

تعیین شرایط ایمن سایشی در زانویی‌های واحد نمک‌زدایی واحد پالایشگاهی

ابوالحسن عامری^{1*}

¹ استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: 1400/01/30 پذیرش: 1400/06/23

چکیده

سایش در اثر انتقال ذرات ریز در جریان سیال مانند خطوط انتقال نفت و گاز اتفاق می‌افتد که می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی به آن‌ها گردد. در این مطالعه، پدیده سایش با استفاده از نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی شده است. از سه مدل پرکاربرد صنعتی با نام‌های فینی، دی ان وی و ای سی آر سی، در جریان آشفته سیال استفاده شده است. اثر پارامترهای سرعت سیال شامل مقادیر 5، 10 و 20 m/s، قطر ذرات جامد شامل مقادیر 120، 170 و 220 میکرون و دبی شن تزریقی شامل مقادیر 0/3، 0/6 و 0/9 kg/h بر روی میزان سایش در زانویی مورد بررسی قرار گرفته است. در هر سه مدل ناحیه‌ای در بخش شعاع خارجی زانویی به‌عنوان ناحیه مستعد بیش‌ترین میزان خوردگی نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت سیال، قطر ذرات جامد و همچنین دبی تزریق ذرات جامد، میزان سایش در زانویی افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سایش، زانویی، سرعت سیال، قطر ذرات جامد، دبی تزریقی.

* aa.ameri12@gmail.com

مقدمه

پدیده سایش¹ برای زمان‌های طولانی به‌عنوان یک منبع ایجاد مشکل و آسیب در سیستم‌های تولید و بهره‌برداری هیدروکربن شناخته شده است. بسیاری از خرابی‌های خطرناک مربوط به زانویی‌ها در تأسیسات بهره‌برداری دریایی، واحدهای حفاری و دیگر تأسیسات زیردریایی در نتیجه سایش بوده است. این مشکلات و خرابی‌ها هم شامل هزینه تعویض بخش‌های فرسوده شده و هم مشکلات محیط زیستی و مسائل ایمنی کارکنان است. تمامی رشته لوله و تجهیزات درون و بیرون چاه، خطوط لوله انتقال و پالایشگاه‌ها در معرض خوردگی و سایش قرار دارند؛ اما بعضی از مکان‌ها و تجهیزات که سبب انحراف سیال از مسیر اصلی می‌شوند یا دچار تغییر سطح مقطع می‌شوند، نظیر چوک‌ها و شیرهای ایمنی زیرسطحی در معرض خطرات بیش‌تری قرار دارند. زمانی که گاز و نفت از مخازن دارای مقاومت نسبتاً پایین سازند تولید می‌شود (کم‌تر از 2000 psia)، با کاهش فشار مخزن، ذرات جامد از سنگ مخزن جدا شده و تعدادی از ذرات همراه با سیالات تولید می‌شوند. این ذرات جامد در سرعت‌های بالا می‌توانند سبب سایش خطوط لوله و تجهیزات شده و در نتیجه منجر به توقف یا اختلال در تولید و انتقال هیدروکربن شوند و از این‌رو ضررهای اقتصادی هنگفتی متوجه تولیدکنندگان نفت و گاز شود. چندین روش جهت جلوگیری از تولید شن و ورود آن‌ها به درون لوله‌های تولیدی وجود دارد، اما این روش‌ها سبب کاهش دبی تولیدی می‌شوند. از این‌رو جهت حصول دبی بهره‌برداری مناسب، تولیدکنندگان معمولاً اجازه می‌دهند ذراتی با اندازه‌های خاص و به میزان محدود از درون فیلترهای شنی² یا ستون‌های شنی³ عبور نمایند. باین‌وجود با گذشت زمان، فیلترهای شنی می‌توانند در بعضی از مکان‌ها در اثر تولید دانه‌های شن مسدود شده و سرعت سیال در قسمت‌های دیگر مشبک‌کاری شده⁴ افزایش یابد. از این‌رو سرعت سیال ممکن است بسیار بیش‌تر از مقادیر طراحی اولیه شده و سبب سایش فیلترهای شنی شده و اجازه عبور ذرات درشت‌تر را داده و این ذرات درشت همراه با ذرات ریزتر از طریق لوله‌های جریان تولیدی، تولید شوند [1].

سایش یا در اثر برخورد مستقیم یا برخورد اتفاقی به وجود می‌آید. در برخورد مستقیم معمولاً بیش‌ترین خسارت در اتصالاتی نظیر زانویی‌ها و سهرای‌ها (اتصالات T شکل) که جهت جریان در آن‌ها تغییر می‌کند، اتفاق می‌افتد. ذرات موجود در سیال می‌توانند مومنتوم کافی به دست آورده و خطوط جریان سیال را قطع نموده و به دیواره لوله یا سایر تجهیزات نظیر زانویی برخورد نمایند و آسیب‌هایی به تجهیزات وارد نماید. در سایش از نوع برخورد اتفاقی با وجود آن‌که مؤلفه سرعت متوسطی که سیال را به سمت دیواره لوله و تجهیزات هدایت کند وجود ندارد، باین‌وجود تلاطم‌های موجود در جریان می‌توانند ذراتی با مومنتوم در جهت شعاعی ایجاد نموده و آن‌ها را به سمت دیواره لوله و تجهیزات حرکت دهند؛ اما تلاطم‌های آشفته یک فرآیند اتفاقی بوده و از این‌رو با نام برخورد اتفاقی بیان می‌شوند. این دو نوع مکانیسم می‌توانند انواع مختلفی از سایش را سبب شوند. خواص مواد تأثیر فراوانی بر سایش دارند و به‌طور کلی ماده‌ای که در مقابل یک نوع خاصی از سایش مقاوم هست، در مقابل انواع دیگر سایش نیز مقاوم است. در سیستم‌های بهره‌برداری و پالایشگاهی نفت و گاز، تقریباً تمامی اجزا از مواد نرم و انعطاف‌پذیر نظیر فولاد، پلاستیک‌ها،

¹ Erosion

² Sand Screen

³ Gravel Pack

⁴ Perforated

لاستیک‌ها، الاستومترها، مواد کامپوزیت و دیگر مواد مشابه ساخته شده‌اند. اگر سایش در تجهیزات مشاهده شود، مواد مقاوم در برابر خوردگی سایشی نظیر کاربید تنگستن ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد [2]. مکانیسم‌های بالقوه‌ای که می‌توانند باعث آسیب‌های سایشی شوند، عبارت‌اند از: سایش ناشی از ذرات جامد⁵، سایش ناشی از قطرات مایع⁶، خوردگی سایشی و پدیده کاویتاسیون⁷. سه مورد اول از مکانیسم‌های فوق در لوله‌ها و سایر تجهیزات اتفاق می‌افتد و مورد چهارم به ندرت در لوله‌ها به وقوع می‌پیوندد. سایش تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار دارد و تغییرات کوچک و جزئی در شرایط عملیاتی می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای صدمات ناشی از آن را تغییر دهد. این شرایط منجر به آن می‌شود که در بعضی از سناریوها، نرخ‌های سایش بالا در سیستم‌های بهره‌برداری رخ داده و در بعضی سیستم‌های ظاهراً مشابه سایش کم‌تری اتفاق بیفتد. تشخیص سایش در حال پیشرفت، دشوار است و از این‌رو مدیریت آن مخصوصاً برای کسانی که با نحوه‌ی ایجاد سایش آشنا نیستند مشکل است. هیدرودینامیک مخلوط‌های چندفازی هیدروکربن‌ها در یک خط لوله، تأثیر بسزایی در تعدادی از پدیده‌های فیزیکی تعیین‌کننده عملکرد سایش و خوردگی سیستم، دارد. سرعت یک پارامتر مهم در جریان تولید هیدروکربن است. سرعت‌های بیش‌از اندازه سیال ناشی از انتخاب نامناسب لوله‌ها و یا طراحی نامناسب فرآیند، می‌تواند اثرات زیانباری بر روی خط لوله و اتصالات و کارایی بازدارنده‌های شیمیایی داشته باشد. این پدیده‌ها بسیار پیچیده بوده و شامل اثرات هیدرودینامیک خط لوله، طبیعت شیمیایی مخلوط چندفازی درون خط لوله و مواد مورد استفاده در ساخت خط لوله و تجهیزات است.

