

تحلیل عددی جریان گاز در شیرهای صنعتی جهت کاهش اثرات حباب زایی در شبکه گازرسانی کشور

چکیده: شیرهای صنعتی با طراحی دقیق، نقش مهمی در کنترل جریان سیال و کاهش پدیده کاویتاسیون ایفا می کنند. کاویتاسیون، با کاهش فشار محلی سیال، منجر به تشکیل و انفجار حباب ها شده که سطوح را فرسایش داده و عملکرد شیرها را مختل می سازد. این پژوهش به شبیه سازی کاویتاسیون در شیرهای پروانه ای و کروری پرداخته و تأثیر پارامترهایی نظیر افت فشار، دمای سیال و درجه باز شدگی شیر بر شدت کاویتاسیون را بررسی می کند. مدل سازی جریان و تحلیل پارامترهای کلیدی با رویکرد گسسته سازی مرتبه دوم انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل اغتشاشی $\gamma - Re_{\theta}$ دقیق ترین پیش بینی ها را ارائه می دهد. استقلال تحلیل از مش بندی و اعتبارسنجی با داده های آزمایشگاهی نیز تأیید شد. مقاله حاضر با بهره گیری از مدل های شبیه سازی عددی پیشرفته و تحلیل های پارامتریک دقیق، نوآوری هایی در درک پدیده کاویتاسیون در شیرهای پروانه ای و کروری ارائه می کند. استفاده از مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برای پیش بینی دقیق رفتار کاویتاسیون، همچنین بررسی اثرات افت فشار و دما بر شدت این پدیده، به طور خاص در شرایط صنعتی، از جمله دستاوردهای این تحقیق به شمار می رود.

واژه های راهنما: کاویتاسیون، شیرهای صنعتی، شبیه سازی عددی، جریان سیال، تحلیل پارامتریک

مسعود درفشان*
استادیار

صادق ستوده

دانشجوی کارشناسی ارشد،
گروه سیستم های انرژی، دانشکده
مهندسی،
دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء،
بهبهان

پیام پرواسی

دانشیار،
گروه مهندسی شیمی،
دانشکده مهندسی،
دانشگاه صنعتی شیراز،
شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

Masoud Dorfeshan*
Assistant Professor

Sadegh Sotoudeh

MSc. Student,
Department of Energy
Systems, Faculty of
Engineering, Khatam
Alania University of
Technology, Behbahan

Payam Parvasi

Associate Professor,
Department of Chemical
Engineering, Faculty of
Engineering, Shiraz
University of Technology,
Shiraz

Numerical analysis of gas flow in industrial valves for mitigating cavitation effects in the national gas distribution network

Abstract: Industrial valves, with precise design, play a significant role in controlling fluid flow and mitigating cavitation phenomena. Cavitation, by reducing the local fluid pressure, leads to the formation and collapse of bubbles, which erode surfaces and disrupt valve performance. This study simulates cavitation in butterfly and ball valves and investigates the impact of parameters such as pressure drop, fluid temperature, and valve opening degree on the intensity of cavitation. Flow modeling and analysis of key parameters were carried out using second-order discretization methods. The results showed that the $\gamma - Re_{\theta}$ turbulence model provides the most accurate predictions. The independence of the analysis from meshing and its validation with experimental data were also confirmed. This study, by utilizing advanced numerical simulation models and precise parametric analyses, presents innovations in understanding the cavitation phenomenon in butterfly and spherical valves. The use of the turbulence model $\gamma - Re_{\theta}$ for accurate cavitation predictions, along with the investigation of the effects of pressure drop and temperature on the intensity of this phenomenon, particularly in industrial conditions, are key contributions of this research.

Keywords: Solar greenhouse, Photovoltaic panel, Coverage ratio, Shading factor, DLI factor, Design Builder software, Daylighting simulation

۱- مقدمه

پوزار و همکاران در تحقیق خود برای نظارت صنعتی بر جریان سیالات، نشان دادند که انتقال از یک جریان تک‌فاز به حالت کاویتاسیون معمولاً از طریق میکروفونی شناسایی می‌شود که صدای ساطع شده در نزدیکی نواحی بحرانی مانند باز شدن دریچه‌های کنترل را اندازه‌گیری می‌کند. برای اندازه‌گیری آستانه کاویتاسیون، آنها یک روش تشخیص پیزوالکتریک آنالوگ و کارآمد توسعه دادند. ارزیابی این روش، هم در صفحه دهانه آزمایش مرجع و هم در یک شیر کنترل منتخب، نشان داد که این روش قادر است نویز صوتی در محیط‌های صنعتی را کاهش دهد، وابستگی به قضاوت اپراتور را تا حد زیادی کم کند و امکان مشاهده دقیق‌تر پدیده کاویتاسیون را فراهم سازد [۲].

یانگ و همکاران نشان دادند که کاویتاسیون در نازل فلپر شیر صنعتی، عامل اصلی لرزش فلپر و افت عملکرد آن است. آن‌ها تأثیر کاهش کاویتاسیون را با استفاده از دو میکروجت پیوسته در اطراف جت اصلی نازل بررسی کردند. این روش از طریق شبیه‌سازی عددی و مقایسه کسر بخار در شرایط مختلف ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که میکروجت‌ها توانستند کاویتاسیون را کاهش دهند و این تأثیر به عواملی مانند فشار ورودی، قطر محفظه و فاصله پوچی وابسته است. در شرایط مشابه، ساختار نازل مجهز به میکروجت‌ها کاویتاسیون را به طور مؤثری مهار می‌کند [۳].

لیو و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیالات محاسباتی، فرسایش ناشی از کاویتاسیون و ذرات را در شیر پروانه‌ای سیستم تصفیه آب یک رآکتور PWR^۱ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که فرسایش، عمدتاً در نواحی جلو و عقب دیسک شیر رخ می‌دهد. همچنین، افزایش فشار ورودی منجر به تشدید فرسایش و افزایش شدت آشفته‌گی جریان می‌شود. از سوی دیگر، کاهش زاویه باز شدن شیر، میزان فرسایش را کاهش داده و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. این تحلیل به بهبود قابلیت اطمینان و عمر مفید شیر کمک می‌کند [۴].

چینایف و همکاران در پژوهش خود، بر پایه تجزیه و تحلیل فرآیندهای کاویتاسیون و روش‌های موجود تعیین خصوصیات آن، روشی آزمایشی برای تعیین ضریب کاویتاسیون ارائه کردند. آن‌ها همچنین تکنیک پردازش داده‌های تجربی را در توسعه این ضرایب ارزیابی نمودند. بر اساس داده‌های تجربی، نویسندگان تأثیر فشار قبل و بعد از شیر صنعتی و نیز جریان فشار دیفرانسیل را بر مشخصه پهنای باند و ویژگی‌های کاویتاسیون شیرها بررسی کردند [۵].

شیرهای صنعتی اجزایی با هندسه‌های متنوع هستند که برای کنترل جریان گاز در شبکه گازرسانی به کار می‌روند. با طراحی دقیق اجزای داخلی این شیرها، می‌توان پدیده کاویتاسیون را کنترل کرد. علاوه بر این، انتخاب مواد مناسب در ساخت اجزای شیر، امکان استفاده از آن‌ها را با انواع سیالات و در کاربردهای مختلف فراهم می‌سازد. یک شیر صنعتی معمولاً از یک دیسک تشکیل شده است که می‌تواند با چرخش یک‌چهارم دور توسط محوری که از درون آن عبور می‌کند، جریان را تنظیم کند. موقعیت نسبی بین مرکز هندسی دیسک و محور، نوع سپ را مشخص می‌کند: متقارن، خارج از مرکز یا مضاعف. چرخش دیسک، تعیین‌کننده میزان جریانی است که از طریق شیر عبور می‌کند؛ حداکثر جریان زمانی است که دیسک موازی با مسیر جریان قرار گیرد (حالت باز)، و حداقل جریان زمانی است که دیسک عمود بر جریان باشد (حالت بسته).

هنگامی که فشار محلی سیال کمتر از فشار بخار اشباع در دمای کاری شود، کاویتاسیون در جریان سیال رخ می‌دهد. رشد و انفجار حباب‌های ایجاد شده منجر به فرسایش سطح و جدا شدن ذرات گاز از سیال می‌شود که این امر مشکلاتی برای شیرهای صنعتی ایجاد می‌کند و در نتیجه، هزینه‌های زیادی برای جایگزینی آن‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه به همراه دارد؛ بنابراین، کاویتاسیون یکی از پارامترهای کلیدی در مسائل دینامیک سیالات و توربومشین‌ها به شمار می‌رود و بی‌توجهی به آن می‌تواند عواقب متعددی به دنبال داشته باشد. شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون در شیرها و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن، از اقدامات اساسی در طراحی و بهینه‌سازی شیرهای صنعتی است. برای کارخانه‌های سازنده شیرهای صنعتی، توجه به این نکات از اهمیت بالایی برخوردار است. براین اساس، بررسی پژوهش‌های پیشین در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل پدیده کاویتاسیون در شیرهای صنعتی می‌تواند به شناسایی روش‌های مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد این تجهیزات کمک کند.

