



## بررسی عددی تاثیر نسبت قطر لوله ماریپیچ بیضوی بر خوردگی در جریان دو فازی آب و شن

محمود سهرابی<sup>۱</sup>، حسن کاووسی بلوتکی<sup>۲\*</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی، ایذه، ایران

\*نویسنده مسئول: hakavoosi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

### چکیده

در این پژوهش به حل عددی تاثیر جریان دو فازی آب و شن در رژیم جریان مغشوش درون لوله ماریپیچ با شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار تجاری فلوئنت پرداخته شده است و نتایج مربوط به پارامترهای مختلف جریان از قبیل فشار عمودی وارد بر سطح، شدت سایش، شدت آشفتنگی و انرژی جنبشی آشفتنگی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. براساس این مدل، تأثیر نسبت قطر لوله بیضی شکل بررسی شد و نتایج بدست آمده به این شرح هستند. با افزایش نسبت قطر لوله ماریپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان انرژی جنبشی، شدت آشفتنگی، فشار عمودی، لزجت آشفتنگی و میزان سایش به ترتیب ۳۴، ۱۵، ۱۹۰۰، ۲۱ و ۱۲۰ درصد افزایش می‌یابند همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه مشخصات گفته شده به ترتیب ۴۶۳، ۱۳۷، ۱۴، ۳۱۷ و ۴۹۰ درصد تغییر خواهند کرد.

**کلمات کلیدی:** جریان دو فازی، نسبت قطر، شدت آشفتنگی، خوردگی

### مقدمه

سایش خطوط لوله و تجهیزات مورد استفاده جهت انتقال سیالات حاوی ذرات جامد یک مشکل اساسی در بسیاری از صنایع می‌باشد. بسیاری از خرابی‌های خطرناک مربوط به زانویی‌ها در دهه‌های قبل در نتیجه سایش بوده است. این مشکلات و خرابی‌ها، هم شامل هزینه تعویض بخش‌های فرسوده شده و هم مشکلات محیط زیستی و مسائل ایمنی را به دنبال دارد. ذرات شن می‌توانند سبب سایش خطوط لوله و تجهیزات گردیده و از این‌رو باعث ضررهای اقتصادی قابل ملاحظه‌ای شوند. علاوه بر آن سایش با شن و ماسه می‌تواند موجب از بین رفتن پوشش‌های جلوگیری از خوردگی شده و به تشدید خوردگی سایشی منجر شود. با این وجود دیگر مکانیسم‌های سایشی می‌توانند در شرایط عملیاتی خاص خسارات جبران ناپذیری به سیستم تولید وارد کنند. در بیشتر موارد شناسایی سایش به راحتی ممکن نیست و این مورد مدیریت سایش را با مشکلات فراوانی مواجه ساخته است. عوامل مؤثر بر سایش عبارت هستند از: سرعت جریان، رژیم جریان، تعداد فازهای جریان، میزان و یا غلظت فاز جامد در جریان (غلظت دانه‌های شن معلق در فاز مایع یا گاز)، اندازه‌ی ذرات جامد، اندازه قطرات مایع معلق در گاز، میزان تیزی دانه‌های شن و ماسه، زاویه برخورد ذرات با دیواره تجهیزات، ژئومتری و هندسه مجرای عبوری جریان، میزان سختی ذرات جامد، میزان سختی قطعات و تجهیزات.

تحقیق و پژوهش بر روی پدیده سایش به صورت مطالعات آزمایشگاهی و علمی، اولین بار توسط فینی<sup>[۱]</sup> آغاز شد. ایشان به بررسی سایش جریان گاز حاوی ذرات شن بر روی صفحات فلزی پرداختند. بیتر<sup>[۲]</sup> به اصلاح مدل ارایه شده فینی پرداخت. شلدون و فینی<sup>[۳]</sup> تاثیر تفاوت مواد شکننده<sup>۱</sup> و مواد انعطاف پذیر<sup>۲</sup> (فلزات) را بر سایش مورد مطالعه قرار دادند. بعد از آن در استانداردهای API<sup>[۴]</sup> و دیگر شرکت‌ها ارایه گردید. سالاما و ونکاتش<sup>[۵]</sup> براساس مدل  $(V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}})$  فاکتور C را ۸۰ تا ۱۰۰ برای جریان گاز فاقد شن و ضریب ۳۰۰ را برای گاز همراه با قطرات مایع ارایه دادند. سپس سایش چاه‌های نفت و گاز را اندازه گرفتند و روابط و اطلاعات مفیدی استخراج نمودند<sup>[۶]</sup>. محققین متعددی بر روی پارامترهای مختلف سایش مطالعات

