن روابط ساده و نسبتاً دقیق کاربرد بیشتری دارند (۱۷). در کانال های آبیاری یکی از سازه های کنترل و تنظیم سطح آب، دریچه های سالونی مستطیلی بوده که به عنوان آب بند یا سازه کنترل عمق جریان مطرح است. علاوه بر آن نوع دیگری از دریچه های سالونی تحت عنوان دریچه های سالونی بیضوی توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. دریچه های سالونی به صورت دو دروازه مستطیلی شکل بوده که در امتداد کانال لولا می شود و قابلیت تنظیم در باز شدگی های مختلف را دارا است. این نوع از دریچه ها در امتداد جریان آب باز شده و با تغییر در میزان باز شدگی، امکان تنظیم ارتفاع سطح آب را برای دبی های مختلف در بالادست دریچه و تنظیم توزیع آب عبوری را در پایین دست دریچه فراهم می سازد (۱۳). دریچه سالونی (Lopac Gate) در سال ۱۹۸۰ توسط پیتر لانگمن و همکاران، با هدف مدیریت نوسانات آب در مجراهای آبیاری ارائه شد و تاکنون تعدادی از بهره برداری های موفقیت آمیز آن از جمله استفاده در پروژه Middle Rio Grand در نیومکزیکو در سال ۲۰۰۶ گزارش شده است (۷). رامی و هیگر (۱۸) به بررسی نیروهای وارده بر دریچه آویزان در کانال مستطیلی پرداخته و بیان کردند، هنگامی که دریچه به طور کامل بسته است، فشار وارده بر آن از توزیع خطی تبعیت خواهد کرد. باز شدگی دریچه با مقدار

عددی تفاوت بین نیروی استاتیک و نیروی واقعی رابطی را مستقیم داشته و با افزایش باز شدگی این مقدار نیز افزایش خواهد یافت. همچنین معادله ای را برای تخمین میزان نیروی وارده بر دریچه از سوی جریان (که تابعی از درجه باز شدگی دریچه است) پیشنهاد کرده و این معادله را با استفاده از معادله مومتم بررسی کردند. نجم و همکاران (۱۲) به مطالعه اثر عملکرد چند دریچه بر روی الگوی سرعت در پایین دست در شرایط جریان مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد، الگوی سرعت بر عملکرد دریچه ها، نوع آن (اصلی یا اضطراری)، نسبت استغراق و عدد فرود در ناحیه انقباض بستگی دارد.

Aqua System 2000 Inc. (AS21) برای ارائه یک راه حل مقرون به صرفه برای کنترل جریان آب در کانال هایی با ابعاد مختلف، دریچه سالونی را با یک سیستم محرک هیدرولیکی پیشنهاد داده و روابطی را برای دبی و ضریب آبگذری در شرایط جریان آزاد و مستغرق ارائه داد و آستانه درجه استغراق  $0/3$  در نظر گرفته شد (۱). نقایی و منعم (۱۱) به بررسی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره برداری دریچه سالونی و توسعه مدل ریاضی سازه در انطباق با مدل هیدرودینامیک ICSS در شبکه آبیاری دز تحت شرایط کاربردی مختل پرداختند. نتایج نشان داد، مدل تهیه شده برای انواع شرایط کاربردی به خوبی عمل کرده و از آن می توان در انواع کانال ها و شبیه سازی شبکه های مجهز به این نوع آب بند استفاده کرد. پایین شهری و کاویان پور (۱۴) به مطالعه عددی روی تأثیر غلظت جریان بر فشار وارد به دریچه تخلیه کننده تحتانی سد پرداخته و به این نتیجه رسیدند که میزان باز شدگی دریچه و غلظت جریان اثر مستقیم بر فشار وارد به این دریچه ها خواهند داشت. رضائی شادهی و بیژن خوان (۱۹) به مطالعه تجربی روی جت های آزاد و مستغرق پرداخته و با استفاده از تحلیل باکینگهام، مرتبط با پرش هیدرولیکی آزاد یک فرمول کلی برای تخمین ضریب تصحیح حرکت در مکان های مختلف اندازه گیری پایین دست پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد، فرمول به دست آمده در دریچه های نصب شده به صورت موازی تمایز بین شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق را افزایش می دهد. در انتها،

بررسی عددی تأثیر یکپارچگی آستانه در عملکرد هیدرولیکی دریاچه‌های کشویی پرداختند. نتایج نشان داد، مهم‌ترین عامل مؤثر بر ضریب دبی در شرایط هیدرولیکی ثابت، شکل لبه دریاچه است. دانشفراز و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاهی شکل هندسی و اندازه اثرات آستانه بر عملکرد هیدرولیکی دریاچه‌های کشویی پرداختند. نتایج نشان داد، افزایش عرض آستانه باعث افزایش ضریب دبی دریاچه نسبت به حالت بدون آستانه شد. نتایج حاصل از قرارداد یک آستانه با اشکال هندسی مختلف در زیر یک دریاچه حفره حاکی از آن است که استفاده از آستانه نیمه استوانه‌ای باعث افزایش ضریب دبی می‌شود.

باتوجه به پژوهش‌های گذشته، تاکنون تمامی مطالعه‌های مرتبط با دریاچه‌های سالونی به‌طور عمده در حالت تک‌دریاچه انجام شده است و تأثیر استفاده از دریاچه‌های چندگانه به‌جای تک‌دریاچه در دریاچه‌های سالونی مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش اثر کاربرد دو دریاچه کوچک‌تر به‌جای یک دریاچه بر خصوصیات هیدرولیکی جریان مانند میدان توزیع تنش‌برشی، حداکثر نیروی افقی وارد بر دریاچه و گردابه‌های جریان با هدف افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری و همچنین ارتقا و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه‌های بهره‌برداری و انتقال آب مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### مدل معرفی FLOW 3D

در این پژوهش، به‌منظور مدل‌سازی جریان آزاد عبوری از دو دریاچه سالونی مستطیل روی کانال از نرم‌افزار Flow 3D 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 نرم‌افزار Flow 3D از دو روش مدل‌سازی استفاده خواهد شد. روش FAVOR که به‌عنوان روش نماینده کسر مساحت - حجم مانع معرفی می‌شود و برای

