

## اثر افت فشار بر سایش در زانوهای ایستگاه تقلیل فشار

سید محمد قریشی\*، حسین مظاهری، علی حسینی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

### چکیده

در این مقاله با توجه به محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی زانو‌هایی که در معرض سایش و یا دچار سایش شده‌اند، اثر افت فشار بر این پدیده در جریان‌های دارای ذرات با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ذات متغیر فرآیند سایش که یک پدیده درونی است، ارائه قطعی الگوهای پیشنهادی در مدل‌سازی برای زانو‌ها در شرایط عملیاتی واقعی را دشوار ساخته است. در این تحقیق اثر افت فشار بر جریان دو فازی (گاز-ذرات جامد) در یک زانوی ایستگاه تقلیل فشار به روش عددی، شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی به روش اویلری - لاگرانژی با عبور سیال گاز طبیعی و تزریق ذرات جامد با اندازه‌های مختلف در دمای استاندارد می‌باشد و اثر افت فشار بر جریان تحلیل می‌شود. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی، نرخ و محل وقوع سایش با توجه به افت فشارهای متنوع نشان داده شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، کار انجام شده با یک نمونه سایش واقعی در صنعت گاز مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افت فشار و افزایش اندازه ذرات، نرخ سایش افزایش پیدا می‌کند و محل وقوع بیشترین سایش از کنار زانو (دیواره) به محل خم و تغییر مسیر جریان، توسعه می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۵/۱۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۸/۲۹

### واژگان کلیدی:

سایش، جریان گاز طبیعی، جریان دو فازی، اویلری - لاگرانژی

### مقدمه

از دیدگاه اویلری و فاز ذرات جامد از دیدگاه لاگرانژی بررسی شده‌اند [۶،۷]. به دلیل دو فازی بودن جریان گاز و ذرات جامد از مدل قطرات مجزا استفاده می‌شود. در این مدل فاز گاز و جامد از یکدیگر جدا فرض می‌شود، به طوری که فاز ذرات جامد گسسته و فاز گازی غیر قابل تراکم و پیوسته در نظر گرفته می‌شود. فاز گاز با به کار بردن معادلات ناویر-استوکس در ترکیب با یک مدل آشفته‌گی که معمولاً مدل شناخته شده  $\epsilon$ -K است، توصیف می‌گردد. در هر زمان  $t$ ، این فرمول‌بندی اویلری رفتار پارامترهای مورد نظر جریان مانند مولفه‌های سرعت، فشار، چگالی و دما به صورت تابعی از موقعیت  $(X, Y, Z)$  در مختصات کارتزین برای میدان جریان سه بعدی شرح می‌دهد. فرمول‌بندی اویلری برای توصیف فاز ذرات جامد گسسته مناسب نیست و توصیف لاگرانژی برای این منظور به کار می‌رود. ذرات به صورت نقاط جرم منفردی رفتار می‌کند که سرعت هریک به نیروهای پسای ناشی از سرعت نسبی موجود بین گاز و ذرات جامد کاهش می‌یابد. رفتار هر دو فاز با یکدیگر کوبل می‌شود، زیرا مومنتوم مبادله می‌شود (سرعت ذرات به علت نیروهای ایرودینامیکی کاهش یافته و سرعت گاز افزایش می‌یابد). در فاز جامد کل ذرات به دسته‌هایی از ذرات تقسیم می‌شود. هر دسته دارای قطر، سرعت و موقعیت مکانی زمان سپری شده پس از تزریق یکسان هستند. در مدل قطرات مجزا، مشخصات هر دسته از ذرات تازمانی که در میدان حل وجود داشته باشد، در هر لحظه توسط معادلات لاگرانژی محاسبه می‌شود. با تغییر مشخصات ذرات می‌توان

عمده فعالیت‌های انجام شده تاکنون شامل شبیه‌سازی‌های عددی سایش رخ داده ناشی از تغییر سرعت در خم لوله‌های آب و بررسی سایش در سهراهی و خم لوله‌های فاضلاب است. تاکنون ۲۸ مدل سایش ناشی از ذرات داخل جریان تدوین شده است [۳،۴،۸،۱۰،۱۳]. آقای برون و همکاران [۵] با بررسی عددی توسط نرم‌افزار دینامیک سیالات تولید سایش در سهراهی را در سیستم‌های فاضلاب بررسی و محل وقوع آن را مشخص کرده‌اند. در آخرین کار انجام شده، آقای ژانگ و همکاران [۶] در سیستم‌های فاضلاب اثر سرعت بر روی خم‌ها در زانو‌ها را بررسی و محل بیشترین وقوع سایش را پیش‌بینی نمودند. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد اتصالات نظیر سهراهی در سیستم‌های فاضلاب (دارای سیال آب) صورت پذیرفته است لیکن تحقیق یا مقایسه‌ای در مورد اثرات افت فشار و تغییرات اندازه ذرات داخل جریان گاز بر روی سایش در زانوی ایستگاه تقلیل فشار انجام نشده است. در این تحقیق اثرات سایشی افت فشار برای جریان گاز دارای ذرات با اندازه‌های مختلف و نحوه تعیین محل وقوع آن بررسی گردیده است.

