

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

محمد کرم دخت بهبهانی<sup>۱</sup>، سید محسن سجادی<sup>۲\*</sup>، جواد احدیان<sup>۲</sup> و عباس پارسائی<sup>۲</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 سازه‌ی 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 سازه‌ی مطرح شده و مقایسه آن در حالتی است که در شرایط یکسان از یک دریاچه استفاده شده است. کلیه‌ی 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 حداکثر نسبت به حالت تک‌دریاچه در تمامی آزمایشات 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 که 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. کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

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

## مقدمه

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

Aqua System 2000 Inc. (AS2I) جهت ارائه یک راه حل مقرون به صرفه برای کنترل جریان آب در کانال‌هایی با ابعاد مختلف دریاچه‌ی 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. نقایی و منعم (۱۱) به بررسی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه 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 می‌توان در انواع کانال‌ها و شبیه‌سازی شبکه‌های مجهز به این نوع آب‌بند استفاده کرد. پایین شهری و کاویان‌پور (۱۴) به مطالعه‌ی عددی بر روی تأثیر غلظت جریان بر فشار وارد به دریاچه تخلیه‌کننده تحتانی سد پرداخته و به این نتیجه رسیدند که میزان بازشدگی دریاچه و غلظت جریان اثر مسقیم بر فشار وارد به این دریاچه‌ها خواهند داشت. رضائی شادهی و بیژن‌خوان (۲۰) به مطالعه تجربی بر روی جت‌های آزاد و مستغرق پرداخته و با استفاده از تحلیل باکینگهام، مرتبط با پرش هیدرولیکی آزاد یک فرمول کلی برای تخمین ضریب تصحیح حرکت در مکان‌های مختلف اندازه‌گیری پایین دست پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که فرمول به دست آمده در دریاچه‌های نصب شده به صورت موازی

یکی از مهم‌ترین اقدامات لازم در بهسازی و افزایش راندمان شبکه‌ها و تجهیز آن‌ها با سازه‌های تنظیم و کنترل آب قابل اطمینان و کارآمد است. از جهت دیگر، سازه‌هایی که در کانال‌های آبیاری نصب و اجرا می‌شوند، باید به گونه‌ای 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 محققان علوم آب بر این موضوع بوده است که با ساخت و نصب سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان بر روی کانال‌ها، دبی جریان عبوری را با دقت مناسبی اندازه‌گیری کنند (۸). در شبکه‌های آبیاری، از میان سازه‌های اندازه‌گیری، کنترل و انحراف جریان، دریاچه‌ها و سرریزها به دلیل داشتن روابط ساده و نسبتاً دقیق کاربرد بیشتری دارند (۱۷). در کانال‌های آبیاری یکی از سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب، دریاچه‌های سالونی مستطیلی بوده که به عنوان آب‌بند یا سازه کنترل عمق جریان مطرح است. علاوه بر آن نوع دیگری از دریاچه‌های سالونی تحت عنوان دریاچه‌های سالونی بیضوی توسط محققین مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. دریاچه‌های سالونی به صورت دو دروازه مستطیلی شکل بوده که در امتداد کانال لولا می‌شود و قابلیت تنظیم در بازشدگی‌های مختلف را دارا است. این نوع از دریاچه‌ها در امتداد جریان آب باز شده و با تغییر در میزان بازشدگی، امکان تنظیم ارتفاع سطح آب را برای دبی‌های مختلف در بالادست دریاچه و تنظیم توزیع آب عبوری را در پایین دست دریاچه فراهم می‌سازد (۱۳). دریاچه‌ی سالونی (Lopac Gate) در سال ۱۹۸۰ توسط پیترو لانگمن و همکاران، با هدف مدیریت نوسانات آب در مجراهای آبیاری ارائه شد و تاکنون تعدادی از بهره‌برداری‌های موفقیت‌آمیز 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 دریاچه آویزان در کانال مستطیلی پرداخته و بیان کردند هنگامی که دریاچه کاملاً بسته است فشار وارده بر آن از توزیع خطی