ادواردز⁸ و همکاران الگوهای سایش بر روی سطح اتصالات لوله مانند زانویی‌ها و سه‌راهی‌ها را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پیش‌بینی نمودند. پارامترهای مورد بررسی آن‌ها شامل زاویه برخورد ذرات به دیواره، سرعت ذرات و نرخ ته‌نشینی ذرات بودند [3]. چن⁹ و همکاران با استفاده از روش عددی و آنالیز مکانیکی توانستند میزان سایش در زانویی‌ها برای جریان چندفازی گاز، مایع و ذرات شن را پیش‌بینی نمایند. نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی مقایسه گردیدند که همخوانی مناسبی بین آن‌ها وجود داشت [4]. کانگ و لیو¹⁰ مدلی جهت پیش‌بینی سایش در زانویی‌ها در جریان‌های چندفازی ارائه دادند. نتایج خود را با 108 داده تجربی مقایسه نمودند. همچنین با مدل‌های موجود جهت سایش نیز مقایسه صورت گرفت [5]. ژو¹¹ و همکاران به شبیه‌سازی سایش جریان و تغییر شکل ناشی از آن در یک شیر سوزنی پرداخته‌اند و تأثیرات پارامترهای عملیاتی، ساختار و نوع سیال را مورد بررسی قرار داده‌اند و چنین نتیجه گرفته‌اند اندازه ذره دارای بیش‌ترین تأثیر بر سایش جریان است [6]. جعفری¹² و همکاران به مدل‌سازی عددی نرخ سایش در جریان دوفازی گاز-جامد آشفته در لوله‌های افقی پرداخته‌اند. آن‌ها مدلی بهینه برای پیش‌بینی نرخ سایش در جریان داخل لوله بر اساس شبیه‌سازی سرعت‌های نوسان سیال ارائه نموده‌اند. زاویه و سرعت برخورد ذرات جامد مورد ارزیابی قرار گرفته و برای پیش‌بینی شدت سایش با استفاده از مدل‌های موجود و بهینه شده مورد استفاده

⁵ Solid erosion

⁶ Droplet erosion

⁷ Cavitation

⁸ Edwards

⁹ Chen

¹⁰ Kang and Liu

¹¹ Zhu

¹² Jafari

قرار گرفت [7]. لین¹³ و همکاران به بررسی سرعت جریان دوفازی گاز-جامد بر سایش زانویی پرداخته‌اند و مدلی برای پیش‌بینی نرخ سایش ارائه نموده‌اند. این مدل تأثیرات سرعت و فشار جریان دوفازی گاز-جامد را در نظر می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده در تأسیساتی در چین مورد استفاده قرار گرفته‌اند و بیان‌گر دقت بهتر این مدل نسبت به مدل‌های پیشین است [8].

شرینیواس¹⁴ و همکاران به بررسی و تخمین اجزای مختلف چوک به‌عنوان تابعی از موقعیت چوک و دبی جریان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آن‌ها نتایج سایش بخش‌های مختلف به‌صورت ضخامت از دست‌رفته برحسب دبی‌های مختلف و در درصدهای مختلف شن را رسم و ارائه دادند [9]. منصور¹⁵ و همکاران به مدل‌سازی آسیب‌های سایشی در نتیجه ذرات شن در یک زانویی 90 درجه پرداخته‌اند و از دو مدل برای مطالعات خود استفاده نموده‌اند و چنین نتیجه گرفته‌اند استفاده از مدل‌های عدد رینولدز پایین و ناحیه نزدیک دیوار، دقت پیش‌بینی سایش ناشی از ذرات جامد بهبود می‌یابد [10]. زاهدی¹⁶ و همکاران از داده‌های تجربی و محاسبات CFD استفاده نمودند و ضخامت فیلم مایع و خواص جریان را در رژیم جریان حلقوی بررسی نمودند [11]. پارسی¹⁷ و همکاران تأثیرات اندازه ذره و سرعت ظاهری گاز را بر سایش زانویی در جریانات عمودی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند افزایش سرعت سیال و اندازه ذرات شن سبب افزایش نرخ سایش می‌گردد [12]. لیو¹⁸ و همکاران به بررسی سرعت جریان بر خوردگی سایشی یک زانوی 90 درجه افقی پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش وزنی، خوردگی سایشی در نقاط مختلف یک زانویی فولادی افقی در هنگام عبور یک دوغاب را با سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس این مطالعات با افزایش سرعت به محدوده 4 متر بر ثانیه میزان شدت خوردگی سایشی به‌شدت افزایش می‌یابد [13]. در تحقیقی دیگر، آن‌ها سایش ناشی از ذرات جامد در جریان دروی یک خط لوله را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و نرخ نفوذ در زانویی‌ها را برای جریان حلقوی محاسبه نمودند. این روش معایب مدل‌های پیشین را برطرف نمود. بر اساس نتایج به دست آمده، این مدل قادر است سایش را در زانویی‌ها به‌خوبی پیش‌بینی نماید [14]. زمانی¹⁹ و همکاران به بررسی سایش گاز طبیعی در زانویی‌ها در نتیجه چرخش ذرات در جریان آشفته گاز پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد شدت سایش به‌شدت تحت تأثیر چرخش ذرات قرار می‌گیرد. چرخش ذرات تأثیر شدیدی بر مسیر حرکت ذره و در نتیجه الگوی سایش زانویی دارد [15]. ویرا²⁰ و همکاران به اندازه‌گیری سایش شن تحت شرایط جریان حلقوی چندفاز در یک زانویی افقی پرداختند. آن‌ها الگوهای سایش و اندازه‌گیری‌های کاهش وزن فلز را در تجهیزات آزمایشگاهی ایجاد شده انجام دادند. آزمایش‌های آن‌ها با سرعت‌های ظاهری گاز در محدوده 27 تا 49 متر بر ثانیه و در فشار نزدیک به اتمسفر با اندازه ذرات شنی به میزان 20، 150 و 300 میکرون انجام گرفت. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد رفتارهای سایشی مختلفی با تغییر الگوهای جریان در زانویی افقی مشاهده می‌گردد. همچنین تأثیر پارامترهایی نظیر اندازه ذرات شن و ویسکوزیته مایع بر نرخ‌های سایش اندازه‌گیری شده

