

# بررسی تأثیر ذرات جامد در سیال بر سایش لوله فولادی: مدل سازی CFD و آزمایش های تجربی

آرمین ثابت قدم اصفهانی<sup>۱</sup>، یگانه داود بیگی<sup>۲</sup>، سید محمود لطیفی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. شرکت گاز استان هرمزگان، صندوق پستی ۹۸۴۶۹۹۵۱۹۷، بندرعباس، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: [y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir](mailto:y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir)

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۵۸ - ۷۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

## چکیده

سایش ناشی از ذرات جامد معلق در جریان سیال یکی از مشکلات کلیدی در صنایع نفت و گاز است که می تواند عمر مفید لوله های فولادی را کاهش دهد. در این پژوهش، آزمایش های تجربی متعددی برای بررسی و اعتبارسنجی سه روش مدل سازی مختلف انجام شد: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، مدل اویلری و مدل لاگرانژی. ابتدا جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ و یک زانویی ۹۰ درجه برقرار گردید و نرخ سایش روی دیواره های بیرونی زانویی با استفاده از هر سه روش پیش بینی شد. سپس با آزمایش های سایش پین-روی-دیسک روی نمونه فولاد ST37، نتایج مدل سازی ها با داده های تجربی مقایسه شد. یافته ها نشان دادند که مدل CFD-لاگرانژی با انحراف کمتر از ۱۷/۱۷ درصد و مدل CFD-اویلری با انحراف کمتر از ۱۰/۷ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی همخوانی دارند. این مقایسه دقیق، برتری روش CFD-اویلری را در پیش بینی دقیق تر سایش فولاد ST37 نشان داد. نتایج این مطالعه می تواند راهگشای بهبود طراحی و نگهداری لوله های فولادی در صنایع نفت و گاز بوده و هزینه های ناشی از سایش و خرابی تجهیزات را کاهش دهد.

کلید واژه ها: ذرات جامد، سایش، خواص مکانیکی، نرخ سایش، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل سازی عددی

## ۱. مقدمه

جریان های ذرات گازی رقیق دسته ای از جریان ها هستند که ذرات در امتداد یا درون میدان گاز حرکت می کنند و کاربردهایی در مهندسی شیمی، تبدیل انرژی، فرآوری مواد معدنی، ایمنی راکتور هسته ای و کنترل آلودگی هوا دارند. در این گروه از جریان ها، برخی از داده های مربوط به ذرات مانند سرعت متوسط ذرات و غلظت ذرات، تحت تأثیر میدان جریان گاز آشفته حائز اهمیت است [۱].



نفت و گاز باهم بیش از ۶۸ درصد کل انرژی جهان را تأمین می‌کنند و انتقال این انرژی از طریق خطوط لوله انجام می‌شود [۲]. با این حال، پدیده پودر سیاه (ترکیبی از سولفید آهن، اکسیدهای آهن و کربنات آهن) در خطوط لوله گاز، تهدیدی جدی برای تجهیزات ایجاد می‌کند. این ذرات با ایجاد ساییش در اجزای کمپرسور، شیرهای کنترل و فیلترها، عملکرد سیستم را مختل کرده و کیفیت گاز تحویلی را کاهش می‌دهند [۳-۵]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عواملی مانند سرعت جریان، اندازه ذرات و جنس لوله تأثیر قابل توجهی بر شدت ساییش دارند [۶, ۷]. برآوردها نشان می‌دهد که هزینه‌های مرتبط با خوردگی و ساییش در این صنعت سالانه به میلیاردها دلار می‌رسد که شامل هزینه‌های تعمیرات، تعویض تجهیزات، توقف تولید و خسارات زیست‌محیطی می‌شود. تحلیل اقتصادی این خسارات و هزینه‌های نگهداری می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهینه در طراحی، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی تعمیرات کمک کرده و ارزش اقتصادی پژوهش‌های مرتبط با ساییش را برجسته‌تر سازد [۸].

همچنین در صنایع نفت و گاز، ساییش به‌عنوان یکی از عوامل اصلی کاهش یکپارچگی ساختاری و افزایش ریسک‌های ایمنی شناخته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که ساییش می‌تواند منجر به نشت مواد خطرناک، انفجار یا آلودگی محیطی گردد که تأثیرات جبران‌ناپذیری بر ایمنی کارکنان و محیط‌زیست دارد؛ بنابراین، تحلیل دقیق ساییش و ارزیابی ریسک‌های مرتبط با آن برای طراحی و بهره‌برداری ایمن از خطوط لوله ضروری است [۹].

زانویی‌ها به‌عنوان اجزای کلیدی در سیستم‌های انتقال پنوماتیکی، به دلیل افت فشار، جداسازی ذرات و ساییش دیواره لوله، چالش‌هایی را به همراه دارند. مطالعات نشان می‌دهند که هندسه زانویی (مانند شعاع انحنا و جهت‌گیری) و توزیع اندازه ذرات، بر الگوی جریان و نرخ ساییش تأثیر مستقیم دارند [۱۰-۱۲]. برای مثال، افزایش شعاع انحنای زانویی می‌تواند ساییش ناشی از برخورد ذرات را کاهش دهد [۱۳]. با این حال، طراحی بهینه این تجهیزات مستلزم درک دقیق برهم‌کنش ذرات با جریان آشفته گاز است.

فولاد ST37، یکی از پرکاربردترین فولادهای ساختمانی و صنعتی با کربن پایین است که به‌ویژه در صنایع کلیدی مانند ساخت لوله‌های انتقال نفت و گاز، سازه‌های فلزی و تجهیزات صنعتی به کار می‌رود. این فولاد به لطف ترکیبی از خواص مکانیکی مطلوب، شامل مقاومت تسلیم حداقل  $235 \text{ N/mm}^2$ ، مقاومت کششی  $360-510 \text{ N/mm}^2$  و شکل‌پذیری بالا، همراه با قابلیت جوشکاری و تراشکاری عالی، به انتخابی ایده‌آل برای پروژه‌های صنعتی بزرگ تبدیل شده است. علاوه بر این، هزینه نسبتاً پایین آن در مقایسه با فولادهای آلیاژی پیشرفته، جذابیت اقتصادی آن را دوچندان می‌کند. استاندارد قدیمی DIN 17100:1980 آلمان که در گذشته برای تعریف این فولاد استفاده می‌شد، اکنون جای خود را به استاندارد مدرن EN 10025-2:2004 داده و نام جدید آن S235JR است. از نظر خواص فیزیکی، این فولاد دارای تراکم  $7.85 \text{ g/cm}^3$ ، نقطه ذوب  $1420-1460^\circ \text{C}$  و سختی حداکثر HBW 120 است که نشان‌دهنده تعادل مناسب بین استحکام و انعطاف‌پذیری آن است [۱۵, ۱۶].

با این حال، یکی از چالش‌های اصلی فولاد ST37، مقاومت محدود آن در برابر ساییش ناشی از ذرات جامد موجود در سیالات انتقالی، به‌ویژه در کاربردهایی مانند لوله‌های نفت و گاز، است. این ساییش می‌تواند به مرور زمان باعث فرسودگی سطحی، کاهش ضخامت دیواره لوله‌ها و درنهایت کوتاه شدن عمر مفید آن‌ها شود که نتیجه آن افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و حتی ریسک‌های عملیاتی است. به همین دلیل، مهندسان و پژوهشگران در تلاشند تا با استفاده از روش‌هایی مانند پوشش‌دهی سطحی، بهبود آلیاژ یا طراحی بهینه سیستم‌ها، مقاومت ساییشی این فولاد را ارتقا دهند. این موضوع به‌ویژه در پروژه‌های انتقال سیالات با ذرات معلق، مانند خطوط لوله در مناطق بیابانی یا محیط‌های خورنده، از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱۶, ۱۷].

دو مورد از مهم‌ترین مشکلاتی که هنگام ورود ذرات به یک جریان آشفته به وجود می‌آید، پراکندگی ذرات توسط آشفتگی و تغییر خواص آشفتگی در فاز گاز توسط ذرات است [۱۲]. این پراکندگی با دو دیدگاه بررسی می‌شود: اول، فرض اینکه خواص میدان جریان گاز تحت

1. Black Powder





تأثیر ذرات قرار نمی‌گیرد (اتصال یک‌طرفه) و دوم، در نظر گرفتن تغییراتی که ذرات در میدان جریان ایجاد می‌کنند (اتصال دوطرفه).

دو تکنیک اصلی برای شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی، مدل دو سیال اوپلری-اوپلری (TFM)<sup>۱</sup> و مدل ردیابی ذرات لاگرانژی (LPT)<sup>۲</sup> هستند. در دیدگاه اوپلری، دو فاز (گاز و ذرات جامد) به‌عنوان محیط‌های پیوسته در نظر گرفته می‌شوند که با ضرایب تبادل به هم مرتبط هستند. در دیدگاه لاگرانژی، هر ذره درون حوزه محاسباتی ردیابی می‌شود که پیاده‌سازی ضرایب تبادل را آسان‌تر می‌کند [۱۳].

در همین راستا، انتخاب روش مناسب برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی به‌ویژه در حضور ذرات جامد، بستگی مستقیمی به ویژگی‌های جریان و هدف مدل‌سازی دارد. روش اوپلری هر دو فاز سیال و ذرات را به‌عنوان پیوسته‌های درهم‌تنیده در نظر می‌گیرد و معادلات بقا را برای هر فاز بر روی یک شبکه ثابت حل می‌کند. این روش برای جریان‌های ذرات متراکم و شرایط پایدار از نظر محاسباتی کارآمد است، اما ممکن است به مدل‌های بسته پیچیده برای در نظر گرفتن تعاملات ذرات نیاز داشته باشد [۱۸]. در مقابل، روش لاگرانژی ذرات منفرد یا بسته‌های نماینده ذرات را در میدان جریان ردیابی می‌کند و اطلاعات دقیقی در مورد مسیرها و رفتارهای ذرات ارائه می‌دهد. در حالی که این روش برای جریان‌های رقیق و شرایط گذرا دقیق‌تر است، برای سیستم‌هایی با تعداد زیادی ذره به منابع محاسباتی قابل توجهی نیاز دارد [۱۹]. در زمینه مدل‌سازی سایش در لوله‌ها به دلیل ذرات جامد، هر دو روش به کار گرفته شده‌اند و انتخاب بین آن‌ها به عواملی مانند غلظت ذرات، اندازه و ویژگی‌های خاص جریان بستگی دارد. به‌عنوان مثال، در سناریوهایی با غلظت بالای ذرات، روش اوپلری ممکن است مناسب‌تر باشد، در حالی که روش لاگرانژی برای جریان‌های رقیق یا زمانی که داده‌های دقیق برخورد ذرات ضروری است، ترجیح داده می‌شود.

مدل‌سازی سایش مبتنی بر دینامیک سیالات

محاسباتی (CFD)<sup>۳</sup> برای پیش‌بینی سایش در هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود. مقایسه سرعت و سایش ذرات محاسبه‌شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در جریان آب و هوا نشان داده که مدل‌های سایش مرکز تحقیقات خوردگی-سایشی و مدل اوکا و همکاران از دقت بیشتری برخوردارند [۲۰-۲۲]. همچنین، روشی برای پیش‌بینی سایش در زانویی‌ها و سه‌راهه‌های مسدود شده با استفاده از داده‌های تجربی توسعه یافته و در کد CFD، CFX 4.2 پیاده‌سازی شده است [۲۳، ۲۴]. مطالعات دیگری شدت نسبی سایش در زانویی‌ها و سه‌راهه‌ها را در جریان‌های رقیق گاز-مایع-جامد بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که نوع سیال حامل بر میزان سایش تأثیرگذار است [۲۵]. علاوه بر این، تأثیر شعاع انحنای زانویی بر سایش ناشی از برخورد ذرات مورد ارزیابی قرار گرفته و مشخص شده که شعاع خمیدگی بزرگ‌تر، سایش را کاهش می‌دهد [۲۶]. همچنین، جهت‌گیری زانویی بر حرکت ذرات و در نتیجه بر میزان سایش تأثیر دارد [۲۷].