### ۱- معادلات حاکم بر فازها

#### ۱-۱- معادلات حاکم بر جریان دو فازی گاز و ذرات جامد

در این بخش، معادلات حاکم در حالت سه‌بعدی، دائمی و متلاطم که دارای ذرات جامد می‌باشد، بررسی شده است. در این کار فاز گاز

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (sm\_ghoreyshi@nigc-tpgc.ir)

### ۱-۳- معادلات حاکم بر فاز گسسته

برای شبیه‌سازی ذرات مدل فاز گسسته استفاده می‌شود که با این مدل، رفتار ذرات از طریق دامنه شبیه‌سازی با استفاده از دیدگاه لاگرانژ محاسبه می‌شوند. در این روش تبادل اطلاعات در مورد حرکت و انرژی بین ذرات و فاز پیوسته می‌تواند به دست آید. محاسبات برای ذرات با حل موازنه نیرو برای یک ذره انجام می‌شود.

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (3)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\eta_f c_D Re_p}{\rho_p d_p^2} (u_f - u_p) + f \quad (4)$$

$x$  موقعیت،  $u_p$  سرعت ذره،  $d_p$  قطر ذره،  $\rho_p$  دانسیته ذره،  $\eta_f$  ویسکوزیته دینامیکی جریان و  $c_D$  ضریب دراگ برای ذرات کروی است. ترم سمت راست معادله فوق بسیار دارای اهمیت است، چون معرف عملکرد نیروهای دراگ بر روی یک ذره در اطراف سیال می‌باشد. ترم دوم همه نیروهای موثر بر ذره، شامل نیروی گرانشی، نیروی گرادیان فشار و نیروی بویانسی است.

### ۱-۴- مدل سایش

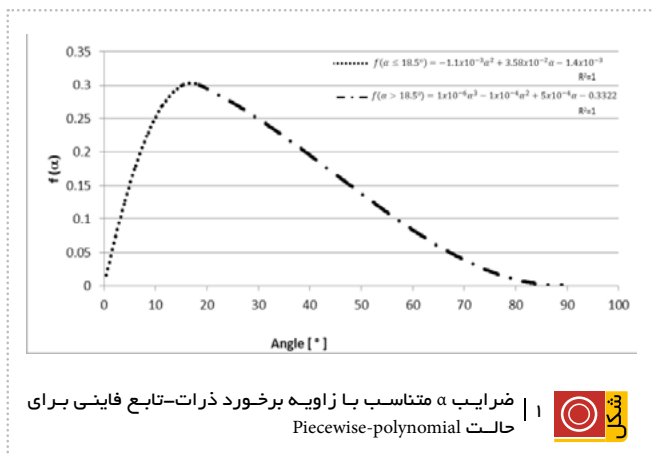
تعداد زیادی از مدل‌های سایش در جهت شبیه‌سازی‌های عددی ارائه شده است که در اینجا از مدل ارائه شده توسط آقای فاینی استفاده شده می‌شود [۴].

$$E = K \cdot u_p^n \cdot f(\alpha) \quad (5)$$

که در آن  $K$  ضریب تصحیح،  $\alpha$  زاویه برخورد ذرات به دیواره،  $E$  نرخ سایش و  $n$  توان سرعت برخورد ذرات با دیواره می‌باشد. جهت انتخاب ضرایب  $\alpha$  در نرم‌افزار از نمودار شکل ۱- استفاده می‌شود.

### ۱-۵- کوپلینگ بین فازها

در این شرایط هزینه و زمان محاسبات نسبت به روند تک‌مسیره افزایش می‌یابد. چون در فرآیند سایش موردنظر، کسر حجمی فاز ذرات بالا



عبارت‌های تولید را که در معادلات اویلری فاز گاز داخل می‌شوند، محاسبه کرد.

### ۱-۲- معادلات حاکم بر فاز پیوسته

برای مدل‌سازی فاز گازی می‌باید قوانین بقای حاکم بر میدان جریان در دستگاه مختصات اویلری مورد تحلیل قرار گیرند [۱]. این قوانین عبارتند از قانون بقای جرم و قانون بقای مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس). فرض بر این است که دمای فاز گازی ثابت است و انتقال حرارت صورت نمی‌گیرد و همچنین هدف تحقیق، مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی یا احتراق نیست. بنابراین، نیازی به تحلیل معادله انرژی در میدان جریان مشاهده نمی‌شود. در این قسمت دو معادله برای جریان آشفته بیان می‌گردد.

