

Prediction and estimation of vulnerability pipes due to cavitation phenomenon

A.H. Farajollahi ^{*1} M. Rostami ² 

Imam Ali University, Tehran, Iran.

(Received: 2024/03/11, Revised: 2024/06/14, Accepted: 2024/07/06, Published: 2024/07/22)



DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.2.8>

ABSTRACT

Cavitation is a process that involves the generation, transport (along with the liquid), and collapse of bubbles upon impact with internal walls. The primary objective of this study is to examine the movement of generated microbubbles and estimate the frequency of bubble impacts on the walls of pipes with varying degrees of surface clogging and pipes with bends, considering different inlet flow rates. This analysis aims to evaluate the vulnerability to damage due to bubble impacts in each of these geometries. The simulation results for clogged pipes indicate that the higher the degree of clogging, the greater the likelihood of microbubble impacts on the clogged area and their subsequent collapse, which significantly increases the potential for pipe wall damage. Additionally, for pipes with high clogging percentages (above 36%), the likelihood of wall damage dramatically increases with higher fluid inlet velocities. Conversely, in pipes with low clogging percentages (below 36%), lower fluid inlet velocities increase the likelihood of microbubble impacts on the clogged walls, thereby also increasing the potential for pipe damage.

Keywords: Cavitation, Tube, Microbubble, Collision, Damage

پیش بینی و تخمین میزان آسیب پذیری در لوله های انتقال سیال بر اثر پدیده تغییر فاز جریان

محسن رستمی ^۲ امیر حمزه فرج الهی ^۱ 

دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

خلأزایی یا کاویتاسیون فرآیندی متشکل از تولید، انتقال همراه با مایع و فروپاشی حبابها در اثر برخورد به دیواره های داخلی می باشد. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی حرکت میکرو حباب های تولید شده و تخمین میزان برخورد حبابها به دیواره داخل لوله های دارای گرفتگی های سطحی با درصد گرفتگی های مختلف و لوله های دارای زانویی با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله جهت بررسی میزان آسیب پذیری در اثر برخورد حبابها در هر کدام از هندسه های مختلف است. نتایج حاصل از شبیه سازی برای لوله های دارای گرفتگی نشان می دهد که هر چقدر لوله دارای درصد گرفتگی بیشتر باشد، احتمال برخورد میکرو حبابها به ناحیه گرفتگی و ترکیدن آنها زیاد است که از این رو احتمال آسیب دیواره لوله به شدت افزایش می یابد. همچنین در درصد گرفتگی های بالای لوله (بالای ۳۶٪) هر چه سرعت جریان سیال ورودی به لوله بیشتر باشد، احتمال آسیب دیواره به طور چشمگیری افزایش می یابد. باین حال در درصد گرفتگی پایین لوله (کمتر از ۳۶٪) هر چه سرعت جریان ورودی سیال کمتر باشد، احتمال برخورد میکرو حبابها به دیواره گرفتگی نیز بیشتر می شود و در نتیجه احتمال تخریب و آسیب دیدگی لوله ها نیز بیشتر می شود.

واژه های کلیدی: کاویتاسیون، لوله، میکرو حباب، برخورد، آسیب

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): a.farajollahi@sharif.edu

۲- استادیار: cpt.rostami@gmail.com

فهرست علائم و اختصارات

u	سرعت سیال
ρ	چگالی
P	فشار سیال
t	زمان
μ	ویسکوزیته
F	نیرو
v	سرعت ذره
m_p	جرم ذره

۱- مقدمه

انتقال سوخت به وسیله لوله‌ها در صنایع پتروشیمی و نظامی بسیار حائز اهمیت است. به طوری که کاهش عمر لوله‌های سوخت‌رسانی، خرابی و نشستی آن‌ها می‌تواند خسارت مالی و جانی جبران‌ناپذیری را برای کارخانه‌ها، شرکت‌ها و یگان‌های نظامی که با مواد مشتعل سرکار دارند، ایجاد کند. خلأزایی یا کاویتاسیون فرآیندی متشکل از تولید، انتقال همراه با مایع و فروپاشی حباب‌ها در اثر برخورد به دیواره‌های داخلی می‌باشد. بارزترین نمونه این اثر در لوله‌های انتقال سیال که دارای زانو و یا گلوگاه هستند و یا حتی دچار گرفتگی شده‌اند، رخ می‌دهد. در لوله‌های انتقال سیال حاوی روغن و مواد شیمیایی، با انباشته شدن مواد معدنی از جمله، سولفات کلسیم و کربنات سدیم در داخل لوله‌ها رسوب‌گذاری در سطح داخلی ایجاد می‌شود که باعث گرفتگی و ایجاد زبری در سطح می‌شود که می‌تواند در الگوی جریان سیال به شدت تأثیر بگذارد و باعث ایجاد گردابه در نواحی اطراف آن گردد. اگر حباب‌های کاویتاسیون هنگام فروپاشی در نزدیکی دیواره داخلی باشند، نیروی ناشی از فروپاشی حباب‌ها که همراه با تشکیل جت مایع است، باعث ایجاد فشار موضعی زیادی می‌شود که عامل به شدت مخربی را در لوله‌ها ایجاد می‌کند؛ بنابراین با توجه به اهمیت موضوع در زمینه‌های نظامی و صنعتی، مطالعه دینامیک حرکت حباب‌های برگرفته از پدیده کاویتاسیون و بررسی پارامترهای تأثیرگذار در میزان و محل تشکیل حباب‌ها و به‌ویژه تخمین میزان و محل تخریب‌های

به وجود آمده در اثر فروپاشی حباب‌ها با برخورد آنها به دیواره داخلی لوله‌ها، بسیار حائز اهمیت است.

برای اولین بار برنن [۱] در سال ۱۹۶۹ به تحلیل عددی جریان کاویتاسیون پشت جسم متقارن با دماغه کروی و دارای یک کاویتور دیسکی پرداخت. ایشان در مطالعه خود اثرات لزجت بر روی نقطه جدایش در دماغه کروی را مورد بررسی قرار دادند. بعد از آن آکوستا و پارکین [۲] در سال ۱۹۷۵ مروری از مطالعات انجام گرفته در مورد شروع کاویتاسیون بر روی سطوح صاف، کاویتاسیون گردابه‌ای و اندازه‌گیری هسته‌های کاویتاسیون را ارائه دادند. چائو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۶ به بررسی جریان سوپر کاویتاسیون ناپایدار پشت مخروط پرداختند و رابطه‌ای بین طول سوپر کاویتاسیون و عدد کاویتاسیون بدست آوردند. گاوزن و راد [۴] در سال ۲۰۰۹ مشخصات مدار تست تونل آب کاویتاسیون و آزمایش‌های کاویتاسیون حول استوانه‌ای دایروی با جریان آزاد آشفته را بررسی کردند. آنها در این مطالعه با در نظر گرفتن عدد رینولدز معین و آشفتگی جریان، اثرات کاویتاسیون بروی ضریب پسا، فشار برگشتی و زاویه نقطه‌ی شکل‌گیری را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اثرات کاویتاسیون بروی لایه‌ی مرزی و جدایش جریان در استوانه و نیز نیروی پسا در عدد کاویتاسیون تأثیر گذار است.

در سال ۲۰۱۴ بیلوش و همکارانش [۵] نوسانات فشار و ساختار کاویتاسیون را به صورت همزمان مورد بررسی قرار داده و با یکدیگر مقایسه کردند. بررسی آزمایشگاهی میدان جریان کاویتاسیون ناپایا در ناحیه جدایش اجسام گرد انجام گرفت. نوسانات فشار با استفاده از سنسورهای عقب نصب شده در پایان دست جسم اندازه‌گیری شده و دینامیک ساختار کاویتاسیون ابری به وسیله‌ای دوربین سرعت بالا مجسم‌سازی شده است و همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری در بازه‌های فرکانسی بالا و پایین بررسی شده است. تسدلار و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای را بصورت تجربی و عددی بر روی جریان کاویتاسیون ناپایا پیرامون هیدروفیل انجام دادند. هدف اصلی در این پروژه، وابستگی دینامیک کاویتاسیون به عدد کاویتاسیون در زوایای برخورد بالا می‌باشد. آزمایش‌ها در تونل آب با مقطع تست مستطیلی شکل انجام شده و از یک هیدروفون برای اندازه‌گیری پالس‌های فشار در فرکانس بالا در انتهای هیدروفون استفاده گردیده است. شبیه‌سازی عددی آن‌ها نیز نشان داد

که می‌تواند به تخمین میزان خوردگی و نواحی آسیب‌پذیر در لوله‌های انتقال سیال کمک بسزایی بکند.

