



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۲ ■ تابستان ۱۴۰۱

صفحه‌های ۲۶۳-۲۷۵

DOI: 10.22059/jwim.2022.335817.952

مقاله پژوهشی:

### مدل‌سازی عددی اثر کشیدگی بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه سالونی بیضوی

فرانک مبارک<sup>۱</sup>، سیدمحسن سجادی<sup>۲\*</sup>، جواد احدیان<sup>۳</sup>، مهدی زینی‌وند<sup>۴</sup>

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

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

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

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

#### چکیده

دریچه‌ها سازه‌هایی جهت کنترل جریان هستند که در کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین، دریچه‌های سالونی دارای قابلیت‌های بسیار کارآمدی از جمله کنترل و تنظیم ارتفاع آب در بالادست جریان، خودکار سازی، مصرف انرژی کم‌تر نسبت به انواع دیگر دریچه‌ها (مانند دریچه‌های کشویی، قطاعی و...) و امکان عبور اجسام شناور هستند. دریچه‌های سالونی بیضوی از انواع نوین دریچه‌های سالونی هستند که با هدف افزایش ضریب دبی نسبت به انواع دیگر دریچه‌های سالونی در نظر گرفته شده‌اند. پژوهش پیش رو با هدف مدل‌سازی دریچه‌های سالونی بیضوی در پنج نسبت بیضوی متفاوت همراه با تبدیل ناگهانی در کانال، با استفاده از نرم‌افزار Flow3d انجام گرفت. کلیه مدل‌ها در سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و در سه بازشدگی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و با مدل آشفتگی RNG شبیه‌سازی مورد انجام قرار گرفته است. نتایج نهایی نشان داد که با افزایش نسبت بیضوی از ۰/۷ تا ۱/۲۸، مقادیر استهلاک انرژی نسبت به انرژی اولیه، از هشت تا ۲۰ درصد کاهش خواهد داشت. در بررسی تنش برشی کف نیز نتایج نشان داد که با افزایش نسبت بیضوی به‌طور متوسط تنش برشی 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 و سرعت جریان از ۲۲ تا ۵۴ درصد کاهش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** استهلاک انرژی، بازشدگی، تبدیل ناگهانی، تنش برشی، نسبت بیضوی، Flow3d.

### Numerical modeling of the effect of elliptical elongation on the hydraulic performance of an elliptical Lopac gate

Faranak Mobarak<sup>1</sup>, S. Mohsen Sajjadi<sup>2\*</sup>, Javad Ahadiyan<sup>3</sup>, Mehdi Zeynivand<sup>4</sup>

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

2. Assistant Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahwaz, Iran.

3. Associate Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahwaz, Iran.

4. Assistant Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahwaz, Iran.

Received: December 18, 2021

Accepted: June 07, 2022

#### Abstract

Gates are Flow control structures used in irrigation canals. In the meantime, Lopac Gates have very efficient capabilities such as controlling and regulation the level of water upstream, automation, lower energy consumption than other types of gates (like sliding gate, radil gate) and the possibility of passing floating objects. Elliptical Lopac gate (ELG) are one of the new types of lopac gates that are intended to increase the discharge coefficient compared to other types of lopac gates. The present study was conducted with the aim of modeling ELG in five different elliptical ratios with sudden transition in the channel using Flow3d software. All models are considered in three discharges of 25, 35 and 45 liters per second and in three openings of 20, 30 and 40 cm and simulation has been done with RNG turbulence model. The final results showed that by increasing the elliptical ratio from 0.7 to 1.28, the energy consumption gates will decrease from eight to 20 percent compared to the initial energy. In the study of floor shear stress, the results show that by increasing the elliptical ratio, the average shear stress decreases by 52 percent. In the section on flow vortices, the results show that in elliptical ratios greater than one, vortex currents and current deviation from the path are reduced and the flow rate decreases from 22 to 54 percent.

**Keywords:** Elliptical ratio, Energy consumption, Flow3d, Opening, Shear stress, Sudden transition.

## مقدمه

حدود ۱۴ تا ۷۳ درصد کاهش داشته و ضریب دبی با زاویه بازشدگی دریچه رابطه مستقیم و با میزان انقباض ناگهانی کانال و استغراق دریچه رابطه معکوس دارد.

Aqua system (2013) جهت ارائه یک راه حل منعطف و مقرون به صرفه برای کنترل جریان در کانال‌های با اندازه کوچک و متوسط، ترکیب مدل‌سازی دریچه سالونی را با یک سیستم محرک هیدرولیکی پیشنهاد داده و با انجام یک سری از آزمایش‌ها بر روی دریچه‌های سالونی، ضمن ارائه معادلات دبی دریچه سالونی در شرایط جریان آزاد و مستغرق، رابطه‌ای برای ضریب دبی دریچه سالونی ارائه نمود. همچنین نظریه‌ای را ارائه کرد که در آن برای درجه استغراق کم‌تر از ۰/۳ جریان عبوری از دریچه آزاد و برای درجه استغراق بالاتر از ۰/۳ جریان عبوری از دریچه مستغرق در نظر گرفته می‌شود که در این صورت جریان با درجه استغراق ۰/۳، آستانه استغراق دریچه سالونی در نظر گرفته می‌شود.

در پژوهش Badiee & Sajadi (2018)، با کمک مدل‌سازی عددی شرایط هیدرولیکی و شکل جریان در بالادست و پایین‌دست دریچه‌های سالونی مورد بررسی قرارداد و طبق اطلاعات به دست آمده مشخص شد که در پشت دریچه پدیده آب‌مردگی شکل می‌گیرد و گردابه‌ها در این بخش با سرعت کم، محل رشد گیاهان و انباشت رسوبات هستند. همچنین تنش برشی در پایین‌دست دریچه درست در کف کانال بیش‌ترین میزان خود را دارد.

