

# مدلسازی عددی عملکرد شیر خودکار کنترل دبی برای محدوده هد کانال‌های روباز و شبکه‌های کم‌فشار

## چکیده

شیرهای خودکار کنترل جریان یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل آب هستند. شیرهای خودکار کنترل دبی معمولاً برای هدهای متداول در شبکه‌های توزیع تحت فشار طراحی می‌شوند. در این پژوهش یک سازه جدید برای کنترل جریان در آبگیر مزارع طراحی شده که شامل یک شیر خودکار کنترل دبی برای هدهای کم است. پس از آزمون عملکرد این شیر در آزمایشگاه، مدلسازی عددی آن توسط نرم‌افزار انسیس فلونت انجام گرفته است. این مدلسازی عددی زمینه‌ساز توسعه کم‌هزینه شیر خودکار کنترل دبی برای بهره‌برداری در محدوده گسترده‌تری از اختلاف فشار و دبی خواهد شد. با توجه به متحرک بودن اجزای داخلی این شیر کنترل، شبیه‌سازی عددی پویای آن از پیچیدگی‌های خاص برخوردار است و نیازمند به‌کارگیری شبکه دینامیک است که اجرای آن بسیار زمان‌بر است. در این پژوهش برای کاهش زمان مدلسازی پویا، فرضیات مرسوم ساده‌سازی هندسه به کار گرفته شده و اثرات آن بر نتایج گزارش شده است. نتایج نشان داد که حذف محور هادی شیر از هندسه ضمن ایجاد سهولت بسیار در مدلسازی پویا و کاهش هزینه زمانی محاسبات، خطای سیستماتیک یک‌طرفه برآورد دبی به میزان ۲/۷ تا ۴/۹ درصد ایجاد می‌کند. از آنجا که جهت خطای برآورد دبی یک‌طرفه بوده، رابطه تعدیل نتایج برای آن ارائه و گزارش شده است.

کلیدواژه‌ها: انسیس فلونت، تحویل حجمی، خطای مدلسازی، دبی ثابت شیر خودکار

## Numerical Modelling of Automatic Flow Control Valve Performance for the Head Range of Open Channel and Low-head Networks

### ABSTRACT

Automatic flow control valves are one of the most important parts of the conveyance, distribution, and volumetric water delivery. Automatic flow control valves are usually designed for common heads in pressurized distribution networks. In this study, a new structure has been designed for farm use to control the flow which is applied in low operation heads. A numerical simulation by Ansys Fluent was carried out after a performance examination in the laboratory. This numerical modeling will lay the groundwork for the low-cost development of the automatic flow control valve for operating in a wide range of heads and flow rates. Due to the mobility of the internal components of this control valve, its dynamic simulations are complex and require the use of a dynamic mesh, which is very time-consuming to implement. In this research, to reduce the time of dynamic simulation, conventional assumption is considered to simplify the flow field geometry and its results are reported based on the results. The results show that excluding a guide rod from geometry, whilst facilitate dynamic simulation and decrease simulation time, also leads to a one-sided systematic error ranging from 2.7 to 4.9 percent. Since the direction of the discharge estimation error is one-sided, the correlation relationship of the results was presented and reported in this study.

*Keywords: Ansys Fluent, automatic valve, constant discharge, simulation errors, volumetric delivery*

## مقدمه

افزایش همزمان کمبود آب و نیاز روزافزون جهان به محصولات کشاورزی، توجه بیش‌تری را به بهینه‌سازی مصرف آب معطوف کرده است. کنترل تحویل حجمی آب به‌عنوان روشی برای افزایش بهره‌وری توزیع و تحویل آب در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور تحویل حجمی دقیق آب و تأمین یکنواختی توزیع آن، کاربرد شیرهای خودکار کنترل دبی در شبکه‌های سطحی مورد توجه قرار گرفته است. این شیرهای خودکار بخشی از یک سازه غیرحساس به نوسانات سطح آب در سامانه‌های سطح آزاد و یا نوسانات فشار تفاضلی در سامانه‌های تحت فشار هستند. در این پژوهش با داده‌برداری آزمایشگاهی از یک شیر خودکار کنترل دبی، عملکرد آن در تنظیم و تحویل جریان ثابت در یک محدوده معین فشار تفاضلی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

با توسعه رایانه‌ها و امکان استفاده از روش‌های عددی برای حل میدان جریان و فشار، کاربرد مدل‌های عددی در مسائل هیدرولیک و مکانیک سیالات نیز رو به افزایش رفت. یکی از این مدل‌های عددی، نرم‌افزار انسیس فلونت است. کاربرد گسترده فلونت در شبیه‌سازی شیرهای کنترل جریان سبب شد تا پژوهش‌گران با انجام فرضیات ساده‌ساز مختلف، هزینه محاسباتی انجام این شبیه‌سازی‌ها را کاهش دهند. یکی از این فرضیات، ساده‌سازی هندسه است که تأثیر آن در نتایج نهایی مدل عددی در این پژوهش نیز مورد توجه قرار گرفته است.

## پیشینه پژوهش

شیرهای کنترل جریان از اجزای مهم سیستم‌های توزیع و انتقال سیال هستند که در بخش‌های مختلف شبکه‌های انتقال و توزیع آب نیز دیده می‌شوند. انواع مختلفی از شیرهای کنترل برای پیشگیری از شکست سامانه و یا بهبود عملکرد آن و نیز کنترل نشت در شبکه‌های توزیع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fecarotta et al., 2015). یکی از جدیدترین سازه‌های کنترل جریان، شیر خودکار کنترل دبی به کمک انسداد مکانیکی روزنه MCOP<sup>۱</sup> است. این شیر که از این پس نام مخفف آن MCOP به کار می‌رود نخستین بار توسط ژانگ و وانگ پیشنهاد شد که هنوز مراحل پژوهشی را می‌گذراند. این دو پژوهشگر با ایجاد گرفتگی مکانیکی در یک روزنه توسط یک قطعه متحرک دوکی شکل، فرآیند تحویل جریان ثابت را طراحی کردند که علی‌رغم نوسان فشار تفاضلی در دو طرف شیر در بازه‌ای مشخص، دبی نسبتاً ثابتی را با خطای  $\pm 4\%$  درصد تحویل می‌دهد (kai Zhang & Wang, 2015).

پژوهش‌گران دیگری برای گسترش دامنه فشار کارکرد و بهبود طراحی اجزای شیر کنترل، پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام داده‌اند.

<sup>۱</sup>Mechanical choked orifice plate

ضوابط طراحی شیر کنترل فشار در شبکه‌های تحت فشار در پژوهش (Rezazadeh et al., 2019) برای محدوده دبی وسیع‌تر تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه و فشار تفاضلی بالاتر معادل ۱۹۶۰ میلی‌بار (۲۰ متر ستون آب) توسعه داده شد. آن‌ها با به کار بردن یک روزنه و یک استوانه (سیلندر)، رابطه تخلیه جریان را محاسبه کرده و بر اساس آن طرح اولیه شیر را به دست آوردند. سپس عملکرد شیر کنترل دبی را با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و اصلاح شکل شناور افزایش دادند. همین مکانیزم در پژوهشی دیگر (Atashparvar et al., 2019) برای بررسی یک سیستم پمپاژ با سرعت دوران متغیر مورد استفاده قرار گرفت. آتش‌پرور و همکاران با توسعه رابطه دبی-فشار تفاضلی برای یک روزنه سیلندری، یک روش طراحی برای تخمین شکل اولیه شناور پیشنهاد کردند. این دو شیر کنترل با دبی طرح ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه و در محدوده فشار کارکرد به ترتیب ۹۸ تا ۹۸۰ میلی‌بار و ۲۹ تا ۱۴۷ میلی‌بار، می‌توانند نقطه عملکرد سیستم پمپاژ را برای حفظ دبی تقریباً ثابت تنظیم کنند. مهری و بی‌جن‌خان نیز در محدوده دبی و فشار مشابه آتش‌پرور و همکاران، ضرایب افت انرژی ورودی و افت کل سازه در فشارهای تفاضلی پایین و در فشارهای تفاضلی بالا را مورد بررسی قرار دادند (kai Zhang & Wang, 2015).

با توسعه سخت‌افزار کامپیوترها و امکان استفاده از روش‌های عددی برای حل جریان، کاربرد نرم‌افزار انسیس در مسائل مکانیک سیالات رو به افزایش رفت. کاربرد گسترده مدل‌های عددی در شبیه‌سازی شیرهای کنترل سبب شد تا جانسون و لاومارک یک شیر یکطرفه دیسکی را با نرم‌افزار انسیس فلونتت شبیه‌سازی کنند و ویژگی‌های دینامیکی این شیر را به‌منظور تعیین زمان بسته شدن آن، مورد ارزیابی قرار دهند. اهرم شیر کنترل در دو حالت مختلف با وزنه و بدون وزنه بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با حضور وزنه، زمان شروع بسته شدن دیسک سریع‌تر آغاز می‌شود و سرعت زاویه‌ای مطلق در طول فرآیند بسته شدن افزایش می‌یابد. درحالی‌که اگر وزنه برداشته شود، دیسک دیرتر شروع به بسته شدن می‌کند اما سرعت زاویه‌ای مطلق به‌طور یکسخت افزایش نمی‌یابد (Jansson & Lövmark, 2013). این تجربه در شبیه‌سازی شیر خودکار کنترل دبی که دارای یک قطعه متحرک لغزنده بر روی یک محور است، مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مدل‌سازی عددی علاوه بر هیدرولیک جریان، در ارزیابی، اصلاح و طراحی هندسه شیر کنترل‌ها نیز کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. در شیرهای کنترل درون‌خط، شکل هندسه بدنه با اعمال دو چرخش ۹۰ درجه‌ای در سیال سبب تلفات انرژی بالا می‌شود، این امر سبب شد تا طراحان بر ضرورت اندازه‌گیری و مطالعه میدان جریان در داخل شیر واقف شوند تا به این ترتیب دریابند که چرا یک طراحی خاص کارآمدتر از طراحی دیگر است. در همین راستا استرز و همکاران (Stares et al., 2003) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی آلفگوی

