



The University of Tehran Press

Modeling and Comparison of the Effect of Surface Roughness in Ball and Butterfly Valves on Cavitation Formation and Energy Loss in the National Gas Distribution Network

Masoud Dorfeshan^{1*} | Sadegh Sotoudeh² | Mohsen Dorfeshan³

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran. Email: m.dorfeshan@gmail.com

2. Msc. Student, Energy Systems engineering, Khatam Al-Anbia University of Technology, Behbahan, Iran; Senior Engineer at Behbahan Gas Distribution Company. Email: Sadeghsetoodeh888@gmail.com

3. Senior Engineer at south pars gas complex. Email: mohsen_dorfeshan@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received 20 November 2024

Revised 20 December 2024

Accepted 19 January 2025

Published Online 18 March 2025

Keywords:

Surface Roughness,
Cavitation,
Industrial Valves,
Numerical Simulation,
Energy Loss.

ABSTRACT

Industrial valves, particularly ball and butterfly valves, play a crucial role in flow and pressure control within gas distribution networks. One of the major operational challenges in these valves is cavitation, which occurs due to a drop in fluid pressure inside the valve, leading to severe damage to internal surfaces and reduced service life. This study models and analyzes the impact of surface roughness on cavitation formation in ball and butterfly valves used in gas distribution systems. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted under identical conditions to examine the influence of surface roughness on cavitation intensity. The results indicate that increased surface roughness creates localized stress concentrations in the flow, making these regions more prone to severe cavitation, particularly in valves with rougher surfaces. Additionally, variations in valve geometry, surface roughness, inlet pressure, and fluid temperature significantly affect cavitation distribution and intensity. These findings highlight the potential for optimizing valve design to minimize cavitation damage, enhance durability, and reduce maintenance costs in gas distribution systems.

Cite this article: Dorfeshan, M.; Sotoudeh, S. & Dorfeshan, M. (2025). Modeling and Comparison of the Effect of Surface Roughness in Ball and Butterfly Valves on Cavitation Formation and Energy Loss in the National Gas Distribution Network. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (2), 139-155. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390078.1119>



© Masoud Dorfeshan, Sadegh Sotoudeh, Mohsen Dorfeshan
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390078.1119>

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Industrial valves are essential components in fluid control systems, used in industries like oil, gas, petrochemicals, and power plants for flow regulation and pressure control. Proper valve performance depends on design, material selection, and hydrodynamic factors. A major challenge is cavitation, which occurs when pressure drops in the fluid, causing vapor bubbles to form and burst. This leads to noise, vibration, internal surface damage, and increased maintenance costs. Studies show that factors like inlet pressure, fluid temperature, and valve geometry affect cavitation. Surface roughness also plays a significant role in initiating and spreading cavitation. While advancements in fluid flow simulation exist, the impact of surface roughness hasn't been fully explored. Controlling roughness can reduce cavitation damage and improve valve efficiency. This paper reviews studies on surface roughness and its effect on cavitation, aiming to optimize valve design and reduce maintenance costs.

Cavitation remains a key challenge in improving valve performance, and various studies have been conducted to mitigate its effects.

Materials and methods

This study evaluates cavitation performance in butterfly and ball valves using an 8-inch valve size for comparison. The Rayleigh model is used to describe bubble motion during cavitation, factoring in fluid velocity, pressure gradients, and Reynolds number. Surface roughness plays a key role in initiating cavitation, with roughness values ranging from 100 to 1000 micrometers depending on the flow regime. Numerical flow modeling is performed using ANSYS Workbench, with refined grid generation in critical areas like walls and stagnation points. Boundary conditions include defining inlet pressure, temperature, turbulence, and mass flow at the outlet. The rotating reference frame method is used for valve and housing movement. The study focuses on simulating cavitation and its impact on valve performance, highlighting the effects of surface roughness and fluid dynamics.

Results

This research demonstrates that the internal surface roughness of industrial valves influences cavitation differently depending on the valve type. For ball valves, increasing roughness has a minimal effect on cavitation intensity across various scales, with factors such as flow speed, pressure, and valve geometry being more significant. In contrast, butterfly valves show a notable increase in vapor volume fraction and cavitation intensity with higher surface roughness, especially at the inlet and outlet, where the flow is more responsive to changes in roughness. Lowering surface roughness, particularly at these critical points, helps reduce cavitation and prolongs equipment life. Furthermore, butterfly valves are more reactive to roughness changes, exhibiting greater fluctuations in vapor formation. Numerical analysis and graphs indicate that in butterfly valves, roughness increases the vapor volume fraction by 15%, whereas the effect is less pronounced in ball valves. The study also revealed that a higher pressure ratio in butterfly valves enhances the mass flow rate and mitigates cavitation more effectively than in ball valves. These results underscore the significance of optimizing the internal surfaces of valves, suggesting that controlling roughness can enhance performance and minimize the negative impacts of cavitation in industrial systems.

Discussion and Conclusion

This study shows that surface roughness affects cavitation differently in ball and butterfly valves. In ball valves, roughness has little impact on cavitation, with factors like flow speed and pressure playing a bigger role. However, in butterfly valves, increased roughness significantly raises vapor volume fraction and cavitation intensity, especially at the inlet and outlet. Reducing roughness can help lower cavitation and extend equipment life. Butterfly valves are more sensitive to roughness changes, showing greater fluctuations in vapor production. The study emphasizes that optimizing surface roughness can improve valve performance and reduce cavitation effects in industrial systems.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

مدل‌سازی و مقایسه اثر زبری سطوح شیرهای توپی و پروانه‌ای در ایجاد کاویتاسیون و هدررفت انرژی در شبکه گازرسانی کشور

مسعود درفشان^{۱*} | صادق ستوده^۲ | محسن درفشان^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان، ایران. رایانامه: m.dorfeshan@gmail.com
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا، بهبهان، ایران؛ مهندس ارشد شرکت توزیع گاز بهبهان. رایانامه: Sadeghsetoodeh888@gmail.com
۳. مهندس ارشد مجتمع گاز پارس جنوبی. رایانامه: mohsen_dorfeshan@yahoo.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

کلیدواژه:

زبری سطح،

کاویتاسیون،

شیرهای صنعتی،

شبیه‌سازی عددی،

هدررفت انرژی.

شیرهای صنعتی، به‌ویژه انواع توپی و پروانه‌ای، در فرایندهای کنترل جریان و فشار در صنایع مختلف، نظیر گازرسانی، نقش حیاتی دارند. از مهم‌ترین چالش‌های عملکردی این شیرها، پدیده کاویتاسیون است که به دلیل کاهش فشار سیال درون شیر رخ می‌دهد و می‌تواند به آسیب‌های جدی به سطوح داخلی شیرها و کاهش عمر مفید آن‌ها منجر شود. این مقاله به بررسی و مدل‌سازی اثرات زبری سطوح داخلی شیرهای توپی و پروانه‌ای بر پدیده کاویتاسیون در شبکه‌های گازرسانی پرداخته است. تحقیق حاضر به طور خاص به تأثیر زبری سطوح داخلی شیرها بر ایجاد و شدت کاویتاسیون می‌پردازد. در این راستا، شیرهای توپی و پروانه‌ای با ابعاد مشابه انتخاب و تحت شرایط یکسان شبیه‌سازی شده‌اند. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل رفتار جریان و کاویتاسیون انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهند افزایش زبری سطح داخلی شیرها باعث ایجاد نواحی با تنش‌های متمرکز در جریان سیال می‌شود که این نواحی مستعد کاویتاسیون شدیدتر هستند. این اثر به‌ویژه در شیرهای با سطوح زبر و ناصاف بیشتر مشهود است. علاوه بر این، تغییر هندسه شیرها و بررسی پارامترهایی همچون زبری سطح، فشار ورودی و دمای سیال می‌تواند به طور قابل توجهی بر شدت و توزیع کاویتاسیون تأثیر بگذارد و در نتیجه، امکان بهینه‌سازی طراحی شیرها برای کاهش آسیب‌های ناشی از کاویتاسیون فراهم شود. این پژوهش می‌تواند به طراحی شیرهای صنعتی با عمر طولانی‌تر و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک کند و اثرات منفی کاویتاسیون را در سیستم‌های گازرسانی کاهش دهد.