Monem & Sadeghi (2014) به پژوهش و بررسی عملکرد دریچه سالونی و کشویی در کانال‌ها، با کمک مدل هیدرودینامیک ICSS پرداختند. برداشت حاصل از مقایسه و بررسی مشخص نمود که دریچه‌های سالونی در مقابل دریچه کشویی، در زمانی که جریان دارای نوسانات ملایم باشد، عملکرد بهتری در راستای کنترل و تنظیم تراز سطح آب دارند و باعث کاهش تغییرات دبی ورودی به آبگیرها

دریچه‌ها می‌توانند جریان را در سازه‌های آبی - کشاورزی به دقت اندازه‌گیری کرده و منابع آب را به موقع توزیع کنند. در میان انواع دریچه‌ها که می‌توانند وظایف فوق‌الذکر را انجام دهند، دریچه‌های سالونی را می‌توان به راحتی برای دستیابی به جریان مطلوب در پروژه‌های آبیاری تنظیم کرد و سطح بالادست را به صورت الکترونیکی کنترل کرد. نوسازی سیستم‌های آبیاری، به ویژه جهت دستیابی به سیستم پایدار در مدیریت منابع آب، جهت بهینه‌سازی زیرساخت‌های آبی کشاورزی موجود، با هدف صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت سیستم‌های آبیاری جدید، موجب افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری در شبکه‌های بهره‌برداری و توزیع آب خواهد شد در مطالعه‌ای آزمایشگاهی به بررسی دریچه سالونی بیضوی در شرایط مستغرق پرداخته شد. در این پژوهش تعداد ۹۰ آزمایش در شرایط مختلف دبی و بازشدگی دریچه و استغراق انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها، ضریب دبی و افت انرژی محاسبه شد و نتایج نشان داد که حداکثر کاهش افت انرژی نسبی زمانی رخ خواهد داد که استغراق دریچه به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد (Pilbala et al., 2021).

Babaei Faqihmahaleh et al. (2018) در بررسی تأثیر مشخصات هندسی و شرایط هیدرولیکی سازه تنظیم و تحویل دبی دریچه سالونی، این سازه را با شرایط متفاوت از جمله بازشدگی دریچه، ابعاد و ... در نظر گرفتند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که بازشدگی‌های ۱۱ و ۲۳ درصد دریچه سالونی باعث می‌شود تا افت انرژی به میزان ۲۹/۷ درصد افزایش یابد.

Kheybar et al. (2021) به بررسی اثر تبدیل ناگهانی بر عملکرد هیدرولیکی دریچه در سالونی بیضوی در شرایط آزمایشگاهی در سه دبی و سه نسبت استغراق پرداخت. نتایج نشان داد که به دلیل انقباض ناگهانی کانال، ضریب دبی در

مستغرق ارائه شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که در شرایط جریان مستغرق ضریب دبی تابعی از بازشدگی و میزان نسبت استغراق دریچه است.

تاکنون تمامی بررسی‌ها در زمینه هیدرولیک دریچه به‌طور عمده در حالت نسبت بیضوی ثابت ( $T_2/T_1=1$ ) انجام شده است. جهت بررسی نسبت‌های بیضوی مختلف، پنج نسبت متفاوت در نظر گرفته شده و در این مقاله تصمیم بر این شده تا پارامترهایی نظیر استهلاك انرژی، تنش برشی در کف و جریان‌های گردابه‌ای در حالتی که نسبت بیضوی ( $T_2/T_1$ ) مقادیر عددی متفاوت را داراست، در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت مورد مطالعه قرار بگیرد. دبی‌ها ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و بازشدگی‌ها ۲۰ سانتی‌متر، ۳۰ سانتی‌متر و ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.

## مواد و روش‌ها

### معرفی مدل Flow3d

در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی جریان آزاد عبوری از دریچه سالونی بیضوی از نرم‌افزار Flow3d که یک نرم‌افزار بسیار قوی در زمینه CFD بوده استفاده شده است. مدل Flow3d حل معادلات سه‌بعدی حرکت سیال در مسائل چندفازی را سهولت می‌بخشد و با بهره‌گیری از تکنیک TruVOF برای مدل‌سازی سطح آزاد جریان به مدل‌سازی می‌پردازد. در این نرم‌افزار از دو روش شبیه‌سازی استفاده می‌شود. روش FAVOR (روش نماینده کسر مساحت-حجم مانع) معرفی شده است که برای مدل‌سازی سطوح و اجسام صلب استفاده می‌شود و روش VOF از طریق سعی و خطا و تحلیل هم‌زمان معادلات ناویر-استوکس جریان متلاطم با انواع روش‌های CFD، جهت نمایش رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می‌شود.

می‌شوند. Sajjadi *et al.* (2021) با کمک معادله انرژی و نتایج آزمایشگاهی، به بررسی خصوصیات جریان عبوری از دریچه‌های سالونی-بیضوی و مقایسه با دریچه مستطیلی در شرایط جریان آزاد پرداختند. آزمایش‌ها نشان داد که در وضعیت جریان آزاد، ضریب دبی تنها تابعی از نسبت بازشدگی دریچه است. هم‌چنین مشخص شد در وضعیت یکسان، با کم‌شدن بازشدگی، ضریب دبی دریچه سالونی-بیضوی نسبت به دریچه سالونی-مستطیلی افزایش می‌یابد.

در یک ارزیابی، توسط Pilbala *et al.* (2018) به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر استهلاك انرژی و ارائه رابطه جهت محاسبه آن، توسط دریچه سالونی مستطیلی پرداخته شد. در مجموع ۴۵ آزمایش با مقادیر مختلف از دبی، زوایای بازشدگی و نسبت‌های استغراق انجام شد که نتایج نهایی نشان داد درصد استغراق، نسبت بازشدگی و عدد فرود، پارامترهای مؤثر بر استهلاك انرژی جریان عبوری از دریچه سالونی مستطیلی هستند و هم‌چنین با افزایش دبی جریان در استغراق ثابت، استهلاك انرژی توسط دریچه افزایش پیدا می‌کند.

Monem & Naghayi (2013) با بهره‌گیری از نمودارهای ارائه شده توسط AS2I، رابطه دبی-اشل را برای دریچه‌های سالونی با عرضه‌ای سه، چهار، پنج، شش و هشت فوت و به‌ترتیب با بازشدگی از ۲/۷ تا ۷/۳ فوت، و نیز زوایای بازشدگی ۷۰ درجه ارائه کردند. در این پژوهش، نسبت عرض بازشدگی به عرض دریچه، برای دریچه‌های مختلف، ثابت و برابر با ۰/۹ بود. بررسی‌های انجام شده نشان داد که این سازه در مقایسه با دیگر سازه‌ها به‌دلیل اجرای آسان و سهولت در خودکارسازی به‌عنوان سازه تنظیم و کنترل جریان مناسب می‌باشد.