مطالعات قبلی [۲۰-۲۷] درباره سایش در لوله‌های فولادی اغلب بر شبیه‌سازی‌های عددی متمرکز بوده‌اند، اما داده‌های تجربی کافی برای اعتبارسنجی این مدل‌ها ارائه نشده است. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها نقش بسزایی در تعیین شیوه‌ای واقعی‌تر و صحیح‌تر برای شبیه‌سازی دارد و همچنین، فرآیند شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. از این رو، وجود نتایج آزمایشگاهی که در شرایطی منطبق با شبیه‌سازی‌ها به‌دست آمده باشند، برای مقایسه و استخراج درصد خطا ضروری است.

در این پژوهش، مطالعه‌ای جامع برای بررسی سایش لوله‌های فولادی ST37 ناشی از ذرات جامد موجود در جریان گاز انجام شد. تمرکز اصلی این تحقیق بر آزمایش‌های تجربی بود که شامل برقراری جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه و همچنین انجام آزمایش‌های سایش پین-روی-دیسک بر روی نمونه‌های فولادی ST37 بود. این آزمایش‌ها داده‌های لازم را برای اعتبارسنجی سه روش مدل‌سازی عددی، یعنی دینامیک سیالات محاسباتی

1. Two-Fluid Model
2. Lagrangian Particle Tracking
3. Computational Fluid Dynamics

(CFD)، مدل اولیری و مدل لاگرانژی، فراهم کردند. با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها با داده‌های تجربی، دقت هر روش در پیش‌بینی سایش ارزیابی شد. این فرآیند اعتبارسنجی نقش مهمی در شناسایی روش مناسب برای تحلیل سایش در سیستم‌های لوله‌کشی دارد و می‌تواند به بهبود طراحی و استراتژی‌های نگهداری در صنعت نفت و گاز کمک کند که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از آسیب‌های سایشی و افزایش ایمنی عملیاتی می‌شود.

## ۲. مطالعات CFD

در این پژوهش، از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌عنوان ابزاری کلیدی برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار جریان سیالات، به‌ویژه برهم‌کنش بین جریان گاز و ذرات جامد، استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی سایش فولاد ST37 در لوله‌های انتقال گاز به دلیل حضور ذرات جامد معلق در سیال است که می‌تواند عمر مفید تجهیزات را کاهش دهد. برای دستیابی به این هدف، شبیه‌سازی‌های CFD بر روی دو هندسه کلیدی انجام گرفت: یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه که هر یک شرایط و چالش‌های متفاوتی را در انتقال گاز و ذرات جامد ارائه می‌دهند. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.3 انجام شده و از رویکردهای مختلف مدل‌سازی چندفازی برای تحلیل دقیق رفتار جریان و سایش استفاده شده است.

### ۱-۲. هندسه و شرایط جریان

دو هندسه متمایز برای تحلیل سایش لوله‌های فولادی ST37 در این مطالعه در نظر گرفته شده است: یک لوله مستقیم و یک زانویی ۹۰ درجه. این هندسه‌ها نماینده اجزای رایج در سیستم‌های انتقال گاز هستند و برای بررسی پدیده‌های مختلف مرتبط با سایش انتخاب شده‌اند.

- **لوله مستقیم:** این هندسه شامل یک لوله با طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ (تقریباً ۱/۴۲ متر) است. در شبیه‌سازی‌ها، فرض شده است که ذرات جامد در ابتدا در کف لوله ته‌نشین شده‌اند و جریان گاز برای سیال‌سازی و حمل این ذرات وارد می‌شود.

سرعت‌های گاز از ۰/۵ تا ۳۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است تا تأثیر سرعت جریان بر رفتار ذرات، از جمله سیال‌سازی و خروج آن‌ها از لوله، بررسی شود. این هندسه برای مطالعه رفتار کلی ذرات در یک جریان مستقیم و اثرات آن بر سایش دیواره داخلی مناسب است.

- **زانویی ۹۰ درجه:** این هندسه دارای قطر ۵۶ اینچ و نسبت شعاع انحنا به قطر ۱/۵ است. زانویی‌ها به دلیل تغییر جهت جریان و تمرکز ذرات در دیواره خارجی، نقاط حساسی برای سایش هستند. این هندسه برای تحلیل دقیق برهم‌کنش ذرات با دیواره خارجی و پیش‌بینی نرخ سایش طراحی شده است. در شبیه‌سازی‌ها، ذرات با جریان گاز وارد زانویی شده و مسیر آن‌ها تحت تأثیر نیروهای جریان و گریز از مرکز بررسی می‌شود.

- **شرایط جریان:** شرایط جریان برای هر دو هندسه یکسان در نظر گرفته شده است تا امکان مقایسه نتایج فراهم شود. این شرایط شامل موارد زیر است:

۱. نرخ جریان گاز: SMMCF/H ۶۰۰ (میلیون فوت مکعب استاندارد بر ساعت).

۲. فشار عملیاتی: ۸۰ بار که نشان‌دهنده شرایط فشار بالا در خطوط انتقال گاز است.

۳. دما: ۴۰ درجه سانتی‌گراد که دمای عملیاتی استاندارد را بازنمایی می‌کند.

۴. خواص ذرات: ذرات جامد دارای چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت هستند. توزیع اندازه ذرات بر اساس الک آزمایشگاهی<sup>۱</sup> تعیین شده است (جدول ۱) [۲۸].

این شرایط جریان و هندسه‌ها امکان تحلیل دقیق رفتار ذرات در سیستم‌های انتقال گاز و تأثیر آن‌ها بر سایش فولاد ST37 را فراهم می‌کنند. برای لوله مستقیم، تمرکز بر سیال‌سازی و حمل ذرات است، در حالی که برای زانویی، تمرکز بر برخورد ذرات با دیواره و سایش ناشی از آن است.

1. Woven Wire Test Sieve, WWTS

جدول ۱: توزیع اندازه و جرم ذرات [۲۸]

شماره دیسک توری	اندازه ذرات (μm)	جرم ذرات (gr)	(Wt%)
۶	۳۳۵۰ < d	۱۴/۷۳	۷
۸	۲۳۶۰ < d < ۳۳۵۰	۱۷/۴۵	۸/۲
۱۲	۱۷۰۰ < d < ۲۳۶۰	۱۵/۶	۷/۴
۱۶	۱۱۸۰ < d < ۱۷۰۰	۱۹/۴	۹/۲
۲۰	۸۵۰ < d < ۱۱۸۰	۴۱	۱۹/۴
۳۰	۶۰۰ < d < ۸۵۰	۲۰/۹۴	۹/۹
۴۰	۴۲۵ < d < ۶۰۰	۱۵/۸۸	۷/۵
۵۰	۳۰۰ < d < ۴۲۵	۱۳/۱۸	۶/۱
۷۰	۲۱۲ < d < ۳۰۰	۱۲/۷۲	۶/۰
۱۰۰	۱۵۰ < d < ۲۱۲	۲۸/۴۲	۱۳/۵
۲۰۰	۱۲۵ < d < ۱۵۰	۱۲/۴۲	۵/۸

## ۲-۲. فرمول‌بندی ریاضی

در این معادله،  $\bar{\tau}_s$  تنش برشی فاز جامد،  $P_s$  فشار جامد،  $\rho_s$  ضریب درگ بین فازی،  $\alpha_s$  کسر حجمی فاز جامد،  $g$  شتاب چگالی فاز جامد،  $u_s$  سرعت فاز جامد،  $P$  فشار سیال،  $g$  شتاب گرانش و  $u_g$  سرعت فاز گاز هستند. تنش برشی فاز جامد  $\bar{\tau}_s$  به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۹، ۲۸]:

$$\alpha_s \tau_s = -P_s I + \alpha_s \mu_s (\nabla u_s + (\nabla u_s)^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla u_k \quad (۳)$$

که در آن  $\mu_s$  ویسکوزیته برشی جامد و  $\lambda_s$  ویسکوزیته حجمی جامد،  $\bar{A}$  تانسور واحد،  $u_k$  سرعت فاز  $k$  است. فشار جامد با معادله لون محاسبه می‌شود [۲۹، ۲۸]:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (I + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (۴)$$

در این معادله،  $e_{ss}$  ضریب بازیابی برای برخورد ذرات با مقدار پیش فرض ۰/۹ که نشان می‌دهد برخورد ذرات به برخورد الاستیک نزدیک است،  $g_{0,ss}$  تابع توزیع شعاعی و  $\Theta_s$  دمای ذره‌ای  $\bar{A}$  است. دمای ذره‌ای متناسب با انرژی جنبشی حرکت نوسانی ذرات است. معادله پایستگی برای دمای ذره‌ای عبارت است از [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \Theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \Theta_s u_s) \right] = (-P_s \bar{A} + \bar{\tau}_s) : \nabla u_s - \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\theta_s} \quad (۵)$$

نرم‌افزار تجاری CFD و نرم‌افزار FLUENT ۶،۳ برای حل معادلات رینولدز میانگین ناویر-استوکس استفاده می‌شوند. برای ارزیابی تأثیر سرعت ورودی گاز بر الگوی سیال‌سازی ذرات، از چارچوب اویلری برای مدل‌سازی جریان گاز-جامد استفاده می‌شود. در این مدل، هر دو فاز (گاز و ذرات جامد) به عنوان فازهای پیوسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند که به هم نفوذ می‌کنند. تأثیر فاز گاز پیوسته بر روی ذرات توسط نیروی درگ بین فازی تعیین می‌شود. سهم هر فاز در معادلات پیوستگی و مومنتوم توسط کسر حجمی آن فاز مشخص می‌گردد. معادلات فاز جامد از تئوری جنبشی جریان ذره‌ای<sup>۱</sup> به دست می‌آید. معادله پیوستگی برای هر فاز به صورت زیر است [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{\partial (\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \bar{U}_k) = 0 \quad (۱)$$

در این معادله،  $\bar{U}_k$  سرعت فاز  $k$ ،  $\rho_k$  چگالی و  $\alpha_k$  کسر حجمی آن فاز هستند. معادله تعادل مومنتوم برای فاز جامد به صورت زیر است [۲۹، ۲۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s \bar{u}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s g + \sum_{g=1}^n \beta_{gs} (\bar{u}_g - \bar{u}_s) \quad (۲)$$

1. Granular Flow
2. Granular Temperature





درگ بین فازها  $\beta_{gs}$  طبق معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\beta_{Ergun} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\alpha_s d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_s}{d_s} |v - u| ; \alpha_s < 0.8 \quad (12)$$

ویسکوزیته جنبشی با استفاده از معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\beta_{Wen-yu} = \frac{3}{4 C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{d_s} |v - u| \alpha_g^{-2.65}} ; \alpha_g \geq 0.8 \quad (13)$$

که در آن  $\mu_g$  ویسکوزیته فاز گاز،  $\rho_g$  چگالی فاز گاز،  $\alpha_g$  کسر حجمی فاز گاز،  $C_D$  ضریب پسا و  $|v-u|$  اختلاف سرعت نسبی بین فازها است. هندسه مورد استفاده برای ارزیابی الگوی سیال سازی یک لوله ۱۰ متری با قطر ۵۶ اینچ است. فرض بر این است که ذرات در لوله ته‌نشین شده‌اند و تأثیر جریان گاز با سرعت ورودی مختلف روی بستر ذرات در نظر گرفته می‌شود.