جریان در داخل یک شیر را شبیه‌سازی کامپیوتری کردند. آن‌ها با بهبود شکل مجراها در غلاف دریچه گاز، جدایی جریان سیال از دیواره بدنه شیر را به حداقل رساندند و کاهش قابل توجهی در تلفات فشار ایجاد کردند. مدل‌سازی عددی شیر کنترل جریان هم‌چنین در تحلیل ضریب جریان کاربرد دارد. لیسوفسکی و فیلو هندسه یک شیر کنترل جهت تناسبی دارای کنترل گر یکپارچه موقعیت قرقره را توسط نرم‌افزار انسیس فلونت اصلاح کردند و مقادیر ضرایب جریان این شیر را تعیین نمودند (Lisowski & Filo, 2017). آن‌ها بر اساس نتایج بدست آمده از CFD برای فرموله کردن مقدار ضریب جریان سه تابع تقریبی ارائه کردند. مناسب‌ترین تابع ضریب جریان در شبیه‌سازی‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. لیسوفسکی و راجدا نیز با روش دینامیک سیالات محاسباتی کاهش مقاومت جریان در سیستم‌های هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها یک بهینه جدید برای شیر کنترل‌های ۴ طرفه طراحی کردند (Lisowski & Rajda, 2013). این پژوهش‌گران توانستند با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری بهینه‌سازی شکل هندسه، افت این شیر کنترل را تا ۳۵ درصد کاهش دهند. در پژوهش دیگری با کاربرد نرم‌افزار فلونت، عبور جریان از داخل یک شیر تنظیم فشار مورد بررسی قرار گرفت (Saha et al., 2014). ساها و همکاران با تغییر فشار ورودی، تغییر موقعیت قرقره داخل شیر را با روش مدل نبرو محاسبه کردند. در این مدل‌سازی موقعیت نهایی قرقره توسط نرم‌افزار فلونت پیش‌بینی شد. این روش برای پیش‌بینی موقعیت نهایی مغزی شیر خودکار کنترل دبی قابل استفاده است.

شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت هم‌چنین در بهبود و بهینه‌سازی هندسه MCOP مفید واقع شده است. ژانگ و وانگ در پژوهش خود در ساخت شیر خودکار کنترل دبی، با بهره‌گیری از یک شبیه‌سازی عددی دو بعدی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت، شکل شناور موجود در شیر کنترل را بهینه کردند. آن‌ها برای کاهش زمان محاسبات بخشی از هندسه شامل فنر و براکت‌های نگهدارنده‌ی محور هادی را نادیده گرفتند. ژانگ و وانگ ضمن اجرای نرم‌افزار در ۸ فشار تفاضلی مختلف منحنی‌های توزیع فشار و سرعت را در ابتدا و انتهای دامنه فشار کارکرد ارائه کردند. آن‌ها هم‌چنین استقلال از شبکه و استقلال از گام زمانی را بررسی کرده و توزیع فشار بر روی قطعه شناور را در فشارهای تفاضلی متفاوت مقایسه کردند (kai Zhang & Wang, 2015).

جدول ۱ به اختصار پژوهش‌های انجام شده در زمینه شیر خودکار کنترل دبی و محدوده هد عملیاتی و دبی طرح آن‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود پژوهش‌های پیشین در محدوده‌های بالاتری از فشار تفاضلی و یا دبی انجام گرفته‌اند. این در حالی است پژوهش حاضر معطوف به دبی و فشار عملیاتی پایین‌تری است به نحوی که با ظرفیت تحویل آب به مزارع سازگار باشد.

جدول ۱ پژوهش‌های انجام شده در زمینه ساخت MCOP و توسعه محدوده عملیاتی آن

پژوهش‌گران	محدوده عملیاتی فشار (متر)	دبی طرح (لیتر بر ثانیه)
ژانگ و وانگ (۲۰۱۵)	۷ - ۰/۶	۰/۴

رضازاده و همکاران (۲۰۱۹)	۲۰ - ۲/۶	۰/۶
مهری و بی‌جن‌خان (۲۰۲۰)	۱۰ - ۱	۵
	۱۵ - ۳	۱۰

در این پژوهش نوع جدیدی از این شیرها برای کاربرد در شبکه‌های آبیاری سطحی طراحی و بومی‌سازی شده است. این سازه جدید برای تضمین توزیع عادلانه آب بین مزارع و اطمینان از تحویل دائمی دبی مورد نظر در شرایط نوسان سطح آب یا فشار بالادست و پایین دست به کار برده می‌شود. این سازه برخلاف سازه‌های موجود در شبکه‌های آبیاری که نیازمند حضور مکرر تکنسین‌ها است، به صورت خودکار عمل می‌کند. کاربرد MCOP در آبیگر مزارع به توزیع عادلانه آب بین کشاورزان، ایجاد تناسب بین میزان آبیگری و مقدار آب در دسترس فصلی، غلبه بر نوسانات کانال تغذیه و کانال آبیگر، عدم نیاز به دخالت اپراتور، دشواری دست کاری توسط ذی‌نفعان، استقلال عملکرد آبیگر از تغییرات ارتفاع آب در بالادست و پایین دست منجر می‌شود.

اما از آنجاکه مدل‌سازی‌های عددی به‌یغی پویا (دینامیک) که در آن تمام یا بخشی از هندسه متحرک است، از پیچیدگی بسیاری برخوردار است، علاوه بر زمان طولانی اجرا، در مواردی تقارب و اخذ جواب را با دشواری مواجه می‌کند. از این رو انجام ساده‌سازی‌ها در هندسه امری رایج است که نیازمند بررسی است. یکی از این ساده‌سازی‌ها در MCOP مربوط به هندسه شیر و حذف سپری‌های ابتدا و انتهای آن و نیز حذف محور نگهدارنده‌ای است که شناور بر روی آن می‌لغزد. این امر منجر به کاهش هزینه زمانی محاسبات و کاهش پیچیدگی شبکه‌بندی می‌شود. در پژوهش حاضر خطای سیستماتیک مدل عددی انسیس فلونت در اثر حذف محور هادی قطعه‌ی متحرک مغزی مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و ارزیابی شد. نتایج به دست آمده می‌تواند برای گسترش کاربرد و کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی طرح‌های نهایی به کار روند. این نتایج نشان داد که حذف محور هادی از هندسه اگرچه باعث ایجاد خطای بیش‌برآورد دبی توسط مدل شده است، اما به جهت ایجاد سهولت بسیار در شبکه‌بندی، زمان محاسبات و هم‌گرایی مدل را به طرز چشم‌گیری کاهش داده است.

## روش‌شناسی پژوهش

### انتخاب ابعاد سازه

از آنجا که موضوع این پژوهش کاربرد شیر خودکار کنترل دبی در کانال‌های درجه سوم و چهارم شبکه‌های آبیاری است، اندازه این شیر به نحوی انتخاب شده که مناسب استفاده و نصب در آبیگر مزارع باشد. در این پژوهش یک شیر خودکار کنترل دبی با قطر ۷۶ میلی‌متر (۳ اینچ) طراحی شد که ظرفیت عبور جریان ۳ لیتر بر ثانیه را دارد. این شیر به تنهایی یا ترکیب با چند شیر دیگر می‌تواند هیدرومدول متداول

مزارع را تامین کند. قطعه‌بندی متداول مزارع کشور ایران ۱۰ هکتاری است و هیدرومدول متداول برای هر مزرعه ۱ لیتر در ثانیه در هکتار است. بنابراین جریان تخصیص یافته به یک مزرعه ۱۰ هکتاری معادل با ۱۰ لیتر بر ثانیه است. برای نمونه هیدرومدول در فصل حداکثر (تیر ماه) برای منطقه تاکستان در شبکه آبیاری دشت قزوین معادل ۰/۹۵ لیتر در ثانیه در هکتار است (ایبانه ۲۰۱۹, et al.).

از آنجا که قطعات زراعی کوچک‌تر از ۱۰ هکتار هم در مزارع ایران وجود دارند، طراحی این شیر به نحوی انجام شده است که جریان تحویلی آن در دامنه ۳ لیتر تا ۱۰ لیتر متغیر باشد. مزیت این شیر خودکار امکان استفاده در شبکه‌های کم‌فشار و هددهای پایین است. دامنه مدولار شیر خودکار کنترل دبی ۳۴ تا ۱۶۲ میلی‌بار (۳۵ تا ۱۶۵ سانتی‌متر ستون آب) است.

## مدل‌سازی عددی

دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۳</sup> امروزه به ابزاری توانمند برای کمک به طراحان تجهیزات و سازه‌های پیچیده تبدیل شده است. با بهره‌گیری از این ابزار، شکل سازه‌های هیدرولیکی بهینه می‌شوند و هزینه مدل‌سازی فیزیکی کاهش می‌یابد. نرم‌افزار فلوئنت شرکت انسیس یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی است که با حل کردن معادلات ناویر-استوکس با روش حجم محدود، توانمندی مدل کردن شرایط بسیار پیچیده را دارد. این نرم‌افزار با استفاده از شبکه‌های غیرساختار امکان تحلیل جریان را در هندسه‌های بغرنج فراهم می‌کند. نوع شبکه قابل تولید یا فراخوانی در فلوئنت برای هندسه‌های دوبعدی مثلثی و مربعی، و برای هندسه‌های سه‌بعدی، هرمی، چهاروجهی، شش وجهی و گوه‌ای است. همچنین این نرم‌افزار می‌تواند جریان‌های آشفته را با ۹ مدل آشفتگی بررسی کند. انسیس فلوئنت همانند سایر مدل‌های CFD دارای سه جزء اصلی پیش‌پردازشگر، پردازشگر و پس‌پردازشگر است. در شبیه‌سازی عددی انجام گرفته از داده‌های اختصاصی برداشت شده در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران استفاده شده است.