هم‌چنین، Yousefvand *et al.* (2015) با بررسی ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق، رابطه‌ای نظری برای تعریف ضریب دبی در شرایط جریان

### مدل‌های آشفتگی

در نسخه جدید نرم‌افزار flow3d مدل‌های آشفتگی شامل ۱- مدل‌های صفر معادله‌ای (طول اختلاط پراپرتی)، ۲- مدل یک معادله‌ای، ۳- مدل دو معادله‌ای (k-ε)، ۴- مدل دارای معادله تنش (RNG) و ۵- مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌باشند که مرسوم‌ترین آن‌ها در بحث سازه‌های هیدرولیکی مدل‌های k-ε، LES و RNG می‌باشند.

### مشخصات مدل

در ابتدا جهت صحت‌سنجی مدل تعریف‌شده، از مقایسه نتایج اطلاعات مدل فیزیکی Kheybar et al. (2021) استفاده شده است. در پژوهش ایشان از فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۸ متر استفاده شده است. در پژوهش آقای خیبر به منظور ایجاد استغراق‌های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد ( $\frac{y_t}{y_u}$ ) دریچه‌ای کشویی در انتهای فلوم قرار گرفته تا با بسته شدن آن و ایجاد حالت برگشتی در جریان، استغراق‌های مدنظر حاصل شوند. هم‌چنین نسبت بیضوی به‌کمک نرم‌افزار در بهترین حالت و بیش‌ترین تأثیر در جریان نسبت به دریچه سالونی مستطیلی انتخاب شد و برابر یک در نظر گرفته شد دامنه تغییرات عدد فرود در آزمایش‌ها از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ متغیر بوده است. شکل (۱) شماتیک دریچه سالونی و شکل (۲) دریچه آزمایشگاهی Kheybar et al. (2021) را که در این مطالعه استفاده شده را نشان می‌دهد.

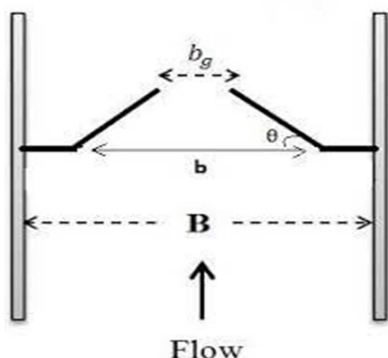


Figure 1. Elliptical gate plan view with sudden transition

### معادلات حاکم بر جریان

از معادلات حاکم می‌توان به معادله پیوستگی، معادله مومنتم و معادله پروفیل سطح آزاد اشاره نمود.

### معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این معادله (u, v, w) و (A<sub>x</sub>, A<sub>y</sub>, A<sub>z</sub>) به ترتیب مقادیر سرعت و نسبت مساحت در راستای x, y, z می‌باشد.

### معادله مومنتم

معادله مومنتم از حل معادلات ناویراستوکس به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z \quad (\text{رابطه ۴})$$

در معادله بالا  $g_z$  همان شتاب در جهت z، t پارامتر مربوط به زمان، A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های (x,y,z)، (u,v,w) متوسط سرعت در جهت‌های (x,y,z)، ρ چگالی سیال ( $kg/m^3$ )، p فشار در هر نقطه از سیال (pa) می‌باشد.

### معادله پروفیل سطح آزاد

(رابطه ۵)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = 0$$

A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های (x,y,z)

و (u,v,w) متوسط سرعت در جهت‌های (x,y,z) و هم‌چنین F

تابع نسبت سیال بوده که مقادیری بین صفر و یک دارد.

اطراف دریچه‌ها دقیق‌تر انجام شده و هم به علت ضخامت کم دریچه‌ها که یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌اند، شناسایی آن‌ها توسط نرم‌افزار جهت شرکت در حل مسأله به راحتی صورت بگیرد. برای کل فلوم اندازه سلول‌های درشت‌تر گرفته شد تا پردازش و حل توسط سیستم سریع‌تر و آسان‌تر انجام گیرد. در پایان مرحله مش‌بندی برای اطلاع از میزان توانایی شبکه مش‌بندی تعریف شده با ابعاد و سلول‌های مشخص شده و دست‌یابی به بهترین و مؤثرترین میدان حل، در مدل‌کردن اجسام صلب از گزینه FAVOR استفاده شد.

نُه آزمایش، با زاویه ۲۵ درجه، تبدیل پنج سانتی‌متر و سه دبی (۲۵، ۳۵ و ۴۵) لیتر بر ثانیه شبیه‌سازی شد. هر یک از آزمایش‌ها با سه مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، LES و RNG انجام شد که در مجموع تعداد ۲۷ شبیه‌سازی مورد انجام و بررسی قرار گرفته است. در نهایت پس از پایان شبیه‌سازی هر ۲۷ مورد با مقایسه و بررسی، مدل دارای نزدیک‌ترین مقادیر به مقادیر آزمایشگاهی به عنوان مدل آشفتگی برای مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفته که در این مطالعه، طبق بررسی نتایج در شکل (۳) و جدول (۱) نشان می‌دهد که مدل RNG از کم‌ترین درصد خطا، نسبت به سایر مدل‌ها در حل مسأله برخوردار است.

Table 1. Values of statistical indicators

Model	R2	RMSE
RNG	0.789	0.020
K-ε	0.736	0.025
LES	0.781	0.021

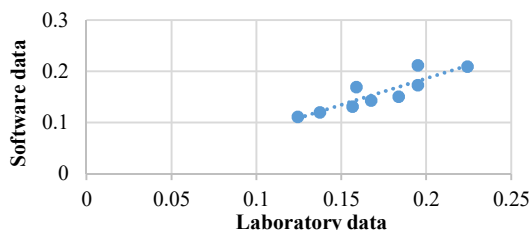


Figure 3. Comparison of Elliptical lopac gate Modeling Results Simulated with Flow3d and Laboratory Model by Turbulence Model RNG