کر و همکاران با استفاده از یک روش المان محدود، برهم‌کنش‌های سیال و سازه در یک شیر کنترل را مورد بررسی قرار دادند. بردارهای جابه‌جایی، سرعت و متغیرهای فشار نسبت به زمان برای توصیف سیال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق، توصیف جامعی از میدان‌های سیال تحت موج یا شوک را ارائه داد [۱].

¹ Pressurized-Water Reactor

هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر شبکه محاسباتی و مدل‌های مختلف توربولانس را بر همگرایی حل مطالعه کردند [۱۲].

چرن و همکاران جریان عبوری از یک شیر کروی با مقطع مدور را به طور آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن‌ها در دو مورد، یعنی طول گردابه بی‌بُعد شده و شاخص کاویتاسیون، به‌عنوان مبنای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

ژیومی و همکاران جریان کاویتاسیونی ناپایدار و نوسانات فشار در شیرهای تنظیم‌کننده را به روش عددی-آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کاویتاسیون شامل حباب‌های ثابت و متحرک است که با جریان برگشتی جدا شده و متلاشی می‌شوند. نسبت طول به قطر تأثیر مستقیمی بر دوره نوسان حباب‌ها و نوسانات فشار دارد. در مراحل اولیه، جریان پایدار است، اما در مرحله فروپاشی حباب‌ها، ناپایداری افزایش یافته و افت فشار تشدید می‌شود [۱۴].

برای تشخیص فرسایش کاویتاسیون، یک پارامتر جدید به نام "سطح آستانه" پیشنهاد شد. این پارامتر ارتباط بین اثرات کاویتاسیون و مقاومت مواد را برقرار می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، اگر اثرات کاویتاسیون از حد آستانه بزرگ‌تر باشد، احتمال دارد که ماده تحت تأثیر قرار گرفته و دچار فرسایش شود [۱۵].

تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که کاویتاسیون را می‌توان از طریق انعکاس یا پراکندگی امواج مافوق صوت و با تجسم جریان مایع شبیه‌سازی کرد. برای مشاهده غیرمستقیم کاویتاسیون، از سنسورهای فشار، شتاب و ابزار صوتی استفاده می‌شود. در این تحقیقات مشخص شد که نوسانات مکرر، نشانه‌ای از کاویتاسیون ابتدایی هستند [۱۶].

حبیب‌نژاد و همکاران تأثیر چهار ساختار مختلف قفسه سوراخ‌دار در شیرهای گلوب را بر افت فشار و کاویتاسیون بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش باز شدن شیر، حتی در سرعت‌های پایین نیز کاویتاسیون ایجاد می‌شود و با افزایش سرعت ورودی، شدت کاویتاسیون بیشتر می‌شود. در نهایت، استفاده از قفسه سوراخ‌دار با سوراخ‌های به سمت پایین موجب کاهش کاویتاسیون بیشتر و حفاظت از اجزای داخلی شیر می‌شود [۱۷].

در تحقیق دیگری مازور و همکاران سایش بیش از حد شیر کنترلی در توربین ۲۵ مگاواتی زمین گرمایی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. مدل‌سازی انجام شد و جریان بخار حاوی ذرات جامد تحلیل گردید. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی فشار تغذیه و کندانسور، انرژی جریان

سونگ و پارک نتایج آزمایشگاهی یک شیر پروانه‌ای به قطر ۱/۸ متر را با شبیه‌سازی سه‌بعدی مقایسه کردند. سیال مورد بررسی آب، جریان آشفته لزج و غیر قابل تراکم، با شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار اتمسفر در خروجی و مدل آشفتگی K-ε بود. نتایج شبیه‌سازی، به‌جز در زاویه‌های کمتر از ۲ درجه، با داده‌های تجربی مطابقت خوبی داشت [۶].

ابراهیم و همکاران شبیه‌سازی عددی دوبعدی جریان آب از میان یک شیر پروانه‌ای ۳۸ میلی‌متری تک دیسک را با نرم‌افزار فلوئنت و مدل آشفتگی K-ε انجام دادند. آن‌ها مشخصات جریان، پروفیل سرعت، و توزیع فشار را در زوایای مختلف بازشدگی و سرعت‌های مختلف ورودی بررسی کردند و پیشنهاد دادند که شیرهای پروانه‌ای در زوایای نزدیک به حالت بسته استفاده نشوند [۷].

وکیلی تهامی و همکاران رفتار هیدرودینامیکی انواع دیسک شیر پروانه‌ای به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر را شبیه‌سازی کردند. این شبیه‌سازی با فرض جریان پایای غیر قابل تراکم آشفته، مدل آشفتگی K-ε و شرایط مرزی ورودی در دو حالت سرعت ثابت و فشار ثابت و خروجی با فشار اتمسفر انجام شد و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شد [۸].

فرسایش کاویتاسیونی در پمپ‌ها و شیرآلات نیروگاه‌های هسته‌ای موجب کاهش بازدهی و عمر مفید آن‌ها شده است. زاو و همکاران [۹] گزارش کرده‌اند که این پدیده به ریزساختار، سختی و چقرمگی مواد وابسته بوده و در فولاد آستنیتی مقاومت بیشتری مشاهده شده است. همچنین، سایش-خوردگی تحت تأثیر ترکیب عناصر قرار دارد. برای بهبود مقاومت، استفاده از عناصر آلیاژی و پوشش‌های محافظ پیشنهاد شده است.

ژو و همکاران به بررسی مکانیزم‌های اتلاف انرژی در جریان‌های کاویتاسیونی شیرهای کنترلی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که کاویتاسیون می‌تواند منجر به افزایش قابل توجهی در اتلاف انرژی شود و طراحی بهینه شیرهای کنترلی می‌تواند به کاهش این اتلاف‌ها کمک کند [۱۰].

دیویس و استوارت با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت جریان سیال در شیرهای کنترلی را مطالعه کردند. آن‌ها شیر کنترلی با فاکتور ظرفیت ۲،۵ تا ۱۳ را بررسی کرده و نتایج عددی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. یافته‌ها نشان داد که ضریب ظرفیت و سایر ویژگی‌های وابسته به‌راحتی از طریق مدل قابل‌پیش‌بینی هستند [۱۱].

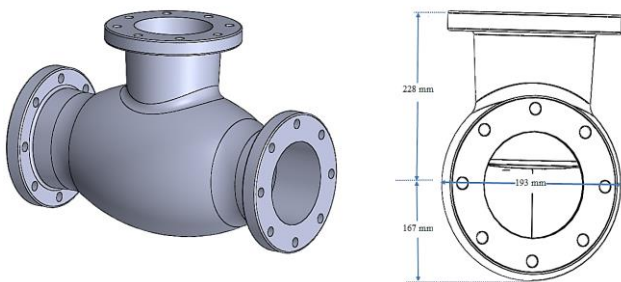
لینو و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، فشار، سرعت و پدیده کاویتاسیون در یک شیر سوپاپ

نرم‌افزار انسیس فلونت، خواص گاز و فرآیند حباب‌زایی با استفاده از مدل چندجمله‌ای موجب در نرم‌افزار، به‌منظور اعمال خواص حرارتی متغیر با دما، اجرا می‌گردد. در گام نخست، استقلال تحلیل از اندازه مش و انتخاب مدل اغتشاشی مناسب مورد توجه قرار گرفته است. سپس نتایج با کارهای آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی شده و دقت پیش‌بینی نتایج با روش عددی نسبت به کار آزمایشگاهی تحلیل خواهد شد. در نهایت، به عنوان تحلیلی پارامتریک، تأثیر پارامترهایی همچون افت فشار، دمای ورودی جریان سیال و زبری بر پارامترهای بروز کایتاسیون مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی این تحقیق، تحلیلی پارامتریک از متغیرهای بسیار مهم در طراحی شیرهای صنعتی خواهد بود که در تحلیل جریان شبکه گازرسانی کشور مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

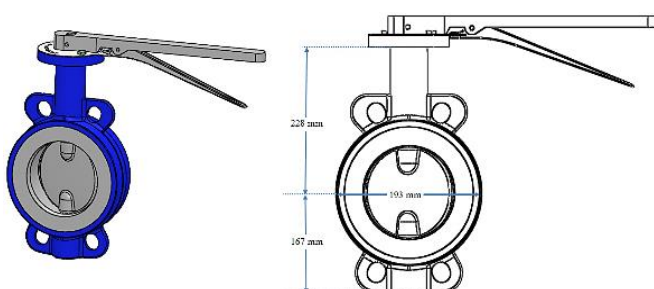
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- هندسه و طراحی مدل

در این پژوهش، در گام نخست هندسه دو نوع شیر انتخاب شده برای بررسی پدیده‌های آشفتگی و کایتاسیون مورد تحلیل قرار می‌گیرد. هندسه‌های انتخابی برای شیرهای مورد بررسی در این تحقیق، شیرهای کروی و پروانه‌ای هستند که به‌منظور مقایسه نمودارهای عملکردی طراحی شده‌اند. طراحی این هندسه‌ها با استفاده از نرم‌افزار سیالیدورک انجام شده است.



شکل ۱ مدل CAD از شیر کروی



شکل ۲ مدل CAD از شیر محور چرخان دیسک پروانه‌ای

توربولانسی و نرخ سایش تا ۴۹٪ کاهش می‌یابد. همچنین، پیشنهادهایی برای پیشگیری از سایش ارائه شد [۱۸].