<sup>1</sup> Brittle material

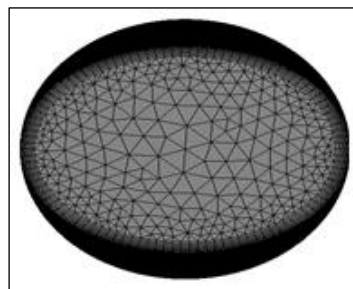
<sup>2</sup> Ductile material



چشمگیری را انجام داده و روابط نیمه متمرکزی نیز ارائه دادند. از این محققین می‌توان به نام بورگین [۷]، ونگ [۸] اشاره نمود. نکاهی و همکاران [۹] یک مطالعه در زمینه مدل‌سازی فرسایش در کامپوزیت‌های پلیمری انجام دادند آنها روشی جدید برای مدل‌سازی فرسایش در کامپوزیت‌های پلیمری تحت ضربه ذرات ساینده ارائه نمودند. در این روش با حل معادلات دیفرانسیل، نرخ فرسایش کامپوزیت بر اساس نرخ فرسایش هر جزء به طور جداگانه پیش‌بینی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت. نعمتی و همکاران [۱۰] به مطالعه بررسی راهکارهای هندسی جدید برای کاهش فرسایش در خم‌های لوله پرداختند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری نشان دادند که اضافه کردن حلقه‌های داخلی به خم لوله می‌تواند به طور قابل توجهی فرسایش را کاهش دهد. بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که تعداد و آرایش حلقه‌ها بهینه باشد. پرا و همکاران [۱۱] به بررسی فرسایش دریچه در اثر برخورد ذرات پرداختند. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی فرسایش دریچه‌ای پرداخته شد که در معرض برخورد ذرات قرار دارد. نتایج نشان می‌دهند که نقاط مختلف دریچه در معرض سایش‌های متفاوتی قرار دارند. همچنین، عوامل مختلفی مانند سرعت ذرات، زاویه برخورد و هندسه دریچه بر میزان فرسایش تأثیر می‌گذارند. این مطالعه به طراحی بهتر دریچه‌ها و افزایش عمر مفید آنها کمک می‌کند. متی و همکاران [۱۲] به بررسی فرسایش پره‌های توربین بادی پرداختند. این تحقیق به بررسی فرسایش پره‌های توربین‌های بادی در اثر برخورد ذرات شن می‌پردازد. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، محققان به دنبال یافتن نقاطی از پره هستند که بیشترین آسیب را می‌بینند. نتایج نشان می‌دهند که سرعت باد، اندازه ذرات و زاویه برخورد تأثیر مستقیمی بر میزان فرسایش دارند. همچنین، این مطالعه به پیش‌بینی میزان فرسایش در طول زمان کمک می‌کند.

### هندسه و شبکه مورد بررسی

در پژوهش حاضر، تأثیر نسبت قطر لوله بیضوی مارپیچ بر میزان سایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای هندسی که در طراحی هندسه عمومی لوله بیضوی مارپیچ در نظر گرفته شدند،  $L$  طول آشفته‌ساز،  $D$  قطر بزرگ بیضی،  $d$  قطر کوچک بیضی می‌باشد. هندسه مسئله در نرم‌افزار انسیس فلونت تولد و شبکه‌بندی شده است و طول دامنه لوله مقدار آن ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شبکه مورد استفاده همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، به صورت بی‌سازمان و از نوع هیبریدی است و شبکه نزدیک دیواره‌ها از نوع لایه مرزی می‌باشد.



شکل ۱: نمای شبکه بندی

### شرایط مرزی

سرعت در ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شود و در این پژوهش ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰ متر بر ثانیه و سیال آب می‌باشد. شرایط مرزی ورودی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$u=v=w=0, \text{ ثابت} \quad (1)$$

فرض کاملاً توسعه‌یافته برای خروجی اعمال می‌شود.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$



خروجی لوله در فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. جریان مورد بررسی به صورت تراکم ناپذیر، پایا، نیوتنی، مغشوش، سیال تک فازی و همچنین ویژگی‌های ترموفیزیکی برای سیال ثابت در نظر گرفته می‌شود. تمامی دیواره‌ها به صورت ثابت و با فرض عدم لغزش در نظر گرفته می‌شوند. برای مرز خروجی نیز شرط مرزی فشار نسبی صفر لحاظ می‌گردد.

### روش مدل‌سازی جریان و فرضیات حل

معادلات حاکم بر مسئله با استفاده نرم‌افزار آنسیس فلونت بر اساس روش حجم محدود حل می‌گردند. مدل استاندارد  $Re$ - $\kappa - \epsilon$  با تابع دیواره استاندارد می‌باشد، که می‌تواند جریان آشفته را به خوبی پیش‌بینی کند. در جدول (۱) مشخصات ذرات و سیال آب آورده شده است. مبنای مغشوش بودن جریان عدد رینولدز می‌باشد جریان در حالت مغشوش می‌باشد.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (3)$$

جهت حل مسئله از حل‌کننده فشار مینا<sup>۱</sup> و برای ارتباط فشار و سرعت از کوپل<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم از گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات ذرات و سیال آب

لزجت	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	
۰/۰۰۰۱	۹۹۸/۲	آب
-	۱۵۵۰	شن

تمام تنظیمات صورت گرفته در آنسیس فلونت ۱۹ در جدول (۲) به شرح ذیل می‌باشند.