#### الف- جریان لامینار

معادله بقای جرم در فاز پیوسته بدین شکل است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0 \quad (1)$$

همچنین معادلات مومنتوم (ناویر-استوکس) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\text{div} p + \mu \text{div}(\text{grad } u) + S_m \quad (2)$$

در معادلات بالا  $\rho$  چگالی سیال،  $V = ui + vj + wk$  میدان سرعت سیال در دستگاه مختصات اویلری،  $p$  میدان فشار استاتیکی سیال و  $S_m$  ترم چشمه ناشی از نیروهای حجمی مانند نیروی گرانش است [۷].

#### ب- جریان آشفته

همانطور که می‌دانیم در جریان آشفته کمیت‌های جریان همانند فشار، سرعت و ... در یک نقطه با نوسانات بسیار زیاد تصادفی است و پیش‌بینی رفتار جریان را با مشکل مواجه می‌کند. برای مدل کردن جریان آشفته روش‌های مختلفی مانند میانگین‌گیری از معادلات ناویر-استوکس و مدل گردابه‌های بزرگ وجود دارد. هر روش با توجه به دقت آن، زمان و هزینه خاص خود را دارد. با توجه به هزینه هر روش در این تحقیق از مدل معادلات ناویر-استوکس میانگین رینولدز استفاده می‌شود. این مدل بر مبنای مقدار میانگین زمانی هر متغیر استوار است که توسط رینولدز پیشنهاد شد. با جایگذاری پارامترهای جریان با استفاده از مقدار میانگین و نوسانی در معادلات ناویر-استوکس، معادلات جریان جدیدی که به معادلات ناویر-استوکس میانگین رینولدز شهرت دارند، به دست می‌آید.

#### ج- مدل K-ε

این مدل روی عملکردهایی که بر روی انرژی جنبشی آشفته اثر می‌گذارند، متمرکز شده است. انرژی جنبشی لحظه‌ای جریان آشفته  $k(t)$  که عبارت است از مجموع انرژی جنبشی متوسط و همچنین نرخ استهلاك انرژی بر واحد جرم، در مطالعات دینامیک آشفته (ε) بسیار مهم می‌باشد.

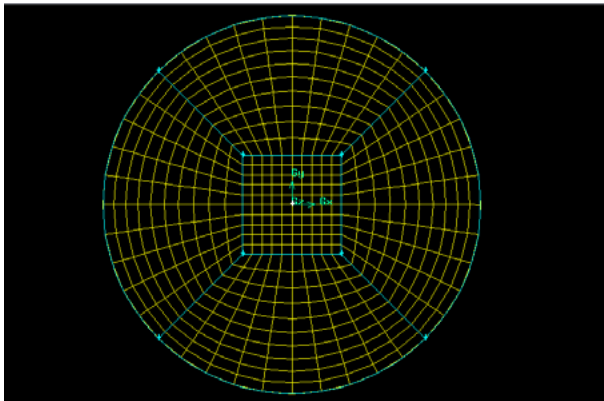
اینچ مطابق استاندارد ASME B 16.9 انتخاب شده است [۹,۱۴,۱۶]. شماتیک زانو با مشخصات مندرج در استاندارد ذکر گردیده است.

### ۲-۲- هندسه جریان

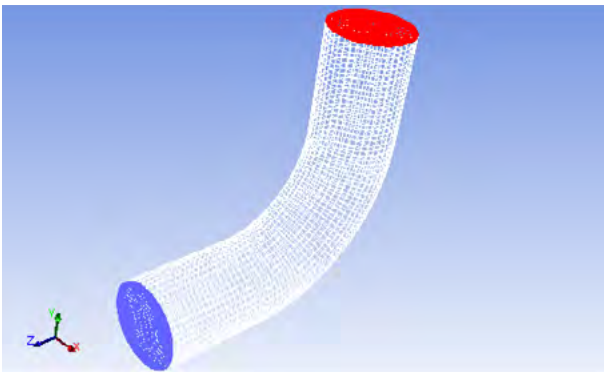
برای مدل سازی زانو که دارای جریان گاز طبیعی به همراه ذرات جامد می باشد، شماتیک زانوی نشان داده شده در شکل-۳ استفاده شده است. با توجه به شرایط استاندارد قطر این زانو ۶ اینچ در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل-۴ قابل مشاهده است، شبکه محاسباتی تولید شده برای صفحه ورودی، اندازه شبکه ای به نسبت کوچکتر دارد. به این ترتیب تغییرات در صفحه ورودی به خوبی مشاهده شده و از هزینه محاسباتی کاسته می شود. هندسه و شبکه محاسباتی با استفاده از نرم افزار گمبیت (Gambit) تولید شده است (جدول-۱). شکل-۵ نحوه شبکه محاسباتی تولید شده در نرم افزار فلوئنت را نمایش می دهد.