## رژیم جریان

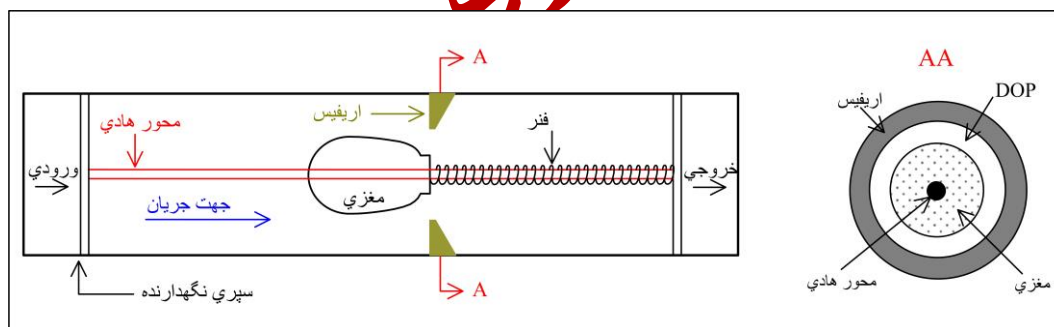
شیر خودکار کنترل دبی در داخل یک لوله با قطر ۷۶ میلی‌متر و به طول ۶۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. جریان برقرار شده داخل این شیر به نحوی است که رژیم جریان در حالت آشفته قرار دارد. در جریان‌های آشفته هر جزء جریان ممکن است موقعیت مکانی خود را بطور اتفاقی در هر جهت تغییر دهد و تعیین موقعیت قطعی آن به صورت دقیق ممکن نیست. از همین روست که آشفتگی را ذاتا وابسته به زمان می‌دانند. در چنین شرایطی، آشفتگی یک پدیده تصادفی و به صورت آماری بررسی می‌شود. فلسفه روش‌های RANS یا میانگین‌گیری

<sup>۳</sup>Computational fluid dynamics (CFD)

رینولدز ناویر-استوکس<sup>۴</sup> بر همین مفهوم استوار است. در این روش خصوصیات میدان جریان به دو بخش مقدار متوسط و مقدار ناشی از نوسانات جریان تفکیک می‌شود که اولین بار توسط رینولدز برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر پیشنهاد داده شد (اسکوهی et al., 2019). روش‌های RANS شامل مدل‌های جبری، مدل‌های یک معادله‌ای، مدل‌های دو معادله‌ای و مدل‌های چند معادله‌ای است که متداول‌ترین آن خانواده  $k-\varepsilon$  است. هرچه تعداد معادلات بیشتر شود، دقت محاسبات افزایش می‌یابد اما هزینه زمانی انجام محاسبات بیشتر می‌شود. بنابراین انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای شبیه‌سازی بهینه از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  که برای اعداد رینولدز بالا استفاده می‌شود از دو معادله انتقال برای حل انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۵</sup> ( $k$ ) و نرخ اتلاف<sup>۶</sup> ( $\varepsilon$ ) آن استفاده می‌کند.

### شیر خودکار تنظیم دبی

در این پژوهش شیر خودکار کنترل دبی محوری توسط نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده است. این شیر شامل یک مغزی متحرک است که در راستای محور لوله و بر روی یک میله هادی می‌لغزد. میله هادی در ابتدا و انتهای لوله توسط دو براکت ثابت شده است. در پاشنه این مغزی یک فنر قرار داد که حرکت آزادانه مغزی به سمت پایین دست را در اثر نیروی فشاری جریان مهار می‌کند. ثابت سختی این فنر  $534/87$  و طول آن  $82$  میلی‌متر است. این مغزی در داخل یک روزنه با قطر دهانه‌ی  $53/3$  میلی‌متر قرار گرفته است. شکل ۱ شماتیک این شیر کنترل را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک شیر خودکار کنترل دبی

افت فشار ناشی از عبور جریان آب از سطح بین مغزی و روزنه (DOP) مغزی متحرک را به طرف پایین دست می‌راند. حرکت مغزی بلافاصله فنر را فشرده می‌کند و پس از آنکه نیروی فشار سیال وارد بر مغزی و نیروی فنر به تعادل می‌رسند، مغزی در جای خود ثابت

<sup>۴</sup>Reynolds Averaged Navier-Stokes

<sup>۵</sup>Turbulent kinetic energy ( $k$ )

<sup>۶</sup>Rate of dissipation of turbulent kinetic ( $\varepsilon$ )

<sup>۷</sup>the Disc between the Orifice and the Plug

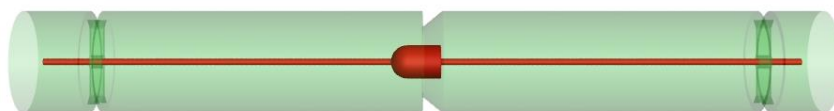
می‌شود. این سازوکار در محدوده اختلاف فشار ۳۴ تا ۱۶۲ میلی‌بار، دبی جریان را نزدیک به دبی اسمی شیر قرار می‌دهد. مدل‌سازی عددی شیر خودکار کنترل دبی در یازده اختلاف فشار مختلف در محدوده مجاز اختلاف فشار انجام شد. مدل‌سازی در دو حالت انجام شد و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. در حالت اول کل هندسه محدوده مورد مطالعه شبیه‌سازی شد و در حالت دوم برای کاهش هزینه زمانی و محاسباتی مدل عددی، محور هادی نگهدارنده مغزی از هندسه حذف شد. اهمیت این پژوهش از آن روی است که حذف این محور و به‌طور کلی ساده‌سازی هندسه نه‌تنها برای کاهش زمان اجرا امری ضروری بود بلکه ساده‌سازی هندسه دست‌یابی به نتایج را میسر ساخت. به‌عبارت دیگر اجرای هندسه‌های بغرنج در مدل‌سازی‌های عددی پویا در بسیاری از موارد تقارب نتایج و رسیدن به جواب را دشوار می‌کند.

### آماده‌سازی مدل

انسیس فلونت دارای سه بخش است. بخش نخست پیش‌پردازنده است که همان ابزارهای سازنده هندسه و شبکه هستند. در پژوهش حاضر بخش پیش‌پردازنده در پلتفرم ورک‌بنچ آماده‌سازی شده است. ساخت هندسه مدل شیر توسط نرم‌افزار Design Modeler انجام شده است. شبکه‌بندی میدان شبیه‌سازی جریان نیز توسط ابزار Meshing ورک‌بنچ انجام گرفته است.

### روزنه سیلندری

روزنه سیلندری شامل یک سیلندر با قطر ۲۵ میلی‌متر است که توسط یک میله هادی داخل دهانه‌ی یک روزنه با قطر ۵۳/۳ میلی‌متر ثابت شده است. میله هادی در داخل دو براکت در دو انتهای یک لوله با قطر ۷۶/۲ و طول ۶۰۰ میلی‌متر قرار گرفت به‌نحوی که لوله، روزنه، سیلندر و میله هادی همگی هم‌مرکز باشند. در اثر اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله، جریان آب در این سامانه برقرار شد به‌نحوی که جریان آب از فضای بین روزنه و سیلندر عبور کند. دبی جریان توسط یک فلومتر مغناطیسی در ورودی سامانه روزنه سیلندری سنجیده شد. فشار استاتیک در دو طرف روزنه سیلندری و در ابتدا و انتهای لوله توسط چهار پیزومتر اندازه‌گیری شد. هندسه ساخته شده در محیط دیزاین مدلر انسیس در شکل ۲ نشان داده شده است.





## شرایط مرزی

یکی از ضروریات حل عددی یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه برای مدل عددی است. در شبیه‌سازی‌های عددی جریان سیال باید فیزیک جریان و ویژگی‌های سیال در مرزهای دامنه محاسباتی تعریف شوند. بنابراین هدف از تعیین شرایط مرزی در یک شبیه‌سازی عددی، ایجاد قید برای حل معادله دیفرانسیل در یک چارچوب مشخص است. برای یک مساله سیالاتی اشکال متفاوتی از شرایط مرزی وجود دارد که تابعی از نوع رژیم جریان و داده‌های موجود در مرزهای ورودی و خروجی هستند. اگر شرایط مرزی به درستی انتخاب نشوند، علاوه بر کاهش دقت محاسباتی، هم‌گرایی مساله با کندی مواجه خواهد شد.

## شرایط مرزی در پژوهش حاضر

به‌طور کلی در نرم‌افزار انسیس فلونت دو نوع شرایط مرزی وجود دارد:

- شرایط مرزی بیرونی که شامل وجوه خارجی دامنه محاسبات است.
- شرایط مرزی درونی که در داخل دامنه محاسبات قرار دارد.

در شبیه‌سازی پیش‌رو از شرایط مرزی بیرونی فشار - فشار استفاده شد. این شروط شامل شرط مرزی ورودی فشار و شرط مرزی خروجی فشار و شرط مرزی دیواره هستند. فشار در مرز ورودی و فشار در مرز خروجی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود در مدل اعمال شد. به‌علاوه شرط مرزی دیواره عدم لغزش و ارتفاع زبری  $7-15e$  متر برای مدل تعیین شد. هم‌چنین در ورودی‌های مدل جنس روزنه آلومینیوم، جنس سیلندر و لوله پلی‌اتیلن، نوع سیال آب و جنس محور هادی استیل تعریف شد.

## اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل توسط سیلندر با قطر ۲۵ میلی‌متر انجام شد. در این اعتبارسنجی شرایط مرزی ورودی و خروجی از جنس فشار و نیز شرط مرزی دیواره با ارتفاع زبری اعمال شد. اعتبارسنجی توسط پارامتر دبی جریان انجام گرفت. نتایج نشان داد که نرم‌افزار انسیس فلونت قابلیت و دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان روزنه سیلندری دارد. جدول ۲ نتیجه خطای مدل در اختلاف فشار  $34/5$  میلی‌بار را گزارش می‌کند:

جدول ۲ ارزیابی درصد خطای انسیس در محاسبه دبی جریان روزنه سیلندری

شرایط مرزی			دبی آزمایشگاهی $Q_E$ (لیتر بر ثانیه)	دبی محاسباتی $Q_C$ (لیتر بر ثانیه)	درصد خطا RE%
ورودی	خروجی	دیواره			
فشار (میلی بار)	فشار (میلی بار)	ارتفاع زبری (m)			
۱۸۹/۱۷	۱۵۴/۶۵	۰/۰۰۰۰۰۱۵	۴/۱۴	۴/۴	۶/۲۸

چنانچه در جدول ۲ مشاهده می شود خطای نسبی معادل ۶/۲۸ درصد است. هم چنین خطای محاسبه دبی توسط مدل عددی انسیس فلونت بر اساس شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده طبق رابطه ۱ محاسبه می شود:

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Q}_E} \times 100 = \frac{\sqrt{\frac{\sum (Q_D - Q_E)^2}{N}}}{\bar{Q}_E} \times 100 = 5.99\% \quad (\text{رابطه ۱})$$

چنانچه مشاهده می شود بر اساس شاخص های آماری نرم افزار انسیس فلونت قادر است با خطای قابل قبول دبی عبوری از روزنه سیلندری را محاسبه کند.

### بررسی کیفیت شبکه

برای بررسی کیفیت شبکه ساخته شده، روش های مختلف ساخت شبکه در یک هندسه یکسان اعمال شد. کیفیت شبکه بندی توسط سه پارامتر پیشنهادی کاربران انسیس مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای ارزیابی کیفیت شبکه در جدول ۳ ارائه شده است. انتخاب شبکه بهینه که منجر به بهترین حل میدان سرعت و جریان شود، مستلزم بررسی پارامترهای ذکر شده در جدول ۳ است. در این پژوهش سه پارامتر چولگی، تعامد و نسبت منظری توسط سه روش اتوماتیک، چهار وجهی و مکعبی ارزیابی شدند. جدول ۳ نشان می دهد که شبکه بندی چهاروجهی به دلیل نزدیک بودن پارامترهای کنترل کیفیت به مقدار ایده آل بر سایر روش ها ارجحیت دارد.

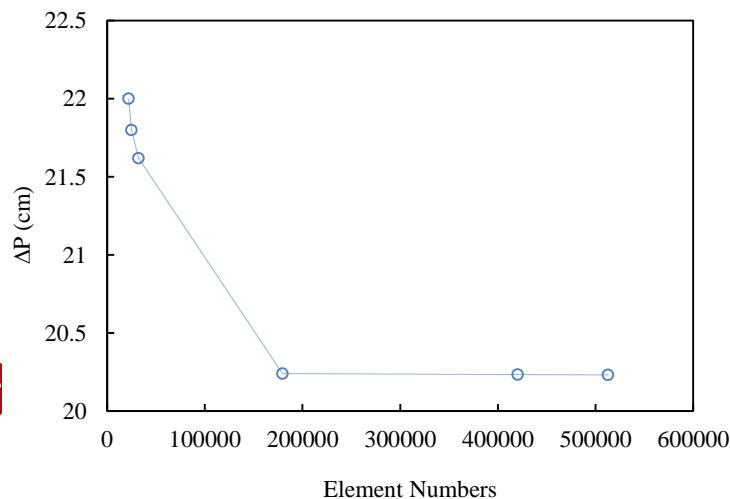
جدول ۳ بررسی کیفیت شبکه در روش های مختلف شبکه بندی در نرم افزار انسیس فلونت

روش شبکه بندی					
پارامتر کیفیت چولگی	محدوده مجاز	مقدار ایده آل	خودکار	چهاروجهی	Hex Dominant
	۰ - ۱	۰	۰/۹۹	۰/۷۵	۰/۹۷

تعامد	۰/۱۵ - ۱	۱	-	۰/۸۶	-
نسبت منظری	۱ - ۵۰	۱	-	۱/۷	-

### استقلال از شبکه

جواب قابل قبول به دست آمده از مدل عددی نیازمند به کارگیری یک شبکه بندی بهینه است. شبکه بهینه شبکه‌ای است که با در نظر گرفتن هزینه محاسباتی با ریزتر شدن ابعاد، نتایج مطلوب‌تری ارائه نکند و تاثیر معناداری بر روی پارامتر کنترل نداشته باشد. پارامتر کنترل پارامتری است که برای بررسی استقلال از شبکه توسط طراح انتخاب می‌شود. بنابراین در پژوهش حاضر استقلال از شبکه برای شش شبکه بندی مختلف انجام شد و میزان تاثیر اندازه سلول‌های شبکه بر پارامتر کنترل بررسی شد. در این مدل سازی، پارامتر فشار تفاضلی روزنه سیلندری (ارتفاع معادل اختلاف فشار پیزومتری در دو طرف روزنه سیلندری) به عنوان پارامتر کنترل برای مقایسه در نظر گرفته شد. اندازه سلول‌های شبکه از ۸ میلی‌متر تا ۰/۵ میلی‌متر یا به عبارت دیگر تعداد سلول‌های شبکه از ۲۱ هزار تا ۵۱۲ هزار عدد متغیر بود. بررسی استقلال از شبکه برای یک سیلندر ۲۵ میلی‌متری و در دبی مشخصی انجام گرفت.



شکل ۳ نمودار بررسی استقلال از شبکه در شبیه سازی روزنه سیلندری

چنانچه در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود سه اجرای آخر تفاوت محسوس و معناداری نداشته و با توجه به ملاحظات هزینه محاسباتی اجرا، سلول با اندازه ۲ میلی‌متر (شبکه دارای ۱۷۹۴۷۷ سلول) به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

## تنظیمات حل گر

بخش میانی و مهم در یک مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی بخش پردازنده است. پس از ساخت هندسه و تعیین شبکه بهینه لازم است تا ورودی های مدل، شرایط مرزی، ویژگی های سیال، جنس دیواره و بخش های صلب، مدل آشفتگی، روش گسسته سازی در حل گر، مقداردهی اولیه، گام زمانی و نیز تعداد تکرارهای داخلی تعریف شوند. فلونت با استفاده از الگوریتم های تکراری، حل معادلات را تا زمان همگرا شدن نتایج، ادامه می دهد. حل گرهای فلونت به دو دسته تراکم-پایه<sup>۱</sup> و فشار-پایه<sup>۲</sup> تقسیم می شوند. حل گرهای فشار-پایه برای جریان های تراکم ناپذیر با سرعت پایین استفاده می شوند در حالی که حل گرهای تراکم-پایه برای جریان های تراکم پذیر با سرعت بالا مورد استفاده قرار می گیرند. در شبیه سازی حاضر از حل گر فشار-پایه و الگوریتم کولینگ فشار-سرعت با روش SIMPLE بهره گرفته شد. در این الگوریتم، یک دستگاه معادلات کوپل مومنتوم و پیوستگی را بر پایه فشار حل می کند. نرم افزار انسیس برای حل عددی میدان سرعت و فشار در شیر خودکار کنترل دبی، از معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر استفاده می کند و این حل را تا زمان همگرا شدن نتایج ادامه خواهد داد. این معادلات کلیدی شامل معادلات زیر هستند:

۱- معادله پایستگی جرم (Ganesan & Poirier, 1990) که تضمین می کند جرم ورودی به حجم کنترل برابر با جرم خروجی از

آن است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن  $\rho$  نشان دهنده چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ )،  $t$  نشان دهنده زمان (s) و  $\mathbf{V}$  نمایانگر بردار سرعت (m/s) است.

۲- معادله پایستگی مومنتوم (Ganesan & Poirier, 1990) که تعادل نیروهای وارد بر ذرات سیال را بیان کرده و شکل تراکم ناپذیر

آن به صورت زیر است:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{F} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن  $P$  نشان دهنده فشار (Pa)،  $\mu$  نمایانگر لزجت دینامیکی سیال (Pa.s) و  $\mathbf{F}$  نیز بیانگر نیروی خارجی (N) است. نرم افزار فلونت

<sup>۱</sup>Density-Based

<sup>۲</sup>Pressure-Based

<sup>۳</sup>Conservation of mass

<sup>۴</sup>Conservation of momentum

برای حل میدان جریان علاوه بر معادلات ناویر-استوکس که در بالا بیان شد، برای توصیف آشفتگی لزجت و اتلاف انرژی از مدل‌های آشفتگی برای افزودن ترم‌های اضافی به معادلات یاد شده بهره می‌گیرد (Launder & Spalding, 1983). در پژوهش حاضر از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد به دلیل پایداری آن در شرایط اختلاف فشار بالا (kai Zhang & Wang, 2015) استفاده شده است. در این بخش برای اطمینان از صحت نتایج نرم‌افزار، هم‌چنین مدل‌های آشفتگی اسپالارت-آلماراس و  $k-\omega$  نیز مورد بررسی قرار گرفتند که برای ایجاد اختصار در بیان نتایج به جزییات این بررسی پرداخته نمی‌شود. در نهایت نتایج نشان داد که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی ایجاد می‌کند. شدت تلاطم در مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  توسط پارامتر  $I$  در رابطه ۴ و به صورت درصد محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16 (\text{Re}_{D_H})^{-1/8} \quad \text{رابطه ۴}$$

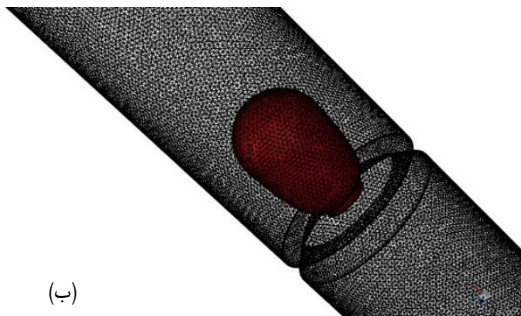
$$D_H = \frac{4A}{P_w} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن  $D_H$  قطر هیدرولیکی (m)،  $A$  مساحت عبور جریان ( $\text{m}^2$ ) و  $P_w$  پیرامون مرطوب (m) است. بر اساس پارامتر  $I$  به شدت تلاطم کمتر از ۱ درصد، تلاطم پایین، و به شدت تلاطم بیش‌تر از ۱۰ درصد تلاطم بالا گفته می‌شود. شدت تلاطم در این روزنه سیلندری معادل ۵ درصد است. در پژوهش حاضر طبق داده‌های آزمایشگاهی موجود جنس روزنه آلومینیوم، جنس لوله پلی‌اتیلن، نوع سیال آب، شرط مرزی دیواره با ارتفاع زبری  $7-15\text{e}$  متر، شرط مرزی ورودی فشار و شرط مرزی خروجی فشار در مدل اعمال شد.