جدول ۲: تنظیمات فلونت

فشار مینا	نوع حل گر
ضمنی	نحو حل
سه بعدی	نوع مدل
پایدار	نوع جریان
k-ε-realizable	مدل آشفتگی
ثابت	لزجت مخلوط
مرتبه ۲	روش گسسته‌سازی معادلات
کوپلینگ	الگوریتم حل

### بررسی اندازه شبکه و اعتبار سنجی نتایج

تاثیر شبکه بر نتایج حاصل از حل جریان، مورد ارزیابی قرار گرفته است. میزان فرسایش به عنوان معیاری برای در نظر گرفتن تاثیرات تعداد سلول‌های شبکه، انتخاب شده است. به این منظور چهار شبکه با تراکم متفاوت در نظر گرفته شده است. جدول (۳) مقادیر فرسایش را در شرایط ثابت برای حالت‌های مختلف شبکه‌های تولید شده، نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، شبکه سوم و چهارم در میزان فرسایش، تفاوت چندانی ندارند. در نتیجه شبکه سوم به دلیل اینکه حجم محاسبات آن نسبت به شبکه چهارم کمتر است، انتخاب می‌شود.

<sup>1</sup> Pressure-Based

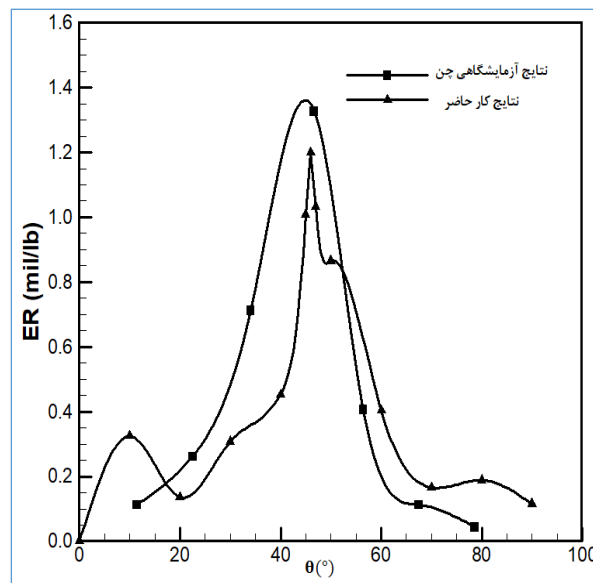
<sup>2</sup> Coupled



جدول ۳: حل جریان با شبکه‌های مختلف

شبکه بی‌سازمان	تعداد سلول‌ها	فرسایش ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )
اول	۱۱۲۱۹۱۵	۰/۰۰۰۱۴۵
دوم	۲۳۶۲۸۱۹	۰/۰۰۰۱۶۸
سوم	۳۰۳۳۳۴۵	۰/۰۰۰۲۹۸
چهارم	۴۷۵۱۲۳۶	۰/۰۰۰۲۹۹

به واسطه وجود لزجت سیال و اصل عدم لغزش در نزدیکی دیواره‌ها، لایه‌های مرزی ایجاد می‌شوند و با توجه به اهمیت رفتار جریان در نزدیک دیواره‌ها، چگونگی تحلیل این نواحی در بررسی عددی نقش عمده را ایفا می‌کند. از طرفی در این نواحی نزدیک دیوار به واسطه تشکیل لایه مرزی، تغییرات ممنتم و سایر متغیرهای جریان شدیدتر می‌باشد. لذا دقت بیشتر در تحلیل این نواحی، تاثیر به سزایی در حل و پیش‌بینی دقیق‌تر کل میدان جریان آشفته خواهد بود. نتایج این پژوهش با نتایج عددی مقاله چن و همکاران [۱۳] مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شکل (۲) نمودار نرخ سایش در نقاط مختلف زانویی کار حاضر با مرجع موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار نرخ سایش در نقاط مختلف زانویی

## معادلات حاکم بر رژیم جریان

با در نظر گرفتن مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  معادلات حاکم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (۴)$$

معادله ممنتم

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{aff} \nabla U) \quad (۵)$$

که در آن  $\mu_{aff} = \mu + \mu_1$

انرژی جنبشی آشفتگی  $k$ 

$$\rho \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (6)$$

پراکنش آشفتگی  $\varepsilon$ 

$$\rho \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

که در آن  $\mu_t$  ویسکوزیته آشفتگی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

در روابط (۴) تا (۸)،  $k$ ،  $\varepsilon$ ،  $\mu_{eff}$ ،  $P$ ،  $U$ ،  $\rho$ ،  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $C_k$ ،  $\sigma_k$  و  $C_\mu$  مقادیر ثابت هستند،  $C_1=1/44$ ،  $C_2=1/92$ ،  $C_k=1/0$ ،  $\sigma_k=1/0$  و  $\sigma_\varepsilon=3/1$  و  $C_\mu=0/09$ .

