



علمی - پژوهشی

Experimental study of the effect of Hartmann-Sprenger resonance tube end flow on tube heating performanceA.H. Farajollahi¹ M. Rostami² E. Dadkhah³ M. Mohammadalizade Gorji⁴

Imam Ali University, Tehran, Iran

Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Imam Ali University, Tehran, Iran

(Received: 2024/05/17, Revised: 2024/08/23, Accepted: 2024/11/12, Published: 2024/12/01)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.8.6>**ABSTRACT**

In industrial processes, particularly in oil, gas, and fuel pipeline systems, erosion is a common issue. Small particles colliding with the surfaces of pipes lead to damage and erosion. Therefore, examining the motion of particles and determining influential parameters in the extent of damages resulting from particle impact on the inner walls of pipes is of great significance. The primary objective of this study is to investigate the movement of particles and estimate the extent of particle impact on the inner walls of U-shaped pipes, considering different inlet flow rates and various particle sizes to assess the vulnerability of pipe walls to particle impact in each geometry of U-shaped pipes. The geometry of the pipes has been reconstructed using design software. Subsequently, fluid flow modeling and tracking of microbubbles in each geometry of the pipes have been conducted using finite element analysis software. The results of the simulation for pipes with diameters of 3, 6, and 9 mm showed that the number of microbubbles hitting the inner wall of U-shaped tubes increases with the increase of the inner diameter of the tubes. In this study, three ratios of 2.33, 3.2, and 4.2 were assumed for the pipe curvature radius, and the results showed that in all pipes, decreasing the pipe curvature increases the number of microbubbles hitting the inner wall of the pipes. To be for example, in a pipe with a diameter of 3 mm and a fluid velocity of 12 meters per second, the difference in microbubble impact for different curvature radii is about 25%. The reason for this phenomenon is that the reduction of the curvature of the pipe causes the creation of a vortex after the fluid passes through the curved area. It turns out that this vortex can increase the possibility of bubbles hitting the wall. It can also be seen that between the input speeds of 1, 4, 8 and 12 meters per second, the maximum collision is for the input of 12 meters per second. It is concluded that increasing the speed of the incoming fluid flow causes an increase in the number of bubbles hitting the inner wall of the tubes due to the increase in the drag force (which is caused by the increase in the speed of the incoming fluid flow). The results also showed that by reducing the diameter of microbubbles (1, 2, 3 and 4 microns), the amount of particles hitting the wall increases greatly, so that increasing the number of microbubbles hitting the wall can cause great damage to the body. This study can contribute significantly to understanding and improving the erosion phenomenon in pipeline systems, especially in industrial environments. Researchers and industry professionals, in designing and optimizing their pipeline systems, can benefit from the patterns and recommendations derived from this research, thereby enhancing the performance and resistance of their systems against erosion.

Keywords: Tube, Microbubble, Collision of Particles, Erosion**ردیابی و بررسی برخورد میکرو حباب‌ها در لوله‌های U شکل در خطوط انتقال سیال**

مصطفی محمد علیزاده گرجی^۴ محسن رستمی^۲ احسان دادخواه^۳ امیر حمزه فرج‌اللهی^{۱*}

دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

چکیده

در فرآیندهای صنعتی، به‌ویژه در سیستم‌های لوله‌کشی نفت، گاز و سوخت، فرسایش از جمله مشکلات رایج است. ذرات کوچک که به سطوح لوله‌ها برخورد می‌کنند، باعث آسیب و فرسایش سطوح می‌شوند؛ بنابراین بررسی حرکت ذرات و به‌دست آوردن پارامترهای تأثیرگذار در میزان تخریب‌های به وجود آمده در اثر برخورد ذرات به دیواره داخلی لوله‌ها، بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی حرکت ذرات و تخمین میزان

۱- دانشجویار (نویسنده پاسخگو): m.abedinejad@alzahra.ac.ir

۲- استادیار: samaneh.8daliri.72@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد: e.dadkhah1@gmail.com

۴- کارشناسی ارشد: m.gorji@gmail.com

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.



برخورد ذرات به دیواره داخل لوله‌های U شکل با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله و اندازه‌های مختلف ذرات جهت بررسی میزان آسیب‌پذیری دیواره لوله‌ها در اثر برخورد ذرات در هر کدام از هندسه‌های مختلف لوله‌های U می‌باشد. ابتدا هندسه لوله‌ها توسط نرم‌افزار طراحی بازسازی شده است. سپس به مدل‌سازی جریان سیال و ردیابی میکروحباب‌ها در هر کدام از هندسه‌های لوله‌ها در نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌ازای لوله با قطرهای ۳، ۶ و ۹ میلی‌متر نشان داد که تعداد برخورد میکروحباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌های U شکل، با افزایش قطر داخلی لوله‌ها افزایش می‌یابد. در این مطالعه سه نسبت ۲،۳۳، ۳،۲ و ۴،۲ برای شعاع انحنا لوله فرض گردید که نتایج نشان داد که در همه لوله‌ها کاهش انحنا باعث افزایش در میزان برخورد میکروحباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌ها می‌شود. به طور مثال در لوله با قطر ۳ میلی‌متر و سرعت سیال ۱۲ متر بر ثانیه، اختلاف برخورد میکروحباب به‌ازای شعاع انحنا مختلف، حدود ۲۵ درصد می‌باشد. دلیل این پدیده این است که کاهش انحنا باعث ایجاد گردابه بعد از عبور سیال از ناحیه انحنا در لوله می‌شود که این گردابه می‌تواند احتمال برخورد حباب‌ها به دیواره را افزایش دهد. همچنین مشاهده می‌شود که بین سرعت‌های ورودی ۴،۱، ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه بیشترین برخورد برای ورودی ۱۲ متر بر ثانیه است. نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش سرعت جریان سیال ورودی باعث افزایش تعداد برخورد حباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌ها به دلیل افزایش نیروی پسا (که ناشی از افزایش سرعت جریان سیال ورودی می‌شود)، می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که با کاهش قطر میکروحباب‌ها (۱، ۲، ۳ و ۴ میکرون)، میزان برخورد ذرات به دیواره به‌شدت افزایش می‌یابد، طوریکه افزایش تعداد برخورد میکروحباب‌ها به دیواره می‌تواند آسیب زیادی به بدنه لوله‌ها وارد کند. مطالعه حاضر می‌تواند در درک و بهبود پدیده فرسایش در سیستم‌های لوله‌کشی به‌ویژه در محیط‌های صنعتی بسیار مفید باشد. پژوهشگران و صنعتگران در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های لوله‌کشی خود، می‌توانند از الگوها و پیشنهادهای این تحقیق بهره‌مند شده و بدین ترتیب عملکرد و مقاومت سیستم‌های خود در برابر فرسایش را بهبود بخشند.

واژه‌های کلیدی: لوله، میکروحباب، برخورد ذرات، فرسایش

۱- مقدمه

در بسیاری از فرآیندهای صنعتی از جمله سیستم‌های لوله‌کشی نفت و گاز و سوخت پدیده فرسایش دیده می‌شود. وقتی که ذرات کوچک جامد به سطوح لوله و کانال‌ها برخورد می‌کنند به‌مرور باعث آسیب آن‌ها می‌شوند که به این‌گونه از آسیب‌ها به سطوح، پدیده فرسایش گفته می‌شود. از جمله اجزای آسیب‌پذیر سیستم‌های انتقال سیال در برابر فرسایش می‌توان به لوله‌ها و کانال‌های انحنا دار که در مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های انتقال سوخت کاربرد دارد، اشاره کرد. پدیده فرسایش در این اجزا باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل آلودگی، نشست سیال و ایجاد اختلال در مکانیزم کار آن‌ها می‌شود. شایان‌ذکر است پدیده فرسایش از عوامل اصلی بالارفتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش میزان بهره‌وری است. از این‌رو برای درک بهتر فیزیک جریان‌های حاوی ذرات و جستجوی راه‌حلی کارآمد برای کاهش اثر تخریبی پدیده فرسایش امری ضروری به نظر می‌رسد.