¹³ Lin

¹⁴ Shrinivas

¹⁵ Mansoori

¹⁶ Zahedi

¹⁷ Parsi

¹⁸ Liu

¹⁹ Zamani

²⁰ Vieira

مورد ارزیابی قرار گرفت [16]. آن‌ها همچنین در تحقیقی دیگر سایش درون زانویی‌ها به دلیل وجود ذرات شن در جریان هوا را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها توانستند سرعت لغزشی بین ذرات شن و هوا را اندازه‌گیری کردند. سرعت گاز در دو حالت 11 و 27 متر بر ثانیه، اندازه ذرات شن برابر 150 و 300 میکرومتر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی با چهار رابطه برای محاسبه سایش مقایسه گردیدند که هم‌خوانی خوبی با هم داشتند [17]. خان²¹ و همکاران به بررسی تجربی خوردگی سایشی در زانویی‌های کربن استیل در جریان چندفازی حاوی ذرات شن پرداخته‌اند. زانویی مورد استفاده دارای قطر 50 میلی‌متر است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد حداکثر زبری در پایین دست نزدیک به خروجی زانویی 90 درجه اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نشان می‌دهد تغییر وضعیت زانویی از حالت زاویه کوچک به زاویه بزرگ‌تر، منجر به کاهش فراوانی در سایش مکانیکی زانویی می‌گردد [18]. ژای²² و همکاران به شبیه‌سازی عددی سایش زانویی در یک جریان دوفازی مایع جامد با استفاده از نرم‌افزار CFD پرداخته‌اند. نتایج مطالعات این محققین نشان می‌دهد حداکثر نرخ سایش با افزایش قطر لوله و زاویه انحنای زانویی کاهش یافته و همچنین با افزایش طول لوله و شعاع زانویی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد زاویه انحنای زانویی بیش‌ترین تأثیر را بر میزان سایش لوله دارا است [19]. کوزینسکا²³ و همکاران به صورت تئوری سایش در زانویی‌ها به دلیل جریانات سیال حاوی ذرات جامد میکرو و نانو پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد سایش در اثر ذرات با اندازه میکرو به دلیل اثرات سانتریفیوژی این ذرات و برخورد بیش‌تر آن‌ها با دیواره بیش‌تر از سایش ناشی از ذرات با اندازه نانو است. ذرات نانو به دلیل انرژی جنبشی کم‌تری که دارند با دیواره زانویی برخورد کم‌تری داشته و از این رو سایش کم‌تری را سبب می‌شوند [20]. تیانا²⁴ و شیرازی به بررسی و ارزیابی سایش زانویی‌های سری در وضعیت‌های مختلف پرداخته‌اند. آن‌ها از نرم‌افزارهای CFD برای شبیه‌سازی این وضعیت‌ها برای جریان مایع با چگالی‌های مختلف و جهت‌های مختلف زانویی استفاده نموده‌اند. نتایج کارهای آن‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین سایش در حالت‌هایی اتفاق می‌افتد که زانویی دوم با زاویه 90 درجه قرار داشته باشد. طبق این مطالعه، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی در تطابق خوبی قرار دارد. آن‌ها بیان می‌دارند در اغلب موارد زانویی دوم نسبت به زانویی اول دچار سایش بیش‌تری می‌گردد [21].

در این مطالعه، برای پیش‌بینی نرخ سایش ناشی از سرعت بالای سیال و ذرات شن در خطوط لوله تولید هیدروکربن، ابتدا چندین مدل برای پیش‌بینی نرخ سایش ارائه شده و سپس این مدل‌ها توسط نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک²⁵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های مورد استفاده مهم‌ترین معادلات تجربی به‌دست آمده در زمینه محاسبه سایش در لوله‌ها هستند که توسط بسیاری از مراکز تحقیقاتی دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به مطالعات انجام شده، این مطالعه به صورت مطالعه موردی جهت یک واحد نمک‌زدایی واحد پالایشگاهی انجام شده که شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است و به صورت هم‌زمان تأثیر پارامترهای سرعت سیال ورودی، اندازه ذرات شن و دبی ذرات جامد بررسی شده است؛ اما نتایج آن قابل تعمیم به تمام موارد بررسی است. اکثر مطالعات پیشین مربوط به جریان گاز - جامد یا آب به همراه ذرات شن بوده است؛ اما در این مطالعه جریان سیال درون لوله نفت خام

²¹ Khan²² Xie²³ Kosinska²⁴ Thiana²⁵ COMSOL Multiphysics

است که ذرات شن در آن وجود دارد. با توجه به هزینه کم محاسبات و قابل اطمینان بودن و دقت این روش، می‌توان از آن برای محاسبه میزان نرخ سایش در زانویی‌ها و دیگر تجهیزات بهره برداری استفاده کرد.

2- مدل‌سازی

نفت خام محتوی ناخالصی‌های زیادی از قبیل نمک، آب و مواد جامد معلقه مختلف است که اگر این ناخالصی از نفت خام خارج نگردند ممکن است به‌طور جدی به کوره‌ها و دستگاه‌های تقطیر صدمه رسانده و طول عمر عملیات را کوتاه و باعث عملیات نامناسب شوند. نمک می‌تواند به اسید کلریدریک تبدیل شده و به‌عنوان عاملی خورنده به برج‌ها، پمپ‌ها، مبدل‌های حرارتی و لوله‌ها حمله کرده و باعث خوردگی شدید در آن‌ها گردد. نمک می‌تواند همچنین به‌عنوان کاتالیزور در تشکیل کک بر روی کوئل کوره‌ها و ته برج‌ها عمل نماید. نمک و مواد جامد همراه نفت خام روی سطوح انتقال حرارت رسوب کرده و باعث انسداد و کثیف شدن مبدل‌های حرارتی شده و در نتیجه شدت انتقال حرارت را کاهش می‌دهند. همچنین باعث ایجاد نقاط داغ روی لوله‌های کوره می‌گردند. به این دلیل ضروری است که نمک و جامدات همراه به حداقل مقدار ممکن در خوراک کاهش داده شوند. چون نمک در آب قابل حل است، نفت خام را با آب در همان ابتدا مخلوط کرده و برای ورود به ظروف نمک‌گیر آماده می‌کنند. به‌طور معمول مقدار آب جبرانی جهت نمک‌زدایی حدود 5% حجمی نفت خام است. تفکیک آب از نفت خام با به‌هم پیوستن قطره‌های آب و همچنین ته‌نشینی آن در لایه پائین نمک‌گیرها صورت می‌گیرد. به‌هم پیوستگی قطره‌های آب به کمک یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا تقویت می‌گردد.

در مسیرهای مختلف عبور جریان نفت به همراه آب و نمک و ذرات جامد همراه آن، تجهیزات مختلفی از قبیل زانویی، سه‌راه، شیرآلات و... جهت کنترل، انحراف یا تغییر مسیر جریان سیال قرار دارد. وجود این تجهیزات در مسیر سیالات پرسرعت و همراه با ذرات جامد، منجر به آسیب دیدن برخی از این تجهیزات می‌گردد. داشتن دید و دانش مناسب از چگونگی و میزان آسیب‌دیدگی این تجهیزات، می‌تواند در کنترل و جلوگیری از شدت و میزان تخریب فیزیکی و احتمال صدمات و آسیب‌های جانی پرسنل را کاهش دهد. در این مطالعه فرآیند سایش یک زانویی مورد استفاده در واحد نمک‌زدایی پالایشگاه بندرعباس توسط نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی شده است. جریان سیال به صورت تک فاز و رژیم جریان از نوع جریان آشفته انتخاب می‌گردد. جهت جریان آشفته از مدل k-w استفاده شده است.