Figure 2. Elliptical lopac gate with sudden transition

شرایط مرزی اعلام شده در مدل‌سازی توسط نرم‌افزار به این صورت بوده که در بالادست جریان در قسمت ورودی آب به درون فلوم شرایط مرزی  $valoum\ flow\ rate$  اعمال شد و مقادیر دبی و ارتفاع آب (با توجه به داده‌های آزمایشگاهی) وارد شد. همچنین در قسمت انتهایی فلوم در قسمت خروجی آب شرط مرزی  $outflow$  اعمال شد. دیواره‌ها و کف فلوم به صورت  $wall$  قرار گرفته و قسمت بالای فلوم و همچنین نواحی از دریچه‌ها که با جریان آب، در ارتباط بود به صورت  $symmetry$  در نظر گرفته شد. مجموع تعداد مش‌های اعمال شده ۵۱۴۰۰۰ و زمان شبیه‌سازی ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شد و با انجام یکسری شبیه‌سازی در بخش کالیبراسیون نتایج نشان داد با افزایش زمان شبیه‌سازی و یا ریزتر کردن مش‌بندی‌ها درصد خطا بسیار کاهش بسیار جزئی و مدت‌زمان شبیه‌سازی افزایش قابل توجهی داشت، به طور مثال در شبیه‌سازی با مدل آشفتگی RNG با ریزتر کردن اندازه‌های مش‌بندی درصد خطا از ۲۱ درصد به ۱۹ درصد کاهش و زمان شبیه‌سازی از پنج ساعت به هشت ساعت افزایش یافت. اندازه سلول‌های هر بلوک به میزان تأثیر آن روی جریان گذرنده در شبکه حل، ضخامت هندسه و ... بستگی دارد. بنابراین باید این اندازه‌ها به گونه‌ای مشخص شوند که هم نتیجه متناسب با فیزیک مسأله حاصل شود و هم زمان حل خیلی طولانی نباشد که برای دستیابی به مش‌بندی بهینه اندازه سلول‌های مش مربوط به دریچه‌ها کوچک‌تر در نظر گرفته شد تا هم محاسبات

بازشدگی و نسبت شعاع و برای هر سه دبی، تهیه و در نرم‌افزار فراخوانی شد و پس از اعمال یک‌سری از تنظیمات مربوط به تعیین زمان، مش‌بندی، شرایط مرزی و خروجی‌های مدنظر به اجرای شبیه‌سازی پرداخته شد.

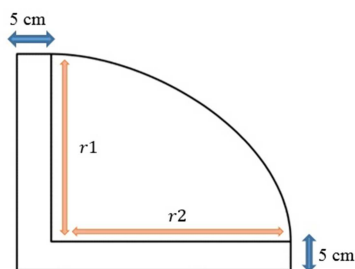


Figure 4. View of the elliptical lopac gate with different radius

در شکل (۵) پارامترهای مهم و تأثیرگذار در روند بررسی و محاسبات از جمله طول فلوم، اندازه تبدیل‌ها، عرض فلوم و بازشدگی دریچه همراه با ابعاد و اندازه، درون فلوم مورد بررسی نشان داده شده است.

پارامترهای مهم در بررسی‌ها شامل نسبت بازشدگی  $(\frac{bg}{B})$ ، عمق آب در بالادست  $(y_1)$ ، عمق آب در پایین دست  $(y_2)$  و نسبت بیضوی  $(\frac{r_2^2}{r_1^2})$  می‌باشد که در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.

پس از تعیین مدل آشفتگی به کمک کالیبراسیون به مدل‌سازی و بررسی دریچه با ابعادی متفاوت پرداخته شد. تاکنون تمامی بررسی‌ها در زمینه هیدرولیک دریچه به طور عمده در حالت نسبت بیضوی ثابت  $(r_1/r_2=1)$  انجام شده است. جهت بررسی نسبت‌های بیضوی مختلف، نسبت‌های متفاوت بیضوی در نظر گرفته شده و مدل دریچه مدنظر در این پژوهش یک دریچه سالونی بیضوی با تبدیل ناگهانی ثابت به طول ۱۰ سانتی‌متر در هر طرف و پنج نسبت بیضوی مختلف به شرح زیر می‌باشد که برای شعاع  $r_1$  مقدار عددی ۳۵ سانتی‌متر به صورت ثابت و برای شعاع  $r_2$  پنج مقدار به شرح زیر را خواهیم داشت. در شکل (۴) بخش‌های مختلف دریچه و ابعاد و اندازه‌ها نشان داده شده است.

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{0.25}{0.35}, \frac{0.3}{0.35}, \frac{0.35}{0.35}, \frac{0.4}{0.35}, \frac{0.45}{0.35} \quad (\text{رابطه ۶})$$

طول فلوم در مدل‌سازی عددی به جهت کاهش مدت‌زمان شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار، از ۱۰ متر به ۲/۵ متر کاهش پیدا کرد. همچنین زمان شبیه‌سازی ۴۰ ثانیه، عرض ۰/۸ متر، ارتفاع ۰/۶ متر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها برای سه دبی مختلف ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با سه بازشدگی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر شبیه‌سازی شده‌اند. در کل ۱۵ هندسه از دریچه با ابعاد متفاوت

