

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

مدلسازی عددی و اعتبارسنجی فرسایش ناشی از ذرات جامد در زانویی
۹۰ درجه

نگارنده:

محمود اعوری دوغائی

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

بهمن ۱۳۹۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : مهندسی آب

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمود اعوری دوغائی

تحت عنوان :

مدلسازی عددی و اعتبارسنجی فرسایش ناشی از ذرات جامد در زانویی

۹۰ درجه

در تاریخ.....توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با

درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور :	امضاء	اساتید راهنما :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر رامین امینی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی:	امضاء	اساتید داور :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تهدیه نامه

اینجانب محمود اعوری دوغائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی عددی و اعتبارسنجی فرسایش ناشی از ذرات جامد در زانویی ۹۰ درجه، تحت راهنمایی دکتر رامین امینی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

یکی از مشکلات عمده در صنعت آب، نفت و گاز، تولید ذرات جامد شن و ماسه به همراه فرآیند استخراج می باشد. میزان ذرات جامد تولید شده در فرایند استخراج می تواند باعث مشکلات عمده ای از جمله فرسایش، انسداد لوله، مشکلات زیست محیطی شود. فرآیند ناشی از فرسایش یک روند مکانیکی می باشد که طی آن مواد سطح لوله در اثر برخورد ذرات جامد دچار فرسایش می شوند. پارامترهای مختلفی بر پدیده فرسایش تاثیر گذار هستند که به طور خلاصه می توان به اندازه ذرات، سرعت ذرات، شکل ذرات جامد، آشفتگی جریان و سایر موارد اشاره کرد.

در پژوهش حال حاضر یک روش جامع جهت پیش بینی فرسایش ناشی از ذرات جامد مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی در یک هندسه زانویی تیز ۹۰ درجه انجام شده است. در ابتدا جهت اعتبار سنجی کار عددی حاضر، شبیه سازی فرسایش برای یک شبکه پایدار انجام شده است، و در نهایت یک مدل آشفتگی مناسب جهت شبیه سازی فرسایش معرفی می شود.

در ادامه یک مطالعه جامع در ارتباط با شبکه مورد استفاده در هندسه جهت پیش بینی فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز ماسه انجام شده است. در این فرایند مشخص می شود فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز می تواند تحت تاثیر آرایش شبکه باشد. در نهایت این پژوهش یک استراتژی شبکه بندی را پیشنهاد می کند که قابلیت بهینه کردن مدلسازی فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز با توجه به کدهای عددی رایج را دارد.

نتایج بدست آمده نشان می دهد که مدل های آشفتگی مختلف می توانند نتایج متفاوتی را برای فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز و جریان های چند فازی پیش بینی کنند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده می توان اینگونه بیان کرد، با توجه به محدودیت کدهای عددی، در شرایطی که تغییرات میدان جریان مستقل از شبکه شده است، نتایج شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد می تواند به

تحت تاثیر اصلاح شبکه در بخش های مختلف هندسه زانویی باشد. در حالت کلی می توان گفت که به دلیل محدودیت کدهای عددی رایج، شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز کوچکتر از ۵۰ میکرومتر با محدودیت شبیه سازی عددی مواجه است.

واژگان کلیدی : دینامیک سیالات محاسباتی، جریان دو فاز سیال و ذره، نسبت فرسایش

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- راه های جلوگیری از فرسایش:.....	۲
۳-۱- اهمیت کار حاضر	۳
فصل دوم : مروری بر مفاهیم اصلی و کارهای پیشین.....	۵
۱-۲- مقدمه	۶
۲-۲- مکانیزم فرسایش ذرات جامد.....	۶
۱-۲-۲- فرسایش در مواد ترد	۶
۲-۲-۲- فرسایش در مواد انعطاف پذیر	۸
۳-۲- فاکتورهای موثر بر پدیده فرسایش.....	۹
۱-۳-۲- سرعت برخورد ذرات جامد.....	۹
۲-۳-۲- زاویه برخورد ذرات جامد	۱۰
۳-۳-۲- خصوصیات ذرات جامد	۱۲
۴-۳-۲- خصوصیات مواد سطح	۱۳
۵-۳-۲- خصوصیات سیال حامل	۱۴
۴-۲- مدلسازی فرسایش.....	۱۴
۱-۴-۲- مدل های تئوری	۱۵
۲-۴-۲- مدل های تجربی فرسایش	۱۸
۳-۴-۲- مدل های مکانیکی برای پیش بینی فرسایش در جریان تک فاز	۲۱
۴-۴-۲- مکانیزم پیش بینی فرسایش در جریان های چند فاز.....	۲۷

۳۱	۵-۲- مدل تجربی و مدل فرسایش بیکر هیوز
۳۳	فصل سوم :معادلات حاکم.....
۳۴	۳-۱-مقدمه
۳۵	۳-۲-مدلسازی جریان سیال.....
۳۵	۳-۲-۱-معادلات پیوستگی و ناویر استوکس
۳۶	۳-۲-۲- مدلسازی آشفتهگی.....
۳۹	۳-۲-۳- توابع دیواره
۴۲	۳-۳-مدلسازی فاز پراکنده.....
۴۵	۳-۴- مدلسازی فرسایش
۴۷	فصل چهارم : نتایج.....
۴۸	۴-۱مقدمه:
۴۸	۴-۲-خلاصه ای از نرم افزار انسیس فلوئنت
۴۸	۴-۳-تعریف مسئله:
۵۲	۴-۴-تعیین شرایط مرزی.....
۵۳	۴-۵-شبکه بندی :
۵۴	۴-۶-استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی.....
۵۶	۴-۷-صحت سنجی نتایج شبیه سازی عددی.....
۵۷	۴-۸-بررسی نتایج شبیه سازی عددی
۵۷	۴-۸-۱-بررسی مدل های آشفتهگی جهت پیش بینی فرسایش
۶۱	۴-۸-۲-مطالعه پالایش شبکه.....
۶۱	۴-۸-۲-۱-بررسی تاثیر اندازه شبکه در جهت طولی در نرخ فرسایش
۶۳	۴-۸-۲-۲-بررسی تاثیر ضخامت لایه مرزی در نرخ فرسایش.....

۴-۸-۳-بررسی اصلاح شبکه در مقطع عرضی در نرخ فرسایش۶۶

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....۷۱

۵-۱- نتیجه گیری۷۲

۵-۲-پیشنهادهات.....۷۳

مراجع.....۷۴

فهرست شکل ها:

- شکل ۲-۱: نمایشی از میدان تنش و جهت ترک ها تحت برخورد ذرات جامد به سطح [۴] ۷
- شکل ۲-۲: ترک های شعاعی و طولی ایجاد شده بر روی سطح در اثر برخورد ذرات جامد شیشه ای [۵] ۸
- شکل ۲-۳: مکانیزم فرسایش در مواد انعطاف پذیر [30] ۹
- شکل ۲-۴: نرخ فرسایش بی بعد شده برای سرعت ۱۰۰ و ۱۳۰ متر بر ثانیه برای ۵ نوع مواد سطح [۱۴] ۱۱
- شکل ۲-۵: نسبت فرسایش بر حسب اندازه ذرات و سرعت ذرات جامد [۲۰] ۱۳
- شکل ۲-۶: ناحیه سکون در هندسه برخورد مستقیم ۲۲
- شکل ۲-۷: ناحیه سکون در سه راهی و زانویی ۲۳
- شکل ۲-۸: جریان حبابی ۲۹
- شکل ۲-۹: جریان حلقه ای ۳۰
- شکل ۲-۱۰: جریان حلزونی ۳۰
- شکل ۲-۱۱: جریان لخته ای ۳۱
- شکل ۳-۱: انواع مدل های آشفته در فلوئنت ۳۷
- شکل ۳-۲: لایه های مجاور دیواره در یک جریان آشفته ۴۰
- شکل ۳-۳: لایه مرزی تعیین شده توسط تابع دیواره ۴۱
- شکل ۴-۱: هندسه زانویی ۹۰ درجه مورد استفاده در شبیه سازی عددی ۴۹
- شکل ۴-۲: آرایش شبکه در قسمت زانویی ۵۴
- شکل ۴-۳: آرایش شبکه در مقطع عرضی ۵۴
- شکل ۴-۴: تعداد ذرات جامد مورد استفاده جهت شبیه سازی ۵۶
- شکل ۴-۵: تصویری شماتیک از نمونه تحت آزمایش [38] ۵۷
- شکل ۴-۷: مدل کا-ا پسیلون اصلاح شده جهت پیش بینی فرسایش ۵۹
- شکل ۴-۸: خطوط جریان سیال ۶۰
- شکل ۴-۹: خطوط مسیر ذرات جامد ۶۰
- شکل ۴-۱۰: کانتورهای فرسایش ۶۱
- شکل ۴-۱۱: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه به اصلاح شبکه در جهت طولی لوله ۶۳
- شکل ۴-۱۲: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه به اصلاح شبکه در لایه مرزی ۶۵
- شکل ۴-۱۳: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه به اصلاح شبکه در مقطع عرضی لوله ۶۸

فهرست جدول ها

جدول ۱-۲: مروری بر تحقیقات پیشین.....	۲۵
جدول ۱-۴: ضرایب شیمیایی فلز مورد آزمایش.....	۵۱
جدول ۲-۴: مقادیر ثابت A_i [1].....	۵۲
جدول ۳-۴: استقلال حل عددی از شبکه با استفاده از سرعت ذرات جامد.....	۵۳
جدول ۴-۴: مقایسه خطای نتایج بدست آمده و نتایج [44] برحسب درصد.....	۵۶
جدول ۴-۴: جزئیات اصلاح مش در جهت طولی لوله.....	۶۲
جدول ۵-۴: جزئیات اصلاح مش در لایه مرزی.....	۶۴
جدول ۶-۴: جزئیات اصلاح شبکه در مقطع عرضی لوله.....	۶۶

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

فرسایش به صورت آسیب سطوح ناشی از برخورد ذرات جامد تعریف می شود و در قالب یک پدیده مکانیکی توصیف می شود و یک مشکل بزرگ در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز می باشد. تولید ذرات جامد به همراه فرایند استخراج سیال در صنایع نفت و گاز دلیل اصلی فرسایش می باشد. لذا پیش بینی محل و مقدار فرسایش ناشی از ذرات جامد در طراحی خطوط انتقال سیالات استخراج شده اهمیت فراوانی دارد. در همین راستا شبیه سازی عددی فرسایش یک ابزار نسبتاً جدید در جهت ساخت تجهیزات مختلف مهندسی عنوان شده است. مشاهده شده که عوامل مختلفی در تعیین میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد تاثیرگذار می باشند که از آن جمله می توان به هندسه مورد نظر جهت شبیه سازی، جنس مواد هدف، اندازه ذرات جامد، شکل ذرات، سرعت سیال و موارد دیگری اشاره کرد. در این پژوهش یک جریان دوفازی شامل سیال آب و ذرات جامد در یک زانویی ۹۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به آنکه مفاهیم اصلی و مطالعه کارهای پیشین در این تحقیق بسیار به هم وابسته بوده اند، در هر جایی که مفاهیم اصلی توضیح داده شده اند، مراجع وابسته به آن هم ذکر شده اند و در نتیجه قسمت مجزائی تحت عنوان مطالعات کارهای پیشین در این فصل دیده نمیشود.

۱-۲- راه های جلوگیری از فرسایش:

روش های مختلفی برای جلوگیری از تولید ذرات جامد در فرایند استخراج نفت و گاز وجود دارد که از این موارد می توان به استفاده از صافی برای جداسازی ذرات جامد از سیال تولید شده اشاره کرد. مشکل عمده ای که صافی ها دارند این است که نمی توانند مانع از عبور ذرات جامد ریزتر از ۵۰ میکرومتر شوند. ذرات جامدی که از صافی ها عبور می کنند در گردابه های ایجاد شده ناشی از آشفتگی جریان در مسیر لوله به دام افتاده و با برخوردهای متوالی به دیواره باعث افزایش فرسایش می شوند. یکی دیگر از

مشکلات عمده صافی ها افزایش سایز سوراخ های دهانه ورودی صافی و در نتیجه افزایش سرعت جریان سیال تولیدی و در نهایت افزایش فرسایش را در پی خواهد داشت.

روش های مختلفی برای کاهش میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به کاهش سرعت استخراج اشاره کرد که این روش از نقطه نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. یکی دیگر از مواردی که می تواند باعث افزایش خطر فرسایش شود پدیده انبساط و انقباض ناگهانی در خطوط انتقال است. در ارتباط با مورد ذکر شده جهت کاهش میزان فرسایش بایستی از انبساط و انقباض های ناگهانی در خطوط لوله تا جایی که امکان دارد خوداری کرد.

۱-۳- اهمیت کار حاضر

در پژوهش حال حاضر یک جریان دوفازی آب و ذرات جامد ماسه با قطر ۲۵,۴ میکرومتر از داخل یک لوله زانویی ۹۰ درجه تیز که دارای ابعاد مشخصی است عبور داده می شود. هندسه مورد مطالعه با توجه به هندسه هایی انتخاب شده که به صورت معمول در صنایع نفت و گاز و صنایع دیگر استفاده می شوند. در این کار پژوهشی جهت مدلسازی فرسایش از مدل فرسایش ژانک و همکاران [۱] استفاده می شود. در این مدل خصوصیات مختلفی از جمله قطر ذرات، شکل ذرات، سختی مواد هدف و موارد دیگری در نظر گرفته شده است. جهت استفاده از این مدل فرسایش از قابلیت مدل عمومی فرسایش در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. هدف نهایی این کار پژوهشی اصلاح شبکه مورد استفاده در هندسه مورد مطالعه و تاثیر آن بر میزان فرسایش می باشد.

فصل دوم: مروری بر مفاهیم اصلی و کارهای پیشین

۲-۱-مقدمه

آسیب ناشی از فرسایش تقریباً در تمامی صنایع که دارای جریان های چند فازی سیال-ذرات جامد هستند رخ می دهد. ذرات جامد ریز معمولاً از مسیر حرکت سیال حامل طبیعت کرده و با برخورد به سطح دیوار باعث آسیب دیواره می شوند. پدیده فرسایش می تواند باعث ایجاد محدودیت در کارایی تجهیزات انتقال در صنایع و در موارد شدید حتی می تواند باعث تخریب و نابودی ابزارالات و تجهیزات شود. از این رو پدیده فرسایش از دیدگاه های مختلف مانند شبیه سازی های عددی و آزمایشگاهی مورد بحث قرار گرفته است. هدف از این فصل یک جمع بندی کلی از کلیه کارهای انجام شده بر روی پدیده فرسایش ناشی از ذرات جامد می باشد تا بتوانیم درک کاملی از بحث فرسایش ناشی از ذرات جامد را داشته باشیم.

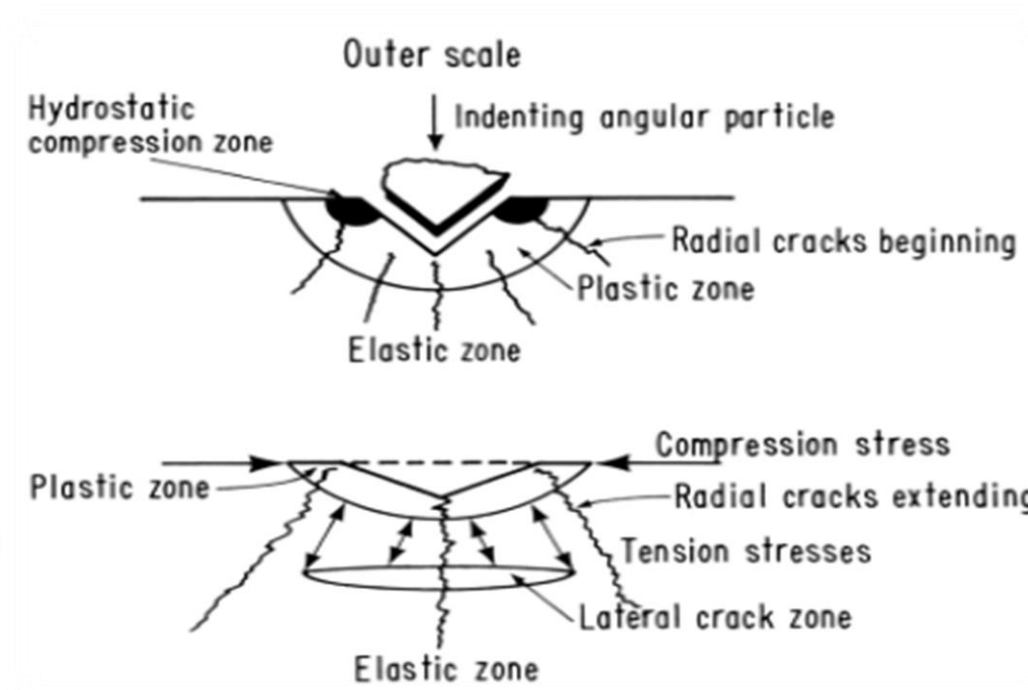
۲-۲- مکانیزم فرسایش ذرات جامد

سرینواسن و اسکترگود[۲] نشان دادند، هنگامی که یک ذره جامد به سطح برخورد می کند مکانیزم فرسایش با توجه به ترد بودن یا انعطاف پذیر بودن مواد سطح متفاوت است. به همین علت سازوکار فرسایش در مواد ترد و نرم متفاوت است به همین دلیل تحقیقات کاملی در مورد اثرات ترد بودن یا انعطاف پذیر بودن مواد هدف در میزان فرسایش انجام شده که در یک جمع بندی در زیر ارائه می شود.