با وجود استفاده‌های مکرر در فرآیندهای کاربردی سیستم‌های انتقال پنوماتیک، محلول‌های حاوی ذرات ریز در جریان‌های گازی و یا مایع هم باعث مزایای فراوانی [۱،۲] نظیر افزایش انتقال حرارت و هم باعث ایجاد اشکالاتی در این سیستم‌ها بسته به نوع ذرات می‌شوند. به دلیل اینکه مسیرهای لوله و کانال‌های جهت‌دار به دلیل انحنا باعث تغییر در جهت جریان می‌شود، با ایجاد این تغییرات، اینرسی هر یک از ذرات می‌تواند عامل انحراف آن ذره از خط جریان

حامل آن شود و در نتیجه ذرات به دیواره‌ها برخورد کنند. به دنبال انحراف از مسیر و برخورد ذره به دیواره، انرژی ذره به محل برخورد منتقل شده و بسته به جنس دیواره و قدرت ذره، یا ذره آسیب می‌بیند و یا محل برخورد به مرور دچار فرسایش می‌شود.

بسیاری از محققان در هر دو مدل فیزیکی و عددی فرسایش در لوله‌ها، کانال‌ها و سه‌راهی‌ها پژوهش‌هایی به‌طور گسترده انجام داده‌اند. از اوایل سال ۱۹۹۱ میلادی، دینامیک سیالات محاسباتی به‌طور گسترده برای پیش‌بینی فرسایش ذرات جامد در لوله‌های منحنی و کانال‌ها، با انواع تحلیل‌ها، مدل‌های تجربی و نیمه تجربی استفاده و توسعه داده شده است. حبیب و همکاران [۳] با استفاده از روش اولیری - لاگرانژی و مدل نیمه تجربی فرسایش به محاسبه فرسایش در انقباضات ناگهانی لوله و فرسایش در قسمت پایانی لوله پرداختند که نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که نرخ فرسایش در لوله با انقباض ناگهانی نسبت به تغییر سرعت جریان ورودی بخصوص در سرعت‌های مابین ۸ تا ۱۰ متر بر ثانیه بسیار تاثیر پذیر بوده، در حالی که نرخ فرسایش در سرعت‌های کمتر از ۳ متر بر ثانیه ناچیز است. قطر ذرات تاثیر زیادی بر نرخ فرسایش داشته است، بگونه‌ای که با کوچکتر شدن قطر ذرات نرخ فرسایش درون لوله کاهش یافته است، همچنین هندسه لوله بر نرخ فرسایش تاثیر می‌گذارد، بطوری که نرخ فرسایش نسبت به عمق و ضخامت لوله تناسب عکس دارد. یکی از نخستین

کنترل کننده سایش نظیر سرعت و تعداد ذرات و زاویه برخورد ذرات عمدتاً توسط شرایط جریان سیستم تعیین میشوند. و تغییرات در آنها باعث افزایش یا کاهش در میزان سایش می شود. مثلاً سایش در زانویی‌ها، شیرها و سطوح غیر همسطح تا حدود زیادی نرخ سایش را افزایش می‌دهد. فورد و همکاران [۸] نیز به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و استفاده از معادلات مومنتوم، سایش در جریان‌های مغشوش را بررسی کرده و نشان دادند که ذرات موجود در سیالات نفتی باعث افزایش سایش به خصوص در شیرهای کنترل می شود. شبیه سازی عددی نشان داده است که رفتار برگشتی ذرات نقش مهمی در تعیین حرکت ذرات ایفا می کند. گزارش محققان در مورد روش فرسایش بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی قادر به پیش بینی معقولانه مشخصه های فرسایش بوده و روند فرسایش آن با توجه به سرعت سیال حامل قابل اطمینان بوده است. منگ و لودما [۹] در سال ۱۹۶۱ به یک بررسی جنجالی از برخی مدل های فرسایشی که از زمان فینی [۱۰] در سال ۱۹۹۵ به عنوان اولین روش تحلیلی ارائه شد بود پرداختند. و بیست و هشت مدل مخصوص برای فرسایش ذرات جامد بدست آوردند. نویسندگان گزارش دادند که در این مدل ها از سی و سه پارامتر استفاده شده بود. با میانگین پنج پارامتر در هر مدل این پارامترها مکانیزم فرسایش را تحت اثر قرار داده بودند. بررسی ها نشان داد که هر معادله نتیجه یک عملکرد خاص و منحصر به فرد بود. از این رو نتیجه شد که هیچ تک معادله ای وجود ندارد که بتوان برای پیش بینی محل برخورد تمام مواد شناخته شده یا پارامترهای ذرات از آن استفاده کرد. اطمینان به اندازه گیری های تجربی همیشه نیازمند ارائه ثوابت تجربی در مدل های مختلف فرسایش داشته است. ادواردز و همکاران [۱۱] از کد دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل کردن جریان های مایع/جامد استفاده کرده و با استفاده از مدل E/CRC راه هایی برای پیش بینی فرسایش بر اثر ضربه ذرات پیشنهاد دادند. دریک و فیرویدر [۱۲] با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی به همراه روش لاگرانژی برخورد ذرات و چند مدل فرسایش عددی به پیش بینی فرسایش حاصل از ذرات جامد درون لوله زانویی با شعاع انحنای زیاد و مقطع مربعی، برای جریان حاوی ذرات معلق پرداختند. آنها در این تحقیق از پنج روش مختلف که قادر به پیش بینی خواص فرسایشی مواد داکتیل دارای

یافته‌های این تحقیق تاثیر فراوان هندسه و پیکر بندی لوله بر جریان سیال بوده است. افزایش ارتفاع و یا ضخامت لوله باعث تغییر در سرعت و زاویه برخورد می شود. در نتیجه برای کوتاه ترین ارتفاع و ضخامت، حداکثر سرعت و زاویه ضربه ذرات ماسه و نیز حداکثر نرخ فرسایش وجود داشته است. با ترکیب هندسی متفاوت (عمق متغیر، ضخامت ثابت و بالعکس) هندسه با حداقل عمق یا ضخامت در تمامی قطرها و سرعت ها، مستعد بیشترین نرخ فرسایش است. چن و همکاران [۴] به بررسی شدت فرسایش نسبی بین سه راهی متصل و خم لوله برای جریان گاز رقیق/ ذرات جامد در آن با فشاری نزدیک به فشار اتمسفر است پرداخته اند. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر اساس مدل پیش بینی فرسایش برای پیش بینی شدت فرسایش نسبی استفاده شده است. آزمون های تجربی به منظور بررسی نتایج شبیه سازی به دست آمده برای جریان گاز/ شن و ماسه انجام شده است و اثر قابل توجهی از بار گذاری شن و ماسه به شدت فرسایش نسبی مورد بحث قرار گرفته است. نتیجه گیری شد که نسبت فرسایش به طور قابل توجهی به خواص سیال بستگی دارد. همچنین در شبیه سازی جریان آب/جامد نشان داده شد. که سه راهی متصل نسبت به لوله خمیده فرسایش بیشتری دارد. حبیب و همکاران [۵] اثرات سرعت جریان و اندازه ذرات شن و ماسه بر نرخ فرسایش در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله معمولی را با استفاده از روش ردیابی لاگرانژی ذرات مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از ریزگردهایی با قطر ۱۰ تا ۵۰۰ میکرون با سرعت ۰.۱۹۷ تا ۲.۹۵ متر بر ثانیه ثابت کردند که نرخ سایش به صورت تابع نمایی با سرعت ذرات در ارتباط می باشد و اندازه ذرات تأثیر بسزایی در نرخ سایش دارد. نتایج نشان داد که محل و تعداد لوله های فرسوده عمدتاً به اندازه ذرات و میزان سرعت در ورودی بستگی دارد. همچنین نتیجه گیری شد که ذرات با اندازه های بزرگ در مقادیر سرعت بالا تأثیر ناچیزی بر نرخ فرسایش در مقایسه با ذرات کوچکتر در مقادیر کم سرعت دارد. اوکا و همکاران [۶] نشان دادند که میزان سایش و روابط مربوط به آن متأثر از فشردگی و ضربات ریزگردها می باشد. همچنین ثابت نمودند که سرعت و زاویه برخورد ذرات بسیار تأثیرگذار بوده و خواص مکانیکی مواد نظیر سختی ماده، جزء پارامترهای کلیدی برای تخمین خوردگی سایشی می باشد. پارسلو [۷] نیز نشان داد که بسیاری از عوامل

ذرات را بطور دقیق برای هر ذره ارائه دهد. همچنین با تجمع زیاد ذرات در دامنه باریک بین ورودی و خروجی چوک، بیشترین مقدار سرعت ثبت می‌شود. عامل اصلی در حرکت ذرات در دو فاز جامد-مایع، نیروی درگ سیال است، اما نیروی حاصل از برخورد ذرات نیز نقش مهمی بازی می‌کند.