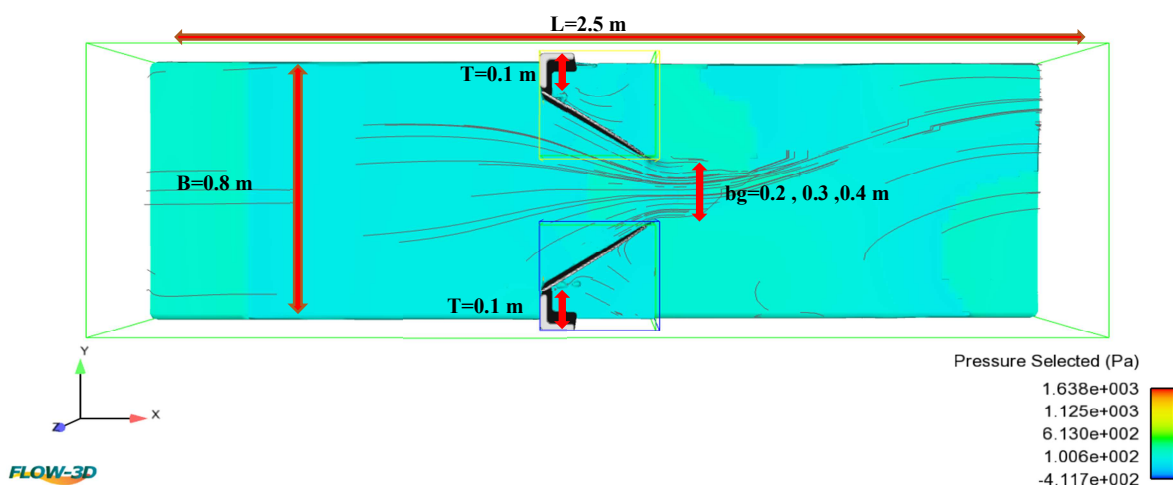


Figure 5. Flow plan view modeled in Flow 3d with dimensions and details

لازم پرداخته شد. بخش محور عمودی مربوط به نسبت تغییرات انرژی در بالادست و پایین‌دست نسبت به انرژی اولیه در بالادست و محور افقی مربوط به نسبت‌های بیضوی متفاوت می‌باشد. همان‌طور که پیش از این ذکر شد، نسبت بیضوی در محاسبات به صورت نسبت  $r_2$  به  $r_1$  در نظر گرفته شده است. با بررسی گراف‌های رسم‌شده، روند نزولی و رابطه عکس بین استهلاك انرژی و نسبت بیضوی قابل توجه بوده است. به این صورت که با افزایش نسبت بیضوی در سه بازشدگی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، استهلاك انرژی به نسبت انرژی اولیه به‌طور مرتب از حدود هشت تا ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند و این پدیده برای هر سه دبی تکرار می‌شود. بنابراین هرچه ضلع افقی دریچه کشیدگی بیش‌تری نسبت به ضلع عمودی آن داشته باشد، انرژی کم‌تری ضمن عبور جریان از دریچه، مستهلک می‌شود و براساس الگوی جریان نیز می‌توان گفت که ضمن افزایش نسبت بیضوی دریچه و کاهش گردابه‌ها افت نیز کم‌تر می‌شود.

#### محاسبه و مقایسه تغییرات تنش در بستر در نسبت‌های بیضوی متفاوت

تنش برشی وارد بر کف و دیواره‌های رودخانه‌ها و مسیرهای دیگر عبور جریان یکی از مهم‌ترین خصوصیات جریان در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز می‌باشد. در تمامی شکل‌های نشان داده‌شده تفاوت مقادیر تنش برشی در نزدیکی بستر با حالت شاهد در دبی‌های مختلف به‌وضوح دیده می‌شود.

در این بخش به مقایسه کیفی تنش بین حالت‌های شاهد و دیگر حالت‌ها پرداخته شد و هدف، دستیابی به نسبت بیضوی همراه با بیش‌ترین کاهش تنش نسبت به شرایط شاهد می‌باشد. نحوه توزیع تنش در شکل (۹-ا)، در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۲۰ سانتی‌متر (نسبت

Table 2. Values related to the elliptical ratio of the gate

r2(m)	r1(m)	r2/r1
0.25	0.35	0.7
0.3	0.35	0.85
0.35	0.35	1
0.4	0.35	1.14
0.45	0.35	1.28

Table 3. Values related to the opening ratio

bg(m)	B(m)	bg/B
0.2	0.8	0.25
0.3	0.8	0.375
0.4	0.8	0.5

پس از پایان تمامی شبیه‌سازی‌ها، نوبت به مرحله تحلیل نتایج و داده‌ها می‌رسد. در این بخش ابتدا توسط نرم‌افزار مقادیر عددی ارتفاع آب در بالادست دریچه را برای تمامی مدل‌سازی‌های انجام‌شده برداشت‌شده و در یک جدول از پیش تهیه‌شده، جمع‌آوری شده است.

#### نتایج و بحث

##### محاسبه و مقایسه استهلاك انرژی در نسبت‌های بیضوی مختلف

ضمن عبور جریان از دریچه مقداری از انرژی جریان در بالادست صرف حرکت آب و عبور از تنگ‌شدگی موجود خواهد شد جهت محاسبه و دستیابی به مقادیر اتلاف انرژی و مقایسه باحالت شاهد از فرمول زیر استفاده شده است:

$$E = \gamma + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (\text{رابطه } \gamma)$$

با استفاده از رابطه (۷) و با جای‌گذاری مقادیر ارتفاع آب ( $\gamma$ )، دبی مدنظر ( $Q$ ) و مساحت مقطع جریان ( $A$ ) در هر دو مقطع مقادیر عددی  $E_1$  و  $E_2$  به‌دست آمد و با کسر مقدار  $E_2$  از  $E_1$  میزان اتلاف انرژی در هر آزمایش محاسبه شد و سپس جهت بی‌بعدکردن، نسبت  $\frac{\Delta E}{E_1}$  تشکیل شد و با استفاده از مقادیر نسبت انرژی و نسبت بیضوی، نمودارها در شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) رسم شد.

در شکل‌های (۶) تا (۸) به بررسی روند تغییرات انرژی تلف‌شده نسبت به تغییرات ابعاد و رسم گراف‌های

بیضوی بزرگ‌تر از یک و در کم‌ترین میزان بازشدگی، تغییر رنگ‌بندی از زرد و قرمز به رنگ سبز در بخش میانی و بعد از دريچه مشاهده شده همین امر نشان‌دهنده کاهش مقدار تنش برشی در کف فلوم می‌باشد. در نتیجه، در دبی و بازشدگی ثابت، افزایش کشیدگی دريچه و نسبت بیضوی، کاهش تنش در کف را به دنبال دارد.