۲-۲-۱- فرسایش در مواد ترد

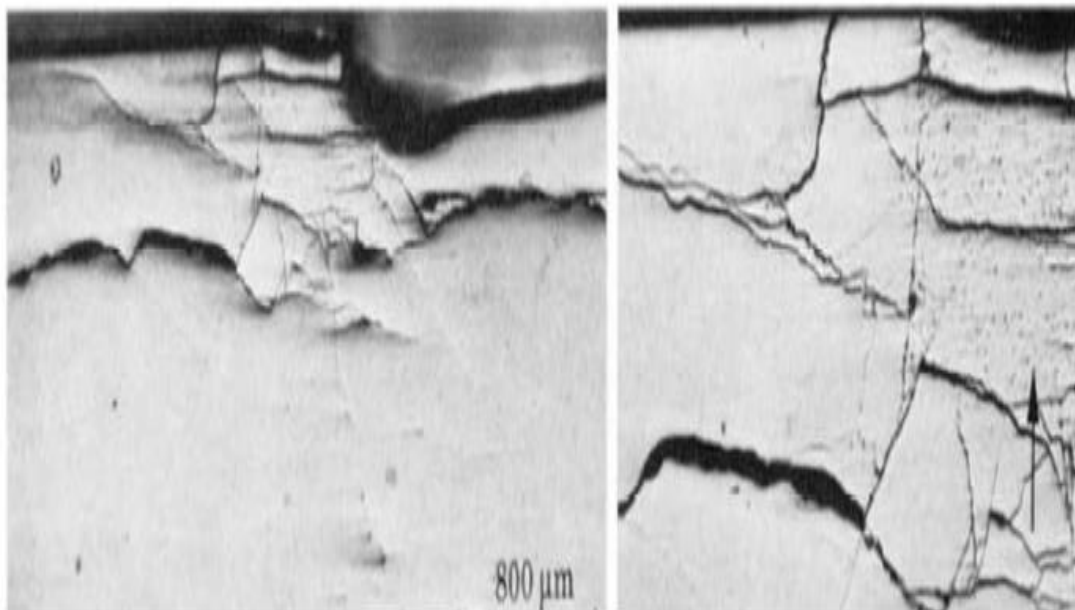
فرسایش در سطوحی که خصوصیت ترد بودن را دارند به صورت به وجود آمدن ترک رخ می دهد. و این ترک ها در ادامه روند برخورد ذرات جامد رشد می کنند و در نهایت زمانی که بار ضربه ها از سختی مواد هدف بیشتر شود شکست پلاستیک رخ خواهد داد. این پدیده توسط لوی[۳] با جزئیات به نمایش درآمده و در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که چطور میدان تنش می تواند به

داخل قسمت ترک خورده نفوذ کند.



شکل ۲-۱: نمایشی از میدان تنش و جهت ترک ها تحت برخورد ذرات جامد به سطح [۴]

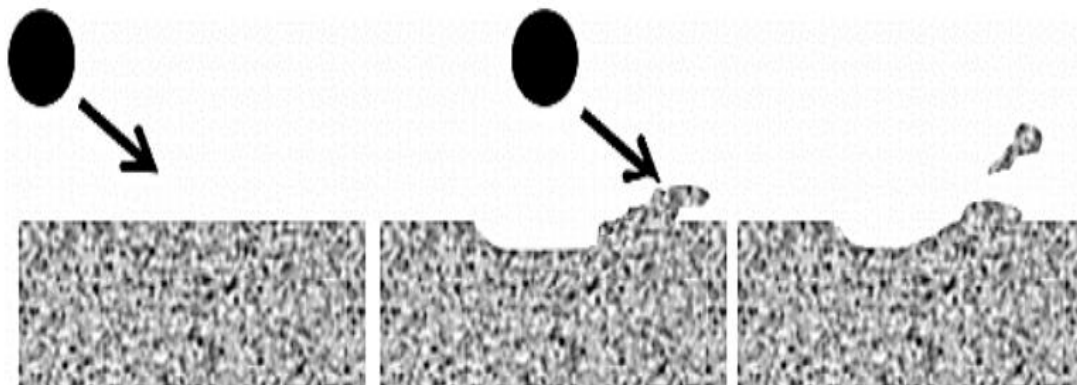
ایوان گالدن و روزنبالت [۴] پژوهشی را در زمینه آسیب برخورد ذرات جامد در مواد ترد ارائه داده اند با توجه به این پژوهش در مواد ترد بعد از برخورد ذرات جامد به سطح و منعکس شدن آنها یک سری ترک های سطحی در اطراف ناحیه برخورد ایجاد می شود که این ترک های سطحی در برخوردهای دیگر از بین می روند. مناطق ترک خورده تحت تاثیر ذرات شیشه ای در شکل ۲-۲ نمایش داده شده اند.



شکل ۲-۲: ترک های شعاعی و طولی ایجاد شده بر روی سطح در اثر برخورد ذرات جامد شیشه ای [۵]

۲-۲-۲- فرسایش در مواد انعطاف پذیر

یک مدل پیش بینی فرسایش توسط فینی [۵] ارائه شده است. مدل ارائه شده بیانگر این است که مکانیزم فرسایش در مواد انعطاف پذیر یک فرایند برش ریز است. در این مکانیزم مواد با برخورد به سطح گودال هایی ایجاد می کنند و سپس با برخوردهای مجدد مواد از سطح جدا می شوند. یک مکانیزم فرسایش دو مرحله ای توسط تایللی [۶] ارائه شده است. در این مدل در مرحله اول گودال هایی بر روی سطح ایجاد می شود و اطراف سطح شیارهایی به وجود می آید و در مرحله دوم شیارهای ایجاد شده که به صورت دندانچه هستند طی برخوردهای متوالی از سطح جدا می شوند.



شکل ۲-۳: مکانیزم فرسایش در مواد انعطاف پذیر [۳۰]

۲-۳- فاکتورهای موثر بر پدیده فرسایش

بیش از ۱۰۰ مدل مختلف فرسایش در گذشته توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. براساس مطالعات انجام شده شش فاکتور مهم در مطالعه فرسایش می توان نام برد. ۱-سرعت ذرات جامد ۲-زاویه برخورد ذرات جامد با سطح ۳-چگالی ذرات جامد ۴-شکل ذرات جامد ۵-اندازه ذرات جامد ۶-جنس مواد سطحی که تحت سایش قرار می گیرد. به همین دلیل پیش بینی فرسایش دشوار است. در ادامه توضیحاتی در مورد فاکتورهای موثر در میزان فرسایش ارائه می شود.

۲-۳-۱-سرعت برخورد ذرات جامد

تقریباً تمامی محققان در مطالعات خود موافق این موضوع بوده اند که سرعت ذرات جامد پارامتر بسیار مهمی در پیش بینی فرسایش می باشد. آنها به این نتیجه رسیدند که فرسایش می تواند به نسبتی از سرعت ذرات جامد بیان شود.

$$ER = V_p^n \quad (1-2)$$

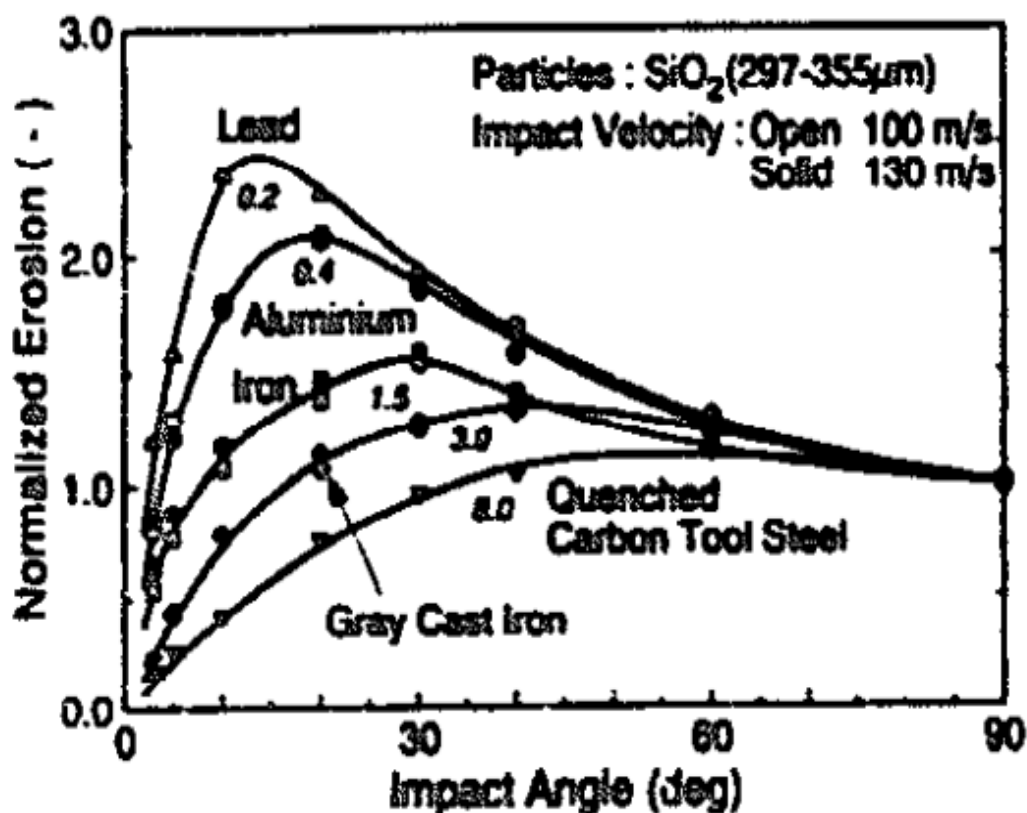
ER نسبت جرم مواد جدا شده از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح (kg/kg)

V_p^n سرعت ذرات جامد (m/s)

مقادیر مختلفی توسط محققان برای مقدار n پیشنهاد شده است. فینی [۷] مدلی ارائه کرد که در آن انرژی جنبشی ذرات تعیین کننده سرعت ذرات جامد جهت تعیین نرخ فرسایش بود، او مقدار $n=2$ در نظر گرفت. اسمالتز [۸] و بارنت [۹] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مقدار n را از ۰,۳ تا ۴,۵ متغیر دانستند. لیتون [۱۰] تاثیرات آیرودینامیکی را در میزان فرسایش مورد مطالعه قرار داد و او به این نتیجه رسید که تغییرات در سرعت سیال حامل می تواند در میزان فرسایش موثر باشد به همین علت جهت دستیابی به نتایج بهتر میزان n را بیشتر از ۴ پیشنهاد کرد. ذکر این نکته قابل توجه است که در اکثر کارهای تجربی سرعت ذرات جامد برابر سرعت سیال حامل فرض می شود. اوکا و همکاران [۱۱] به این نتیجه رسیدند که مقدار n تابعی از سختی مواد هدف می باشد و نمی توان آن را به عنوان یک عدد ثابت در نظر گرفت. با توجه به مطالب عنوان شده در این بخش در یک جمع بندی اکثر پژوهشگران به این نتیجه رسید که به جهت دستیابی به نتایج آزمایشگاهی مناسب می توان میزان n را بین دو مقدار ۲ تا ۳ در نظر گرفت.

۲-۳-۲- زاویه برخورد ذرات جامد

زاویه برخورد ذرات جامد به دیوار از اهمیت به سزایی در تعیین نرخ فرسایش برخوردار می باشد. اثر زاویه برخورد ذرات توسط محققانی از جمله فینی [۱۲] و اوکا و همکاران [۱۳] مورد مطالعه و بررسی بوده است. طبق تحقیقات اوکا نرخ فرسایش بی بعد شده بر اساس زاویه برخورد بیان شده است که نتایج در شکل ۴ نمایش داده می شود.

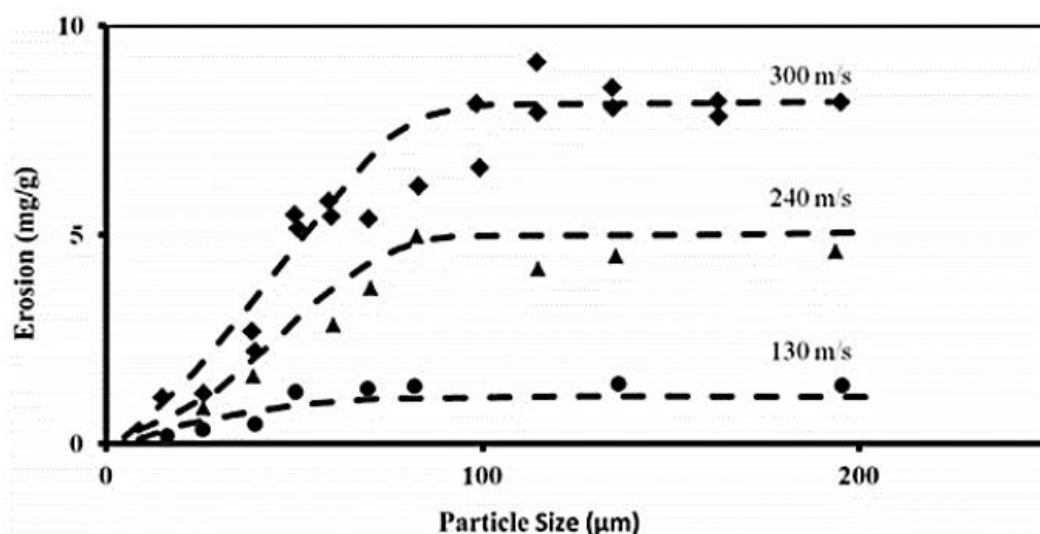


شکل ۲-۴: نرخ فرسایش بی بعد شده برای سرعت ۱۰۰ و ۱۳۰ متر بر ثانیه برای ۵ نوع مواد سطح [۱۴]

رفتار برش و ورقه ورقه شدن در زاویه های برخورد کم برای مواد شکل پذیر قابل مشاهده است در حالی که برای مواد ترد تغییر شکل پلاستیک مواد به عنوان فرسایش قالب در نظر گرفته می شود. اگر چه تحقیقات قابل توجهی برای تعیین وابستگی میزان فرسایش به زاویه برخورد انجام شده است اما هنوز هیچ رابطه مشخصی که بتواند اثر تغییرات زاویه را در نرخ فرسایش، برای سطوح با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف تعیین کند به دست نیامده است.

۲-۳-۳- خصوصیات ذرات جامد

خصوصیات ذرات جامد یکی از عوامل تعیین کننده در تعیین فرسایش است. در صنایع مختلف خصوصیات ذرات شامل شکل، سختی، اندازه و موارد مشابه متفاوت هستند. تحقیقات مختلفی جهت بررسی تاثیر شکل و اندازه ذرات بر میزان نرخ فرسایش انجام گرفته است که در نهایت پارامترهایی جهت در نظر گرفتن این اثرات در معادلات فرسایش تعریف شده اند. اوکا [۱۴] مدلی را ارائه کرده که اثر شکل ذرات را در میزان فرسایش به صورت اعداد ثابت در نظر می گیرد. مکلوری [۱۵] در مرکز تحقیقات خوردگی دانشگاه تولسا مدلی توسعه داده که میزان ضریب شکل ذرات جامد را با توجه به شکل ذرات به صورت اعداد ثابت در نظر می گیرد. برای ذرات تیز گوشه مقدار ضریب شکل برابر ۱ و برای ذرات شبه گرد برابر ۰,۵۳ و برای ذرات گرد برابر ۰,۲ در نظر گرفته می شود. سیلیک [۱۶] به این نتیجه رسید که در یک مدل آزمایشگاهی ذرات زاویه دار شیشه فرسایش بیشتری نسبت به ذرات گرد ایجاد می کنند. لوی [۱۷] به این نتیجه رسید که ذرات تیز گوشه می توانند میزان فرسایش را ۴ برابر بیشتر نسبت به ذرات گرد گوشه ایجاد کنند. کاسن و هاتچینگ [۱۸] به این نتیجه رسیدند که شکل ذرات می تواند علاوه بر تاثیرگذاری بر میزان نرخ فرسایش در زاویه برخورد ذرات جامد به دیواره نیز موثر باشد. تایللی [۱۹] یک مدل ارائه داده که در آن نرخ فرسایش تابعی از اندازه ذرات جامد است. در این مطالعه میزان نرخ فرسایش با نتایج تجربی مطابقت خوبی نشان می دهد.