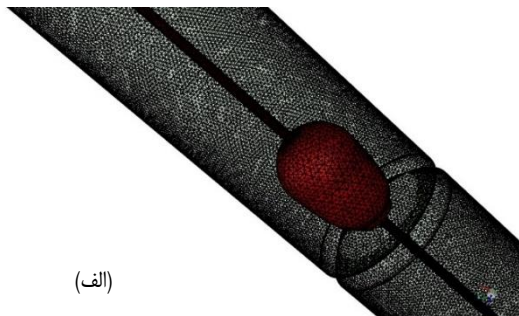
### مدل‌سازی پویای شیر کنترل

هدف اصلی انجام این پژوهش مدل‌سازی عددی شیر خودکار کنترل دبی و ایجاد فرضیات ساده‌ساز در این مدل‌سازی است. این مدل‌سازی در راستای توسعه این شیر و بهینه‌سازی اجزا و ویژگی‌های شیر انجام گرفته است. در این راستا میزان خطای ناشی از فرضیات ساده‌ساز ارزیابی شده است. بنابراین پس از اعتبارسنجی مدل توسط شبیه‌سازی روزنه سیلندری، شبیه‌سازی متحرک شیر خودکار کنترل دبی در دو حالت وجود و عدم وجود محور هادی، که نقش کلیدی در طولانی کردن زمان اجرا و عدم همگرایی داشته، برای ارزیابی این خطا انجام شد. برای ساخت هندسه و اندازه شبکه همانند روزنه سیلندری عمل شد.

شکل ۴ شبکه شبیه‌سازی شده در دو حالت ذکر شده توسط مدل را نشان می‌دهد:



(ب)



(الف)

شکل ۴ هندسه و شبکه شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار انسیس فلونت در حالت (الف) با محور هادی و (ب) بدون محور هادی

### شبکه پویا

شبکه پویا<sup>۲</sup> یکی از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار انسیس است که به‌طور کلی برای شبیه‌سازی حرکت رفت و برگشتی یا دورانی یک قطعه صلب در دامنه سیال استفاده می‌شود. این قابلیت به کاربر اجازه می‌دهد تا مدل‌هایی با مرزهای متحرک، مانند شیر مورد نظر، را شبیه‌سازی کند. از این ویژگی می‌توان برای مدل‌سازی جریان‌هایی استفاده کرد که در آن شکل دامنه با گذشت زمان تغییر می‌کند. شبکه پویا در ترکیب با حل‌گرهای شش درجه آزادی اجازه می‌دهد تا موقعیت نهایی یک جسم متحرک توسط نیروهای هیدرودینامیکی میدان جریان تعیین شود. در شبیه‌سازی جاری با توجه به اینکه حرکت مغزی داخل شیر فقط در یک جهت (در راستای مسیر جریان) امکان‌پذیر بود، مسئله در حالت درجه آزادی یک<sup>۳</sup> حل شد. در این بخش مجموعاً پنج فشار تفاضلی در محدوده ۳۴ تا ۱۶۲ میلی‌بار و هر فشار تفاضلی برای هر دو حالت «با محور هادی» و «بدون محور هادی» شبیه‌سازی شد.

### روش شبکه‌بندی پویا

نرم‌افزار فلونت برای به‌روز رسانی شبکه از سه روش Smoothing, Layering و Remeshing بهره می‌گیرد. در این پژوهش از روش Smoothing استفاده شد که در نواحی‌ای که مش به‌علت تغییر هندسه کج شده است، موقعیت گره‌ها را باز تنظیم می‌کند. این روش در ترکیب با Remeshing مورد استفاده قرار گرفت که هنگامی که در اثر حرکت یا تغییر شکل یک قطعه، مش از حالت طبیعی خارج شده و یا خیلی بزرگ می‌شود، سلول‌های قدیمی پاک شده و سلول‌های جدید ساخته می‌شوند.

<sup>۲</sup>Dynamic Mesh

<sup>۳</sup>One DOF (One degree of freedom)

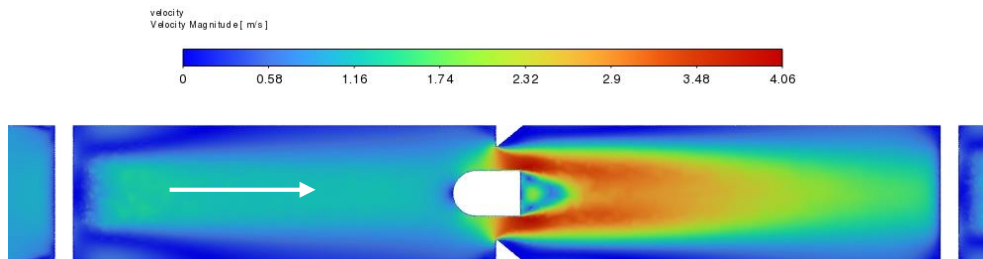
## شبیه‌سازی فنر

در شیر خودکار برای مهار حرکت آزادانه مغزی یک فنر در پاشنه آن تعبیه شد. برآیند نیروهای وارد بر مغزی تابعی از کشسانی فنر است و فشردگی فنر در اثر اختلاف فشار تا جایی ادامه دارد که نیروهای وارد بر آن به تعادل برسند. اینجا بجای شبیه‌سازی فیزیک فنر با طول ۸۲ میلی‌متر و سختی ۵۳۴/۸۷ نیوتن بر متر، برای کاهش هزینه زمانی محاسبات، تاثیر آن در پاشنه مغزی بصورت نیروی کشسانی اعمال شد که روشی متداول برای مدل‌سازی فنر است.

## یافته‌های پژوهشی

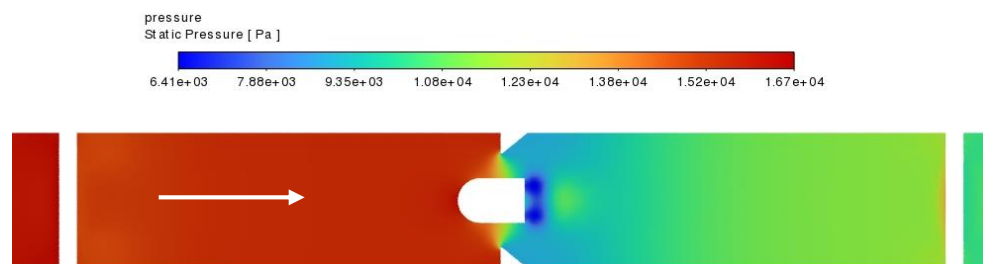
## تحلیل شبیه‌سازی عددی

پس از حل میدان جریان و فشار توسط مدل عددی آنسیس فلوئنت، توزیع فشار و توزیع سرعت در روزنه سیلندری مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۵ توزیع سرعت در اطراف روزنه سیلندری ۲۵ میلی‌متری را تحت فشار تفاضلی ۵۸/۳ میلی‌بار نشان می‌دهد.



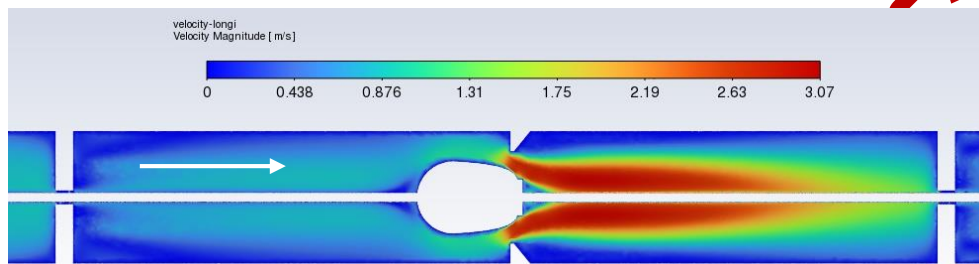
شکل ۵ توزیع سرعت در اطراف روزنه سیلندری ۲۵ میلی‌متری شبیه‌سازی شده توسط آنسیس فلوئنت

در شکل ۶ نیز توزیع فشار در اطراف همین روزنه سیلندری به نمایش درآمده است. چنانچه در این شکل به وضوح دیده می‌شود، یک اختلاف فشار قابل توجه در دو طرف سیلندر ایجاد شده است.