استناد: درفشان، مسعود؛ ستوده، صادق و درفشان، محسن (۱۴۰۴). مدل‌سازی و مقایسه اثر زبری سطوح شیرهای توپی و پروانه‌ای در ایجاد کاویتاسیون و هدررفت انرژی در شبکه گازرسانی کشور. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۴ (۲) ۱۳۹-۱۵۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390078.1119>

© مسعود درفشان، صادق ستوده، محسن درفشان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.390078.1119>



۱. مقدمه

شیرهای صنعتی به عنوان یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های انتقال و کنترل سیال، نقشی حیاتی در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، آب‌وفاضلاب و نیروگاه‌ها ایفا می‌کنند. این شیرها انواع مختلفی دارند و انتخاب هر یک بسته به نوع سیال، فشار و شرایط عملیاتی متفاوت است. با وجود اهمیت زیاد این تجهیزات، استفاده از آن‌ها با چالش‌هایی روبه‌رو است که از مهم‌ترین آن‌ها پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون و فرسایش است. کاویتاسیون به دلیل کاهش فشار سیال در برخی نقاط شیر، باعث تشکیل حباب‌های بخار می‌شود که می‌تواند به تخریب سطوح داخلی شیر، کاهش کارایی و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری منجر شود. این چالش‌ها نیازمند طراحی دقیق‌تر و بهینه‌سازی شیرها به‌ویژه از نظر جنس، هندسه و ویژگی‌های سطحی است تا علاوه بر بهبود عملکرد، عمر مفید تجهیزات افزایش یابد. این تجهیزات در فرایندهایی نظیر تنظیم جریان، کنترل فشار و تضمین ایمنی سیستم‌ها به کار گرفته می‌شوند. انواع شیرها مانند شیرهای پروانه‌ای، توپی و گلوب بسته به نوع سیال، فشار عملیاتی و شرایط محیطی انتخاب می‌شوند و هر یک ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. عملکرد بهینه این شیرها به طراحی صحیح، انتخاب مناسب جنس و توجه به پارامترهای هیدرودینامیکی وابسته است. به عنوان مثال، یکی از مسائل کلیدی در عملکرد شیرها، کاهش افت فشار و جلوگیری از نشت سیال است که تأثیر چشمگیری بر کارایی کلی سیستم دارد. یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از شیرهای صنعتی، وقوع پدیده‌هایی نظیر حباب‌زایی و کاویتاسیون است. کاویتاسیون که بر اثر کاهش فشار سیال رخ می‌دهد، به تشکیل و ترکیدن حباب‌های بخار در مجاورت سطوح داخلی شیر منجر می‌شود. این پدیده، علاوه بر ایجاد صدا و ارتعاشات شدید، موجب تخریب سطوح داخلی، کاهش عمر مفید تجهیزات و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد شد. مطالعات متعددی در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل این پدیده انجام شده است. تحقیقات نشان داده‌اند عواملی نظیر فشار ورودی، دمای سیال و هندسه داخلی شیر بر وقوع و شدت کاویتاسیون تأثیر مستقیمی دارند. افزایش دمای سیال به افزایش فشار بخار آن منجر می‌شود که احتمال تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی را در فشارهای بالاتر افزایش می‌دهد، در حالی که دماهای پایین‌تر معمولاً باعث کاهش این احتمال می‌شوند. از سوی دیگر، هندسه داخلی شیر نقش مهمی در توزیع فشار و شدت جریان دارد؛ به عنوان مثال، در شیرهای پروانه‌ای، تغییر مسیر ناگهانی جریان و افت فشار زیاد، احتمال کاویتاسیون را افزایش می‌دهد، در حالی که در شیرهای توپی، به دلیل مسیر یکنواخت‌تر جریان، شدت کاویتاسیون کمتر است. همچنین، شیرهای زاویه‌ای و کنترلی به دلیل نقاط تمرکز جریان و افت فشار ناگهانی، مستعد کاویتاسیون بیشتری هستند.

در کنار این عوامل، زبری سطوح داخلی شیرها نیز نقش مهمی در آغاز و گسترش کاویتاسیون ایفا می‌کند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در طراحی و شبیه‌سازی عددی جریان سیال، اثر زبری سطح هنوز به صورت جامع بررسی نشده است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که سطوح زبر با ایجاد نقاط تمرکز تنش و تغییر مسیر جریان، می‌توانند تشکیل حباب‌های کاویتاسیونی را تسریع کنند. از سوی دیگر، کنترل زبری سطح می‌تواند به کاهش آسیب‌های ناشی از کاویتاسیون و بهبود عملکرد شیرهای صنعتی کمک کند؛ بنابراین، این مقاله ضمن مروری بر پژوهش‌های پیشین، به بررسی تأثیر زبری سطوح در شیرهای صنعتی و نقش آن در ایجاد یا کاهش پدیده کاویتاسیون می‌پردازد. هدف این مطالعه، ارائه راهکارهایی برای طراحی بهینه‌تر و افزایش بهره‌وری این تجهیزات است تا ضمن کاهش آسیب‌ها، هزینه‌های مرتبط با تعمیر و نگهداری نیز به حداقل برسد. پدیده کاویتاسیون در شیرهای صنعتی یکی از چالش‌های اساسی در بهینه‌سازی عملکرد این تجهیزات به شمار می‌رود. تا کنون پژوهش‌های متعددی با هدف تحلیل، پیش‌بینی و کاهش اثرات مخرب این پدیده انجام شده است. در ادامه، مطالعات برجسته در این زمینه به تفصیل بررسی خواهند شد.

سون و همکاران [۱] در حوزه پیش‌بینی دقیق ضریب جریان شیر پروانه‌ای سه‌گانه خارج از مرکز پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد اثر اصطکاک و زبری بر ضریب جریان یک شیر پروانه‌ای سه‌گانه خارج از مرکز پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان می‌دهد اثر عدد رینولدز و کاویتاسیون ناچیز است، اما زبری سطح باعث افزایش افت فشار اصطکاکی و تغییر ضریب جریان تا ۱۷ درصد در حالت کاملاً باز می‌شود. برای دقت بیشتر، شبیه‌سازی و آزمایش‌هایی که اثر زبری را در نظر می‌گیرند، توصیه می‌شوند.

یوزاوا و همکاران [۲] آزمایش‌های فرسایش کاویتاسیون را روی یک شیر زاویه‌ای با پلاگ سوزنی شکل از استیل ضد زنگ انجام دادند. فرسایش عمدتاً در ناحیه اتصال بستر رخ داد و کاهش وزن طبق یک روند توان‌محور با مدت کارکرد مرتبط بود. نقص عملکرد شیر یا آسیب سطح به پیشرفت فرسایش نسبت داده شد. پایش عملکرد شیر امکان پیش‌بینی زمان تعویض پلاگ را فراهم می‌کند. تنظیم دقیق سطح و هم‌مرکزی پلاگ با صندلی برای کاهش فرسایش ضروری است.

سونگ و پارک [۳] طی تحقیقی به تحلیل عددی جریان در شیرهای پروانه‌ای پرداختند و پارامترهای اساسی نظیر افت فشار و گشتاور هیدرودینامیکی را بررسی کردند. آن‌ها از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی بهره بردند و نشان دادند تغییر زاویه بازشدگی دیسک، تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان و فشار وارد بر بدنه شیر دارد. نتایج این تحقیق به طراحی بهینه شیرهای پروانه‌ای کمک شایانی کرد، زیرا روش‌های پیش‌بینی دقیق‌تر نسبت به داده‌های تجربی ارائه داد.

در پژوهشی دیگر، مشخصات جریان در شیرهای پروانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد. پژوهشگران اثر زوایای مختلف بازشدگی دیسک بر توزیع فشار، پروفیل سرعت، و مکانیزم‌های کاویتاسیونی را بررسی کردند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد افزایش زاویه بازشدگی باعث تغییرات قابل توجهی در نواحی فشار پایین و شدت جریان می‌شود. همچنین، این مطالعه تأثیر هندسه دیسک را بر وقوع و شدت کاویتاسیون برجسته کرد [۴]. وکیلی و همکاران [۵] طی پژوهشی بر تحلیل گشتاور هیدرودینامیکی شیرهای پروانه‌ای بزرگ متمرکز شدند و نشان دادند پارامترهایی نظیر اندازه دیسک و دبی ورودی بر گشتاور وارد بر شیر تأثیر می‌گذارند. آن‌ها با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های خود با استانداردهای AWWA^۱، به بهینه‌سازی طراحی شیرهای بزرگ‌تر برای کاربردهای صنعتی مختلف پرداختند.