### ۳. مطالعات اویلری

در دیدگاه اویلری که توسط اندرسون و جکسون [۲۲] معرفی شد، هر دو فاز سیال (گاز و ذرات) را به‌عنوان دو محیط پیوسته در نظر می‌گیرد که با یکدیگر در تعامل دینامیکی هستند. این رویکرد برخلاف روش لاگرانژی، به‌جای ردیابی تک‌تک ذرات، به توصیف کلی رفتار فاز پراکنده (ذرات) و فاز حامل (گاز) می‌پردازد. یکی از مزایای اصلی این روش، امکان استفاده مستقیم از روش‌های عددی توسعه‌یافته برای جریان‌های تک‌فاز و تعمیم آن‌ها به سیستم‌های دو فاز است. این امر با در نظر گرفتن تبادلات مومنوم، انرژی و آشفتگی بین دو فاز انجام می‌شود. اخیراً، تلاش‌هایی برای بهبود این روش با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته‌تر مانند شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) صورت گرفته است [۲۳].

با این حال، مدل‌های اویلری با چالش‌هایی مواجه هستند. یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها، ناتوانی در توصیف دقیق برخورد ذرات با سطوح جامد (به‌ویژه نزدیک دیواره) است. این موضوع به دلیل عدم تفکیک‌پذیری کافی در نزدیکی مرزهای کنترل و نیاز به دقت بالاتر برای نمایش فرآیندهای ضربه و بازتاب ذرات است. شیروولکار، کویمبرا و مک‌کوی [۲۴] اشاره کرده‌اند که مدل‌های اویلری قادر به در نظر گرفتن اثرات

که در آن  $k_{\theta_s}$  ضریب هدایت دمای ذره‌ای و  $\gamma_{\theta_s}$  نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای بر اثر برخورد ذرات است. عبارت  $-\nabla(k_{\theta_s} \nabla \theta_s)$  شار انتشار انرژی ذره‌ای را توصیف می‌کند. نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای در فاز جامد به دلیل برخورد بین ذرات ( $\gamma_{\theta_s}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \alpha_s \rho_s \theta_s^{3/2} \quad (6)$$

در این رابطه،  $d_s$  قطر ذرات فاز جامد است. معادله لون برای عبارت است از [۲۸، ۲۹]:

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right) \right]^{-2.5} \alpha_{s,max} \quad (7)$$

که در آن  $\alpha_{s,max}$  حداکثر کسر حجمی فاز جامد در حالت حد تراکم یا چگالی بسته‌بندی ذرات است. ویسکوزیته برشی جامد به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fric} \quad (8)$$

در این معادله،  $\mu_{s,col}$  ویسکوزیته برخوردی جامد،  $\mu_{s,kin}$  ویسکوزیته جنبشی جامد و  $\mu_{s,fric}$  ویسکوزیته اصطکاکی جامد است. بخش اصطکاکی ویسکوزیته جامد تنها زمانی مهم است که کسر حجمی جامد به حد تراکم  $\alpha_{s,max}$  نزدیک شود. ویسکوزیته برخوردی جامد عبارت است از [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (9)$$

ویسکوزیته جنبشی با استفاده از معادله گیداسپو محاسبه می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (10)$$

ویسکوزیته حجمی فاز جامد با معادله لون داده می‌شود [۲۸، ۲۹]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (11)$$

ویسکوزیته حجمی جامد نشان‌دهنده مقاومت ذرات در برابر فشردگی و انبساط است. ضریب



تاریخچه‌ای حرکت ذرات نیستند، زیرا مسیرهای منفرد ذرات را دنبال نمی‌کنند. علاوه بر این، با افزایش لختی ذرات (که با عدد استوکس بالاتر مشخص می‌شود)، دقت این روش کاهش می‌یابد، زیرا مسیرهای متقاطع ذرات برجسته‌تر می‌شوند.

برای غلبه بر برخی از این چالش‌ها، تو و فلچر [۲۵] یک چارچوب اولیری با شرایط مرزی بهبودیافته برای برخورد ذره-دیواره ارائه کردند. این مدل با در نظر گرفتن انتقال مومنوم بین ذرات و دیواره، نتایج همخوانی خوبی با داده‌های تجربی نشان داد. این رویکرد در مطالعات بعدی، مانند تحلیل جریان ذرات در آرایه‌های لوله‌ای [۲۶] و زانوی مربعی [۲۵]، با موفقیت به کار گرفته شد. در این پژوهش‌ها، از یک اتصال دوطرفه بین فاز گاز و ذرات استفاده شد که امکان بررسی دقیق‌تر انتقال مومنوم و آشفتگی در سطح دو فاز را فراهم کرد.

یکی از نکات قابل توجه در این مقاله، عدم استفاده از نظریه جنبشی جریان‌های ذره‌ای است. این نظریه عمدتاً در سیستم‌های با تراکم بالا و تنش‌های برخوردی قابل اعمال است، در حالی که جریان مورد بررسی در این مطالعه رقیق بوده و اتلاف انرژی عمدتاً از طریق ویسکوزیته آشفتنه ذرات مدل‌سازی شده است. این رویکرد به دلیل سادگی و کارایی محاسباتی، برای سیستم‌های رقیق مناسب‌تر است.

### ۳-۱. هندسه و شرایط جریان

هدف از شبیه‌سازی اولیری، بررسی الگوی سیال‌سازی ذرات جامد ته‌نشین شده در یک لوله مستقیم تحت تأثیر جریان گاز با سرعت‌های مختلف است. هندسه مورد استفاده یک لوله مستقیم با طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ است. در ابتدای شبیه‌سازی، فرض شده است که ذرات جامد در کف لوله ته‌نشین شده‌اند و جریان گاز آن‌ها را به حرکت درمی‌آورد. شرایط استاندارد جریان شامل نرخ جریان گاز ۶۰۰ مترمکعب استاندارد در ساعت (SMMCF/H)، فشار ۸۰ بار و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است.

ذرات جامد دارای چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت هستند. توزیع اندازه ذرات بر اساس داده‌های تجربی با استفاده از الک‌های سیمی استاندارد تعیین شده است که جزئیات آن در (جدول ۱) ارائه شده است. این شرایط امکان بررسی دقیق رفتار ذرات تحت تأثیر سرعت‌های مختلف گاز را فراهم می‌کند.

### ۳-۲. فرمول‌بندی ریاضی

روش اولیری هر دو فاز گاز و جامد را به‌عنوان محیط‌های پیوسته در نظر می‌گیرد که از طریق نیروهای بین‌فازی مانند نیروی کشش با یکدیگر برهم‌کنش دارند. این روش برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی با کسر حجمی قابل توجه هر دو فاز مناسب است. معادلات حاکم بر این سیستم با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.3 حل شده‌اند که فرمول‌بندی این روش مشابه با فرمول‌بندی CFD در نظر گرفته شده است.

### ۴. مطالعات لاگرانژی

در دیدگاه لاگرانژی، رفتار هر ذره به‌صورت مجزا ردیابی می‌شود که امکان توصیف دقیقی از سرعت، مسیر حرکت و زاویه برخورد ذرات را فراهم می‌آورد. این رویکرد به‌ویژه در تحلیل پدیده‌های مرتبط با ذرات منفرد کارآمد است. با این حال، در مسائل چندبعدی و سیستم‌های دارای برهم‌کنش‌های آشفتنه بین دو فاز (مانند اتصال دوطرفه)، پیچیدگی محاسباتی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این موضوع نیاز به درک عمیق از مکانیزم‌های تعاملی بین ذرات را ضروری می‌سازد [۱۳]. علاوه بر این، در جریان‌های با تراکم ذرات بالا، چالش‌هایی مانند هزینه محاسباتی قابل توجه به دلیل نیاز به ردیابی تعداد زیادی ذره برای دستیابی به داده‌های آماری معتبر پدید می‌آید [۲۷]. در پژوهش حاضر، با بهینه‌سازی محاسبات بر پایه ایستگاه‌های کاری، زمان اجرا تا حد قابل قبولی کاهش یافته و کارایی روش حفظ شده است.

مدل گام تصادفی گسسته (DRW)<sup>۱</sup> به‌عنوان چارچوب اصلی در روش لاگرانژی این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، حرکت آشفتنه ذرات را از طریق برهم‌کنش با گرداب‌های سیال ایده‌آل شبیه‌سازی می‌کند. پارامترهای کلیدی این گرداب‌ها شامل سرعت متوسط سیال، نوسانات سرعت آشفتنه لحظه‌ای و طول عمر گرداب هستند. در این مدل، نوسانات سرعت آشفتنه با توزیع گاوسی به‌سرعت متوسط حاصل از حل معادلات (RANS)<sup>۲</sup>

1. The Discrete Random Walk Model
2. Reynolds-averaged Navier–Stokes

افزوده می‌شود. طول عمر گرداب نیز به‌عنوان بازه زمانی تعامل ذره با گرداب تعریف می‌گردد. نکته حائز اهمیت آن است که زمان تعامل ذره معمولاً کوتاه‌تر از طول عمر گرداب است که نشانگر اثرات گذرای مسیر حرکت است. در هر گام زمانی، سرعت ذره ثابت فرض شده و موقعیت جدید آن محاسبه می‌شود. در گام بعدی، نوسانات سرعت محلی سیال برای به‌روزرسانی مسیر ذره اعمال می‌گردد.

ستون اول از سمت راست در (شکل ۳) تغییرات اشباع آب حاصل از استفاده از ضریب سیمان‌شدگی ثابت (نمودار قرمز رنگ) و متغیر (نمودار مشکی رنگ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، اختلاف مقادیر به‌دست‌آمده از طریق دو روش در بخش‌های واجد اشباع آب بالا، بیشتر می‌باشد. با اینکه میزان تغییرات در بخش‌های واجد هیدروکربن اقتصادی کم‌تر است (حدود ۵ درصد)، لیکن همین تغییرات اندک می‌تواند اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای را در تخمین‌های حجمی ذخایر ایجاد نماید؛ بنابراین، استفاده از مقادیر ضریب سیمان‌شدگی متغیر برای سازنده‌های کربناته با توجه به‌دقت بالاتر آن، ضرورت دارد. به‌عنوان مثال، عمق ۲۷۷۹ متر مشخص‌شده با فلش آبی‌رنگ در (شکل ۳) با فرض یکسان بودن مابقی حدود برش، بر اساس خروجی اشباع آب حاصل از ضریب سیمان‌شدگی ثابت، به اشتباه، بخشی از زون مخزنی تشخیص داده خواهد شد در صورتی که با محاسبه اشباع آب از طریق معادله بورای، غیرمخزنی خواهد بود. این مهم زمانی که اختلاف در مرز سطوح سیالات باشد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود زیرا بر برنامه‌های تولیدی نظیر عملیات سوراخ‌کاری تأثیرگذار خواهد بود.

زون‌های مخزنی شناسایی‌شده از طریق اعمال ضریب سیمان‌شدگی ثابت و متغیر در (شکل ۴) باهم مقایسه شده‌اند. در این شکل، ستون اول از سمت راست بیانگر نتایج به‌دست آمده با در نظر گرفتن ضریب سیمان‌شدگی ثابت و ستون دوم از سمت راست مربوط به حالتی است که ضریب سیمان‌شدگی به‌صورت متغیر اعمال شده است. همان‌طور که مشخص است، نتایج حاصل از دو روش در بیشتر بخش‌ها مشابه است، اما در مرز سطوح سیالات اختلافاتی مهم در خروجی دو روش دیده می‌شود (مشخص‌شده با فلش آبی‌رنگ در شکل ۴). در اعماق ۲۷۶۹ الی ۲۷۷۰ متر استفاده از ضریب سیمان‌شدگی ثابت باعث شده است که این محدود زون مخزنی تشخیص داده شود لیکن روش ضریب سیمان‌شدگی متغیر این بخش

را غیرمخزنی معرفی می‌نماید و بر همین اساس، ضخامت زون مخزنی ابتدای سروک ۳ کاهش یافته است. این مهم در مورد مرز آب-نفت زون ضخیم مخزنی سروک ۳ و ۴ نیز صادق می‌باشد. در این موقعیت‌ها، با توجه به کاهش نگاره مقاومت الکتریکی عمیق، وجود ذخایر هیدروکربنی اقتصادی منطقی به‌نظر نمی‌رسد که این مهم مؤید صحت نتایج ضریب سیمان‌شدگی متغیر می‌باشد.