بیضوی یک) و در شکل (9-b)، در همان دبی و همان بازشدگی در نسبت بیضوی ۱/۲۸ نشان داده شده است که به‌وضوح می‌توان کاهش تنش در قسمت میانی بعد از دريچه را مشاهده کرد. برای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) هم تمامی شرایط ذکر شده، صادق می‌باشد. طبق راهنمای رنگ‌بندی در همه شکل‌های به‌دست‌آمده، در نسبت‌های

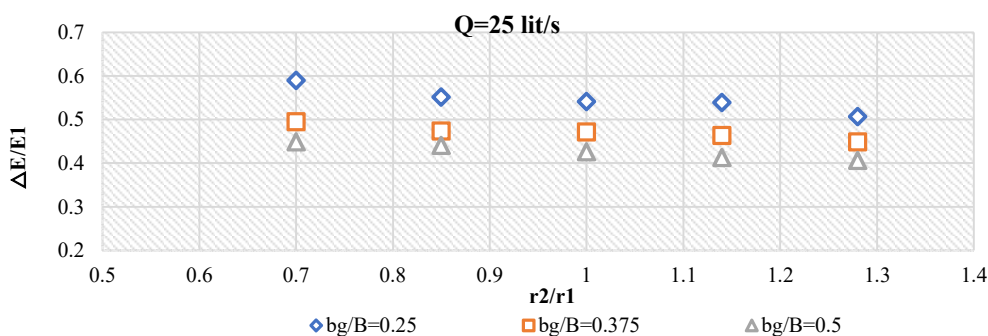


Figure 6. The trend of changes in the ratio of energy loss to primary energy versus changes in the elliptical ratio at a flow rate of 25 lit/s

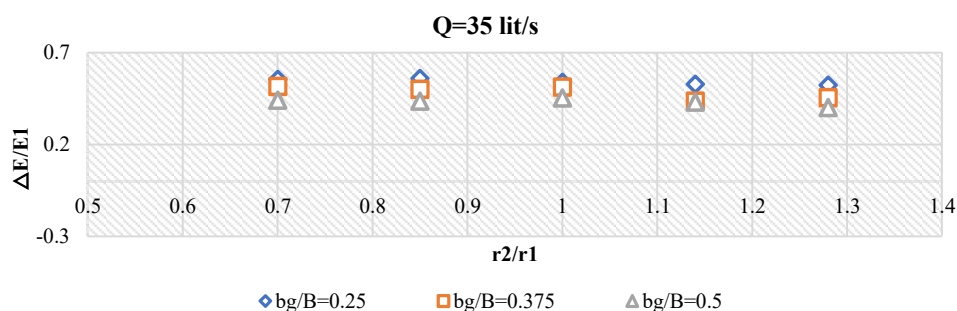


Figure 7. The trend of changes in the ratio of energy loss to primary energy versus changes in the elliptical ratio at a flow rate of 35 lit/s

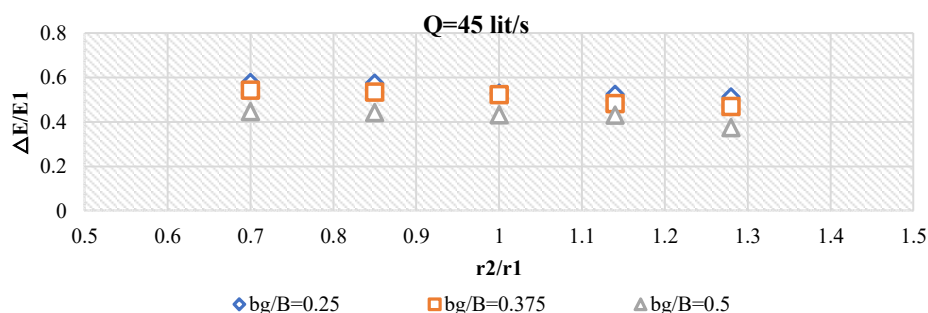


Figure 8. The trend of changes in the ratio of energy loss to primary energy versus changes in the elliptical ratio at a flow rate of 45 lit/s



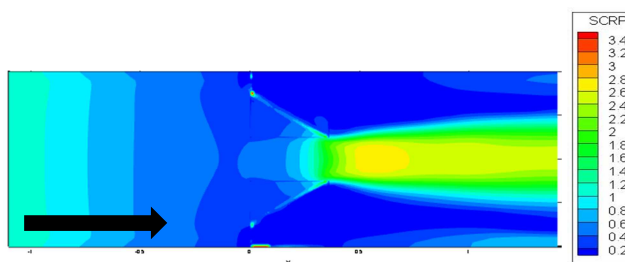


Figure 9. (a) Shear stress distribution in elliptical ratio 1 in flow of 25 lit/s and opening 20 cm

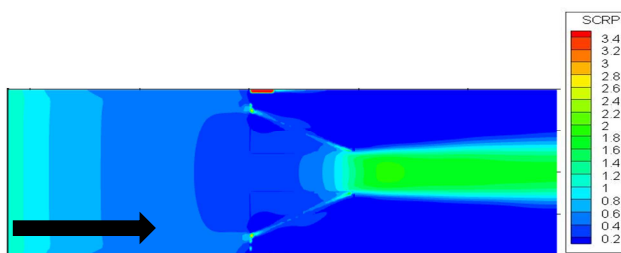


Figure 9. (b) Shear stress distribution in elliptical ratio 1.28 in flow of 25 lit/s and opening 20 cm

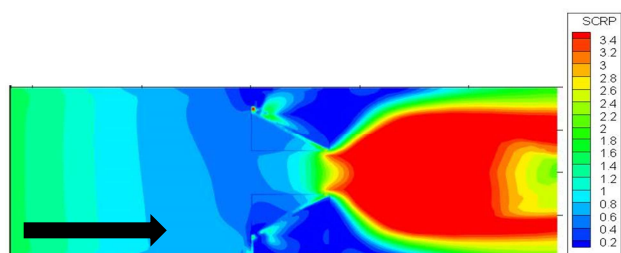


Figure 10. (a) Shear stress distribution in elliptical ratio 1 in flow of 35 lit/s and opening 20 cm

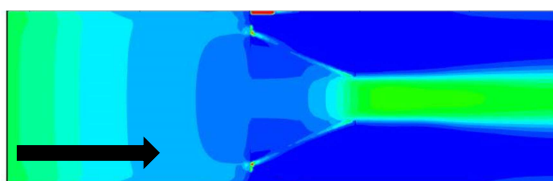


Figure 10. (b) Shear stress distribution in elliptical ratio 1.28 in flow of 35 lit/s and opening 20 cm

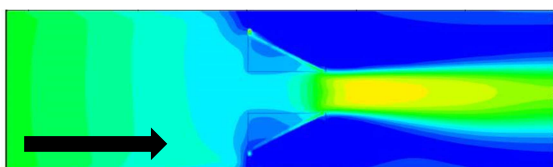


Figure 11. (a) Shear stress distribution in elliptical ratio 1 in flow of 45 lit/s and opening 20 cm