ایجاد شکست در خطوط جریان باعث ایجاد الگوی جریان متفاوتی نسبت به حالت بدون آستانه می‌شود. دانشفراز و همکاران (۴) به بررسی عددی تأثیر یکپارچگی آستانه در عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های کشویی پرداختند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین عامل مؤثر بر ضریب دبی در شرایط هیدرولیکی ثابت، شکل لبه‌ی دریچه است. دانشفراز و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاهی شکل هندسی و اندازه اثرات آستانه بر عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های کشویی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش عرض آستانه باعث افزایش ضریب دبی دریچه در حالت بدون آستانه شد. نتایج حاصل از قرار دادن یک آستانه با اشکال هندسی مختلف در زیر یک دریچه حفره حاکی از آن است که استفاده از آستانه نیمه استوانه‌ای باعث افزایش ضریب دبی می‌شود.

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

## مواد و روش‌ها

### مدل معرفی FLOW 3D

در این پژوهش، به‌منظور مدل‌سازی جریان آزاد عبوری از دو دریچه‌ی سالونی مستطیلی بر 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

تمایز بین شرایط جریان آزاد و جریان مستغرق را افزایش می‌دهد. در انتها، یک فرمول تخلیه بی‌بعد برای تخمین نرخ جریان مستغرق از طریق دریچه‌های موازی با دهانه‌ها و عرض‌های مختلف دریچه پیشنهاد شده است. خیبر و همکاران (۶) به بررسی تأثیر تبدیل ناگهانی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های سالونی بیضوی در دبی‌ها و استغراق‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که به‌دلیل انقباض ناگهانی کانال ضریب دبی کاهش یافته و همچنین این مقدار با بازشدگی دریچه رابطه مستقیم و با میزان انقباض ناگهانی کانال و استغراق دریچه رابطه معکوس دارد. مبارک و همکاران (۹) به بررسی عددی اثر کشیدگی بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه‌های 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 دریچه‌های سالونی بیضوی تحت شرایط جریان مستغرق پرداختند. آنان 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 هندسه‌ی متفاوت بر خطوط جریان و ضریب دبی عبوری از دریچه‌کشویی پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که وجود آستانه در هندسه‌های متفاوت، الگوی جریان عبوری از زیر دریچه را تحت تأثیر قرار خواهد داد. علاوه بر آن استفاده از آستانه‌های غیر هم‌عرض در زیر دریچه‌ی کشویی، باعث شکستگی خطوط جریان عبوری می‌شود. دانشفراز و همکاران (۳) به بررسی عددی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان دریچه‌های کشویی با آستانه مهار نشده و تأثیر آن بر ضریب دبی در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج نشان داد که قرار دادن یک آستانه غیر سرکوب شده در زیر دریچه‌های کشویی با

بلوک مش‌بندی در حالت دیوار تنظیم شده و سقف این بلوک نیز به‌علت وجود هوا به‌صورت شرط مرزی متقارن در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ بلوک شبکه مش‌بندی برای هر دو حالت از دریاچه مورد بررسی به‌صورت دریاچه‌های چندگانه و حالت تک‌دریاچه مشاهده می‌شود.