2-1- هندسه مدل و مش‌بندی

هندسه مدل شامل دو لوله مستقیم استوانه‌ای شکل، هر کدام به طول 50 سانتی‌متر و قطر 20 سانتی‌متر است. بخش‌های مستقیم با استفاده از یک لوله زانویی 90 درجه با شعاع انحنای 50 سانتی‌متر به هم متصل شده‌اند. آلیاژ مورد استفاده از جنس کربن استیل بوده و دانسیته آن برابر با 7860 کیلوگرم بر مترمکعب و میزان سختی فلز برابر با 1/96 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. لوله مورد نظر جهت انتقال یک سیال مایع با دانسیته 850 kg/m^3 و ویسکوزیته دینامیکی $0/009 \text{ kg/m.s}$ در دمای محیط که همان نفت عبوری از سیستم‌های نمک‌زدایی و پالایشگاه است. در این مطالعه سرعت‌های 5، 10 و 20 متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت 5 الی 10 متر بر ثانیه بر طبق استاندارد DNV، سرعت‌هایی است که می‌تواند منجر به سایش دیواره تجهیزات گردد. از این رو همین محدوده سرعت در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ذرات شن تولیدی با توجه با ساختارهای زمین‌شناسی معمولاً دارای چگالی در محدوده 2000 تا 2600 کیلوگرم بر مترمکعب هستند. در انجام شبیه‌سازی‌های انجام گرفته

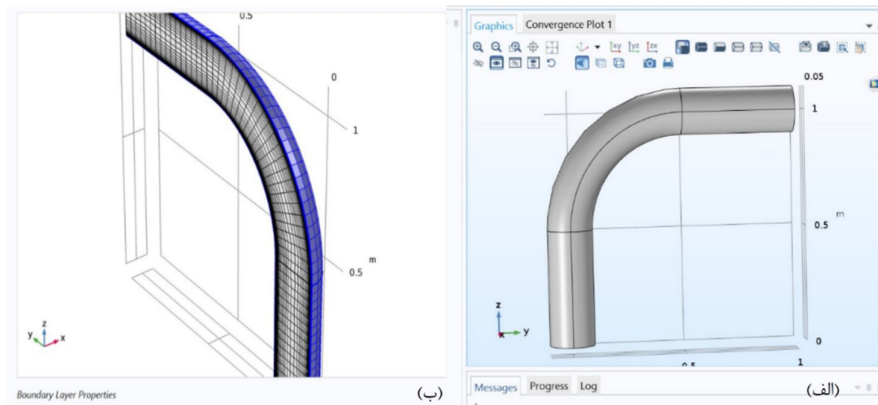
چگالی ذرات شن تقریباً با متوسط چگالی سازندهای نفتی که از جنس سنگ آهک بوده و برابر با 2200 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است و با دبی‌های 0/3، 0/6 و 0/9 کیلوگرم بر ساعت در لوله انتقال می‌یابند. قطر متوسط ذرات ورودی به سیستم‌های کنترل شن درون چاهی معمولاً در محدوده 50 الی 500 میکرومتر است که ذرات سبک تأثیری در سایش دیواره نداشته و همچنین ذرات سنگین قابلیت برخورد جدی با دیواره ندارند و بیش‌ترین ساییدگی معمولاً در نتیجه ذرات با قطر متوسط در محدود 100 میکرومتر اتفاق می‌افتد. در این مطالعه در سه حالت و با اندازه‌های ذرات به میزان 120، 170 و 220 میکرومتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه به مش‌های چهاروجهی کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود. در نواحی نزدیک به سطح که تغییرات جریان شدیدتر است، از مش‌های ریزتر استفاده شده است. همچنین در نزدیکی زانویی، مش‌ها دسته‌بندی شده‌اند. به منظور انجام آنالیز استقلال از شبکه، چهار حالت با تعداد المان‌های 254761، 310871، 386003 و 460244 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش المان‌ها از 386003 به 460244 نتایج مدل‌سازی تغییر چندانی از نظر نزدیک‌تر شدن به نتایج تجربی پیدا نکردند. از این رو تعداد 386003 المان به عنوان مش‌بندی نهایی هندسه در نظر گرفته شد. هندسه و مش ایجاد شده در شکل 1 نشان داده شده است.

2-2- شرایط مرزی و معادلات حاکم

بر اساس قطر لوله و دیگر مشخصات سیال، عدد رینولدز در محدوده جریان‌ات آشفته قرار می‌گیرد و بنابراین از مدل جریان آشفته با توابع دیوار²⁶ و بطور مشخص از مدل k-w استفاده می‌شود. این مدل نسبت به مدل k-ε در حالتی که جریان دچار انحنای زیادی گردد، دقت بالاتری ارائه می‌دهد. در این مطالعه فرض می‌شود توزیع سرعت سیال در ورودی، با قانون معروف توان $\frac{1}{7}$ ارائه گردد. این رابطه توزیع جریان سیال درون لوله را بصورت زیر بیان می‌دارد:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (1)$$

در این رابطه n به ضریب اصطکاک بستگی دارد و مقدار n به عدد 7 نزدیک است و از این رو به نام توان $\frac{1}{7}$ معروف است. r فاصله شعاعی از خط مرکز لوله و R شعاع کلی لوله است.



شکل 1- نمایی از (الف) هندسه و (ب) مش مورد استفاده جهت مدل‌سازی جریان سیال و سایش ذرات

²⁶ Turbulence model with wall functions

شرط مرزی عدم لغزش بر روی همه دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. شرط مرزی ورودی لوله به صورت سرعت ثابت در محدوده 5 الی 20 متر بر ثانیه و در خروجی به صورت فشار اتمسفری است. شرایط مرزی برای ذرات جامد به صورت پی تعریف شده است که توسط دیواره‌ها برگشت داده می‌شوند اما در قسمت ورودی و خروجی لوله می‌توانند وارد و خارج شوند. سرعت ورودی ذرات جامد در همه حالات صفر در نظر گرفته شده است. روش مورد استفاده جهت حل معادلات حاکم، از روش بالادست مرتبه دوم و از الگوریتم SIMPLE جهت حل معادلات گسسته‌سازی استفاده شده است. مقدار باقی‌مانده جهت متغیرهای مختلف پس از حل تکرار شونده برابر 10^{-3} بوده است.

براساس قانون دوم نیوتن، مومنتوم ذره در حرکت سیال در مدل جریان آشفته را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{d}{dt}(m_p V) = F_D + F_g + F_{ext} \quad (2)$$

در این رابطه m_p بیانگر جرم ذرات جامد بر حسب کیلوگرم، v سرعت ذره جامد بر حسب m/s ، F_D بیانگر نیروی دراگ بر حسب نیوتن، F_g بردار نیروی جاذبه بر حسب نیوتن و F_{ext} بیانگر هر نوع نیروی خارجی بر حسب نیوتن است. نیروی دراگ را می‌توان با رابطه زیر محاسبه نمود:

$$F_D = \left(\frac{1}{\tau_p}\right)m_p(u - v) \quad (3)$$

در این رابطه τ_p زمان پاسخ به سرعت ذره بر حسب ثانیه و u بیانگر سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه است.

سرعت لحظه‌ای جریان ارائه شده در نیروی دراگ به فرم پراکندگی آشفته²⁷ به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$u = U + u' \quad (4)$$

در این رابطه U سرعت متوسط زمانی و u' سرعت نوسان آشفته²⁸ است که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$u' = \varphi \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (5)$$

در این رابطه k بصورت انرژی جنبشی آشفته تعریف می‌شود و φ یک عدد تصادفی نرمال توزیع شده است. نیروی جاذبه نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$F_g = m_p g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \quad (6)$$

در این رابطه ρ_p بیانگر چگالی ذره بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، ρ بیانگر چگالی سیال و g جهت جاذبه را نشان می‌دهد.