حرکت حباب‌ها داخل لوله دارای جریان سیال به پارامترهای مختلفی از جمله هندسه لوله، شرایط مرزی سیال ورودی و خواص خود سیال دارد. مطالعات عددی قبلی به بررسی حرکت میکرو حباب‌ها داخل شریان‌های دارای هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند که نشان داده شد، میزان برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره‌های شریان‌ها از الگوهای جریان داخل شریان پیروی می‌کنند [۲۵] تا [۲۲]. در این مطالعه، بررسی دینامیکی جریان سیال داخل لوله‌های U شکل با هندسه مختلف با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان فرسایش در هر کدام از هندسه لوله‌های ذکر شده است. همچنین از طرف دیگر به بررسی حرکت میکرو حباب‌های تولید شده در هر کدام از هندسه‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط دبی و تخمین میزان برخورد حباب‌ها به دیواره داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان آسیب پذیری در اثر برخورد حباب‌ها در هر کدام از هندسه‌های مختلف است، پرداخته شد. در نهایت می‌توان گفت ضرورت این بررسی‌ها جهت پیش‌بینی فرسایش لوله‌ها و بدست آوردن میزان تخریب توسط آنها از جمله هندسه لوله‌ها، دبی ورودی و اندازه میکرو حباب در داخل لوله‌هاست تا به عمر لوله‌های انتقال سیال افزوده گردد. بدین منظور نخست هندسه‌های زانو‌ها و لوله‌های دارای گرفتگی‌های مختلف توسط نرم افزار طراحی Solidworks طراحی می‌شود و در مرحله بعد، به مش‌بندی مناسب آنها توسط نرم افزار تجاری Comsol پرداخته می‌شود.

۲- فرضیه‌های محاسباتی:

فرضیات لازم برای بررسی و مطالعه این مطالعه عبارت‌اند از:

- ۱- سیال نیوتنی می‌باشد. در این تحقیق به دلیل این که سیال داخل لوله‌ها آب و یا سوخت استفاده می‌شود، سیال نیوتنی در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- سیال، تراکم ناپذیر و با لزجت کم در نظر گرفته می‌شود.
- ۳- سیال بدون اینرسی^۱ در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی عدد رینولدز (Re) آن بسیار کم بوده و سیال از خود سرعت و اینرسی ندارد.

بیشینه فرسایش در زاویه برخورد بحرانی ذره هستند، استفاده کردند. فن و همکاران [۱۳] با استفاده از روش اوپلری- لاگرانژی و ضریب جریان تجربی گرانت و تاباکوف [۱۴] به شبیه سازی سرعت های برگشت ذرات پرداختند و بعد از آن با بکارگیری معادله نیمه تجربی فرسایش گرانت- تاباکوف، فرسایش در خم عمودی و افقی را مورد مطالعه قرار دادند. در تمام مطالعات همه نویسندگان بجز فن و همکاران برای مدل اغتشاشی از روش کی- اپسیلون استاندارد استفاده کردند. مطالعات وانگ و شیرازی [۱۵] نشان داد که افزایش شعاع خم در زانویی یه راه مناسب برای کاهش فرسایش است اما با توجه به فضا و غیر ممکن بودن استفاده از زانویی با شعاع بزرگ محققان دریافتند که به منظور کاهش فرسایش، بهتر است از سه راهی انتها بسته استفاده شود. سوزوکی و همکاران [۱۶] با استفاده از روش خط فرسایش ارائه شده توسط یونچی و همکاران [۱۷] به بررسی فرسایش در لوله نود درجه خمیده با مقطع چهار وجهی پرداختند. در این بررسی شبکه بندی محاسباتی به دو قسمت ناحیه میدان جریان و ناحیه دیواره جامد تقسیم شد. هدف از این تحقیق پیش بینی عددی فرسایش ماسه، درون لوله خم، نود درجه با مقطع چهار وجهی، با استفاده از تغییرات فیزیکی سطح دیواره و تغییر حالت جریان دو فاز بود. همچنین آنها با استفاده از روش فرسایش نیلسون و گیلکریست [۱۸] به پیش بینی یکی از تحقیقات تجربی میسون و اسمیت [۱۹] بر روی خم ها پرداخته و موفق به پیش بینی محل فرسایش در ناحیه داخلی و خارجی لوله شدند. لی گوامی و همکاران [۲۰] از روش لاگرانژی اوپلری با برخورد ذره با ذره و مدل فرسایش ذره برای شبیه سازی حرکت ذرات جامد و همچنین خصوصیات فرسایش ذره در جریان دو فاز جامد- مایع با استفاده از روش استاندارد $\epsilon-k$ برای شبیه سازی جریان مغشوش در چوک استفاده کردند. از مدل کره سخت ذرات پراکنده برای همسان سازی برخورد های بین ذره ای و ضریب نیمه تجربی منگوتورک و سوردراپ [۲۱] برای مطالعه نرخ فرسایش و همچنین از شیاریایی برای مطالعه اثرات ضد فرسایشی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل کره سخت ذرات پراکنده می‌تواند فرآیند حرکتی ذرات جامد و همچنین خصوصیات غیر یکسان پراکندگی توزیع ذرات را شبیه سازی کند. هم زمان این مدل می‌تواند اطلاعات سرعت، زاویه و محل برخورد

۴- از نیروی جاذبه زمین صرف نظر می‌شود.

۳- مدل‌سازی ریاضی مسئله:

این بخش از چهارشاخه انتخاب محدوده^۳، معادلات^۴، مدل فیزیکی^۵ و متغیرهای وابسته^۶ تشکیل شده است. در شاخه انتخاب محدوده باید تمام محدوده فیزیکی کانال که حل جریان آرام قرار است برای آن حل شود، انتخاب شود. روشن است که در مسئله ما، کل هندسه تعریف شده حامل جریان سیال است، پس کل هندسه را به عنوان محدوده حل انتخاب می‌کنیم. در بخش معادلات، تمام معادلاتی که مربوط به جریان آرام هستند و به عنوان حل مسئله، قرار است حل شوند آورده شده‌اند. معادلات یادشده عبارت‌اند از معادله پیوستگی و معادله ناویر-استوکس که روابط زیر آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

که در معادلات بالا \mathbf{u} بردار سرعت، ρ چگالی، μ چسبندگی و \mathbf{F} میدان نیروهای خارجی است. در شاخه مدل فیزیکی، جریان را از نظر تراکم‌پذیر بودن مشخص می‌کنیم و در صورت لزوم مدل توربولانسی مناسب را برای آن انتخاب می‌کنیم. در این مدل‌سازی جریان تراکم‌ناپذیر است، همچنین روشن است که به دلیل آرام بودن جریان به مدل توربولانسی نیازی نیست. در بخش آخر نیز صرفاً متغیرهای جریان از جمله مؤلفه‌های سرعت و متغیر فشار فهرست شده‌اند که نیازی به تغییر نیست. همچنین، در این مطالعه شرط مرزی عدم لغزش بر روی دیواره‌ها صدق می‌کند.

$$\mathbf{u} = 0 \quad \text{بر روی کلیه دیواره‌ها} \quad (3)$$

پس از تعیین تمامی موارد موردنیاز برای فیزیک مسئله و سایر موارد برای تعیین شرایط حل، می‌توانیم حرکت سیال داخل کانال را مورد بررسی قرار دهیم. اما قبل از آن تنظیمات مربوط به ردیابی ذرات را نیز بیان می‌کنیم.

برای تعیین مسیر حرکت ذره از قانون دوم نیوتون که به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود، استفاده می‌شود.

$$\frac{d(m_p \vec{v})}{dt} = \vec{F}_t \quad (4)$$

در جایی که m_p جرم ذره، \vec{v} بردار سرعت حرکت ذره و \vec{F}_t بردار نیروهای وارد بر ذره است. با ایجاد جریان به صورت خود به خودی نیروهای داخلی که در قسمت قبلی آورده شد، ایجاد می‌شود. در نهایت با داشتن برآیند این نیروها، توسط معادله دیفرانسیلی که در رابطه قبلی آورده شده است، مقدار و جهت سرعت ذرات را محاسبه و طبق رابطه (۵) بردار مکان ذرات را به دست می‌آورد.