کیپر و دودیا [۶] از دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل جریان در شیرهای پروانه‌ای استفاده کردند. هدف آن‌ها بررسی تغییرات افت فشار و دبی در شرایط مختلف بازشدگی بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بازشدگی بیشتر شیر به دلیل کاهش سرعت جریان و کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون، عملکرد بهتری در کاهش آسیب‌های مکانیکی دارد. دل‌تورو و همکاران [۷] به بررسی عملکرد شیرهای پروانه‌ای تحت شرایط مختلف عملیاتی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های عددی، روابط میان افت فشار، جریان آشفته، و کاویتاسیون را تحلیل کردند. یافته‌های این تحقیق به بهبود طراحی هندسه داخلی شیرها برای کاهش کاویتاسیون کمک کرد. کر و همکاران [۸] برهم‌کنش سیال و سازه در شیرهای کنترلی با استفاده از مدل‌های عددی را تحلیل کردند و تغییرات فشار و تنش‌های ایجادشده بر اثر کاویتاسیون را مورد مطالعه قرار دادند. این پژوهش اطلاعات مفیدی درباره میدان‌های تنش و نقاط بحرانی در طراحی شیرها ارائه کرد و راهکارهایی برای افزایش دوام آن‌ها پیشنهاد داد. چرن و همکاران [۹] به تحلیل تجربی و عددی جریان اطراف شیرهای تویی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و داده‌های تجربی، به محاسبه شاخص کاویتاسیون و بررسی تشکیل گردابه‌ها در نزدیکی خروجی شیر پرداختند. این تحقیق اهمیت ویژه‌ای در کاهش اثرات مخرب کاویتاسیون از طریق بهینه‌سازی جریان سیال داشت.

هونگ و همکاران [۱۰] به تحلیل جریان کاویتاسیونی در شیرهای هیدرولیکی پرداختند و کانتورهای بخار آب را در شرایط مختلف فشار و دما محاسبه و تحلیل کردند. این پژوهش بر اهمیت پارامترهایی نظیر سرعت جریان، فشار ورودی، و هندسه داخلی شیر در کاهش یا افزایش کاویتاسیون تأکید کرد. یانگ و همکاران [۱۱] طی پژوهشی روش‌های هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تشخیص کاویتاسیون در شیرهای پروانه‌ای را به کار گرفتند. پژوهشگران یادشده دقت زیاد این روش را در پیش‌بینی وقوع کاویتاسیون و تحلیل تغییرات جریان در شرایط عملیاتی مختلف نشان دادند. دیویس و استیوارت [۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل عملکرد شیرهای کنترلی پرداختند و نشان دادند ضریب ظرفیت جریان و دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی به طور مستقیم بر شدت کاویتاسیون تأثیر می‌گذارند. نتایج این تحقیق به بهینه‌سازی طراحی شیرها و کاهش آسیب‌های ناشی از کاویتاسیون کمک کرد. لینو و همکاران [۱۳] به مقایسه مدل‌های مختلف شبیه‌سازی در تحلیل جریان کاویتاسیونی پرداختند. آن‌ها نشان دادند انتخاب مدل شبیه‌سازی مناسب، دقت پیش‌بینی نواحی کاویتاسیونی و تغییرات فشار را افزایش می‌دهد. این تحقیق اهمیت مدل‌سازی دقیق در جلوگیری از تخریب ناشی از کاویتاسیون

را برجسته کرد. کوولا و همکاران [۱۴] طی پژوهشی روش‌های نوینی برای شناسایی و اندازه‌گیری کاویتاسیون در سیستم‌های هیدرولیکی را معرفی کردند. محققان از سنسورهای فشار و ابزارهای صوتی برای تجسم جریان و بررسی نوسانات ناشی از کاویتاسیون استفاده کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد تشخیص زودهنگام کاویتاسیون می‌تواند از آسیب‌های بزرگ‌تر جلوگیری کند. ژانگ و همکاران [۱۵] با استفاده از دوربین‌های پرسرعت، تکامل کاویتاسیون را در شرایط مختلف بازشدگی شیر و فشارهای متفاوت ثبت کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درجه بازشدگی شیر، حجم کاویتاسیون افزایش یافته و فرکانس جداسازی کاویتاسیون کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که گردابه‌ها باعث تجمع حباب‌های کاویتاسیون می‌شوند و توزیع آن‌ها را در میدان جریان تغییر می‌دهند. این مطالعه به درک بهتر مکانیزم‌های کاویتاسیون و ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی ساختار شیرهای پروانه‌ای در جهت کاهش اثرات منفی کاویتاسیون کمک می‌کند. وانگ و همکاران [۱۶] با ترکیب محاسبات عددی و مطالعات تجربی، تأثیر بازشدگی‌های مختلف شیر را بر توزیع نويز در میدان جریان مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد با افزایش بازشدگی شیر، نويز به ناحیه پایین‌دست گسترش می‌یابد و شدت کاویتاسیون پس از کاهش فشار شیر افزایش می‌یابد. تحلیل سیگنال‌های نويز نشان داد نويز در بازه فرکانسی گسترده‌ای توزیع شده است؛ به طوری که در بازشدگی‌های ۶۰ تا ۱۰۰ پالس، نويز عمدتاً در محدوده ۱۰ تا ۲۰ کیلوهرتز متمرکز است، در حالی که در بازشدگی‌های ۱۱۰ تا ۱۵۰ پالس، نويز از باند فرکانسی بالا به باند پایین گسترش می‌یابد. این مقاله به بررسی تجربی و عددی کاویتاسیون در شیرهای انبساط الکترونیکی می‌پردازد. نتایج تحقیقات وانگ و همکاران [۱۷] در حوزه شیرهای انبساط الکترونیکی نشان می‌دهد در بازشدگی‌های کوچک، انبساط ناگهانی به تشکیل جریان دوفازی و فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون منجر شده که باعث ایجاد نويز و کاهش کارایی سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود. برای کاهش نويز، یک ساختار شیر اسپول شیر طراحی شد که تأثیر مثبتی در کاهش آن داشت.

لی و همکاران [۱۸] با بررسی ارتباط بین کاویتاسیون و فرسایش ناشی از آن در شیرهای کنترل هیدرولیکی آب خالص تحت شرایط فشار بالا و جریان زیاد نشان دادند افزایش فشار و دبی جریان باعث تشدید کاویتاسیون و افزایش فرسایش در سطح داخلی شیر می‌شود. نتایج تحقیق ژانگ و همکاران [۱۹] نشان داد با افزایش انحنای صفحات پروانه و افزایش فشار، نوع کاویتاسیون از غیرچسبیده به چسبیده تغییر می‌کند و طول و ضخامت حباب‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، زمانی که انتهای صفحه پروانه مثلی باشد، چسبندگی حباب‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش انحنای صفحات حباب‌ها کاهش و حجم آن‌ها افزایش می‌یابد. این مطالعه به بهبود طراحی شیرهای پروانه‌ای و کاهش اثرات منفی کاویتاسیون کمک می‌کند.

وانگ و همکاران [۲۰] به بررسی مکانیزم کاویتاسیون و تحلیل خرابی در شیرهای تویی فشار قوی پرداختند و با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، تشکیل کاویتاسیون و تأثیر آن بر خرابی شیر را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد کاویتاسیون می‌تواند به آسیب‌های جدی در شیرهای تویی فشارقوی منجر شود. این مطالعه می‌تواند به بهبود طراحی و افزایش عمر مفید این نوع شیرها کمک کند. مطالعه‌ای تجربی و عددی بر ویژگی‌های تپش شبه‌دوره‌ای جریان کاویتاسیون در شیر کنترلی توسط ژو و همکاران [۲۱] انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد جریان کاویتاسیون دارای تپش‌های شبه‌دوره‌ای است که می‌تواند به نوسانات فشار و کاهش کارایی سیستم منجر شود. این مطالعه به بهبود طراحی شیرهای کنترلی و کاهش اثرات منفی کاویتاسیون کمک می‌کند. این مجموعه از پژوهش‌ها نشان‌دهنده پیشرفت‌های مهم در درک پدیده کاویتاسیون و عوامل تأثیرگذار بر آن است. از آنجا که کاویتاسیون می‌تواند به تخریب سطوح داخلی، ارتعاشات شدید، و کاهش طول عمر شیرهای صنعتی منجر شود، تحلیل دقیق‌تر پارامترهایی مانند زبری سطح داخلی، هندسه جریان، و شرایط عملیاتی ضروری به نظر می‌رسد. همچنین، استفاده از روش‌های ترکیبی تجربی و عددی در کنار مدل‌سازی‌های پیشرفته، به بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری این تجهیزات کمک خواهد کرد. بررسی‌های پیشین نشان داده‌اند پارامترهایی مانند فشار، دما، و هندسه شیرهای صنعتی، نقش مهمی در وقوع کاویتاسیون ایفا می‌کنند. با این حال، یکی از عواملی که کمتر مورد توجه قرار گرفته، زبری سطوح داخلی شیرها است که می‌تواند از طریق ایجاد تمرکز تنش و تغییر در مسیر جریان، نقش مؤثری در آغاز و گسترش پدیده کاویتاسیون داشته باشد. نوآوری تحقیق حاضر در بررسی تأثیر زبری سطوح داخلی شیرهای تویی و پروانه‌ای بر