در این مطالعه به منظور تعیین میزان سایش دیواره لوله زانویی از سه مدل پر کاربرد صنعتی به نام‌های مدل فینی²⁹ [22]، مدل تولسا ای سی آر سی³⁰ [23] و مدل دی ان وی³¹ [24] استفاده شده است.

$$E_{VP} = \begin{cases} \frac{mV^2}{P\psi k} \left(\sin(2\alpha) - \frac{6}{k} \sin^2\alpha \right) & \text{for } \tan \alpha \leq \frac{k}{6} \\ \frac{mV^2}{P\psi k} \left(\frac{k \cos^2\alpha}{6} \right) & \text{for } \tan \alpha \geq \frac{k}{6} \end{cases} \quad (7)$$

²⁷ Turbulent dispersion

²⁸ Turbulent fluctuation velocity

²⁹ Finnie

³⁰ Tulsa ECRC

³¹ DNV

در این رابطه E_{VP} حجم مواد کنده شده توسط ذره مستقل، m جرم ذره، V سرعت ذره، P تنش ثابت پلاستیک جریان، α زاویه برخورد ذره، K نسبت نیروی عمودی به افقی و Ψ یک نسبت برابر با 2 است. مدل ای سی آر سی به صورت زیر است:

$$E = CF_s (BH)^{-0.59} \left(\frac{v}{1[m/s]} \right)^n F(\alpha) \quad (8)$$

$$F(\alpha) = (5.4\alpha - 10.11\alpha^2 + 10.93\alpha^3 - 6.33\alpha^4 + 1.42\alpha^5) \quad (9)$$

در این معادله C ضریب بدون بعد مدل، F_s ضریب شکل ذرات (بدون بعد)، BH ضریب سختی برینل دیواره مواد (بدون بعد) است. زاویه برخورد نیز برحسب رادیان اندازه گیری می شود.

مدل دی ان وی سایش را به صورت نسبت جرم از دست رفته سطح به جرم ذرات برخورد کننده و با رابطه زیر تعریف می نماید.

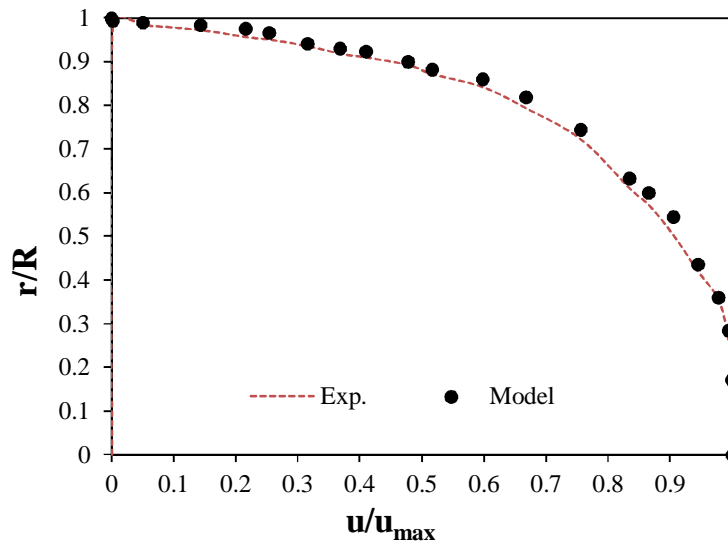
$$E = K \left(\frac{v}{1[m/s]} \right)^n F(\alpha) \quad (10)$$

$$F(\alpha) = (9.37\alpha - 42.295\alpha^2 + 110.864\alpha^3 - 175.804\alpha^4 + 170.137\alpha^5 - 98.398\alpha^6 + 31.211\alpha^7 - 4.170\alpha^8) \quad (11)$$

مقادیر K و n مقادیری ثابت بوده و به جنس ماده بستگی دارند.

3- نتایج و بحث

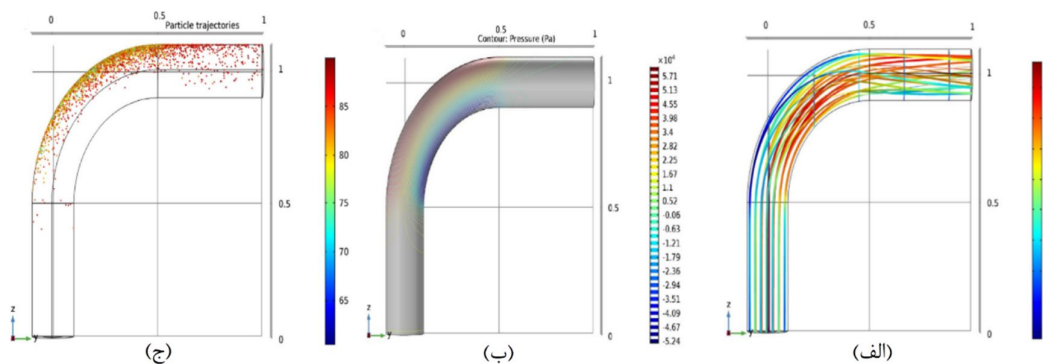
توزیع سرعت حاصله در حالت ورود سیال با سرعت 20 متر بر ثانیه در زانویی، در شکل 2 نشان داده شده است. از نتایج پروفایل سرعت نفت خام در ورودی لوله طبق مطالعه تجربی داریهاکی³² و همکاران برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی استفاده شده است [25]. همان طور که در شکل (2) مشخص است، نتایج حاصل از شبیه سازی به نتایج تجربی بسیار نزدیک بوده و هم خوانی دارند.



شکل 2- پروفایل سرعت با سرعت ورودی 20 متر بر ثانیه

³² Darihaki

توزیع سرعت حاصله در حالت ورود سیال با سرعت 20 متر بر ثانیه در زانویی، در شکل 3 (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ناحیه تغییر مسیر سیال، سیال به سمت میانه زانویی و شعاع داخلی زانویی متمایل می‌گردد. بر روی دیواره بنا بر شرط عدم لغزش، سرعت سیال صفر در نظر گرفته می‌شود و در مرکز زانویی بالاترین سرعت سیال حاصل می‌شود. در شکل 3 (ب) کانتورهای فشار نشان داده شده است. در بخش‌های نزدیک به دیواره شعاع داخلی، چرخش و برگشت جریان سیال سبب ایجاد فشارهای کم‌تر از صفر گردیده است. این وضعیت با رنگ‌های نزدیک به آبی نشان داده شده است. فشار سیال در قسمت بیرونی زانویی که سیال به دیواره ضربه می‌زند، در بیشینه مقدار خود است. برعکس در سمت مخالف به دلیل سرعت سیال مقدار فشار کمینه است. مسیرهای حرکت ذرات در شکل 3 (ج) نشان داده شده‌اند. با استفاده از شرط دیواره محو شونده، ذراتی که به دیواره برخورد نمی‌کنند، نشان داده نمی‌شوند و فقط ذراتی که برخوردی با دیواره دارند نشان داده می‌شوند. رنگ‌های راهنما، زاویه برخورد با دیواره را نشان می‌دهند. مشاهده می‌گردد ذرات از مسیر حرکت سیال خارج شده و با دیواره برخورد می‌نمایند و پس از برخورد دوباره به مسیر جریان سیال برمی‌گردند. بیش‌ترین برخورد ذرات با دیواره شعاع خارجی زانویی اتفاق می‌افتد و بنابراین بیش‌ترین آسیب در این ناحیه اتفاق می‌افتد. پس از برگشت ذرات شن به سطح داخلی لوله خروجی، یک ناحیه دیگر با سایش بالا ایجاد می‌شود. به نظر می‌رسد در جریان حرکت مایعات و ذرات جامد همراه در زانویی، برخورد ذرات با دیواره با زاویه‌هایی بیش‌تر از 70 درجه اتفاق می‌افتد. در این صورت در جاهایی که زاویه برخورد 90 درجه است، بیش‌ترین شدت سایش اتفاق می‌افتد.