در این تحقیق، به بررسی دینامیکی جریان سیال داخل لوله‌های دارای گرفتگی‌های سطحی با درصد گرفتگی‌های مختلف و لوله‌های دارای زانویی با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف در داخل لوله‌ها، پرداخته شده است. از طرف دیگر به بررسی حرکت میکرو حباب‌های تولید شده در هر کدام از هندسه‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط دبی مختلف و تخمین میزان و موقعیت برخورد حباب‌ها به دیواره داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان آسیب‌پذیری لوله‌ها در اثر برخورد حباب‌ها پرداخته شده است که یکی دیگر از نوآوری‌های این مطالعه می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت که ضرورت این بررسی‌ها جهت پیش‌بینی محل دارای خوردگی زیاد (تخریب بالا) لوله‌ها و به دست آوردن شرایط موثر در تشکیل پدیده کاویتاسیون و میزان تخریب توسط آنها از جمله هندسه لوله‌ها، میزان گرفتگی داخل آنها، دبی ورودی در داخل لوله‌هاست تا به عمر لوله‌های انتقال سیال افزوده گردد.

۱- فرضیه‌های محاسباتی پمپ

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 با دمای ۲۵ درجه سلسیوس 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.
- ۴- از نیروی جاذبه زمین صرف نظر می‌شود.

۲- مدل‌سازی ریاضی مسئله

این بخش از چهارشاخه^۱ انتخاب محدوده^۲، معادلات^۳، مدل فیزیکی^۴ و متغیرهای وابسته^۴ تشکیل شده است. در شاخه^۱ انتخاب محدوده باید تمام محدوده فیزیکی کانال که حل جریان آرام قرار است برای آن حل شود، انتخاب شود. روشن است که در مسئله^۲ ما، کل هندسه تعریف شده حامل

که نوسانات فرکانس به عدد کاویتاسیون بستگی داد و در یک بازه‌ی خاصی از عدد کاویتاسیون اثرات رزونانس اتفاق می‌افتد. اگر چه مطالعات زیادی در بررسی پدیده کاویتاسیون انجام گرفته است، با این حال، پژوهشی در رابطه با بررسی احتمال تشکیل پدیده کاویتاسیون در داخل لوله‌های دارای گرفتگی و یا زانویی تا به حال انجام نگرفته است. مطالعه روی این پدیده می‌تواند درک ما را در تخمین شدت و ناحیه شکل‌گیری کاویتاسیون بهبود ببخشد.

مطالعه سررشته داری و نجفی [۷] سه مدل انتقال جرم (کانز، زوارت، سینگال) را برای پیش‌بینی کاویتاسیون در نرم‌افزار اوپن‌فوم مقایسه کرده و نشان داده که مدل‌های کانز و زوارت با دقت بالاتر و خطای کمتر از ۵ درصد نسبت به مدل سینگال عملکرد بهتری دارند. جعفری گاوزن و همکاران [۸] رژیم‌های کاویتاسیونی حول گوه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه را به صورت تجربی بررسی کرده و دریافته‌اند که با تغییر سرعت و فشار تونل، انواع مختلف کاویتاسیون مانند کاویتاسیون لایه‌ای، ابری و سوپر کاویتاسیون رخ می‌دهد. فرج‌الهی و همکاران [۹] تأثیر هندسه نازل انژکتور و پروفیل بالابری سوزن بر رفتار افشانه سوخت دیزل را بررسی کرده و نشان دادند که نازل‌های مخروطی با پروفیل‌های مختلف طول نفوذ بیشتر و قطر ذرات کوچکتری دارند و وقوع کاویتاسیون تأثیر زیادی بر رفتار افشانه دارد. فدایی رودی و پسندیده فرد [۱۰] مدل آشفته‌گی GEKO را در جریان کاویتاسیونی حول پرتابه‌های استوانه‌ای سرتخت و سرکروی ارزیابی کرده و دریافته‌اند که این مدل برای اعداد کاویتاسیون بزرگ‌تر نتایج بهتری می‌دهد. این تحقیقات بر اهمیت توسعه و بهینه‌سازی مدل‌های انتقال جرم و استفاده از روش‌های نوین عددی و تجربی در پیش‌بینی دقیق کاویتاسیون تأکید دارند.

حرکت حباب‌ها داخل لوله دارای جریان سیال به پارامترهای مختلفی از جمله هندسه لوله، شرایط مرزی سیال ورودی و خواص خود سیال بستگی دارد. مطالعات عددی قبلی به بررسی حرکت میکرو حباب‌ها داخل شریان-های دارای هندسه‌های مختلف پرداخته‌اند که نشان داده شد، میزان برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره‌های شریان‌ها از الگوهای جریان داخل شریان پیروی می‌کنند [۱۱-۱۴]. این بررسی را می‌توان در سطح گسترده‌تر در لوله‌های انتقال سیال که دارای هندسه‌های مختلف است، انجام داد

¹ Domain Selection

² Equation

³ Physical Model

⁴ Dependent Variables

شده است، مقدار و جهت سرعت ذرات را محاسبه و طبق رابطه (۵) بردار مکان ذرات را به دست می‌آورد.

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

در برخورد ذرات به دیواره لوله از روش بازتاب استفاده شد که زاویه برخورد ذره با زاویه بازتاب آن نسبت به سطح برابر است.

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

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

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

$$v_{t_1} = |\vec{v}_c| \sin \theta \sin \phi \quad (8)$$

$$v_{t_2} = |\vec{v}_c| \sin \theta \cos \phi \quad (9)$$

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

سرعت‌های مماسی خروجی (v_{t_1}) و (v_{t_2})، سرعت لحظه‌ای برخورد ذره به سطح (\vec{v}_c) و سرعت نرمال (v_n) می‌باشد. زاویه‌ای (ϕ) بین بازه $2\pi - 0$ به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. همچنین زاویه (θ) از معادله زیر بدست می‌آید.

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

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

جریان سیال است، پس کل هندسه را به‌عنوان محدوده حل انتخاب می‌کنیم. در بخش معادلات، تمام معادلاتی که مربوط به جریان آرام هستند و به‌عنوان حل مسئله، قرار است حل شوند، آورده شده‌اند. مدل‌سازی در نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول انجام گرفته است. معادلات یادشده عبارت‌اند از معادله پیوستگی و معادله ناویر - استوکس که روابط زیر آن‌ها را نشان می‌دهد.

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

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

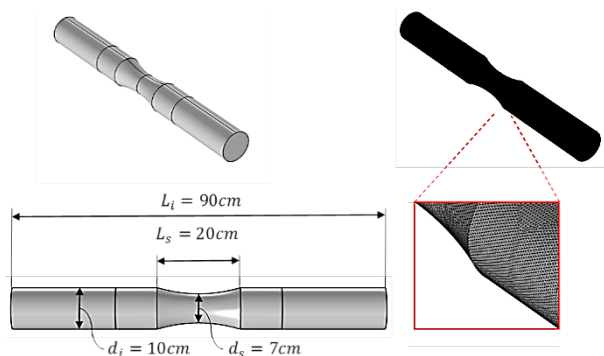
که در معادلات بالا \vec{u} بردار سرعت، ρ چگالی، μ چسبندگی و \vec{F} میدان نیروهای خارجی است. در این مطالعه فرض شده است که حباب‌ها توسط پره‌های توربین یا پمپ در بخش قبل‌تر از مدل در نظر گرفته شده تولید شده‌اند که می‌توان فرض جریان آرام را صحیح دانست. در این مدل‌سازی جریان تراکم‌ناپذیر است، همچنین روشن است که به‌دلیل 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.