شکل ۲-۵: نسبت فرسایش برحسب اندازه ذرات و سرعت ذرات جامد [۲۰]

با توجه به مطالب ارائه شده تنها نتیجه مثبتی که می توان گرفت این است که تقریباً همه محققان اتفاق نظر دارند که میزان فرسایش تحت تاثیر شکل ذرات برای ذرات جامد بزرگتر از ۱۰۰ میکرومتر ثابت است و تغییری نمی کند.

۲-۳-۴- خصوصیات مواد سطح

خصوصیات مواد هدف یکی از پارامترهایی است که بر میزان فرسایش موثر است. سختی مواد هدف مهمترین خصوصیت در بحث فرسایش است. تحقیقات کلی بیانگر این بوده که افزایش سختی مواد سطح باعث افزایش فرسایش می شود. لوی [۲۰] نشان داده هر مقدار مواد هدف شکل پذیرتر باشند دچار فرسایش کمتری می شوند و افزایش سختی باعث افزایش فرسایش می شود. دلیل کاهش فرسایش در مواد انعطاف پذیر را می توان مستهلک شدن انرژی جنبشی ذرات جامد توسط سطوح با سختی کمتر دانست. خصوصیت دیگر از جمله دما، کرنش برشی و موارد مشابه نیز مورد بررسی قرار گرفته اند و تاثیر آنها در میزان فرسایش تأیید شده است.

۲-۳-۵- خصوصیات سیال حامل

اثر متقابل ذرات جامد و سیال بر روی همدیگر در نوع خود یک پدیده پیچیده مهندسی می باشد. بر همکنش های مختلفی مانند انتقال حرارت و مومنت بین سیال و ذره رخ می دهد. بنابراین کاملاً واضح است که خصوصیات سیال مانند چگالی و لزجت می توانند بر روی مسیر ذرات جامد و در نتیجه فرسایش ناشی از ذرات جامد موثر باشد به عبارتی با افزایش چگالی و لزجت سیال نیروی درگ اعمال شده بر روی ذرات جامد افزایش پیدا می کند. اسملتزر [۲۱] با انجام آزمایشاتی به این نتیجه رسید که افزایش درجه حرارت سیال باعث کاهش نرخ فرسایش می شود و این به این علت است که در درجه حرارت بالا لزجت و چگالی سیال روند کاهشی پیدا می کنند. پوراحمدی و همکاران [۲۲] به این نتیجه رسیدند که مومنت ذرات جامد تحت تاثیر آشفتگی افزایش پیدا می کند و این می تواند عاملی باشد در افزایش نرخ فرسایش.

۲-۴- مدل سازی فرسایش

موسسه تحقیقات نفت امریکا API 14E طی تحقیقاتی بیان کرده است که با محدود کردن سرعت استخراج سیال در صنایع نفت و گاز می توان آسیب ناشی از فرسایش را کاهش داد. این میزان سرعت فقط با توجه به چگالی سیال استخراج شده محاسبه می شود.

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}} \quad (2-2)$$

V_e سرعت فرسایشی سیال ($\frac{m}{s}$)

ρ_m چگالی مخلوط جریان چند فازی ($\frac{kg}{m^3}$)

$C = 100$ بیانگر یک ثابت تجربی می باشد

سرعت مشخصه سیال، نشان دهنده یک سرعت مشخص است که تغییرات ناشی از فرسایش را محدود

می کند.

با این حال همانطور که در بخش های قبلی گفته شد فرسایش تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی قرار دارد که رابطه ارائه شده توسط API14E این فاکتورها را در نظر نمی گیرد در ادامه تعدادی از محققان و دانشمندان مدل های فرسایش را جایگزین رابطه توصیه شده API14E کردند. این مدل ها به دو دسته مدل های تجربی و تئوری تقسیم می شوند، مدل های تئوری برای دامنه ی گسترده ای از صنایع مورد استفاده قرار می گیرند اما مدل های تجربی استفاده مشخصی دارند. در کار حاضر این امکان وجود ندارد تا این مدل ها با جزئیات بیان شوند اما چندین مدل مهم و پرکاربرد در ادامه معرفی می شوند.

۲-۴-۱-مدل های تئوری

چندین مدل تئوری پرکاربرد به صورت جمع بندی شده در ادامه معرفی می شوند.

۲-۴-۱-۱-مدل فینی

فینی از اولین محققانی بود که یک مدل تئوری برای فرسایش ارائه داد. او بیان کرد که فرسایش ناشی از برش موثرترین نوع فرسایش است. در نهایت معادله ای توسط مک فادن و فینی [۲۳] توسعه پیدا کرد. مشکل عمده این مدل این است که فرسایش را در زاویه درست پیش بینی نمی کند و به عبارتی میزان فرسایش را برای زاویه های برخورد کم بیش از حد تخمین می زند و برای زاویه برخورد زیاد میزان فرسایش را کم گزارش می کند.

$$V = \frac{CMU^2}{4P(1 + mr^2/I)} \left[\cos^2 \alpha - \left(\frac{x'_0}{U} \right)^2 \right] \quad (۲-۳)$$

V حجم از دست رفته از سطح

M جرم ذرات فرسایش دهنده در واحد حجم سیال

m جرم یک ذره منفرد

I اینرسی ذرات تحت مرکز ثقل آنها

r شعاع متوسط ذرات

α زاویه برخورد ذرات جامد به سطح

U سرعت برخورد ذرات

P مولفه افقی از تنش جریان

x_0 سرعت افقی ذرات جامد بعد از برش سطح

۲-۴-۱-۲-مدل نیلسون و گیلچریست

نیلسون و گیلچریست [۲۴] موفق به توسعه مدلی شدند که فرسایش را ناشی از هر دو مکانیزم برش و تغییر شکل در نظر می گیرد.

$$\alpha \leq \alpha_0 : W = \frac{M}{2} \left(\frac{V^2 * \cos^2 \alpha * \sin nx}{\varphi} + \frac{(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \right) \quad (۴-۲)$$

$$\alpha \geq \alpha_0 : W = \frac{M}{2} \left(\frac{V^2 * \cos^2 \alpha}{\varphi} + \frac{(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \right)$$

M جرم ذرات جامد

W جرم مواد کنده شده از سطح در اثر فرسایش

K مولفه بردار نرمال سطح

α زاویه برخورد ذرات جامد به سطح در زمان سرعت صفر ذره جامد

۲-۴-۱-۳- مدل فرسایش استاندارد انسیس فلوئنت

نرم افزار انسیس فلوئنت نیز دارای یک مدل استاندارد فرسایش به صورت پیش فرض می باشد. در این مدل ارائه شده نرخ فرسایش به صورت تابعی از قطر ذرات جامد، زاویه برخورد ذرات جامد و توانی از سرعت با واحد شار جرمی تعریف می شود.

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{m_p C_{dp} f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (2-5)$$

C_{dp} تابعی از قطر ذرات جامد

α زاویه برخورد ذرات جامد با سطح دیوار (rad)

$f(\alpha)$ تابعی از زاویه برخورد

v سرعت نسبی ذرات جامد ($\frac{m}{s}$)

$b(v)$ تابعی از سرعت نسبی ذرات جامد

A_{face} مساحتی از سطح سلول روی دیوار (m^2)

مدل تئوری نرم افزار انسیس فلوئنت به مانند هر مدل دیگری دارای مزایا و معایبی است. از مزایای این مدل می توان به تابع زاویه برخورد و تابع قطر ذرات جامد اشاره کرد که این قابلیت را در اختیار ما قرار می دهد تا بتوانیم رابطه را براساس نتایج آزمایشگاهی تنظیم کنیم. به بیان دیگر این قابلیت را به ما می دهد تا رابطه تجربی مورد نظر خود را به صورت توابع چند جمله ای در قالب تابع زاویه برخورد و تابع قطر ذرات جامد به نرم افزار فلوئنت اضافه کنیم. علاوه بر این روش با استفاده از قابلیت کدهای تعریف

شده کاربر^۱ نیز می توانیم مدل خود را به نرم افزار اضافه کنیم.

۲-۴-۲- مدل های تجربی فرسایش

مدل های تجربی مختلفی با توجه به صنایع مختلف توسعه پیدا کرده اند. توسعه این مدل ها عموماً براساس نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی های مختلف بوده است. مدل های تجربی این امکان را دارند تا با استفاده از قابلیت UDF و CFF^۲ به نرم افزار فلونت اضافه شوند.

۲-۴-۲-۱- مدل فرسایش مک لوری و همکاران

مک لوری [۲۵] و اهلرت [۲۶] در مرکز تحقیقات خوردگی دانشگاه تولسا یک مدل تجربی توسعه دادند که این مدل با توجه به تجهیزاتی مانند چوکها، لوله ها و زانوئی های مورد استفاده در صنایع نفت و گاز، توسعه پیدا کرده است.

$$ER = A V^n f(\alpha) \quad (۲-۶)$$

$$f(\alpha) = a\alpha^2 + b\alpha \quad \alpha \leq 15^\circ$$

$$f(\alpha) = x \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) + y \sin^2(\alpha) + z \quad \alpha > 15^\circ$$

$$A = 1559 HB^{-0.59}$$

ER نسبت جرم مواد از دست رفته از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح ($\frac{kg}{kg}$)

a, b, x, y, z مقادیر ثابتی هستند که با توجه آزمایشات تجربی تعیین می شوند.

^۱ User Define Function

^۲ Custom Field Function

HB سختی برینل

n توان سرعت که با توجه به سختی مواد سطح مورد فرسایش، تعیین می شود.

۲-۲-۴-۲-مدل فرسایش تولسا^۱

این مدل در مرکز تحقیقات خوردگی دانشگاه تولسا توسعه پیدا کرده است. این مدل جهت پیش بینی فرسایش در لوله ها و زانویی های مورد استفاده در صنایع نفت و گاز می باشد.

$$ER = \frac{A F_s F_p V^n m}{D_p^2 B^b} \quad (۷-۲)$$

ER نسبت جرم مواد از دست رفته از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح ($\frac{kg}{kg}$)

A بیانگر ثابت تجربی می باشد

F_s نشان دهند فاکتور شکل ذرات جامد می باشد.

F_p فاکتور نفوذ سطح دیوار

D_p قطر لوله

B سختی برینل سطح دیوار

n توان سرعت

b توان سختی مواد سطح دیوار

۲-۲-۴-۳-مدل فرسایش سالما و ونکاتش

ونکاتش و سالما [۲۷] مدلی را برای پیش بینی فرسایش در زانویی ها و لوله ها ارائه دادند.

^۱ Tulsa

$$ER = \frac{S_k V^2 m}{d_{pipe}^2} \quad (۸-۲)$$

ER نسبت جرم مواد از دست رفته از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح $(\frac{kg}{kg})$
 S_k مقداری ثابت است که وابسته به هندسه می باشد و برای زانویی های شعاع کوتاه برابر $۰,۰۳۸$ و
 برای سایر هندسه ها برابر $۰,۰۱۹$ در نظر گرفته می شود.

d_{pipe} نشان دهنده قطر لوله می باشد. (m)

m نرخ جریان ماسه $(\frac{kg}{s})$

V سرعت برخورد ذرات جامد به دیوار $(\frac{m}{s})$

۲-۴-۲-۴- مدل فرسایش اوکا و همکاران

اوکا و همکاران [۱۳] یک مدل فرسایش براساس زاویه برخورد ذرات جامد به سطح هدف توسعه داده اند.

$$E(\alpha) = g(\alpha) E90 \quad (۷-۲)$$

$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1} (1 + Hv(1 - \sin \theta))^{n2}$$

$$E90 = K(Hv)^{k1} (\frac{V_p}{V})^{k2} (\frac{D_p}{d})^{k3}$$

$$n_{1=S_1} (Hv)^{q1}$$

$$n_{2=S_2} (Hv)^{q2}$$

$$k_2 = 2.3(Hv)^{0.038}$$

ER نسبت جرم مواد از دست رفته از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح $(\frac{kg}{kg})$

جنس مواد هدف تعیین می شوند. این مقادیر ثابت هایی هستند که با توجه به جنس ذرات و $K, k_1, k_2, k_3, s_1, s_2, q_1, q_2, n_1, n_2$

در مدل ارائه شده تابع $g(\alpha)$ از دو ترم تشکیل می شود. ترم اول بیانگر تغییر شکل پلاستیک است و با افزایش زاویه برخورد ذرات به سطح افزایش پیدا می کند. ترم دوم بیانگر تغییر شکل برشی است. این ترم در زاویه های کم دارای حداکثر مقدار می باشد.

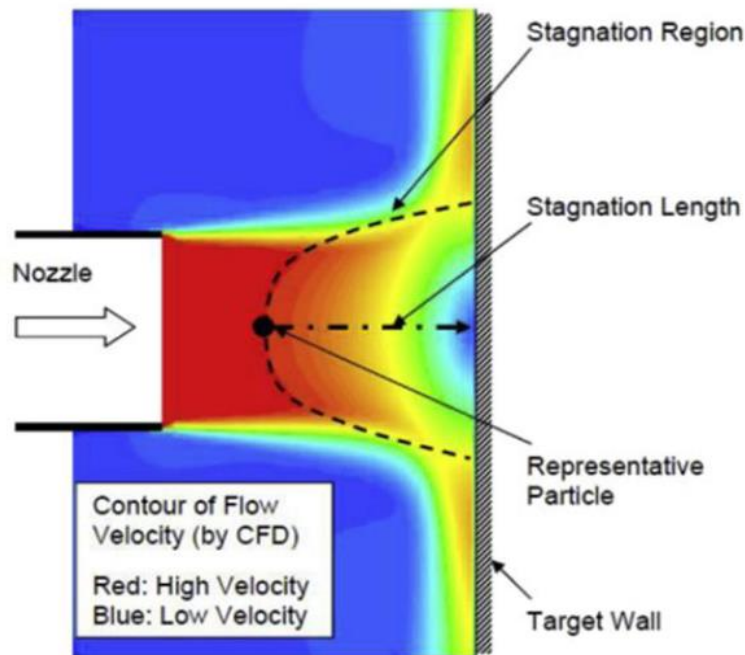
مدلهای تجربی نیز مانند مدل های تئوری دارای مزایا و معایبی هستند. مدل های تجربی با توجه به صنعتی که برای آن توسعه پیدا کرده اند دارای دقت بالایی هستند. این مدل ها به گونه ای توسعه پیدا کرده اند که می توانند برای صنایع گوناگون مورد استفاده قرار گیرند. بزرگترین معایب مدل های تجربی غیر قابل تغییر بودن اعداد ثابت تجربی می باشد. و اینکه این اعداد تجربی برای هندسه های مشخص تعریف شده اند و قابل بسط دادن به شرایط متفاوت تر نمی باشند.

معادلات تجربی بسیار کاربردی هستند. اما چون مکانیزم فرسایش در شرایط مختلف متفاوت است نمی توان در بیشتر موارد به صحیح بودن نتایج حاصل شده از معادلات تجربی استناد کرد. به این دلیل که مکانیزم فرسایش ناشی از ذرات جامد در شرایط مختلف متفاوت است. در همین ارتباط تعدادی از پژوهشگران مدل های مکانیکی را توسعه دادند. این مدل ها در یک قالب کلی تری نسبت به معادلات تجربی اراده شده اند. به عبارتی مواردی مانند فیزیک هندسه و جریان سیال و سایر موارد دیگر را در فرضیات خود در نظر می گیرند. در ادامه خلاصه ای از مدل های مکانیکی بیان می شود.