رومانگولو و همکاران تأثیر کایتاسیون بر عملکرد و تخریب شیر کنترل پروپورشنال را بررسی کردند. جریان روغن در یک شیر اسپولی با بدنه پلکسی‌گلاس به‌صورت تجربی ثبت و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنش سطحی بر تغییر شکل حباب‌های کایتاسیون تأثیر دارد. همچنین، شاخصی برای ارزیابی ناپایداری کایتاسیون ارائه شده که می‌تواند به کاهش این پدیده کمک کند [۱۹].

کایتاسیون همواره برای بهره‌برداران و تعمیرکاران صنایع به عنوان یک مشکل نگران‌کننده مطرح است، زیرا این پدیده می‌تواند موجب کاهش بهره‌وری و سودآوری سیستم شود. کایتاسیون نه‌تنها باعث کاهش ظرفیت حجمی تجهیزات می‌شود؛ بلکه موجب تخریب قطعات، نویز و ارتعاشات زیاد نیز می‌گردد. در شیرهای پروانه‌ای و کروی، به دلیل رفتار چرخشی جریان در این شیرها، بروز کایتاسیون امری ذاتی است. درک ماهیت طبیعی این پدیده و آشنایی با تکنیک‌ها و تجهیزات کنترل آن، بهترین راه برای جلوگیری از نتایج منفی کایتاسیون است. باتوجه‌به هزینه‌های سنگین خسارات ناشی از بروز کایتاسیون در شبکه گازرسانی و کاهش فشار به‌ویژه در اقلیم‌های سردسیر، طراحی شیرهای کنترلی جریان گاز و بررسی پدیده کایتاسیون از اهمیت بالایی برخوردار است که در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. جنبه نوآوری این تحقیق در آن است که در بیشتر مطالعات پیشین در زمینه شیرهای صنعتی، پدیده کایتاسیون به‌طور جامع برای بهبود عملکرد شیرهای کنترلی و تعیین بهینه پارامترهای آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفته است. نوآوری‌های اصلی این پروژه به شرح زیر است: تحلیل دقیق عملکرد و رفتار شیرهای صنعتی در شرایط بروز پدیده کایتاسیون، بررسی تأثیر مقطع عبور جریان بر وقوع و شدت کایتاسیون، تعیین ضریب کایتاسیون و شدت آن در شیرهای مختلف، شبیه‌سازی عددی پدیده کایتاسیون و تحلیل پارامتریک شیرهای پروانه‌ای و کروی، و ارزیابی اثرات کایتاسیون بر ویژگی‌های هیدرولیکی جریان سیال در این شیرها.

روش کار این تحقیق به این صورت است که ابتدا یک مدل سه‌بعدی از هندسه شیرهای پروانه‌ای و کروی تهیه شده و به‌منظور تحلیل به نرم‌افزار انسیس فلونت ارسال می‌شود. تغییرات هندسه‌های مختلف شیر صنعتی با استفاده از نرم‌افزار CAD انجام می‌شود تا هندسه‌ای قابل بسط برای تحلیل پارامتریک به دست آید. پس از اعمال شرایط مرزی به مدل در

می‌کند. اگرچه عدد کاویتاسیون مستقیماً به هندسه شیر مرتبط نیست؛ اما هندسه شیر و موانع جریان می‌توانند با تغییر توزیع فشار و سرعت، شرایط کاویتاسیون را تحت تأثیر قرار دهند. عواملی مانند زبری سطح، اثرات ترمودینامیکی و کشش سطحی نیز بر شدت و شکل‌گیری کاویتاسیون تأثیرگذار هستند. تغییرات عدد کاویتاسیون معمولاً به تغییرات شرایط جریان بالادست مربوط می‌شود. در شیرهای صنعتی، رابطه بین چرخش میله و میزان بازشدگی شیر بسته به نوع طراحی شیر متفاوت است. در شیرهای کروی، چرخش میله باعث تغییرات غیرخطی در میزان بازشدگی می‌شود، که معمولاً از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$A = A_{max} \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)^n \quad (3)$$

که در آن A مساحت عبور جریان است، θ زاویه چرخش میله و n یک ثابت تجربی است که در این تحلیل ۲ در نظر گرفته شده است. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش زاویه چرخش، جریان به‌طور نمایی افزایش می‌یابد و برای بازشدگی کامل نیاز به چرخش بیشتری است. در مقابل، در شیرهای پروانه‌ای، تغییرات بازشدگی به‌صورت خطی با چرخش میله صورت می‌گیرد که از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$A = A_{max} \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \quad (4)$$

θ زاویه چرخش دیسک پروانه‌ای است.

۲-۳- معادلات توصیف‌کننده حرکت حباب در حین بروز پدیده کاویتاسیون

در یک میدان جریان، مدل رایلی می‌تواند برای توصیف رفتار یک حباب کروی مورد استفاده قرار گیرد [۲]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[p_v - p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3K} - p \frac{2\gamma}{R} \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right] \quad (5)$$

اگر رفتار حباب بدون در نظر گرفتن حرارت اتلافی در نظر گرفته شود، مقدار $K = 0.25$ خواهد بود. در این معادله فرضیاتی چون تراکم‌ناپذیری سیال، یکنواختی فشار و دمای درون حباب و صرف‌نظر از انتقال جرم به داخل حباب در نظر گرفته شده است. اگر تغییرات در شعاع حباب نیز لحاظ شود، معادله حرکت با رابطه (۶) قابل توصیف است [۲۱].

سپس با بررسی برخی روابط تئوری مرتبط با ایجاد حباب‌های هوایی و نابجایی در جریان سیال، تحلیلی تئوری از پارامترهای پر اهمیت برای آشنایی با مبانی کاویتاسیون در جریان ارائه خواهد شد. در نهایت، با بیان روش‌شناسی شبیه‌سازی جریان در محیط فلونت از نرم‌افزار انسیس ورک بنچ، به پدیده آشفته‌گی و مدل‌های مختلف مورد استفاده در گذر جریان از حالت خطی به آشفته پرداخته خواهد شد. در شکل‌های (۱) و (۲) نقشه شیرهای طراحی شده مشاهده می‌شود. در این تحقیق از سایز ۸ اینچی (DIN200) استفاده شده است و به‌منظور انجام مطالعه مقایسه‌ای با شیر کروی، هندسه دهانه شیر کروی نیز با همین ابعاد انتخاب گردیده است.

۲-۲- بررسی پدیده کاویتاسیون

بروز پدیده کاویتاسیون و تشکیل حباب در شیرهای صنعتی به علت عواملی همچون افزایش دما (افزایش دمای کارکرد سیال، بروز پدیده جوش، تماس با جریان هوای گرم و ...) یا کاهش فشار نسبی رخ می‌دهد. در برخی موارد، هنگامی که جریان از یک بستر سیالاتی عبور می‌کند، تغییرات هندسی بستر جریان می‌تواند باعث تغییر در سرعت جریان شود و با کاهش فشار هیدرواستاتیکی، خطوط جریان از پیوستگی خود خارج می‌گردند که در نتیجه پدیده کاویتاسیون ایجاد می‌شود. حباب‌های موجود در جریان سیال حاوی گازهایی هستند که در حین عبور جریان در سیال حل شده‌اند. فشار گازهایی که در این حباب‌ها ایجاد می‌شود، نقش بسزایی در نوع تخریب حباب‌ها دارد. اگر فشار بخار داخل حباب‌ها کم باشد، تخریب حباب‌ها به‌صورت انفجاری و ناگهانی خواهد بود؛ در غیر این صورت، تخریب حباب‌ها به‌طور آهسته صورت می‌گیرد [۲۰]. برای حباب کروی شکل، معادله تعادل را به‌صورت زیر می‌توان نوشت [۲۱]:

$$p_g + p_v = p_\infty + \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

طبق این رابطه در صورت تغییر در فشار سیال، برای برقراری تعادل فیزیکی، شعاع حباب نیز تغییر می‌کند. در بررسی پدیده‌ی کاویتاسیون عدد بدون بعد کاویتاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2} \quad (2)$$

عدد کاویتاسیون یک معیار بی‌بعد است که احتمال وقوع و سرعت موضعی بستگی دارد و در نقاط مختلف جریان تغییر

ضریبی برای اندازه‌گیری جریان گاز از شیر است برای شیرهای پروانه‌ای و کروی با ۲۵ درصد بازشدگی برابر ۲ در نظر گرفته شده است.

۲-۴- شبیه‌سازی عددی

ساخت مدل سه‌بعدی و شبکه‌بندی مدل مطابق با شکل‌های (۳) و (۴) انجام شده است. همه قطعات شیرهای صنعتی از فولاد ضدزنگ ماشین‌کاری ساخته شده است. خصوصیات کلی شبیه‌سازی جریان در شیر صنعتی در جدول (۱) آمده است. برای شبیه‌سازی درصدهای مختلف بازشدگی شیر، مدل کروی و پروانه طراحی شده از شیرهای کروی و پروانه‌ای با نرم‌افزار سالیدورک برای پیکربندی‌های مختلف دوران داده شده و سپس به نرم‌افزار انسیس فلونت وارد شده است.