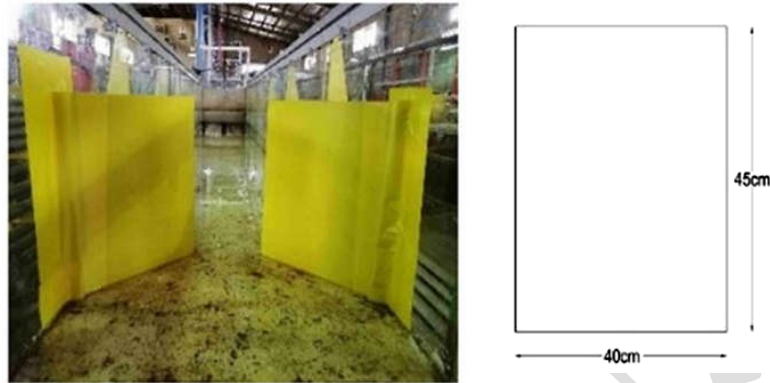
اولین گام در مدل‌سازی عددی انتخاب یک مش‌بندی مناسب و بهینه برای انجام شبیه‌سازی است. باید تعداد شبکه مش‌بندی به‌صورتی انتخاب شود که دارای کمترین خطای نرم‌افزاری باشد و این از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در یک شبیه‌سازی عددی صحیح است. به جهت دستیابی به یک مش‌بندی مناسب و بهینه از یک شبیه‌سازی از آزمایش‌های پیل‌بالا با ابعاد مختلف سلول مش‌بندی استفاده شده و نتایج آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. پس از بررسی مش‌بندی‌های مختلف در نهایت برای تمامی شبیه‌سازی‌ها تعداد ۱۰۰۰۰۰۰ سلول مش در نظر گرفته شده و همچنین زمان شبیه‌سازی با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای رسیدن جریان عبوری از دریاچه به پایداری ۵۰ ثانیه انتخاب شده است. با توجه به شکل ۳ و انجام یک‌سری مدل‌سازی در بخش انتخاب مش‌بندی نتایج نشان داد با افزایش تعداد سلول مش‌بندی و افزایش زمان شبیه‌سازی خطای محاسباتی کاهش بسیار جزئی داشته و مدت زمان شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی خواهد داشت. 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 با سه مدل آشفتگی (LES)، (RNG) و (K-ε) و در مجموع ۲۷ شبیه‌سازی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. با بررسی‌های انجام شده بین شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و مقایسه مقادیر به‌دست آمده با مدل آزمایشگاهی، مشخص شد که مدل عددی شبیه‌سازی شده حساسیت چندانی نسبت به مدل آشفتگی RNG نداشته و مقایسه‌ی مقادیر به‌دست آمده در مدل عددی با استفاده از مدل آشفتگی RNG خطای کمتری نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در مقایسه با مدل‌های آشفتگی دیگر دارد. همان‌طور که بیان شد و با توجه به شکل ۴ نتایج نشان

مدل‌سازی خواهد پرداخت. در نرم‌افزار Flow 3D از دو روش مدل‌سازی استفاده خواهد شد. روش FAVOR که به‌عنوان روش نماینده‌ی کسر مساحت-حجم مانع معرفی 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، با هدف نمایش رفتار سیال در سطوح آزاد استفاده می‌شود. نرم‌افزار Flow 3D یک برنامه کامپیوتری با توانایی‌های بسیار و کاربردهای گسترده است. کاربران می‌توانند با وارد کردن اطلاعات مورد نیاز، مدل‌های مختلفی را به جهت ارائه محدود و وسیعی از پدیده‌های جریان، انتخاب کنند.