معادلات حاکم بر فاز گسسته جامد

معادله حاکم بر حرکت ذره در سیال بر اساس قانون دوم نیوتن برابر است با [۱۳]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_A + \vec{F}_p \quad (9)$$

در معادله (۹)  $\vec{F}_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$  نیروی درگ بر واحد جرم ذره است و برابر است با:

$$\vec{F}_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (10)$$

که در اینجا  $\vec{u}$  سرعت فاز سیال،  $\vec{u}_p$  سرعت ذره،  $\mu$  ویسکوزیته سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $d_p$  قطر ذره می‌باشد.  $C_D$  ضریب نیروی درگ می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (11)$$

و  $Re$  عدد رینولدز نسبی ذره است و بوسیله زیر تعریف می‌شود.

$$Re = \frac{\rho |\vec{u}_p - \vec{u}| d_p}{\mu} \quad (12)$$

نیروی گرادیان فشار، نیروی مورد نیاز برای شتاب دادن سیالی است که در صورت غیاب ذره، حجمی معادل ذره را اشغال می‌کند. این نیرو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{F}_p = \left( \frac{\rho}{\rho_p} \right) \vec{u}_p \nabla u \quad (13)$$



نیروی جرم ظاهری<sup>۱</sup> یا جرم اضافه شده<sup>۲</sup> به علت اختلاف شتاب بین سیال و ذره بوجود می‌آید. در هنگام شتاب گرفتن ذره، سیال یک جرم مجازی بر روی ذره وارد می‌کند. این نیروی زمانی اهمیت پیدا می‌کند که اختلاف چگالی سیال و ذره قابل توجه باشد.

$$\vec{F}_A = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (14)$$

#### ردیابی ذره

شبیه‌سازی ردیابی ذره پس از بدست آوردن حل جریان سیال حامل، انجام می‌گردد. در این تحقیق از روش ردیابی ذره به صورت اویلری - لاگرانژی استفاده می‌شود. در این روش جریان سیال بر روی یک شبکه ثابت حل می‌شود و ذرات به صورت لاگرانژی دنبال می‌شوند. معمولاً این روش‌ها مدل ذره گسسته<sup>۳</sup> یا مدل جزء گسسته<sup>۴</sup> نیز نامیده می‌شوند. در این روش‌ها اثر متقابل ذره - ذره، ذره - دیوار و ذره - سیال می‌تواند در نظر گرفته شود. در اینجا از اثر ذره - ذره صرف نظر شده است.

#### مدل پیش‌بینی فرسایش

اطلاعات برخورد مانند سرعت برخورد و زاویه برخورد به عنوان ذراتی که به دیوار ضربه می‌زنند، جمع‌آوری می‌شود. با استفاده از این اطلاعات نرخ فرسایش می‌تواند محاسبه شود. در رابطه زیر  $ER$  نرخ فرسایش بر حسب  $kg / m^2 s$  می‌باشد.

$$ER = \sum_{p=1}^{N \text{ particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (15)$$

که در آن  $C(d_p)$  تابعی از قطر ذره،  $f(\alpha)$  تابع زاویه برخورد و  $b(v)$  تابعی توانی سرعت نسبی ذره می‌باشد.  $a$  زاویه برخورد مسیر ذره با سطح دیوار و  $v$  سرعت نسبی ذره می‌باشد.  $A_{face}$  مساحت سطح سلول در دیواره می‌باشد.  $\dot{m}_p$  نیز دبی جرمی ذرات می‌باشد. رابطه (۱۶) را می‌توان با تقسیم بر دبی جرمی شن و ماسه و چگالی دیواره لوله بر حسب  $mm/kg$  نیز نوشت:

$$ER = \sum_{p=1}^{N \text{ particles}} \frac{1000(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face} \rho_w} \quad (16)$$

در رابطه فوق ۱۰۰۰ برای تبدیل به میلی‌متر می‌باشد.