۲-۴-۳- مدل های مکانیکی برای پیش بینی فرسایش در جریان تک فاز

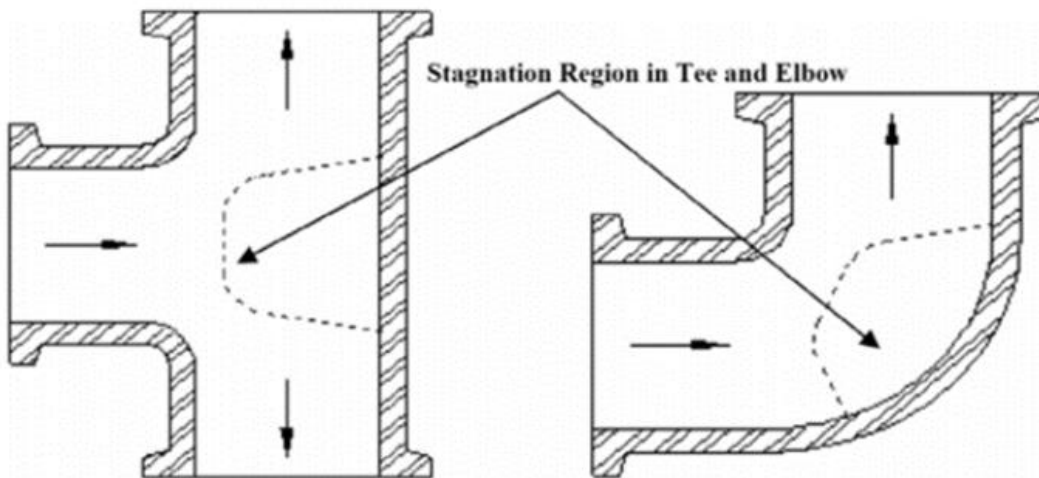
طبق مطالعات انجام شده در یک هندسه برخورد مستقیم، ذرات جامد قبل از اینکه به دیواره برخورد کنند وارد ناحیه ای تحت عنوان ناحیه سکون می شوند که در این ناحیه ذرات جامد تحت تاثیر تراکم

سیال کاهش سرعت خواهند داشت. این ناحیه در شکل ۲-۶ به نمایش درآمده است. برای در نظر گرفتن این اثر کاهش سرعت ذرات جامد، شیرازی و همکاران [۲۸] یک مدل مکانیکی جهت محاسبه فرسایش ارائه کردند که در این مدل فرسایش اثر ناحیه سکون نیز مدنظر قرار داده شده است.



شکل ۲-۶: ناحیه سکون در هندسه برخورد مستقیم

شیرازی و همکاران [۲۸] به جهت در نظر گرفتن اثر این ناحیه در معادله فرسایش ناحیه ای را تحت عنوان ناحیه سکون در نظر گرفتند. فرض آنها این بود که ذرات قبل از برخورد به دیواره وارد ناحیه ای می شوند با طول مشخص تحت عنوان ناحیه سکون، که نحوه فرض کردن محدوده این ناحیه وابستگی مستقیمی به هندسه مورد مطالعه جهت شبیه سازی دارد.



شکل ۲-۷: ناحیه سکون در سه راهی و زانویی

در مدل مکانیکی شیرازی و همکاران [۲۸] یک ذره جامد بعد از وارد شدن به ناحیه سکون از یک پروفیل سرعت جریان طبیعت می کند و با یک سرعت مشخص به دیواره برخورد می کند. سپس از سرعت ذره بدست آمده جهت محاسبه فرسایش استفاده می شود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که سرعت ذرات در این قسمت را نمی توان برابر با سرعت سیال در نظر گرفت چون سرعت ذره تابعی از خصوصیات فیزیکی ذره و سیال تعیین می شود. به جهت تعیین سرعت ذره جامد در ناحیه سکون بایستی پروفیل سرعت جریان در ناحیه سکون تعریف شود. به همین جهت رابطه ای در ارتباط با این مورد تعیین شده است.

$$V_f = V_{char} \left(1 - \frac{x}{L_{stage}}\right) \quad (۸-۲)$$

سرعت برخورد ذرات جامد به دیواره در یک نمونه یک بعدی توسط رابطه ۲-۹ محاسبه می شود. در این روش معادلات حرکت ذره در قالب شبیه سازی عددی حل می شود. قابل ذکر است که تنها نیروی که در این روش جهت محاسبه سرعت ذره در نظر گرفته می شود نیروی پسا است.

$$m_p V_p \frac{dV_p}{dx} = 0.5 \rho_f (V_f - V_p) |V_f - V_p| C_D \frac{\pi d^2}{4} \quad (9-2)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + 0.5 \quad (10-2)$$

$$Re_p = \frac{\rho_f |V_f - V_p| d_p}{\mu_f} \quad (11-2)$$

$$ER = 1.73 * 10^{-6} V_L^{1.623} \quad (12-2)$$

$$\frac{L_{stag}}{L_{ref}} = 1 - 1.27 \tan^{-1}(1.01 D^{-1.89}) + D^{0.129} \quad (13-2)$$

m_p جرم ذرات جامد

V_L سرعت برخورد ذرات جامد به دیوار

V_p سرعت ذرات جامد

V_f سرعت سیال در موقعیت ذرات جامد

ρ_f چگالی سیال

C_D ضریب درگ

Re_p عدد رینولدز ذرات

μ_f ویسکوزیته سیال

ER نسبت جرم کنده شده از مواد سطح لوله به جرم کل ذرات برخورد کننده به سطح لوله (kg/kg)

L_{stag} طول ناحیه سکون

طول ناحیه سکون ارتباط مستقیمی با قطر لوله دارد به صورتی که برای لوله ها با قطر کوچکتر

وابستگی طول سکون بیشتر می شود در نتیجه ذرات جامد مسیر بیشتری را باید طی کنند تا به دیواره

برخورد کنند.

با توجه به مطالب عنوان شده در این قسمت باید به این نکته توجه کرد که سرعت ذرات در ورودی ناحیه سکون برابر سرعت سیال حامل در نظر گرفته می شود و سپس ذرات جامد با استفاده از معادله ذکر شده در این قسمت ردیابی می شوند و این ردیابی تا زمانی ادامه پیدا می کند که فاصله ذره جامد تا دیواره برابر نصف شعاع ذره جامد در نظر گرفته شود. سپس سرعت ذره در این قسمت به عنوان سرعت ذره جهت محاسبه نرخ فرسایش در نظر گرفته می شود.

از مزایای مدل شیرازی و همکاران می توان به این نکته اشاره کرد که این مدل برای بسیاری از مکانیزم های فرسایش می تواند مناسب باشد. این مدل اثر بسیاری از پارامترها مانند سرعت ذرات، چگالی ذرات، شکل ذرات و اثر هندسه مورد مطالعه را در محاسبه میزان فرسایش در نظر می گیرد.

از معایب مدل شیرازی می توان به این اشاره کرد که این مدل برای شبیه سازی ها با مکانیزم برخورد مستقیم تعریف شده است در نتیجه برای جریانهایی که چگالی فاز حامل نسبت به فاز پراکنده بیشتر است مکانیزم برخورد مستقیم اتفاق نخواهد افتاد. به عبارتی ذرات جامد در حالت غیر از مکانیزم برخورد مستقیم از خطوط جریان سیال طبیعت می کنند و در نتیجه فرض تعیین شده شیرازی و همکاران در این حالت که تاکید بر حالت مکانیزم مستقیم است درست نخواهد بود. علاوه بر مدل ارائه شده، در این قسمت پارامتری که بتواند اثرات آشفتگی جریان را روی مسیر ذرات جامد در نظر بگیرد تعیین نشده است.

جدول ۲-۱: مروری بر تحقیقات پیشین

محققین	سال	نوع کار	سیال	شرح انجام کار	نتایج مرتبط
عرب نژاد و همکاران [۲۹]	۲۰۱۷	تجربی	گاز	برسی اثر مدل های انعکاس ذرات جامد از دیواره	مدلهای ارتجاعی اثرات قابل توجهی در پیش بینی فرسایش دارند به خصوص در مواردی که تداوم

برخورد ذرات به دیواره وجود دارد					
نتایج نشان دادند که با افزایش لزجت سیال حامل، حداقل سرعت لازم جهت انتقال فاز پراکنده افزایش می یابد.	بررسی انتقال ذرات جامد با غلظت کم در لوله افقی تحت یک جریان لزج	آب	تجربی	۲۰۱۴	دیول پانديا و همکاران [۳۰]
غلظت و قطر ذرات جامد به صورت مستقیم بر روی پدیده فرسایش موثر است.	نرخ فرسایش برای ذرات با قطر متفاوت و غلظت متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.	آب	عددی	۲۰۱۸	ویکاس کانوجیا و همکاران [۳۱]
در حل وابسته به زمان و مش دینامیکی با به وجود آمدن فرورفتگی در سطح هدف میزان نرخ فرسایش ناشی از ذرات جامد کاهش می یابد. اما در حالت حل پایدار اثر این کاهش در نظر گرفته نمی شود و میزان فرسایش بیش از حد پیش بینی می شود.	بررسی اثر تغییر شکل سطح هدف بر روی نرخ فرسایش ناشی از ذرات جامد	آب	عددی	۲۰۱۹	پارسی و همکاران [۳۲]

۲-۴-۴- مکانیزم پیش بینی فرسایش در جریان های چند فاز

پیش بینی فرسایش در جریان های چند فاز بسیار پیچیده تر از جریان های تک فاز می باشد. و دلیل این پیچیدگی شبیه سازی جریان چند فازی و ردیابی فاز پراکنده می باشد. جردن [۳۳] یک مدل جهت تعیین فرسایش در جریان های چند فازی ارائه کرد. در این مدل فازهای مختلف جریان براساس قطر موثر تقسیم بندی می شوند. و سپس فرسایش برای هر فاز به صورت جداگانه محاسبه می شود. و در نهایت میزان فرسایش کلی با جمع مقادیر فرسایش بدست آمده برای هر فاز محاسبه و گزارش می شود. مکلوری [۳۴] و شیرازی [۳۵] یک مدل برای تعیین میزان فرسایش در جریان های چند فازی در مواد فولادی ارائه دادند. که میزان فرسایش از رابطه زیر بدست می آید.

$$ER = F_M F_S F_P F_{r/D} \frac{\dot{W}_p V_L^{1.73}}{\left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^2} \quad (۲-۱۴)$$

$$F_{r/D} = \exp\left(-\left(0.1 \frac{\rho_f^{0.4} \mu_f^{0.65}}{d_p^{0.3}} + 0.015 \rho_f^{0.25} + 0.12\right)(r_c - 1.5)\right) \quad (۲-۱۵)$$

F_M یک ثابت تجربی بر اساس ویژگی مواد

F_P فاکتور نفوذ ذرات جامد

F_S ضریب شکل ذرات جامد

$F_{r/D}$ فاکتوری بر اساس شعاع زانویی

W_p وزن شن استفاده شده

D_{ref} قطر مرجع لوله که معادل با ۱ اینچ می باشد.

ER نسبت جرم مواد کنده شده از سطح به جرم ذرات جامد برخورد کننده به سطح (kg/kg)

مقدار پارامتر V_L در رابطه ذکر شده در بالا توسط معادلات ارائه شده توسط شیرازی و همکاران [۳۶]

بدست می آید. در جریان های چند فازی خصوصیات جریان چند فازی از قبیل لزجت و چگالی جریان چند فازی از روابط ذکر شده بدست خواهد آمد.

$$\mu_m = \frac{V_{SG}}{V_{SG} + V_{SL}} \mu_G + \frac{V_{SL}}{V_{SG} + V_{SL}} \mu_L \quad (۱۶-۲)$$

$$\rho_m = \frac{V_{SG}}{V_{SG} + V_{SL}} \rho_g + \frac{V_{SL}}{V_{SG} + V_{SL}} \rho_L \quad (۱۷-۲)$$

ذکر این نکته در اینجا قابل توجه است که در جریان های تک فازي سرعت مشخصه سیال V_{char} برابر با متوسط سرعت جریان در نظر گرفته می شود. اما در جریان های چند فازي این مقدار با توجه به رابطه ذکر شده در پایین تعیین خواهد شد.

$$V_{char} = \lambda_L^n V_{SL} (1 - \lambda_L)^n V_{Sg} \quad (۱۸-۲)$$

در مدل های تجربی و مکانیکی ارائه شده برای جریان های چند فازي میزان فرسایش با توجه به متغیرهای غیر واقعی جریان چند فازي بدست می آیند. به عبارتی این مدل ها اثر الگوی رژیم جریان را در محاسبه فرسایش در نظر نمی گیرند.

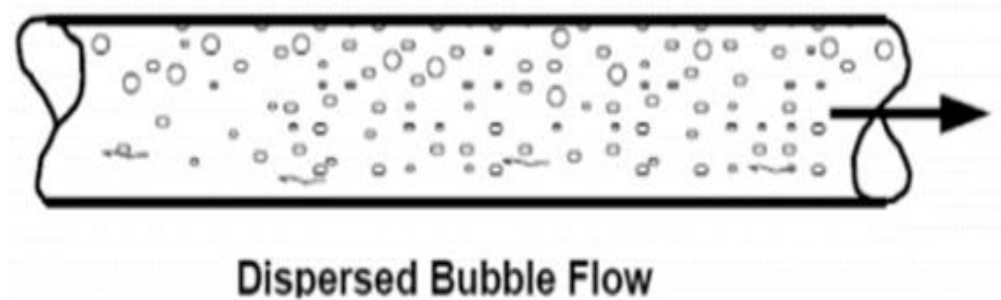
پارسی [۳۷] نشان داد که برای سرعت های جریان یکسان، الگوی جریان های چند فازي مختلف می تواند مقادیر فرسایش متفاوتی را پیش بینی کند. بنابراین یک مدل پیش بینی مکانیکی دقیق باید اثرات الگوهای جریان چند فازي را در میزان فرسایش در نظر بگیرد.

در جریان های چند فازي نیروهای سطحی در فازهای مختلف باتوجه به نوع جریان چند فازي متفاوت هستند. تغییر در خصوصیات فازهای مختلف می تواند در تعیین نوع الگوی جریان چند فازي موثر باشد. الگوهای پرکاربرد و مرسوم در جریان های چند فازي عبارتند از جریان لایه ای، حلقوی، حلزونی و

حبابی.

۲-۴-۴-۱- جریان حبابی^۱

جریان حبابی به صورت یک جریان چند فازی که در آن حباب های مایع به صورت یکسان در فاز سیال پراکنده هستند تعریف می شود. این الگوی جریان چند فازی در زمانی به وجود می آید که یا قطر هندسه مورد مطالعه بسیار زیاد است و یا اینکه میزان سیال گاز در مقایسه با سیال مایع بسیار ناچیز باشد.



Dispersed Bubble Flow

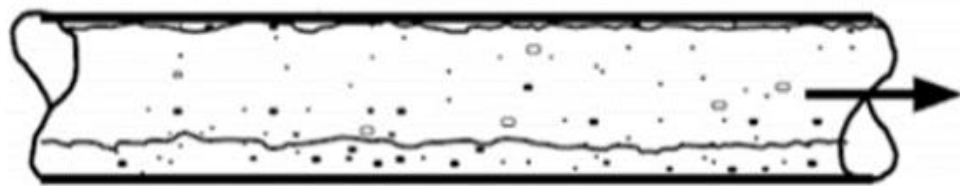
شکل ۲-۸: جریان حبابی

۲-۴-۴-۲- جریان حلقه ای^۲

جریان حلقوی در یک جریان چند فازی که درصد فاز هوا نسبت به فاز مایع از درصد بالایی برخوردار است رخ می دهد. این الگوی جریان به صورت یک لایه نازک مایع که روی دیواره چسبیده و یک هسته از گاز که در مرکز هندسه قرار دارد مشخص می شود. در الگوی جریان حلقوی ذرات کوچک هوا را می توان در فاز مایع در کنار دیوار نیز مشاهده کرد.

^۱ Dispersed Bubble Flow

^۲ Annular Flow

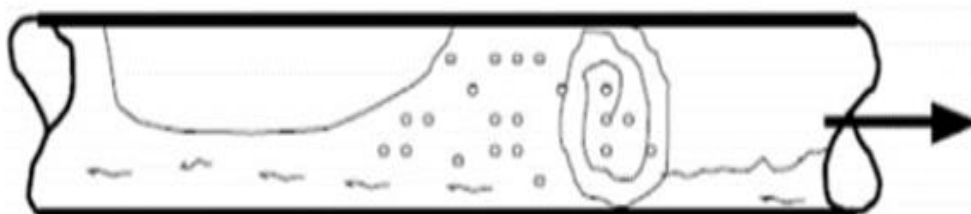


Annular Flow

شکل ۲-۹: جریان حلقه ای

۲-۴-۴-۳- جریان حلزونی^۱

جریان حلزونی یک جریان چند فازی است که به صورت یک جریان درهم شامل حباب های هوا و مایع تشکیل می شود. این نوع از جریان در محدوده وسیع از جریان های گاز و مایع تشکیل می شود.