شکل 3- (الف) توزیع خطوط جریان سرعت در زانویی، (ب) کانتورهای فشار به دست آمده در زانویی و (ج) مسیر حرکت ذرات جامد با سیال در داخل زانویی.

3-1- تأثیر تغییرات سرعت بر میزان سایش زانویی

به منظور بررسی تأثیر تغییرات سرعت بر میزان سایش، سرعت سیال ورودی به زانویی در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت ورودی به زانویی به ترتیب در مقادیر 5، 10 و 20 متر بر ثانیه تعیین گردیده و اثر افزایش سرعت بر میزان سایش زانویی با سه مدل فینی، دی ان وی و ای سی آر سی سنجیده شده است. همچنین دبی تزریق شن برابر با 0/3 کیلوگرم بر ساعت و اندازه قطر ذرات شن برابر با 120 میکرون در نظر گرفته شده است. نتایج سایش زانویی حاصل در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش سرعت سیال میزان سایش نیز افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که سرعت ورودی ذرات جامد صفر در نظر گرفته شده است. همچنین

ناحیه‌ای که دارای بیش‌ترین میزان سایش است، در هر سه مدل شبیه هم هستند. میزان بیشینه سایش برای سرعت‌های 5، 10 و 20 متر بر ثانیه در مدل فینی به ترتیب برابر با $3/5 \times 10^{-9}$ ، $1/8 \times 10^{-8}$ و 5×10^{-8} ، در مدل دی ان وی به ترتیب برابر با 1×10^{-9} ، 7×10^{-9} و 2×10^{-8} و در مدل ای سی آر سی به ترتیب برابر با $4/5 \times 10^{-10}$ ، 3×10^{-9} و 9×10^{-9} است. مدل ای سی آر سی مقدار سایش را کم‌تر از دو مدل دیگر و همچنین مدل دی ان وی کم‌تر از فینی پیش‌بینی می‌نماید. از آنجایی که ذرات شن توسط سیال حمل می‌گردند، بنابراین دارای انرژی جنبشی بسیار بالایی بوده که به تبع آن دارای سرعت بالایی است که منجر به افزایش نرخ سایش می‌شود. ناحیه‌ای که دارای بیشینه سایش است در شکل 3 (ج) نشان داده شده است.

با توجه به اینکه سطح مقطع لوله ثابت است بنابراین دبی سیال با سرعت سیال رابطه مستقیمی دارد. پس با افزایش سرعت، دبی نیز بیش‌تر شده و نرخ سایش در زانویی لوله نیز افزایش می‌یابد. در اثر افزایش میزان ضربه‌ای که از سمت ذرات جامد به دیواره وارد می‌شود، با افزایش دبی نرخ سایش نیز بیش‌تر می‌گردد. این نتیجه قابلیت تعمیم به شرایط و هندسه‌های دیگر نیز دارد. در صورتی که خط لوله حاوی سیال گاز به جای مایع باشد و جریان فشار بالا داشته باشیم، فاز گاز به‌طور چشم‌گیری بر روی حرکت ذرات جامد تأثیرگذار است. زیرا دانسیته گاز در فشار بالا بیش‌تر است. بنابراین تغییر سرعت دوفازی گاز - جامد یا فاز گاز به‌تنهایی می‌تواند تأثیر بیش‌تری بر روی مقدار سایش نسبت به زمانی که تغییر فقط در سرعت ذرات جامد باشد، داشته باشد؛ اما زمانی که جریان فشار پایین باشد، چون دانسیته گاز کم‌تر است، فاز گاز اثر کم‌تری بر روی سرعت ذرات و در نتیجه میزان سایش دارد.

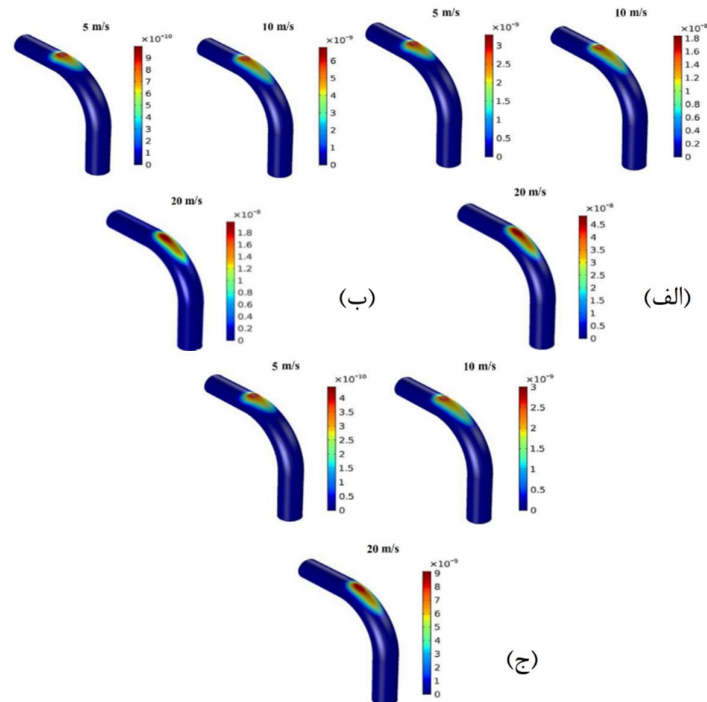
3-2- تأثیر تغییرات اندازه ذرات شن بر میزان سایش زانویی

به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اندازه ذرات شن بر میزان سایش، ذرات ورودی به زانویی در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه ذرات شن ورودی به زانویی به ترتیب 120، 170 و 220 میکرون انتخاب و اثر تغییرات اندازه ذرات بر میزان سایش زانویی با سه مدل سنجیده شده است. همچنین دبی تزریق شن برابر با $0/3$ کیلوگرم بر ساعت و سرعت سیال ورودی برابر با 10 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج سایش زانویی حاصله در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش اندازه قطر ذرات میزان سایش افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه ذرات شن، محل دارای بیش‌ترین سایش دچار تغییر شده و به سمت ناحیه میانی انحنای زانویی متمایل می‌گردد. برهم‌کنش بین سیال و ذرات جامد باعث می‌شود که با قطرهای مختلف ذرات شن، سرعت‌ها و همچنین زاویه برخورد‌های مختلف دیده شود. جریان ذرات با قطر بیش‌تر نیازمند انرژی جنبشی بیش‌تری هستند و بنابراین تأثیر بیش‌تری بر روی سطح زانویی دارند و نرخ سایش را افزایش می‌دهند. بیش‌ترین میزان سایش برای اندازه‌های ذرات شن 120، 170 و 220 میکرومتر در مدل فینی به ترتیب برابر با $2/5 \times 10^{-9}$ ، $1/8 \times 10^{-8}$ و $4/5 \times 10^{-8}$ ، در مدل دی ان وی به ترتیب برابر با 1×10^{-9} ، 7×10^{-9} و $1/6 \times 10^{-8}$ و در مدل ای سی آر سی به ترتیب برابر با 10^{-10} ، 4×10^{-9} ، 3×10^{-9} و 8×10^{-9} است. مدل ای سی آر سی میزان سایش را نسبت به هر دو مدل دیگر کم‌تر و مدل دی ان وی نسبت به مدل فینی کم‌تر پیش‌بینی می‌کند.