معمولاً تولید شبکه یکی از مهم‌ترین و زمان‌برترین بخش یک شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در بررسی توابع فلونت اغلب آنها در نزدیکی سطوح به‌خوبی قادر به تحلیل جریان نیستند، به همین جهت در نقاط حساس مانند نزدیکی دیواره‌ها، اطراف سوراخ‌ها، نواحی جدایش جریان، روی نقاط سکون و نقاط مورد توجه برای خنک‌کاری به دلیل ایجاد بی‌نظمی‌های کنار سطح و به‌منظور تحلیل درست رفتار جریان و همچنین دست‌یابی به نتایج با دقت بالاتر، از شبکه ریزتری استفاده شده است. در این نواحی اندازه شبکه‌های ایجاد شده با نرخ ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

شرایط مرزی برای شبیه‌سازی جریان عبارتند از: تعریف پروفیل فشار کل و دمای کل ورودی. جهت جریان در ورودی به‌صورت عمود بر سطح و بدون پیش‌فرض فرض شد و از شدت توربولانس به مقدار ۵ درصد به عنوان پارامتر ورودی استفاده شد. دبی جرمی در خروجی به عنوان شرط مرزی معین تعریف می‌گردد. تعریف شرط مرزی تمام دیواره‌های ساکن و چرخان به‌صورت آدیاباتیک و عدم لغزش برای بردارهای سرعت.

استفاده از روش دستگاه مختصات چرخان برای در نظر گرفتن حرکت نسبی دریاچه و محفظه شیر صنعتی. در مرز مشترک بین دریاچه و محفظه شیر صنعتی شرط مرزی اختلاط تعریف شده است. در این روش منطقه محاسباتی به دو بخش ساکن (پوسته) و متحرک (دریاچه) تقسیم شده و هرکدام از این نواحی به‌صورت یک مسئله دائم حل می‌شوند. هرچند تکرار مشخص، همه خواص جریان در صفحه اختلاط و در جهت محیطی روی خروجی

$$\rho_b V_b \frac{d\bar{U}_b}{dt} = V_b (\rho_b - \rho) g \bar{j} + V_b \bar{\nabla} p + \frac{1}{2} \rho A_b C_D (\bar{U} - \bar{U}_b) |\bar{U} - \bar{U}_b| \quad (6)$$

ضریب C_D نیز عبارت است از [۲۲]:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38}) \quad (7)$$

عدد بی‌بعد رینولدز به ترتیب زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{2R|\bar{U} - \bar{U}_b|}{\vartheta} \quad (8)$$

باتوجه به اینکه جریان کابیناسیون در شیر کنترلی دوفازی است، چگالی ρ_H و ویسکوزیته دینامیکی μ_{tp} در سیال دوفازی باید براساس کیفیت x برای فازهای بخار g و مایع l به صورت زیر تعریف شوند:

$$\rho_H = \varepsilon_H \rho_g + (1 - \varepsilon_H) \rho_l \quad (9)$$

$$\mu_{tp} = x \mu_g + (1 - x) \mu_l \quad (10)$$

در رابطه (۹)، ε_H کمیتی به نام کسر حجمی همگن^۱ بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

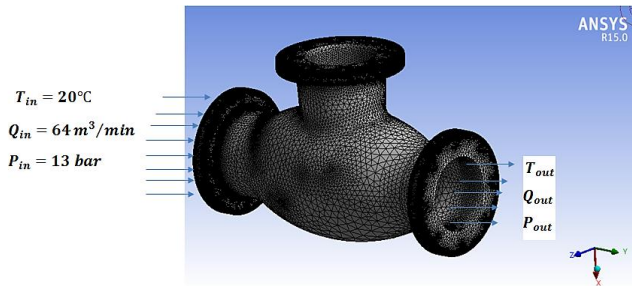
$$\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{(1-x)\rho_g}{x\rho_l} \right)} \quad (11)$$

با تعریف کمیت‌های لازم در این بخش، افت فشار ناشی از ممنوتوم را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد که بیان‌کننده اختلاف انرژی جنبشی بین ورودی و خروجی سیال دوفازی می‌باشد:

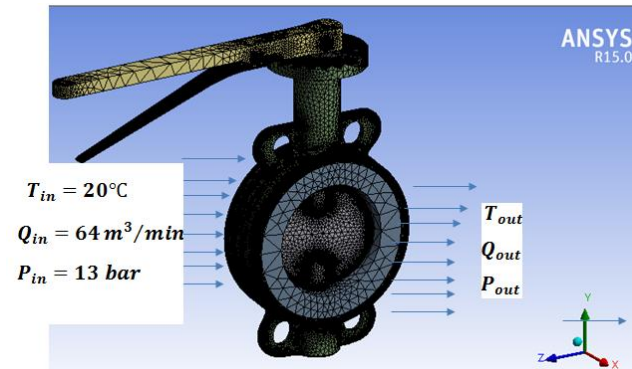
$$\Delta P_{mom} = G_r^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_g} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{(1-\varepsilon_H)\rho_l} + \frac{x^2}{\varepsilon_H \rho_g} \right]_{in} \right\} \quad (12)$$

در محاسبات پیش رو، چگالی گاز طبیعی در شرایط دمایی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۳ بار، برابر ۰/۸ کیلوگرم بر متر مکعب؛ ضریب فشار که نسبت فشار ورودی به خروجی یا فشار در نقطه طراحی است برابر با ۱/۲ و ضریب عبور گاز از شیر که

¹ Fraction Volume Hemogenous



شکل ۳ مش‌بندی و شبیه‌سازی مدل CAD شیر کروی



شکل ۴ مش‌بندی و شبیه‌سازی مدل CAD شیر پروانه‌ای

جدول ۱ مشخصات مرزی جریان ورودی و خروجی شیرها

مقدار	پارامتر
۲۵ درصد	درصد بازشدگی
۲۰ درجه سانتی‌گراد	دمای ورودی سیال
۲۰ دور بر دقیقه	دور گشودگی در نقطه طراحی
۶۴ متر مکعب بر ساعت	دبی جریان
۱۳ بار	فشار کل ورودی

در این پژوهش از مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است تا بتوان به خوبی حباب ایجاد شده در قسمت مکش را مدل‌سازی نمود. همچنین از روش اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس با گسسته‌سازی مرتبه دوم در مکان و زمان برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شده است. به منظور کوپلینگ معادلات سرعت و فشار، الگوریتم تکرار سیمپل در این نرم‌افزار به کار گرفته می‌شود. مدل $\gamma - Re_{\theta}$ قادر است که حالت گذرا از جریان آرام به جریان مغشوش را به خوبی شبیه‌سازی کند.

این مدل در واقع مدل تصحیح شده‌ای از روش $k - \omega$ می‌باشد. مدل گذرای $\gamma - Re_{\theta}$ شامل دو معادله تناوب γ و معادله عدد رینولدز ضخامت مومنتوم گذرای انتقال یافته Re_{θ} می‌باشد که این معادله انتقال به صورت رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

دریچه و ورودی نازل متوسط‌گیری شده و سپس از یک ناحیه به ناحیه دیگر منتقل می‌شود. در بخش چرخان حل عددی شتاب گریز از مرکز و شتاب کوریولیس را به معادلات اضافه می‌کند. چون شیر متقارن محوری است، از شرایط مرزی متناوب برای دریچه و نازل استفاده شد؛ یعنی می‌توان با استفاده از شرایط مرزی متناوب تنها یک تکرار از مراحل حل را شبیه‌سازی کرد. به‌طور خلاصه شرایط مرزی عبارتند از:

شدت توربلانس معین در ورودی

$$I = \frac{K^{0.5}}{U_{in}} = 0.05 \quad (13)$$

عدم لغزش در دیواره‌ها

$$(U|_{wall}) = 0 \quad (14)$$

شرایط مرزی برای انرژی جنبشی توربلانس:

$$K_{in} = C_K U_{in}^2 I^2 \quad (15)$$

ضریب C_K برابر ۰/۰۹ در نظر گرفته شده است.

نرخ تخریب توربلانس:

$$\epsilon_{in} = C_{\epsilon} \cdot \frac{K_{in}^{\frac{2}{3}}}{\gamma_{in}} \quad (16)$$

ضریب C_{ϵ} ۱/۴۴ در نظر گرفته شده است.

شرط مرزی آدیاباتیک برای دیواره‌های چرخان:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (17)$$

برای حل معادلات حاکم، نرم‌افزار انسیس بر اساس روش حجم محدود بکار رفته است. معادله فشار بر اساس طرح استاندارد و نیز معادلات مومنتوم و انرژی با استفاده از طرح اختلاف بالادست مرتبه دوم و سایر معادلات با طرح مرتبه اول گسسته‌سازی شده‌اند. به منظور ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم جهت به‌دست‌آوردن معادلات تصحیح فشار و سرعت، الگوریتم سیمپل به کار رفته است. دقت حل برای معادله انرژی 10^{-6} و برای دیگر معادلات 10^{-3} در نظر گرفته شده است. جریان در شیرهای صنعتی دارای پیچیدگی‌های سیالاتی می‌باشد. در این میدان جریان، علاوه بر این که جریان حالت گذرا را تجربه می‌کند، بلکه شاهد پیدایش حباب جریان در قسمت مکش در شیرهای صنعتی نیز می‌باشد. در چنین جریانی لزوم انتخاب مناسب یک مدل جریان مغشوش می‌تواند به پیش‌بینی پیچیدگی‌های جریان کمک شایانی کند.