Slug Flow

شکل ۲-۱۰: جریان حلزونی

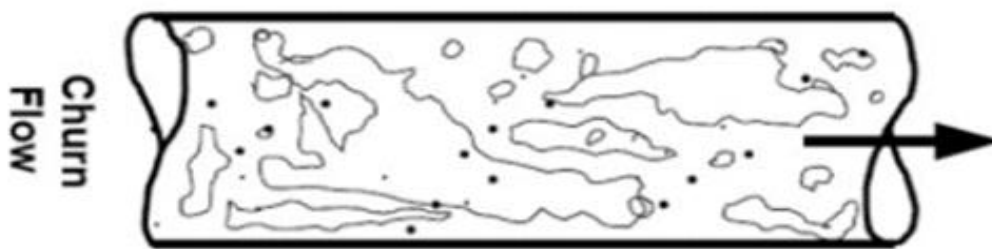
۲-۴-۴-۴- جریان لخته ای^۲

جریان لخته ای در حدفاصل عمود و نزدیک به عمود به وجود می آید و جریانی است که به صورت

^۱ Slug Flow

^۲ Churn Flow

ترکیبی از جریان حلزونی و حلقوی تشکیل می شود. در این نوع از جریان هیچ مرز مشخصی بین فازهای مختلف وجود ندارد. این نوع از الگوی جریان در دبی های کم رخ می دهد.



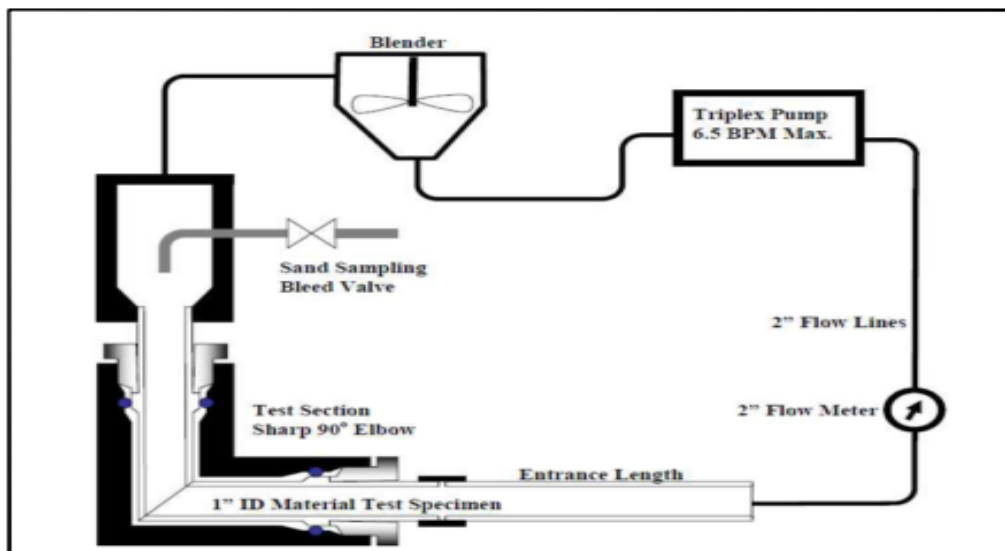
شکل ۲-۱۱: جریان لخته ای

۲-۵ مدل تجربی و مدل فرسایش بیکر هیوز

تمامی تحلیل های انجام شده در این پژوهش بر اساس نتایج ارائه شده توسط بیکر هیوز^۱ می باشد. این کار تجربی برای چهار شرایط جریان متفاوت شامل دو اندازه ذرات جامد با قطر ۲۵۶ و ۲۵ میکرو متر و همچنین شامل دو دبی جریان مختلف ۸۵,۸ و ۵۰ فوت بر مترمکعب انجام شده است. راسل [۳۸] در سال ۲۰۰۴ نتایج تجربی این کار پژوهشی را به صورت یک مقاله کنفرانسی ارائه داد. هندسه مورد استفاده در این کار تجربی یک زانویی ۹۰ درجه با قطر ۱ اینچ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش غلظت ذرات جامد ۱ درصد وزن سیال و یا ۰,۳۸ درصد حجم سیال در نظر گرفته شده است. در این

^۱ Baker Hughes

تحقیق در نهایت نرخ فرسایش برای ۲۳۰ موقعیت روی زانویی بدست آمده است. در ادامه تصویری شماتیک از هندسه مورد استفاده در این کار تجربی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲: روند انجام فرسایش تجربی [۱]

فصل سوم: معادلات حاکم

۳-۱- مقدمه

ابزار های پیچیده و هندسه های پیچیده در صنعت وجود دارد که فرسایش در آنها می تواند رخ دهد. در صنعت آب و نفت و گاز بیشتر مواقع امکان مدلسازی دقیق شرایط فرسایش در مقیاس آزمایشگاهی وجود ندارد. دینامیک سیالات محاسباتی می تواند ابزاری کاربردی باشد در تحلیل میدان های جریان سیال در هندسه های پیچیده. با پیشرفت علوم، دینامیک سیالات محاسباتی این قابلیت را به ما می دهد تا مسائل در مقیاس های بسیار بزرگ و پیچیده را در مدت زمان کم تحلیل و شبیه سازی کنیم. تعداد زیادی کدهای تجاری برای شبیه سازی جریان های چند فازی مربوط به صنایع آب و نفت و گاز در دهه های گذشته توسعه پیدا کرده اند. تجزیه و تحلیل بر اساس دینامیک سیالات تنها باعث صرفه جویی در زمان و هزینه ها نمی شود بلکه در اکثر موارد این روش شبیه سازی با محیط زیست نیز سازگار است. دینامیک سیالات محاسباتی از اوایل سال ۱۹۹۰ به صورت گسترده ای برای محاسبه فرسایش مورد استفاده قرار گرفت. دانشگاه تولسا از سه دهه گذشته به صورت متمرکز بر روی پیش بینی فرسایش بر اساس دینامیک سیالات تمرکز کرده است. مکلوری [۳۹] اولین مدل پیش بینی فرسایش براساس دینامیک سیالات محاسباتی را ارائه داد. ادوارد [۴۰] و چن و همکاران [۴۱] مدل های مختلفی برای پیش بینی فرسایش بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی ارائه داده اند. همچنین ژانک و همکاران [۴۲] توصیه هایی را برای بهینه سازی فرسایش بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی ارائه داده اند.

مدلسازی فرسایش براساس دینامیک سیالات محاسباتی شامل سه بخش می شود:

۱-مدلسازی جریان سیال

۲-ردیابی ذرات جامد

۳-محاسبه نرخ فرسایش

۳-۲-مدلسازی جریان سیال

مدلسازی جریان سیال اولین گام در حل عددی فرسایش بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی^۱ می باشد. ساختار میدان جریان سرعت و آشفتگی به صورت مستقیم بر حرکت ذرات جامد و رفتار آنها در میدان جریان موثر هستند. با توجه به اینکه این گام از حل عددی، اولین مرحله از حل است، هرگونه خطا می تواند باعث بروز رفتارهای غیرفیزیکی در گام های بعدی شود.

فلوئنت یک سری کد براساس حجم محدود است که معادلات ناویر استوکس را برای پیش بینی رفتار جریان سیال حل می کند. همچنین از قابلیت انسیس مشینگ برای مش بندی دامین حل استفاده می شود. در ادامه جزئیات مربوط به شرایط مرزی، مدل آشفتگی و روش حل عددی در نظر گرفته می شوند. و در نهایت میدان جریان حل شده و اطلاعات میدان جریان بدست می آید.

۳-۲-۱-معادلات پیوستگی و ناویر استوکس

در نرم افزار فلوئنت برای حل معادلات پیوستگی، ممنتوم، انرژی از روش حجم محدود استفاده می شود. در این روش فرم انتگرالی معادلات مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (۱-۳)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (۲-۳)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (۳-۳)$$

^۱ Computational Fluid Dynamics

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (4-3)$$

فرم انتگرالی معادلات جهت استفاده در نرم افزار فلوئنت:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho \phi \, dv \right) + \int_A n \cdot (\rho \phi U) dA = \int_A n \cdot (\Gamma \text{grad} \phi) dA + \int_{CV} S_\phi \, dv \quad (5-3)$$

۳-۲-۲- مدلسازی آشفته‌گی

تمامی جریان‌های که در طبیعت وجود دارند به نوعی جریان آشفته محسوب می‌شوند از خصوصیات جریان آشفته می‌توان به وجود نوسانات سرعت اشاره کرد. مدلسازی این نوسانات به صورت مستقیم غیر ممکن است. به همین دلیل مدل‌های مختلف عددی توسط محققان برای شبیه‌سازی جریان آشفته ارائه شده است. مدل‌های ارائه شده به ترتیب بر اساس دقت و هزینه محاسباتی در شکل ۳-۱ به نمایش درآمده است. از میان تمامی مدل‌های ارائه شده مدل‌های کا-اِپسیلون استاندارد و کا-اِپسیلون اصلاح شده برای صنایع مختلف نتایج مناسب و قابل قبولی ارائه می‌دهند. در نتیجه در ادامه این دو مدل محاسباتی به اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد.

معادله حمل نرخ انرژی جنبشی:

$$\rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \varepsilon \quad (۶-۳)$$

معادله حمل نرخ اضمحلال:

$$\rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} - C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (۷-۳)$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_ε , σ_k ثابت های تجربی می باشند.

۳-۲-۲-۲- مدل کا اپسیلون اصلاح شده^۱

تعداد زیادی از فرم های مختلف مدل کا اپسیلون استاندارد وجود دارد که هدف هر یک بهبود توانایی های این مدل در پیش بینی خواص جریان است. استدلال و منطقی که در پشت این مدل نهفته است این است که علاوه بر مقیاس زمانی آشفتگی k/ε ، مقیاس زمانی دیگری به صورت $\rho k/G$ نیز وجود دارد که به کمک آن می توان نرخ اضمحلال لزجت را به نرخ کرنش متوسط در جریان مرتبط کرد. با استفاده از این فرضیه فرم معادله اضمحلال به صورت زیر تغییر کرد. از ویژگی های این مدل می توان به این اشاره کرد که برای خطوط جریان انحنا دار یا چرخشی این مدل نتایج مناسب تری نسبت به مدل استاندارد ارائه می دهد.

^۱Realizable k-epsilon

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (۸-۳)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۹-۳)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (۱۰-۳)$$

A_0, A_s, U^* این مقادیر توابعی هستند بر اساس گرادیان سرعت

۳-۲-۳- توابع دیواره

هدف از مباحث ارائه شده در این بخش مروری بر پروفیل های تحلیلی جریان سیال در مجاورت دیواره می باشد. در مدلسازی جریان آشفته، توابع دیواره پروفیل های تحلیلی جریان در لایه مرزی نزدیک دیواره می باشند، که با استفاده از روش های تحلیلی و از حل صریح معادلات جریان در لایه مرزی مجاور دیواره بدست آمده اند. و از آنجا که به صورت تحلیلی بدست آمده اند دیگر خطاهای موجود در روش های عددی در پروفیل های توابع دیواره به چشم نمی خورد. بنابراین مزیت استفاده از توابع دیواره را می توان به صورت زیر عنوان کرد:

۱- کاهش حجم محاسبات به واسطه عدم نیاز به شبکه بندی در نواحی نزدیک دیواره

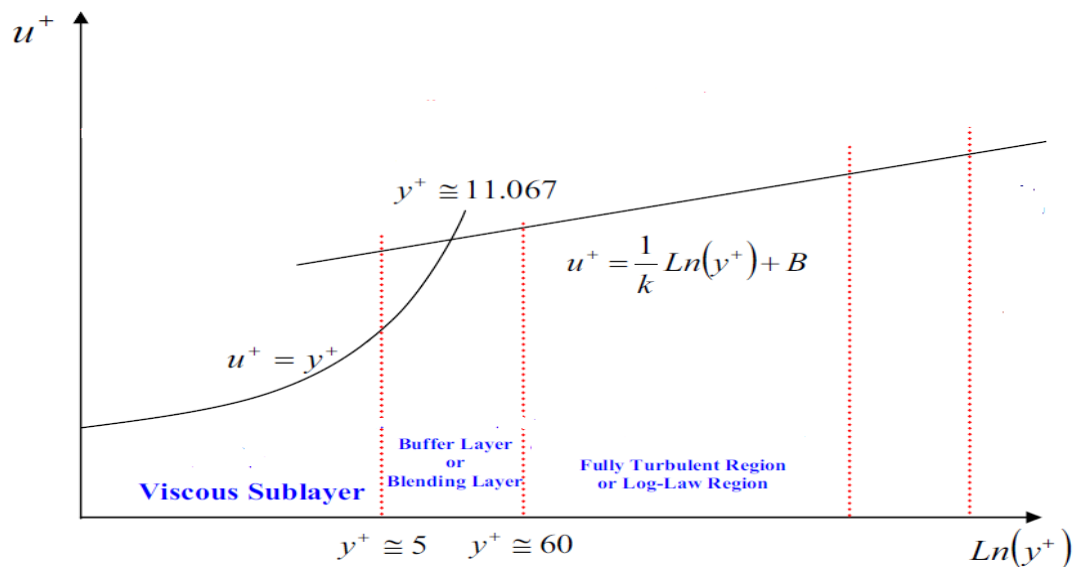
۲- افزایش دقت محاسبات

آزمایشات فراوانی نشان داده اند که ناحیه نزدیک دیواره را می توان به سه لایه مجزا تقسیم کرد. در داخلی ترین لایه که اصطلاحاً زیر لایه لزج^۱ نامیده می شود جریان اغلب شبیه جریان آرام می باشد، به عبارتی در این ناحیه لزجت مولکولی قالب می باشد. خارجی ترین لایه که لایه کاملاً آشفته^۲ نامیده می

^۱ Viscous Sublayer

^۲ Fully Turbulent Layer

شود، گردابه ها نقش اصلی را در انتقال پدیده های فیزیکی جریان بر عهده دارند. در این میان لایه ای دیگر تحت عنوان لایه گذرا^۱ وجود دارد که در این لایه نقش گردابه ها و لزجت مولکولی در انتقال پدیده های فیزیکی میدان جریان یکسان می باشد.



شکل ۳-۲: لایه های مجاور دیواره در یک جریان آشسته

بسیاری از مدل های آشسته موجود مانند کا-اِپسیلون و مدل تنش رینولدز^۲ در منطقه دور از دیوار کاربرد دارند. مدل های دیگری مانند اسپالارت الماراس^۳ و کا-اومگا^۴ مدل هایی هستند که در زیر لایه لزج معنی پیدا می کنند. در نتیجه در این حالت نیاز است که شبکه تعیین شده در نزدیک دیواره از تراکم بالایی برخوردار باشد و این از نقطه نظر اقتصادی مقرون به صرفه نخواهد بود.

فلوئنت در حالت کلی دو گزینه برای مدلسازی منطقه نزدیک دیوار در اختیار ما قرار می دهد. رویکرد

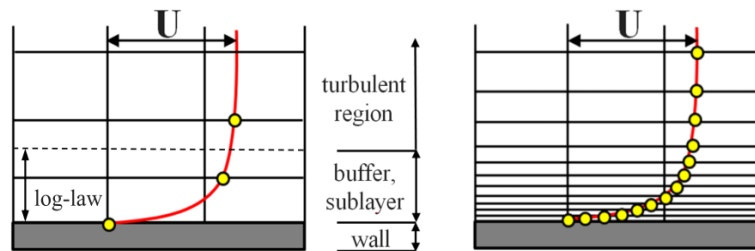
^۱ Buffer Layer

^۲ Reynolds Stress Model

^۳ Spalart-Almaras

^۴ Standard K-W

اول تابع دیواره نام دارد که از روابط نیمه تجربی برای برقراری ارتباط بین دو ناحیه نزدیک دیوار و منطقه کاملاً آشفته استفاده می کند. رویکرد دوم مدل نزدیک دیواره نامیده می شود در این رویکرد منطقه نزدیک دیوار و با یک مش به اندازه کافی ریز حل می شود. در ادامه شکل ۳-۳ تفاوت بین دو رویکرد را نشان می دهد.



شکل ۳-۳: سمت چپ بیانگر لایه مرزی تعیین شده توسط تابع دیواره و شکل راست رویکرد نزدیک دیواره

۳-۲-۳-۱-مدل تابع استاندارد دیوار^۱

این روش مناسب برای اعداد رینولدز بالا می باشد. در این روش اثر لزجت در منطقه نزدیک دیوار در نظر گرفته نمی شود و همچنین در این روش می توان یک مش درشت در منطقه نزدیک دیوار در نظر گرفت. زمانی که فرضیات ذکر شده برای حالت تابع استاندارد دیوار مناسب نباشد نتایج این روش قابل اعتماد نخواهد بود. به عنوان مثال این روش ممکن است برای جریانهایی با گرادیان فشار زیاد و یا دارای خطوط جریان منحنی شکل مناسب نباشد.