### ۲-۳- شرایط مرزی

شرط مرزی در صفحه ورودی سیال، سرعت ورودی است. صفحه ورودی سیال یک صفحه دایره ای به قطر ۶ اینچ است. مولفه های سرعت سیال در ورودی می تواند به صورت یک پروفیل ثابت و یا پروفیل متغیر



شکل ۴ | شبکه محاسباتی تولید شده برای تحلیل جریان در صفحه ورودی



شکل ۵ | شبکه محاسباتی تولید شده برای تحلیل جریان در زانو

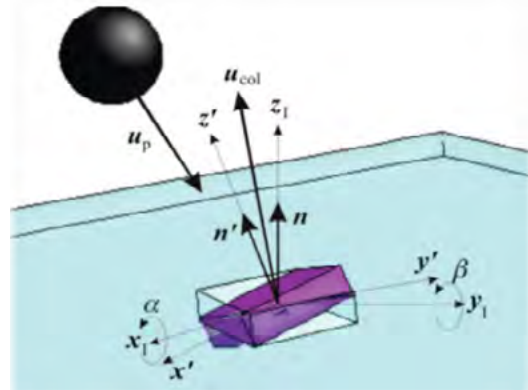
بوده و در طول تزریق، مومنتوم بالایی را حمل می کنند، چشم پوشی از تأثیر آن بر فاز پیوسته غیر قابل تصور است، لذا در تمام مدل سازی های سایش از روند حل دومسیره استفاده شده است. شکل-۲ شماتیک برخورد ذرات با دیواره را نشان می دهد.

### ۲-۲- حل مسئله (توسط نرم افزار فلوئنت)

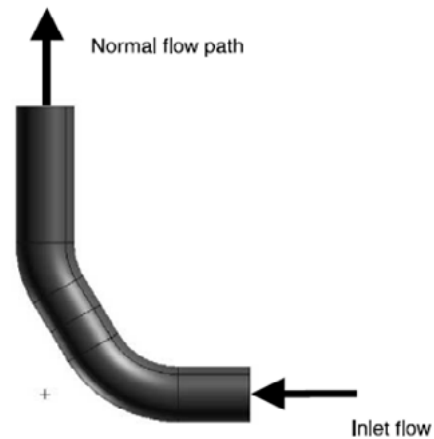
#### ۲-۱- مراحل حل

- ترسیم هندسه زانو توسط نرم افزار گمبیت
- بازخوانی هندسه ترسیم شده توسط نرم افزار فلوئنت
- انتخاب مدل های حل مناسب (فاز پیوسته = مدل استاندارد ویسکوزیته K-ε و فاز گسسته)
- انتخاب نوع سیال، جنس دیواره زانو و ذرات موجود در سیال
- مشخص کردن شرایط مرزی
- حل با مقدار اولیه
- حل مسئله

مسئله ای که با آن روبه رو هستیم مطالعه اثرات فشار بر سایش در زانوی ایستگاه های تقلیل فشار است. جهت بررسی، یک زانوی ۶



شکل ۲ | شماتیک برخورد ذرات با دیواره



شکل ۳ | شماتیک زانو بر حسب جریان ورودی و خروجی

فشار شود، اثر این افت فشار بر سایش در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲-۵- روش حل

برای حل مسئله از نرم افزار آنسیس فلونت ۱۴ (ANSYS FLUENT 14) استفاده شده است. نرم افزار فلونت معادلات انتگرالی را برای بقای جرم، مومنتوم و کمیت های دیگری مانند معادلات انرژی جنبشی (k) و نرخ استهلاک و انرژی آشفستگی (ε)، حل می کند. بدین منظور از روش حجم محدود استفاده می شود که شامل مراحل زیر است:

۱. تبدیل هندسه جریان به حجم های کنترلی گسسته شده توسط مش های محاسباتی که در نرم افزارهای تولید مش ایجاد می شوند.
۲. انتگرال گیری از معادلات اساسی در حجم های کنترل مجزا جهت تولید معادلات جبری از متغیرهای گسسته شده مثل سرعت و فشار.
۳. خطی کردن معادلات گسسته شده و حل دسته معادلات خطی شده برای به دست آوردن مقادیر متغیرها.

در فلونت روند تکرار حل به شکل زیر است:

۱. خواص سیال در ابتدای هر حل بروزرسانی می شوند. در اولین حل باید به معادلات، مقادیر اولیه داده شود.
۲. معادلات مومنتوم در سه جهت X،Y،Z با توجه به مقادیر قبلی فشار و شار جرمی حل و میدان سرعت بروزرسانی می شود.
۳. چون سرعت در مرحله دو ممکن است به صورت محلی در معادله پیوستگی صدق نکند، تصحیح فشار به صورت معادله خطی در معادله پیوستگی صورت می گیرد. این معادله تصحیح فشار حل می شود تا تصحیحات لازم برای میدان سرعت و فشار صورت گیرد.
۴. معادلات مربوط به آشفستگی به کمک اطلاعات به دست آمده در

توزیع شده بر روی سطح تعریف شود. در این تحقیق به دلیل تقارن، سرعت ها را به صورت پروفیل متغیر روی سطح دایره ای در نظر می گیریم. شرط مرزی سایر سطوح محفظه سایش، فشار خروجی در نظر گرفته شده است. مقدار این فشار، برابر با فشار اتمسفر فرض شده است. یعنی فشار نسبی در خروج برابر با صفر است.