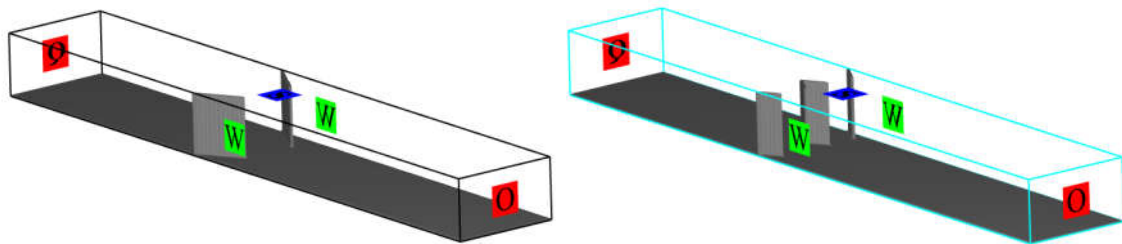
### مدل‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی با توجه به تعداد معادلات دیفرانسیل به جهت ارتباط تنش‌های تلاطم با سرعت‌های متوسط گیری شده یا گرادیان آن‌ها شامل، مدل‌های صفر معادله‌ای (طول اختلاط پراتل)، مدل‌های تک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای (k-ε)، مدل‌های دارای معادله تنش (RNG)، مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) که متداول‌ترین آن‌ها در بحث سازه‌های هیدرولیکی مدل‌های (RNG)، (LES) و (k-ε) است. در این پژوهش به‌منظور انتخاب یک مش‌بندی بهینه برای مدل شبیه‌سازی، انتخاب مدل آشفتگی و کالیبراسیون شبیه‌سازی عددی با نمونه آزمایشگاهی از مقایسه‌ی نتایج اطلاعات مدل آزمایشگاهی (پیل‌بالا و همکاران، ۲۰۲۱) استفاده شده که برای این مقایسه از پارامتر عمق آب بالادست دریاچه استفاده شده است. در شکل ۱ تصاویر مربوط به دریاچه‌سالونی مستطیلی آزمایشگاهی پیل‌بالا نشان داده شده است.

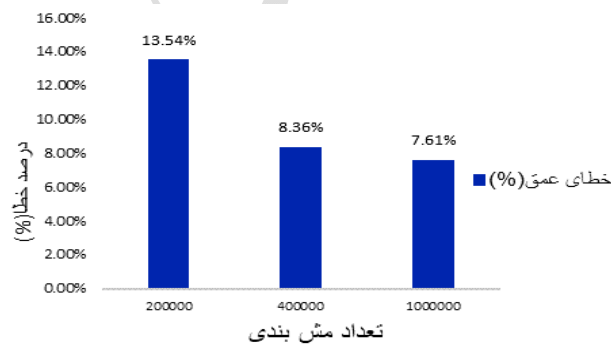
در این پژوهش از یک بلوک مش‌بندی استفاده شده که در آن شرایط مختلف مرزبندی شبکه سلول محاسباتی به‌صورت مرز ورودی به‌صورت دبی ورودی، مرز خروجی نیز به‌علت خروج جریان به‌صورت جریان خروجی انتخاب شد. دیواره‌های جانبی شبکه سلول‌های محاسباتی و همچنین کف



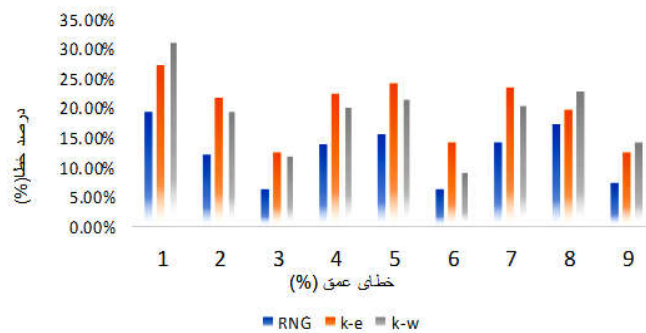
شکل ۱: نمای دریچه سالونی مستطیلی آزمایشگاهی



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

فراخوانی و مدل‌سازی شد. پس از پایان شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان (تنش برشی، نیروهای وارد بر دریچه و گردابه‌های جریان) توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در نهایت با حالت تک‌دریچه مقایسه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ شماتیک دریچه سالونی مستطیلی در حالت تک‌دریچه و دو دریچه، درون فلوم مورد بررسی نشان داده شده 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 تنش برشی، نیروهای وارد بر دریچه و گردابه‌های جریان مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### بررسی تنش برشی در دریچه‌های سالونی چندگانه

در شکل‌های ۶ تا ۸ نحوه توزیع تنش برشی 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 تنش برشی 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 مشاهده نخواهد شد. همچنین قابل مشاهده است که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه محدوده میدان توزیع تنش برشی در مقایسه با حالت تک‌دریچه کمتر می‌شود.