در برخورد ذرات به دیواره لوله از روش بازتاب استفاده شد. در این روش احتمال ذره از سطح در یک صفحه مماسی^۰ است. که زاویه ی برخورد ذره با زاویه بازتاب آن نسبت به سطح برابر است.

$$\frac{d(\vec{r})}{dt} = \vec{v} \quad (5)$$

$$\mathbf{q}' = \mathbf{q} \quad (6)$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})\mathbf{n} \quad (7)$$

برداری موقعیت ذره قبل از تماس (\mathbf{q}) و بعد از تماس (\mathbf{q}')، بردار نرمال سطحی (\mathbf{n}) و بردار سرعت ذرات قبل از تماس (\mathbf{v}) و بعد از تماس (\mathbf{v}') می‌باشد. از آنجا که ذره به صورت ناهمگن بازتاب می‌شود. همچنین موقعیت ذره مطابق قانون کسینوس ها در سه بعد مطابق معادلات زیر محاسبه می‌شود.

$$v_{t1} = |\mathbf{v}_c| \sin\theta \sin\phi \quad (8)$$

$$v_{t2} = |\mathbf{v}_c| \sin\theta \cos\phi \quad (9)$$

$$v_n = |\mathbf{v}_c| \sin\theta \quad (10)$$

سرعت‌های مماسی خروجی (v_{t1}) و (v_{t2})، سرعت لحظه‌ای برخورد ذره به سطح (\mathbf{v}_c) و سرعت نرمال (v_n) می‌باشد. زاویه‌ای (ϕ) بین بازه $0-2\pi$ به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. همچنین زاویه (θ) از معادله زیر بدست می‌آید.

$$\theta = \sin^{-1}(\sqrt{\Gamma}) \quad (11)$$

توزیع احتمال مؤلفه نرمال سرعت که Γ نام دارد با زاویه θ رابطه کسینوسی فوق را دارد. این مؤلفه یک عدد تصادفی است. در زیرشاخه بعدی باید شرط مرزی دیواره تعیین شود که در اینجا به عنوان شرط مرزی تعیین شده است که دیواره به صورت صلب بوده و ذرات پس از برخورد به آن منحرف می‌شوند و از دیواره عبور نمی‌کنند.

³ Domain Selection

⁴ Equation

⁵ Physical Model

⁶ Dependent Variables

افزارهای مدل‌سازی انجام می‌گیرد تا بتواند معادلات و حلگرها را روی هر کدام از گره‌های المان‌ها اعمال کند. حال اگر گروه‌بندی و تعداد گره‌ها به تعداد کافی نباشد، دقت حلگرها و نتایج شبیه‌سازی کاهش می‌یابد؛ بنابراین بایستی تعداد گره‌ها و یا المان‌های هندسه موردنظر را به اندازه کافی ریزتر کرد. با این حال ریزتر کردن المان‌ها و افزایش تعداد گره‌ها موجب افزایش تعداد معادلات حلگر در نرم‌افزار می‌گردد که منجر به طولانی شدن مدت زمان ران‌گیری از شبیه‌سازی یا به عبارتی دیگر باعث افزایش هزینه محاسباتی شبیه‌سازی می‌شود که خود نیازمند سیستم‌های قدرتمند رایانه‌ای است؛ بنابراین بایستی به دنبال تعداد المان‌های بهینه بود که هم دقت حلگرها قابل قبول باشد و هم از لحاظ هزینه و زمان مناسب باشد. در اینجا ما به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تعداد المان‌های مختلف پرداخته‌ایم. تحلیل مش‌بندی برای هندسه لوله U در $R=3.2 \text{ mm}$ و $D=3 \text{ mm}$ صورت گرفته است که مطابق جدول ۱، در کیفیت مش‌بندی مختلف، نتایج ماکزیمم سرعت در خروجی برای هر کدام آورده شده است. باتوجه به جدول ۱، مشاهده می‌شود که کیفیت مش نرمال، گزینه مناسبی از لحاظ دقت و هزینه می‌تواند باشد. این درحالی است که این نوع مش خطایی کمتر از ۰/۳۱ درصد را دارا می‌باشد. بنابراین برای شبیه‌سازی‌ها از کیفیت مش نرمال استفاده شده است.

جدول (۱): تحلیل مش هندسه‌های لوله دارای گرفتگی و دارای زانوهای با زاویه‌های مختلف به وسیله‌ی نتایج سرعت ماکزیمم در خروجی‌ها در سرعت ۱ متر بر ثانیه

هندسه لوله	کیفیت شبکه	تعداد شبکه	ماکزیمم سرعت در خروجی (m/s)	درصد اختلاف با تعداد مش قبلی
لوله دارای گرفتگی ۵۰ درصد	Coarser	۶۱۰	۱.۲۷۱	-
	Coarse	۱۱۲۸	۱.۲۷۸	۰.۵۵٪
	Normal*	۱۷۴۴	۱.۲۸۲	۰.۳۱٪
	Fine	۲۶۱۸	۱.۲۸۳	۰.۰۸٪

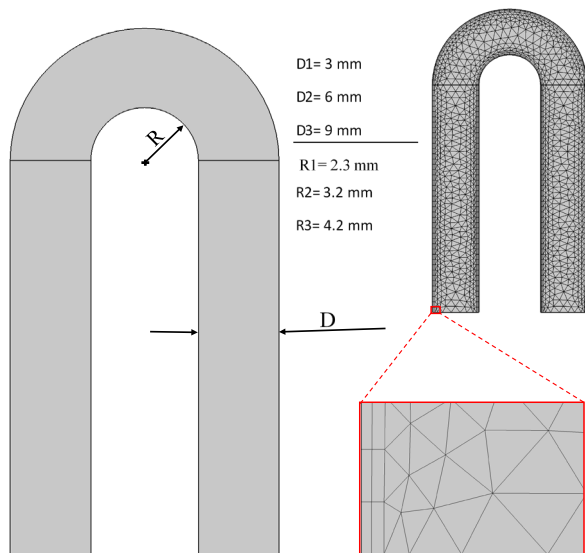
۶- اعتبار سنجی مدل‌سازی مطالعه حاضر

مسیر حرکت و پراکندگی ذرات داخل دوشاخه برای قطره‌های مختلف ذرات و همچنین فلوریت‌های مختلف جریان

در این مرحله که گام نهایی در انتخاب تنظیمات حل می‌باشد، نوع حل‌کننده‌ی متناسب با مسئله موردنظر انتخاب می‌شود. منظور از نوع حل‌کننده، دو نوع حل پایا و حل وابسته به زمان است. در واقع با انتخاب نوع حل‌کننده، وابستگی و یا استقلال حل از زمان مشخص می‌شود. در حالت دوم که مسئله به زمان وابسته است، باید بازه زمانی را که قرار است حل در آن انجام شود مشخص کرد. در اینجا برای ایجاد جریان سیال در کانال از حالت پایا و مستقل از زمان استفاده کرده، در بخش دوم که هدف پیگیری حرکت ذرات است از حل‌کننده‌ی وابسته به زمان استفاده شده است.

۴- هندسه لوله‌ها

در این تحقیق، بررسی دینامیکی جریان سیال داخل لوله‌های U شکل با هندسه مختلف با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان فرسایش در هر کدام از هندسه‌های ذکر شده است. بدین منظور نخست هندسه‌های لوله‌ها مختلف توسط نرم‌افزار طراحی سالیدورکس طراحی می‌شود و در مرحله بعد، به مش‌بندی مناسب آنها توسط نرم‌افزار تجاری کامسول پرداخته می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): هندسه لوله U شکل با ابعاد مشخص شده روی آن (سمت چپ) و نمایی از مش تتراهدرال بر روی لوله

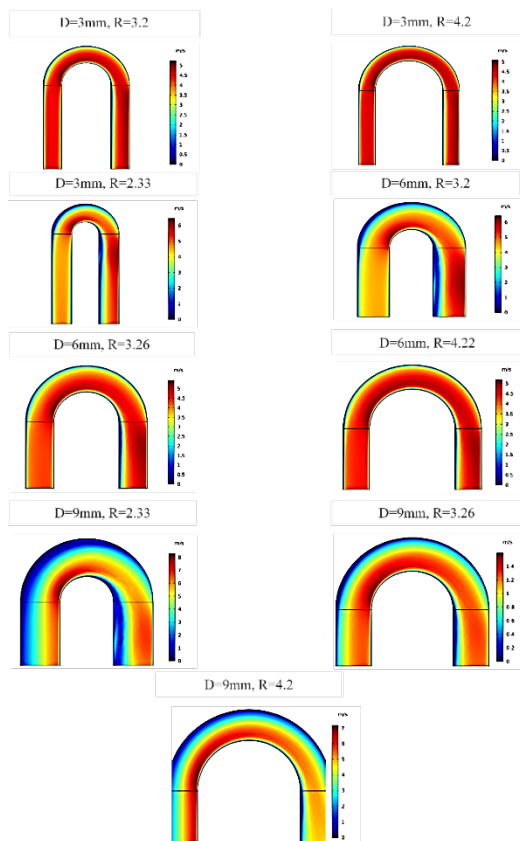
۵- استقلال نتایج از شبکه‌بندی

پس از مدل‌سازی هندسه لوله‌ها مش‌بندی در نرم‌افزار کامسول انجام گرفت. مش‌بندی جهت حل عددی در نرم-