۳-۲-۳-۲-تابع دیوار مقیاس پذیر^۲

این روش شباهت زیادی با روش تابع استاندارد دیوار دارد. اما در این روش یک محدودیت در تعیین

^۱ Standard Wall Function

^۲ Scalable Wall Function

مقدار y^* در نظر گرفته می شود. به عبارتی با توجه به تعریف y^* ناحیه نزدیک دیوار به دو قسمت زیر لایه لزج و ناحیه کاملاً آشفته تقسیم می شود، و دیگر لایه گذرا وجود نخواهد داشت. هدف این روش اجبار به استفاده از ناحیه لگاریتمی در تابع استاندارد دیوار است. در نتیجه اینطور می توان بیان کرد که تمامی y^* ها در تابع استاندارد دیوار با مقدار y_1^* جایگزین خواهند شد.

$$y_1^* = \max(y_{limt}^*, y^*) \quad (11-3)$$

$$y_{limt}^* = 11.225 \quad (12-3)$$

۳-۳-۲-۳- تابع دیواره توسعه یافته^۱

این روش مناسب برای جریان های رینولدز پایین و همچنین پدیده های پیچیده نزدیک دیوار مدل مناسبی تشخیص داده شده است. برای استفاده از این مدل باید مش نزدیک دیوار مش ریزی در نظر گرفته شود.

۳-۳- مدل سازی فاز پراکنده

ردیابی ذرات جامد گام دوم در مدل سازی فرسایش بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. بعد از اینکه میدان جریان سیال با استفاده از رویکرد اویلری-لاگرانژی به همگرایی می رسد، فاز پراکنده از طریق ردیابی، تعداد مشخص از ذرات جامد حل می شود. یکی از فرضیات در مدل سازی فاز پراکنده این است که فاز دوم به صورت کسر حجمی از فاز اول در نظر گرفته می شود. با توجه به فرایند استخراج سیالات در صنایع آب، نفت و گاز، غلظت ذرات جامد تولید شده نسبت به سیال آب، نفت یا گاز بسیار کم

^۱ Enhanced Wall Treatment

است. در نتیجه از تاثیرات ذرات جامد بر روی سیال تولید شده، در روند شبیه سازی صرف نظر می شود. به همین دلیل از روش کوپل یک طرفه^۱ که فرض می کند حضور ذرات جامد تاثیر کمی روی میدان جریان دارد به عنوان روشی جهت محاسبه مسیر ذرات جامد استفاده می شود. از مدل فاز پراکنده^۲ موجود در نرم افزار فلوئنت به عنوان مدلی برای محاسبه فرسایش ناشی از ذرات جامد می توان استفاده کرد.

فلوئنت مسیر ذرات جامد را با استفاده از یک رویکرد لاگرانژی که توسط حل کردن معادلات حاکم بر مسیر ذرات جامد بدست می آید حل می کند. معادلات حاکم بر مسیر ذرات جامد می تواند معادله گرادیان فشار، نیروی پسا، نیروی شناوری، و سایر موارد باشد.

فلوئنت مسیر ذرات جامد را به وسیله انتگرال گیری از معادله اندازه حرکت ذرات جامد در یک قالب لاگرانژی حل می کند.

$$\frac{P}{6} d_p^3 \rho_p \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} = \frac{P}{6} d_p^3 \rho_p F_D (\vec{V} - \vec{V}_p) + \frac{P}{6} d_p^3 \rho_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (13-3)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (14-3)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (15-3)$$

$$Re = \frac{\rho d_p (V_p - V)}{\mu} \quad (16-3)$$

a_1, a_2, a_3 مقادیر ثابتی هستند که بر اساس شکل ذرات جامد و اندازه آنها تعیین می شوند.

^۱ One-way Coupling

^۲ Discrete Phase Model

آشفته‌گی جریان سیال و نوسانات ناشی از آن بر روی مسیر ذرات جامد موثر هستند. به همین دلیل برای در نظر گرفتن این اثرات از مدل برخورد تصادفی^۱ گردابه- ذرات استفاده می کنند. این مدل فرض می کند که ذرات جامد از طریق گردابه های موجود در جریان آشفته حرکت می کنند. هر کدام از این گردابه ها که با ذرات جامد برخورد می کنند با استفاده از یک توزیع گوسی^۲ از نوسانات سرعت و یک مقیاس زمانی که طول عمر گردابه نامیده می شود مشخص می شود. این مدل در اصل انحراف ذرات جامد از مسیر خود را که ناشی از گردابه ها است محاسبه می کند. برای داشتن اطلاعات بیشتر از این موضوع می توان راهنمای ارائه شده در نرم افزار فلوئنت را مطالعه کرد. ذکر این نکته مهم است که در نظر گرفتن مدل ذرات – گردابه به طور مستقیم روی مسیریابی ذرات جامد تاثیر می گذارد و این می تواند منطقه پیش بینی فرسایش و نرخ فرسایش را تغییر دهد.

اثر متقابل ذرات جامد و دیوار به عنوان یک پدیده مهم در بحث فرسایش در نظر گرفته می شود. این اثر به صورت نسبت سرعت ذرات قبل از برخورد به دیواره جامد به سرعت ذرات بعد از برخورد به دیواره تعریف می شود.

$$e_n = \frac{V_{pn2}}{V_{pn1}}$$

$$e_n = \frac{V_{pt2}}{V_{pt1}}$$

V_{pn} و V_{pt} به ترتیب اجزای مماسی و عمودی سرعت ذرات جامد هستند. زیرنویس ۱ اشاره به برخورد و زیرنویس ۲ اشاره به بعد از برخورد دارد.

تاباکوف و گرنت [۴۳] ضرایبی تحت عنوان e_t و e_n ارائه دادند که این ضرائب مقدار تغییرات اندازه حرکت ذرات جامد را بعد از برخورد به دیواره جامد در میزان فرسایش در نظر می گیرند.

^۱ Stochastic Tracking

^۲ Gosman

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha + 1.56\alpha^2 - 0.49\alpha^3 \quad (17-3)$$

$$e_t = 0.998 - 1.66\alpha + 2.11\alpha^2 - 0.76\alpha^3$$

α : زاویه برخورد ذرات به سطح برحسب رادیان

۳-۴- مدل سازی فرسایش

آخرین گام در مدل سازی فرسایش براساس دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه فرسایش می باشد. نرم افزار فلوئنت این قابلیت را در اختیار کاربر قرار می دهد تا مدل های تجربی مختلف را با استفاده از CFF و یا با استفاده از روش توابع تعریف شده کاربر (UDF) به نرم افزار فلوئنت وارد کند. CFF همچنین این قابلیت را به کاربر می دهد تا میزان نرخ فرسایش را در واحدهای دلخواه بدست آورد.

فصل چہارم: نتائج

۴-۱-مقدمه:

در این فصل به توضیحاتی در مورد روش عددی مورد استفاده جهت شبیه سازی، نحوه گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان و موارد دیگر خواهیم پرداخت. جهت شبیه سازی کار حاضر از نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. در تحقیق حاضر ابتدا شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد در هندسه مورد مطالعه با توجه به میدان جریان همگرا شده انجام می شود و نتایج با نتایج تجربی [۳۸] جهت اعتبار سنجی مقایسه می شود. در ادامه با تغییر اندازه المان های شبکه در بخشهای طولی، عرضی و تغییر ضخامت اولین سلول مجاور دیوار، اثرات پالایش شبکه را بر روی نتایج فرسایش نشان خواهیم داد.

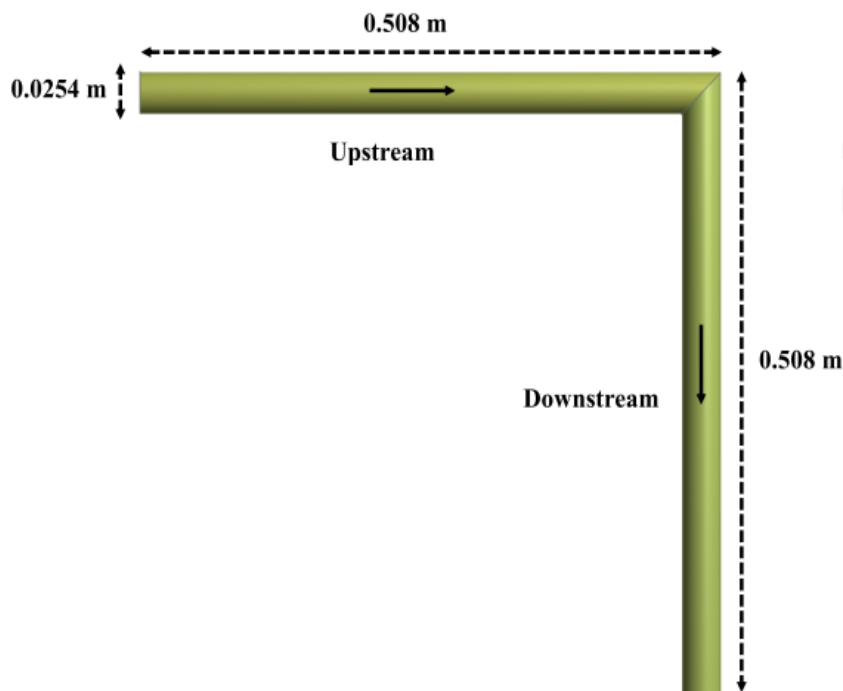
۴-۲-خلاصه ای از نرم افزار انسیس فلوئنت

این نرم افزار یکی از قدرتمند ترین نرم افزار ها جهت شبیه سازی مسائل گوناگون در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، محسوب می شود. اولین نسخه از این نرم افزار در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است که کاربرد آن محدود به حل سازمان یافته بوده است. با گذشت زمان نسخه هایی با قابلیت های بیشتر ارائه شد. نسخه های جدید این امکان را به کاربر می دادند تا مسائل با شبکه های سازمان نیافته را نیز تحلیل و بررسی کند.

۴-۳-تعریف مسئله:

با توجه به توضیحات داده شده در [۳۸] هندسه مورد مطالعه یک زانویی ۹۰ درجه می باشد که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در این هندسه قسمت عمودی و افقی دارای طول ۰,۵۰۸ متر و قطر ۰,۰۲۵۴ متر می باشند. جهت اعتبار سنجی نتایج این شبیه سازی عددی از نتایج [۳۸] استفاده شده است. در روند شبیه سازی از سیال آب با سرعت ۱۵,۲۰ متر بر ثانیه در ورودی به عنوان فاز حامل

استفاده می شود و همچنین غلظت فاز پراکنده ناشی از ذرات جامد ۱ درصد جرم فاز حامل در نظر گرفته شده است. به همین دلیل می توان در روند شبیه سازی از اثر متقابل ذرات جامد روی سیال حامل صرف نظر کرد. جنس ذرات مورد استفاده کوارتز نیمه گرد با قطر ۲۵,۴ میکرومتر و دانسیته ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد.



شکل ۴-۱: هندسه زانویی ۹۰ درجه مورد استفاده در شبیه سازی عددی

در روند شبیه سازی کار حاضر ابتدا میدان جریان سیال حل شده است و سپس فاز پراکنده به میدان حل اضافه می شود. هر بار که ذرات جامد به دیواره هندسه برخورد می کنند اطلاعاتی از قبیل سرعت ذرات، زاویه برخورد ذرات از هر سلول محاسباتی استخراج شده و جهت محاسبه فرسایش در رابطه فرسایش قرار داده می شود. معادلات مختلفی جهت محاسبه نسبت فرسایش ارائه شده است. دقت این معادلات با توجه به تنوع و اهمیت متغیرهایی است که در معادله در نظر گرفته می شود. از مهمترین این متغیرها می توان به سرعت ذره، شکل ذره و زاویه برخورد ذرات به دیواره اشاره کرد. ژانک و همکاران [۱]

معادله فرسایشی ارائه داده اند که میزان فرسایش را در مقایسه با نتایج تجربی برای ذرات جامد تا ۲۵ میکرومتر مقدار خوبی پیش بینی می کند. این معادله فرسایش برای فلز اینکونل ۷۱۸ با دانسیته ۸۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ارائه شده است. مشخصات شیمیایی این فلز در جدول ۴-۱ ارائه شده است. رابطه ژانک و همکاران براساس رابطه اهلرت در مرکز تحقیقات خوردگی دانشگاه تولسا توسعه پیدا کرده است. جزئیات این معادله در رابطه ۴-۱ به نمایش درآمده و برای تعیین مقادیر ثابت A_i از جدول ۴-۲ استفاده می شود. برای استفاده از رابطه ۴-۱ در نرم افزار فلوئنت برای محاسبه فرسایش از قابلیت معادله عمومی فرسایش در نرم افزار استفاده شده است. همچنین برای محاسبه نرخ فرسایش به صورت ضخامت از دست رفته می توان از رابطه ۴-۳ استفاده کرد.

$$ER = C(BH)^{-0.59} F_s V_p^n F(\theta) \quad (1-4)$$

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^5 A_i \theta^i \quad (2-4)$$

$$\Delta h = \frac{ER_{tot} \dot{m}_{sand} t}{\rho_{wall} A_{cell}} \quad (3-4)$$

در رابطه (۳-۴) $\dot{m}_{sand}$ نشان دهنده دبی جرمی ناشی از ذرات جامد، A_{cell} مساحت هر سلول محاسباتی، t مدت زمان آزمایش، BH سختی برینل، F_s ضریب شکل ذرات جامد که برای ذرات نیمه گرد برابر ۰.۵۳ در نظر گرفته می شود، V_p سرعت ذرات جامد (m/s)، $n = ۲.۴۱$ ثابت تجربی، θ زاویه برخورد ذرات جامد با دیوار بر حسب رادیان، $C = ۲.۱۷ * ۱۰^{-۷}$ ، ER نسبت جرم مواد کنده شده از سطح به جرم ذرات برخورد کننده به سطح (kg/kg) و Δh میزان ضخامت از دست رفته بر حسب متر می باشد.

تمامی معادلات ذکر شده در بالا در یک قالب اویلری_لاگرانژی حل می شوند. شبیه سازی به صورت

پایا انجام می شود و معادلات ناویر استوکس در یک قالب اویلری حل می شوند. برای حل فاز پراکنده از رویکرد لاگرانژی استفاده شده است. امکان استفاده از رویکرد اویلری برای شبیه سازی فاز پراکنده وجود ندارد، زیرا در رویکرد اویلری سرعت متوسط ذرات جامد هنگام برخورد به دیواره در نظر گرفته می شود به همین دلیل نتایج فرسایش اشتباه خواهد بود. به جهت توسعه یافتگی جریان سیال در داخل حوزه حل، طول بالادست و پایین دست ۲۰ برابر قطر لوله تعیین شده است. برای شبیه سازی آشفتگی از مدل کا-اپسیلون اصلاح شده^۱ استفاده شده است. جهت گسسته سازی معادلات حاکم از دقت مرتبه دوم^۲ استفاده شده است و برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^۳ استفاده شده است.

درمدلسازی فاز پراکنده ذرات جامد با برخورد به سطح مقداری از انرژی خود را به صورت گرما یا تغییر شکل از دست می دهند به همین جهت در این تحقیق برای محاسبه این میزان انرژی از دست رفته از مدل گرانت و تاباکوف [۴۳] استفاده شده است. جزئیات کامل در مورد این مدل در فصل مروری بر کار های پیشین ارائه شده است.

جدول ۴-۱: ضرایب شیمیایی فلز مورد آزمایش

Alloy	%	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	C	Mn	Si	S	Cu	Al	Ti
718	Min.	50	17	balance	2.8	4.75							0.2	0.7
	Max.	55	21		3.3	5.5	1	0.08	0.35	0.35	0.01	0.3	0.8	1.15

^۱ Realizable K-epsilon

^۲ Upwind second order

^۳ Simple

جدول ۴-۲: مقادیر ثابت A_i [۱]

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
5.40	-10.11	10.93	-6.33	1.42

۴-۴- تعیین شرایط مرزی

در مرز ورودی جریان سیال در جهت بردار نرمال سطح ورودی با سرعت ۱۵,۲۰ متر بر ثانیه جریان پیدا می کند. در مرز خروجی نیز از فشار اتمسفر بهره گرفته شده است و همچنین در دیواره ها از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است.