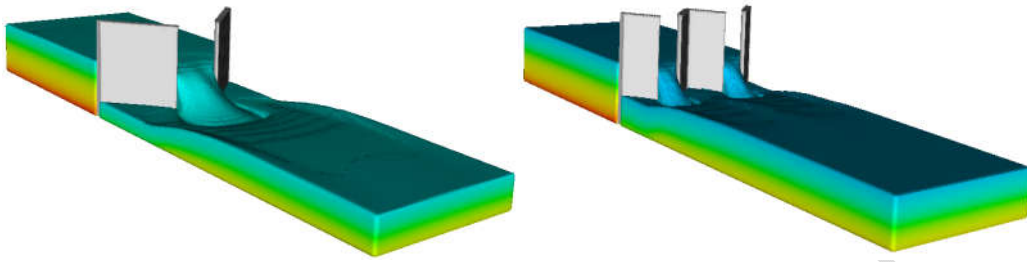
علاوه بر بررسی کیفی میدان تنش برشی وارد بر بستر به بررسی عددی میانگین تنش برشی عرضی در یک فاصله یکسان نسبت به دریچه و تنش برشی حداکثر در پایین دست دریچه در هر دو نوع سازه خواهیم پرداخت. نمودارهای زیر تغییرات تنش برشی

می‌دهند که مدل آشفتگی RNG نسبت به دیگر مدل‌های آشفتگی از عملکرد بهتری برخوردار بوده و از آن در تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.

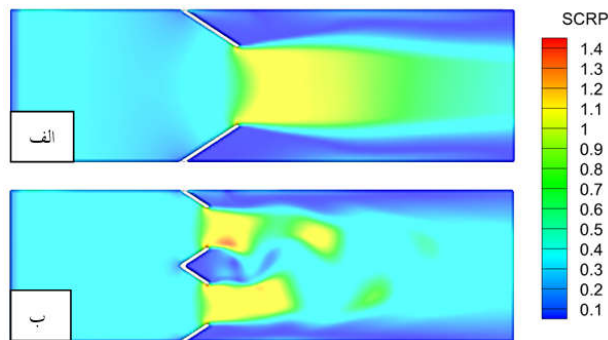
گام سوم در انجام مدل‌سازی عددی که مهم‌ترین گام در یک شبیه‌سازی است کالیبره کردن مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار با مدل آزمایشگاهی است. به این منظور ۹ مدل متفاوت نسبت به گام دوم از آزمایشات پیل‌بالا با تعداد مش‌بندی و مدل آشفتگی مشخص شده در گام‌های پیشین شبیه‌سازی و به ارزیابی و بررسی نتایج آن و مقایسه 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 به ترتیب برابر با ۰/۰۱۷، ۷/۰۱ و ۰/۰۰۰۲ است.