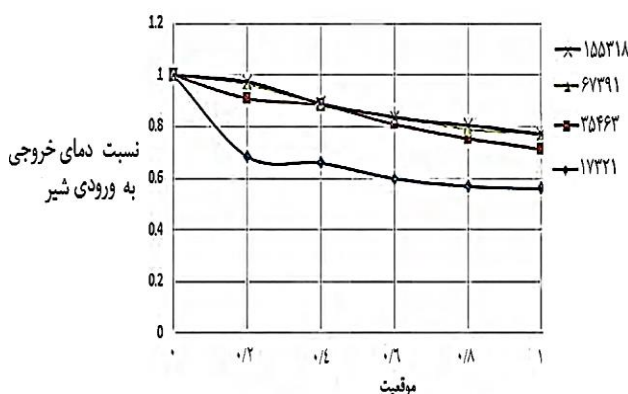
در رابطه (۱۲) کمترین سرعت صوت در سیال است و مقدار آن نقش تعیین کننده‌ای در تخمین ابعاد و ضخامت حفره‌های تشکیل شده در کاپیتاسیون دارد. با توجه به مدل‌های تجربی، بهترین انتخاب برای این پارامتر عددی مابین ۱/۵ تا ۲/۵ است [۲۰].

۳- بررسی استقلال نتایج از مش بندی

به منظور کاهش خطا به علت درشتی یا ابعاد نامناسب مش بندی در میدان محاسباتی، مدل سازی با تعداد مش بندی مختلف بررسی شده است. استقلال از شبکه در مش زنی به مفهوم این است که با تغییر در ابعاد مش زنی، نتایج تغییر چندانی نداشته باشند. شبیه سازی شیر پروانه‌ای با درصد بازشدگی ۵۰ درصد و دمای ورودی سیال ۳۵ درجه برای چهار شبکه با تعداد ۱۷۳۲۱، ۳۵۴۶۳، ۶۷۳۹۱ و ۱۵۵۳۱۸ سلول استفاده شد و پارامتری که برای سنجش معیار همگرایی در نظر گرفته شده است، نسبت دمای خروجی به ورودی شیر می باشد. این پارامتر در نسبت‌های فواصل گوناگون موقعیت خطوط جریان نسبت به کل طول حجم کنترل انتخاب شده برای جریان سیال مورد سنجش قرار گرفت (طول حجم کنترل ۸۰۰ میلی متر انتخاب شده است).

مطابق با نتایج ترسیم شده در شکل (۶)، تعداد شبکه محاسباتی ۶۷۳۹۱ و ۱۵۵۳۱۸ دارای پاسخ‌هایی نزدیک به یکدیگر بوده‌اند.

محور افقی در شکل (۶) بیانگر موقعیت کانتور دما نسبت به کل دهانه حجم کنترل است. مقدار این بازه بین ۰ تا ۰/۶ در نظر گرفته شده است؛ زیرا در خارج از این بازه در خروجی شیر دیگر تغییراتی در میدان سرعت یا دما مشاهده نشده است. به دلیل نیاز کمتر به زمان برای شبیه سازی شبکه محاسباتی با ۶۷۳۹۱ سلول نسبت به شبکه با ۱۵۵۳۱۸ سلول، تصمیم گرفته شد که برای تمامی شبیه سازی‌ها از شبکه‌ای با ۶۷۳۹۱ سلول استفاده شود.

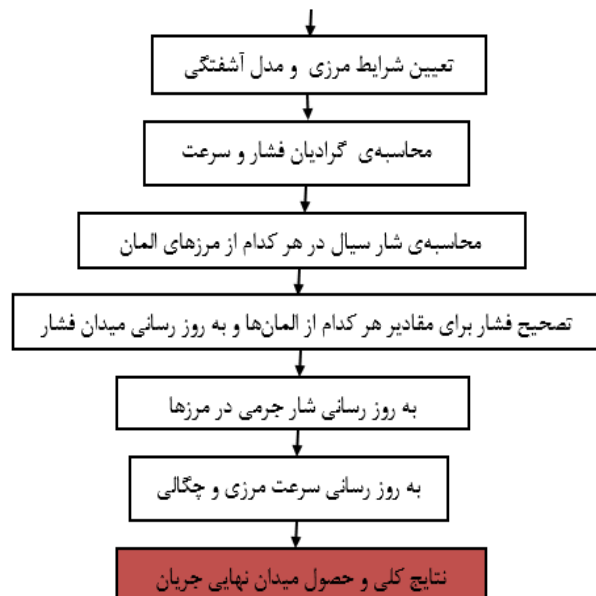


شکل ۶ بررسی نتایج استقلال از شبکه در فضای محاسباتی

$$\rho \frac{D\gamma}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] + F_L c_{a1} \rho S (\gamma F_{onset})^{0.5} (1 - c_{e1} \gamma) + F_{tur} c_{a2} \rho \Omega (\gamma F_{onset})^{0.5} (1 - c_{e2} \gamma) \quad (11)$$

الگوریتم تحلیل یک مسئله حرارتی-سیالاتی در شکل (۵) ترسیم شده است. همچنین لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از جریان دوفازی و در نظر گرفتن حباب‌های هوا به صورت یک گاز ایده آل، از فرمولاسیونی مبتنی بر چگالی موجود در نرم افزار فلوئنت برای شبیه سازی استفاده خواهد شد.

عنوان: الگوریتم شبیه سازی عددی کاپیتاسیون در شیرهای صنعتی



شکل ۵ الگوریتم نحوه حل یک مسئله سیالاتی با روش عددی

مدل سازی پدیده کاپیتاسیون علاوه بر تحلیل عملکرد شیرهای کنترل دبی جریان بر تجهیزات دیگر مانند توربوماشین‌ها نیز اثر دارد. این پدیده زمانی رخ می دهد که فشار محلی از فشار بخار سیال کمتر شود و هم زمان دوفاز مختلف سیال (مایع و بخار) یا فاز ترکیبی وجود داشته باشد. این شرایط مدل سازی کاپیتاسیون را پیچیده می کند. چگالی جریان ترکیبی را می توان با استفاده از مدل باروتروپیک تخمین زد.

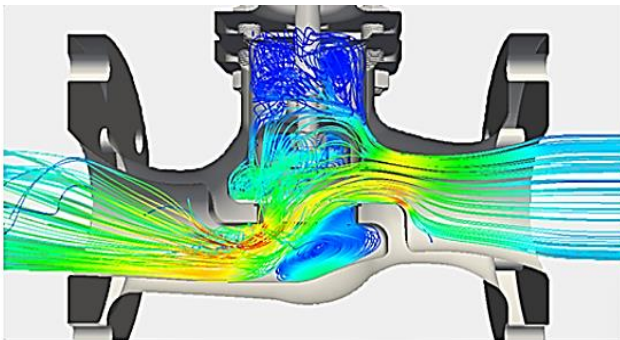
$$\rho = \left\{ \frac{\rho_l + \rho_v}{2} + \frac{\rho_l - \rho_v}{2} \sin \left(\frac{2}{C_{min}} \frac{p - p_{vap}}{\rho_l - \rho_v} \right) \right\} \quad (12)$$

۴- انتخاب مدل اغتشاشی مناسب

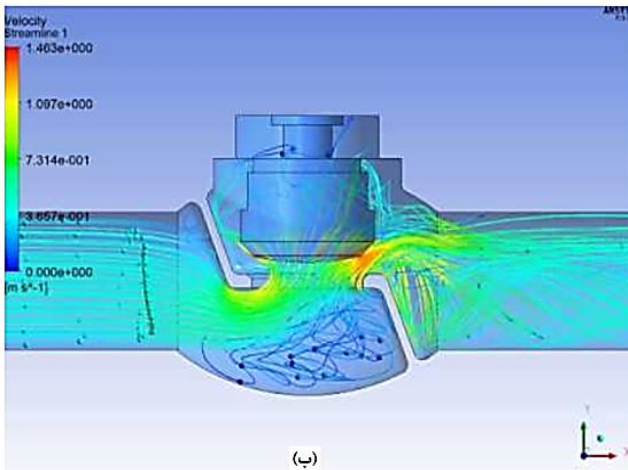
انتخاب مدل اغتشاشی تأثیر زیادی در پیش‌بینی دقیق پدیده کاویتاسیون دارد. هرچه مدل اغتشاشی بتواند جریان‌های برگشتی و عبوری از شیر صنعتی را بهتر شبیه‌سازی کند، نتایج به‌دست‌آمده برای احتمال بروز کاویتاسیون دقیق‌تر خواهند بود. در واقع، با ترسیم بردارهای سرعت و تحلیل جریان‌های برگشتی در شیرهای صنعتی، می‌توان با دقت بیشتری وقوع کاویتاسیون را پیش‌بینی کرد.