یک فرمول تخلیه بی‌بعد برای تخمین نرخ جریان مستغرق از طریق دریاچه‌های موازی با دهانه‌ها و عرض‌های مختلف دریاچه پیشنهاد شده است. خیبر و همکاران (۶) به بررسی تأثیر تبدیل ناگهانی بر عملکرد هیدرولیکی دریاچه‌های سالونی بیضوی در دبی‌ها و استغراق‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد، به‌دلیل انقباض ناگهانی کانال ضریب دبی کاهش یافته و همچنین این مقدار با بازشدگی دریاچه رابطه مستقیم و با میزان انقباض ناگهانی کانال و استغراق دریاچه رابطه معکوس دارد. مبارک و همکاران (۹) به بررسی عددی اثر کشیدگی بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریاچه‌های سالونی بیضوی پرداختند. بررسی نتایج نشان داد، مقدار عددی تنش‌برشی کف با افزایش نسبت بیضوی به‌طور متوسط ۵۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. در بخش بررسی کیفی گردابه‌های جریان نیز نتایج نشان داد، در نسبت‌های بیضوی بزرگ‌تر از یک، جریان‌های گردابه‌ای و انحراف جریان از مسیر کمتر می‌شود. پیل‌بالا و همکاران (۱۶) به بررسی مدل‌های مختلف عملکرد دریاچه‌های سالونی بیضوی تحت شرایط جریان مستغرق پرداختند. آنها مقادیر استهلاک انرژی، ضریب آبگذری، ضریب اتلاف انرژی و گردابه‌ها را در دبی‌ها، بازشدگی‌ها و نسبت‌های بیضوی مختلف مورد بررسی قرار دادند.

دانشفراز و همکاران (۲) به ارزیابی آزمایشگاهی اثر آستانه غیر هم‌عرض با هندسه متفاوت بر خطوط جریان و ضریب دبی عبوری از دریاچه کشویی پرداختند. بررسی‌ها نشان داد، وجود آستانه در هندسه‌های متفاوت، الگوی جریان عبوری از زیر دریاچه را تحت‌تأثیر قرار خواهد داد. علاوه‌بر آن استفاده از آستانه‌های غیر هم‌عرض در زیر دریاچه کشویی، باعث شکستگی خطوط جریان عبوری می‌شود. دانشفراز و همکاران (۳) به بررسی عددی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان دریاچه‌های کشویی با آستانه مهار نشده و تأثیر آن بر ضریب دبی در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج نشان داد که قرارداد یک آستانه غیر سرکوب شده در زیر دریاچه‌های کشویی با ایجاد شکست در خطوط جریان، باعث ایجاد الگوی جریان متفاوتی نسبت به حالت بدون آستانه می‌شود. دانشفراز و همکاران (۴) به

گرفته شده است. در شکل ۲ بلوک شبکه مش بندی برای هر دو حالت از دریچه مورد بررسی به صورت دریچه های چندگانه و حالت تک دریچه دیده می شود.

اولین گام در مدل سازی عددی انتخاب یک مش بندی مناسب و بهینه برای انجام شبیه سازی است. باید تعداد شبکه مش بندی به صورتی انتخاب شود که دارای کمترین خطای نرم افزاری باشد و این از مهم ترین پارامترهای مؤثر در یک شبیه سازی عددی صحیح است. برای دستیابی به یک مش بندی مناسب و بهینه از یک شبیه سازی از آزمایش های پیل بالا با ابعاد مختلف سلول مش بندی استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. پس از بررسی مش بندی های مختلف، در نهایت برای تمامی شبیه سازی ها تعداد ۱۰۰۰۰۰۰ سلول مش در نظر گرفته شده و همچنین زمان شبیه سازی با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای رسیدن جریان عبوری از دریچه به پایداری، ۵۰ ثانیه انتخاب شده است. با توجه به شکل ۳ و انجام تعدادی مدل سازی در بخش انتخاب مش بندی، نتایج نشان داد با افزایش تعداد سلول مش بندی و افزایش زمان شبیه سازی خطای محاسباتی کاهش بسیار جزئی داشته و مدت زمان شبیه سازی افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

گام دوم در مدل سازی عددی انتخاب یک مدل آشفتگی مناسب بوده که دارای نزدیک ترین جواب در مقایسه با مدل آزمایشگاهی باشد. برای این منظور ۹ آزمایش از پژوهش پیل بالا و همکاران با سه مدل آشفتگی (LES)، (RNG) و (K-ε) و در مجموع ۲۷ شبیه سازی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. با بررسی های انجام شده بین شبیه سازی های صورت گرفته و مقایسه مقادیر به دست آمده با مدل آزمایشگاهی مشخص شد، مدل عددی شبیه سازی شده حساسیت چندانی نسبت به مدل آشفتگی RNG نداشته و مقایسه مقادیر به دست آمده در مدل عددی با استفاده از مدل آشفتگی RNG خطای کمتری نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در مقایسه با مدل های آشفتگی دیگر دارد. همان طور که بیان شد و با توجه به شکل ۴، نتایج نشان می دهند که مدل آشفتگی RNG نسبت به دیگر مدل های آشفتگی

شبیه سازی سطوح و اجسام صلب استفاده می شود و روش VOF از تحلیل هم زمان معادلات ناویر - استوکس جریان متلاطم و از طریق سعی و خطا و با انواع روش های CFD، با هدف نمایش رفتار سیال در سطوح آزاد استفاده می شود.

نرم افزار Flow 3D یک برنامه کامپیوتری با توانایی های بسیار و کاربردهای گسترده است. کاربران می توانند با وارد کردن اطلاعات مورد نیاز، مدل های مختلفی را به جهت ارائه محدوده وسیعی از پدیده های جریان، انتخاب کنند.