توسط کیم و اقلسیاس [۲۶] به طور آزمایشگاهی و نظری مورد مطالعه قرار گرفت. برای اعتبارسنجی حل جریان سیال و حرکت ذرات در این مطالعه، هندسه‌ای مطابق با شکل ۲-الف که هندسه به کار رفته در کار کیم و اقلسیاس [۲۶] است، رسم گردید. در این هندسه ابعاد در نظر گرفته شده برای پارامترهای ذکر شده در تصویر ۲-الف به ترتیب $L_1 = 10 \text{ cm}$ ، $L_2 = 5 \text{ cm}$ ، $a = 0.5 \text{ cm}$ ، $b = 0.4 \text{ cm}$ و $\theta = 37.5^\circ$ است. جریان آرام هوا با چگالی 1.28 kg/m^3 بر متمرکعب و ویسکوزیته $1.78 \times 10^{-5} \text{ cp}$ در نرخ جریان‌های ۸، ۴ و ۱۲ لیتر بر دقیقه در ورودی وارد می‌شود. شرط مرزی خروجی‌ها فشار اتمسفر و شرط مرزی دیواره‌ها بدون لغزش انتخاب شده است.

۷- نتایج:

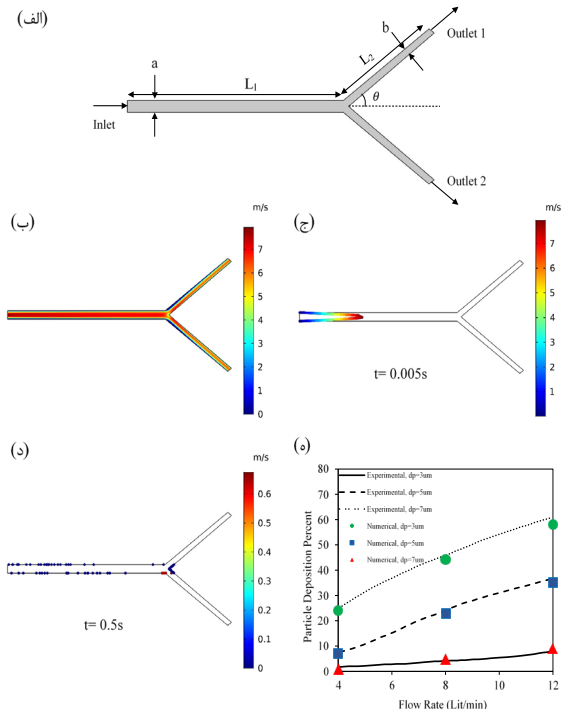
۷-۱- نتایج جریان سیال



شکل (۳): مقدار سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با

هندسه‌های مختلف در سرعت جریان ورودی ۱ متر بر ثانیه الگوی جریان سیال داخل لوله‌ها و کانال‌ها یکی از عوامل کلیدی در حرکت ذرات داخل آن‌ها است. این اثرات به دلیل نیروهای وارد بر ذرات از طرف سیال است که می‌توان به نیروی دراگ و نیروی لیفت اشاره کرد؛ بنابراین بررسی الگوی جریان سیال داخل لوله‌ها می‌تواند درک ما را از علت و نحوه

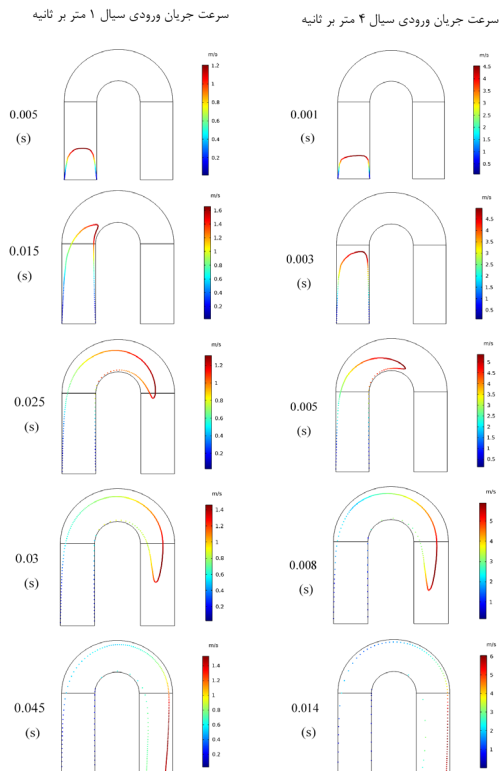
انتخاب شده است.



شکل (۲): اعتبارسنجی حل جریان سیال و حرکت ذرات (الف) هندسه لوله (ب) میدان سرعت تولید شده توسط جریان در نرخ جریان ۸ (ج) مسیر حرکت ذرات در $t = 0.5 \text{ s}$ (د) نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج کار آزمایشگاهی کیم و اقلسیاس [۳۴] و مقایسه آنها

میدان سرعت تولید شده توسط جریان در نرخ جریان ۸ لیتر بر دقیقه مطابق شکل ۲-ب می‌باشد. ذرات با چگالی 5230 kg/m^3 و قطرهای ۳، ۵ و ۷ برای شبیه‌سازی انتخاب شدند. در هر بار شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ذره به طور تصادفی در خروجی رها می‌شوند و تحت شرایط مرزی چسبناک برای دیواره‌ها به سمت خروجی‌ها که دارای شرط مرزی ناپدید هستند، حرکت می‌کنند. مسیر حرکت ذرات ۵ میکرومتر در ثانیه

قطر ۶ میلی‌متر در شکل‌های ۴-۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که هرچه قطر لوله‌ها افزایش یابد، حرکت حباب‌ها به سمت خروجی بیشتر متمایل می‌شود چرا که فضای کافی برای عبور از لوله‌ها در حالت بدون برخورد به دیواره لوله‌ها بیشتر مهیا می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که در لوله‌های با انحنا کمتر، حباب‌ها فرصت خروج کمتری پیدا می‌کنند و این عامل اصلی در برخورد حباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌ها می‌تواند باشد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان سیال ورودی حباب‌ها بیشتر متمایل دارند که به دیواره داخلی شعاع خارجی لوله برخورد کنند. این پدیده می‌تواند بدلیل افزایش نیروی دراگ وارد بر حباب‌ها شود که به سمت دیواره لوله هل می‌دهد.



شکل (۴): موقعیت ذرات در داخل لوله با $D=6\text{ mm}$, $R=2.3\text{ mm}$ با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۴ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