#### بررسی تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر خوردگی

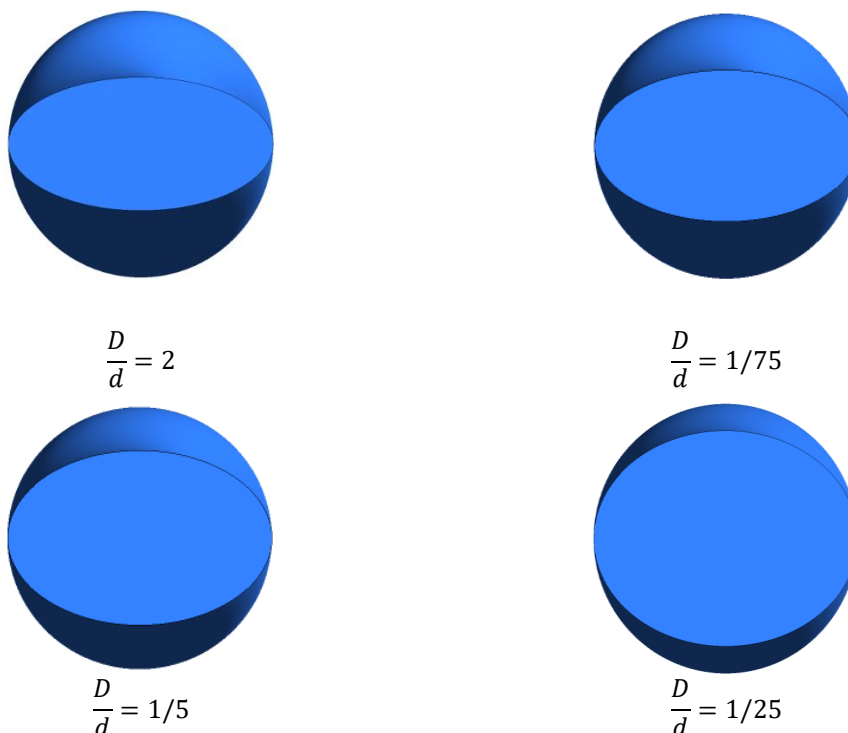
در این بخش نتایج عددی تاثیر نسبت قطر بر میزان خوردگی در لوله مارپیچ در دو قسمت بیان خواهد شد و تاثیر آن بر فشار عمودی وارد بر سطح، شدت سایش، شدت آشفته‌گی و انرژی جنبشی آشفته‌گی بیان می‌گردد. یکی از پارامترهای موثر در میزان خوردگی نسبت قطر لوله مارپیچ بر خوردگی می‌باشد، لذا در این بخش به بررسی اثر نسبت قطر لوله مارپیچ در میزان خوردگی و مشخصات آشفته‌گی جریان پرداخته خواهد شد. نسبت قطر لوله مارپیچ در نظر گرفته شده شامل ۱/۲۵، ۱/۵ و ۲ می‌باشند. شکل (۳) نسبت قطر سطح مقطع لوله نشان می‌دهد. در همه حالت‌ها قطر کوچک ۱۵ میلی‌متر و گام ۱ در نظر گرفته می‌گردد. در تحلیل میزان اثر نسبت قطر لوله مارپیچ بر خوردگی یکی از مشخصات مهم در خوردگی لوله میزان شدت آشفته‌گی و انرژی جنبشی آشفته‌گی جریان می‌باشد. با افزایش سرعت سیال، نرخ سایش افزایش خواهد یافت. سرعت، مهم‌ترین فاکتور از بین سایر متغیرهای دیگر محسوب می‌شود. طبق رابطه فیزیکی ارائه شده توسط بورگین [۷]، سایش متناسب خواهد بود با مقدار انرژی جنبشی منتقل شده از طرف ذرات شن به فلز هدف، انرژی جنبشی نیز از ترم سرعت به توان دو می‌باشد.

<sup>1</sup> Virtual mass

<sup>2</sup> Added mass

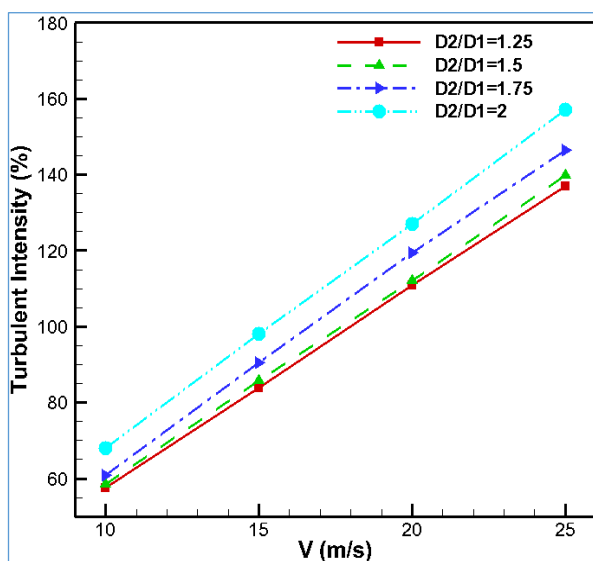
<sup>3</sup> Discrete Particle Model (DPM)

<sup>4</sup> Discrete Element Model (DEM)