### مدل های آشفتگی

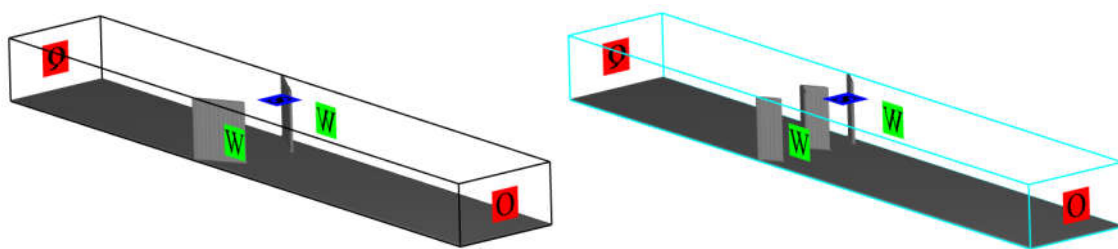
مدل های آشفتگی با توجه به تعداد معادلات دیفرانسیل به منظور ارتباط تنش های تلاطم با سرعت های متوسط گیری شده یا گرادین آن ها شامل مدل های صفر معادله ای (طول اختلاط پرانتل)، مدل های تک معادله ای، مدل های دو معادله ای (k\_ε)، مدل های دارای معادله تنش (RNG)، مدل های شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) که متداول ترین آن ها در بحث سازه های هیدرولیکی، مدل های (RNG)، (LES) و (k\_ε) است.

در این پژوهش به منظور انتخاب یک مش بندی بهینه برای مدل شبیه سازی، انتخاب مدل آشفتگی و کالیبراسیون شبیه سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی از مقایسه نتایج اطلاعات مدل آزمایشگاهی (پیل بالا و همکاران (۱۵)) استفاده شده که برای این مقایسه از پارامتر عمق آب بالادست دریچه استفاده شده است. در شکل ۱ تصاویر مربوط به دریچه سالونی مستطیلی آزمایشگاهی پیل بالا نشان داده شده است.

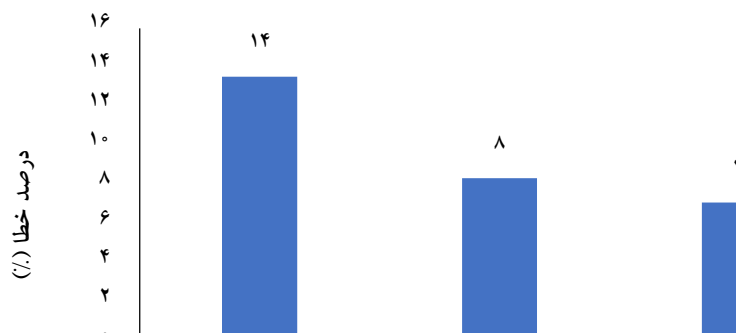
در این پژوهش از یک بلوک مش بندی استفاده شده که در آن شرایط مختلف مرز بندی شبکه سلول محاسباتی به صورت مرز ورودی به صورت دبی ورودی، مرز خروجی نیز به علت خروج جریان به صورت جریان خروجی انتخاب شد. دیواره های جانبی شبکه سلول های محاسباتی و همچنین کف بلوک مش بندی در حالت دیوار تنظیم شده و سقف این بلوک نیز به علت وجود هوا به صورت شرط مرزی متقارن در نظر



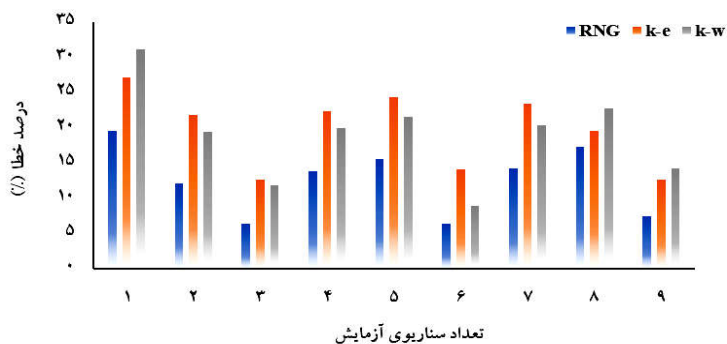
شکل ۱: نمای دریچه سالونی مستطیلی آزمایشگاهی



شکل ۲: بلوک شبکه مش بندی مدل حالت های تک دریچه و دو دریچه در نرم افزار FLOW 3D



شکل ۳: نتایج آنالیز مش بندی بهینه



شکل ۴: مقادیر خطای عمق بالادست نسبت به مدل آزمایشگاهی با تغییر مدل آشفتگی

از عملکرد بهتری برخوردار بوده و از آن در تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

گام سوم در انجام مدسازی عددی که مهم‌ترین گام در یک شبیه‌سازی است، کالیبره کردن مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار با مدل آزمایشگاهی است. برای این منظور ۹ مدل متفاوت نسبت به گام دوم از آزمایش‌ها پیل‌بالا با تعداد مش‌بندی و مدل آشفستگی مشخص شده در گام‌های پیشین شبیه‌سازی و به ارزیابی و بررسی نتایج آن و مقایسه مقادیر به دست آمده با مدل آزمایشگاهی پرداخته شد. پس از بررسی‌ها و ارزیابی نتایج و با استفاده از ابزارهای محاسبه، درصد خطا مشخص شد که مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار Flow 3D تفاوت چندانی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نداشته و از درصد خطای کمی برخوردار بوده و مقادیر خطاهای MAPE، RMSE و MSE برابر با ۷/۰۱، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۰۰۲ است.