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی برای چهار مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ ، انتقال تنش برشی $k - \omega$ (SST)، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ و مدل اسپالارت-آلماراس (S-A) برای شبیه‌سازی جریان در نظر گرفته شد که با توجه به تشابه نتایج جریان سرعت برای مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ و $k - \omega$ تنها یکی از این مدل‌ها برای مطالعات بعدی انتخاب شد. نتایج تحلیل نشان داد که در شیر کروی، تنها مدل $k - \omega$ پاسخ‌های همگرا حاصل کرده و در بقیه‌ی موارد با گام‌های بیش از ۲۰۰ تکرار همگرایی بین پاسخ‌ها بدست نیامده است. همگرا شدن جواب‌ها در مدل $k - \omega$ به لحاظ کردن پارامترهای تنش برشی در حل عددی نسبت داده می‌شود، چون با توجه به تغییر در جهت‌گیری جریان در این هندسه از شیر صنعتی، لحاظ کردن تنش برشی در فرمولاسیون امری ضروری به نظر می‌رسد. نتایج توزیع سرعت و خط جریان این مدل در شکل (۷) قابل مشاهده است. همگرایی نتایج در مدل $k - \omega$ بواسطه در نظر گرفتن پارامترهای تنش برشی در حل عددی حاصل می‌شود. این امر به‌ویژه در هندسه‌های پیچیده‌ای مانند شیرهای صنعتی اهمیت پیدا می‌کند؛ چرا که تغییرات در جهت‌گیری جریان در این نوع هندسه‌ها نیازمند توجه ویژه به تنش‌های برشی است. به این ترتیب، گنجاندن تنش برشی در فرمولاسیون مدل $k - \omega$ برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و معتبرتر امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

در شیر محور چرخان دیسک پروانه‌ای برای مدل کردن جریان برگشتی در زیر لایه ویسکوز برای سه مدل توربولانسی بر مبنای پارامتر سرعت، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ برگشت جریان را به مراتب بهتر از مدل‌های دیگر نشان می‌دهد. در این شیر، با توجه به اینکه تشخیص سریع گذار جریان از رژیم جریان آرام به مغشوش اهمیت دارد، مدل $\gamma - Re_{\theta}$ بهتر از مدل‌های دیگر پدیده کاویتاسیون را پیش‌بینی کرده است. در واقع می‌توان گفت مدل توربولانسی $\gamma - Re_{\theta}$ تابع صریحی از عدد رینولدز می‌باشد و با لحاظ کردن مقدار معینی از زیری، مدل عددی جریان را پیش‌بینی کرده و حباب‌های ناشی از کاویتاسیون را حاصل کرده است. نتایج در شکل (۸) قابل مشاهده است.

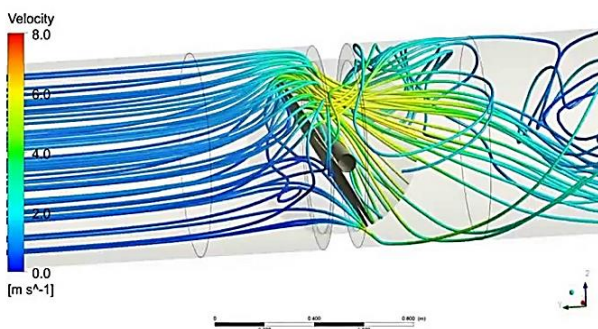
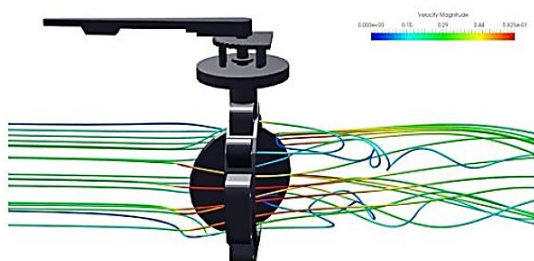


(الف)



(ب)

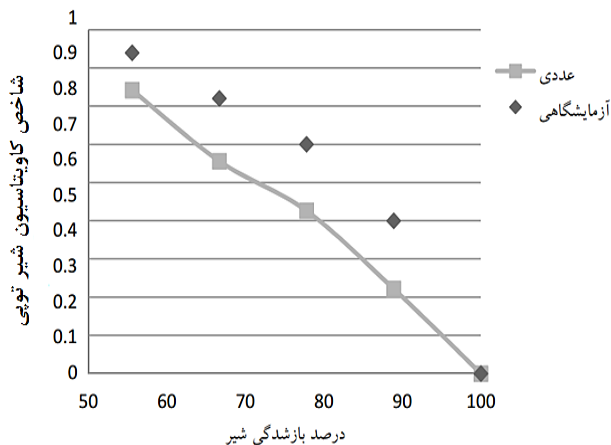
شکل ۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل $k - \omega$ در شیر کروی؛ الف- خط جریان، ب- توزیع سرعت



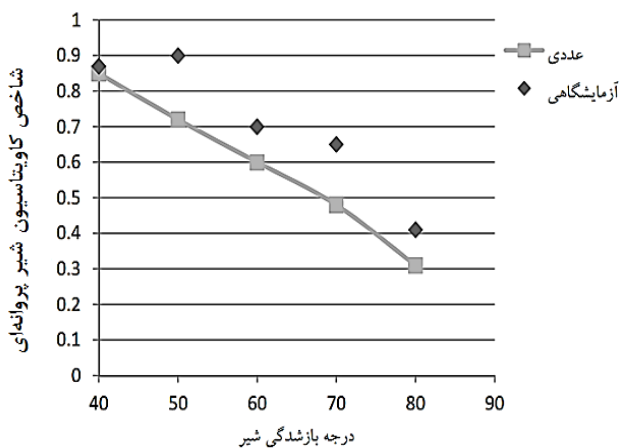
شکل ۸ پیش‌بینی پدیده کاویتاسیون در جریان شیر پروانه‌ای توسط مدل توربولانسی $\gamma - Re_{\theta}$

در شکل (۸) تعداد خطوط جریان در سمت چپ و راست تصویر نشان‌دهنده تغییرات فشار و سرعت جریان است و به‌طور غیرمستقیم می‌تواند میزان بخار ایجاد شده به‌علت کاویتاسیون

مقاطع کروی دارای تحلیل‌های دقیق‌تری خواهد بود. باتوجه به اینکه در شرایط مرزی اعمال شده، درصد بازشدگی شیر کمتر مورد نظر قرار گرفته است، نتایج مرتبط با شاخص کاویتاسیون برای درصد بازشدگی کمتر از ۳۰ درصد برای شیرهای کروی و پروانه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاکی از کمتر بودن میانگین این شاخص در شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی داشته است.



شکل ۹ مقایسه شاخص کاویتاسیون برای شیر کروی در تحقیق حاضر و کار آزمایشگاهی [۲۴].



شکل ۱۰ مقایسه شاخص کاویتاسیون برای شیر پروانه‌ای در تحقیق حاضر و کار آزمایشگاهی [۲۴].

جدول ۲ مقدار شاخص کاویتاسیون برای درصد‌های پایین بازشدگی شیرهای کروی و پروانه‌ای در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

درصد بازشدگی	۱۵٪	۲۰٪	۲۵٪	۳۰٪	نوع شیر - درصد
شیر کروی	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۹	
شیر پروانه‌ای	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۸۳	
درصد اختلاف	۳/۲۲	۳/۲۹	۴/۴۹	۵/۶۱	

را مشخص کند. در نواحی که خطوط جریان به هم نزدیک‌تر هستند، سرعت جریان بالاتر است و فشار کاهش می‌یابد. این کاهش فشار ممکن است به اندازه‌ای برسد که باعث تبدیل مایع به بخار و ایجاد کاویتاسیون شود. در سمت راست تصویر، جایی که خطوط جریان از هم دورتر شده‌اند و تغییر جهت یافته‌اند، فشار کاهش می‌یابد و احتمالاً گردابه‌هایی به وجود آمده است که باعث افت فشار شدید و ایجاد کاویتاسیون می‌شوند. بنابراین، اختلاف تعداد خطوط جریان می‌تواند نشان‌دهنده نواحی با فشار پایین باشد که مستعد وقوع کاویتاسیون هستند.

۵- اعتبارسنجی نتایج عددی

به‌منظور اطمینان از دقت نتایج شبیه‌سازی عددی بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای کروی و پروانه‌ای، نتایج حاصل شده از این تحقیق باید تطابق قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی مقالات موجود داشته باشد. شاخص کاویتاسیون برای محاسبه نیاز به افت فشار و چگالی دارد. افت فشار که با کانتورهای فلونت قابل حصول است. از طرفی چگالی بر اساس افت فشار خوانده شده و مدل باروتروپیک معرفی شده در رابطه (۱۲) آورده می‌شود. با داشتن این مقادیر، مقادیر شاخص کاویتاسیون قابل حصول است. به‌منظور اجرای تحلیلی مقایسه‌ای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، شاخص کاویتاسیون مطابق با این مدل باروتروپیک و در درجات مختلف بازشدگی شیر با یکدیگر مقایسه شده است. شاخص کاویتاسیون ذکر شده برای شیرهای کروی و پروانه‌ای در شکل‌های (۹) و (۱۰) مطابق با نتایج عددی و کار آزمایشگاهی [۲۴] ترسیم شد.