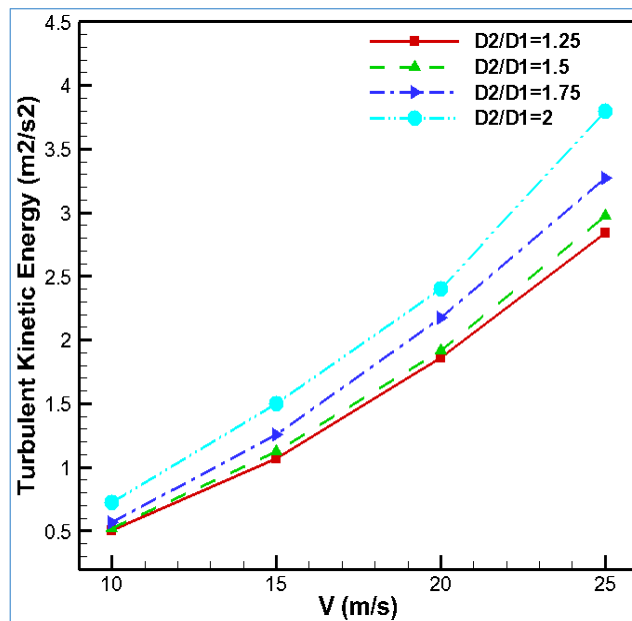


شکل ۳: نسبت قطر سطح مقطع

این نتیجه با دقت بسیار بالایی هم در داده‌های آزمایش و هم در مدل‌های ارایه شده مشاهده می‌گردد. در شکل‌های (۴) و (۵) تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر میزان شدت آشفتگی و انرژی جنبشی آشفتگی در سرعت جریان مختلف آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت و نسبت قطر لوله انرژی جنبشی و شدت آشفتگی جریان افزایش خواهند یافت. هرچه آشفتگی جریان بیشتر باشد میزان سایش افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار انرژی جنبشی و شدت آشفتگی با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان هر دو مشخصه به ترتیب ۳۴ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابند. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه هر دو مشخصه به ترتیب ۴۶۳ و ۱۳۷ درصد تغییر خواهند کرد.

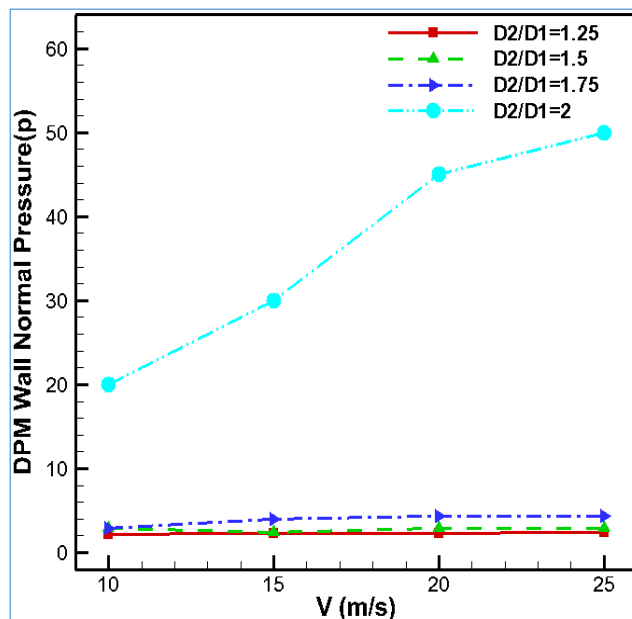


شکل ۴: تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر میزان شدت آشفتگی



شکل ۵: تاثیر نسبت قطر لوله ماریپچ بر میزان انرژی جنبشی آشفتگی

در شکل‌های (۶) و (۷) تاثیر نسبت قطر لوله ماریپچ بر میزان فشار عمودی و لزجت آشفتگی در سرعت جریان مختلف و همچنین در شکل (۸) کانتور فشار وارد بر سطح لوله نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر لوله ماریپچ شدت فشار ایجاد شده بر سطح و همچنین لزجت ناشی از آشفتگی جریان بیشتر شده، لذا اثر خوردگی جریان بر سطح لوله بیشتر خواهد شد. با توجه به نمودار فشار عمودی و لزجت آشفتگی با افزایش نسبت قطر لوله ماریپچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان هر دو مشخصه به ترتیب ۱۹۰۰ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابند. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه هر دو مشخصه به ترتیب ۱۴ و ۳۱۷ تغییر خواهند کرد.