#### شرح انجام آزمایش

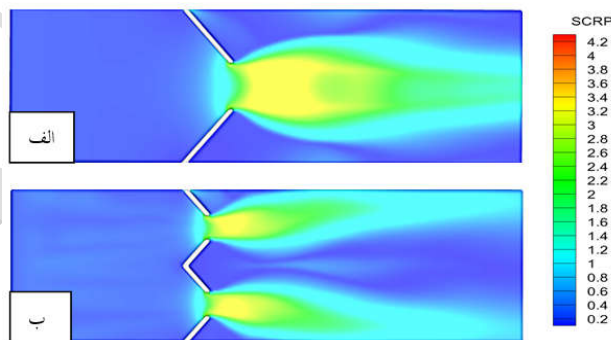
پس از انتخاب تعداد سلول مش‌بندی بهینه و تعیین مدل آشفتگی به کمک کالیبراسیون و همچنین کالیبره کردن مدل‌سازی عددی با نمونه‌ی آزمایشگاهی به شبیه‌سازی و بررسی دریچه‌های سالونی چندگانه با ابعادی متفاوت پرداخته شد. تاکنون تمامی پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی هیدرولیک دریچه به‌طور عمده در حالت تک‌دریچه انجام شده است. جهت بررسی هیدرولیکی استفاده از دو دریچه به‌صورت هم‌زمان و با ابعاد صفحات کوچک‌تر، بازشدگی‌های متفاوت در نظر گرفته شده و مدل دریچه‌ی مدنظر در این پژوهش استفاده از دو دریچه‌ی سالونی مستطیلی با ارتفاع و عرض به ترتیب 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 به ترتیب ۴۵ و ۴۰ سانتی‌متر و با شرایط کاملاً یکسان به‌منظور مقایسه پارامترهای هیدرولیکی با دریچه مورد بررسی در نرم‌افزار



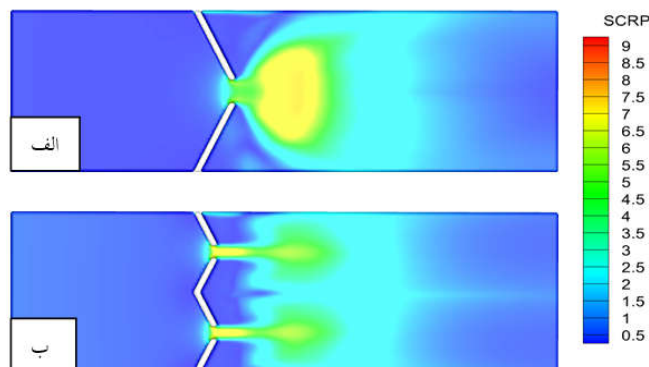
شکل ۵. نمای کلی دریچه سالونی مستطیلی در حالت تک دریچه و چندگانه



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

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 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

با توجه 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 که در هنگام استفاده از تک‌دریچه گردابه‌های بزرگ با قدرت بالا و میدان توزیع وسیع در کانال دیده می‌شود که تا پایین دست دریچه نیز ادامه دارد اما در زمان استفاده از دو دریچه وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک‌دریچه استفاده می‌شود افزایش می‌یابد و علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که گردابه‌ها بیشتر در نزدیکی دریچه رخ می‌دهند، که این امر با مشاهده کاهش میدان سرعت و تغییر رنگ این محدوده‌ها قابل مشاهده است.

رنگ‌بندی نارنجی، زرد، سبز و آبی در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان دهنده میدان سرعت در بخش‌های مختلف کانال بوده که مشاهده می‌شود با کاهش بازشدگی (افزایش تنگ‌شدگی) وسعت رنگ‌بندی کاهش یافته و تغییر رنگ مشاهده می‌شود که این امر نشان دهنده کاهش سرعت جریان در ناحیه‌های مختلف است. علاوه بر این بررسی‌ها نشان می‌دهد که محدوده‌ی گردابه با میزان بازشدگی رابطه مستقیم دارد به این صورت که هرچه میزان بازشدگی کمتر باشد (دریچه تنگ‌تر شود) وسعت گردابه‌ها نیز کاهش خواهد یافت. شکل‌های ۷ تا ۹ نشان می‌دهد که 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.

حداکثر را نسبت به فرودهای مختلف نشان می‌دهد که محور عمودی مربوط به میزان تنش برشی حداکثر بوده و محور افقی تغییرات عدد فرود را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۹ قابل مشاهده است که تنش برشی حداکثر 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 حداکثر افزایش خواهد یافت. همچنین تنش برشی حداکثر در دریچه‌های سالونی چندگانه نسبت به حالت تک‌دریچه در اکثر آزمایشات کاهش یافته به طوری که این میزان کاهش در بازشدگی و دبی‌های مختلف به طور میانگین حدوداً ۳۸ درصد بوده است. علاوه بر این بیشترین میزان کاهش تنش برشی حداکثر مربوط به بازشدگی ۴۵ درجه و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه با مقدار ۷۶ درصد است.