## ۲-۴- شرایط طراحی و جمع آوری داده ها

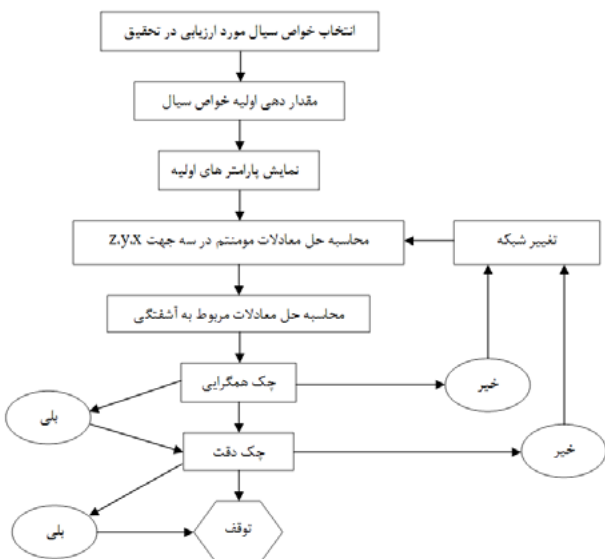
در شرایط طراحی استاندارد برای عبور گاز طبیعی از زانو به همراه ذرات به اندازه ۵ تا ۱۰ میکرون، دبی ذرات موجود در گاز  $0.1 \text{ kg/s}$  تا  $0.07 \text{ kg/s}$  (در فشار طراحی استاندارد  $250 \text{ psi}$ )، چگالی و ویسکوزیته گاز مطابق جدول ۲-۲ می باشد [۲،۱۱،۱۲] که جهت محاسبه دبی در حالت طراحی استاندارد برای فشار مذکور از رابطه های (۱)، (۴) و (۵) استفاده شده است و در ادامه از این روابط سرعت های متناسب با هر فشار استخراج می شود. با فرض اینکه زانوی مورد نظر در نقطه بالادستی یعنی قبل از رگولاتور یک ایستگاه TBS باشد، انتظار می رود در شرایط استاندارد در فشار کاری  $250 \text{ psi}$  کار کند ولی به هر دلیل دچار افت

۱ | مشخصات شبکه محاسباتی مورد استفاده

مقدار $\text{m}^3$	مشخصه شبکه
$3.019763 \times 10^{-7}$	حجم بزرگترین المان
$1.066915 \times 10^{-7}$	حجم کوچکترین المان
$1.707305 \times 10^{-6}$	سطح بزرگترین وجه
$9.6573115 \times 10^{-6}$	سطح کوچکترین وجه
$1.387785 \times 10^{-2}$	حجم کل

۲ | شرایط خواص سیال تزریق شده

مقدار	خاصیت
$0.668 \text{ Kg/m}^3$	چگالی گاز طبیعی
$1.087 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$	ویسکوزیته گاز طبیعی
$12 \text{ m/s}$	سرعت در حالت استاندارد طراحی
$250 \text{ psi}$	فشار در حالت استاندارد طراحی
$519/69 \text{ R}^\circ$	دما در حالت استاندارد طراحی

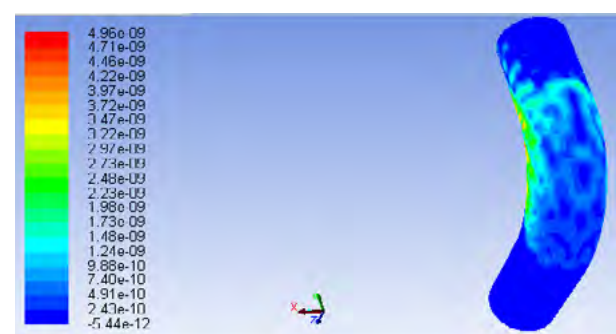


۶ | فلوچارت مورد استفاده در فلونت





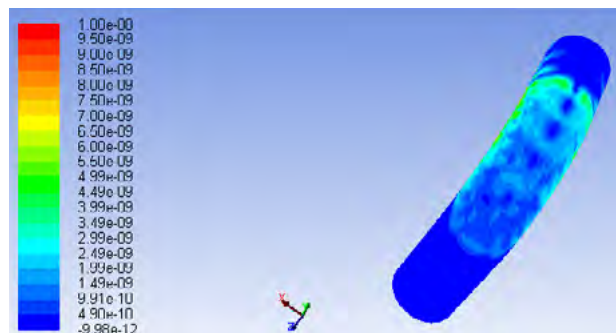
شکل ۷ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار طراحی ۲۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۸ | کانتور سایش در فشار طراحی ۲۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۹ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار ۲۰۰۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۱۰ | کانتور سایش در فشار ۲۰۰۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)

حل مرحله قبل پروزرسانی و حل می شود.