به جهت محاسبه تغییرات در ناحیه مجاور دیوار از رویکرد تابع دیواره مقیاس پذیر^۱ استفاده شده است. فاصله اولین سلول مجاور به دیوار در این روش برابر ۲۵,۴ میکرومتر در نظر گرفته شده است در نتیجه میزان Y^+ برابر ۱۴ بدست می آید که این مقدار از ۱۱,۲۲۵ بزرگتر است، در نتیجه میزان تعیین شده برای فاصله اولین سلول مجاور از دیوار مناسب است. با استفاده از روابط ارائه شده در زیر فاصله اولین سلول مجاور به دیوار بدست می آید.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (4-4)$$

$$C_f = (2 \log_{10} Re_x - 0.65)^{-2.3} \quad \text{for}$$

$$Re < 10^9$$

$$T_w = C_F \frac{1}{2} \rho U^2$$

$$u^* = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}}$$

^۱ Scalable Wall Function

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u^*}$$

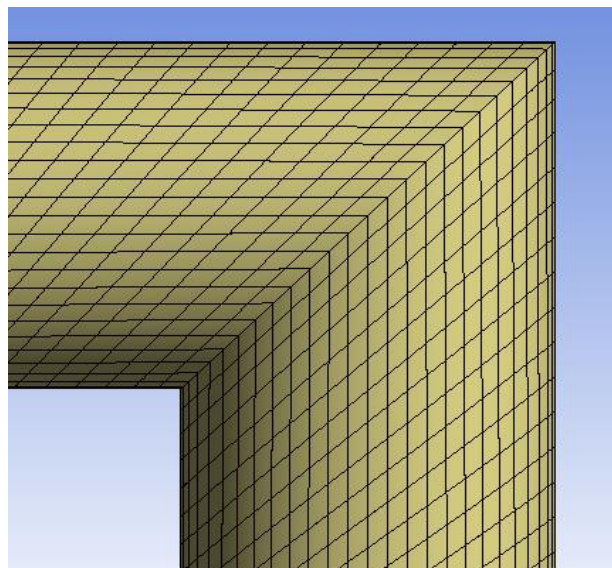
$$y^+ = 14$$

جهت بررسی شرط توسعه یافتگی جریان سیال در طول لوله از نسبت زیر استفاده شده است که در آن مقدار x بیانگر طول لوله و D نشان دهنده قطر لوله می باشد. در تحقیق حاضر این نسبت به جهت توسعه یافتگی جریان ۲۰ برابر قطر لوله در نظر گرفته شده است.

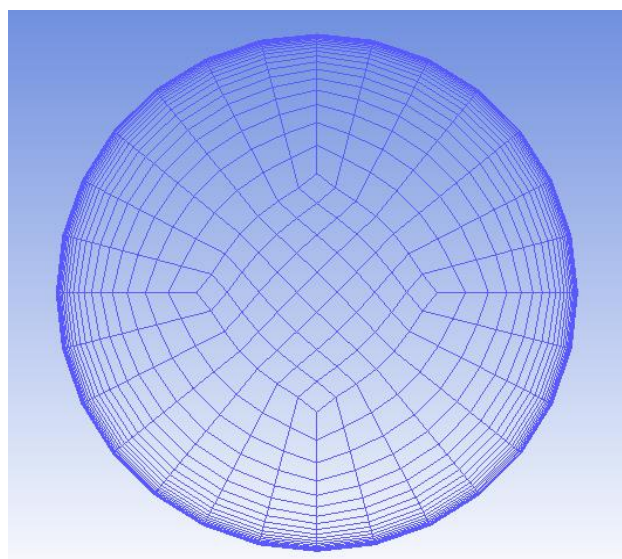
$$10 \leq \frac{x}{D} \leq 60 \quad (5-4)$$

۴-۵- شبکه بندی :

شبیه سازی با توجه به شبکه منظم هندسی انجام شده است. در شکل ۴-۲ و ۴-۳ شبکه های مورد استفاده به نمایش در آمده اند. در این شبکه ها که به جهت شبیه سازی اولیه فرسایش انجام شده است اندازه المان ها در جهت طولی ۱۰۰ برابر قطر ذره در نظر گرفته شده است. در نهایت یک شبکه با تعداد ۲۷۵۴۱۲ المان جهت شبیه سازی فرسایش استفاده شده است. در شبکه تعیین شده تعداد المان ها در مقطع عرضی برابر ۶۷۲ المان می باشد.



شکل ۴-۲: آرایش شبکه در قسمت زانویی



شکل ۴-۳: آرایش شبکه در مقطع عرضی

۴-۶- استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

با توجه به نوع هندسه ای که جهت شبیه سازی استفاده می شود کاربر می تواند تصمیم بگیرد که کدام نوع از شبکه قابل استفاده جهت مش بندی هندسه مورد مطالعه است. شبکه مورد استفاده می تواند

در دو قالب منظم و غیر منظم تعریف شود. تفاوت عمده این دو قالب شبکه بندی در نحوه برقراری ارتباط بین سلول های مجاور یکدیگر می باشد. شبکه ساختار یافته که در کار حاضر از آن استفاده شده است برای هندسه های پیچیده کاربرد ندارد و کاربرد آن محدود به هندسه هایی است که شکل هندسی مشخصی دارند.

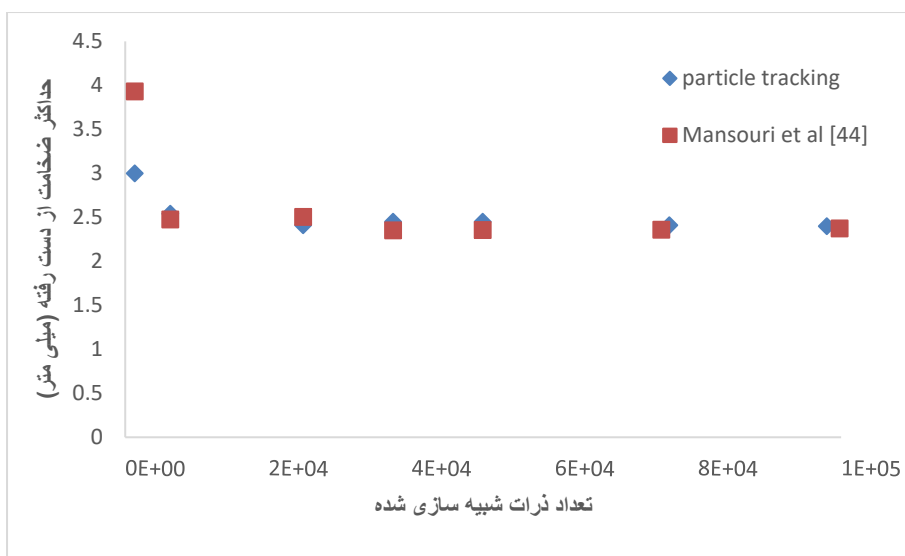
در ادامه استقلال حل عددی از شبکه را مورد بررسی قرار می دهیم. با توجه به اینکه هر دو فاز سیال حامل آب و فاز پراکنده ذرات جامد تحت تاثیر تراکم شبکه بندی هستند در نتیجه بایستی از پایدار شدن هر دو فاز در ارتباط با تراکم شبکه اطمینان حاصل کنیم. متغیری که جهت استقلال حل عددی از شبکه در نظر گرفته می شود بایستی متغیری باشد که با مقصود ما از حل مسئله ارتباط مستقیم داشته باشد که در اینجا این متغیر ذرات جامد است. به همین دلیل در اینجا برای استقلال حل عددی از شبکه، سرعت ذرات جامد به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است و نتایج آن در جدول ۳-۴ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۴ : استقلال حل عددی از شبکه با استفاده از سرعت ذرات جامد

تعداد سلولها	حداکثر سرعت ذره جامد (m/s)	درصد تغییرات
۳۷۵۲۰	۲۴,۳۵	
۹۶۷۶۸	۳۱,۸۳	۲۳,۴۹
۱۷۸۰۰۰	۳۲,۱۴	۰,۹۶
۲۷۵۰۰۰	۳۲,۲۵	۰,۳
۵۶۴۰۰۰	۳۲,۳۳	۰,۲

۴-۷- صحت سنجی نتایج شبیه سازی عددی

به جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی عددی، مقدار ماکزیمم ضخامت از دست رفته ناشی از فرسایش را از مقاله [۴۴] مورد بررسی قرار داده ایم. برای محاسبه ماکزیمم میزان فرسایش از رابطه ۳-۴ استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی با مقادیر شبیه سازی عددی مقاله [۴۴] در شکل ۴-۴ مقایسه و میزان خطا بر حسب درصد در جدول ۴-۴ به نمایش درآمده است.



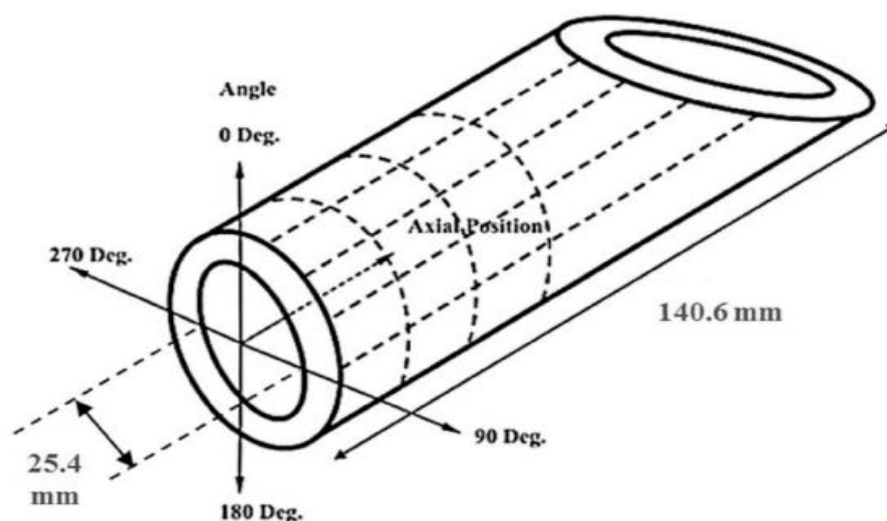
شکل ۴-۴: تعداد ذرات جامد مورد استفاده جهت شبیه سازی

جدول ۴-۴: مقایسه خطای نتایج بدست آمده و نتایج [۴۴] بر حسب درصد

تعداد ذرات	۱۳۳۳	۶۲۸۸	۲۴۹۰۰	۳۷۴۰۰	۴۹۹۰۰	۷۴۸۰۰	۱۰۰۰۰۰
درصد خطا	۲۳	۲/۷۵	۳/۹۸	۴	۳/۶	۲	۱/۰۵

۴-۸- بررسی نتایج شبیه سازی عددی

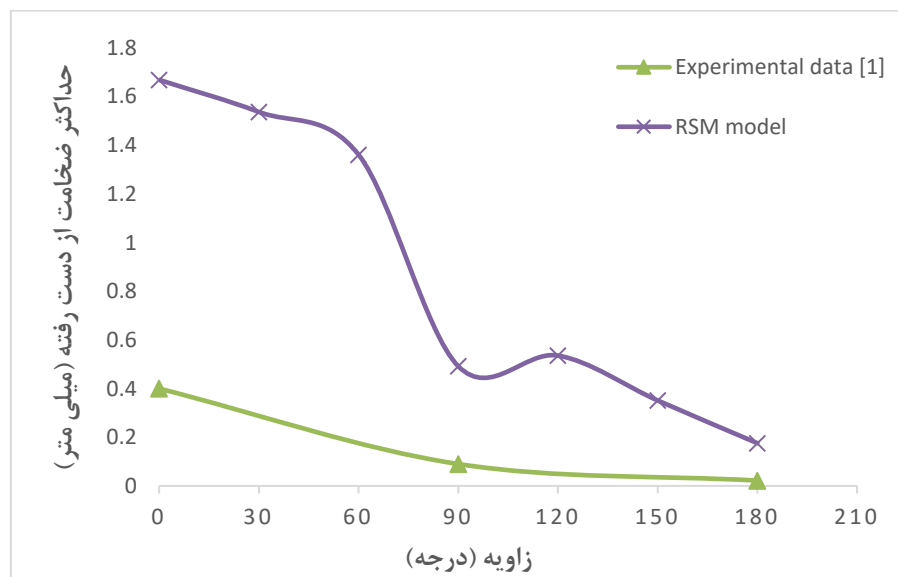
نتایج حاصل از این پژوهش در دو بخش ارائه می شود. در بخش اول میزان فرسایش برای ذرات جامد ریز سیلیکا با قطر ۲۵ میکرومتر و دانسیته ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تحت میدان جریان همگرا شده ارائه می شود و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی [۳۸] مقایسه می شود. در بخش دوم اثرات اصلاح شبکه بندی هندسه مورد مطالعه بر روی نتایج فرسایش ارائه می شود و هدف معرفی یک شبکه بهینه برای بهبود نتایج شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد می باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در کار تجربی [۳۸] حداکثر میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد در مدت زمان آزمایش ۱۰ ساعت، در لوله پایین دست زانویی ۹۰ درجه اتفاق می افتد. در نتیجه در این پژوهش عددی، میزان فرسایش ناشی از ذرات جامد به صورت ضخامت از دست رفته بر روی لوله پایین دست زانویی ۹۰ درجه در محدوده زاویه ۰ تا ۱۸۰ درجه، مطابق شکل ۴-۵ و در مدت زمان ۱۰ ساعت اندازه گیری و با نتایج تجربی مقایسه می شود.



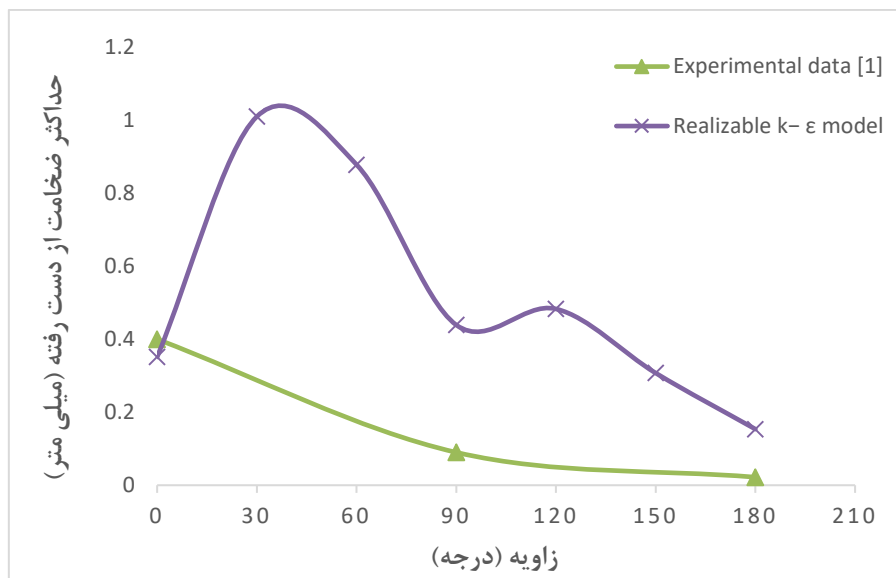
شکل ۴-۵: تصویری شماتیک از نمونه تحت آزمایش [۳۸]

۴-۸-۱- بررسی مدل های آشفستگی جهت پیش بینی فرسایش

با توجه به خصوصیات جریان های آشفته، مدل های مختلفی جهت شبیه سازی میدان های جریان آشفته معرفی شده اند. عمومی ترین مدل آشفتگی که در شبیه سازی جریان های آشفته در صنایع مختلف کاربرد دارد مدل آشفتگی کا-اِپسیلون است. از فرضیات مهم در این مدل این است که نوسانات سرعت جریان در تمامی جهات یکسان فرض می شود و به عبارت دیگر جریان ایزوتروپ در نظر گرفته می شود. فرض در نظر گرفته شده در مدل کا-اِپسیلون در میدان های جریان چند فاز و پیچیده می تواند باعث بروز نتایج متفاوتی شود. در نتیجه به جهت رفع این نقص بایستی معادلات انتقال را برای تک تک تنش های رینولدز حاصل از جریان سیال، استخراج نموده و سپس حل کنیم، که این روند منجر به معرفی مدل تنشهای رینولدز می شود. در نتیجه در این کار پژوهشی، میزان ضخامت از دست رفته ناشی از ذرات جامد را با استفاده از مدل کا اِپسیلون اصلاح شده و مدل تنشهای رینولدز حل میکنیم و با مقایسه نتایج بدست آمده بهینه ترین مدل جهت شبیه سازی را معرفی کنیم. خطوط جریان، خطوط مسیر ذرات جامد و کانتور فرسایش در زانویی مورد مطالعه به ترتیب در شکل ۴-۸ و ۹-۴ و ۱۰-۴ به نمایش در آمده اند.