### بحث و نتایج

در این قسمت نتایج کاربرد دو دریچه سالونی در عرض کانال را در مقایسه با یک دریچه بزرگ‌تر در شرایط یکسان شامل دبی جریان، عرض و زاویه بازشدگی بر خصوصیات هیدرولیکی جریان شامل میدان توزیع و مقادیر عددی تنش‌برشی، نیروهای وارد بر دریچه و گردابه‌های جریان مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### بررسی تنش‌برشی در دریچه‌های سالونی چندگانه

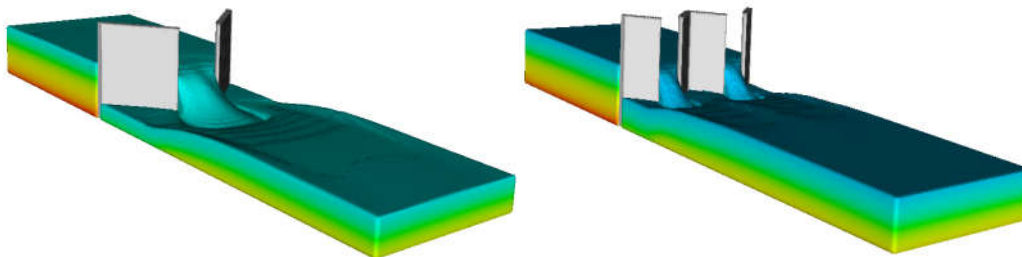
در شکل‌های ۶ تا ۸ نحوه توزیع تنش‌برشی در بستر و تفاوت آن با حالت تک‌دریچه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی‌های متفاوت نشان داده شده و این روند برای دبی‌های دیگر نیز صدق می‌کند. همان‌طور که پیداست، میدان تنش‌برشی با میزان بازشدگی رابطه مستقیم دارد؛ یعنی هرچه بازشدگی کاهش یابد (تنگ‌شدگی افزایش یابد)، محدوده توزیع نیز کاهش خواهد یافت. در بازشدگی ۳۰ و ۴۵ درجه در شکل‌های ۴-ب و ۵-ب نیز انحراف جریان به سمت مرکز کانال و دیواره‌ها قابل مشاهده خواهد بود که این انحراف در زمان استفاده از تک‌دریچه دیده نخواهد شد. همچنین قابل مشاهده است که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، محدوده میدان توزیع تنش‌برشی در مقایسه با حالت تک‌دریچه کمتر می‌شود.

علاوه بر بررسی کیفی میدان تنش‌برشی وارد بر بستر، به بررسی عددی میانگین تنش‌برشی عرضی در یک فاصله یکسان نسبت به دریچه و تنش‌برشی بیشینه در پایین دست دریچه در هر دو نوع سازه خواهیم پرداخت. نمودارهای زیر تغییرات تنش‌برشی بیشینه را نسبت به فرودهای مختلف نشان می‌دهد که محور عمودی مربوط به میزان تنش‌برشی بیشینه بوده و محور افقی تغییرات عدد فرود را نمایش می‌دهد. باتوجه به شکل ۹ قابل مشاهده است که تنش‌برشی

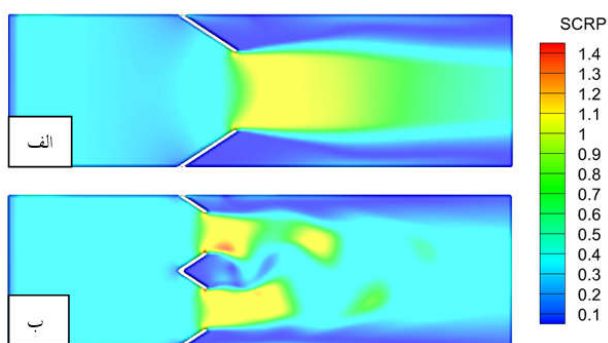
پس از انتخاب تعداد سلول مش‌بندی بهینه و تعیین مدل آشفستگی به کمک کالیبراسیون و همچنین کالیبره کردن مدل‌سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی، به شبیه‌سازی و بررسی دریچه‌های سالونی چندگانه با ابعادی متفاوت پرداخته شد. تاکنون تمامی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه هیدرولیک دریچه به‌طور عمده در حالت تک‌دریچه انجام شده است. برای بررسی هیدرولیکی استفاده از دو دریچه به‌صورت هم‌زمان و با ابعاد صفحات کوچک‌تر، بازشدگی‌های متفاوت در نظر گرفته شده و مدل دریچه مد نظر در این پژوهش، استفاده از دو دریچه سالونی مستطیلی با ارتفاع و عرض ۴۵ و ۲۰ سانتی‌متر و سه میزان بازشدگی مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه دبی متفاوت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و در مجموع ۹ شبیه‌سازی است. همچنین ۹ مدل تک‌دریچه با ارتفاع و عرض ۴۵ و ۴۰ سانتی‌متر و با شرایط کاملاً یکسان به‌منظور مقایسه پارامترهای هیدرولیکی با دریچه مورد بررسی در نرم‌افزار فراخوانی و مدل‌سازی شد. پس از پایان شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان (تنش‌برشی، نیروهای وارد بر دریچه و

#### شرح انجام آزمایش

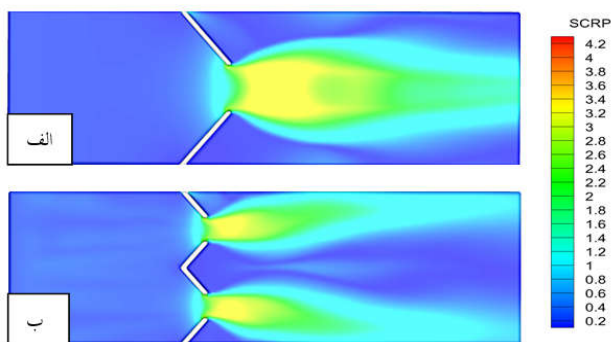
پس از انتخاب تعداد سلول مش‌بندی بهینه و تعیین مدل آشفستگی به کمک کالیبراسیون و همچنین کالیبره کردن مدل‌سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی، به شبیه‌سازی و بررسی دریچه‌های سالونی چندگانه با ابعادی متفاوت پرداخته شد. تاکنون تمامی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه هیدرولیک دریچه به‌طور عمده در حالت تک‌دریچه انجام شده است. برای بررسی هیدرولیکی استفاده از دو دریچه به‌صورت هم‌زمان و با ابعاد صفحات کوچک‌تر، بازشدگی‌های متفاوت در نظر گرفته شده و مدل دریچه مد نظر در این پژوهش، استفاده از دو دریچه سالونی مستطیلی با ارتفاع و عرض ۴۵ و ۲۰ سانتی‌متر و سه میزان بازشدگی مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سه دبی متفاوت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و در مجموع ۹ شبیه‌سازی است. همچنین ۹ مدل تک‌دریچه با ارتفاع و عرض ۴۵ و ۴۰ سانتی‌متر و با شرایط کاملاً یکسان به‌منظور مقایسه پارامترهای هیدرولیکی با دریچه مورد بررسی در نرم‌افزار فراخوانی و مدل‌سازی شد. پس از پایان شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان (تنش‌برشی، نیروهای وارد بر دریچه و