پدیده کاویتاسیون و مدل سازی آن با استفاده از شبیه سازی های عددی است. نتایج نشان می دهد در شیرهای تویی، تغییرات زبری سطح تأثیر زیادی بر شدت کاویتاسیون ندارد و عوامل دیگری مانند سرعت جریان و فشار بیشتر مؤثر هستند. در مقابل، در شیرهای پروانه‌ای، افزایش زبری سطح باعث افزایش محسوس شدت کاویتاسیون، به ویژه در نواحی ورودی و خروجی می شود. همچنین، کاهش زبری سطح، به ویژه در این نواحی، می تواند شدت کاویتاسیون را کاهش دهد و عمر تجهیزات را افزایش دهد. این تحقیق نشان می دهد شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای تویی حساسیت بیشتری به تغییرات زبری دارند که می تواند به بهینه سازی طراحی شیرها و کاهش اثرات کاویتاسیون در سیستم های صنعتی کمک کند. در این مقاله، تمرکز اصلی بر تحلیل دقیق اثر زبری سطح داخلی شیرهای صنعتی و ارتباط آن با شدت و توزیع کاویتاسیون خواهد بود. دستاوردهای این پژوهش می تواند شامل ارائه مدل های عددی دقیق تر برای پیش بینی وقوع کاویتاسیون، شناسایی محدوده های بحرانی زبری برای کاهش این پدیده، و در نهایت بهینه سازی طراحی شیرها برای افزایش طول عمر و کارایی آنها باشد. این نتایج می توانند به طور مستقیم در کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری تجهیزات صنعتی و بهبود عملکرد سیستم های انتقال سیال نقش آفرینی کنند.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق، شیرهای پروانه‌ای و تویی برای ارزیابی پارامترهای عملکردی پدیده کاویتاسیون انتخاب شده اند. برای این منظور، از شیر با سایز ۸ اینچ استفاده شده و به منظور انجام مطالعه مقایسه ای با شیر تویی، هندسه دهانه شیر تویی نیز با همین ابعاد تعیین شده است.

۲-۱. معادلات توصیف کننده حرکت حباب هنگام بروز پدیده کاویتاسیون

در یک میدان جریان، مدل رایلی می تواند برای توصیف رفتار یک حباب کروی مورد استفاده قرار بگیرد [۲۲]:

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

اگر رفتار حباب بدون در نظر گرفتن حرارت اتلافی در نظر گرفته شود، مقدار $K=0.25$ خواهد بود. در رابطه ۱، فرضیاتی همچون تراکم ناپذیری سیال، یکنواختی فشار و دمای درون حباب و چشم پوشی از انتقال جرم به داخل حباب در نظر گرفته شده است. اگر تغییرات در شعاع حباب نیز لحاظ شود، معادله حرکت با رابطه ۲ قابل توصیف است [۲۳]:

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

ضریب C_D نیز عبارت است از [۲۴]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + 0.197 Re^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re^{1.38} \right) \quad (3)$$

عدد بی بعد رینولدز به ترتیب زیر تعریف می شود (رابطه ۴):

$$Re = \frac{2R |\vec{U} - \vec{U}_b|}{\mu} \quad (4)$$

با استفاده از رابطه ۲، معادله حرکت حباب به صورت معادله ۵ بازنویسی خواهد شد:

$$\frac{d\vec{U}_b}{dt} = 2g \vec{j} - \frac{3}{\rho} \nabla p + \frac{3}{4} \frac{C_D}{R} (\vec{U} - \vec{U}_b) |\vec{U} - \vec{U}_b| \quad (5)$$

۲-۲. معادلات جریان

در جریان پایا که خواص فیزیکی سیال تابع دما است، معادله بقا جرم، بقا مومنتوم و انرژی به صورت رابطه ۶ خواهد بود. معادله بقای جرم:

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (6)$$

معادله بقای مومنتوم (رابطه ۷):

$$\text{div}(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\text{grad}P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) \quad (7)$$

معادله بقای انرژی (رابطه ۸):

$$\text{div}(\rho \vec{V} C_p T) = \text{div}(k \text{grad}T) \quad (8)$$

با توجه به اینکه جریان کاویتاسیون 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 روابط ۹ و ۱۰ 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 مرتبط با چگالی، ε_H کمیتی به نام کسر حجمی همگن^۱ بوده و به صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود [۲۵]:

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

با تعریف کمیت‌های لازم در این بخش، افت فشار ناشی از مومنتوم را می‌توان با رابطه ۱۲ بیان کرد که اختلاف انرژی جنبشی بین ورودی و خروجی سیال دوفازی را تعیین می‌کند:

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

۲-۳. مدل‌سازی پدیده کاویتاسیون

مدل‌سازی صحیح پدیده کاویتاسیون، علاوه بر تأثیر مستقیم بر تحلیل عملکرد شیرهای کنترل جریان، بر عملکرد سایر تجهیزات موجود در مدار سیالاتی، از جمله توربوماشین‌ها، نیز اثر قابل توجهی دارد. کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار موضعی به کمتر از فشار بخار سیال برسد. حضور هم‌زمان دو فاز مختلف از سیال (مانند سیال تک‌فاز تراکم‌ناپذیر مایع و بخار مایع خالص یا یک‌فاز ترکیبی تراکم‌پذیر) فرایند مدل‌سازی کاویتاسیون را پیچیده می‌سازد.

۲-۴. مدل‌سازی اثر زبری سطوح شیرهای صنعتی در ایجاد کاویتاسیون

مقادیر زبری به کاررفته با توجه به مطالعات پیشین [۲۶ و ۲۷] ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومتر برای رژیم جریان گذار، ۳۰۰ میکرومتر برای اندکی پس از رژیم جریان گذار و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومتر برای ناحیه کاملاً زبر در نظر گرفته شده است. شاخص زبری با ضریب k_{eq}^+ به ترتیب زیر نشان داده می‌شود [۲۷].

$$k_{eq}^+ = U_\tau \frac{k_{eq}}{g} \quad (13)$$

U_τ پروفیل سرعت و g لزجت سینماتیکی است. بر این اساس، سه نوع رژیم جریان معرفی می‌شود:

(الف) ناحیه هیدرودینامیکی صاف:

$$k_{eq}^+ = U_\tau \frac{k_{eq}}{g} \leq 5 \quad (14)$$

در این ناحیه هیچ اثری از زبری روی جریان مشاهده نمی‌شود. به بیانی، ضریب اصطکاک تنها تابعی از عدد رینولدز متوسط جریان است.

(ب) ناحیه گذار:

$$5 \leq k_{eq}^+ = U_{\tau} \frac{k_{eq}}{g} \leq 70 \quad (۱۵)$$

در این حالت یک نوع افزایش در مقاومت جریان سیال مشاهده می‌شود. این رژیم را به اصطلاح رژیم جریان گذرا می‌نامند. این حالت مربوط به مواقعی است که برجستگی عناصر زبری، زیرلایه لزج را پوشش می‌دهند و مقاومت اضافی ایجاد می‌کنند. (ج) ناحیه زبر:

$$k_{eq}^+ = U_{\tau} \frac{k_{eq}}{g} \geq 70 \quad (۱۶)$$

در این حالت افزایش بیشتری در مقاومت مقابل جریان ایجاد می‌شود. این رژیم را به اصطلاح رژیم کاملاً زبر می‌نامند و ویژه مواقعی است که اندازه برجستگی‌های زبری بسیار بزرگ‌تر از زیرلایه لزج و ناحیه گذار است.