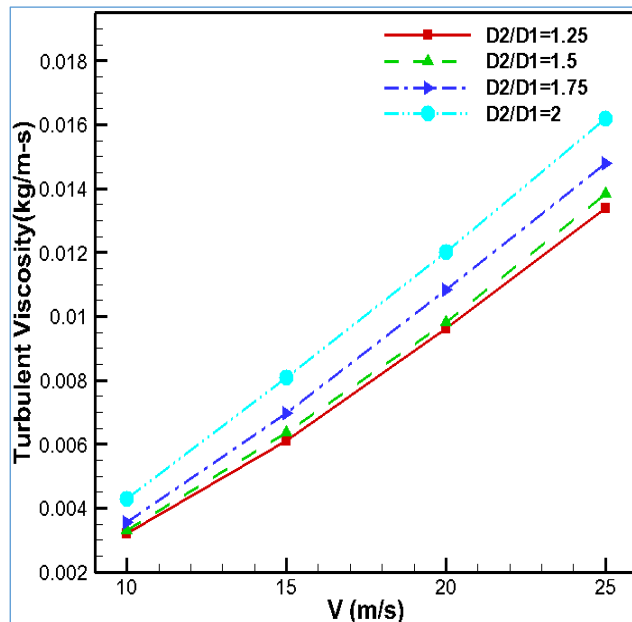


شکل ۶: تاثیر نسبت قطر لوله ماریپچ بر میزان فشار عمودی

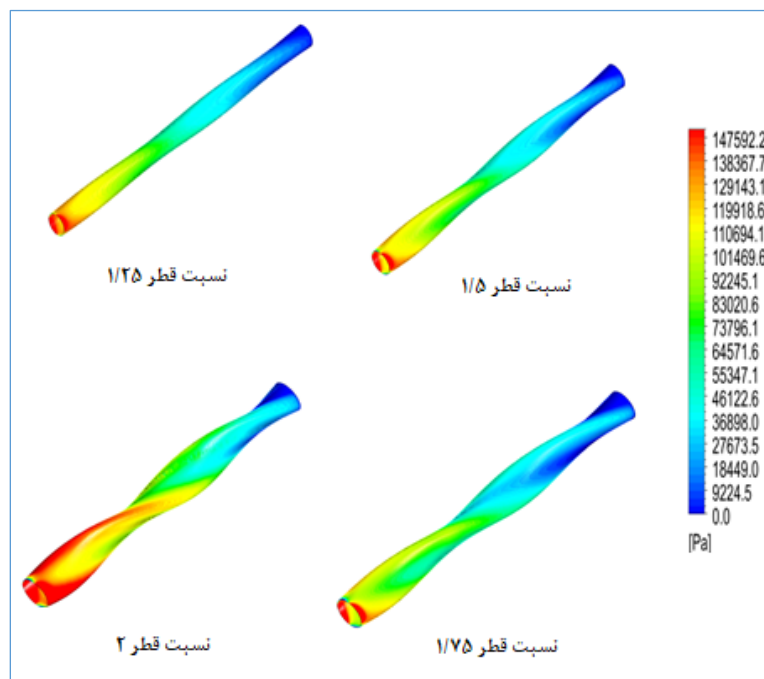




با افزایش اندازه سرعت سایش بیشتر خواهد شد. در سرعت‌های کمتر از ۱۵ متر بر ثانیه شیب تغییرات کم و در اندازه‌های بزرگتر از ۱۵ متر بر ثانیه شیب تغییرات بیشتر خواهد شد. این بدان معنی است که هرچه اندازه سرعت بزرگتر شود، اثر نیروی اینرسی نیز بیشتر شده و در اندازه مشخصی، شیب نمودار بیشتر خواهد شد. اثر سرعت ذرات در لوله افقی خیلی چشمگیر است.