$$\vec{u} = 0 \quad (3)$$

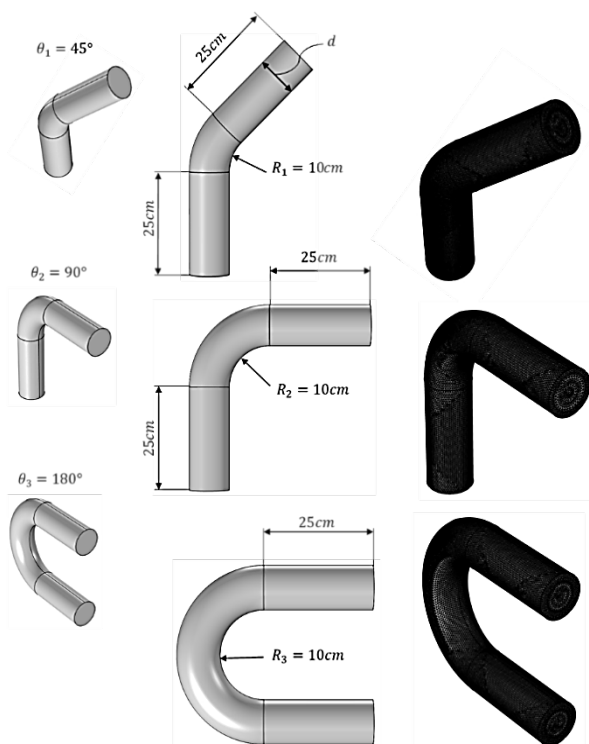
پس از تعیین تمامی موارد موردنیاز برای فیزیک مسئله و سایر موارد برای تعیین شرایط حل، می‌توانیم حرکت سیال داخل کانال را مورد بررسی قرار دهیم. اما قبل از آن تنظیمات مربوط به ردیابی ذرات را نیز بیان می‌کنیم. برای تعیین مسیر حرکت ذره از قانون دوم نیوتن که به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود، استفاده می‌شود.

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

درجایی که m_p جرم ذره، \vec{v} بردار سرعت حرکت ذره و \vec{F}_t بردار نیروهای وارد بر ذره است. با ایجاد جریان به‌صورت خود به خودی نیروهای داخلی که در قسمت قبلی آورده شد، ایجاد می‌شود. درنهایت با داشتن برآیند این نیروها، توسط معادله دیفرانسیلی که در رابطه قبلی آورده



شکل (۱): هندسه لوله دارای گرفتگی ۳۰ درصد با ابعاد مشخص شده روی آن (سمت چپ) و نمایی از مش تتراهدرا ل بر روی لوله دارای گرفتگی



شکل (۲): هندسه لوله دارای زانویی با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه با ابعاد مشخص شده روی آن (سمت چپ) و نمایی از مش تتراهدرا ل بر روی آن‌ها (سمت راست)

۴- استقلال نتایج از شبکه‌بندی

پس از مدل‌سازی هندسه لوله‌ها، مش‌بندی در نرم‌افزار کامسول انجام گرفت. مش‌بندی جهت حل عددی در نرم‌افزارهای مدل‌سازی انجام می‌گیرد تا بتواند معادلات و حلگرها را روی هر کدام از گره‌های المان‌ها اعمال کند. حال اگر گره‌بندی و تعداد گره‌ها به تعداد کافی نباشد، دقت حلگرها و به طبع دقت نتایج شبیه‌سازی کاهش می‌یابد؛

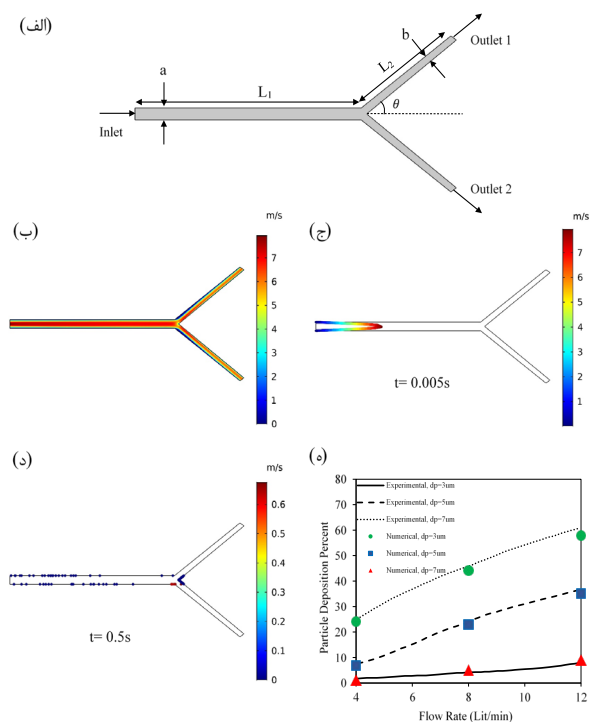
در این مرحله که گام نهایی در انتخاب تنظیمات حل می‌باشد، نوع حل‌کننده متناسب با مسئله موردنظر انتخاب می‌شود. منظور از نوع حل‌کننده، دو نوع حل پایا و حل وابسته به زمان است. در واقع با انتخاب نوع حل‌کننده، وابستگی و یا استقلال حل از زمان مشخص می‌شود. در حالت دوم که مسئله به زمان وابسته است، باید بازه زمانی را که قرار است حل در آن انجام شود، مشخص کرد.

۳- هندسه لوله‌ها

در این تحقیق، بررسی دینامیکی جریان سیال داخل لوله‌های دارای گرفتگی‌های سطحی با درصد گرفتگی‌های مختلف و لوله‌های دارای زانویی با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون در هر کدام از هندسه لوله‌های انجام شده است. از طرف دیگر به بررسی حرکت میکرو حباب‌های تولید شده در هر کدام از هندسه‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط دبی و فشار مختلف و تخمین میزان و موقعیت برخورد حباب‌ها به دیواره داخل لوله‌ها جهت بررسی میزان آسیب‌پذیری در اثر برخورد حباب‌ها در هر کدام از هندسه‌های مختلف صورت گرفته شده است. در نهایت می‌توان گفت ضرورت این بررسی‌ها جهت پیش‌بینی محل دارای خوردگی زیاد (تخریب بالا) لوله‌ها و به دست آوردن شرایط موثر در تشکیل پدیده کاویتاسیون و میزان تخریب توسط آنها از جمله هندسه لوله‌ها، میزان گرفتگی داخل آنها، دبی ورودی و فشار خروجی در داخل لوله‌هاست تا به عمر لوله‌های انتقال سیال افزوده گردد. بدین منظور نخست هندسه‌های زانوها و لوله‌های دارای گرفتگی‌های مختلف توسط نرم‌افزار طراحی سالیدورکس طراحی می‌شود و در مرحله بعد، به مش‌بندی مناسب آنها توسط نرم‌افزار تجاری کامسول پرداخته می‌شود. هندسه لوله دارای گرفتگی ۳۶ درصد با ابعاد مشخص شده روی آن و نمایی از مش تتراهدرا ل بر روی لوله دارای گرفتگی در شکل ۱ آورده شده است. در شبیه‌سازی مطالعه حاضر لوله‌های دارای گرفتگی‌های ۱۰، ۳۶، ۵۰، ۶۴ و ۷۵ درصد جهت انجام مدل‌سازی استفاده شده است. همچنین هندسه لوله دارای زانویی با زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه با ابعاد مشخص شده روی آن و نمایی از مش تتراهدرا ل بر روی آن‌ها در شکل ۲ آورده شده است.

۵- اعتبارسنجی مدل سازی مطالعه حاضر

مسیر حرکت و پراکندگی ذرات داخل دو شاخه برای قطرهای مختلف ذرات و همچنین دبی‌های مختلف جریان توسط کیم و اقلسیاس [۱۵] به طور آزمایشگاهی و نظری مورد مطالعه قرار گرفت. برای اعتبارسنجی حل جریان سیال و حرکت ذرات در این مطالعه، هندسه‌ای مطابق با شکل ۳-الف که هندسه به کار رفته در کار کیم و اقلسیاس [۱۵] است، رسم گردید. در این هندسه ابعاد در نظر گرفته شده برای پارامترهای ذکر شده در شکل ۳-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 1.28×10^{-5} و ویسکوزیته 1.78×10^{-5} در دبی‌های ۴، ۸ و ۱۲ لیتر بر دقیقه در ورودی وارد می‌شود. شرط مرزی خروجی‌ها فشار اتمسفر و شرط مرزی دیواره‌ها بدون لغزش انتخاب شده است.