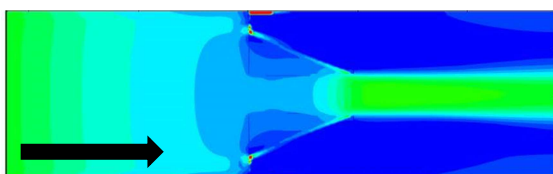


Figure 11. (b) Shear stress distribution in elliptical ratio 1.28 in flow of 45 lit/s and opening 20 cm

منحرف‌شده و از مسیر اصلی خود خارج می‌شود. بنابراین با نتایج حاصل از بررسی تمامی نسبت‌های بیضوی و مقایسه با حالت شاهد نشان می‌دهد که بهترین حالت از خطوط جریان با آشفتگی کم‌تر که فاقد انحراف جریان از مسیر و گردابه با مساحت زیاد می‌باشد در حالت نسبت بیضوی  $1/28$  و بیش‌ترین کشیدگی برای ضلع افقی دریچه (۴۵ سانتی‌متر) مطابق شکل در بازشدگی  $20$  سانتی‌متر می‌باشد.

در بازشدگی  $30$  سانتی‌متر برای دبی  $35$  لیتر بر ثانیه پنج حالت نسبت بیضوی داشته که چهار حالت از آن باحالت شاهد (نسبت بیضوی ۱) مقایسه شد و مشاهده شد که، در حالت شاهد، ایجاد گردابه‌های بزرگ با قدرت بالا و انحراف جریان وجود داشت که این گردابه تا پایین‌دست نیز ادامه داشت. رنگ‌بندی زرد و نارنجی در شکل (a-13)، نشان‌دهنده سرعت بالا در بخش میانی جریان بعد از دریچه است که با کوچک‌تر شدن نسبت بیضوی به رنگ سبز تغییر پیدا می‌کند که نشان‌دهنده کاهش سرعت جریان در همان ناحیه می‌باشد. در نسبت بیضوی یک و چهارده صدم اندازه گردابه‌های جریان کوچک‌تر شده و در نتیجه قدرت کم‌تری دارند و همچنین انحراف جریان از مسیر نسبت به حالت شاهد بسیار کم‌تر می‌باشد.

با بررسی شکل‌های (a-14) و (b-14)، در بازشدگی‌های  $40$  سانتی‌متر و شرایطی هم‌چون بررسی‌های پیشین به‌وضوح تغییر مسیر جریان نسبت به حالت شاهد، پراکندگی خطوط گردابه‌ها و در نتیجه کم‌تر شدن قدرت و سرعت آن‌ها مشاهده شد. کاهش سرعت جریان در نتیجه کاهش مقدار نسبت بیضوی به کم‌تر از یک، با تغییر رنگ‌بخش میانی جریان از زرد به آبی کاملاً مشهود بوده و این روند برای دبی‌های  $25$  لیتر بر ثانیه و  $45$  لیتر بر ثانیه نیز تکرار شده و در نسبت‌های بیضوی بیش‌تر از یک، کاهش قدرت و شدت گردابه‌ها و همچنین کاهش سرعت جریان دیده شد.

**Table 4. Results of shear stress analysis in the floor**

Q (lit/s)	Maximum stress reduction (%)	$r_2/r_1$	$b_g$ (cm)
25	62	1.28	20
35	82	1.28	20
45	52.5	1.28	20

مقادیر جمع‌آوری‌شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که در دبی  $25$  لیتر بر ثانیه در بازشدگی  $20$  سانتی‌متر و در نسبت بیضوی  $1/28$ ،  $\left(\frac{r_2}{r_1} = \frac{0.45}{0.35}\right)$ ، به‌دلیل افزایش نسبت بیضوی به مقادیر بزرگ‌تر از یک و در نظر گرفتن کم‌ترین بازشدگی برای دریچه  $62$  درصد کاهش تنش نسبت به حالت شاهد، در دبی  $35$  لیتر بر ثانیه با همان شرایط  $82$  درصد کاهش تنش و در دبی  $45$  لیتر بر ثانیه نیز با شرایط ثابت  $52/5$  درصد کاهش تنش داشته به این معنا که در هر سه دبی در کم‌ترین میزان بازشدگی و بیش‌ترین مقدار کشیدگی برای ضلع افقی دریچه (کم‌ترین نسبت بیضوی) بیش‌ترین مقدار کاهش تنش نسبت به حالت شاهد مشاهده می‌شود.

### بررسی گردابه‌های جریان در نسبت‌های بیضوی مختلف

هنگامی که حرکت ذرات سیال به‌گونه‌ای باشد که در آن خطوط جریان به‌صورت منحنی‌های بسته باشند، جریان گردابی شکل می‌گیرد؛ گردابه‌ها ناحیه‌هایی خاص محسوب شده و تحت شرایطی ویژه تشکیل می‌شوند. این پدیده می‌تواند باعث بروز مشکلاتی نظیر افزایش افت انرژی، کاهش نرخ آبیگری، کاهش راندمان ماشین‌های هیدرولیکی و عملکرد نامناسب آن‌ها شود از این‌رو بررسی این ناحیه نیز نسبت به دیگر نواحی متفاوت و حائز اهمیت است.

طبق شکل‌های (a-12) و (b-12)، با رسم خطوط جریان در نزدیکی کف فلوم در دبی  $35$  لیتر بر ثانیه و مقایسه آن‌ها در پنج نسبت بیضوی متفاوت در بازشدگی ثابت مشاهده شد که در نسبت‌های بیضوی کوچک‌تر از یک با ایجاد گردابه‌ی بزرگ در یک سمت جریان به سمت مقابل

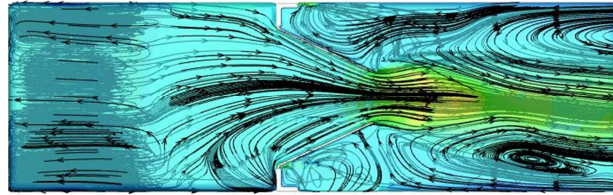


Figure 12. (a) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1 at an opening of 20 cm