3-3- تأثیر تغییرات دبی تزریق شن بر میزان سایش زانویی

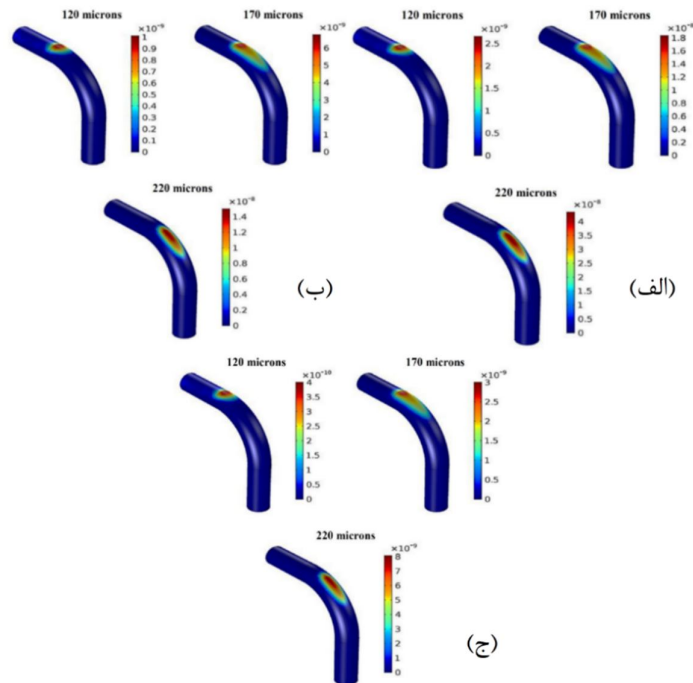
به‌منظور بررسی تأثیر دبی تزریق شن بر میزان سایش، دبی ذرات ورودی به زانویی در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است. دبی‌های تزریق شن به ترتیب 0/3، 0/6 و 0/9 کیلوگرم بر ساعت انتخاب گردیده و اثر تغییرات اندازه

ذرات بر میزان سایش زانویی با سه مدل سنجیده شده است. همچنین اندازه ذرات شن تزریقی برابر با $0/17$ و سرعت سیال ورودی برابر با 10 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

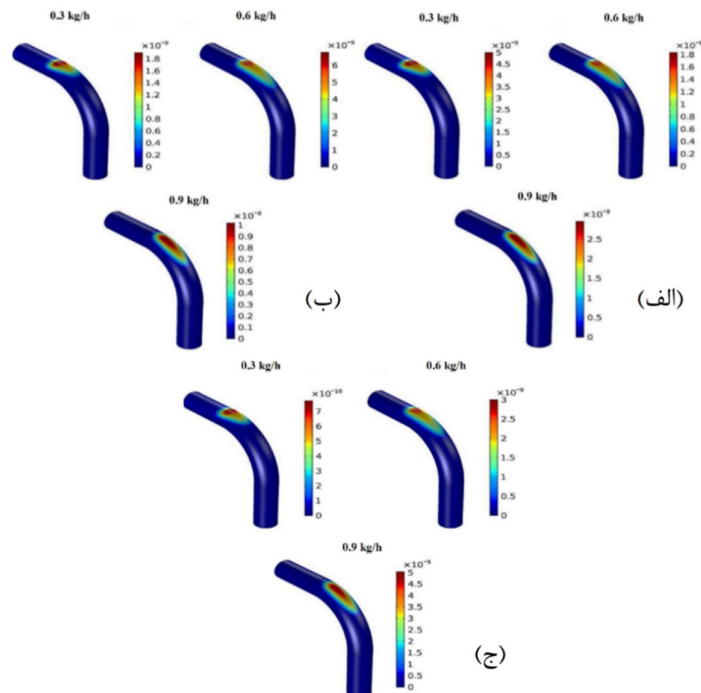


شکل 4- میزان سایش دیواره زانویی در سرعت‌های مختلف و دبی تزریق شن $0/3$ کیلوگرم بر ساعت و اندازه قطر ذرات شن 120 میکرونی با استفاده از (الف) مدل فیننی (ب) مدل دی ان وی (ج) ای سی آر سی (عدد رینولدز برای سرعت‌های 5 ، 10 و 20 متر بر ثانیه به ترتیب برابر با 94445 ، 188890 و 377780 است).

نتایج سایش زانویی حاصل در شکل 6 نشان داده شده است. مطابق پیش‌بینی با افزایش دبی تزریق، نرخ سایش به میزان زیادی افزایش می‌یابد. زیرا تعداد ضربه‌های ذرات شن بر روی سطح زانویی افزایش می‌یابد. هرچند که با افزایش دبی تزریق، لزوماً تعداد ذرات جامد افزایش نیافته و می‌تواند محدود بماند. همچنین محل سایش حداکثر با تغییر دبی تزریق شن دچار تغییر مکان می‌گردد.



شکل 5- میزان سایش دیواره زانویی در قطرهای مختلف ذرات شن و دبی تزریق شن برابر با $0/3$ کیلوگرم بر ساعت و سرعت سیال ورودی به میزان 10 متر بر ثانیه با استفاده از (الف) مدل فینی (ب) مدل دی ان وی (ج) ای سی آر سی (عدد رینولدز برای سرعت‌های 5 ، 10 و 20 متر بر ثانیه به ترتیب برابر با 94445 ، 188890 و 377780 است)



شکل 6- میزان سایش دیواره زانویی در دبی‌های مختلف تزریق شن و اندازه ذرات شن تزریقی $0/17$ میلی‌متر و سرعت سیال ورودی 10 متر بر ثانیه با استفاده از (الف) مدل فینی (ب) مدل دی ان وی (ج) ای سی آر سی (عدد رینولدز برای سرعت‌های 5 ، 10 و 20 متر بر ثانیه به ترتیب برابر با 94445 ، 188890 و 377780 است)

بیشترین میزان سایش برای دبی تزریق شن 0/3، 0/6 و 0/9 کیلوگرم بر ساعت در مدل فینی به ترتیب برابر با 5×10^{-8} ، $1/8 \times 10^{-8}$ و 3×10^{-8} ، در مدل دی ان وی به ترتیب برابر با 2×10^{-9} ، 7×10^{-9} و 1×10^{-8} در مدل ای سی آر سی به ترتیب برابر با 8×10^{-10} ، 3×10^{-9} و 5×10^{-9} است. مدل ای سی آر سی میزان سایش را نسبت به هر دو مدل دیگر کم تر و مدل دی ان وی نسبت به مدل فینی کم تر پیش بینی می کند.

مقادیر سایش به دست آمده با سه مدل فوق نشان می دهد افزایش سرعت به طور مستقیم سبب افزایش میزان سایش دیواره می شود. همین نتیجه گیری در مورد دو عامل دیگر یعنی اندازه ذرات شن و دبی های تزریق شن به دست می آید. لذا ضرورت دارد در صورت امکان سرعت سیال عبوری از تجهیزات کاهش داده و از این رو میزان سایش تجهیز را کاهش دهیم. همچنین در صورتی که بتوان تولید شن از چاه را (استفاده از غربال های ته چاهی) محدود نمود، برخورد ذرات جامد که مهم ترین عامل ایجاد سایش هستند، کاهش یافته یا حذف می گردد و از این رو میزان ذرات ورودی به سایر واحدهای پایین دست از قبیل واحدهای بهره برداری و پالایشگاهی را کاهش داده و بنابراین عمر مفید تجهیزات افزایش می یابد.