۵. شرط همگرایی چک می شود.

معادلات اساسی غیرخطی برای تولید دستگاه معادلات متغیرهای وابسته باید خطی شوند. سپس دستگاه معادلات برای تصحیح میدان سرعت و فشار به روش تکرار حل می شود. شکل ۶-فلوچارت مورد استفاده در فلوئنت را نمایش می دهد.

### ۲-۶- تنظیمات نرم افزار

برای حل مسئله این تنظیمات را در نرم افزار فلوئنت انجام می دهیم: ابتدا فایل مش را بازخوانی کرده و سپس شروع به تعریف مسئله می کنیم. مسئله به صورت پایا تعریف و حل می شود. در قسمت ویسکوز مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و سپس نوع استاندارد فعال می شود. در قسمت فاز مجزا گزینه برهم کنش با فاز پیوسته را فعال می کنیم. سپس در قسمت مدل های فیزیکی گزینه سایش و در تنظیم خصوصیات تزریق، محل موثر ذرات را بر پیوسته فعال می کنیم. در قسمت تعریف سایش، نوع سایش را بر پیوسته و نقطه ورودی را انتخاب می کنیم. برای مدل سایش از مدل فاینی استفاده شده است [۳،۴،۱۵،۱۷،۱۸،۱۹].

در قسمت مواد از پایگاه داده های نرم افزار، مواد ذرات جامد و گاز طبیعی بین دیواره را فراخوانی می کنیم و به عنوان مرجع شرایط کاری قرار می دهیم. از گرانش نیز صرف نظر می کنیم. در قسمت شرایط مرزی، در ورود مولفه های سرعت ورودی سیال را وارد می کنیم در قسمت شرط مرز خروجی، گزینه جریان خروجی را انتخاب می کنیم. برای دیوارهای زانو از گزینه مدل فاز گسسته، مدل سایش و ثابت های متناسب بازایه برخورد ذرات انتخاب می شود.

### ۳- نتایج

در این بخش سعی شده است در ابتدا نتایج حاصل از حل عددی جریان دو فاز متناسب با افت فشار و در دو جریان متفاوت (جریان دارای ذرات به اندازه ۵ میکرون، دبی ذرات موجود در گاز ۰/۰۱ kg/s و ۱۰ میکرون، دبی ذرات موجود در گاز ۰/۰۰۷ kg/s) بررسی شود.

در مرحله اول، سایش در زانوی دارای شرایط استاندارد طراحی که دارای فشار ۲۵۰ psi، سرعت ۱۲ m/s و دبی طراحی مشخص می باشد (در دمای استاندارد) جهت نقطه مرجع برای مقایسه سایش های رخ داده در فشارهای متفاوت تولید می شود.

در مرحله بعدی، سایش در شرایط استاندارد طراحی برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون به عنوان نقطه مرجع آورده شده است. با توجه به ذرات به اندازه ۱۰ میکرون نرخ و محل وقوع سایش متناسب با هر فشار مقایسه شده است.

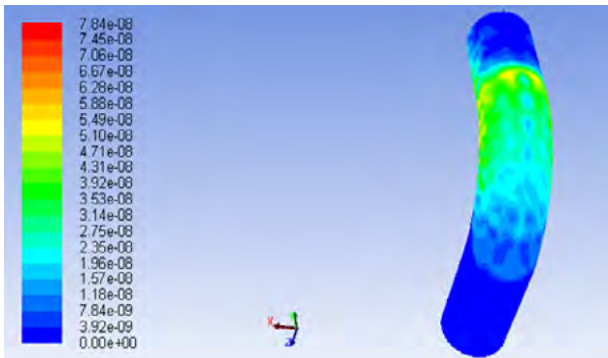
### ۳-۱- اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی

همانطور که در شکل ۲۳- مشاهده می گردد، محل وقوع بیشترین سایش در خم (محل تغییر جریان) زانو می باشد و برای زانو با جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون و حداقل فشار ۵۰ psi دقیقاً محل وقوع سایش

منطبق با شکل ۲۲- نتیجه حاصل از شبیه سازی (کانتور سایش در فشار ۵۰ psi برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون) می باشد که این موضوع نشان دهنده صحت نتیجه به دست آمده از شبیه سازی است. جدول ۵- شرایط عملیاتی یک زانو را در ایستگاه تقلیل فشار گاز نشان می دهد.

### نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که با افت فشار و افزایش اندازه ذرات، نرخ سایش افزایش پیدا می کند و محل وقوع بیشترین سایش از کنار زانو (دیواره) به محل خم و تغییر مسیر جریان توسعه می یابد.