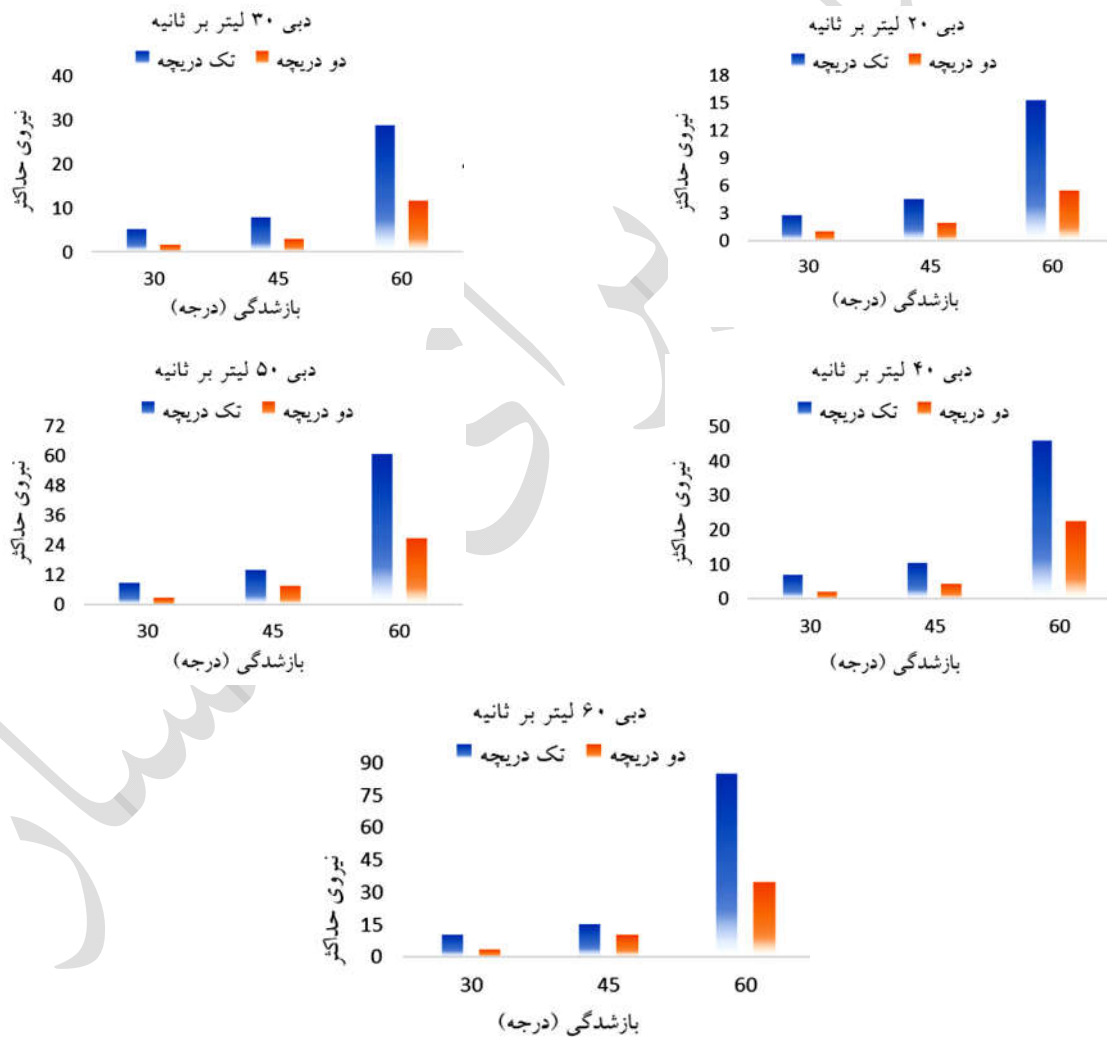
### بررسی حداکثر نیروی وارد بر دریچه‌های چندگانه