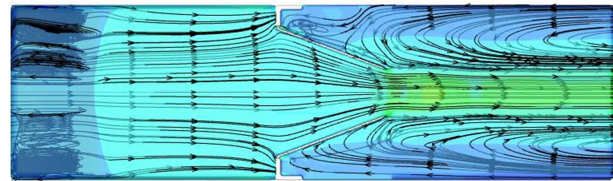


Figure 12. (b) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1.28 at an opening of 20 cm

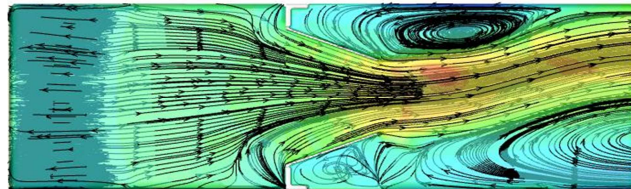


Figure 13. (a) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1 at an opening of 30 cm

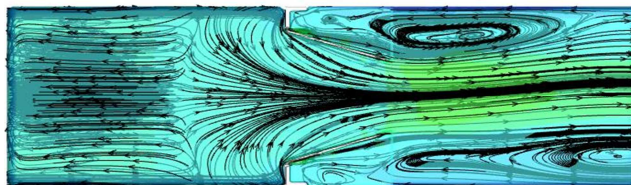


Figure 13. (b) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1.14 at an opening of 30 cm

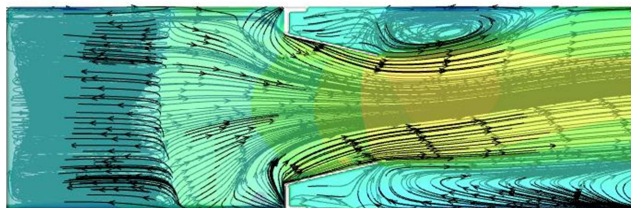


Figure 14. (a) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1 at an opening of 40 cm

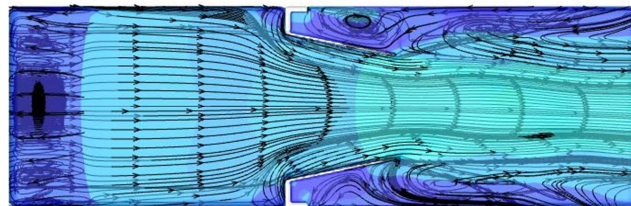


Figure 14. (b) Streamlines at a flow rate 35 lit/s and an elliptical ratio of 1.14 at an opening of 40 cm

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی هیدرولیکی دریاچه سالونی بیضوی در شرایط جریان آزاد و تغییر پارامترهایی نظیر استهلاک انرژی، تنش برشی و گردابه‌های جریان در نسبت‌های بیضوی متغیر، پرداخته شد.

- بین مقادیر اتلاف انرژی و نسبت بیضوی رابطه معکوس وجود دارد که نشان می‌دهد هرچه مقادیر نسبت بیضوی، بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شود، انرژی تلف‌شده کم‌تر شده و اختلاف انرژی در پایین‌دست نسبت به انرژی بالادست کاهش داشته و اتلاف انرژی در این بین صرف عبور جریان از تنگ‌شدگی بخش میانی فلوم می‌شود.

- در کم‌ترین میزان بازشدگی و نسبت‌های بیضوی بیش‌تر از یک، شاهد کم‌ترین میزان تنش برشی در کف بوده است، به این ترتیب که در بازشدگی ۲۰ سانتی‌متر برای دبی ۲۵ در حدود ۶۲ درصد، برای دبی ۳۵ در حدود ۸۲ درصد و برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه ۵۲/۵ درصد کاهش تنش دیده شد. بنابراین جهت کاهش تنش در مسیر جریان، می‌توان دریاچه را کشیده‌تر طراحی کرد.

- در بخش تحلیل گردابه‌ها و جریان‌های چرخشی در مسیر مدنظر، تشکیل گردابه‌ها بعد از دریاچه و در پایین‌دست مشاهده شد. در نسبت‌های بیضوی کم‌تر از یک، گردابه‌ها با قدرت و تراکم بالا و انحراف جریان به یک‌سو اتفاق افتاد. رفته‌رفته افزایش مقادیر نسبت بیضوی به بیش‌تر از یک، علاوه بر کاهش سرعت آب، موجب کاهش تراکم گردابه‌ها و پراکنده‌شدن جریان در ناحیه گردابه شد. هم‌چنین جریان منحرف‌شده نیز به مسیر اصلی، بازگشت. بنابراین جریان‌های گردابه‌ای و نسبت بیضوی رابطه‌ای عکس‌دارند و برای کاهش گردابه‌ها و ورتکس‌ها می‌توان نسبت بیضوی را برای دریاچه‌های سالونی بیضوی افزایش داد.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## منابع

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. Babaei Faqihmahaleh, 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)
3. Badiee, 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)
4. Kheybar, H., Sajadi, M., & Ahadyan, J. (2021). Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*, 1-10. (In Persian)
5. Monem, M.J., & Naghayi, R. (2013). Introduction of lopac gate to regulate water level in irrigation canals and present its hydraulic relations. in: *Proceeding of 4th National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks*, Shahid Chamran university of Ahvaz. (In Persian)
6. Monem, M.J., & Sadeghi, S. (2014). Testing the use of Lopac Gate in irrigation networks and comparing them with conventional structures using the ICSS mathematical model, Ministry of Science, Research and Technology, Tarbiat Modares University, College of Agriculture. (In Persian)
7. Pilbala, A., Sajjadi, M., & Bejestan, M.S. (2021). Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 317-326.
8. Pilbala, A., Sajjadi, M., & Shafai Bajestan, M. (2018). Laboratory study of current energy dissipation passing through a rectangular LOPAC gate under submerged flow conditions. in: *Proceeding of International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran. TEHRAN*. University of Tehran. (In Persian)

9. Sajjadi, M., Neysi, M., & Shafai Bajestan, M. (2021). Experimental Investigation of Hydraulic Conditions of Elliptical and Rectangular Lopac Gate in Free Flow Conditions, *Iranian Water Research Journal*, 14(39), 1-8. (In Persian).
10. Yousofvand, F., Monem, M.J., & Kavianpour, M.R. (2015). Experimental and Theoretical Analysis of Discharge Coefficient for Submerged Lopac Gate. *Irrigation and Drainage*, 9(5), 811-819. (In Persian)