شکل (۳): اعتبارسنجی حل جریان سیال و حرکت ذرات (الف) هندسه لوله (ب) میدان سرعت تولید شده توسط جریان در دبی ۸ (ج) مسیر حرکت ذرات در $t=0.005\text{s}$ (د) مسیر حرکت ذرات در $t=0.5\text{s}$ (ه) نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج کار آزمایشگاهی کیم و اقلسیاس [۱۵] و مقایسه آنها

بنابراین بایستی تعداد گره‌ها و یا المان‌های هندسه موردنظر را به اندازه کافی ریزتر کرد. باین حال ریزتر کردن المان‌ها و افزایش تعداد گره‌ها موجب افزایش تعداد معادلات حلگر در نرم‌افزار می‌گردد که منجر به طولانی شدن مدت زمان حل یا به عبارتی دیگر باعث افزایش هزینه محاسباتی شبیه‌سازی می‌شود که خود نیازمند سیستم‌های قدرتمند رایانه‌ای می‌باشد؛ 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 دو نوع هندسه لوله یعنی لوله دارای گرفتگی ۵۰٪ و لوله دارای زانویی ۴۵ درجه با قطر ۱۰ میلی‌متر، 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 ۰/۳ درصد را داراست؛ بنابراین برای شبیه‌سازی‌ها از کیفیت مش نرمال استفاده شده است.

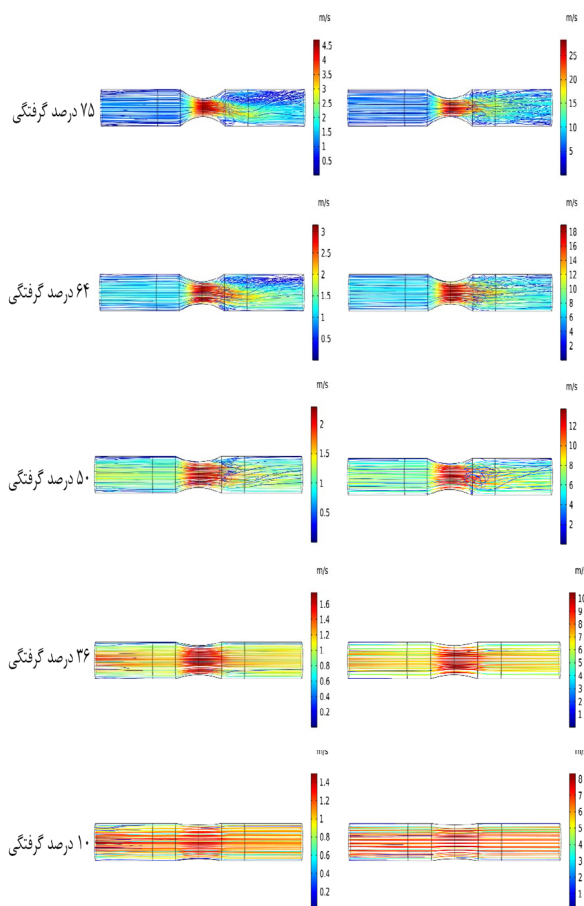
جدول (۱): تحلیل مش هندسه های لوله دارای گرفتگی و

دارای زانوهای با زاویه های مختلف به وسیله ی نتایج سرعت ماکزیمم در خروجی ها در سرعت ۱ متر بر ثانیه

هندسه لوله	کیفیت شبکه	تعداد شبکه	ماکزیمم سرعت در خروجی (m/s)	اختلاف با تعداد مش قبلی	درصد
لوله دارای گرفتگی ۵۰ درصد	درشت‌تر	۴۲۸۴۷	۱.۸۳۵	-	-
	درشت	۱۱۸۱۵۸	۱.۸۲۱	۰.۷۶٪	۰.۳۳٪
	نرمال*	۲۲۸۶۲۳	۱.۸۱۵	۰.۳۳٪	۰.۱۱٪
لوله دارای زانویی ۴۵ درجه با قطر ۱۰ میلی‌متر	درشت‌تر	۱۱۳۱۳	۱.۳۱۹	-	-
	درشت	۳۰۷۷۸	۱.۳۰۱	۱.۳۶٪	۱.۱٪
	نرمال*	۵۷۲۱۳	۱.۲۹۰	۱.۱٪	۰.۲۳٪
	ریز	۱۵۴۸۵۱	۱.۲۹۳	۰.۲۳٪	

و عدد رینولدز، شدت می‌یابد. به‌طور مثال، مشاهده می‌شود که در درصد گرفتگی ۷۵٪، ۶۴٪ و ۵۰٪، در هر دو مقدار سرعت ۱ و ۶ متر بر ثانیه، گردابه‌هایی بعد از گلوگاه تشکیل می‌شود و هرچه میزان درصد گرفتگی بیشتر می‌شود گردابه‌ها و آشفتگی جریان سیال داخل لوله بیشتر پدیدار می‌شوند. هم‌چنین به وضوح می‌توان دید که در سرعت ۶ متر بر ثانیه مقدار این گردابه و آشفتگی نسبت به سرعت ۱ متر بر ثانیه بیشتر است [۲۳-۲۵]. در گرفتگی‌های کمتر (۳۶٪ و ۱۰٪) جریان سیال آرام و بدون ایجاد گردابه در هر دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود. این پدیده‌ها در مطالعات قبلی نیز قابل مشاهده است که صحت نتایج شبیه‌سازی حاضر را نشان می‌دهد [۱۷، ۲۶].

مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۶ متر بر ثانیه مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۱ متر بر ثانیه



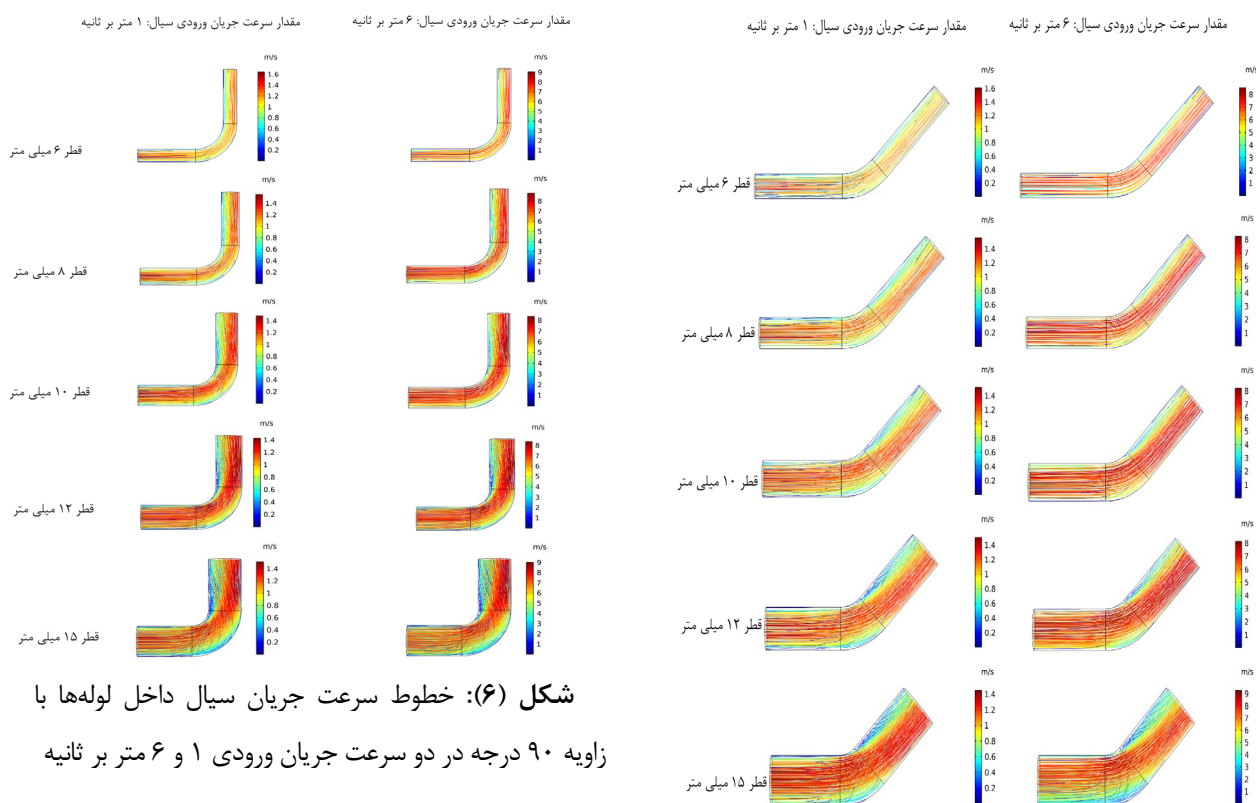
شکل (۴): خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با درصد گرفتگی‌های مختلف در دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه

میدان سرعت تولید شده توسط جریان در دبی ۸ مطابق شکل ۳-ب می‌باشد. ذرات با چگالی ۵۲۳۰ و قطرهای ۳، ۵ و ۷ برای شبیه‌سازی انتخاب شدند. در هر بار شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ذره به طور رندم در خروجی رها می‌شوند و تحت شرایط مرزی چسبناک برای دیواره‌ها به سمت خروجی‌ها که دارای شرط مرزی ناپدید (جایی که میکروحباب‌ها از آنجا خارج می‌شوند و وارد محاسبات شبیه‌سازی نمی‌شوند) هستند، حرکت می‌کنند. مسیر حرکت ذرات ۵ میکرومتر در ثانیه $t=0.005s$ و $t=0.5s$ بترتیب در شکل‌های ۳-ج و ۳-د نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳-ب مشخص است یک نقطه تیز در مسیر ذرات بین دوشاخگی وجود دارد. وجود چنین ناحیه‌ای در مسیر جریان باعث کاهش سرعت و در نهایت موقعیت ذرات در نقطه دوشاخگی می‌شود. همچنین بعضی از ذراتی که در کنار دیواره حرکت می‌کنند به علت موقعیت اولیه‌شان و همچنین شرط مرزی تعریف شده برای دیواره به دیواره‌های لوله می‌چسبند. درصد پراکندگی ذرات با قطرهای مختلف در دبی‌های مختلف در شکل ۳-ه نشان داده شده است. انطباق خوب نتایج عددی مطالعه حاضر با کار آزمایشگاهی کیم و اقلسیاس [۱۵] اعتبارسنجی حل انجام شده برای جریان سیال و حرکت ذرات را نشان می‌دهد.

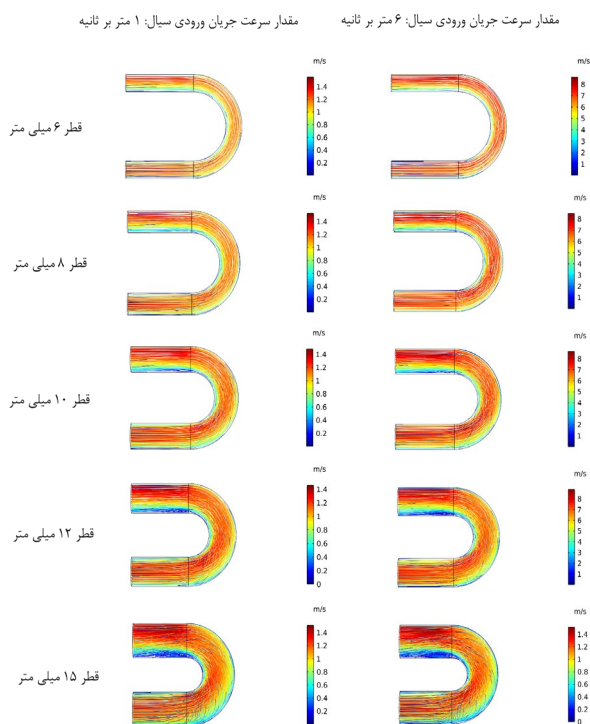
۶- نتایج

الف- نتایج جریان سیال

حرکت ذرات (میکروحباب‌ها) در داخل لوله‌ها و کانال‌ها به‌شدت به الگوی جریان سیال داخل لوله وابسته است، چرا که مؤثرترین نیروهای وارده به ذرات از طرف سیال هستند که شامل نیروی پسا و نیروی براء می‌باشد [۱۶]. بنابراین بررسی الگوی جریان سیال داخل لوله‌ها می‌تواند حرکت ذرات داخل لوله‌ها را توجیه کند و به درک ما به پیش‌بینی حرکت ذرات داخل لوله‌ها کمک بسزایی می‌کند [۱۷-۲۲]. خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با درصد گرفتگی مختلف در دو سرعت جریان ورودی به لوله ۱ و ۶ متر بر ثانیه در شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که هرچه قدر سرعت ورودی سیال بیشتر شود و درصد گرفتگی لوله نیز بالا باشد، مقدار گردابه تشکیل شده در ناحیه بعد از گرفتگی بدلیل ایجاد گلوگاه، تغییر قطر ناگهانی



شکل (۶): خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با زاویه ۹۰ درجه در دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه



شکل (۷): خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با زاویه ۱۸۰ درجه در دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه

شکل (۵): خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها با زاویه ۴۵ درجه در دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه

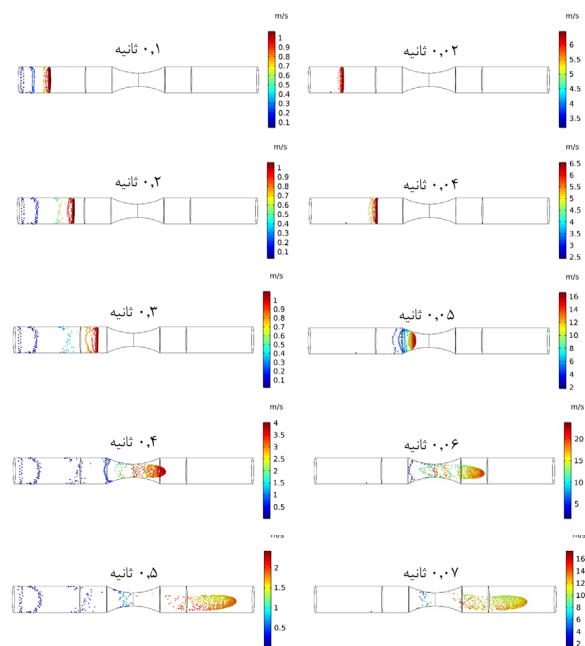
خطوط سرعت جریان سیال داخل لوله‌ها در قطرهای ۴، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر، با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متربرثانیه، با زاویه ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه بترتیب در شکل‌های ۵-۷ آورده شده است. در هرکدام از شکل‌ها مشاهده می‌شود که ماکزیمم سرعت سیال در وسط لوله اتفاق می‌افتد که با توجه به پروفیل سهمی سرعت جریان سیال داخل لوله (بصورت تئوری)، انتظاری غیر از این نمی‌رفت. همچنین نشانه‌هایی از ایجاد جریان گردابه‌ای در قطرهای بالای لوله‌ها (۱۲ و ۱۵ میلی‌متر) بعد از خم شدگی لوله‌ها وجود دارد. با این حال، این جریان گردابه‌ای تشکیل شده نسبت به گرفتگی‌های لوله ناچیز هستند و می‌توان از این گردابه‌ها صرف نظر کرد؛ بنابراین می‌توان گفت که جریان آرام در همه‌ی لوله‌های دارای قطر و زاویه خم‌شدگی مختلف برقرار است.

ب- ردیابی ذرات در لوله‌های دارای گرفتگی

ردیابی حباب‌های به وجود آمده در لوله و میزان برخورد آن‌ها به دیواره که احتمال ترکیدن حباب‌ها را به دنبال دارد، در پیش‌بینی میزان مخرب بودن آن‌ها و آسیب به دیواره داخلی لوله و احتمال ترکیدن لوله‌ها می‌تواند گامی مهم در تعیین و تخمین آسیب لوله‌ها و طراحی لوله‌ها باشند. به‌ویژه لوله‌هایی که بعد از پمپ قرار دارند و احتمال تولید حباب‌ها در آن‌ها بسیار بیشتر است. در مطالعه حاضر، جهت بررسی این میزان تخریب به‌صورت کمی از تعداد برخورد میکروحباب‌ها به دیواره‌های لوله که در معرض برخورد بیشتر حباب‌ها قرار دارند، استفاده شده است. قطر میکروحباب‌های تولید شده، ۱ میکرومتر در نظر گرفته شده است که به تعداد ۱۰۰۰ میکروحباب وارد لوله می‌شوند. این بررسی در سرعت جریان سیال ورودی کمتر (۱ متر بر ثانیه) و بیشتر (۶ متر بر ثانیه) انجام گرفته است.