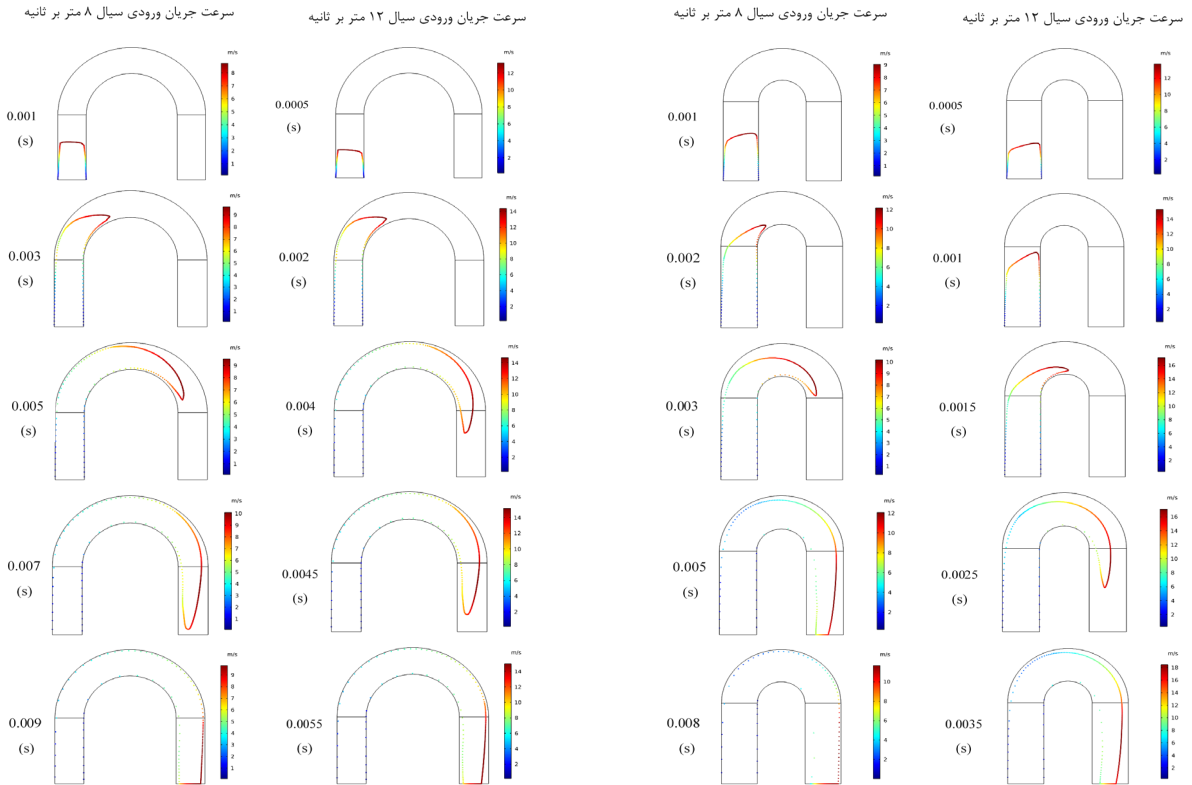
حرکت ذرات درون لوله‌ها بهبود بیخشد. مقدار سرعت جریان ورودی سیال درون لوله‌های U شکل در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در آن سرعت جریان سیال ورودی ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. باتوجه به شکل ۳، می‌توان گفت که هرچه قدر شعاع انحنای لوله کمتر شود، مقدار سرعت ماکزیمم در داخل لوله‌ها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در لوله‌هایی با قطر بیشتر، مقدار سرعت جریان ورودی در داخل لوله کاهش می‌یابد که در شکل ۳ قابل مشاهده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در شعاع انحنای لوله کمتر (R) سیال بعد از گذراندن انحنا دچار افت سرعت جریان می‌شود که این می‌تواند به دلیل ایجاد گردابه در ناحیه بعد از انحنا باشد. این پدیده به علت تغییر مسیر ناگهانی جریان سیال داخل لوله به دلیل شرایط هندسه لوله‌ها است که در مطالعات قبلی مرتبط با گرفتگی شریان‌ها است، مشاهده شده است [۲۷، ۲۸].

۷-۲- ردیابی ذرات

آسیب‌پذیری لوله‌های U شکل که در نزدیکی پمپ‌های پره‌ای قرار دارند، زمانی که حباب‌های تولید شده توسط پدیده کاویتاسیون به دیواره آن‌ها برخورد کنند، به شدت بالا می‌رود و این پدیده می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری در لوله‌کشی‌های صنعتی و نظامی را به وجود آورد، به‌ویژه اگر سیال درون لوله‌ها اشتعال‌زا باشند که حتی خسارت‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی در پی داشته باشد. در مطالعه حاضر ما به بررسی میزان آسیب‌پذیری لوله‌های U شکل بر اساس تعداد برخورد ذرات به دیواره داخلی لوله‌ها که احتمال ترک‌شدن حباب‌ها را افزایش می‌دهد، پرداخته‌ایم.

علت اصلی در نظر گرفتن لوله U شکل در مطالعه حاضر، آسیب‌پذیری بالای این لوله‌ها نسبت به سایر لوله‌های صنعتی است که حباب‌های بیشتری می‌توانند به دیواره برخورد کنند. قطر حباب‌های در نظر گرفته شده در این مطالعه از ۱ تا ۴ میکرومتر است که بسته به اندازه حباب‌های تولید شده توسط پمپ پره‌ای ایجاد می‌شود. درک ما از میزان آسیب‌پذیری لوله‌ها با قطرهای مختلف حباب‌ها می‌تواند به ارائه یک سیستم فیلترینگ در موقعیت بلافاصله پس از پمپ که مانع عبور حباب‌ها با اندازه‌های مشخص، منجر شود.

شبیه‌سازی انجام‌گرفته بر روی هندسه‌های مختلف لوله U شکل و اندازه‌های مختلف حباب‌ها، در چهار سرعت جریان سیال ورودی به لوله‌ها (۱، ۴، ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه) مورد مطالعه قرار گرفت. موقعیت حباب‌ها در قطر ۱ میکرومتر در چهار سرعت جریان ورودی مختلف و همچنین برای لوله‌های به



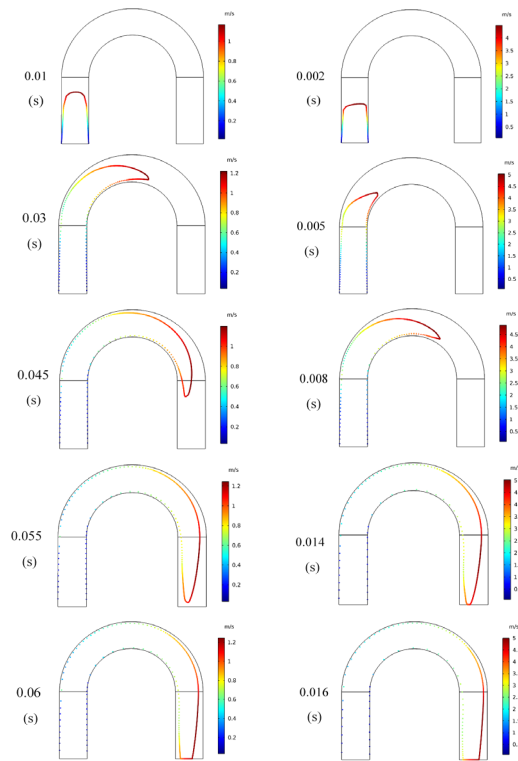
شکل (۷): موقعیت ذرات در داخل لوله با $D=6\text{ mm}$, $R=4.2\text{ mm}$

شکل (۵): موقعیت ذرات در داخل لوله با $D=6\text{ mm}$, $R=2.3\text{ mm}$

با دو سرعت جریان ورودی ۸ و ۱۲ متر بر ثانیه در زمان های مختلف تعداد برخورد میکرو حبابها به دیواره داخلی لوله U شکل در ابعاد هندسی مختلف، در سرعت جریان سیال ورودی ۱، ۲، ۳ و ۴ متر بر ثانیه، برای قطر حبابهای ۱ میکرومتر (A)، ۲ میکرومتر (B)، ۳ میکرومتر (C) و ۴ میکرومتر (D) برای قطر هندسه لوله ۳، ۶ و ۹ میلی متر به ترتیب در شکل ۸-۱۰ آورده شده است. مشاهده می شود که تعداد برخورد میکرو حبابها به دیواره داخلی لوله های U شکل، با افزایش قطر داخلی لوله ها افزایش می یابد. این پدیده را می توان بدلیل فضای حرکتی باز حبابها در قطرهای بیشتر لوله ها دانست که باعث کاهش برخورد به دیواره داخلی لوله ها می شود. علاوه بر این، مشاهده می شود که در همه ی لوله ها کاهش انحنای لوله ها باعث افزایش در میزان برخورد میکرو حبابها به دیواره داخلی لوله ها می شود. همانطور که در بخش قبل نیز گفته شد کاهش انحنای لوله باعث ایجاد گردابه بعد از عبور سیال از ناحیه انحنای لوله می شود که این گردابه می تواند احتمال برخورد حبابها به دیواره را افزایش دهد. چرا که زمان باقی ماندن این ذرات در ناحیه گردابه بالا می رود و از این رو احتمال برخورد به دیواره افزایش می یابد [20,27]. هم چنین مشاهده می شود که افزایش سرعت جریان سیال ورودی به لوله ها باعث افزایش

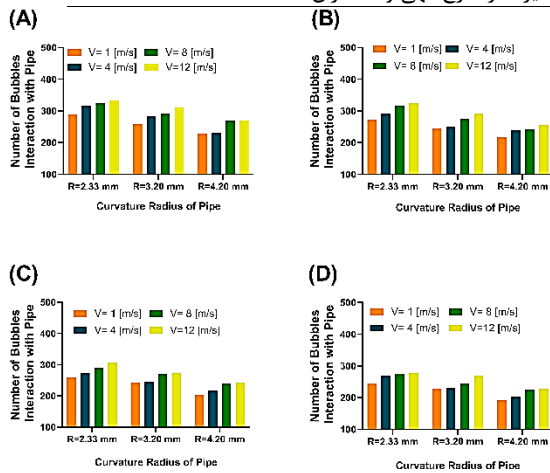
با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۴ متر بر ثانیه در زمان های مختلف