شکل ۱۴ | کانتور سایش در فشار ۱۰۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۱۵ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار ۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



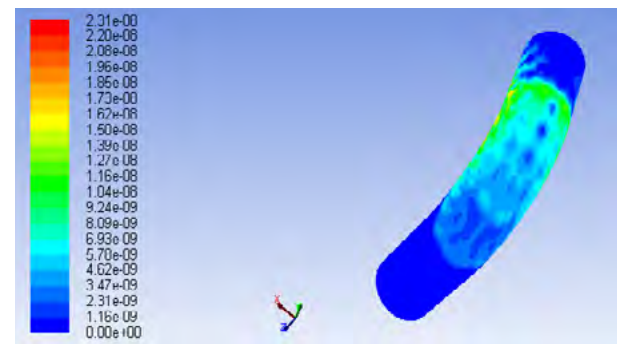
شکل ۱۶ | کانتور سایش در فشار ۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۱۷ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار طراحی ۲۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)



شکل ۱۱ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار ۱۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



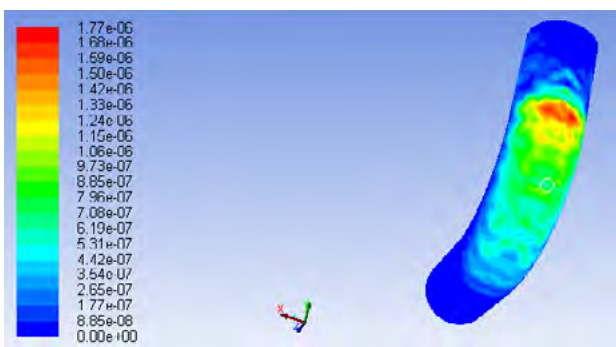
شکل ۱۲ | کانتور سایش در فشار ۱۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۱۳ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار ۱۰۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۵ میکرون)



شکل ۲۱ | کانتور سایش در فشار طراحی ۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)



شکل ۲۲ | کانتور سایش در فشار ۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)

شکل ۲۳ | نرخ و محل وقوع سایش متناسب با هر فشار در جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون

فشار (psi)	نرخ سایش (kg/m <sup>2</sup> .s)		محل وقوع بیشترین سایش شکل
	بیشترین	کمترین	
۲۵۰ - طراحی	$4/82 \times 10^{-9}$	$-1/64 \times 10^{-12}$	۱۸ و ۱۷
۱۵۰	$2/31 \times 10^{-8}$	$-3/10 \times 10^{-11}$	۲۰ و ۱۹
۵۰	$1/59 \times 10^{-6}$	$8/85 \times 10^{-8}$	۲۲ و ۲۱

شکل ۲۴ | نرخ و محل وقوع سایش متناسب با هر فشار در جریان دارای ذرات ۵ میکرون

فشار (psi)	نرخ سایش (kg/m <sup>2</sup> .s)		محل وقوع بیشترین سایش شکل
	بیشترین	کمترین	
۲۵۰ - طراحی	$4/96 \times 10^{-9}$	$-5/44 \times 10^{-12}$	۸ و ۷
۲۰۰	$1/00 \times 10^{-8}$	$-9/98 \times 10^{-12}$	۱۰ و ۹
۱۵۰	$2/31 \times 10^{-8}$	$1/16 \times 10^{-9}$	۱۲ و ۱۱
۱۰۰	$7/84 \times 10^{-8}$	$3/92 \times 10^{-9}$	۱۴ و ۱۳
۵۰	$6/42 \times 10^{-7}$	$3/21 \times 10^{-8}$	۱۶ و ۱۵



شکل ۲۵ | کانتور سایش در فشار طراحی ۲۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)



شکل ۲۶ | نمای جانبی از کانتور سایش در فشار ۱۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)

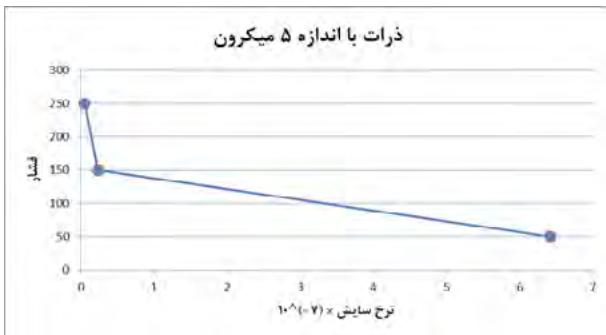
شکل ۲۷ | شرایط عملیاتی یک زانو در ایستگاه تقلیل فشار گاز

مشخصات زانو	مشخصات سیال
زانوی ۶ اینچی با زاویه ۹۰ درجه	گاز طبیعی با ذرات ۱۰ میکرون
حد اقل فشار	۵۰ psi
مدت زمان قرائت فشار	۳ ماه
دمای ثبت شده	۴ الی ۲۷ سانتی گراد