۲-۵. مدل سازی عددی جریان در شیرهای صنعتی

ساخت مدل سه بعدی و شبکه بندی مدل در نرم افزار انسیس ورک بنچ^۱ انجام شده است. همه قطعات شیرهای صنعتی از فولاد ضد زنگ ماشین کاری ساخته شده است. خصوصیات کلی شبیه سازی جریان در شیر صنعتی در جدول ۱ آمده است. برای شبیه سازی درصدهای مختلف بازشدگی شیر، مدل تویی و پروانه طراحی شده از شیرهای تویی و پروانه ای با نرم افزار سالیدورک^۲ برای پیکربندی های مختلف دوران داده شده و سپس به نرم افزار انسیس فلونت وارد شده است. به منظور روشن شدن این پیکربندی جدید در شکل ۱ ترسیم شده است.

معمولاً تولید شبکه از مهم ترین و زمان برترین بخش های یک شبیه سازی عددی است. در بررسی توابع نرم افزار انسیس، اغلب آن ها در نزدیکی سطوح به خوبی قادر به تحلیل جریان نیستند، به همین دلیل در نقاط حساس مانند نزدیکی دیواره ها، اطراف سوراخ ها، نواحی جدایش جریان، روی نقاط سکون و نقاط مورد توجه برای خنک کاری به دلیل ایجاد بی نظمی های کنار سطح و به منظور تحلیل درست رفتار جریان و همچنین، دستیابی به نتایج با دقت بیشتر، از شبکه ریزتری استفاده شده است. در این نواحی اندازه شبکه های ایجاد شده با نرخ ۵۰ درصد افزایش می یابد. شرایط مرزی برای شبیه سازی جریان عبارت اند از:

الف) تعریف پروفیل فشار کل و دمای کل ورودی. جهت جریان در ورودی به صورت عمود بر سطح و بدون پیش چرخش فرض شد و از شدت توربولانس به مقدار ۵ درصد به عنوان پارامتر ورودی استفاده شد.

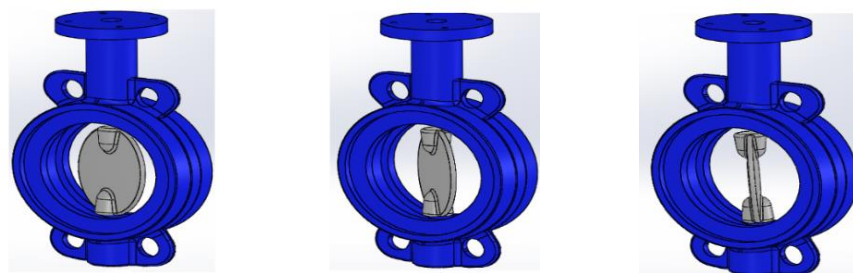
ب) دبی جرمی در خروجی.

ج) تعریف شرط مرزی تمام دیواره های ساکن و چرخان به صورت آدیاباتیک و عدم لغزش برای بردارهای سرعت.

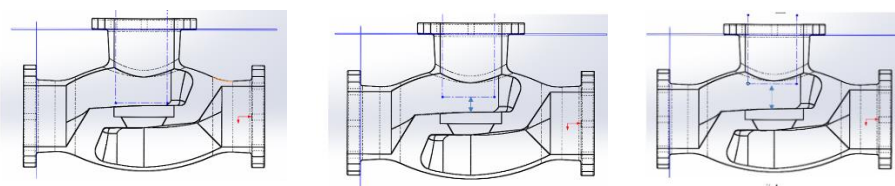
د) استفاده از روش دستگاه مختصات چرخان برای در نظر گرفتن حرکت نسبی دریچه و محفظه شیر صنعتی. در مرز مشترک بین دریچه و محفظه شیر صنعتی شرط مرزی اختلاط تعریف شده است [۱۲].

در این روش، منطقه محاسباتی به دو بخش ثابت (پوسته) و متحرک (دریچه) تقسیم می شود و هر یک از این نواحی به طور مستقل به عنوان یک مسئله دائم حل می شوند. در این میان، خواص جریان در صفحه اختلاط و در جهت محیطی، روی خروجی دریچه و ورودی نازل، به طور میانگین محاسبه می شود و سپس، از یک ناحیه به ناحیه دیگر منتقل می شود. در بخش چرخان، معادلات به روزرسانی شده و شتاب گریز از مرکز و شتاب کوریولیس نیز به آن ها افزوده می شود.

ه) چون شیر متقارن محوری است، از شرایط مرزی متناوب برای دریچه و نازل استفاده شد. یعنی می توان با استفاده از شرایط مرزی متناوب تنها یک تکرار از مراحل حل را شبیه سازی کرد.



الف) پروانه‌ای



ب) توپی

۲۰٪

۴۰٪

۸۰٪

شکل ۱. درصد‌های مختلف بازشدگی شیر

جدول ۱. مشخصات مرزی جریان ورودی و خروجی شیرهای صنعتی مورد استفاده در تحقیق

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

برای حل معادلات حاکم، نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود عمل می‌کند. 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 به منظور به دست آوردن معادلات تصحیح فشار و سرعت، الگوریتم سیمپل^۱ به کار رفته است. دقت حل برای معادله انرژی 10^{-6} و برای دیگر معادلات 10^{-3} در نظر گرفته شده است. با توجه به تأثیر پارامترهای زبری بر رژیم جریان عبوری از شیرهای صنعتی و بروز پدیده کاویتاسیون، در این بخش برای سه نوع زبری مختلف پروانه و توپی مطابق با جدول ۲، مقادیر متوسط کسر حجمی بخار و حباب‌زایی در جریان در نسبت موقعیت ذره به طول کل حجم کنترل X/C برداشت شده است. طبق نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده و بر اساس شکل ۲ مشاهده می‌شود که افزایش مقدار زبری سطح داخلی شیر توپی، به طور قابل توجهی تأثیر زیادی بر بروز پدیده کاویتاسیون در نسبت‌های طولی مختلف حجم کنترل جریان در شیر نداشته است. به بیان دیگر، علی‌رغم افزایش مقدار زبری که می‌تواند شرایط هیدرودینامیکی جریان را تحت تأثیر قرار دهد، این تغییرات در مقیاس‌های مختلف طولی درون شیر تأثیری بر آغاز یا شدت پدیده کاویتاسیون ندارد و روند تغییرات در این پدیده نسبت به زبری سطح تغییرات چشمگیری را نشان نمی‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد سایر عوامل مانند سرعت جریان، فشار و ویژگی‌های هندسی شیر، ممکن است اثرات بیشتری نسبت به زبری سطح بر بروز کاویتاسیون در شرایط خاص جریان در شیر توپی داشته باشند. از طرفی، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند بیشتر تفاوت‌ها و تغییرات مشاهده‌شده در تولید کسر

متوسط حجمی بخار، به طور عمده با ویژگی‌ها و شرایط جریان در دهانه‌های ورودی و خروجی شیر ارتباط دارند، به طوری که در این مناطق تغییرات محسوسی در مقادیر کسر حجمی بخار مشاهده می‌شود. این تفاوت‌ها به دلیل تغییرات در فشار و سرعت جریان در این نواحی است که می‌تواند باعث تشکیل یا افزایش حباب‌های بخار در این مناطق شود. در مقابل، در نواحی میانی و اواسط شیر که جریان در آن‌ها به نسبت هموارتر و یکنواخت‌تر است، تغییرات چندانی در مقادیر کسر حجمی بخار مشاهده نمی‌شود. این امر نشان می‌دهد تأثیر فیزیکی دهانه‌های ورودی و خروجی در ایجاد و کنترل پدیده کاویتاسیون و تولید بخار در جریان داخل شیر بیشتر از نواحی میانه است که در آن تغییرات جریان به صورت متوازن‌تری رخ می‌دهند. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل‌ها و آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند زبری سطح ۱۰ میکرومتر (مدل B) در مقایسه با سطوح زبری کمتر، حساسیت بیشتری را برای بروز پدیده کاویتاسیون در نواحی دهانه‌های ورودی و خروجی شیر از خود نشان داده است. این امر به وضوح نشان می‌دهد با افزایش زبری سطح، شرایطی برای تشکیل حباب‌های بخار در این نواحی فراهم می‌شود که به شدت بر فرایند کاویتاسیون تأثیر می‌گذارد. در واقع، زبری بیشتر موجب افزایش شدت آشفته‌گی جریان و کاهش فشار در نقاط مختلف می‌شود که این خود شرایط لازم برای شروع کاویتاسیون را فراهم می‌کند. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقادیر زبری سطح داخلی شیر، به‌ویژه در نواحی ورودی و خروجی، می‌تواند به طور مؤثری در کاهش روند شروع تولید حباب‌های هوا و کاهش وقوع کاویتاسیون در جریان تأثیرگذار باشد. این کاهش زبری ممکن است به بهبود عملکرد شیر در برابر مشکلات مربوط به کاویتاسیون و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از آن کمک کند. این در حالی است که بر اساس نتایج نمایش داده‌شده در شکل ۳، در شیر پروانه‌ای با افزایش مقادیر زبری سطح از ۷ میکرومتر به ۱۴ میکرومتر، متوسط کسر حجمی بخار به میزان حدود ۱۵ درصد افزایش یافته است. این افزایش قابل توجه در کسر حجمی بخار، به وضوح نشان‌دهنده حساسیت بیشتر شیرهای پروانه‌ای نسبت به تغییرات زبری سطح و تأثیرات آن بر پدیده کاویتاسیون است. در واقع، این تغییرات در شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای تویی قابل توجه‌تر و مشهودتر بوده و نشان‌دهنده این است که با افزایش زبری در شیر پروانه‌ای، احتمال تشکیل حباب‌های بخار و بروز پدیده کاویتاسیون به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که شیرها در محیط‌های دارای مواد خورنده قرار می‌گیرند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