سرعت جریان ورودی سیال ۴ متر بر ثانیه



شکل (۶): موقعیت ذرات در داخل لوله با $D=6\text{ mm}$, $R=4.2\text{ mm}$

با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۴ متر بر ثانیه در زمان های مختلف



۸- نتیجه گیری:

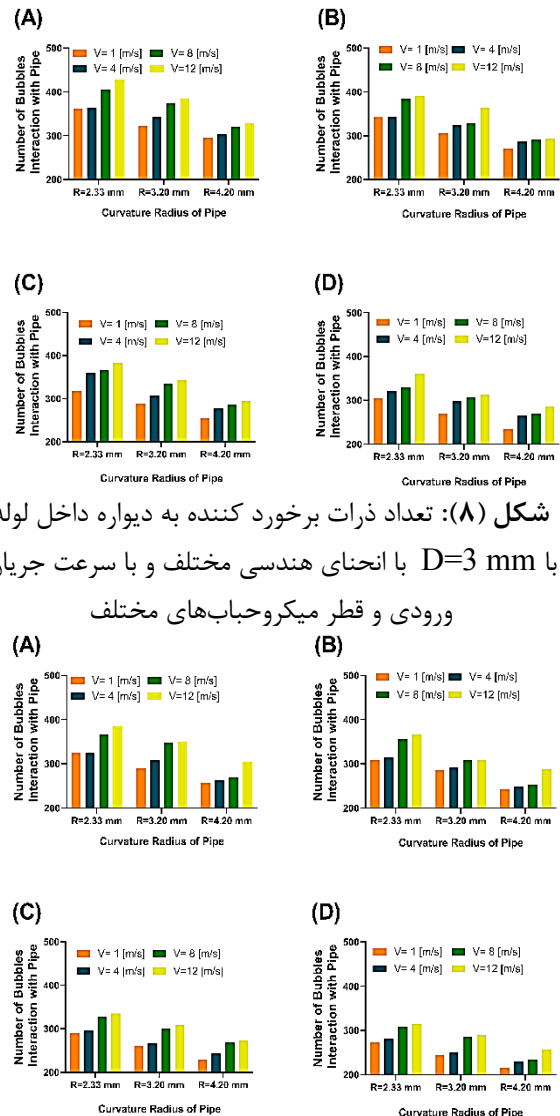
نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش قطر داخلی لوله‌های U شکل، تعداد برخورد میکرو حباب‌ها با دیواره داخلی افزایش می‌یابد. همچنین، در همه لوله‌ها، کاهش انحنا لوله‌ها منجر به افزایش برخورد میکرو حباب‌ها با دیواره داخلی می‌شود. افزایش سرعت جریان سیال ورودی نیز باعث افزایش تعداد برخورد حباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌ها می‌شود و در نتیجه، احتمال برخورد میکرو حباب‌ها با دیواره را افزایش می‌دهد. همچنین، کاهش قطر میکرو حباب‌ها به شدت منجر به افزایش برخورد ذرات با دیواره داخلی لوله‌ها می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش تعداد برخورد میکرو حباب‌ها با دیواره لوله‌ها ممکن است آسیب‌پذیری بالایی بر بدنه لوله‌ها ایجاد کند، به خصوص در شرایطی که قطر میکرو حباب‌ها کاهش یافته باشد. بطور خلاصه می‌توان گفت که در لوله U شکل، پارامترهای هندسه لوله‌ها، اندازه حباب‌های تولید شده توسط پره‌های پمپ و سرعت جریان سیال ورودی، در میزان برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره لوله از این رو تخریب آن‌ها به شدت موثر هستند. در ادامه برای کاهش میزان تخریب و آسیب به بدنه لوله‌ها چندین مورد ذکر شده است.

(۱) لوله‌های U شکل با در نظر گرفتن محاسبات هیدرولیکی با قطر بزرگتر استفاده شوند.

(۲) انحناهای لوله U شکل با در نظر گرفتن محدودیت فضا و هزینه‌های لوله و تیوب، با شعاع بیشتری انتخاب شوند.

(۳) سرعت جریان سیال ورودی در لوله با در نظر گرفتن محاسبات هیدرولیکی و فرایندی در صورت امکان کاهش یابد.

تعداد برخورد حباب‌ها به دیواره داخلی لوله‌ها می‌شود. این اتفاق می‌تواند بدلیل افزایش نیروی دراگ (که ناشی از افزایش سرعت جریان سیال ورودی می‌شود) باشد که باعث هل دادن میکرو حباب‌ها به سمت دیواره داخلی شعاع خارجی انحنا لوله می‌شود. در نتیجه احتمال برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره را افزایش می‌دهد. دیگر پارامتر کلیدی در حرکت میکرو حباب‌ها در داخل لوله‌ها را می‌توان قطر میکرو حباب‌ها دانست. در شکل ۸-۱۰ مشاهده می‌شود که هرچه قطر میکرو حباب‌ها کمتر می‌شود، میزان برخورد ذرات به دیواره به شدت افزایش می‌یابد. افزایش تعداد برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره می‌تواند آسیب به شدت بالایی بر بدنه لوله‌ها ایجاد کند.



شکل (۹): تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره داخل لوله با D=6 mm با انحنا هندسی مختلف و با سرعت جریان ورودی و قطر میکرو حباب‌های مختلف

- nanofluid”, International Communications in Heat and Mass Transfer. (2015). DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.06.003
- [3] Habib, M.A., Badr, H.M., Ben-Mansour, R., and Kabir, M.E. “Erosion rate correlations of a pipe protruded in an abrupt pipe contraction”, Int. J. Impact Eng. 34 (2007). DOI 10.1016/j.ijimpeng.2006.07.007.
- [4] Chen, X., McLaury, B.S., and Shirazi, S.A. “Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow”, Wear. 261 (2006). DOI 10.1016/j.wear.2006.01.022.
- [5] Habib, M.A., Badr, H.M., Said Mansour, S.A.M., Ben, R., and Al-Anizi, S.S. “Solid-particle erosion in the tube end of the tube sheet of a shell-and-tube heat exchanger”, Int. J. Numer. Methods Fluids. 50 (2006). DOI 10.1002/flid.1083.
- [6] Oka, Y.I., and Yoshida, T. “Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact”, Wear. 259 (2005). DOI 10.1016/j.wear.2005.01.040.
- [7] Parslow, G.I., Stephenson, D.J., Strutt, J.E., and Tetlow, S. “Investigation of solid particle erosion in components of complex geometry”, in: Wear, 1999. DOI 10.1016/S0043-1648(99)00194-5.
- [8] Forder, A., Thew, M., and Harrison, D. “A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves”, Wear. 216 (1998). DOI 10.1016/S0043-1648(97)00217-2.
- [9] Meng, H.C., and Ludema, K.C. “Wear models and predictive equations: their form and content”, Wear. 181–183 (1995). DOI 10.1016/0043-1648(95)90158-2.
- [10] Finnie, I. “Erosion of surfaces by solid particles”, Wear. 3 (1960). DOI 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
- [11] Edwards, J.K., McLaury, B.S., and Shirazi, S.A. “Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees”, J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME. 123 (2001). DOI 10.1115/1.1413773.
- [12] Njobuenwu, D.O., and Fairweather, M. “Modelling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions”, Comput. Chem. Eng. 42 (2012). DOI 10.1016/j.compchemeng.2012.02.006.
- [13] Fan, J.R., Luo, K., Zhang, X.Y., and Cen, K.C. “Large eddy simulation of the anti-erosion characteristics of the ribbed-bend in gas-solid flows”, J. Eng. Gas Turbines Power. 126 (2004). DOI 10.1115/1.1760523.
- [14] Grant, G., and Tabakoff, W. “An experimental investigation of the erosive characteristics of 2024 aluminum alloy”, Natl. Tech. Inf. Serv. U. S. Dep. Commer. DA-ARO-D-1 (1973).
- [15] Wang, J., and Shirazi, S.A. “A CFD based correlation for erosion factor for long-radius

(۴) استفاده از یک فیلتر^۷ با سوراخ‌های ریزتر (حدود ۲ میکرومتر در قطر کوچک- حدود ۴ میکرومتر در قطر بزرگتر) در ورودی اتصال لوله به پمپ جهت فیلترینگ میکرو حباب‌ها و ذرات در راستای کاهش آسیب به بدنه لوله U شکل.