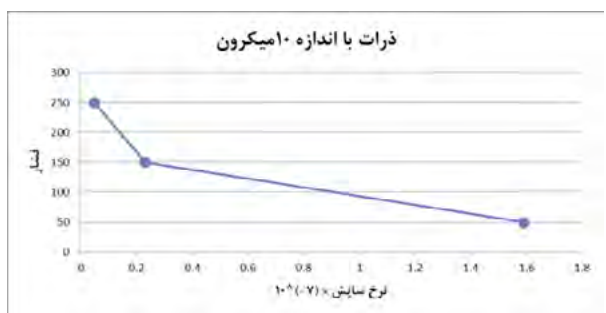


شکل ۲۸ | کانتور سایش در فشار ۱۵۰ psi (برای جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون)





رابطه نرخ ساییش با افت فشار برای ذرات به اندازه ۵ میکرون | شکل ۲۴



رابطه نرخ ساییش با افت فشار برای ذرات به اندازه ۱۰ میکرون | شکل ۲۵



در مقایسه با جریانی که افت فشار گاز در آن مشاهده می شود که حامل ذرات جامد بزرگتری می باشد، نرخ ساییش بیشتر از جریان با افت فشار حامل ذرات با اندازه کوچک تر است. شکل-۲۴ ساییش متناسب با هر فشار در جریان دارای ذرات ۵ میکرون و شکل-۲۵ ساییش متناسب با هر فشار در جریان دارای ذرات ۱۰ میکرون را نشان می دهد.

در نتیجه، افت فشار باعث افزایش نرخ ساییش می شود و اگر اندازه ذرات موجود در جریان تغییر کند به همان میزان نرخ ساییش تغییر کرده، محل وقوع بیشترین ساییش از کنار زانو (دیواره) به محل خم و تغییر مسیر جریان توسعه می یابد. پس می توان از افت فشار و تغییر اندازه ذرات موجود در جریان به عنوان فاکتورهای موثر بر نرخ ساییش نام برد.

محل وقوع ساییش در زانو ۹۰ درجه برای جریان گاز طبیعی با فشار حداقل ۵۰ psi با ذرات ۱۰ میکرون



نمونه واقعه‌ای از ساییش در زانو یکی از ایستگاه‌های تقلیل فشار در صنعت گاز | شکل ۲۳



## منابع

- [1] مکانیک سیالات، محمد صادق معیری، انتشارات دانشگاه شیراز، چاپ سوم، ۱۳۸۷
- [2] دکتر داریوش مولا، روش بهینه سیستم فیلتراسیون گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز. ملی گاز. ۱۳۸۵
- [3] Meng, H. C.; Ludema, K. C. Wear models and predictive equations (1995).
- [4] Finnie, I. Erosion of surfaces by solid particles, (1960), pp. 87-103.
- [5] Brown. Erosion prediction in slurry pipeline tee-junctions, (2002), pp. 155-170.
- [6] Hao Zhang, Yuanqiang Tan Dongmin Yang, Francesc Trias Shengqiang Jiang, Yong Sheng c, Assensi Oliva b. Numerical investigation of the location of maximum erosive wear damage in elbow: Effect of slurry velocity, bend orientation and angle of elbow, (2012), pp. 467-476.
- [7] Samy M. El-Behery, Mofreh H. Hamed, M. A. El-Kadi and K. A. Ibrahim. Numerical simulation and CFD-Based Correlation of Erosion Threshold Gas Velocity in Pipe Bends// Wear. 1, (2010)
- [8] Héctor Alfredo López Aguilar. Erosion case study by Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling and optimization in situ of clinker sampler probe design ISBN : 978-1-61804-246-0
- [9] ASME B. 16.9
- [10] Mr N A Barton Erosion in elbows in hydrocarbon production systems (2003)
- [11] Iran Gas Standard (IGS)
- [12] Perry, R.H, "Perry's Chemical Engineers handbook(1984)
- [13] TŪ V NEL Limited, Erosion in elbows in hydrocarbon production systems: Review document, Research Report 115 for the Health and Safety Executive 2003.
- [14] API, "API RP 14E Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems", American Petroleum Institute, 5th Edition, Washington, DC, 1991.
- [15] Bourgoyne, A.T., Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production Proc. SPE/ IADC Drilling Conf., New Orleans, Louisiana, Feb., 1989, pp 807-816.
- [16] Salama, M. M., An alternative to API 14E erosional velocity limits for sand-laden fluids, Trans. of ASME, J. of Energy Resources Tech., Vol. 122, 2000, pp. 71-77.
- [17] Shirazi, Shedley, J.R., McLaury, and Rybicki, A procedure to predict solid particle erosion in elbows and tees, Trans of ASME, J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 117, 1995, pp. 45-52.
- [18] Wang, J. And Shirazi, S.A., A CFD based correlation for erosion factor for long-radius elbows and bends, Trans. of ASME, J. of Energy Resources Tech., Vol. 125, 2003, pp. 26-34.
- [19] McLaury, B.S., Shirazi, S.A., Shadley, J.R., and Rybicki, E.F., How operating and environmental conditions affect erosion, NACE Int. Annual Conf., Corrosion99, San Antonio, TX, USA, April 25-30, 1999, Paper No. 34.