شکل ۶ توزیع فشار در اطراف روزنه سیلندری ۲۵ میلی‌متری شبیه‌سازی شده توسط آنسیس فلونت

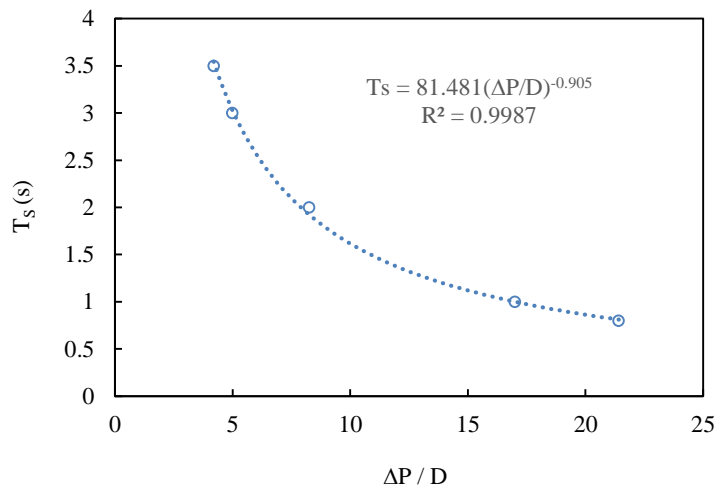
همین اختلاف فشار در شیر خودکار کنترل دبی سبب می‌شود که مغزی بر روی محور به سمت پایین دست به حرکت درآمده و با عبور از دهانه‌ی روزنه، با ایجاد گرفتگی در روزنه، جریان را به میزان دلخواه از پیش تعیین شده تثبیت کند. این سازوکار خودکار به صورت هیدرومکانیکال صورت می‌گیرد. شکل ۷ توزیع سرعت در شیر تنظیم جریان شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار فلونت تحت فشار تفاضلی ۳۴ میلی‌بار را به صورت نمونه نشان می‌دهد:



شکل ۷ توزیع سرعت در شیر تنظیم جریان محوری شبیه‌سازی شده توسط آنسیس فلونت

در شیر خودکار کنترل دبی، حرکت آزادانه‌ی مغزی توسط یک فنر مهار می‌شود که به پاشنه‌ی مغزی متصل است. فشردگی این فنر تا جایی ادامه می‌یابد که نیروهای وارد بر آن به تعادل برسند و مغزی در جای خود ثابت شود. این همان نقطه تثبیت موقعیت مغزی و دبی است. در این شبیه‌سازی مدت زمان واقعی تثبیت موقعیت مغزی از ۳/۵ ثانیه در فشار تفاضلی ۳۴ میلی‌بار تا ۰/۸ ثانیه در فشار تفاضلی ۱۶۲ میلی‌بار متغیر است. شکل ۸ نمودار مدت زمان تثبیت مغزی در برابر ارتفاع معادل اختلاف فشار بدون بُعد را نمایش می‌دهد. در این شبیه‌سازی مدت زمان واقعی تثبیت موقعیت مغزی از ۳/۵ ثانیه در فشار تفاضلی ۳۴ میلی‌بار تا ۰/۸ ثانیه در فشار تفاضلی ۱۶۲ میلی‌بار متغیر است. در این نمودار  $\Delta P$  نشان‌دهنده‌ی اختلاف ارتفاع معادل فشار بر حسب سانتی‌متر،  $D$  نمایانگر قطر لوله بر حسب سانتی‌متر و  $T_s$  نشان‌دهنده‌ی زمان بر حسب ثانیه است.





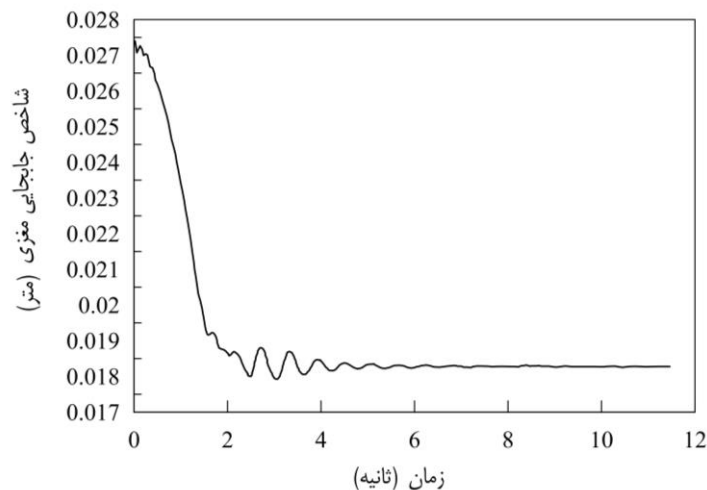
شکل ۸ مدت زمان واقعی تثبیت موقعیت مغزی در اختلاف فشارهای مختلف

شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف فشار، مدت زمان تثبیت موقعیت مغزی کاهش می‌یابد و این بدان معناست که در فشارهای بالاتر نیروی لازم برای پیش‌رانش مغزی و حداکثر جابجایی این قطعه متحرک و تثبیت موقعیت نهایی آن، سریع‌تر تأمین می‌شود. این نیرو که ناشی از فشار تفاضلی است با رابطه ۶ محاسبه می‌شود و میزان فشردگی فنر را نیز تعیین می‌کند:

$$F = \Delta P A_0 = KL$$

(رابطه ۶)

که در آن  $F$  نیروی وارد بر مغزی،  $\Delta P$  اختلاف فشار بین بالادست و پایین دست روزنه،  $A_0$  سطح مقطع موثر مغزی در مقابل جریان،  $K$  ضریب سختی فنر و  $L$  میزان جابجایی (فشردگی) فنر است. شکل ۹ عملکرد شیر خودکار کنترل دبی در اختلاف فشار ۴۳ میلی‌بار را نشان می‌دهد. موقعیت مکانی مغزی در هر لحظه توسط شاخص Surface weighted average بر روی محور عمودی نمودار به نمایش درآمده است. بر اساس این شاخص در هر لحظه موقعیت یک نقطه مشخص از مغزی نسبت به مبدا مختصات گزارش می‌شود. بنابراین اختلاف موقعیت ابتدایی و نهایی مغزی در واقع همان جابجایی محوری مغزی است که توسط نمودار قابل محاسبه است. چنانچه مشاهده می‌شود قطعه متحرک مغزی پس از رانده شدن به سمت پایین دست به میزان ۹/۳ میلی‌متر، در موقعیت نهایی خود ثابت شده است. تثبیت موقعیت نهایی مغزی نشان‌دهنده تثبیت جریان بر روی دبی طرح است.



شکل ۹ نمودار تغییر موقعیت مغزی نسبت به زمان واقعی آزمایش جریان در ارتفاع معادل اختلاف فشار ۴۳ میلی بار

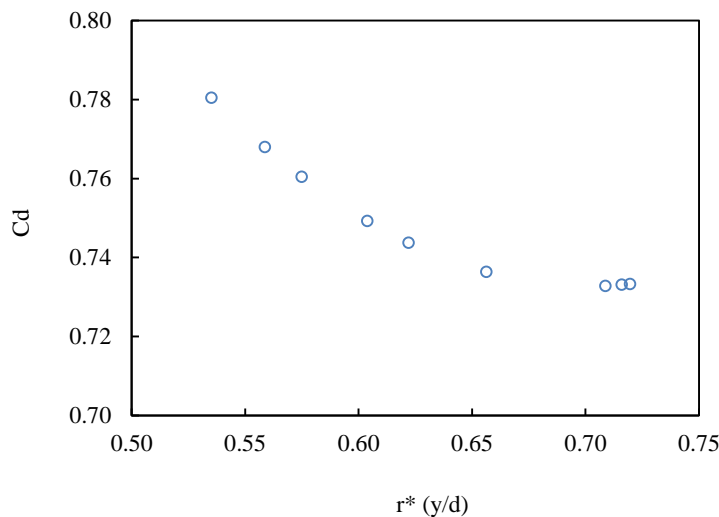
ضریب تخلیه این شیر کنترل توسط رابطه ۷ و به صورت نسبت دبی واقعی به دبی محاسباتی تعریف می شود:

$$C_d = \frac{Q_{\text{actual}}}{Q_{\text{theoretical}}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

که در آن  $Q_{\text{actual}}$  دبی واقعی،  $Q_{\text{theoretical}}$  دبی محاسباتی و  $C_d$  ضریب تخلیه شیر است. این ضریب تخلیه طبق رابطه پیشنهادی اصلاح

شده ژانگ و وانگ (kai Zhang & Wang, 2015) برای اختلاف فشار ۳۷/۲ میلی بار تا ۱۵/۷ میلی بار محاسبه شده و در برابر پارامتر بدون

بعد  $r^* = [y/d]$  رسم شده است که در آن  $y$  نشان دهنده قطر مغزی قرار گرفته در دهانه روزنه و  $d$  نمایانگر قطر روزنه است.



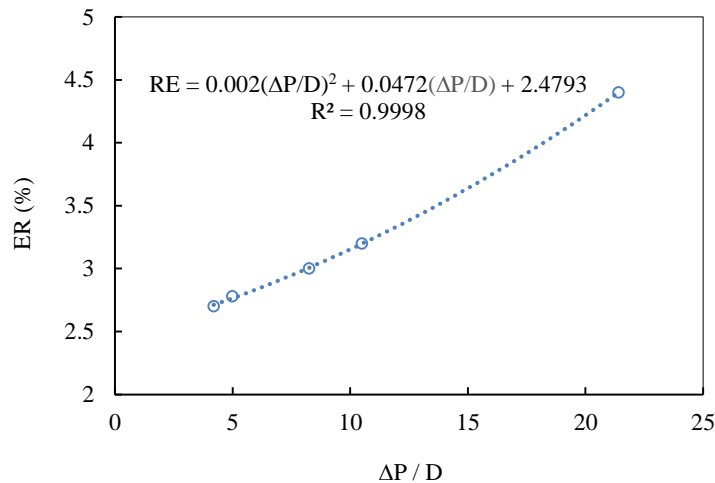
شکل ۱۰ نمودار تغییر ضریب جریان شیر خودکار نسبت به درصد انسداد روزنه

چنانچه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش  $r^*$  ضریب تخلیه شیر خودکار کنترل دبی کاهش می‌یابد.