4- نتیجه گیری

در این مطالعه میزان سایش زانویی را که دارای احتمال سایش زیادی هستند توسط مدل های فینی، دی ان وی و ای سی آر سی مدل سازی شده است. بر طبق نتایج حاصل، بیش تر برخوردها در زوایایی بیش از 70 درجه اتفاق می افتند و از این رو سایش در این محل ها در بیش ترین مقدار خود قرار دارد. میزان سایش دیواره زانویی با افزایش سرعت سیال، افزایش دبی تزریقی شن و همچنین افزایش قطر ذرات شن تزریقی افزایش می یابد. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می گردد که مدل ای سی آر سی مقادیر سایش کم تری نسبت به دو مدل دیگر و مدل دی ان وی نیز مقادیر کم تری نسبت به مدل فینی پیش بینی می نماید. به منظور کاهش ساییدگی دیواره تجهیزات، در صورت امکان باید سرعت سیال عبوری از تجهیزات را کاهش دهیم. همچنین در صورتی که بتوان تولید شن از چاه را (استفاده از غربال های ته چاهی) محدود نمود، برخورد ذرات جامد که مهم ترین عامل ایجاد سایش هستند، کاهش یافته یا حذف می گردد و از این رو عمر مفید تجهیزات افزایش می یابد.

5- فهرست علائم

BH	ضریب سختی برینل دیواره مواد، بدون بعد
C	ضریب بدون بعد مدل ای سی آر سی
E_{VP}	حجم مواد کنده شده توسط ذره مستقل، m^3
F_D	نیروی دراگ، N
F_{ext}	نیروی خارجی، N
F_g	بردار نیروی جاذبه، N
F_s	ضریب شکل ذرات، بدون بعد
g	شتاب گرانش، m/s^2
K	نسبت نیروی عمودی به افقی، بدون بعد
k	انرژی جنبشی آشفته، J

جرم ذره، kg	m
جرم ذرات جامد، kg	m_p
ثابت مدل دی ان وی، بدون بعد	n
تنش ثابت پلاستیک جریان، Pa	P
فاصله شعاعی از خط مرکز لوله	r
شعاع کلی لوله	R
سرعت متوسط زمانی، m/s	U
سرعت جریان، m/s	u
سرعت بیشینه جریان، m/s	u_{max}
سرعت نوسان آشفته، m/s	u'
سرعت ذره، m/s	V
سرعت ذره جامد، m/s	v
علائم یونانی	
زاویه برخورد ذره، رادیان	α
چگالی سیال، kg/m ³	ρ
چگالی ذره، kg/m ³	ρ_p
زمان پاسخ به سرعت ذره، s	τ_p
عدد تصادفی نرمال توزیع شده، بدون بعد	φ
نسبت برابر با 2	Ψ

6- منابع

- [1] Zhang J., McLaury B. S., Shirazi S. A., Modeling sand fines erosion in elbows mounted in series, *Wear*, Vol. 402, 2018, pp. 196-206.
- [2] Zahedi P., Parvande S., Asgharpour A., McLaury B. S., Shirazi S. A., McKinney B. A., Random forest regression prediction of solid particle Erosion in elbows, *Powder Technology*, Vol. 338, 2018, pp. 983-992.
- [3] Edwards J. K., McLaury B. S., Shirazi S. A., Modeling solid particle erosion in elbows and plugged tees, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 123 (4), 2001, pp. 277-284.
- [4] Chen X., McLaury B. S., Shirazi S. A., A comprehensive procedure to estimate erosion in elbows for gas/liquid/sand multiphase flow, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 128 (1), 2006, pp. 70-78.
- [5] Kang R., Liu H., An integrated model of predicting sand erosion in elbows for multiphase flows, *Powder Technology*, Vol. 366, 2020, pp. 508-519.
- [6] Zhu H., Pan Q., Zhang W., Feng G., Li X., CFD simulations of flow erosion and flow-induced deformation of needle valve: Effects of operation, structure and fluid parameters, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 273, 2014, pp. 396-411.
- [7] Jafari M., Mansoori Z., Avval M. S., Ahmadi G., Ebadi A., Modeling and numerical investigation of erosion rate for turbulent two-phase gas–solid flow in horizontal pipes, *Powder technology*, Vol. 267, 2014, pp. 362-370.

- [8] Lin N., Lan H., Xu Y., Dong S., Barber G., Effect of the gas–solid two-phase flow velocity on elbow erosion, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 26, 2015, pp. 581-586.
- [9] Peri S., Rogers B. M., Computational fluid dynamics (cfd) erosion study, in: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro, Anaheim, California, U.S.A., 2007*.
- [10] Mansouri A., Arabnejad H., Karimi S., Shirazi S. A., McLaury B. S., Improved CFD modeling and validation of erosion damage due to fine sand particles, *Wear*, Vol. 338, 2015, pp. 339-350.
- [11] Zahedi P., Vieira R. E., Shirazi S. A., McLaury B. S., Liquid film thickness and erosion of elbows in gas-liquid annular flow, in: *CORROSION 2016, OnePetro, Vancouver, British Columbia, Canada, 2016*.
- [12] Parsi M., Kara M., Sharma P., McLaury B. S., Shirazi S. A., Comparative study of different erosion model predictions for single-phase and multiphase flow conditions, in: *Offshore Technology Conference, OnePetro, Houston, Texas, USA, 2016*.
- [13] Liu J., BaKeDaShi W., Li Z., Xu Y., Ji W., Zhang C., Cui G., Zhang R., Effect of flow velocity on erosion–corrosion of 90-degree horizontal elbow, *Wear*, Vol. 376, 2017, pp. 516-525.
- [14] Liu M., Liu H., Zhang R., Numerical analyses of the solid particle erosion in elbows for annular flow, *Ocean Engineering*, Vol. 105, 2015, pp. 186-195.
- [15] Zamani M., Seddighi S., Nazif H. R., Erosion of natural gas elbows due to rotating particles in turbulent gas-solid flow, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 40, 2017, pp. 91-113.
- [16] Vieira R. E., Parsi M., Zahedi P., McLaury B. S., Shirazi S. A., Sand erosion measurements under multiphase annular flow conditions in a horizontal-horizontal elbow, *Powder Technology*, Vol. 320, 2017, pp. 625-636.
- [17] Vieira R. E., Mansouri A., McLaury B. S., Shirazi S. A., Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow, *Powder Technology*, Vol. 288, 2016, pp. 339-353.
- [18] Khan R., Ya H. H., Pao W., Khan A., Erosion–Corrosion of 30°, 60°, and 90° Carbon Steel Elbows in a Multiphase Flow Containing Sand Particles, *Materials*, Vol. 12 (23), 2019, pp. 3898.
- [19] Xie D., Wu Y., Zhang Z., Wang T., Chen P., Cui Y., Li C., Feng S., Numerical Simulation of Elbow Erosion in Liquid-Solid Two-Phase Flow, in: *2nd International Conference on Mechanical, Electrical and Material Application (MEMA), IOP Publishing, Xian, China, 2019*, pp. 012169.
- [20] Kosinska A., Balakin B. V., Kosinski P., Theoretical analysis of erosion in elbows due to flows with nano-and micro-size particles, *Powder Technology*, Vol. 364, 2020, pp. 484-493.
- [21] Sedrez T. A., Shirazi S. A., Erosion evaluation of elbows in series with different configurations, *Wear*, Vol. 476, 2021, pp. 203683.
- [22] Finnie I., McFadden D. H., On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence, *Wear*, Vol. 48 (1), 1978, pp. 181-190.
- [23] Shirazi S. A., McLaury B. S., Shadley J. R., Rybicki E. F., Generalization of the API RP 14E guideline for erosive services, *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 47 (08), 1995, pp. 693-698.
- [24] Veritas D. N., Erosive wear in piping systems–recommended practice RP O501, *Det Norske Veritas*, 1996.
- [25] Darihaki F., Zhang J., Vieira R. E., Shirazi S. A., The near-wall treatment for solid particle erosion calculations with CFD under gas and liquid flow conditions in elbows, *Advanced Powder Technology*, Vol. 32 (5), 2021, pp. 1663-1676.