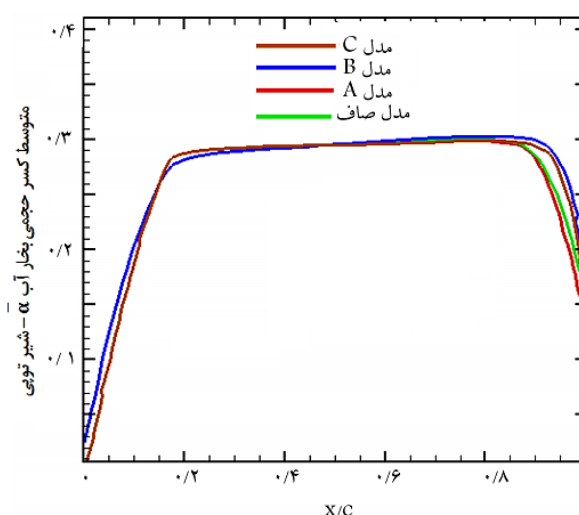
افزایش زبری سطح داخلی در شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای تویی تأثیر بیشتری بر شدت کاویتاسیون دارد، زیرا در شیرهای پروانه‌ای، جریان سیال به دلیل وجود دیسک مرکزی دچار تغییر مسیر ناگهانی می‌شود و در نواحی با فشار پایین، احتمال تشکیل و فروپاشی سریع‌تر حباب‌های کاویتاسیونی افزایش می‌یابد، در حالی که در شیرهای تویی، مسیر جریان یکنواخت‌تر بوده و توزیع فشار پایدارتر است که اثرات کاویتاسیون را کاهش می‌دهد. این تفاوت در صنایعی مانند نیروگاه‌های برق‌آبی که از شیرهای پروانه‌ای برای کنترل جریان آب به توربین‌ها استفاده می‌کنند، اهمیت بالایی دارد، زیرا افزایش زبری می‌تواند باعث تشدید کاویتاسیون و آسیب به پره‌های توربین شود. در خطوط انتقال نفت و گاز نیز زبری بیشتر در شیرهای پروانه‌ای موجب افت فشارهای ناگهانی و افزایش نرخ کاویتاسیون می‌شود که نیاز به تعمیرات مکرر را افزایش می‌دهد، در حالی که شیرهای تویی در این سیستم‌ها عملکرد پایدارتری دارند. همچنین در سیستم‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی، افزایش زبری داخلی شیرهای پروانه‌ای می‌تواند موجب افزایش کاویتاسیون، تشکیل رسوبات، خوردگی، و کاهش بازدهی سیستم شود، در حالی که شیرهای تویی به دلیل کنترل بهتر جریان، این مشکلات را کمتر تجربه می‌کنند. این یافته‌ها نشان می‌دهند در کاربردهای حساس به کاویتاسیون، کنترل زبری سطح داخلی و انتخاب نوع شیر، نقش کلیدی در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و افزایش طول عمر تجهیزات صنعتی دارد. در محیط‌های صنعتی که جریان‌های خورنده وجود دارند، سطح داخلی شیر پروانه‌ای ممکن است دچار خوردگی و فرسایش سریع‌تر شود که این امر می‌تواند تأثیرات قابل توجهی روی عملکرد شیر و پدیده‌های هیدرودینامیکی نظیر کاویتاسیون داشته باشد؛ بنابراین، استفاده از شیرهای پروانه‌ای در این شرایط نیازمند توجه ویژه به سرویس‌ها و نگهداری‌های دوره‌ای است. این سرویس‌ها می‌توانند شامل بررسی‌های منظم وضعیت سطح داخلی شیر، پاک‌سازی و اصلاح زبری آن، و همچنین بررسی سلامت و کارایی اجزای داخلی شیر باشد تا از بروز کاویتاسیون و آسیب‌های ناشی از آن جلوگیری شود.

همچنین، در مقایسه با شیر تویی، در شیرهای پروانه‌ای نوسانات بیشتری در مقادیر تولید کسر حجمی بخار مشاهده می‌شود. این

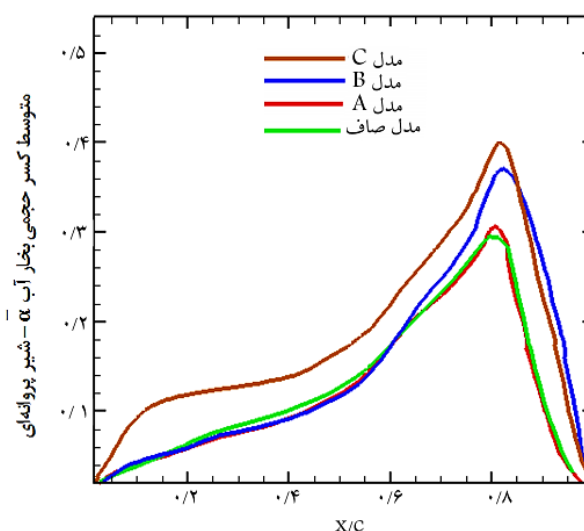
نوسانات بیشتر نشان‌دهنده پیچیدگی‌های جریان و رفتار دینامیکی شیرهای پروانه‌ای است که به واسطه طراحی خاص پروانه‌ها، جریان در این شیرها ممکن است دچار آشفتگی‌های بیشتری شود. این نوسانات در مقادیر کسر حجمی بخار می‌تواند به دلیل تغییرات شدید فشار و سرعت جریان در طول مسیر عبور سیال از شیر و همچنین، تغییرات زبری سطح داخلی شیر در نواحی مختلف باشد. این نوسانات می‌تواند تأثیرات زیادی بر عملکرد سیستم‌های صنعتی داشته باشد و در برخی موارد به مشکلاتی نظیر ایجاد لرزش‌های اضافی یا حتی آسیب به دیگر اجزای سیستم منجر شود؛ بنابراین، در شیرهای پروانه‌ای، علاوه بر حساسیت بیشتر به عوامل خوردگی، نیاز به توجه بیشتری به طراحی و انتخاب مواد مناسب برای سطح داخلی شیر در شرایط خورنده احساس می‌شود. همچنین، به دلیل نوسانات بیشتر در مقادیر کسر حجمی بخار و رفتار پیچیده‌تر جریان، پیشنهاد می‌شود که این نوع شیرها تحت بررسی‌های دقیق‌تری قرار گیرند تا بتوانند عملکرد مطلوب‌تری طی زمان و در شرایط مختلف عملیاتی ارائه دهند.