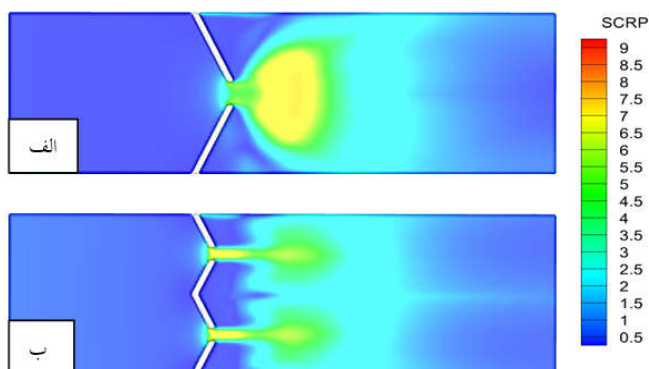
شکل ۵. نمای کلی دریچه سالونی مستطیلی در حالت تک دریچه و چندگانه



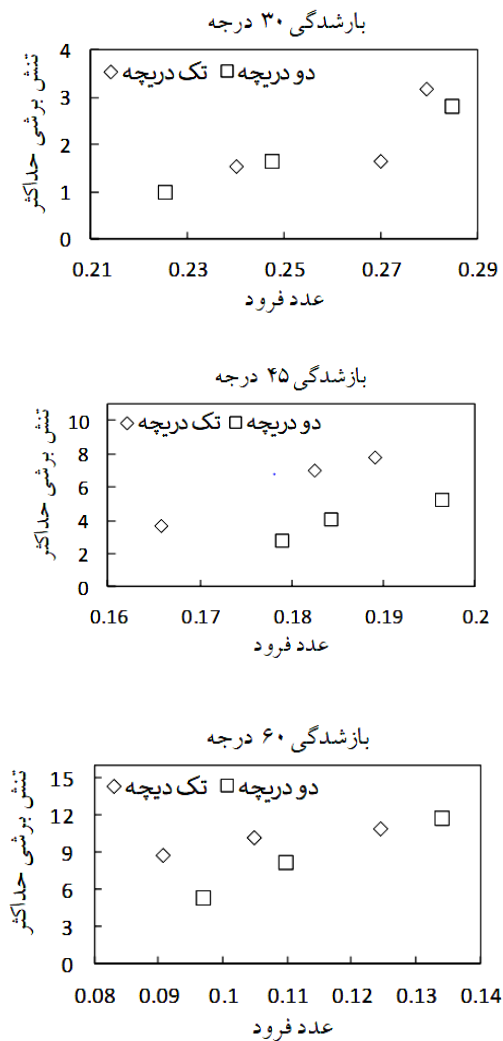
شکل ۶. توزیع تنش برشی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۳۰ درجه (الف) تک دریچه (ب) دو دریچه



شکل ۷. توزیع تنش برشی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۴۵ درجه (الف) تک دریچه (ب) دریچه سالونی چندگانه



شکل ۸. توزیع تنش برشی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۶۰ درجه (الف) تک دریچه (ب) دریچه سالونی چندگانه