#### ۴-۱. هندسه و شرایط جریان

هدف از شبیه‌سازی‌های لاگرانژی، بررسی رفتار ذرات جامد در یک زانویی ۹۰ درجه و تأثیر آن‌ها بر سایش دیواره خارجی است. هندسه مورد مطالعه یک زانویی ۹۰ درجه با قطر ۵۶ اینچ و نسبت شعاع انحنا به قطر ۱/۵ است. این هندسه به دلیل تغییر جهت جریان و تمرکز ذرات در دیواره خارجی، یکی از نقاط بحرانی برای سایش در سیستم‌های انتقال پنوماتیکی محسوب می‌شود. زانویی‌ها در خطوط لوله نفت و گاز به‌طور گسترده استفاده می‌شوند و درک دقیق رفتار ذرات در این اجزا برای طراحی بهینه و کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری است.

شرایط جریان برای شبیه‌سازی شامل سرعت ورودی گاز ۳۳ متر بر ثانیه است که نشان‌دهنده شرایط عملیاتی عادی در خطوط لوله گاز است. نرخ جریان گاز ۶۰۰ مترمکعب استاندارد در ساعت (SMMCF/H)، فشار عملیاتی ۸۰ بار و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. ذرات جامد با چگالی ۲۳۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و نرخ جریان جرمی ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت شبیه‌سازی شده‌اند. توزیع اندازه ذرات با استفاده از تابع روزین-راملر مدل‌سازی شده است که پارامترهای آن (قطر متوسط و ضریب پراکندگی) بر اساس داده‌های تجربی تعیین شده‌اند. این تابع امکان بازنمایی دقیق توزیع اندازه ذرات در سیستم را فراهم می‌کند و برای شبیه‌سازی‌های صنعتی مناسب است.

ذرات به‌صورت کروی فرض شده‌اند و برهم‌کنش آن‌ها با دیواره زانویی برای محاسبه نرخ سایش مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی شامل ورودی سرعت یکنواخت برای فاز گاز و خروجی فشار ثابت است. دیواره‌های زانویی به‌عنوان شرایط بدون لغزش برای فاز گاز و با ضریب بازتاب برای ذرات جامد تعریف شده‌اند. این شرایط امکان شبیه‌سازی واقع‌گرایانه جریان گاز-جامد و برهم‌کنش ذرات با دیواره را فراهم می‌کند.





## ۲-۴. فرمول‌بندی ریاضی

بالای گاز (۳۳ متر بر ثانیه) و نرخ کرنش زیاد سیال نزدیک به دیواره لوله، از مدل Realizable k-ε برای مدل‌سازی آشفتگی فاز گاز استفاده شده است [۲۸، ۳۲].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g k_g) + \nabla \cdot (\rho_g k_g \bar{U}_g) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\rho_{t,g}}{\sigma_k} \right) \nabla k_g \right] + G_{k,g} - \rho_g \varepsilon_g \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon_g \bar{U}_g) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_g \right] + \varepsilon_g \left( -\rho_g C_2 \frac{\varepsilon_g}{k_g + \sqrt{v_g \varepsilon_g}} \right) \quad (21)$$

در این معادلات،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  اعداد پراوتل آشفتگی و  $\mu_{t,g}$  ویسکوزیته آشوبناک،  $k_g$  انرژی جنبشی آشوبناک و  $\varepsilon_g$  نرخ اتلاف آشوبناک هستند. ویسکوزیته آشوبناک ( $\mu_t$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (23)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (24)$$

$$A_0 = 4.04, A_S = \sqrt{6} \cos \phi \quad (25)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\bar{S}^3}, \bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (26)$$

معادله تعادل مومنوم برای فاز گاز [۲۸، ۳۱]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \bar{U}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \bar{U}_g \bar{U}_g) = \nabla P + \nabla \bar{\tau}_g + F_D + \rho_g g \quad (27)$$

در این معادله،  $\bar{U}_g$  سرعت فاز گاز،  $\bar{\tau}_g$  تنش برشی فاز گاز و  $F_D$  نیروی درگ است. نرخ سایش در مرزهای دیواره را می‌توان با ترکیبی جدید از مدل وابسته به زاویه تالسا همراه با مدل هوزر و کوئرولند [۲۰، ۲۱] ارزیابی کرد:

$$ER = 1559 B^{-0.59} F_s v^n F(\alpha) \quad (28)$$

که در این رابطه، ER نشان‌دهنده نرخ سایش، B سختی برینل،  $F_s$  ضریب شکل ذره،  $v$  سرعت نسبی ذره و  $F(\alpha)$  تابع چندجمله‌ای مرتبه پنجم از زاویه برخورد هستند. نرخ سایش با فرض شرط مرزی بازتابی دیواره محاسبه می‌شود. برای ذرات جامد کاملاً گرد مواد فولادی، n برابر ۲/۶ و  $F_s$  برابر ۰/۲ می‌باشد.

برای در نظر گرفتن تأثیر توزیع اندازه ذرات بر حرکت و مسیر حرکت ذرات از چارچوب لاگرانژی برای مدل‌سازی جریان رقیق گاز-جامد استفاده می‌شود. ذرات در حال جریان در خط لوله اصلی گاز با استفاده از الک بافته شده، جمع‌آوری و آنالیز شده‌اند تا توزیع اندازه و جرم ذرات مشخص شود (جدول ۱). تابع توزیع ریزین-راملر برای تعیین سهم ذرات با اندازه‌های مشخص به کار رفته است. سهم جرمی ذرات با قطر بزرگ‌تر از d از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۸، ۳۰]:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (14)$$

در این رابطه، n پارامتر توزیع اندازه و  $\bar{d}$  ثابت اندازه است. مسیر حرکت یک ذره فاز گسسته با انتگرال‌گیری از تعادل نیروی وارد بر ذره پیش‌بینی می‌شود. این تعادل نیرو، لختی ذره را با نیروهای وارد بر آن برابر می‌کند و (برای جهت x در مختصات کارتزین) به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۸، ۳۱]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (15)$$

اینجا  $u_p$  سرعت ذره،  $F_D$  نیروی درگ،  $g_x$  شتاب گرانش در جهت x،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $\rho$  چگالی سیال است. نیروی درگ وارد شده بر ذره ( $F_D$ ) با معادله (۱۶) به دست می‌آید [۲۸، ۳۰]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (u - u_p) \quad (16)$$

در این معادله،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $d_p$  قطر ذره،  $C_D$  ضریب پسا، Re عدد رینولدز ذره و u سرعت سیال است. ضریب پسا ( $C_D$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (17)$$

و عدد رینولدز ذره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_s |u - u_p|}{\mu} \quad (18)$$

مسیر ذرات با انتگرال‌گیری از (معادله ۱۹) محاسبه می‌شود [۲۸، ۳۱]:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (19)$$

پراکندگی ذرات ناشی از آشفتگی فاز گاز با مدل گام تصادفی گسسته در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سرعت

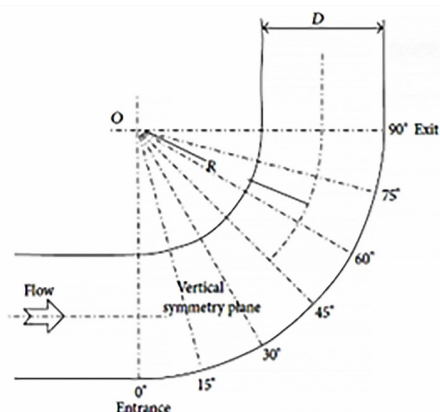
#### ۴-۲-۱. اعتبارسنجی فرمول بندی ریاضی

داده‌های تجربی منتشر شده [۳۳] برای اعتبارسنجی مدل ریاضی مبتنی بر چارچوب لاگرانژی برای مدل‌سازی جریان رفیق گاز-جامد از طریق یک خمیدگی ۹۰ درجه کانال منحنی استفاده شد. خمیدگی منحنی مقطع مربعی (۱۵ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر) است و دارای شعاع انحنای  $R$  معادل  $1/5$  برابر قطر هیدرولیک مجرای  $D$  (۲/۵ سانتی‌متر) است. اندازه‌گیری‌های فاز گاز با استفاده از یک سرعت‌سنج لیزری دوپلر (LDA) در سرعت حجمی گاز،  $V_B$  معادل ۱۰ متر بر ثانیه در غیاب فاز جامد به دست آمد. فاز جامد که کره‌های شیشه‌ای با قطر متوسط ۶۶ میکرومتر است، از بستر سیال‌سازی شده به جریان وارد شد. نسبت بارگذاری جرمی جامدات به گاز به خوبی زیر ۱ درصد است، به طوری که یک رژیم جریان رفیق گاز-جامد را ایجاد کند.

پروفیل‌های سرعت شعاعی گاز و ذرات با داده‌های اندازه‌گیری مشابه که از صفحه‌های مقطع عرضی مختلف از طریق خمیدگی مربعی به دست آمده است، مقایسه می‌شوند (شکل ۱). در (شکل ۲) توزیع شعاعی پیش‌بینی شده سرعت گاز با داده‌های تجربی مقایسه شده است. فاصله شعاعی  $r$ ، با معادله (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$r = R + \frac{D}{2} - r^* \quad (29)$$

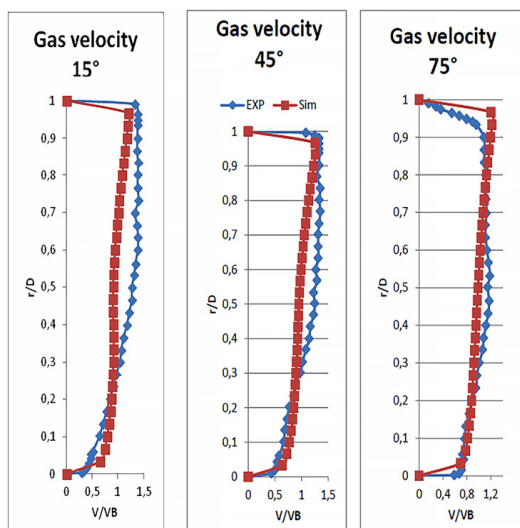
که در آن  $R$  شعاع انحنای مجرا،  $D$  قطر هیدرولیک مجرا و  $r^*$  فاصله هر نقطه‌ای روی یک صفحه مقطع عرضی خاص از مبدأ است.



شکل ۱: نمای عرضی سطح مقطع خمیدگی [۳۴]

همان‌طور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه صفحه مقطع عرضی، انطباق بیشتری بین پروفایل‌های پیش‌بینی شده و پروفایل‌های اندازه‌گیری شده حاصل می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش مؤلفه شعاعی سرعت گاز

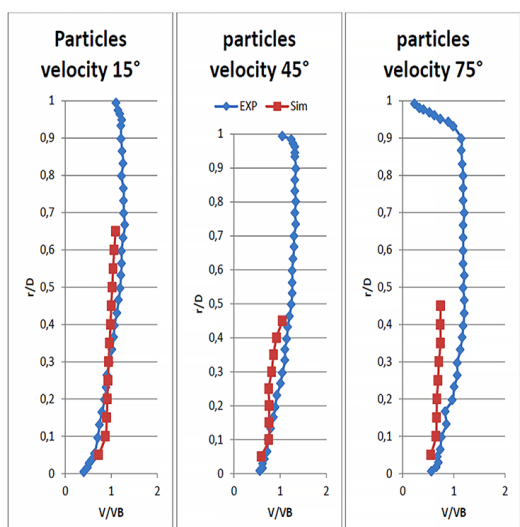
باشد. در این شکل، منحنی آبی مربوط به داده‌های تجربی و منحنی قرمز نتایج حاصل از معادلات ریاضی ارائه شده در این پژوهش است [۲۸، ۳۳].