## بحث

پس از ارزیابی عملکرد مدل عددی انسیس فلونت در شبیه‌سازی شیر خودکار کنترل دبی، به منظور امکان ساده‌سازی هندسه و سنجش میزان تاثیر این فرضیات ساده‌ساز در خطای مدل‌سازی، در ابتدا شیر خودکار کنترل دبی با حضور محور هادی و سپس با حذف محور هادی از هندسه، توسط مدل عددی انسیس فلونت شبیه‌سازی شد. این محور قطعه‌ی لغزنده‌ی شیر خودکار کنترل دبی و نیز فنر را هدایت می‌کند و در دو انتهای خود به دو سپری دو انتهای شیر خودکار متصل است. محور هادی در نمونه اولیه ساخته شده MCOP و نیز در نمونه‌های بعدی ساخته شده توسط سایر پژوهش‌گران در ساختمان این شیر وجود دارد. شرایط شبکه‌بندی و تنظیمات حل‌گر در هر دو شیوه یکسان بود. حضور محور هادی در هندسه در اجزای پویا سبب بالا رفتن زمان محاسبات و افزایش بروز خطا در شبیه‌سازی‌های طولانی‌مدت شد. درحالی‌که حذف محور هادی از هندسه سبب سهولت اجرای مدل شد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که مدل عددی انسیس فلونت در حضور محور هادی، با خطای نسبی  $8/06$  درصد جریان داخل یک شیر خودکار کنترل دبی را شبیه‌سازی می‌کند. این در حالی است که حذف محور هادی از هندسه شیر برای بالا بردن سرعت محاسبات و کاهش هزینه زمانی مدل‌سازی منجر به بروز خطای نسبی معادل  $11/51$  درصد شده است که در مجموع دقت قابل قبولی است برای یک شبیه‌سازی پویا است. اما نکته قابل توجه این است که حذف محور هادی از هندسه سبب بروز خطای سیستماتیک که به صورت بیش‌آورد ظاهر شده است. با توجه به اینکه این ساده‌سازی هندسه سبب

افزایش قابل توجه سرعت محاسبات و سهولت اجرای مدل شده است، با رسم معادله این درصد خطا نسبت به اختلاف فشارهای مختلف، یک معادله برای جبران این خطا ارائه می‌شود. شکل ۱۱ نمودار درصد کاهش بیش‌برآورد مدل در اختلاف فشارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ درصد کاهش بیش‌برآورد مدل نسبت به ارتفاع معادل اختلاف فشار بدون بعد

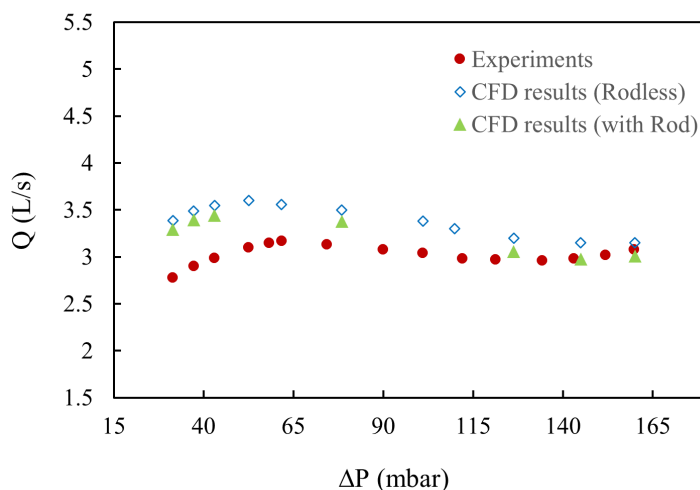
محور افقی نشان‌دهنده‌ی ارتفاع معادل اختلاف فشار ( $\Delta P$ ) است که توسط قطر لوله ( $D$ ) بدون بعد شده است. محور عمودی نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش خطای بیش‌برآورد<sup>۴</sup> دبی است. خطای بیش‌برآورد دبی در اثر حذف محور هادی از هندسه رخ داده است و پارامتر ER در این پژوهش برای نشان دادن میزان کاهش این خطا در پی ساده نکردن هندسه مسأله تعریف شده است. چنانچه در نمودار مشاهده می‌شود، میزان این خطا از ۲/۷ درصد در اختلاف فشارهای پایین تا ۴/۹ درصد در اختلاف فشارهای بالا متغییر است. از آنجا که این کاهش در همه‌ی اختلاف فشارها یکسان نیست، یک معادله چند جمله‌ای برای محاسبه میزان این کاهش برآزش داده شد. رابطه ۸ می‌تواند برای تصحیح خطای سیستماتیک مدل عددی فلوئنت ناشی از ساده‌سازی هندسه شیر خودکار کنترل دبی ۱/۶ میلی‌متری به کار برده شود:

$$ER = 0.002(\Delta P / D)^2 + 0.0472(\Delta P / D) + 2.4793$$

رابطه ۸)

<sup>۴</sup>ER = Error Reduction

که در آن  $D$  قطر لوله (سانتی‌متر) و  $\Delta P$  ارتفاع معادل اختلاف فشار بالادست و پایین دست روزنه (میلی‌بار) است. به منظور ارزیابی عملکرد نرم‌افزار انسیس فلونت در شبیه‌سازی شیر خودکار کنترل دبی، نمودار دبی-اختلاف فشار به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی با نمودار مشابه به دست آمده از داده‌های خروجی نرم‌افزار فلونت در دو حالت یعنی وجود محور هادی و عدم وجود آن مقایسه شد. اختلاف ارتفاع معادل فشار در واقع افت فشار ناشی از عبور جریان از یک مقطع تنگ‌شدگی است. این افت فشار طی یک پژوهش آزمایشگاهی داده‌برداری شده و در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته که در نمودار شکل ۱۲ توسط نقاط قرمز رنگ به نمایش درآمده است. شکل ۱۲ به خوبی نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی روند تغییرات دبی در برابر فشار را به صورت بسیار خوب شبیه‌سازی کرده است که نشان از توانایی بالای مدل عددی است. اما مدل عددی در همه اختلاف فشارها در شرایط حذف محور مقدار دبی را بیش برآورد کرده است. با تصحیح خروجی‌های مدل عددی توسط رابطه ۸ علاوه بر اینکه خطای مدل‌سازی کاهش یافته است، رفتار مدل در اختلاف فشارهای پایین به خوبی تعدیل شده است. در شکل ۱۳ محور افقی نمایش‌گر ارتفاع معادل اختلاف فشار (میلی‌بار) است.



شکل ۱۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی

حذف محور نگهدارنده‌ی مغزی از هندسه شیر کنترل دبی در شبیه‌سازی دینامیک آن، علاوه بر اینکه سهولت بسیار زیادی در اجرای نرم‌افزار ایجاد می‌کند و سبب همگرایی بهتر و سریع‌تر مدل عددی می‌شود، مدت زمان شبیه‌سازی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

جدول ۴ مقایسه مدت زمان شبیه‌سازی جریان در شیر کنترل دبی توسط نرم‌افزار فلونت در دو حالت مختلف هندسه

اختلاف ارتفاع معادل فشار (میلی بار)						
۱۶۰	۱۴۴/۹۴	۱۲۶/۳	۱۰۱	۷۸/۴	۴۳	۳۱/۴۷
۳۰	۴۷	۵۵	۶۰	۷۲	۹۶	۱۰۸ (ساعت)
۱۰	۱۴	۱۵	۱۸	۲۰	۲۳	۲۸ (ساعت)

جدول ۴ نشان دهنده‌ی زمان همگرا شدن حل عددی نرم‌افزار فلونت در ارتفاع معادل فشارهای تفاضلی مختلف است. چنانچه در جدول نیز مشاهده می‌شود در یک فشار تفاضلی یکسان، زمان شبیه‌سازی جریان با حذف محور هادی کاهش می‌یابد. به‌علاوه در هر دو حالت هندسه، هرچه فشار تفاضلی کم‌تر می‌شود زمان شبیه‌سازی بیش‌تر می‌شود. بنابراین وجود محور هادی در هندسه شبیه‌سازی شده در فشارهای تفاضلی پایین هزینه زمانی بسیار زیادی را به کاربر تحمیل می‌کند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نرم‌افزار انسیس فلونت برای شبیه‌سازی جریان از درون یک شیر خودکار کنترل دبی مورد استفاده قرار گرفت. این مدل‌سازی عددی زمینه‌ساز توسعه این شیر خودکار برای کاربرد در محدوده‌ی وسیع‌تری از اختلاف فشار و دبی می‌شود. اعتبارسنجی ایستای مدل توسط داده‌های موجود آزمایشگاهی انجام شد و نتایج نشان داد که مدل عددی انسیس فلونت در حالت ایستا روزنه سیلندری را با میانگین خطای نسبتی ۶/۲۸ درصد شبیه‌سازی می‌کند. بر پایه این اعتبارسنجی، مدل‌سازی پویای شیر خودکار کنترل دبی انجام شد و درصد خطای برآورد دبی توسط مدل محاسبه شد. نتایج این بخش نیز نشان داد که مدل عددی انسیس فلونت با میانگین خطای نسبی ۸/۰۶ درصد شیر خودکار کنترل دبی را در حالت پویا (متحرک) شبیه‌سازی می‌کند. برای سهولت بیش‌تر اجرای مدل و کاهش زمان انجام محاسبات، هندسه مدل با حذف محور هادی ساده‌سازی شد. خطای برآورد دبی توسط مدل مجدداً در شرایط ساده‌سازی هندسه محاسبه شد که معادل ۱۱/۵۱ درصد بود. مقایسه نتایج این دو شیوه مدل‌سازی نشان داد که حذف محور هادی از هندسه اگرچه موجب بروز خطای بیش‌تر در برآورد دبی می‌شود و جهت خطا را یک‌سویه می‌سازد، اما با در نظر گرفتن سهولت بسیار در اجرای مدل و کاهش چشم‌گیر زمان مدل‌سازی، قابل چشم‌پوشی است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که خطای سیستماتیک مدل عددی انسیس فلونت ناشی از حذف محور هادی از هندسه شیر خودکار کنترل دبی از ۲/۷ درصد در اختلاف فشارهای پایین تا ۴/۹ درصد در اختلاف فشارهای بالا متغیر است. هم‌چنین در این پژوهش یک رابطه برای تخمین این خطا پیشنهاد شده است که با اعمال آن در نتایج نهایی خروجی از مدل، می‌توان خطای بیش‌آورد مدل را جبران کرد. به‌طور کلی مدل عددی انسیس فلونت جریان عبوری از شیر خودکار کنترل دبی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند. سایر منابع خطا می‌تواند مربوط به خطای گسسته‌سازی، خطای رندسازی و نیز تقریب در مدل آشفتگی باشد.