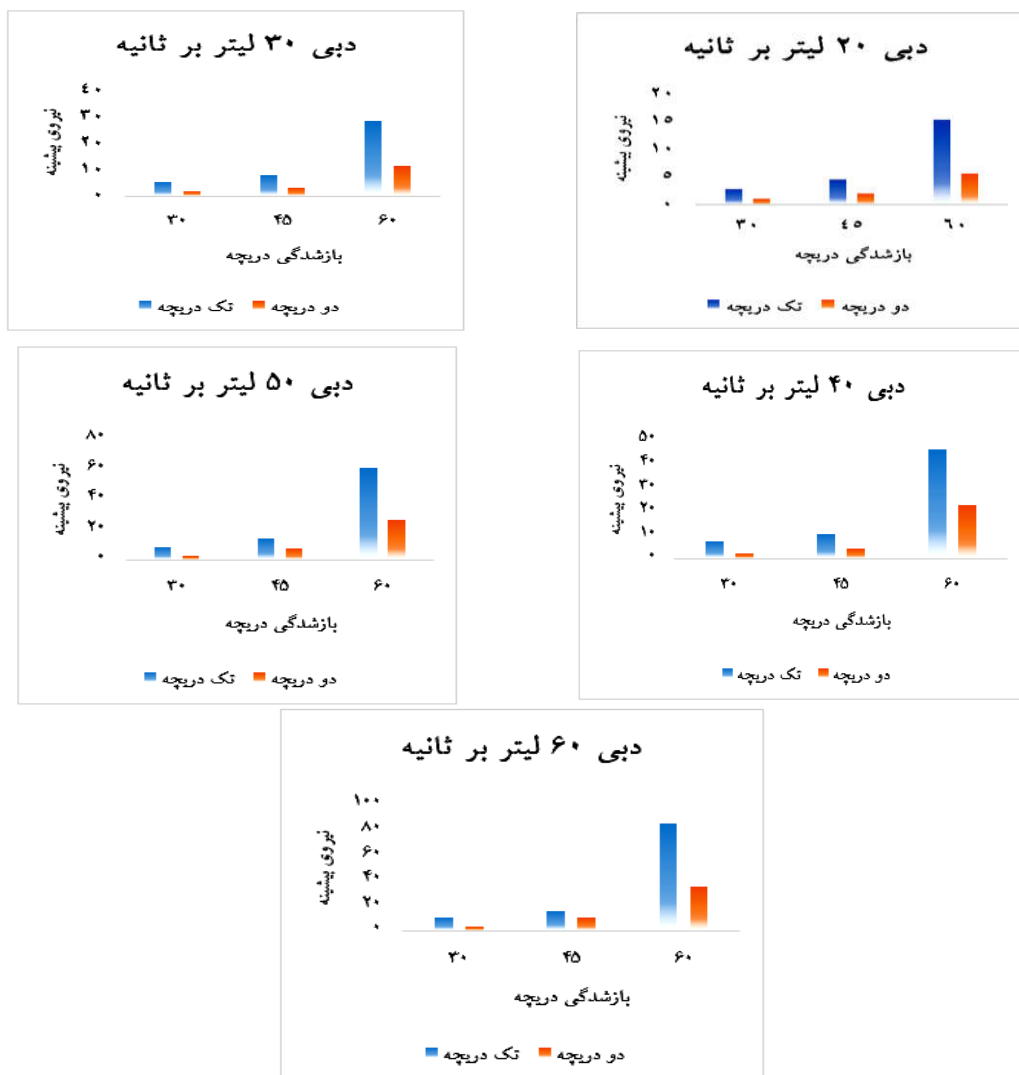


شکل ۹. تغییرات تنش برشی بیشینه نسبت به تغییرات عدد فرود

بیشینه با عدد فرود رابطه مستقیم داشته و با میزان بازشدگی رابطه عکس خواهد داشت. به این صورت که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت و با کاهش میزان بازشدگی (افزایش تنگ‌شدگی)، مقدار تنش برشی بیشینه افزایش خواهد یافت. همچنین تنش برشی بیشینه در دريچه‌های سالونی چندگانه نسبت به حالت تک‌دريچه در بیشتر آزمایش‌ها کاهش یافته؛ به طوری که این میزان کاهش در بازشدگی و دبی‌های مختلف به‌طور میانگین نزدیک ۳۸ درصد بوده است. علاوه‌براین بیشترین میزان کاهش تنش برشی بیشینه مربوط به بازشدگی ۴۵ درجه و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه با مقدار ۷۶ درصد است.

**بررسی حداکثر نیروی وارد بر دريچه‌های چندگانه**  
در شکل ۱۰ به بررسی روند تغییرات بیشترین نیروهای افقی وارد بر دريچه در مقابل تغییرات بازشدگی و رسم گراف‌های لازم پرداخته شد. بخش محور عمودی مربوط به بیشترین نیروی افقی وارد بر دريچه و محور افقی مربوط به بازشدگی‌های متفاوت بوده که در آن ستون آبی رنگ مربوط به تغییرات بیشترین نیروی وارد بر تک دريچه و ستون نارنجی مربوط به تغییرات بیشترین نیروی وارد بر دو دريچه است. بررسی نمودارهای (۴)، رابطه معکوس بین نیروی وارد بر دريچه و بازشدگی‌ها را نشان می‌دهد؛ به طوری که هرچه میزان بازشدگی کاهش یابد (تنگ‌شدگی افزایش یابد)،





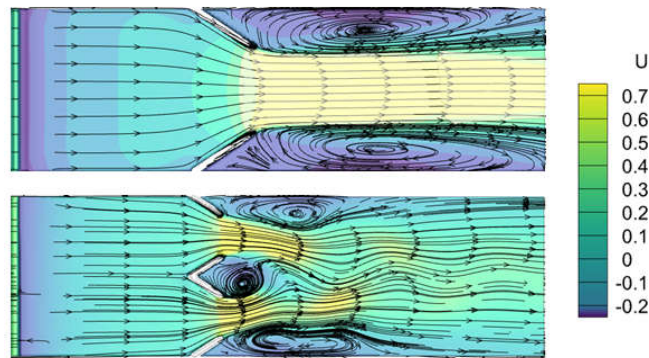
شکل ۱. تغییرات نیروی بیشینه وارد بر دریچه نسبت به تغییرات بازشدگی در دبی‌های مختلف

در باز شدگی ۴۵ درجه و دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه به مقدار ۴۷ درصد بوده است.

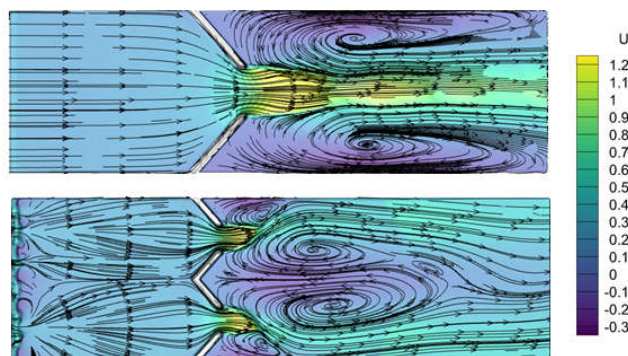
#### بررسی گردابه‌های جریان در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه

باتوجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ خطوط جریان در دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی‌های مختلف برای دریچه‌های سالونی در حالت دو دریچه و تک‌دریچه ترسیم شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، در هنگام استفاده از تک‌دریچه گردابه‌های بزرگ با قدرت زیاد و میدان توزیع وسیع در کانال دیده می‌شود که تا پایین‌دست دریچه

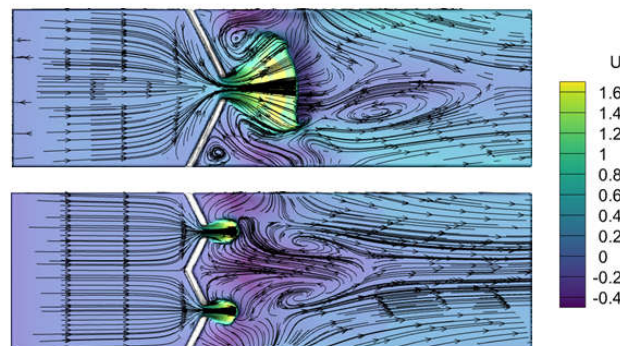
نیروی وارد بر دریچه افزایش یافته که این روند برای تمامی دبی‌ها تکرار می‌شود. همچنین هرچه میزان دبی عبوری افزایش پیدا کند، نیروی وارد بر دریچه افزایش پیدا خواهد کرد. در نهایت بررسی بیشترین نیروهای وارد بر دو دریچه و مقایسه آن با حالت تک‌دریچه نشان می‌دهد، به‌طور میانگین در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت بیشترین نیروی افقی وارد بر دو دریچه نسبت به تک‌دریچه به‌طور میانگین ۱۴۹ درصد کاهش یافته که بیشترین کاهش آن مربوط به بازشدگی ۳۰ درجه و در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه با مقدار ۲۵۶ درصد بوده و کمترین میزان کاهش آن