۷۵ درصد گرفتگی

مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۶ متر بر ثانیه مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۱ متر بر ثانیه



شکل (۸): موقعیت ذرات در داخل لوله با گرفتگی

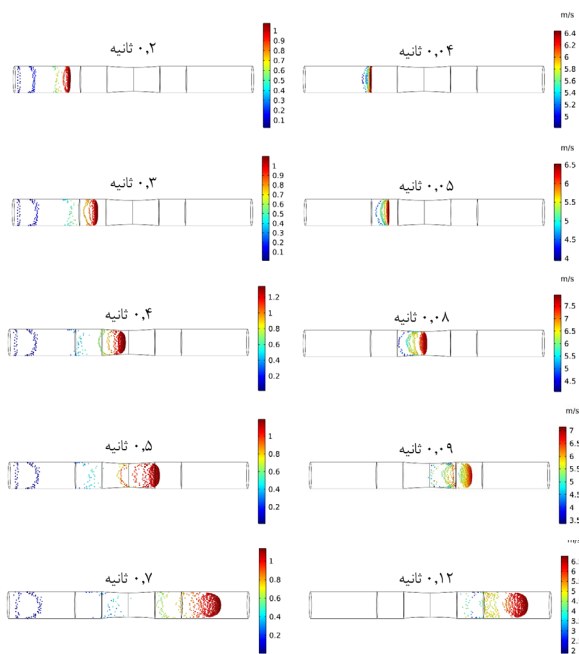
۷۵ درصد با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

پراکندگی ذرات (میکروحباب‌ها) در سرعت جریان ورودی سیال ۱ و ۶ متر بر ثانیه در فاصله زمانی مختلف در لوله‌ی با میزان گرفتگی ۷۵٪ و ۱۰٪ بترتیب در شکل‌های ۷

و ۸ آورده شده است. برای درصد گرفتگی‌های بالای ۷۵٪، مشاهده می‌شود که گردابه‌هایی که تشکیل شده‌اند در اثر جریان سیال در پراکندگی ذرات بعد از گلوگاه و پس زدن آن‌ها به سمت ناحیه گرفته شده، نقش بسزایی دارند. هم-چنین مشاهده می‌شود که در سرعت جریان ورودی بالا (۶ متر بر ثانیه) نسبت به سرعت جریان ورودی پایین (۱ متر بر ثانیه) پروفیل سرعت برای سهمی شدن (جریان توسعه یافته) نیاز به طول لوله ورودی زیادی دارد؛ بنابراین در سرعت‌های پایین جریان ورودی، جریان سریع توسعه یافته می‌شود و این عامل باعث می‌شود که ذرات به سرعت در موقعیت تعادلی قرار بگیرند. یعنی در ناحیه میانی لوله‌ها، که باعث می‌شود تعداد کمی از ذرات احتمال برخورد به ناحیه گرفته شده را داشته باشند.

۱۰ درصد گرفتگی

مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۶ متر بر ثانیه مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۱ متر بر ثانیه



شکل (۹): موقعیت ذرات در داخل لوله با گرفتگی

۱۰ درصد با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

تعداد برخورد ذرات به دیواره ناحیه گرفته شده، در لوله‌های دارای گرفتگی‌های مختلف در دو سرعت ورودی سیال ۱ و ۶ متر بر ثانیه در شکل ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که در درصد گرفتگی‌های بالا (۵۰٪، ۶۴٪ و ۷۰٪) تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره گرفته شده به‌شدت بالاست. این پدیده به دلیل برخورد زیاد جریان

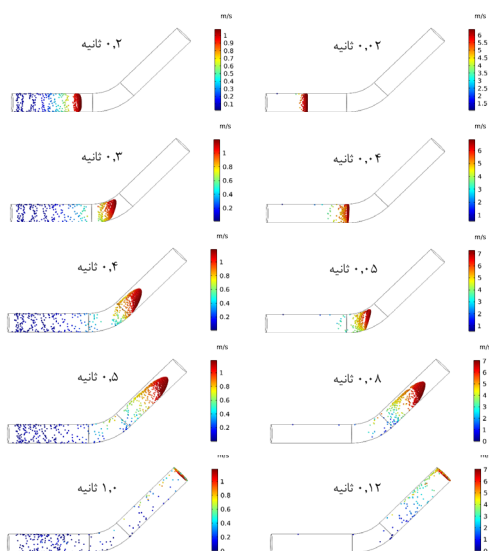
جریان سیال ورودی به لوله بیشتر باشد، احتمال آسیب بدلیل برخورد بیشتر میکروحبابها به دیواره به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. با این حال در درصد گرفتگی پایین لوله (کمتر از ۳۶٪) هرچه سرعت جریان ورودی سیال کمتر باشد، احتمال برخورد میکروحبابها به دیواره گرفتگی نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه احتمال تخریب و آسیب دیدگی لوله‌ها نیز بیشتر می‌شود.

ج- ردیابی ذرات در لوله‌های زانو دار

پراکندگی میکروحبابها در سرعت جریان ورودی سیال پایین و بالا در فاصله زمانی مختلف در لوله‌های با زاویه‌های خم‌شدگی ۴۵ درجه و ۱۸۰ درجه در قطرهای ۶ و ۱۵ میلی‌متر، برترتیب در شکل‌های ۱۱-۱۴ آورده شده است. در همه‌ی لوله‌ها با زاویه‌ی خم‌شدگی‌های ۴۵ و ۱۸۰ درجه مشاهده می‌شود که هرچقدر قطر لوله بیشتر می‌شود، ذرات (میکروحبابها) فضای بیشتری برای رد شدن از ناحیه‌ی وسط لوله را دارند که می‌توانند باعث شود که احتمال برخورد میکروحبابها به دیواره‌ی زانویی لوله‌ها کاهش یابد. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه زاویه زانویی لوله افزایش یابد امکان برخورد میکروحبابها به ناحیه زانویی لوله‌ها افزایش می‌یابد و این مسئله می‌تواند باعث افزایش احتمال آسیب لوله‌ها شود.

قطر ۶ میلی‌متر

مقدار سرعت جریان ورودی سیال: ۱ متر بر ثانیه

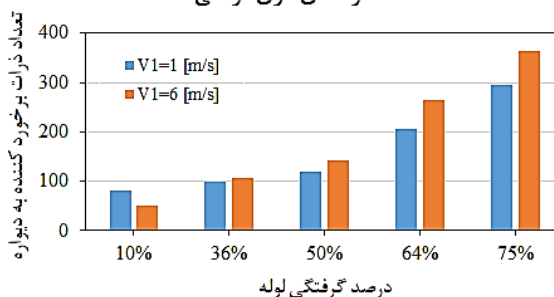


شکل (۱۱): موقعیت ذرات در داخل لوله با زاویه ۴۵ درجه و قطر ۶ میلی‌متر با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

سیال حامل ذرات به سمت دیواره در نواحی گرفته شده است. همچنین در سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه در دو میزان گرفتگی ۷۵٪ و ۶۴٪ اختلاف ۳۸٪ در تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره گرفته شده، مشاهده می‌شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در سرعت جریان ورودی بالا نسبت به سرعت جریان ورودی پایین تعداد برخورد ذرات به دیواره گرفته شده لوله، بالاست. بطوریکه برای گرفتگی‌های ۷۵٪ و ۶۴٪ برترتیب ۲۳٪ و ۲۸٪ اختلاف در تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره در هر دو سرعت جریان ورودی ایجاد می‌شود. علت اصلی این پدیده را میتوان به ایجاد جریان گردابه بعد از گلوگاه نسبت داد، چرا که جریان گردابه‌ای می‌تواند زمان باقی ماندن ذرات در ناحیه گرفته شده را افزایش دهد، از اینرو احتمال برخورد آن‌ها به دیواره ناحیه گرفتگی نیز افزایش می‌یابد.