شکل ۲: توزیع شعاعی سرعت گاز بر روی صفحه‌های مقطع عرضی. منحنی آبی (EXP): داده‌های تجربی [۳۳]؛ منحنی قرمز (Sim):

نتایج معادلات ریاضی [۲۸]

همان‌طور که در (شکل ۳) نشان داده شده است، توزیع شعاعی پیش‌بینی شده سرعت ذرات با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، نتایج پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت ذرات به دیواره داخلی ادامه پیدا نمی‌کند. این به دلیل مؤلفه شعاعی سرعت گاز است که باعث حرکت ذرات به سمت دیواره خارجی خمیدگی می‌شود [۲۸، ۳۳]. (شکل ۴) بردارهای سرعت شعاعی گاز داخل خمیدگی را نشان می‌دهد.

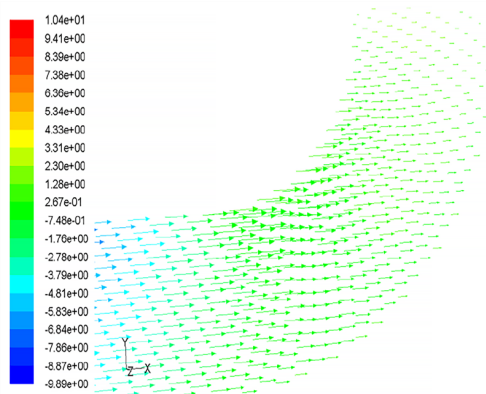


شکل ۳: توزیع شعاعی سرعت ذرات بر روی صفحه‌های مقطع عرضی. منحنی آبی (EXP): داده‌های تجربی [۳۳]؛ منحنی قرمز

۱. Laser Doppler Anemometry

## ۵-۱. معرفی فولاد ST37

فولاد ST37، یک فولاد ساختمانی کم‌کربن، به دلیل خواص مکانیکی مناسب و هزینه اقتصادی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف، به‌ویژه در ساخت لوله‌های انتقال نفت و گاز، سازه‌های فلزی و تجهیزات صنعتی دارد. این فولاد که با استاندارد DIN ۱۹۸۰:۱۷۱۰۰ تعریف شده و امروزه تحت نام S235JR (EN 10025-2:2004) شناخته می‌شود، دارای استحکام تسلیم حداقل  $235 \text{ N/mm}^2$  و مقاومت کششی  $360 \text{ N/mm}^2$  است. شکل‌پذیری بالا و قابلیت جوشکاری آن، این ماده را برای پروژه‌های بزرگ صنعتی ایده‌آل می‌کند. در این مطالعه، یک ورق فولاد ST37 با ابعاد ۲ متر طول، ۱ متر عرض و ضخامت ۲ میلی‌متر از شرکت لوله‌سازی اهواز تهیه شد. جهت‌های نورد و عرضی ورق برای بررسی دقیق خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختاری مشخص شدند. نمونه‌ای به ابعاد  $25/4 \times 25/4$  میلی‌متر از گوشه ورق با استفاده از دستگاه برش الماسی Struers Sectom-10 جدا شد و برای تحلیل ترکیب شیمیایی به آزمایشگاه متالورژی شریف جهاد ارسال گردید. ترکیب شیمیایی این فولاد مطابق با استاندارد MIL-S-16216K در (جدول ۲) ارائه خواهد شد است.



شکل ۴: بردارهای سرعت شعاعی گاز [۳۵]

## ۵. آزمایش‌های فولاد ST37

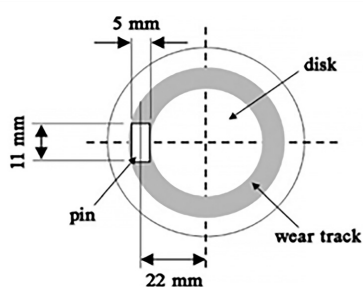
این بخش به بررسی آزمایش‌های انجام‌شده بر روی فولاد ST37 برای ارزیابی خواص مکانیکی و مقاومت سایشی آن اختصاص دارد. فولاد ST37 به دلیل کاربرد گسترده در صنایع نفت و گاز، به‌ویژه در ساخت لوله‌های انتقال، مورد توجه قرار گرفته است. آزمایش‌های انجام‌شده شامل تحلیل ترکیب شیمیایی و تست سایش به روش پین روی دیسک است که نتایج آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی شده و

جدول ۲: ترکیب شیمیایی ST37

Mn	Si	C	Fe	St 37
۰/۴۴۵	۰/۰۶۵۷	۰/۱۳۱	پایه	مقدار
Cr	S	P	Mn	St 37
۰/۰۲۰۸	۰/۰۲۰۷	۰/۰۰۹۲	۰/۴۴۵	مقدار
Co	Al	Mo	Ni	St 37
۰/۰۰۴۵	۰/۰۴۰۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۲۸۶	مقدار
V	Ti	Nb	Cu	St 37
۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۶۱۶	مقدار
As	Sn	Pb	W	St 37
۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۴۹	مقدار
			Zr	St 37
			۰/۰۰۰۵۴	مقدار

## ۵-۲. نوع دآزمایش

به مدت ۲۰۰۰ ثانیه انجام شد. سطح دیسک قبل از آزمایش با کاغذ سمباده تا گرید ۱۰۰۰ صیقل داده شد تا شرایط یکنواخت ایجاد شود. وزن دیسک قبل و بعد از آزمایش با ترازوی دقیق (±۱ میلی گرم) اندازه گیری شد تا کاهش وزن ناشی از سایش محاسبه گردد. ضریب اصطکاک نیز با استفاده از حسگر تنش دستگاه ثبت شد. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار شد. دستگاه آزمایش سایش و پیکربندی پین روی دیسک به ترتیب در (شکل های ۵ الف و ب) نشان داده شده اند.



(ب)



(الف)

شکل ۵: (الف) دستگاه سایش، (ب) پیکربندی دستگاه تست سایش پین روی دیسک

## ۶. بررسی تأثیر دما و فشار بر نرخ سایش لوله ها در شرایط عملیاتی

آن ها با دیواره کمتر می شود؛ بنابراین سایش کاهش می یابد. با این حال، در دماهای بسیار پایین ممکن است تنش های حرارتی در ساختار سطحی لوله به وجود آید که خود می تواند موجب ایجاد ترک های موضعی و تخریب سطح شود.

در خصوص افزایش فشار، باید توجه داشت که فشار بالاتر با افزایش سرعت سیال همراه است که این موضوع انرژی جنبشی ذرات را افزایش می دهد و در نتیجه برخوردهای شدیدتری با سطح داخلی لوله ایجاد می کند. این شرایط اغلب در نواحی با جریان های مغشوش تشدید شده و به سایش موضعی و متمرکز منجر می گردد.

در مقابل، کاهش فشار می تواند سرعت جریان و شدت برخوردهای ذرات با دیواره را کاهش دهد که به کاهش سایش منجر می شود. با این وجود، اگر فشار بیش از حد کاهش یابد، ممکن است جریان دچار ناپایداری شود و شرایط دینامیکی خاصی به وجود آید که به نوعی دیگر از سایش های غیرخطی یا غیرمنتظره منجر شود [۳۶].

اثر افزایش یا کاهش فشار و دمای سیال بر میزان سایش سطح داخلی لوله به عوامل متعددی بستگی دارد؛ از جمله جنس لوله، نوع و اندازه ذرات جامد معلق در سیال، سرعت جریان و شرایط کلی بهره برداری. در این مطالعه، تحلیل های تجربی و مدل سازی های عددی (CFD) برای بررسی این متغیرها انجام شده است و نتایج کلی به شرح زیر قابل بیان است:

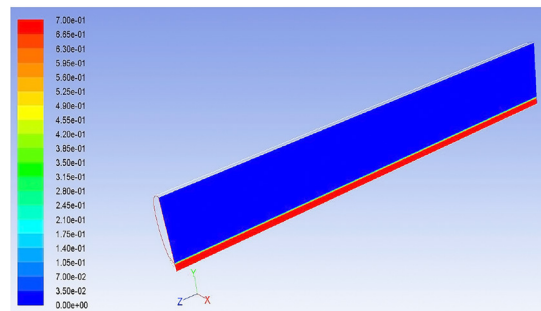
افزایش دما می تواند به کاهش ویسکوزیته سیال منجر شود که این کاهش باعث تسهیل حرکت ذرات جامد و افزایش احتمال برخورد آن ها با دیواره داخلی لوله می شود؛ نتیجه این فرایند، افزایش نرخ سایش خواهد بود. از سوی دیگر، دمای بالا ممکن است خواص مکانیکی ماده لوله، به ویژه سختی سطح را تضعیف کند که این امر نیز آسیب پذیری در برابر سایش را افزایش می دهد. کاهش دما معمولاً موجب افزایش ویسکوزیته سیال می شود که در نتیجه، حرکت ذرات کندتر شده و برخورد

## ۷. نتیجه گیری

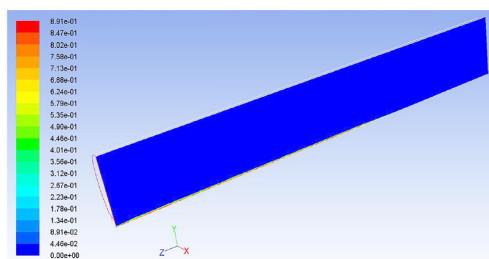
### ۷-۱. نتایج مدل اویلری-CFD (لوله مستقیم)

عبدالکریمی و همکاران [۲۸، ۳۵]، سیال سازی ذرات جامد در جریان گاز درون یک خط لوله گاز به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ با سرعت های گاز مختلف بر اساس فرمول بندی اویلری مورد بررسی قرار دادند. در این شبیه سازی، فرض شده که ذرات جامد در ابتدا در کف لوله ته نشین شده و جریان گاز از روی آنها عبور می کند (شکل ۶). (شکل ۷) الگوی جریان سیال ایجاد شده توسط ذرات را در سرعت های ورودی گاز مختلف پس از گذشت زمان کافی از شروع جریان گاز نشان می دهد. در سرعت گاز ورودی ۰/۵ متر بر ثانیه، ذرات جامد سیال می شوند. برای سرعت های گاز بالاتر از ۰/۵ متر بر ثانیه، ذرات توسط

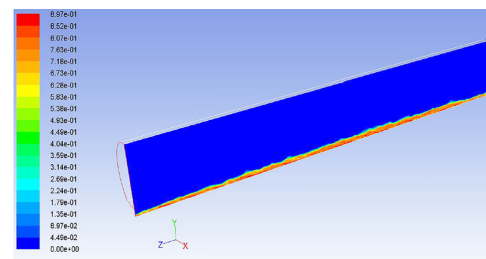
جریان گاز حرکت می کنند. هر چه سرعت حجمی گاز بیش تر باشد، سرعت حرکت ذرات نیز افزایش می یابد. همان طور که در (شکل ۷) مشاهده می شود، در سرعت ورودی گاز ۱ متر بر ثانیه پس از ۱۳۴ ثانیه، بیشتر ذرات از لوله خارج می شوند. با افزایش سرعت ورودی گاز، می توان دید که اگر منبع تولید کننده ذرات جامد در لوله وجود نداشته باشد، کل ذرات به طور کامل خارج می شوند و هیچ ذره سیال شده ای در داخل لوله باقی نمی ماند. با کم ترین سرعت جریان گاز (۳۳ متر بر ثانیه)، می توان نتیجه گرفت که بدون هیچ منبع تولید کننده ذرات جامد، پس از چند دقیقه هیچ ذره ای داخل لوله وجود نخواهد داشت.