جدول ۲. ارتفاع سطوح زبر در نظر گرفته شده در شیرهای تویی و پروانه‌ای

مدل	صاف	A	B	C
(μm) ارتفاع زبری	۰	۷	۱۰	۱۴

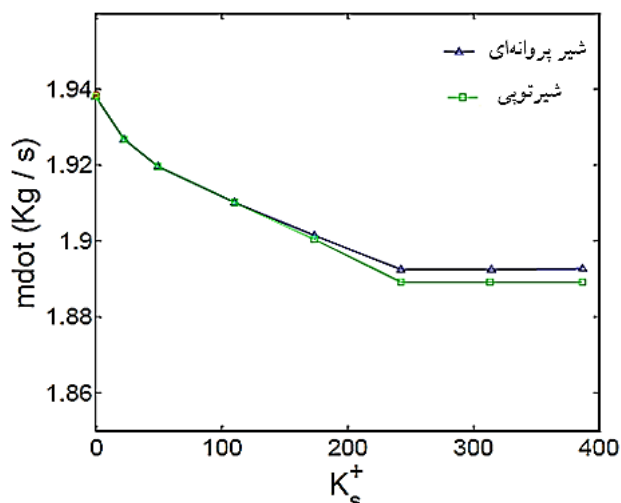


شکل ۲. کسر حجمی بخار برای مدل‌های زبری مختلف شیر تویی

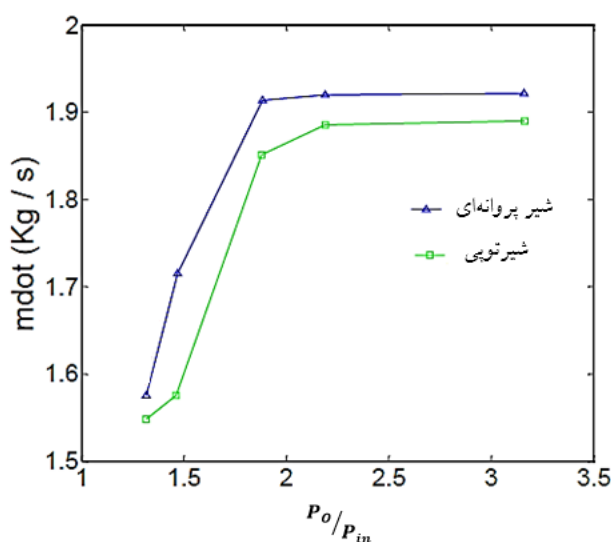


شکل ۳. کسر حجمی بخار برای مدل‌های زبری مختلف شیر پروانه‌ای

به منظور بسط نتایج مرتبط با بروز پدیده کاویتاسیون در شیرهای توپی و پروانه‌ای، شکل ۴ ترسیمی از تأثیر شاخص زبری بر افت دبی دو شیر تحت بررسی در این تحقیق ارائه داده است. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که افزایش زبری بر افت دبی جرمی شیر پروانه‌ای تأثیر کمتری داشته است. به بیان دیگر، حساسیت شیر پروانه‌ای نسبت به زبری نسبت به شیر توپی بیشتر است. همچنین، شکل ۵ تأثیر نسبت بین فشار خروجی به فشار ورودی در افزایش دبی جرمی سیال دارای حباب‌زایی در شیرهای توپی و پروانه‌ای را مقایسه کرده است. مطابق با این تحلیل، با افزایش نسبت فشار خروجی به ورودی در شیر پروانه‌ای، دبی جرمی در شیر پروانه‌ای رشد بیشتری داشته است. بنابراین می‌توان با افزایش نسبت بین فشار خروجی به ورودی در شیر پروانه‌ای به دبی‌های جرمی بیشتری دست یافت که تأثیر پدیده کاویتاسیون را به حداقل ممکن برساند.



شکل ۴. تغییرات دبی ناشی از زبری در شیرهای توپی و پروانه‌ای



شکل ۵. تغییرات دبی جرمی ناشی از تغییر نسبت فشار خروجی به ورودی

این نمودار تغییرات دبی جرمی را بر حسب نسبت فشار خروجی به ورودی (P_o/P_{in}) برای دو نوع شیر صنعتی، یعنی شیر پروانه‌ای و شیر توپی، نشان می‌دهد. محور افقی نسبت فشار خروجی به فشار ورودی را نمایش می‌دهد، در حالی که محور عمودی نرخ دبی جرمی را بر حسب کیلوگرم بر ثانیه مشخص می‌کند.

داده‌ها نشان می‌دهند در مقادیر پایین نسبت فشار ($P_o/P_{in} < 2$) دبی جرمی هر دو شیر به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، اما این افزایش در شیر پروانه‌ای با شیب بیشتری همراه است. این امر نشان می‌دهد جریان در شیر پروانه‌ای به نسبت فشار

حساس‌تر است و زبری سطح در این محدوده تأثیر کمتری بر کاهش دبی جرمی دارد. در مقابل، شیر توپی در همین بازه دبی جرمی کمتری ارائه می‌دهد که می‌تواند ناشی از تأثیر بیشتر زبری سطح بر رفتار جریان در این نوع شیر باشد. با افزایش نسبت فشار ($Po/Pin > 2$)، روند تغییرات دبی جرمی هر دو شیر کاهش می‌یابد و به یک مقدار تقریباً ثابت نزدیک می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد جریان در شرایط فشار بالاتر به حالت اشباع می‌رسد و تأثیر زبری سطح در این شرایط محدودتر می‌شود. با این حال، دبی جرمی شیر پروانه‌ای همچنان اندکی بالاتر از شیر توپی باقی می‌ماند. علاوه بر این، در مقادیر فشار پایین‌تر، اختلاف دبی جرمی میان دو نوع شیر بیشتر بوده، اما در مقادیر فشار بالاتر این اختلاف کاهش یافته و عملکرد دو شیر به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود.

به طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد زبری سطح تأثیر قابل توجهی بر دبی جرمی دارد، به‌ویژه در شیر توپی که به نظر می‌رسد حساسیت بیشتری نسبت به زبری نشان می‌دهد. شیر پروانه‌ای به دلیل طراحی خاص و هندسه متفاوت، جریان سیال را بهتر کنترل کرده و در نتیجه حتی با وجود زبری سطح، دبی جرمی بیشتری فراهم می‌کند. نتایج حاصل بر اهمیت طراحی بهینه شیرها تأکید می‌کند و نشان می‌دهد با کاهش زبری سطح داخلی و بهینه‌سازی هندسه شیرها، می‌توان اثرات مخرب زبری را کاهش داد و عملکرد آن‌ها را در شرایط مختلف فشار و جریان بهبود بخشید. این یافته‌ها می‌تواند مبنای مهمی برای طراحی شیرهای صنعتی با کارایی بالاتر، کاهش اثرات کاویتاسیون، و افزایش طول عمر تجهیزات باشد. هنگامی که حباب‌های کاویتاسیون در نزدیکی سطح قطعات مانند شیرها، پمپ‌ها یا لوله‌ها فرو می‌پاشند، انرژی زیادی آزاد می‌شود که به صورت موج‌های فشار و جریان‌های شدید به سطح قطعه منتقل می‌شود و می‌تواند آسیب‌های مختلفی به قطعه وارد کند. این آسیب‌ها شامل فرسایش مکانیکی است که بر اثر برخورد حباب‌های فروپاشیده به سطح قطعه، لایه‌های سطحی برداشته می‌شود و ضخامت قطعه کاهش می‌یابد. این نوع فرسایش به‌ویژه در قطعات فلزی تحت فشار بالا مشاهده می‌شود. همچنین، برخورد شدید حباب‌های کاویتاسیون می‌تواند میکرو ترک‌هایی در سطح قطعه ایجاد کند که با گذشت زمان و تحت شرایط سیکلی فشار، این ترک‌ها گسترش می‌یابند و به شکست قطعه منجر می‌شوند. علاوه بر این، کاویتاسیون می‌تواند موجب تحریک واکنش‌های شیمیایی بر سطح قطعه شده و با تغییر شرایط فشار و دما، به ترکیبات شیمیایی سطح آسیب بزند و موجب خوردگی آن شود.

۳. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد زبری سطوح داخلی شیرهای صنعتی تأثیر متفاوتی بر بروز پدیده کاویتاسیون در انواع مختلف شیرها دارد. در شیرهای توپی، افزایش زبری تأثیر چشمگیری بر شدت کاویتاسیون در مقیاس‌های طولی مختلف ندارند و سایر عوامل مانند سرعت جریان، فشار و هندسه شیر نقش مهم‌تری در این پدیده ایفا می‌کنند. در مقابل، در شیرهای پروانه‌ای، افزایش زبری سطح به طور محسوسی موجب افزایش متوسط کسر حجمی بخار و شدت کاویتاسیون شده است، به‌ویژه در دهانه‌های ورودی و خروجی که شرایط هیدرودینامیکی جریان حساسیت بیشتری به تغییرات زبری نشان می‌دهد. این تحقیق همچنین نشان داد کاهش زبری سطح داخلی، به‌خصوص در نواحی ورودی و خروجی، می‌تواند به کاهش شدت کاویتاسیون و افزایش طول عمر تجهیزات کمک کند. همچنین، شیرهای پروانه‌ای نسبت به شیرهای توپی حساسیت بیشتری به تغییرات زبری دارند و نوسانات بیشتری در تولید بخار از خود نشان داده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی و نمودارهای ارائه‌شده نشان می‌دهد افزایش زبری در شیر پروانه‌ای باعث افزایش حدود ۱۵ درصدی متوسط کسر حجمی بخار شده است، در حالی که در شیر توپی این تغییرات کمتر محسوس بوده است. همچنین، بررسی تغییرات دبی جرمی سیال در دو نوع شیر نشان داد افزایش نسبت فشار خروجی به ورودی در شیر پروانه‌ای باعث افزایش بیشتر دبی جرمی نسبت به شیر توپی شده و تأثیر کاویتاسیون را کاهش داده است.