در شکل ۱۰ به بررسی روند تغییرات حداکثر نیروهای افقی وارد بر دریچه در مقابل تغییرات بازشدگی و رسم گراف‌های لازم پرداخته شد. بخش محور عمودی مربوط به حداکثر نیروی افقی وارد بر دریچه و محور افقی مربوط به بازشدگی‌های متفاوت بوده که در آن ستون آبی رنگ مربوط به تغییرات حداکثر نیروی وارد بر تک دریچه و ستون نارنجی مربوط به تغییرات حداکثر نیروی وارد بر دو دریچه است. بررسی نمودارهای (۴) رابطه معکوس بین نیروی وارد بر دریچه و بازشدگی‌ها را نشان می‌دهد به طوری که هرچه میزان بازشدگی کاهش یابد (تنگ‌شدگی افزایش یابد) 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 حداکثر نیروهای وارد بر دو دریچه و مقایسه آن با حالت تک‌دریچه نشان می‌دهد که به طور میانگین در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت حداکثر نیروی افقی وارد بر دو دریچه نسبت به تک‌دریچه به طور میانگین ۱۴۹ درصد





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



شکل ۱۰. تغییرات نیروی حداکثر وارد بر دریچه نسبت به تغییرات بازشدگی در دبی‌های مختلف

دبی (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه و سه بازشدگی (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه در می‌یابیم که به‌طور کلی هرچه میزان دبی افزایش یابد، در نتیجه میزان ارتفاع آب بالادست در این نوع از سازه‌های هیدرولیکی نیز بیشتر می‌شود. همچنین هرچه میزان هد آب در

بررسی منحنی دبی - اشل جریان در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با توجه به منحنی تغییرات دبی اشل نمودارهای (۵) دریچه‌های سالونی مستطیلی در حالت تک دریچه و دو دریچه در حالت سه

تغییرات دبی اشل آزمایش‌های مورد بررسی، به این نتیجه خواهیم رسید که میزان بازشدگی دریچه در این نوع سازه با ارتفاع آب بالادست جریان رابطه عکس دارد. به این صورت که با توجه به نمودارهای (۵) و هرچه میزان بازشدگی دریچه‌های سالونی مستطیلی کاهش یابد، (تنگ‌شدگی دریچه افزایش یابد) در نتیجه باعث افزایش ارتفاع آب بالادست در این سازه می‌شود.

بالادست دریچه بیشتر شود، در نتیجه میزان دبی عبوری از دریچه 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 دریچه ارتفاع آب بالادست در این سازه نسبت به حالتی که از یک دریچه ساده استفاده می‌شود افزایش یافته است. در نهایت پس از بررسی روند

### 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), pp. 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), pp. 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. 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* 2023, 15, 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*. 2021;1-10 (In Farsi).
7. Langeman, p., K. Craig, P. Elser and L. Allen. 2006. Irrigation Gate System, US Patent 7,114,878 B2.
8. Mahmoudian Shushtri, M. 1389. Principles of flow in open channels. The third edition. Ahvaz Shahid Chamran University. 513 p.
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 (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), pp.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. IWTC10*, 1, pp.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), pp.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*, pp.1-16.
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), pp.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), pp.95-103.

19. Sajjadi, S.M., M. Nisi and M. Shafai Bejestan. 2020. Investigating the flow equations and flow rate coefficient of the elliptical hall valve and the rectangular hall valve in the free state. *Iran Water Research*, 14(4), pp.1-8 (In Farsi).
20. Shaddehi, F.R. and M. Bijankhan. 2020. Experimental study on free and submerged multi-jets. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, p.101805.

آماده برای انتشار