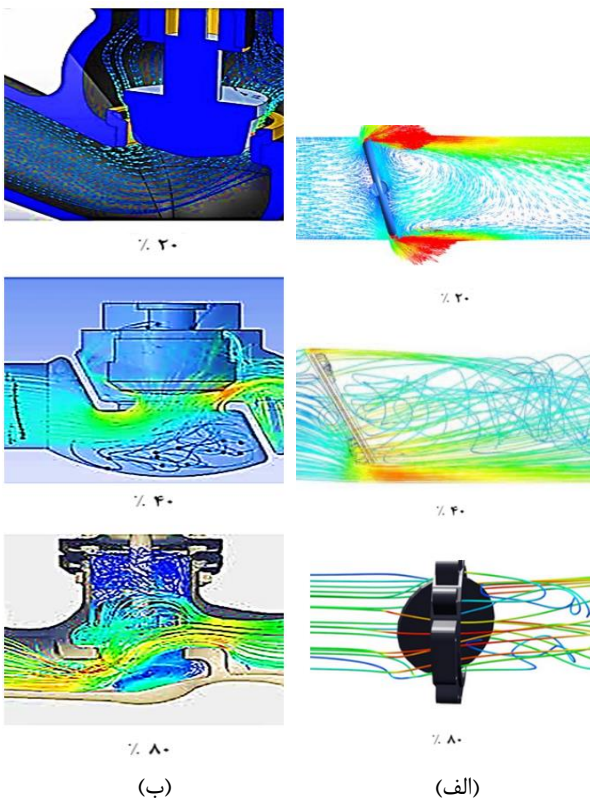
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شاخص کاویتاسیون در داده‌های آزمایشگاهی بالاتر از مقدار به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی است. این اختلاف حاکی از آن است که علی‌رغم استفاده از مدل‌های اغتشاشی و در نظر گرفتن زبری سطح، شبیه‌سازی عددی هنوز تمامی عوامل مؤثر بر وقوع پدیده کاویتاسیون را به‌طور کامل لحاظ نکرده است. بنابراین، مدل‌های مورد استفاده نیازمند بازبینی و اصلاحات بیشتری هستند. شاخص کاویتاسیون برای شیر پروانه‌ای دارای اختلاف متوسط ۱۹ درصدی با نتایج آزمایشگاهی دارد و این در حالی است که این اختلاف برای شیر کروی اختلاف ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد. در واقع شبیه‌سازی عددی بروز پدیده کاویتاسیون در شیر پروانه‌ای با دقت بهتری نسبت به شیر کروی انجام شده است. پیش‌بینی بهتر جریان در شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی نشان از این مطلب دارد که نرم‌افزار برای تحلیل جریان روی صفحات دیسکی به جریان روی

۴-۳ تحلیل تاثیر فشار، دمای جریان و درصد بازشدگی شیر بر بروز پدیده کاویتاسیون

مطابق با جدول (۳)، تغییر مقادیر افت فشار جریان عبوری از شیر کروی از مقدار ۴ به ۸ بار، موجب افزایش متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۰۴۶۹۱ به ۰/۶۲۵۷۸ یعنی افزایش ۵۷ درصدی شده است. در حالیکه برای همین مقدار افت فشار (مطابق با جدول (۳))، افزایش ۵۱ درصدی در کسر حجمی بخار آب دیده می‌شود. با توجه به این نتیجه، در مدارهای هیدرولیکی و برای کنترل جریان‌هایی که دارای افت فشار ناگهانی باشند، استفاده از شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای کروی ارجحیت خواهد داشت. به دلیل اینکه مقادیر حباب‌زایی در شیرهای پروانه‌ای به ازای افت فشارهای یکسان، کمتر است. همچنین به منظور بررسی درصد بازشدگی شیر بر خطوط جریان حول حجم کنترل شیر کروی و پروانه‌ای، شکل (۱۲) برای شیرهای کروی و پروانه‌ای ترسیم شده است.

جدول (۳) مقدار متوسط کسر حجمی بخار آب بر حسب دما برای شیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

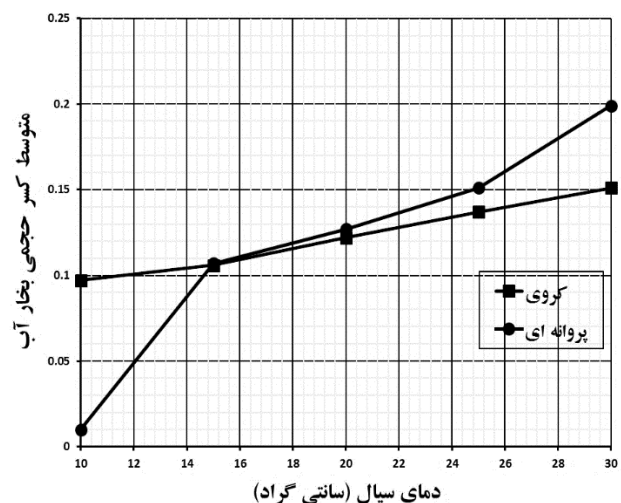
فشار (bar)	۴	۵	۶	۷	۸
کروی α	۰/۰۴۶	۰/۱۳۸	۰/۲۴۷	۰/۳۷۹	۰/۶۲۵
پروانه‌ای α	۰/۰۴۵	۰/۱۳۷	۰/۲۳۳	۰/۳۵۹	۰/۵۵۲
درصد اختلاف	۲/۱	۰/۷	۵/۶	۵/۳	۱۱/۷



شکل ۱۲ ترسیمی از خطوط جریان برای درصدهای مختلف بازشدگی؛ الف- شیر پروانه‌ای، ب- شیر کروی

مطابق با مباحث تئوریک مطرح شده در فصل قبل، فشار و دمای جریان سیال عبوری از شیرهای صنعتی از مهم‌ترین عوامل بروز پدیده کاویتاسیون و حباب‌زایی در جریان هستند.

در این بخش به منظور بررسی پارامترهای فشار و دمای جریان ورودی بر بروز پدیده کاویتاسیون، جریان با دماها و فشارهای اولیه وارد حجم کنترل شیر با درصد بازشدگی ۲۵ درصد شده و بررسی جریان عبوری در شیر اجرا خواهد شد. سپس پارامتر متوسط کسر حجمی بخار آب α تولید شده در شیر مورد سنجش قرار خواهد گرفت. مطابق با شکل (۱۱)، در شیر کروی افزایش دمای جریان سیال ورودی از ۱۰ به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۰۹۸ تا ۰/۱۶ را در پی داشته است. در واقع با افزایش ۳ برابری دمای جریان، کسر حجمی بخار افزایش ۶۰ درصدی خواهد داشت. از طرفی در شیر پروانه‌ای در دمای ۱۰ درجه تقریباً مقدار حباب تولید شده صفر است. با افزایش دما از ۱۰ به ۳۰ درجه، مقدار متوسط کسر حجمی بخار آب از ۰/۲۲ می‌رسد. در واقع این بررسی نشان از این نتیجه می‌دهد که شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی حساسیت بیشتری نسبت به دما برای بروز پدیده کاویتاسیون خواهد داشت. در واقع در صنایعی که دمای سیال دارای تغییرات ناگهانی باشد، استفاده از شیرهای کروی نسبت به شیرهای پروانه‌ای در اولویت خواهد بود. به منظور بررسی تأثیر فشار اختلاف فشار ورودی و خروجی بر روی متوسط کسر حجمی بخار آب، جدول (۲) برای شیر کروی و پروانه‌ای در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد تهیه شده است.



شکل ۱۱ متوسط کسر حجمی بخار آب بر حسب دما

Re_{θ} برای شیر پروانه‌ای توانستند پیش‌بینی‌های دقیقی از بروز کاویتاسیون و رفتار جریان ارائه دهند.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که حساسیت شیر پروانه‌ای به نوسانات دمایی نسبت به شیر کروی بیشتر است. در مقابل، شیر پروانه‌ای در مقایسه با شیر کروی در مواجهه با افت فشارهای زیاد کسر حجمی بخار کمتری تولید می‌کند که این ویژگی برای کاربردهای صنعتی که افت فشار جزئی از پروسه کنترل جریان است می‌تواند انتخاب شیر پروانه‌ای را توجیه‌پذیرتر کند. در نهایت، شبیه‌سازی‌ها نشان داد که شیر پروانه‌ای نسبت به شیر کروی از نظر عملکرد در برابر نوسانات فشار، به‌ویژه در شرایط صنعتی خاص، ویژگی‌های برجسته‌تری دارد. به‌طور کلی این تحقیق به درک بهتر رفتار جریان و بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای صنعتی کمک کرده و می‌تواند راهنمایی برای انتخاب بهینه نوع شیر و شرایط عملیاتی در صنایع مختلف باشد و تمایز اصلی در این پژوهش، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عددی پیشرفته و تحلیل دقیق‌تر پارامترهای عملیاتی به‌منظور بهینه‌سازی طراحی شیرها و کاهش خسارات کاویتاسیون است.