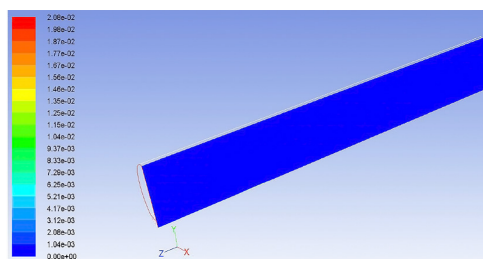
شکل ۶: خطوط اولیه کسر حجمی ذرات جامد در لوله [۳۵]



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۷: خطوط کسر حجمی ذرات؛ الف) در سرعت گاز ۰/۵ متر بر ثانیه پس از ۱۴۰ ثانیه، ب) در سرعت گاز ۱ متر بر ثانیه پس از ۱۳۴ ثانیه، ج) در سرعت گاز ۶ متر بر ثانیه پس از ۴۲ ثانیه [۳۵]

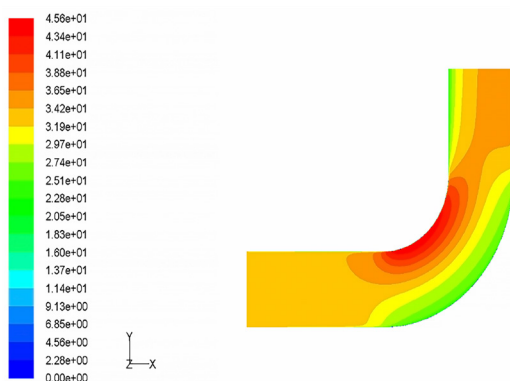
## ۲-۷. بنتایج مدل لاگرانژی-CFD (زانویی ۹۰ درجه)

در مدل‌سازی دیگر توسط عبدالکریمی و همکاران [۳۵، ۲۸]، جریان ذرات با توزیع اندازه ذرات درون یک زانوی ۹۰ درجه با نسبت شعاع به قطر لوله ۱/۵ و قطر لوله ۵۶ اینچ با استفاده از رویکرد لاگرانژی مورد تحلیل قرار گرفته است. توزیع اندازه ذرات از داده‌های تجربی (جدول ۱) به دست آمده و با استفاده از تابع توزیع روزین-راملر در نظر گرفته شده است. میزان جرمی ذرات با قطر بزرگ‌تر از  $d$  با  $Y_d$  نشان داده شده و (جدول ۳) رابطه بین  $d$  و  $Y_d$  را طبق (جدول ۱) توضیح می‌دهد (محاسبه شده بر اساس معادله ۱۴).

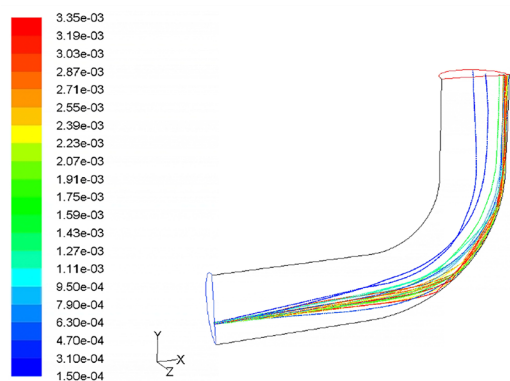
در این مدل‌سازی، سرعت جریان جرمی ذرات برابر با ۰/۶ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شده و این مقدار مطابق با توزیع جرمی، میان ذرات با اندازه‌های مختلف تخصیص داده شده است (جدول ۳). (شکل ۸) خطوط تراز سرعت گاز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر سرعت گاز در نزدیکی دیواره داخلی زانو رخ می‌دهد و مؤلفه شعاعی سرعت گاز باعث حرکت ذرات (به خصوص ذرات بزرگ) به سمت دیواره خارجی می‌شود. مسیر حرکت ذرات بر اساس قطر آن‌ها در (شکل ۹) نشان داده شده است. الگوی پراکندگی ذرات جامد به اندازه آن‌ها بستگی دارد و در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ذرات بزرگ‌تر به دلیل مؤلفه شعاعی سرعت گاز به سمت دیواره خارجی زانو حرکت می‌کنند. در (شکل ۱۱) توزیع اندازه ذرات در مقاطع عرضی مختلف بر اساس (معادله ۲۷) در برابر فاصله شعاعی نسبی ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که در دیواره خارجی ( $r/D=0$ )، میانگین قطر ذرات نسبت به میانگین قطر ذرات در دیواره داخلی ( $r/D=1$ ) بزرگ‌تر است که با آنچه در مورد (شکل ۱۰) گفته شد مطابقت دارد. همان‌طور که از (شکل ۱۱) می‌توان دید، در مقطع عرضی ۱۵ درجه ذرات کوچکی در نزدیکی دیواره داخلی زانو وجود دارد. این صفحه در ناحیه‌ای قرار دارد که مؤلفه شعاعی سرعت گاز شروع به افزایش می‌کند و هنوز به رشد نهایی خود نرسیده است. (شکل ۱۲) توزیع سرعت متوسط ذرات را در هر صفحه نشان می‌دهد. تغییر سرعت ذرات در هر صفحه تقریباً به یک خط مستقیم نزدیک است. با افزایش زاویه صفحه، شیب تغییرات سرعت افزایش می‌یابد. این به دلیل افزایش سرعت گاز در بخش عمودی زانو است.

جدول ۳: مقادیر تابع توزیع  $Y_d$  برای ذرات جامد معلق در سیال برحسب قطر ذرات ( $\mu\text{m}$ ) [۲۸]

قطر ( $\mu\text{m}$ )	$Y_d$
۱۵۰	۰/۹۴۲
۲۱۲	۰/۸۰۷
۳۰۰	۰/۷۴۷
۴۲۵	۰/۶۸۶
۶۰۰	۰/۶۱۱
۸۵۰	۰/۵۱۲
۱۱۸۰	۰/۳۱۸
۱۷۰۰	۰/۲۲۶
۲۳۶۰	۰/۱۵۲
۳۳۵۰	۰/۰۷

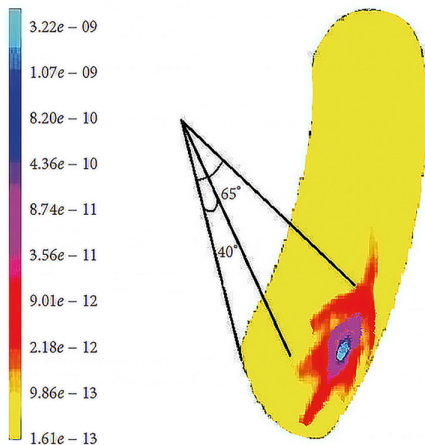


شکل ۸: خطوط تراز (کانتوری) میزان سرعت گاز [۳۵]

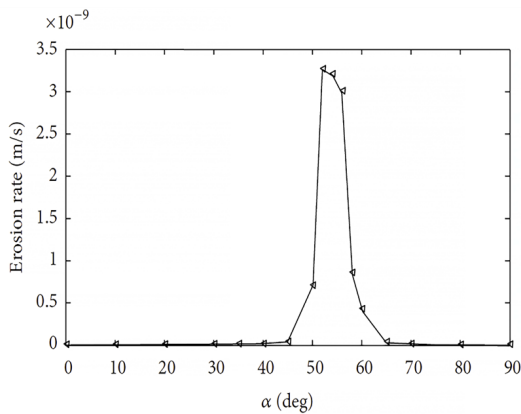


شکل ۹: مسیر ذرات رنگ‌آمیزی شده بر اساس قطر ذره [۳۵]





شکل ۱۳: خطوط نرخ سایش زانویی (m/s) [۲۸]

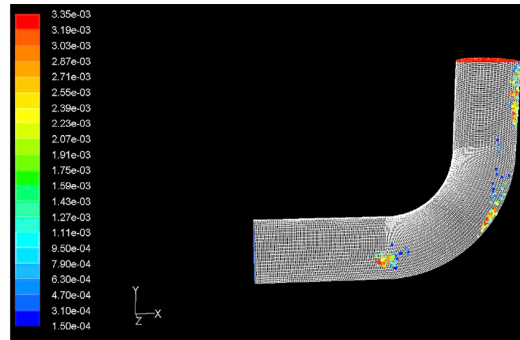


شکل ۱۴: نرخ سایش (m/s) بر حسب زاویه برخورد [۲۸]

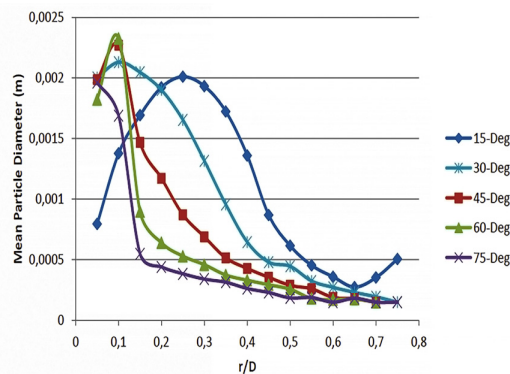
### ۷-۳. نتایج آزمایشگاهی فولاد ST37

نتایج آزمایش‌های سایش و خواص مکانیکی فولاد ST37 به صورت نمودارها و جداول تحلیل شده و ارتباط بین پارامترهای مختلف و رفتار سایشی این فولاد را نشان می‌دهند. در (شکل ۱۵)، منحنی ضریب اصطکاک نسبت به مسافت لغزش برای فولاد ST37 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سختی سطح نمونه (از طریق فرآیندهای اصلاحی مانند کارسختی)، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد که حاکی از بهبود مقاومت سایشی فولاد ST37 است.

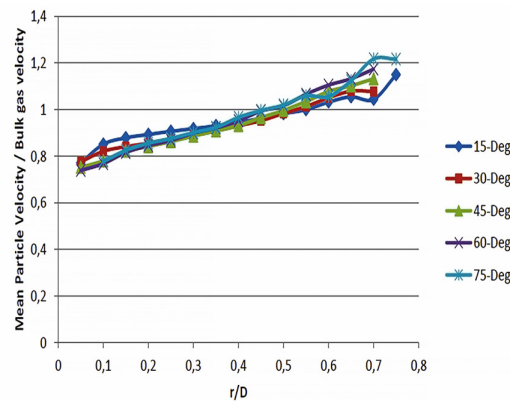
منحنی کاهش وزن نسبت به مسافت لغزش نیز در (شکل ۱۶) نشان داده شده است. این منحنی تأیید می‌کند که نمونه‌های با سختی بالاتر کاهش وزن کمتری را تجربه می‌کنند. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش سختی بر کاهش نرخ سایش است.



شکل ۱۰: الگوی پراکنندگی ذرات رنگ آمیزی شده بر اساس قطر ذرات [۳۵]

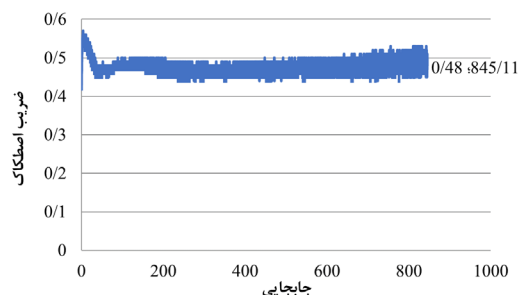


شکل ۱۱: توزیع میانگین قطر ذرات بر روی مقاطع عرضی زانویی [۳۵]

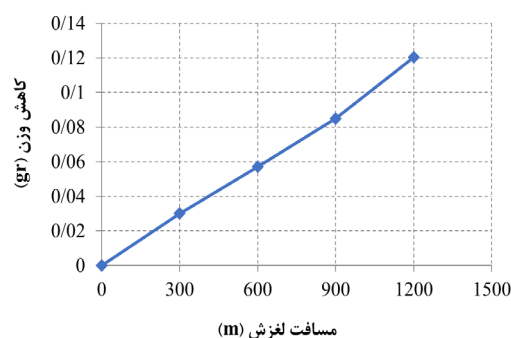


شکل ۱۲: توزیع میانگین سرعت ذرات بر روی مقاطع عرضی زانویی [۳۵]

(شکل ۱۳ و ۱۴) به ترتیب، خطوط تراز (کانتور) نرخ سایش و ترسیم عددی نرخ سایش بر حسب زاویه برخورد را نشان می‌دهند. این تصاویر بیانگر آن هستند که نرخ غیرعادی سایش به زوایای بین ۵۰ تا ۶۰ درجه مرتبط است. حداکثر نرخ سایش، ۳/۲۶ نانومتر بر ثانیه یا ۰/۱ متر بر سال به دست آمده است که در زاویه ۵۲ درجه رخ می‌دهد. این امر به دلیل برخورد ذرات جامد با اندازه حداکثر ۲ میکرون است. این نرخ بالای سایش برای اتصالات خط لوله خطرناک بوده و باید با روش‌هایی مانند حذف ذرات با اندازه حداکثر ۱ میلی‌متر، کنترل شود.