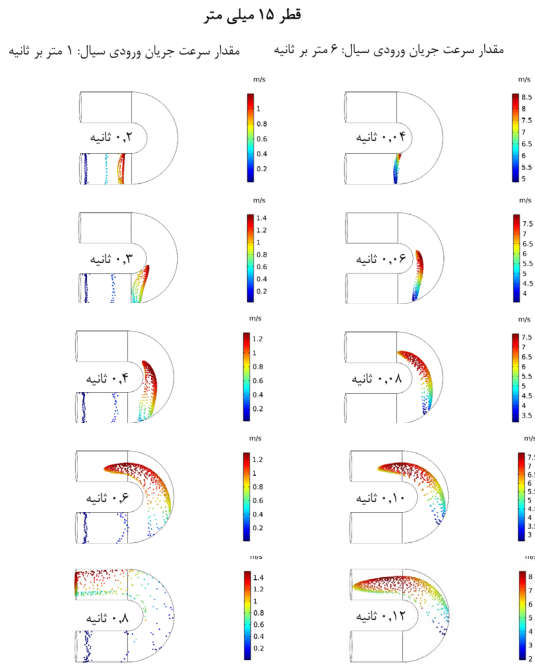
در مقدار گرفتگی پایین لوله (۱۰٪) مشاهده می‌شود که علاوه بر اینکه تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره گرفتگی کمتر از دیگر لوله‌های دارای گرفتگی بالاتر است، در سرعت جریان ورودی بالا نسبت به سرعت پایین این افت چشمگیر است (در حدود ۳۸٪ کاهش). علت اصلی این پدیده را می‌توان در موقعیت تعادلی ذرات داخل لوله که بیشتر جریان آرام هستند، دانست. بطوریکه در سرعت جریان سیال بالا ذرات بیشتر در ناحیه میانی، ذرات تمایل به حرکت دارند و احتمال برخورد آن‌ها به دیواره گرفتگی کمتر است.

لوله‌های دارای گرفتگی



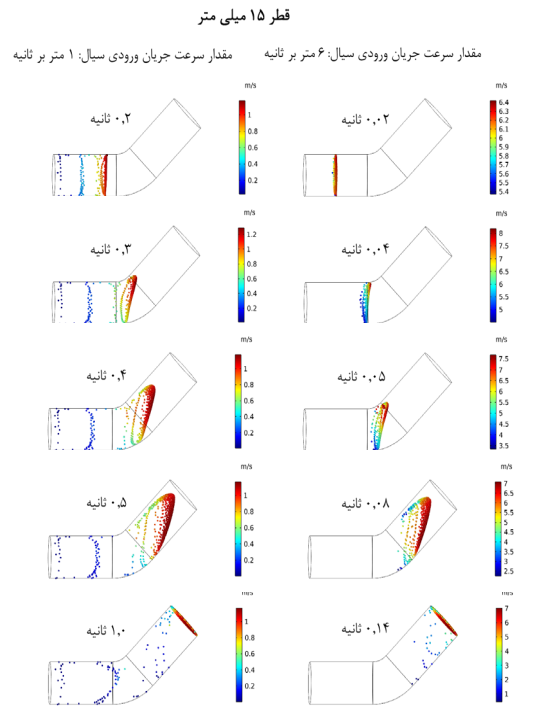
شکل (۱۰): تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره داخلی گرفته شده در لوله با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در گرفتگی‌های مختلف لوله

بنابراین، می‌توان گفت که هرچقدر لوله دارای گرفتگی بیشتر باشد، احتمال برخورد میکروحبابها به ناحیه گرفتگی و ترکیدن آن‌ها زیاد است که از اینرو احتمال آسیب دیواره لوله به شدت افزایش می‌یابد. همچنین در درصد گرفتگی‌های بالای لوله (بالای ۳۶٪) هرچه سرعت

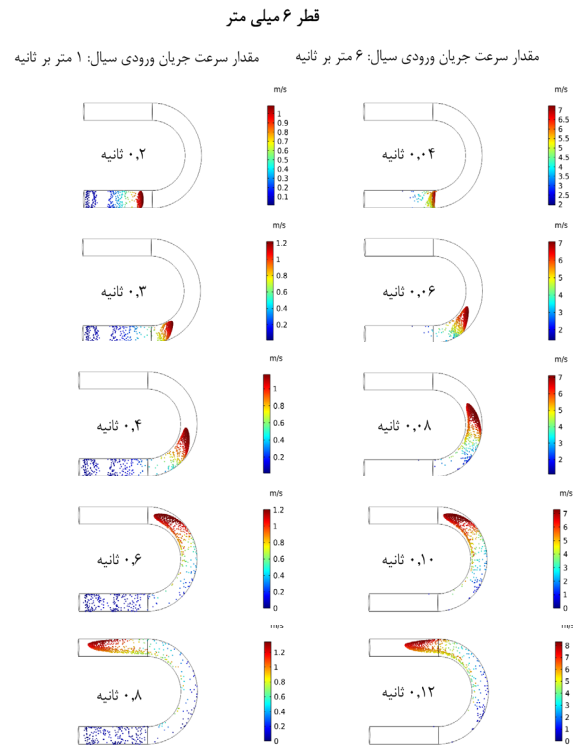


شکل (۱۴): موقعیت ذرات در داخل لوله با زاویه ۱۸۰ درجه و قطر ۱۵ میلی متر با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

تعداد میکروحباب‌های برخوردکننده به دیواره ناحیه زانویی در دو سرعت جریان سیال ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در قطرهای مختلف (۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر) برای لوله‌هایی با زانوهای ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه بترتیب در شکل-های ۱۵-۱۷ آورده شده است. مشاهده می‌شود که هرچه قدر زاویه زانویی بیشتر شود، تعداد میکروحباب‌های برخوردکننده به دیواره به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. بطوریکه برای سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه در لوله به قطر ۶ میلی‌متر اختلاف تعداد میکروحباب‌های برخوردکننده به دیواره زانویی بین زاویه زانویی ۱۸۰ و ۴۵ درجه و زاویه زانویی ۹۰ و ۴۵ درجه بترتیب ۳۷٪ و ۲۱٪ می‌باشد. این پدیده به دلیل برخورد مستقیم سیال به ناحیه زانویی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه قطر لوله بیشتر شود تعداد برخورد ذرات به دیواره زانویی کاهش می‌یابد چرا که ذرات می‌توانند فضای بیشتری برای حرکت در داخل لوله بدون برخورد به دیواره پیدا کنند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که افزایش سرعت سیال باعث کاهش جزئی در تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره زانویی لوله می‌شود که می‌تواند بدلیل تشکیل جریان توسعه یافته شود و موقعیت ذرات را در ناحیه وسط لوله‌ها به تعادل برساند [۱۶، ۲۰-۲۳، ۲۷-۲۸].



شکل (۱۲): موقعیت ذرات در داخل لوله با زاویه ۴۵ درجه و قطر ۱۵ میلی متر با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف



شکل (۱۳): موقعیت ذرات در داخل لوله با زاویه ۱۸۰ درجه و قطر ۶ میلی متر با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

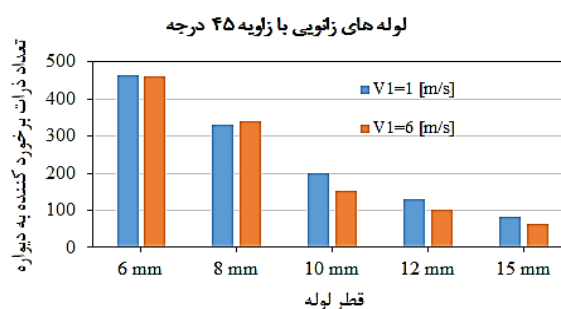
۷- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی حرکت میکرو حباب‌های تولید شده و تخمین میزان برخورد حباب‌ها به دیواره داخل لوله‌های دارای گرفتگی‌های سطحی با درصد گرفتگی‌های مختلف و لوله‌های دارای زانویی با در نظر گرفتن دبی ورودی مختلف داخل لوله جهت بررسی میزان آسیب‌پذیری در اثر برخورد حباب‌ها در هر کدام از هندسه‌های مختلف پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای لوله‌های گرفته نشان می‌دهد که هرچه قطر لوله دارای درصد گرفتگی بیشتر باشد، احتمال برخورد میکرو حباب‌ها به ناحیه گرفتگی و ترکیدن آن‌ها زیاد است که از این رو احتمال آسیب دیواره لوله به شدت افزایش می‌یابد. همچنین در درصد گرفتگی‌های بالای لوله (بالای ۳۶٪) هرچه سرعت جریان سیال ورودی به لوله بیشتر باشد، احتمال آسیب به دلیل برخورد بیشتر میکرو حباب‌ها به دیواره به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. باین‌حال در درصد گرفتگی پایین لوله (کمتر از ۳۶٪) هرچه سرعت جریان ورودی سیال کمتر باشد، احتمال برخورد میکرو حباب‌ها به دیواره گرفتگی نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه احتمال تخریب و آسیب‌دیدگی لوله‌ها نیز بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای لوله‌های زانویی نشان می‌دهد که افزایش زاویه زانویی لوله‌ها تعداد برخورد میکرو حباب به دیواره زانویی را بیشتر کند و به طبع اثرات زیان‌باری را در آسیب به دیواره داخلی در هنگام برخورد میکرو حباب‌ها و ترکیدن آن‌ها به وجود آورد. باین‌حال، با افزایش سرعت ورودی جریان سیال و قطر لوله‌ها می‌توان از شدت آسیب به دیواره‌ها و ناحیه زانویی لوله‌ها کاست.