۴- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

P	فشار (Pa)
U	سرعت (m/s)
R	شعاع (m)
K	ضریب پلی تروپیک
A	مساحت (m^2)
V	حجم (m^3)
x	کیفیت
F	نیرو (N)
S	سطح مقطع (m^2)
T	دما ($^{\circ}C$)
Q	دبی حجمی (m^3/s)

علائم یونانی

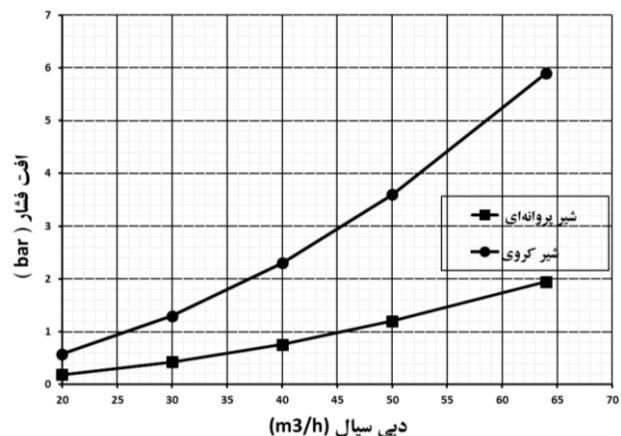
γ	تنش کششی سیال
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت ($kg/(m \cdot s)$)
Ω	سرعت زاویه‌ای (rad/s)
ϵ	کسر حجمی همگن

زیرنویس‌ها

g	گاز
v	بخار
∞	جریان آزاد
0	اولیه
b	حباب
l	مایع
tur	مغشوش

نتایج حاکی از گرایش رژیم جریان در شیر کروی از حالت آرام به مغشوش با افزایش درصد بازشدگی از ۴۰ به ۸۰ درصد دارد. این درحالی است که برای شیر پروانه‌ای تغییر رژیم جریان از جریان آرام به آشفته چنین تغییری مشاهده نمی‌شود. در واقع از این بررسی نتیجه می‌شود که شیر پروانه‌ای نسبت به تغییر رژیم جریان و بروز کاویتاسیون در اثر درصد بازشدگی مختلف، حساسیت کمتری خواهد داشت.

بررسی تغییرات افت فشار با دبی (شکل ۱۳)، نشان می‌دهد که افت فشار در شیر کروی به دلیل مسیر پیچیده‌تر، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از شیر پروانه‌ای است و با افزایش دبی، این اختلاف شدیدتر می‌شود. در دبی ۶۴ مترمکعب بر ساعت، افت فشار در شیر کروی تقریباً سه برابر بیشتر از شیر پروانه‌ای است. بنابراین، شیر پروانه‌ای به دلیل افت فشار کمتر، برای کاهش تلفات فشار مناسب‌تر است، در حالی که شیر کروی برای کنترل دقیق جریان کاربرد دارد، هرچند افت فشار بیشتری ایجاد می‌کند. انتخاب نوع شیر باید با در نظر گرفتن تغییرات دبی، فشار مجاز و نیازهای عملیاتی انجام شود.



شکل ۱۳ تغییرات افت فشار جریان در دبی‌های مختلف

۲- نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌طور کلی به بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای کروی و پروانه‌ای در جریان سیالات صنعتی پرداخته است. در این راستا، فرمولاسیون‌های مرتبط با شبیه‌سازی عددی جریان، مدل‌های اغتشاشی و پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که انتخاب پارامترهای مناسب در شبیه‌سازی جریان، مانند تعداد سلول‌های مش و مدل‌های اغتشاشی، تأثیر چشمگیری در دقت پیش‌بینی‌های عددی داشته است. به‌ویژه مدل اغتشاشی $k-\omega$ برای شیر کروی و مدل γ

L آرام
onset شروع کننده پدیده کاویتاسیون
in ورودی
out خروجی

butterfly valves and comparing results with AWWA C504 standard recommendations,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 9, pp. 2799–2806, Sep. 2012,
<https://doi.org/10.1007/s12206-012-0733-8>.

[9] G. Gao, S. Guo, D. Li, “A review of cavitation erosion on pumps and valves in nuclear power plants” , *Materials*, vol. 17, no. 5, pp1007, Feb. 2024,
<https://doi.org/10.3390/ma17051007>.

[10] X. Xu, L. Fang, A. Li, Wang Z, Li S, “Numerical analysis of the energy loss mechanism in cavitation flow of a control valve,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1;174:121331., Aug. 2021,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121331>.

[11] A. Fiala and E. Kügeler, “ROUGHNESS MODELING FOR TURBOMACHINERY.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://torroja.dmt.upm.es/congresos/asme_2011/dat_a/pdfs/trk-30/GT2011-45424.pdf.

[12] T. Leino, K. T. Koskinen, and M. Vilenius, “CFD-Modelling of a water hydraulic poppet valve - Comparison of different modelling parameters,” Tampere University Research Portal, pp. 277–286, 2025, Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/cfd-modelling-of-a-water-hydraulic-poppet-valve-comparison-of-dif>.

[13] M.-J. Chern, C.-C. Wang, and C.-H. Ma, “Performance test and flow visualization of ball valve,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, no. 6, pp. 505–512, May 2007,
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.04.019>

[14] L. Xiumei, H. Jie , L. Beibei, Z. Chi, X. Huawen, L. Wei, X. Fangwei, “Study on unsteady cavitation flow and pressure pulsation characteristics in the regulating valve,” *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1):6620087. doi:
<https://doi.org/10.1155/2021/6620087>.

[15] T. Koivula, A. Ellman, and M. Vilenius, “EXPERIENCES ON CAVITATION DETECTION METHODS.” Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.imeko.org/publications/wc-2000/IMEKO-WC-2000-TC9-P239.pdf>.

[16] M. H. Tofighi, H. Sazegar, F. Najafi, and S. S. Hossein, “Modeling and Experimental Identification of a Rotary Servo-Hydraulic System in Presence of Noise and Structural Uncertainties,” *Journal of Control*, vol. 3, no. 4, pp. 1–10, Mar. 2010, Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://joc.kntu.ac.ir/browse.php?a_id=149&sid=1&slc_lang=en.

[1] T. Kerh, J. J. Lee, and L. C. Wellford, “Transient Fluid-Structure Interaction in a Control Valve,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 119, no. 2, pp. 354–359, Jun. 1997,
<https://doi.org/10.1115/1.2819141>.

[2] T. Požar, Ž. Pirc, E. Susič, and R. Petkovšek, “Simplified detection of cavitation threshold in control valves,” *Applied Acoustics*, vol. 165, p. 107320, Aug. 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107320>.

[3] H. Yang, W. Wang, K. Lu, and Z. Chen, “Cavitation reduction of a flapper-nozzle pilot valve using continuous microjets,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 133, pp. 1099–1109, Apr. 2019,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.008>.

[4] B. Liu, J. Zhao, and J. Qian, “Numerical analysis of cavitation erosion and particle erosion in butterfly valve,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 80, pp. 312–324, Oct. 2017,
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.045>.

[5] I. R. Chinyaev, A. V. Fominykh, and E. A. Pochivalov, “Method for Determining of the Valve Cavitation Characteristics,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 260–265, Aug. 2016, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.759>.

[6] X. Guan Song, Y. Park, and S. Korea, “Numerical Analysis Of Butterfly Valve-Prediction Of Flow Coefficient And Hydrodynamic Torque Coefficient.” Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.iaeng.org/publication/WCECS2007/WCECS2007_pp759-763.pdf.

[7] G. Ibrahim, Z. Al-Otaibi, and H. Ahmed, “An Investigation of Butterfly Valve Flow Characteristics Using Numerical Technique,” *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, vol. 3, no. 2, pp. 151–166, 2013, Available: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=51c31a5ce36a1e4d5649934f4f787efd0828ae5c>.

[8] Farid Vakili-Tahami, M. Zehsaz, Mahdi Mohammadpour, and A. Vakili-Tahami, “Analysis of the hydrodynamic torque effects on large size

۵- مراجع

- [21] Md. M. Karim and M. S. Ahmmed, "Numerical study of periodic cavitating flow around NACA0012 hydrofoil," *Ocean Engineering*, vol. 55, pp. 81–87, Dec. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.06.034>.
- [22] M. Dular, R. Bachert, B. Stoffel, and B. Širok, "Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 24, no. 4, pp. 522–538, Jul. 2005, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2004.10.004>.
- [23] A. Fiala and E. Kügeler, "ROUGHNESS MODELING FOR TURBOMACHINERY." Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: https://torroja.dmt.upm.es/congresos/asme_2011/data/pdfs/trk-30/GT2011-45424.pdf.
- [24] G. Brett, M. Riveland, T. C. Jensen, and T. J. Heindel, "Cavitation From a Butterfly Valve: Comparing 3D Simulations to 3D X-Ray Computed Tomography Flow Visualization," " *Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Jan. 2011, <https://doi.org/10.1115/ajk2011-33003>.
- [17] D. Habibnejad, P. Akbarzadeh, A. Salavatipour, V. Gheshmipour, "Cavitation reduction in the globe valve using oblique perforated cages: A numerical investigation," *Flow Measurement and Instrumentation*, 1;83:102110, Mar. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102110>.
- [18] Z. Mazur, L. M. Palacios, and G. Urquiza, "Numerical modeling of gland seal erosion in a geothermal turbine," *Geothermics*, vol. 33, no. 5, pp. 599–614, Oct. 2004, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.12.003>.
- [19] L. Romagnuolo, E. Frosina, A. Amoresano, G. Quaremba, M. Spirto, A. Senatore, "Instability measurement of cavitation conditions in a spool valve through the definition of a cavitation instability index," *Flow Measurement and Instrumentation*, 91:102366., Jun. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102366>.
- [20] D. Li, M. Grekula, and P. Lindell, "Towards numerical prediction of unsteady sheet cavitation on hydrofoils," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 22, no. S1, pp. 699–704, Oct. 2010, [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(10\)60024-8](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(10)60024-8).