پیشنهاد می‌شود که در شبیه‌سازی‌های آتی، به‌جای اعمال اثر فنر (به‌عنوان کشسانی قطعه مغزی) در پاشنه‌ی مغزی، خود قطعه فنر

شبیه‌سازی شود و خطای احتمالی ناشی از جایگزینی فنر با اثر آن نیز بررسی گردد.

## منابع

زارع ایبانه، حمید؛ حیدری، آرمان و دانشکار آراسته، پیمان (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد مدیریت آب در شبکه آبیاری دشت قزوین. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۲)، ۷۶-۸۸.  
اسکوهی، مانده و اسماعیلی، کاظم (۱۳۹۷). تکامل تاریخی مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم در هیدرولیک. آب و توسعه پایدار، ۵(۲)، ۴۹-۶۰.

## References

- Atashparvar, S., Bijankhan, M., & Mahdavi Mazdeh, A. (2019). Application of constant flow rate control valve in pump discharge regulation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(7), 06019005.
- Bos, M. G. (1976). *Discharge measurement structures*.
- Daccache, A., Lamaddalena, N., & Fratino, U. (2010). On-demand pressurized water distribution system impacts on sprinkler network design and performance. *Irrigation Science*, 28, 331-339.
- Daneshfaraz, R., Abbaszadeh, H., Gorbanvatan, P., & Abdi, M. (2021). Application of sluice gate in different positions and its effect on hydraulic parameters in free-flow conditions. *Journal of Hydraulic Structures*, 7(3), 72-87.
- Güngör, M., Yazar, U., Cantürk, Ü., & Fırat, M. (2019). Increasing performance of water distribution network by using pressure management and database integration. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10(2), 04019003.
- Han, J., Xie, Y., Wang, Y., & Wang, Q. (2021). Dynamic Simulation of a Warship Control Valve Based on a Mechanical-Electric-Fluid Cosimulation Model. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021, 1-14.
- Johansen, F. (1930). Flow through pipe orifices at low Reynolds numbers. *Proceedings of the royal society of London. series A, containing Papers of a Mathematical and Physical character*, 126(801), 231-245.
- Korkmaz, N., & Avci, M. (2012). Evaluation of water delivery and irrigation performances at field level: The case of the menemen left bank irrigation district in Turkey. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(2), 2079-2089.
- Lauder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* (pp. 96-116). Elsevier.
- Liu, M., Zhang, X., & Wang, D. (2021). Experimental study on the flow characteristics of a plate with a mechanically choked orifice. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 17 (1), 97-107.
- Lisowski, E., & Filo, G. (2017). Analysis of a proportional control valve flow coefficient with the usage of a CFD method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 53, 269-278.
- Lisowski, E., & Rajda, J. (2013). CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic valves. *Energy Conversion and Management*, 65, 285-291.
- Jansson, L., & Lövmärk, J. (2013). An investigation of the dynamic characteristics of a tilting disc check valve using CFD analyses.
- Mehri, N., & Bijankhan, M. (2020). Experimental study on Automatic Valve Control Performance in Water Pipelines. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(79), 129-140.
- Paradise, B. (2014). Critical flow nozzle for controlling fuel distribution and burner stability. In: Google Patents.
- Pourzand, A. (2007). A practical method for volumetric delivery of water. *The Role of Irrigation and Drainage in a Sustainable Future*, 3(6), 631-641.

- Rahmeyer, W., & Driskell, L. (1985). Control valve flow coefficients. *Journal of Transportation Engineering*, 111(4), 358-364.
- Rezazadeh, P., Bijankhan, M., & Mazdeh, A. M. (2019). An experimental study on a flow control device applicable in pressurized networks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101533.
- Rodriguez, S. B., & Fathi, N. (2017). Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling. No. SAND2017-13577B. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 121-196.
- Saha, B. K., Chattopadhyay, H., Mandal, P. B., & Gangopadhyay, T. (2014). Dynamic simulation of a pressure regulating and shut-off valve. *Computers & Fluids*, 101, 233-240.
- Süme, V., Daneshfaraz, R., Kerim, A., Abbaszadeh, H., & Abraham, J. (2024). Investigation of clean energy production in drinking water networks. *Water Resources Management*, 38(6), 2189-2208.
- Surbey, D., Kelkar, B., & Brill, J. (1989). Study of multiphase critical flow through wellhead chokes. *SPE Production Engineering*, 4(02), 142-146.
- Vos, J., & Vincent, L. (2011). Volumetric water control in a large-scale open canal irrigation system with many smallholders: The case of Chancay-Lambayeque in Peru. *Agricultural Water Management*, 98(4), 705-714.
- kai Zhang, X., & Wang, D. (2015). A flow control device for incompressible fluids. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 165-173.
- Zhi-qing, W. (1982). Study on correction coefficients of laminar and turbulent entrance region effect in round pipe. *Applied Mathematics and Mechanics*, 3(3), 433-446.
- Stares, J., Glaun, A., & Dresser, M. (2003). Simulation helps design more efficient control valve. *Journal Articles by Fluent Software Users*, JA, 188.
- Oskouhi, M., & Esmaili, k. (2019). A historical Review of Turbulence Flow Modeling and Simulation in Hydraulics. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 49-60. (In Persian).
- Zare Abyaneh, H., Heidari, A., & Daneshkar Arasteh, P. (2019). Evaluation of Water Management Performance in Irrigation Network of Qazvin Plain. *Iranian Society of Irrigation and Water Engineering*, 10(2), 76-88. (In Persian)

نشریه



# Numerical Modelling of Automatic Discharge Control Valve Performance for Open Channel and Low-head Networks

## Extended ABSTRACT

### Introduction

The simultaneous challenges of increasing water scarcity and the rising demand for agricultural products have highlighted the need for optimizing water usage. Volumetric water delivery has emerged as a method to enhance the efficiency of water distribution. To ensure consistent discharge and uniform distribution, the implementation of an automatic flow control valve in water networks is vital. These valves are designed to be unaffected by fluctuations in upstream and downstream water levels. This study evaluates the performance of an automatic flow control valve in regulating flow within a specific range of differential pressure, using experimental data. By utilizing supercomputers and numerical models, we employed computational fluid dynamics (CFD) simulations, particularly using Ansys Fluent software, to analyze the flow control valve. These simulations are aimed at solving complex hydraulic and mechanical issues. To reduce simulation time and computational expenses during dynamic runs, certain assumptions, including geometry simplifications, were made. The final outcomes of this numerical analysis are also discussed.

### Methods

The valve was designed specifically for low head, i.e., agricultural applications, with a size chosen to handle a discharge rate of 3 L/s. Additionally, it can be installed in group to increase discharge capacity. A key advantage of this valve is its suitability for low discharge and low head conditions. The modular range of the automatic flow control valve extends from 35 to 165 cm. Unique experimental data were compiled to verify the numerical model results. The numerical simulation was carried out using Ansys Fluent under two distinct conditions: in the first the full geometry details was used, which resulted in high computational execution time. In the second condition a simplified geometry was used that significantly reduced the run time while introducing a marginal systematic simulation deviation with that of the first results. A correction equation, derived from the CFD results, was proposed to estimate and correct the deviations caused by removing the guide rod from the geometry in the second .

### Conclusion

Ansys Fluent was employed to simulate fluid flow through a discharge control valve. The numerical simulation led to the development of this valve to be applicable across a wide range of differential pressures and various discharge rates. Static validation was performed using experimental data, and the dynamic simulation was based on the mentioned validation. The error percentage in flow rate estimation was calculated. The simulation was also conducted after simplifying the geometry, and the error percentage was determined similarly. The two sets of results were compared with experimental data. The findings revealed that the removal of the guide rod generated small deviation from that of the full geometry simulation. However, a significant reduction in run time and ease of modeling was reached. Overall, Ansys Fluent proved to be a robust model for simulating the flow control valve with an acceptable margin of error.

*Keywords: Ansys Fluent, automatic valve, constant discharge, simulation errors, volumetric delivery*

### Author Contributions

Conceptualization and methodology, Bijankhan M. and Kouchakzadeh .S.; software and validation, Chavoshi M.; formal analysis, all authors; investigation and data collection, Chavoshi. M. and Kouchakzadeh S.; resources, Kouchakzadeh S.; writing—original draft preparation, Chavoshi. M.; writing—review and editing, Kouchakzadeh. S. and Bijankhan M.; supervision, Kouchakzadeh. S. and Bijankhan. M.; project administration, Kouchakzadeh. S.; funding acquisition, Kouchakzadeh. S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”



**Data Availability Statement**

“Not applicable”

**Acknowledgements**

The first author would like to express her gratitude to Reza Amini for his assistance in troubleshooting software issues and offering fresh perspectives in using ANSYS. Also, she would like to thank Mr. A. Ghorbani the Lab technician for his assistance in constructing the experimental setup.

**Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

پدیدار استادی  
منتشرده