اهمیت شناخت پارامترهای موثر بر پدیده فرسایش سبب گشته تا لازم باشد پیش بینی آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرد. از این رو می توان با تغییر شرایطی همچون شکل ذرات و زاویه برخورد ذرات به گسترش بیشتر بررسی ها بر روی این پدیده پرداخت. به این ترتیب می توان برای گسترش پژوهش ها در این زمینه، به موارد زیر اشاره کرد:

- تغییر در هندسه و جنس ذرات معلق و جداره لوله
- تغییر سطح مقطع و ایجاد شیار بر روی جداره
- تغییر در قطر لوله و کانال ها و زاویه انحنا آن‌ها

فهرست علائم

R	شعاع انحنا لوله, (mm)
D	قطر لوله, (mm)
Γ	توزیع احتمال مولفه نرمال سرعت
u	سرعت سیال, (m/s)
ρ	چگالی, (Kg/m^3)
P	فشار سیال, (KPa)
t	زمان, (sec)
μ	ویسکوزیته, (cp)
F	نیرو, (N)
v	سرعت ذره, (m/s)
m_p	جرم ذره, (Kg)

مراجع و منابع

- [1] Esfe, M.H., Saedodin, S., Wongwises, S., and Toghraie, D. “An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids”, Journal Thermal Analysis and Calorimetry. 1817–1824 (2015). DOI 10.1007/s10973-014-4328-8.
- [2] Esfe, M.H., Abbasian Arani, A.A., Rezaie, M., Yan, W.M., and Karimipour, A. “Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag–MgO/water hybrid

⁷ Strainer

- perforated conical turbulators and added nanoparticles to enhance heat transfer performance in heat exchangers”, *Scientia Iranica*, 30(3), (2023), pp. 1027-1038. DOI 10.24200/sci.2022.59717.6394
- [27] Ranjbar, H., Farajollahi, A. & Rostami, M. “Targeted drug delivery in pulmonary therapy based on adhesion and transmission of nanocarriers designed with a metal-organic framework”, *Biomech Model Mechanobiol* 22, 2153–2170 (2023). DOI 10.1007/s10237-023-01756-9
- [28] Saleh-Abadi, M., Rostami, M. & Farajollahi, A. “Successive expansion and contraction of tubes (SECTs) in a novel design of shell-and-tube heat exchanger: a comparison between basic, finned and non-finned designs”, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 45, 444 (2023). DOI 10.1007/s40430-023-04356-x.
- [29] Saleh-Abadi, M., Rahmati, A., Farajollahi, A. et al. “Optimization of geometric indicators of a ventricular pump using computational fluid dynamics, surrogate model, response surface approximation, kriging and particle swarm optimization algorithm”, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 45, 431 (2023). DOI 10.1007/s40430-023-04355-y
- [30] Farajollahi, A.H., Rostami, M., and Naderi, A.A. “Reconstruction of the Fluid Velocity Field Measured by SPIV via Artificial Neural Networks”, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, 2022: 11(1):57-70. (In Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322327.8.1401.11.1.4.6>
- [31] Farajollahi, A.H., M.M. Yahyaabadi, and Pourseifi, M. “Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement in an Automotive Radiator Utilizing Mini-Channel Tubes and Tubes Configuration”, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, 2023:11(2) :39-52. (In Persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2322327.8.1401.11.2.4.8>
- [32] Avecilla, F.R.B., Farajollahi, A., Rostami, M. Yadav, A., and Flores, J. “Successive expansion and contraction of tubes (SECT) in a novel design of shell-and-tube heat exchanger: entropy generation analysis”, *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 46, 267 (2024). DOI 10.1007/s40430-024-04850-w.
- [33] Amani, A., and Farajollahi, A.H. “Drug Delivery Angle for Various Atherosclerosis and Aneurysm Percentages of the Carotid Artery”, *Molecular Pharmaceutics*, 2024 21 (4), 1777-1793, DOI 10.1021/acs.molpharmaceut.3c01109.
- [34] Kim, C.S., Iglesias, A.J., and Garcia, L. “Deposition of Inhaled Particles in Bifurcating Airway Models: II. Expiratory Deposition”, *J. Aerosol Med. Depos. Clear. Eff. Lung.* 2 (1989). <https://doi.org/10.1089/jam.1989.2.15>
- elbows and bends”, *J. Energy Resour. Technol. Trans.* ASME. 125 (2003). DOI 10.1115/1.1514674.
- [16] Suzuki, M., Inaba, K., and Yamamoto, M. “Numerical simulation of sand erosion phenomena in square-section 90 degree bend”, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions Japan Soc. Mech. Eng. Part B.* 74 (2008). DOI 10.1299/kikaib.74.1478.
- [17] Junichi, K., Toda, K., and Yamamoto, M. “Development of numerical code to predict three-dimensional sand erosion phenomena”, in: *Proc. ASME/JSME Jt. Fluids Eng. Conf.*, 2003. DOI 10.1115/fedsm2003-45017.
- [18] Neilson, J.H., and Gilchrist, A. “Erosion by a stream of solid particles”, *Wear.* 11 (1968). DOI 10.1016/0043-1648(68)90591-7.
- [19] Mason, J.S., and Smith, B.V. “The erosion of bends by pneumatically conveyed suspensions of abrasive particles”, *Powder Technol.* 6 (1972). DOI 10.1016/0032-5910(72)83030-4.
- [20] Li, G., Wang, Y., He, R., Cao, X., Lin, C., and Meng, T. “Numerical simulation of predicting and reducing solid particle erosion of solid-liquid two-phase flow in a choke”, *Pet. Sci.* 6 (2009). DOI 10.1007/s12182-009-0017-9.
- [21] Menguturk, M., and Sverdrup, E. “Calculated Tolerance of a Large Electric Utility Gas Turbine to Erosion Damage by Coal Gas Ash Particles”, in: *Eros. Prev. Useful Appl.*, 2009. DOI 10.1520/stp35802s.
- [22] Shamloo, A., Ebrahimi, S., Amani, A., and Fallah, F. “Targeted Drug Delivery of Microbubble to Arrest Abdominal Aortic Aneurysm Development: A Simulation Study Towards Optimized Microbubble Design”, *Sci. Rep.* (2020). DOI 10.1038/s41598-020-62410-3.
- [23] Ebrahimi, S., Shamloo, A., Alishiri, M., Mozhdhehbash Mofrad, Y., and Akherati, F. “Targeted pulmonary drug delivery in coronavirus disease (COVID-19) therapy: A patient-specific in silico study based on magnetic nanoparticles-coated microcarriers adhesion”, *Int. J. Pharm.* (2021) 121133. DOI 10.1016/j.ijpharm.2021.121133.
- [24] Alishiri, M., Ebrahimi, S., Shamloo, A., Boroumand, A., and Mofrad, M.R.K. “Drug delivery and adhesion of magnetic nanoparticles coated nanoliposomes and microbubbles to atherosclerotic plaques under magnetic and ultrasound fields”, *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 15 (2021) 1703–1725. DOI 10.1080/19942060.2021.1989042.
- [25] Shamloo, A., Amani, A., Forouzandehmehr, M., and Ghoytasi, I. “In Silico study of patient-specific magnetic drug targeting for a coronary LAD atherosclerotic plaque”, *Int. J. Pharm.* (2019). DOI 10.1016/j.ijpharm.2018.12.088.
- [26] Farajollahi, A., Mokhtari, A., Rostami, M., Imani, K., Salimi, M. “Numerical study of using

- Interaction Approach”, *Int. J. Appl. Mech.* 12 (2020) 10.
- [37] Ebrahimi, S., Vatani, P., Amani, A., and Shamloo, A. “Drug delivery performance of nanocarriers based on adhesion and interaction for abdominal aortic aneurysm treatment”, *Int. J. Pharm.* 594 (2021). DOI j.ijpharm.2020.120153,
- [35] Ebrahimi, S., and Fallah, F. “Investigation of coronary artery tortuosity with atherosclerosis: A study on predicting plaque rupture and progression”, *Int. J. Mech. Sci.* 223 (2022) 107295. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2022.107295.
- [36] Manzoori, S., Fallah, A., Sharzehee, F., and Ebrahimi, M. “Computational Investigation of the Stability of Stenotic Carotid Artery under Pulsatile Blood Flow Using a Fluid-Structure