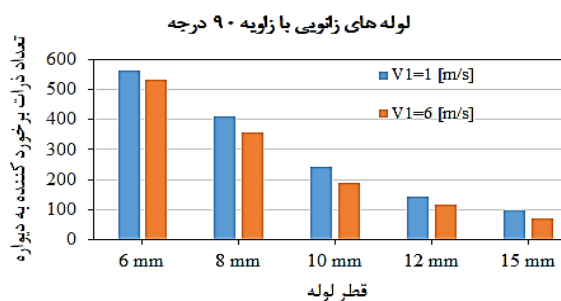
۵- مراجع

- [1] Brennen, C. "A numerical solution of axisymmetric cavity flows", *J. Fluid Mech.* 37 (1969). DOI:10.1017/S0022112069000802.
- [2] Acosta, A.J., and Parkin, B.R. "Cavitation inception - a selective review", (1974). <https://doi.org/10.5957/jsr.1975.19.4.193>.
- [3] Hu, C., Yang, H.L., Zhao, C.B., and Huang, W.H. "Unsteady supercavitating flow past cones", *J. Hydrodyn.* 18 (2006). DOI:10.1016/S1001-6058(06)60002-4.
- [4] Gavzan, I.J., and Rad, M. "Experimental analysis of cavitation effects on drag force and back pressure of circular cylinder with free turbulence", *Sci. Iran.* 16 (2009).
- [5] Biluš, I., Bombek, G., Hočevár, M., Širok, B., Cenčič, T., and Petkovšek, M. "The experimental analysis of cavitating structure fluctuations and pressure pulsations in the cavitation station, Stroj", *Vestnik/Journal Mech. Eng.* 60 (2014).

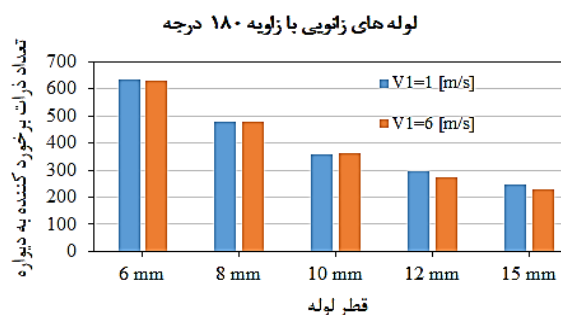
بنابراین، می‌توان گفت که با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر، افزایش زاویه زانویی لوله‌ها تعداد برخورد میکرو حباب تولید شده از ابتدا را به دیواره زانویی را بیشتر کند و به طبع اثرات زیان‌باری را در آسیب به دیواره داخلی در هنگام برخورد میکرو حباب‌ها و ترکیدن آن‌ها به وجود آورد. باین‌حال، با افزایش سرعت ورودی جریان سیال و قطر لوله‌ها می‌توان از شدت آسیب به دیواره‌ها و ناحیه زانویی لوله‌ها کاست.



شکل (۱۵): تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره داخلی ناحیه زانویی در لوله‌های زانویی با زاویه ۴۵ درجه با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه



شکل (۱۶): تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره داخلی ناحیه زانویی در لوله‌های زانویی با زاویه ۹۰ درجه با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه



شکل (۱۷): تعداد ذرات برخورد کننده به دیواره داخلی ناحیه زانویی در لوله‌های زانویی با زاویه ۱۸۰ درجه با دو سرعت جریان ورودی ۱ و ۶ متر بر ثانیه

- <https://doi.org/10.1142/S1758825120501100>.
- [18] Farajollahi, A., Mokhtari, A., Rostami, M., Imani, K., and Salimi, M. "Numerical study of using perforated conical turbulators and added nanoparticles to enhance heat transfer performance in heat exchangers", *Scientia Iranica*, 2023, 30(3), pp. 1027-1038. doi: 10.24200/sci.2022.59717.6394
- [19] Ranjbar, H., Farajollahi, A. and 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). <https://doi.org/10.1007/s10237-023-01756-9>
- [20] Saleh-Abadi, M., Rostami, M., and 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.
- [21] 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
- [22] 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*, Vol. 11, No. 1, pp.57-70,2022.(In Persian).DOR: 20.1001.1.23223278.1401.11.1.4.6)
- [23] Farajollahi, A.H., Yahyaabadi, M.M., and Pourseifi, M., "Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement in an Automotive Radiator Utilizing Mini-Channel Tubes and Tubes Configuration", *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 11, No. 2, pp.39-52, 2023. (In Persian)
DOR: 20.1001.1.23223278.1401.11.2.4.8
- [24] 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.
- [25] 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: 10.021/acs.molpharmaceut.3c01109.
- [26] 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.
- [27] Segré, G., and Silberberg, A. "Radial particle displacements in poiseuille flow of suspensions, *Nature*. 189 (1961). DOI:10.1038/189209a0.
- [28] Di Carlo, D. "Inertial microfluidics, *Lab Chip*", 9 (2009). DOI:10.1039/b912547g.
- [6] Sedlá, M., Komárek, M., Rudolf, P., Kozák, J., and Huzlík, R. "Numerical and experimental research on unsteady cavitating flow around NACA 2412 hydrofoil", in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2015. DOI:10.1088/1757-899X/72/2/022014.
- [7] Sarrashtari, A., and Najafi, V. "Comparison and appropriate selection of mass transfer models for predicting cavitation in internal flows", *Fluid Mechanics and Aerodynamics*, 1392;2(2). .
- [8] Jafari Gavzan, I., Firouz abadi, B., and Amini, H. "Experimental Investigation of Cavitation in Flow around an Extended Wedge", *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2018; 7(1): 27-35.
- [9] Farajollahi, A.H., Firoozy, R., and Poursefi, M. "Numerical Investigation on the Influence of the Nozzle Geometry and Needle Lift Profile Simultaneous Change on Spray Behavior of Diesel Fuel in Injector", *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2020; 8(2): 97-110..
- [10] Fadaeiroodi, R., and Pasandidehfard, M. "Investigation of the New GEKO Turbulence Model for Flows with Cavitation Around Projectiles with Flat and Hemispherical Heads", *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2021; 10(1): 37-53.
- [11] 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.
- [12] Ebrahimi, S., Shamloo, A., Alishiri, M., Mozhdehbakhsh 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.
- [13] 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. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1989042>.
- [14] 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.
- [15] 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>.
- [16] Amani, A., Shamloo, A., Vatani, P., and Ebrahimi, S. "Particles Focusing and Separation by a Novel Inertial Microfluidic Device: Divergent Serpentine Microchannel", *Ind. Eng. Chem. Res.* **0** (n.d.) null. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c02451>.
- [17] Manzoori, A., Fallah, F., Sharzehee, M., and Ebrahimi, S., "Computational Investigation of the Stability of Stenotic Carotid Artery under Pulsatile Blood Flow Using a Fluid-Structure Interaction Approach", *Int. J. Appl. Mech.* **12** (2020) 1758-8251.

- investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability". *Energy.*, Vol. 130, pp. 327-38, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.04.125.
- [31] Hassanzadeh, R. and Mohammad, N. M. "Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models". *Modares Mechanical Engineering.*, Vol. 85, pp. 2599-2606, 2019. (In Persian).
- [29] Sagharichi, A., Maghrebi, M. J., and ArabGolarcheh, A." Numerical Investigation of the Effect of Fixed and Variable Pitch Angle Blade on Dynamic Stall of Flow Field Around Darrieus Wind Turbine Blade". *Fluid Mechanics and Aerodynamics.*, Vol. 5 (1), pp. 29-46, 2017. (In Persian). DOR: 20.1001.1.23223278.1395.5.2.1.3
- [30] Tahani, M., Rabbani, A., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., and Mirhosseini, M. "Design and numerical