شکل ۱۱. خطوط جریان بر روی دریاچه سالونی چندگانه و دریاچه‌ی ساده در بازشدی ۳۰ درجه و دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه



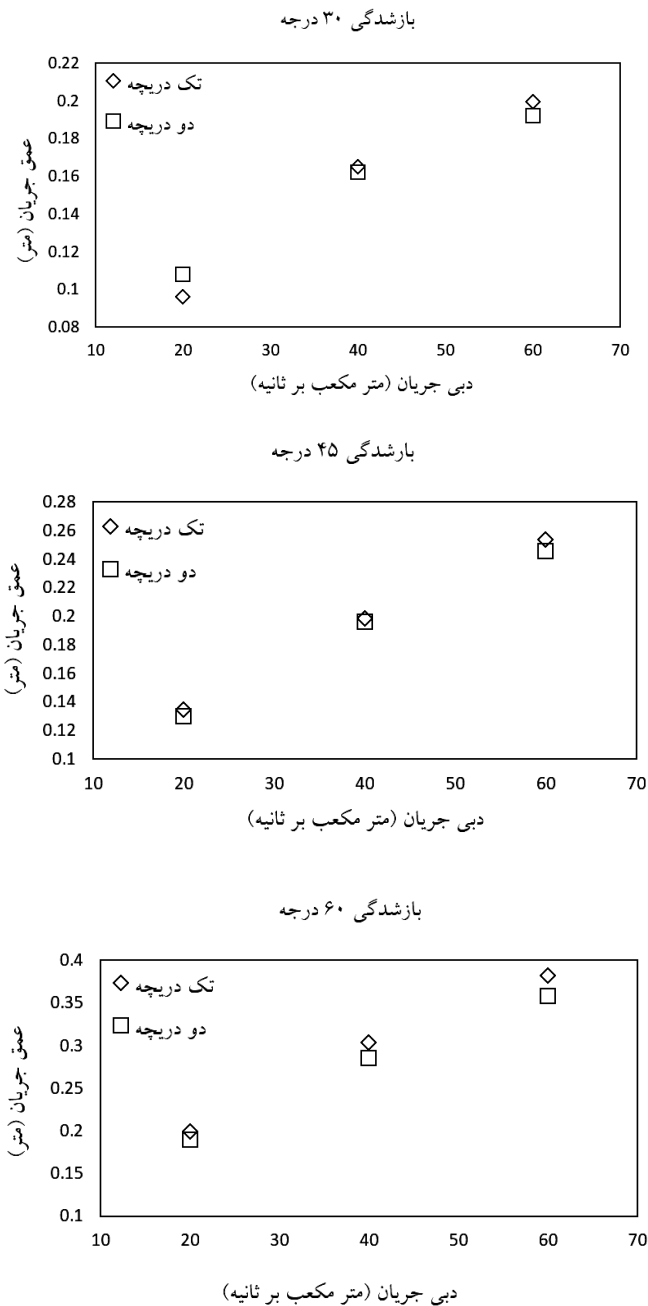
شکل ۱۲. خطوط جریان بر روی دریاچه سالونی چندگانه و دریاچه‌ی ساده در بازشدی ۴۵ درجه و دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۳. خطوط جریان بر روی دریاچه سالونی چندگانه و دریاچه‌ی ساده در بازشدی ۶۰ درجه و دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

رنگ‌بندی نارنجی، زرد، سبز و آبی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، نشان دهنده میدان سرعت در بخش‌های مختلف کانال بوده که دیده می‌شود، با کاهش بازشدگی (افزایش تنگ‌شدگی) وسعت رنگ‌بندی کاهش یافته و تغییر رنگ رخ می‌دهد که این امر نشان دهنده کاهش سرعت جریان در ناحیه‌های مختلف است. علاوه‌براین بررسی‌ها نشان می‌دهد، محدوده‌ی گردابه با میزان بازشدگی

نیز ادامه دارد. اما در زمان استفاده از دو دریاچه وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک‌دریاچه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد و علاوه‌براین نتایج نشان می‌دهد، گردابه‌ها بیشتر در نزدیکی دریاچه رخ می‌دهند که این امر با مشاهده کاهش میدان سرعت و تغییر رنگ این محدوده‌ها دیده می‌شود.



شکل ۱۴. منحنی تغییرات دبی - اشل دریچه‌های سالونی نسبت به بازشدگی‌های مختلف

#### بررسی منحنی دبی - اشل جریان در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه

باتوجه به شکل ۱۴ مربوط به منحنی تغییرات دبی-اشل که تغییرات دبی را نسبت به عمق آب بالادست نشان می‌دهد، در می‌یابیم که کلی هرچه میزان دبی افزایش یابد؛ در نتیجه میزان ارتفاع آب بالادست در این نوع از سازه‌های هیدرولیکی نیز

رابطه مستقیم دارد؛ به این صورت که هرچه میزان بازشدگی کمتر باشد (دریچه تنگ‌تر شود)، وسعت گردابه‌ها نیز کاهش خواهد یافت. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان می‌دهد، جریان در زمان استفاده از دو دریچه به سمت مرکز کانال و دیواره‌ها انحراف داشته که این امر باعث پدید آمدن گردابه‌ها در نزدیکی دیواره و یا مرکز کانال می‌شود.

مورد بررسی، به این نتیجه خواهیم رسید که میزان بازشدگی دریاچه در این نوع سازه با ارتفاع آب بالادست جریان رابطه عکس دارد؛ به این صورت که باتوجه به نمودارهای (۵) و هرچه میزان بازشدگی دریاچه‌های سالونی مستطیلی کاهش یابد، (تنگ‌شدگی دریاچه افزایش یابد) باعث افزایش ارتفاع آب بالادست در این سازه می‌شود.