شکل ۱۵: منحنی تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب جابجایی



شکل ۱۶: منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش

نتایج را افزایش داده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات مشاهده شده در میزان سایش ناشی از تأثیر واقعی پارامترهای بارگذاری است و نمی‌توان آن را صرفاً به اثرات تصادفی نسبت داد که در نهایت اعتبار تحلیل تجربی را بهبود می‌بخشد.

این پژوهش با انجام آزمایش‌های تجربی گسترده، به بررسی و اعتبارسنجی سه روش مدل‌سازی عددی برای پیش‌بینی سایش فولاد ST37 در لوله‌های انتقال گاز پرداخت: دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، مدل اویلری و مدل لاگرانژی. آزمایش‌ها شامل برقراری جریان گاز حاوی ذرات جامد در یک لوله مستقیم به طول ۱۰ متر و قطر ۵۶ اینچ و یک زانویی ۹۰ درجه بود که طی آن نرخ سایش دیواره‌های بیرونی زانویی با استفاده از هر سه روش پیش‌بینی شد. علاوه بر این، آزمایش‌های سایش پین-روی-دیسک بر روی نمونه‌های فولاد ST37 انجام گرفت تا داده‌های تجربی برای مقایسه با نتایج مدل‌سازی فراهم شود. یافته‌ها نشان داد که مدل CFD-لاگرانژی با انحراف کمتر از ۱۷/۷۶ درصد و مدل CFD-اویلری با انحراف کمتر از ۱۰/۷ درصد نسبت به داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارند. این نتایج حاکی از آن است که روش CFD-اویلری به دلیل دقت بالاتر در پیش‌بینی نرخ سایش و توانایی بهتر در مدل‌سازی رفتار میانگین توزیع ذرات در جریان‌های با غلظت ذرات متوسط، برای تحلیل سایش فولاد ST37 مناسب‌تر است. مطالعه ریکاردو و همکاران [۳۷] نشان می‌دهد که مدل‌های اویلری در شرایط جریان‌های با غلظت ذرات متوسط و جریان‌های یکنواخت، به دلیل توانایی در مدل‌سازی رفتار کلی ذرات بدون نیاز به ردیابی جداگانه هر ذره، دقت و کارایی بیشتری دارند. این نتایج می‌توانند به‌عنوان راهنمایی برای طراحی و نگهداری بهینه لوله‌های فولادی در صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرند، هزینه‌های ناشی از سایش و خرابی تجهیزات را کاهش دهند و ایمنی عملیاتی را بهبود بخشند.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش درباره تأثیر ذرات جامد معلق در جریان گاز بر نرخ سایش لوله‌های فولادی ST37 در خطوط انتقال گاز، توصیه‌های عملی زیر به مهندسان طراح ارائه می‌گردد:

- مدیریت سرعت جریان: سرعت جریان باید در محدوده‌ای بهینه نگه‌داشته شود تا از رسوب ذرات و سایش بیش‌ازحد جلوگیری شود. به‌طور کلی، سرعت باید بالاتر از ۱ متر بر ثانیه باشد تا از رسوب جلوگیری

همان‌طور که از (جدول ۳) و (شکل ۱۶) مشخص است، روند لایه برداری از فولاد ST37 مورد مطالعه به نسبت بارگذاری، خطی نیست و پس از طی نمودن یک اکستریم، از شیب لایه برداری کاسته می‌شود و مجدداً به آرامی صعودی می‌گردد.

برای تحلیل داده‌های سایش به روش پین-روی-دیسک، آزمون‌های آماری شامل t-test و ANOVA به‌منظور بررسی معناداری تغییرات اعمال شده‌اند. این تحلیل‌ها امکان ارزیابی دقیق و سیستماتیک تفاوت‌های عددی میان شرایط مختلف بارگذاری را فراهم آورده و نقش عوامل مؤثر بر میزان سایش را مشخص کرده‌اند. جهت بررسی وابستگی آماری داده‌ها، آزمون نرمال بودن (Shapiro-Wilk) اجرا شده است تا صحت فرضیات اولیه برای تحلیل‌های آماری تأیید گردد. نتایج آزمون t-test مستقل نشان داده‌اند که میزان سایش در گروه‌های مختلف با اختلاف معنادار آماری همراه بوده است، به‌گونه‌ای که مقدار p-value محاسبه شده کمتر از ۰/۰۵ بوده و دلالت بر تأثیر بارگذاری بر رفتار سایش دارد. همچنین، اجرای ANOVA یک‌طرفه مشخص کرده است که تأثیر متغیرهای مورد بررسی بر میزان سایش دارای تفاوت‌های معنادار آماری است که دقت تحلیل و قابلیت تعمیم‌پذیری



- نوآوری در مواد: تحقیق در مورد مواد جدید یا پوشش‌هایی که مقاومت بیشتری در برابر سایش ناشی از ذرات جامد دارند، می‌تواند به توسعه خطوط لوله با عمر طولانی‌تر منجر شود [۴۰].
  - مطالعات پارامتری گسترده: انجام مطالعات بیشتر برای بررسی تأثیر طیف وسیع‌تری از اندازه‌ها، غلظت‌های ذرات و شرایط جریان می‌تواند به تعمیم یافته‌های این مطالعه کمک کند و درک جامع‌تری از مکانیزم‌های سایش ارائه دهد [۴۴].
  - ادغام با داده‌های حسگر: استفاده از داده‌های حسگرهای نصب‌شده در خطوط لوله برای تغذیه مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند امکان نظارت در زمان واقعی و نگهداری پیش‌بینانه را فراهم کند و از خرابی‌های ناگهانی جلوگیری نماید [۴۵].
- فهرست علائم اختصاری**
- |             |   |
|-------------|---|
| $B$         | سختی برینل Pa                               |
| $C_D$       | ضریب پسا dimensionless                      |
| $d$         | قطر ذرات $\mu\text{m}$                      |
| $d_p$       | قطر ذره m                                   |
| $D$         | قطر هیدرولیکی m                             |
| $e$         | ضریب بازگشت dimensionless                   |
| $ER$        | نرخ سایش m/s یا nm/s                        |
| $F_d$       | نیروی درگ N                                 |
| $F_s$       | ضریب شکل ذره dimensionless                  |
| $F(\alpha)$ | تابع وابسته به زاویه dimensionless          |
| $g$         | شتاب گرانش $\text{m/s}^2$                   |
| $g_{0,ss}$  | تابع توزیع شعاعی dimensionless              |
| $k$         | انرژی جنبشی آشوبناک $\text{m}^2/\text{s}^2$ |
| $m_p$       | جرم ذره kg                                  |
| $n$         | پارامتر توزیع اندازه ذرات dimensionless     |
| $P$         | فشار Pa                                     |
| $P_s$       | فشار فاز جامد Pa                            |
| $Pr_t$      | عدد پرناتل آشوبناک dimensionless            |
- شود و کمتر از حدی باشد که سایش را تشدید نکند که این حد باید بر اساس ویژگی‌های خاص سیستم و مدل‌های سایش تعیین شود [۳۸].
  - کنترل ذرات: استفاده از فیلترها یا جداکننده‌ها برای کاهش غلظت ذرات جامد در سیال می‌تواند سایش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. به‌عنوان مثال، استفاده از صفحه‌های شن می‌تواند حضور ذرات شن را به حداقل برساند [۳۹].
  - انتخاب مواد: انتخاب موادی با مقاومت بالا در برابر سایش، به‌ویژه در بخش‌های بحرانی مانند زانویی‌ها، می‌تواند عمر لوله را افزایش دهد. مواد کامپوزیتی پلیمری یا پوشش‌های مقاوم می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند [۴۰].
  - بهینه‌سازی طراحی: اجتناب از تغییرات ناگهانی در قطر لوله یا زوایای تند در طراحی می‌تواند مناطق جریان آشوبناک را که مستعد سایش هستند، کاهش دهد. استفاده از خم‌های تدریجی و اطمینان از کیفیت بالای جوشکاری نیز توصیه می‌شود [۳۹].
  - نظارت منظم: اجرای برنامه‌های بازرسی دوره‌ای با استفاده از روش‌های غیرمخرب مانند آزمایش فراصوت یا پیگینگ هوشمند می‌تواند سایش را در مراحل اولیه شناسایی کرده و امکان تعمیرات به‌موقع را فراهم کند [۴۱].
  - به‌منظور ارتقای دانش و بهبود پیش‌بینی سایش ناشی از ذرات جامد در خطوط لوله فولادی انتقال گاز، مسیرهای پژوهشی آینده زیر پیشنهاد می‌گردد:
    - یادگیری ماشین برای پیش‌بینی سایش: توسعه مدل‌های یادگیری ماشین که بر اساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های CFD و آزمایش‌های تجربی آموزش دیده‌اند، می‌تواند نرخ سایش را تحت شرایط عملیاتی مختلف پیش‌بینی کند. این مدل‌ها می‌توانند ابزار سریعی برای ارزیابی ریسک سایش بدون نیاز به شبیه‌سازی‌های گسترده فراهم کنند [۴۲].
    - مدل‌های ترکیبی CFD و یادگیری ماشین: ترکیب شبیه‌سازی‌های CFD با تکنیک‌های یادگیری ماشین می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی دقیقی ایجاد کند که دقت CFD را با سرعت یادگیری ماشین ادغام می‌کنند و امکان ارزیابی سایش در زمان واقعی را فراهم می‌آورند [۴۳].