این یافته‌ها بر اهمیت بهینه‌سازی سطح داخلی شیرها تأکید دارد و نشان می‌دهد کنترل زبری سطح می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش اثرات نامطلوب کاویتاسیون در سیستم‌های صنعتی کمک کند. به‌ویژه، در کاربردهای تعمیرات و نگهداری شیرهای صنعتی، اقدامات ساده‌ای مانند صیقل دادن سطوح داخلی و کاهش زبری در نواحی حساس می‌تواند عمر مفید شیرها را افزایش دهد و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را کاهش دهد. از آنجا که کاویتاسیون می‌تواند به آسیب‌های جدی به شیرها، افت عملکرد و نیاز به تعویض زود هنگام قطعات منجر شود، توجه به این نکات در برنامه‌های نگهداری و بهینه‌سازی تجهیزات

می‌تواند به بهبود کارایی و کاهش خرابی‌های ناشی از این پدیده کمک کند. به‌علاوه، از آنجا که پدیده کاویتاسیون می‌تواند موجب ارتعاشات شدید، تخریب سطوح داخلی و کاهش کارایی سیستم‌ها شود، بهینه‌سازی و کنترل زبری سطح می‌تواند نوعی روش مؤثر برای کاهش هزینه‌های بلندمدت ناشی از این آسیب‌ها باشد.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که اثرات زبری سطح بر پدیده کاویتاسیون در سایر انواع شیرهای صنعتی مانند شیرهای فشارقوی و شیرهای کنترل دقیق، به‌ویژه در شرایط عملیاتی متغیر و دماهای بالا، بررسی شود. علاوه بر این، استفاده از تکنولوژی‌های نوین مانند پوشش‌های ویژه برای کاهش زبری و استفاده از مواد مقاوم در برابر کاویتاسیون می‌تواند راهکارهای جدیدی برای بهبود عملکرد شیرهای صنعتی در برابر این پدیده باشد. همچنین، توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر برای تحلیل رفتار جریان و کاویتاسیون در شرایط عملیاتی پیچیده‌تر می‌تواند به بهبود طراحی شیرها و عملکرد سیستم‌های هیدرولیکی در صنایع مختلف منجر شود. در نهایت، توجه به مطالعات تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته می‌تواند به ارتقای روش‌های طراحی و نگهداری شیرهای صنعتی کمک کند و موجب کاهش خطرات ناشی از کاویتاسیون در صنایع مختلف شود.

منابع

- [1] Sun X, Kim HS, Yang SD, Kim CK, Yoon JY. Numerical investigation of the effect of surface roughness on the flow coefficient of an eccentric butterfly valve. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017 Jun;31:2839-48.
- [2] Yuzawa S, Hashizume T, Okutsu R, Outa E. Trends of cavitation erosion development in a contoured-plug valve. *Waseda Univ., Tokyo (JP)*; 1999 Jul 1.
- [3] Guan Song X, Park YC. Numerical analysis of butterfly valve-prediction of flow coefficient and hydrodynamic torque coefficient. In *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science 2007 Oct* (pp. 24-26).
- [4] Ibrahim G, Al-Otaibi Z, Ahmed HM. An Investigation of Butterfly Valve Flow Characteristics Using Numerical.
- [5] Vakili-Tahami F, Zehsaz M, Mohammadpour M, Vakili-Tahami A. Analysis of the hydrodynamic torque effects on large size butterfly valves and comparing results with AWWA C504 standard recommendations. *Journal of Mechanical science and Technology*. 2012 Sep;26:2799-806.
- [6] Kapre AV, Dodia Y. Flow analysis of butterfly valve using CFD. *Int. J. Res. Eng. Technol*. 2015 Nov;4:95-9.
- [7] Del Toro A, Johnson MC, Spall RE. Computational fluid dynamics investigation of butterfly valve performance factors. *Journal-American Water Works Association*. 2015 May;107(5):E243-54.
- [8] Kerh T, Lee JJ, Wellford LC. Transient fluid-structure interaction in a control valve. 1997: 354-359.
- [9] Chern MJ, Wang CC, Ma CH. Performance test and flow visualization of ball valve. *Experimental thermal and fluid science*. 2007 May 1;31(6):505-12.
- [10] Hong Gao, Xin Fu, Hua-yong Yang, T. Tsukiji. Numerical and experimental investigation of cavitating flow within hydraulic poppet valve. *Journal of Mechanical Engineering*. 2002 Aug;38(8):27-30.
- [11] Yang BS, Hwang WW, Ko MH, Lee SJ. Cavitation detection of butterfly valve using support vector machines. *Journal of sound and vibration*. 2005 Oct 6;287(1-2):25-43.
- [12] Davis JA, Stewart M. Predicting globe control valve performance—Part I: CFD modeling. *J. Fluids Eng.*. 2002 Sep 1;124(3):772-7.
- [13] Leino T, Koskinen KT, Vilenius M. CFD-Modelling of a water hydraulic poppet valve-Comparison of different modelling parameters. In *The Eight Scandinavian International Conference on Fluid Power, Proceedings of the Conference, May 7-9, 2003, Tampere, Finland, SICFP' 03 2003* (pp. 277-286). Tampere University of Technology.
- [14] Koivula T, Ellman A, Vilenius M. Experiences on cavitation detection methods. Tampere University of Technology, Institute of Hydraulics and Automation, Tampere. 2000.
- [15] Zhang G, Zhang HT, Wu ZY, Wu X, Kim HD, Lin Z. Experimental studies of cavitation evolution through a butterfly valve at different regulation conditions. *Experiments in Fluids*. 2024 Jan;65(1):4.
- [16] 16. Wang J, Song Y, Liu J, Zhang L. Research on the characteristics of two-phase flow-induced noise in the cavitation dynamics of electronic expansion valves. *Physics of Fluids*. 2024 Jan 1;36(1).
- [17] 17. Zhang K, Wu D, Wang J, Song Y. Numerical and experimental investigation of cavitation characteristics of the electronic expansion valves. *Physics of Fluids*. 2024 Apr 1;36(4).
- [18] 18. Lei L, Lei Z, Chuanhui H, Huafeng G, Jiaxiang M, Ping Y. Study on the relevance between cavitation and cavitation erosion of pure water hydraulic control check valve under the impact of high pressure and large flow. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024 Feb;46(2):100.
- [19] 19. Zhang HT, Wu X, Suryan A, Lin Z, Zhang G. Experimental study on cavitation inhibition in a butterfly valve with different plate shapes. *Physics of Fluids*. 2024 Feb 1;36(2).
- [20] 20. Wang B, Cai PC, Wang F, Xu C. Cavitation mechanism study and failure analysis of high-pressure ball valve. *Engineering Failure Analysis*. 2025 Mar 15;170:109269.
- [21] 21. Xu X, Bi J, Fang L, Li A, Wang Z, Li Q. Experimental and numerical study on the quasi-periodic pulsation characteristics of cavitation flow in a control valve. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2025 Feb 1;167:105911.

- [22] Li DQ, Grekula M, Lindell P. Towards numerical prediction of unsteady sheet cavitation on hydrofoils. *Journal of Hydrodynamics*. 2010 Oct;22(1):699-704.
- [23] Karim MM, Ahmmed MS. Numerical study of periodic cavitating flow around NACA0012 hydrofoil. *Ocean Engineering*. 2012 Dec 1;55:81-7.
- [24] Dular M, Bachert R, Stoffel B, Širok B. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2005 Jul 1;24(4):522-38.
- [25] Fiala A, Kuřigler E. Roughness modeling for turbomachinery. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* 2011 Jan 1 (Vol. 54679, pp. 595-607).
- [26] Kang YS, Yoo JC, Kang SH. Numerical study of roughness effects on a turbine stage performance. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* 2004 Jan 1 (Vol. 41707, pp. 1267-1274).
- [27] Yun YI, Park IY, Song SJ. Performance degradation due to blade surface roughness in a single-stage axial turbine. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* 2004 Jan 1 (Vol. 41707, pp. 1027-1035).