بیشتر می‌شود. همچنین هرچه میزان هد آب در بالادست دریاچه بیشتر شود؛ در نتیجه میزان دبی عبوری از دریاچه نیز بیشتر می‌شود. (میزان تغییرات دبی با هد جریان در بالادست رابطه مستقیم دارد). علاوه بر این متوجه این مهم می‌شویم که در حالت استفاده از دو دریاچه، ارتفاع آب بالادست در این سازه نسبت به حالتی که از یک دریاچه ساده استفاده می‌شود، افزایش یافته است. در نهایت پس از بررسی روند تغییرات دبی‌اشل آزمایش‌های

### منابع مورد استفاده

1. Aqua Systems 2000 Incorporation (AS21). 2013. Leaders in Water Management and Control. Retrieved from: <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate>.
2. Daneshfaraz, R., R. Noruzi and P. Ebadzadeh. 2022. Experimental Investigation of non-suppressed sill effect with different geometry on flow pattern and discharge coefficient of sluice. *Journal of Hydraulics* 17(3): 47-63. doi: 10.30482/jhyd.2022.316603.1566.
3. Daneshfaraz, R., R. Noruzi and P. Ebadzadeh. 2022. Experimental and numerical study of sluice gate flow pattern with non-suppressed sill and its effect on discharge coefficient in free-flow conditions. *Journal of Hydraulic Structures* 8(1): 1-20. doi: 10.22055/jhs.2022.40089.1201
4. Daneshfaraz, R., R. Norouzi, P. Ebadzadeh and A. Kuriqi. 2023. Influence of sill integration in labyrinth sluice gate hydraulic performance. *Innovative Infrastructure Solutions*. 8(4): 118. 10.1007/s41062-023-01083-z.
5. Daneshfaraz, R., R. Norouzi, P. Ebadzadeh, S. Di Francesco and J.P. Abraham. 2023. Experimental Study of Geometric Shape and Size of Sill Effects on the Hydraulic Performance of Sluice Gates. *Water* 15(2): 314. <https://doi.org/10.3390/w15020314>
6. Kheybar, H., S. M. Sajjadi and J. Ahadyan. 2021. Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*. 70(5): 1145-1154 (In Farsi).
7. Langeman, p., K. Craig, P. Elser and L. Allen. 2006. Irrigation Gate System. *US Patent* 7:114.
8. Mahmoudian Shushtri, M. 2010. Principles of flow in open channels. The third edition. Ahvaz Shahid Chamran University. Ahvaz.
9. Mobarak, F., S. M. Sajjadi, J. Ahadiyan and M. Zeynivand. 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 Farsi).
10. Naqaei, R. and M. J. Manem. 2013. Introduction of the salon valve to regulate the water level in the irrigation canals and provide its hydraulic relations at the 4th National Conference on the Management of Irrigation and Drainage Networks. March 6-8, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (In Farsi).
11. Naqaei, R. and M. J. Manem. 2016. Investigating different hydraulic conditions and operation of the salon valve and developing the mathematical model of the structure in accordance with ICSS hydrodynamic model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(1): 24-35 (In Farsi).
12. Negm, A. M., G. M. Abdelaal, M. M. Elfiky, Y. M. Abdalla and M. Afifi. 2006. Effects of Multi-Gates Operations on Bottom Velocity Pattern Under Submerged Flow Conditions. *Proc. IWTC* 10(1):217-280.
13. Oad, R. and K. Kinzli. 2006. SCADA Employed in Middle Rio Grande Valley to Help Deliver Water Efficiently. News letter of the water center at Colorado State University [online] 10 August.
14. Pain Shahri, K. and M. R. Kavianpour. 2017. Numerical investigation of the effect of flow concentration on the pressure on the lower discharge valve of the dam (In Farsi).
15. Pilbala, A., S. M. Sajjadi and M. Shafai Bejestan. 2021. Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions. *Ain Shams Engineering Journal* 12(1): 317-326.
16. Pilbala, A., M. Shafai Bejestan, S. M. Sajjadi and L. Fraccarollo. 2023. Investigation of the Different Models of Elliptical-Lopac Gate Performance under Submerged Flow Conditions. *Water Resources Management*, 37(9): 3527-3542.

17. Gharahgezlou, M., M. Masoudian, B. Shahin and A. Kurdi. 2018. Investigating the effect of opening changes on the separation point, wake size and velocity distribution in submerged cylindrical spillway-valve. *Journal of Water and Soil Conservation Research* 24(6):177-193 (In Farsi).
18. Raemy, F., W. H. Hager and VAW. 1998. Hydraulic level control by hinged flap gate. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy* 130(2): 95-103.
19. Shaddehi, F. R. and M. Bijankhan. 2020. Experimental study on free and submerged multi-jets. *Flow Measurement and Instrumentation* 75:101805.

## Numerical Hydraulic and Hydrodynamic Investigation of the Flow through Multiple Rectangular Lopac Gates with Flow 3D Software

M. Karamdokht behbahani, S. M. Sajjadi\*, J. Ahadiyan and A. Parsai<sup>1</sup>

(Received: August 31-2023 ; Accepted: November 12-2023)

### Abstract

One of the structures for regulating the water level in the irrigation and drainage ducts is the lopac gates, which are proposed as a structure for regulating and controlling the flow level. In this study, a new design of this type of structure has been proposed in which the gates are placed next to each other in pairs, and they are called multiple lopac gates. The objective of this research is to investigate the effective hydraulic parameters of the proposed structure and compare it in a case where a gate is used under the same conditions. All the simulations were modeled with 3 amounts of opening 30, 45, and 60 degrees and at 3 flow rates of 20, 40, and 60 liters per second and using Flow3d software, in these simulations, the number of mesh cells is 1000000 and RNG turbulence model is used. The results showed that the maximum shear stress was reduced by an average of 38% compared to the single gate mode in most tests at different openings and flow rates using multiple lopac gates, and the largest amount of this reduction was related to the opening of 45 degrees, and the flow rate is 40 liters per second with a value of 76%. Also, the forces acting on the gate at different flow rates and openings will be reduced by 150% on average. In the qualitative investigation of flow vortices, the investigations also showed that vortex range, length, and strength are reduced compared to the single gate mode when two gates are used, and the number of vortices increases compared to when a single valve.

**Keywords:** Multiple lopac gates, Shear stress, Horizontal force, Vortex, Flow 3d

---

1. Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

\*: Corresponding author, Email: m.sajjadi@scu.ac.ir