- and Y. Davoodbeygi, "Friction-Stir-Processing Effect on Fracture Toughness of Oil Pipelines in ST 37 Group Before/After Nano ZrO<sub>2</sub>-Coating", Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME, vol. 17, pp. 79-95, 2016.
- [3]. A. Sherik, "Study examines sources, makeup in dry gas systems", Oil & gas journal, vol. 106, pp. 54-54, 2008.
- [4]. A. Sherik, "Management requires multiple approaches", Oil & Gas Journal, vol. 106, pp. 66-68, 2008.
- [5]. N. A. Tsochatzidis, "Study addresses black powder's effects on metering equipment", Oil and Gas Journal, vol. 106, pp. 56, 2008.
- [6]. A. A. Alghamdi, T. Abadie, S. Cheng, and O. Matar, "(422c) Comparative Study of Erosion Prediction in Elbows Using Machine Learning and CFD", 2023 AIChE Annual Meeting, vol. pp. 2023.
- [7]. K. Gök, H. D. Ada, N. Kilicaslan, and A. Gök, "A Review of CFD Modeling of Erosion-induced Corrosion Formation in Water Jets Using FEA", Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research, vol. 6, pp. 14-22, 2023.
- [8]. O. Ige, L. Umoru, O. Olorunniwo, and M. Adeoye, "EROSION CORROSION IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REVIEW", vol. pp. 2020.
- [9]. Q.-L. Sun, L. Xia, L. Deng, J.-G. Wang, G.-L. Wang, and D. Feng, "Experimental and Numerical Simulation Analyses of Elbow Erosion in Surface Process of Deepwater Gas Well Testing", Journal of Failure Analysis and Prevention, vol. 24, pp. 202-215, 2024.
- [10]. N. A. Tsochatzidis, and K. E. Maroulis,
- |                      |                                     |                              |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| $q$                  | جریان انرژی ذره‌ای                  | $\text{kg/m}\cdot\text{s}^3$ |
| $r$                  | فاصله شعاعی                         | m                            |
| $R$                  | شعاع انحنا                          | m                            |
| $Re$                 | عدد رینولدز                         | dimensionless                |
| $u$                  | سرعت                                | m/s                          |
| $\bar{d}$            | قطر متوسط ذرات                      | $\mu\text{m}$                |
| $\alpha$             | کسر حجمی یا زاویه                   | dimensionless                |
| $\beta$              | ضریب درگ بین فازها                  | $\text{kg/m}^3\text{s}$      |
| $\gamma_{\theta_s}$  | نرخ اتلاف انرژی ذره‌ای              | $\text{kg/m}\cdot\text{s}^3$ |
| $\varepsilon$        | نرخ اتلاف انرژی آشوبناک             | $\text{m}^2/\text{s}^2$      |
| $\Theta_s$           | دمای ذره‌ای                         | $\text{m}^2/\text{s}^2$      |
| $\mu$                | ویسکوزیته                           | $\text{Pa}\cdot\text{s}$     |
| $\mu_t$              | ویسکوزیته آشوبناک                   | $\text{Pa}\cdot\text{s}$     |
| $\rho$               | چگالی                               | $\text{kg/m}^3$              |
| $\sigma_k$           | عدد پراختل آشفته برای k             | dimensionless                |
| $\sigma_\varepsilon$ | عدد پراختل آشفته برای $\varepsilon$ | dimensionless                |
| $\tau_s$             | تنش برشی فاز جامد                   | Pa                           |
| $\psi$               | عامل شکل ذرات                       | dimensionless                |
- فهرست حروف یونانی**
- |               |                         |                          |
|---------------|-------------------------|--------------------------|
| $\rho$        | چگالی                   | $\text{kg/m}^3$          |
| $\alpha$      | کسر حجمی یا زاویه       | dimensionless            |
| $\beta$       | ضریب درگ بین فازها      | $\text{kg/m}^3\text{s}$  |
| $\mu$         | ویسکوزیته               | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| $\varepsilon$ | نرخ اتلاف انرژی آشوبناک | $\text{m}^2/\text{s}^2$  |
| $\Theta$      | دمای ذره‌ای             | $\text{m}^2/\text{s}^2$  |
- مراجع:**
- [1]. Z. Tian, J. Y. Tu, and G. Yeoh, "Numerical Simulation and Validation of Dilute Gas-Particle Flow Over a Backward-Facing Step", Aerosol Science and Technology, vol. 39, pp. 2005.
- [2]. M. H. Sharifi, A. Sabetghadam-Isfahani,

- methods for multiphase flows”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, pp. 215-245, 2013.
- [19]. Z. Xu, Z. Han, and H. Qu, “Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows”, *Powder Technology*, vol. 360, pp. 141-150, 2020.
- [20]. Y. Zhang, E. Reuterfors, B. S. McLaury, S. Shirazi, and E. Rybicki, “Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows”, *Wear*, vol. 263, pp. 330-338, 2007.
- [21]. Y. I. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, “Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation”, *Wear*, vol. 259, pp. 95-101, 2005.
- [22]. Y. Oka, and T. Yoshida, “Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage”, *Wear*, vol. 259, pp. 102-109, 2005.
- [23]. M. Enayet, M. Gibson, A. Taylor, and M. Yianneskis, “Laser-Doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 3, pp. 213-219, 1982.
- [24]. J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, “Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees”, *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 123, pp. 277-284, 2001.
- [25]. X. Chen, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, “Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid
- “Methods help remove black powder from gas pipelines”, *Oil & Gas Journal*, vol. 105, pp. 52-52, 2007.
- [11]. R. M. Baldwin, “Here are procedures for handling persistent black-powder contamination”, *Oil and Gas Journal*, vol. 96, pp. 1998.
- [12]. K. D. Squires, and J. K. Eaton, “Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence”, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 2, pp. 1191-1203, 1990.
- [13]. J. R. Fessler, and J. K. Eaton, “Particle response in a planar sudden expansion flow”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 15, pp. 413-423, 1997.
- [14]. S. M. H. Sharifi, and A. Sabetghadam-Isfahani, “MICRO-HARDNESS PROFILE AND MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION IN FRICTION-STIR-PROCESSING ZONE OF THE ZrO<sub>2</sub>/CNT NANO-COATED ST37 STEEL”, vol. 10, pp. 477-487, 2019.
- [15]. W. Material, “1.0037 Material St37-2 Steel Equivalent, Properties, Composition, DIN 17100”, vol. pp. 2025.
- [16]. B. Benli, and I. Celik, “Surface Modification and Analysis of St37 Steel with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Coatings: Structural, Mechanical, and Tribological Properties”, *Tribology International*, vol. 191, pp. 109183, 2024.
- [17]. R. Khan, H. H. Ya, W. Pao, and A. Khan, “Erosion-Corrosion of 30°, 60°, and 90° Carbon Steel Elbows in a Multiphase Flow Containing Sand Particles”, *Materials (Basel)*, vol. 12, pp. 2019.
- [18]. S. Subramaniam, “Lagrangian–Eulerian



Saudi Aramco Journal of Technology, vol. pp. 2010.

- [35]. V. Abdolkarimi, and S. H. Boroojerdi, "CFD MODELING OF PARTICULATES MOTION IN GAS PIPELINES", *Petroleum & Coal*, vol. 55, pp. 2013.
- [36]. S. Hattori, and Y. Motoi, "Effect of temperature on cavitation erosion of SUS304 stainless steel", *Transactions of the JSME (in Japanese)*, vol. 80, pp. SMM0145-SMM0145, 2014.
- [37]. N. Ricardo, A. Guiherme, and M. Sommerfeld, "Comprehensive Euler/Lagrange modelling including particle erosion for confined gas-solid flows", *Particuology*, vol. 84, pp. 209-235, 2024.
- [38]. M. Ganapathy, H. Lakshminarayanan, P. Sundarraj, and C. Bahubali, "Erosion Prediction, Prevention in Pipeline Gas Production", *Pipeline & Gas Journal*, vol. Vol. 249, No. 2, pp. 2022.
- [39]. M. T. Abdu, W. Khalifa, and M. S. Abdelrahman, "Investigation of erosion-corrosion failure of API X52 carbon steel pipeline", *Scientific Reports*, vol. 13, pp. 20494, 2023.
- [40]. R. J.K. Wood, and A. D.C. Cook, "Erosion-Corrosion in Pipe Flows of Particle-Laden Liquids", *IntechOpen*, 2022.
- [41]. H. Yu, H. Liu, S. Zhang, J. Zhang, and Z. Han, "Research progress on coping strategies for the fluid-solid erosion wear of pipelines", *Powder Technology*, vol. 422, pp. 118457, 2023.
- [42]. R. Melendez, M. A. Rojo, A. Vazquez Hernandez, and F. Silva-González, "Predicting erosion in wet gas pipelines/elbows by mathematical formulations two-phase flow", *Wear*, vol. 261, pp. 715-729, 2006.
- [26]. C. Hengshuan, and X. Zhong, "Numerical analysis and experimental investigation of erosion in variable rectangular-section bends by solid particles", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 111-118, 1991.
- [27]. A. Keating, and S. Nestic, "Prediction of two-phase erosion-corrosion in bends", 1999.
- [28]. V. Abdolkarimi, and R. Mohammadikhah, "CFD modeling of particulates erosive effect on a commercial scale pipeline bend", *International Scholarly Research Notices*, vol. 2013, pp. 105912, 2013.
- [29]. D. Gidaspow, "Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions", *Academic press*, 1994.
- [30]. R. Clift, J. R. Grace, and M. E. Weber, "Bubbles, drops, and particles", vol. pp. 2005.
- [31]. A. Gosman, and E. Loannides, "Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors", *Journal of energy*, vol. 7, pp. 482-490, 1983.
- [32]. T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, "A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows", *Computers & fluids*, vol. 24, pp. 227-238, 1995.
- [33]. W. Yang, and B. Kuan, "Experimental investigation of dilute turbulent particulate flow inside a curved 90 bend", *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 3593-3601, 2006.
- [34]. E. Elsaadawy, and A. M. Sherik, "Black powder erosion in sales gas pipeline bends",



and computational fluid dynamics modeling”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, vol. 232, pp. 135065011774541, 2017.

[43]. H. Chen, H. Huang, R. Wei, and Z. Wang, “A novel AI-driven model for erosion prediction for elbow in gas-solid two-phase flows”, Wear, vol. 540-541, pp. 205241, 2024.

[44]. S. K. Wee, and Y. J. Yap, “CFD study of sand erosion in pipeline”, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 176, pp. 269-278, 2019.

[45]. N. B. Shaik, K. Jongkittinarukorn, W. Benjapolakul, and K. Bingi, “A novel neural network-based framework to estimate oil and gas pipelines life with missing input parameters”, Scientific Reports, vol. 14, pp. 4511, 2024.



## Investigation of the Impact of Solid Particles Suspended in Fluid on Steel Pipe Erosion: CFD Analysis and Experimental Validation

Armin Sabetghadam-Isfahani<sup>1,2</sup>, Yegane Davoodbeygi<sup>3\*</sup>, Seyed Mahmoud Latifi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2. Hormozgan Province Gas Company, P.O. Box: 7915996489, Bandar Abbas, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Chemical and Petroleum Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
4. M.Sc., Department of Chemical Engineering, Chemical and Petroleum Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

### ARTICLE INFO

RESEARCH ARTICLE

#### Article History:

Received: 26 March 2025

Revised: 17 May 2025

Accepted: 31 May 2025

#### Keywords:

Solid particles

Erosion

Mechanical properties

Erosion rate, Computational

Fluid Dynamics (CFD)

Numerical modeling

### ABSTRACT

Erosion caused by suspended solid particles in fluid flow is a key problem in the oil and gas industry, which can reduce the service life of steel pipelines. In this study, multiple experimental tests were conducted to investigate and validate three different modeling methods: Computational Fluid Dynamics (CFD), the Eulerian model, and the Lagrangian model. Initially, gas-solid flow was established in a straight pipe of 10 m length and 56 inches diameter connected to a 90-degree elbow, and the erosion rate on the outer walls of the elbow was predicted using all three approaches. Subsequently, pin-on-disk wear tests were performed on ST37 steel samples, and the modeling results were compared with experimental data. The findings indicated good agreement between the modeling results and experimental data; the CFD-Lagrangian model showed a deviation of less than 17.76%, while the CFD-Eulerian model showed a deviation of less than 10.7%. This detailed comparison demonstrated the superior accuracy of the CFD-Eulerian method in predicting ST37 steel erosion. The results of this study can pave the way for improving the design and maintenance of steel pipelines in the oil and gas industry and reduce costs associated with erosion and equipment failure.

DOR: [20.1001.1.2509.1089.1404.03.10](https://doi.org/10.1001.1.2509.1089.1404.03.10)

#### How to cite this article

A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, S.M. Latifi, Investigation of the Impact of Solid Particles Suspended in Fluid on Steel Pipe Erosion: CFD Analysis and Experimental Validation. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026 12(4): 58-79. ([https://ijge.irangi.org/article\\_735764.html](https://ijge.irangi.org/article_735764.html))

\* Corresponding Author.

E-mail address: [y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir](mailto:y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir), (Y. Davoodbeygi).

Available online 11 March 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