شکل ۷: تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر میزان لزجت آشفتگی

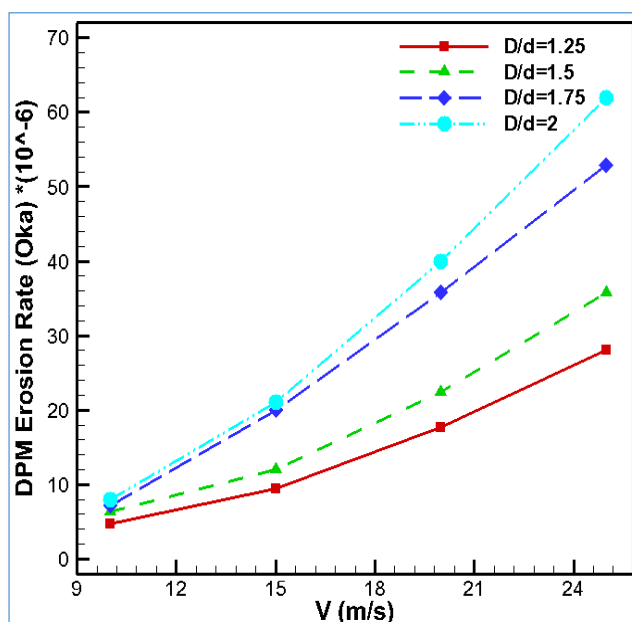


شکل ۸: کانتور فشار وارد بر سطح لوله در نسبت قطر مختلف



تفاوت زیادی در مقدار سایش قسمت تحتانی و فوقانی لوله افقی وجود دارد. تاثیر سختی و دانسیته و سختی فلز با مقدار سایش یک رابطه معکوس دارد. هرچه قدر سختی بیشتر باشد سایش کمتر خواهد بود. اما دانسیته یک ترم بسیار مهمی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هرچه فلز متراکم‌تر باشد حجم کمتری در سایش از دست خواهد داد. و این نکته بسیار مهمی است. زیرا حد مجاز سایش معمولاً به صورت واحد طول بیان می‌شود. اگر عمق سایش ایجاد شده مد نظر قرار گیرد اثر دانسیته ملموس‌تر خواهد بود. از میان مکان بررسی شده در این پروژه، بیشترین سایش مربوط به ناحیه انحنا می‌باشد، زاویه‌ی برخورد نیز از اهمیت خاصی برخوردار است.

در شکل (۹) تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر میزان سایش در سرعت جریان مختلف آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ سایش ایجاد شده بر سطح بیشتر می‌شود، و با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان ۱۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه سایش ۴۹۰ درصد تغییر خواهند کرد.



شکل ۹: تاثیر نسبت قطر لوله مارپیچ بر میزان سایش

### نتیجه‌گیری

- ۱- با افزایش سرعت و نسبت قطر لوله انرژی جنبشی و شدت آشفتگی جریان افزایش خواهند یافت. هرچه آشفتگی جریان بیشتر باشد، میزان سایش افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار انرژی جنبشی و شدت آشفتگی با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان هر دو مشخصه به ترتیب ۳۴ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابند. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه هر دو مشخصه به ترتیب ۴۶۳ و ۱۳۷ درصد تغییر خواهند کرد.
- ۲- فشار عمودی و لزجت آشفتگی با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان هر دو مشخصه به ترتیب ۱۹۰۰ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابند. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه هر دو مشخصه به ترتیب ۱۴ و ۳۱۷ تغییر خواهند کرد.
- ۳- با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ سایش ایجاد شده بر سطح بیشتر شده با توجه به نمودار سایش با افزایش نسبت قطر لوله مارپیچ در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه از ۱/۲۵ به ۲ میزان ۱۲۰ درصد افزایش می‌یابند. همچنین در نسبت قطر ۱/۲۵ با تغییر سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه به ۲۵ متر بر ثانیه سایش ۴۹۰ درصد تغییر خواهند کرد.



## مراجع

- [1] Finnie, I., (1960). Erosion of surfaces by solid particles. wear, 3(2), pp 87-103.
- [2] Bitter, J.G.A., (1963). A study of erosion phenomena part I. wear, 6(1), pp 5-21.
- [3] Sheldon, G.L., Finnie, I., (1966). On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting.
- [4] American Petroleum Institute. Production Department, (1991). Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems. American Petroleum Institute.
- [5] Salama, M.M., Venkatesh, E.S., (1983), May. Evaluation of API RP 14E erosional velocity limitations for offshore gas wells. In Offshore technology conference (pp OTC-4485). OTC.
- [6] Yong, Bai., Qiang, Bai., (2012). Subsea Engineering Handbook, first edition. Houston, Texas, Gulf Publishing Company.
- [7] Bourgoyne, T., (1989). Experimental Study of Erosion in Diverter Systems. SPE/IADC 18716, Proc SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, 28 February - 3 March, pp 807-816.
- [8] Wang, J., Shirazi, S.A., Shadley, J.R., Rybicki, E.F., (1996). Application of flow modeling and particle tracking to predict sand erosion rates in 90 degree elbows. ASME, NEW YORK, NY,(USA)., (734).
- [9] Nekahi, M.M., Vazquez, E.V. , Papini, M., (2024). Prediction of the gradual solid particle erosion of particulate-reinforced epoxy-matrix composites using surface evolution modeling. Tribology International, 193, p 109422.
- [10] Nemati, B., Vaghefi, M., Behroozi, A.M., (2024). Numerical investigation of the erosion reduction in elbows using separate and helical inner ring. Results in Engineering, 23, p 102499.
- [11] Perera, P., Hayward, K., Guzzomi, F., Vafadar, A., (2024). Erosion wear characterisation of an open ductile iron butterfly valve subjected to aluminium oxide particle slurry flow. Tribology International, 191, p 109199.
- [12] El-Maaty, A.A., Abdallah, H.K., Kotb, M.A., Ben-Mansour, R., Alatawi, E.S., (2024). Numerical investigation of sand erosion rate in a horizontal axis wind turbine. Heliyon, 10(6), p.e 27676.
- [13] Chen, X., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., (2004). Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees. Computers & Fluids, 33(10), pp 1251-1272.