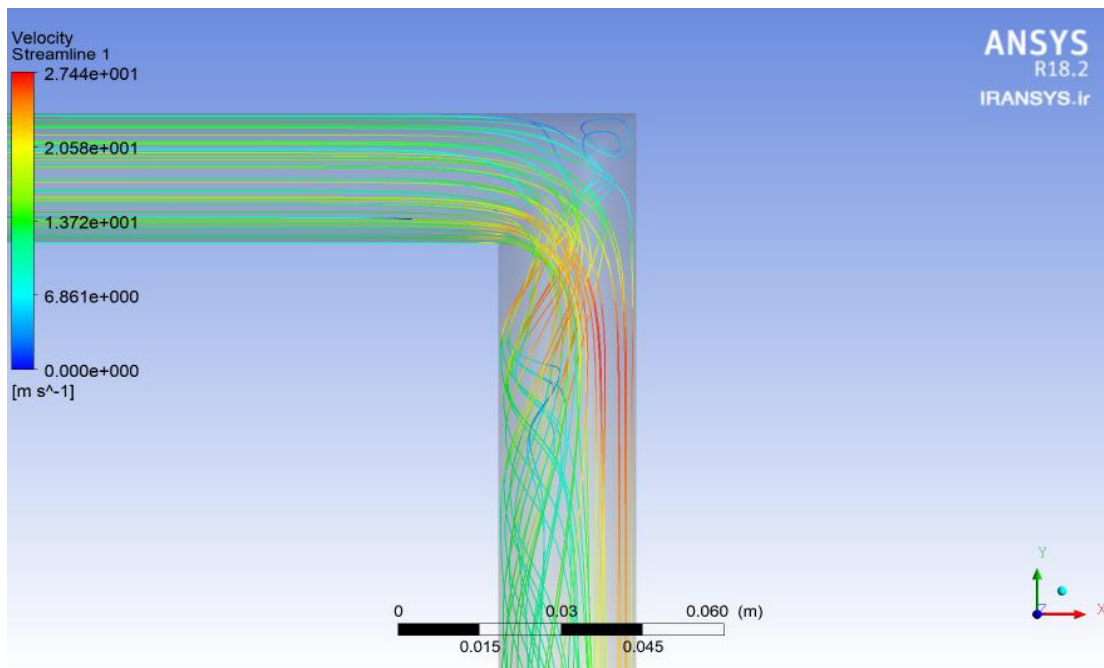


شکل ۴-۶: مدل تنش رینولدز جهت پیش بینی فرسایش

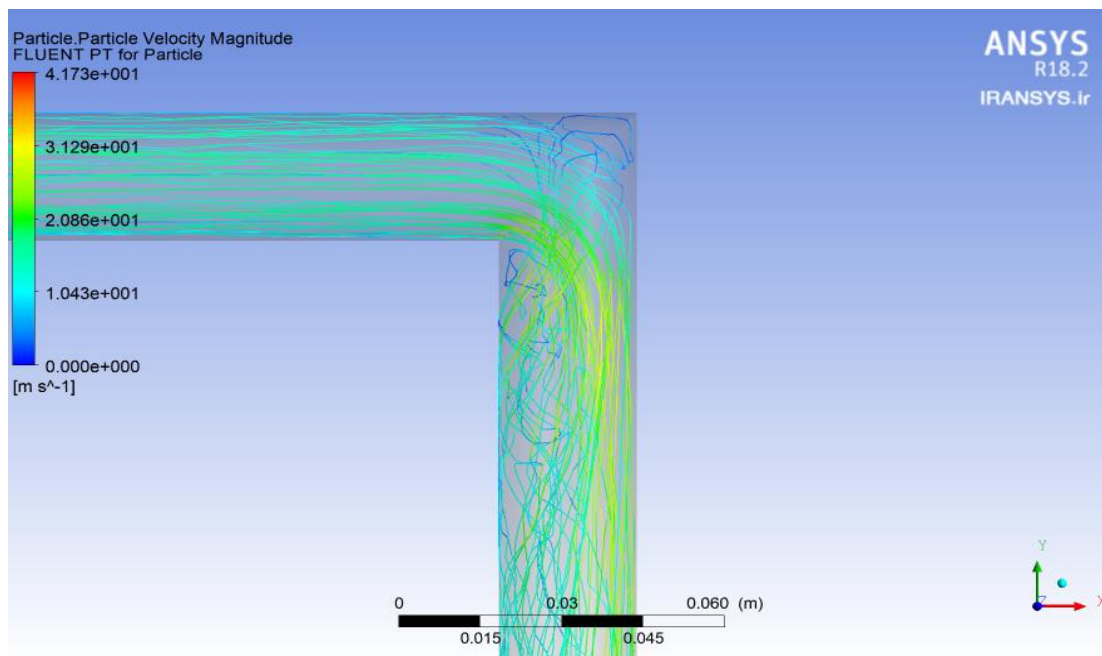


شکل ۴-۷: مدل کا-اِپسیلون اصلاح شده جهت پیش بینی فرسایش

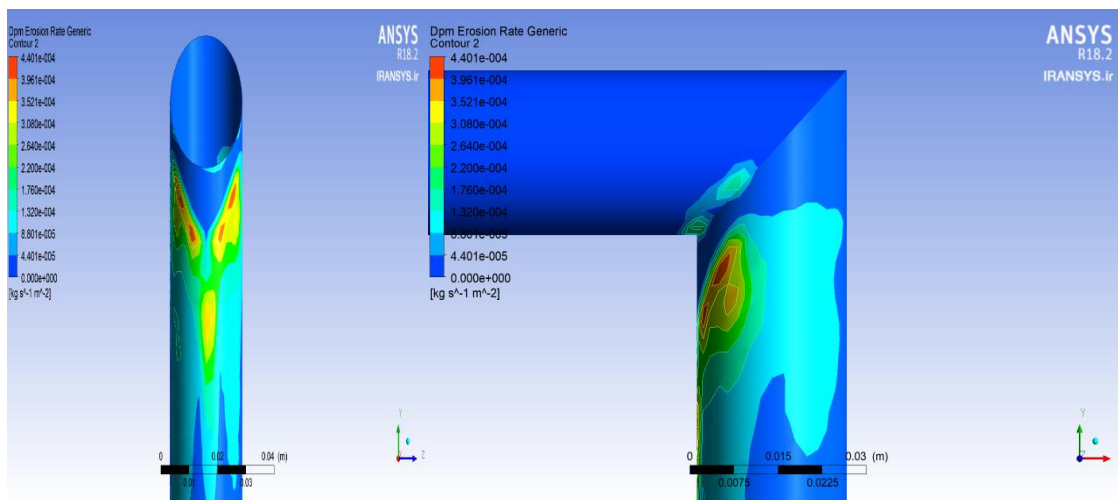
با توجه به نتایج بدست آمده در شکل های ۴-۶ و ۴-۷ مدل تنش رینولدز حداکثر میزان فرسایش را در زاویه صفر درجه با اختلاف ۳۰۰ درصدی نسبت به نتایج تجربی [۳۸] پیش بینی می کند. در صورتی که مدل کا-اِپسیلون اصلاح شده حداکثر میزان فرسایش را در زاویه ۳۰ درجه با اختلاف ۱۵۰ درصدی نسبت به نتایج تجربی [۳۸] پیش بینی می کند. در حالت کلی می توان به این نتیجه رسید که مدل تنش رینولدز در مقایسه با نتایج تجربی محل رخ دادن حداکثر میزان فرسایش را به درستی پیش بینی می کند اما از نظر میزان فرسایش اختلاف دو برابری در مقایسه با مدل کا-اِپسیلون اصلاح شده نشان می دهد. علاوه بر مورد ذکر شده به دلیل اقتصادی بودن مدل کا-اِپسیلون اصلاح شده نسبت به مدل تنش های رینولدز، مدل کا-اِپسیلون به عنوان مدل بهینه جهت شبیه سازی فرسایش در نظر گرفته می شود. و در ادامه از این مدل جهت پیش بینی فرسایش ناشی از ذرات جامد استفاده می شود.



شکل ۴-۸: خطوط جریان سیال



شکل ۴-۹: خطوط مسیر ذرات جامد



شکل ۴-۱۰: کانتورهای فرسایش

۴-۸-۲- مطالعه پالایش شبکه

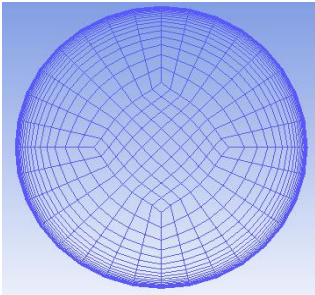
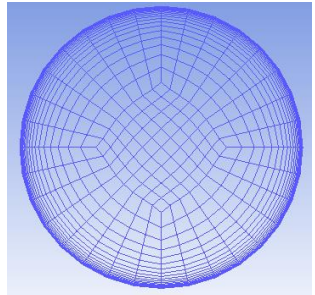
فرسایش ناشی از ذرات جامد به طور مستقیم تحت تاثیر تغییرات اندازه المان ها می باشد. حتی زمانی که حل عددی ما به استقلال حل عددی از شبکه می رسد [۴۵]. بنابراین در این بخش یک مطالعه کامل پالایش شبکه برای هندسه مورد مطالعه تحت مدل آشفتگی کا-اِپسیلون اصلاح شده، انجام می شود. با تغییر اندازه المان ها و نحوه توزیع شبکه در جهات محوری و مقطعی و لایه مرزی اثر پیکربندی شبکه را در میزان فرسایش بررسی می کنیم.

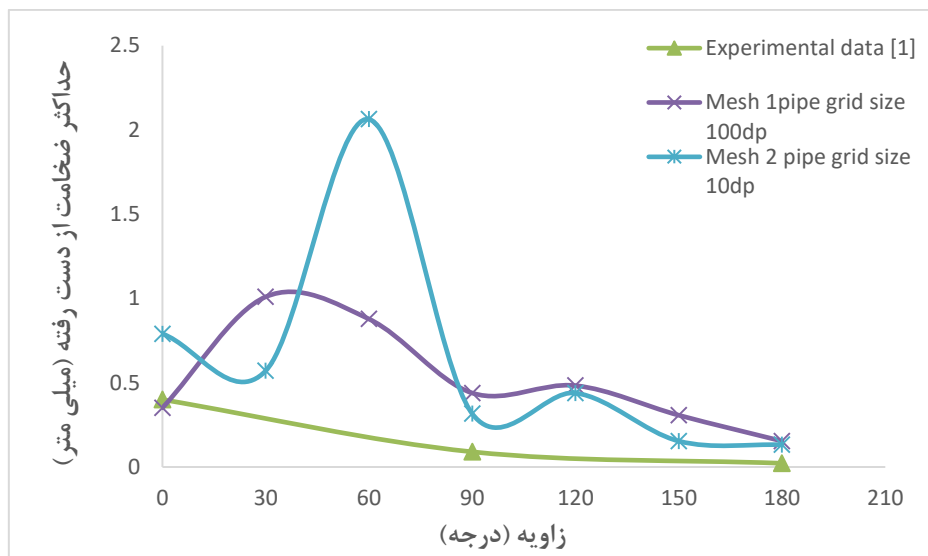
۴-۸-۲-۱- بررسی تاثیر اندازه شبکه در جهت طولی در نرخ فرسایش

در این قسمت اندازه المان های شبکه در جهت طول هندسه زانویی تغییر می کند. و سایر قسمت ها طبق حالت مش اولیه بوده که در قسمت قبل برای شبیه سازی فرسایش استفاده شده است. به جهت بررسی واضح اثر تغییرات شبکه، اندازه مش در جهت طولی یک مرتبه ۱۰۰ برابر قطر ذره و بار دیگر ۱۰

برابر قطر ذره جامد در نظر گرفته شده است. جزئیات در جدول ۴-۴ به نمایش درآمده است.

جدول ۴-۴: جزئیات اصلاح مش در جهت طولی لوله

شماره مش	تعداد کل المان ها	شکل مش در مقطع عرضی	تعداد المان ها در مقطع عرضی	ضخامت لایه مرزی (میکرومتر)	اندازه المان ها در جهت طول لوله (میکرومتر)
۱	۲۷۵۰۰۰		۶۷۲	۲۵	۲۵۴۰
۲	۲۰۳۳۴۴۰		۶۷۲	۲۵	۲۵۴



شکل ۴-۱۱: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه به اصلاح شبکه در جهت طولی لوله

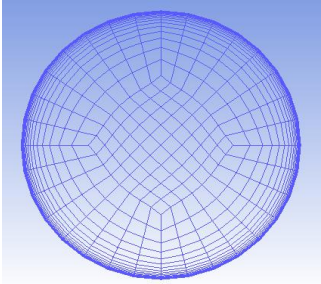
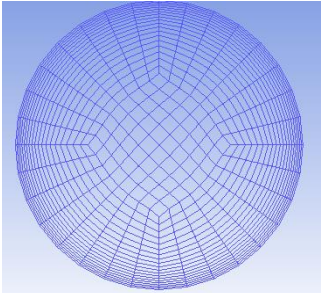
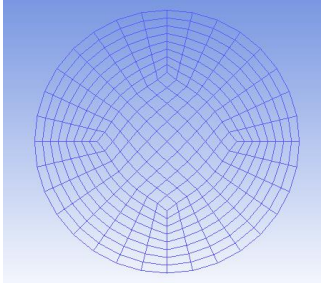
با توجه به شکل ۴-۱۱ در Mesh ۱ حداکثر میزان فرسایش در زاویه ۳۰ درجه رخ می دهد و یک اختلاف ۱۵۰ درصدی را در مقایسه با نتایج کار تجربی [۳۸] نشان می دهد. در Mesh ۲ ماکزیمم میزان فرسایش در زاویه ۶۰ درجه رخ می دهد و در مقایسه با نتایج تجربی اختلاف ۴۰۰ درصدی را در مقایسه با نتایج تجربی نشان می دهد. با توجه به نتایج بدست آمده این نتایج قابل استنباط است که ریز کردن مش در جهت طولی هندسه لوله زانویی باعث پیش بینی بیش از حد میزان فرسایش نسبت به نتایج تجربی، در مقایسه با مش درشت می شود. و همچنین افزایش تعداد المان ها نه تنها باعث افزایش دقت محاسبات عددی نمی شود، بلکه از نقطه نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نخواهد بود.

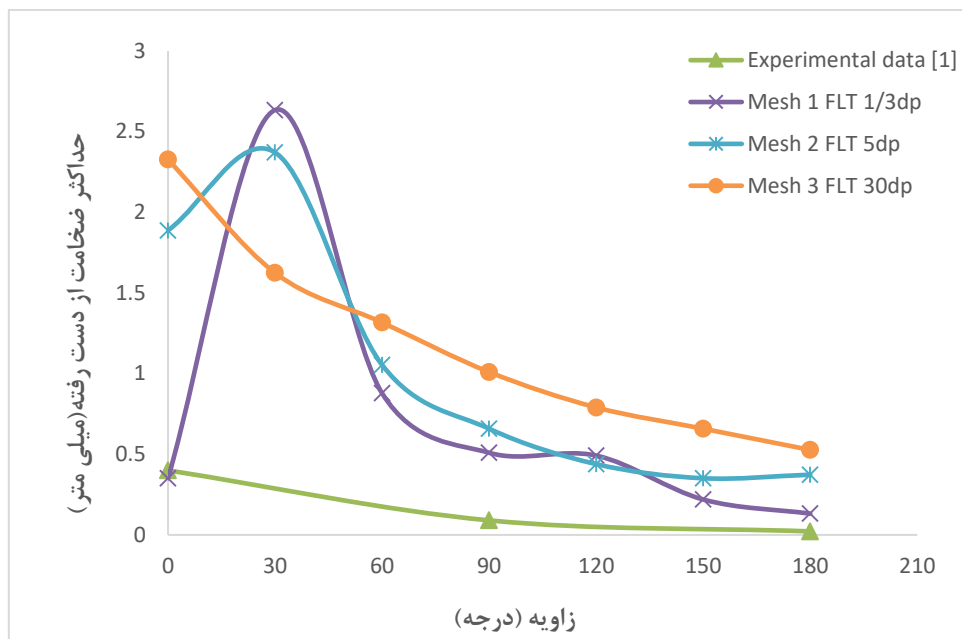
۴-۲-۸-۲- بررسی تاثیر ضخامت لایه مرزی در نرخ فرسایش

در این قسمت اثر تغییر ضخامت لایه مرزی روی میزان فرسایش بررسی می شود. بایستی توجه شود که اثر تغییر ضخامت فقط روی لایه مرزی اول مجاور دیواره اعمال می شود. در نتیجه شکل مقطع عرضی شبکه ثابت بوده و تغییری نخواهد کرد. به جهت بررسی بهتر تغییرات میزان فرسایش ناشی از تغییرات ضخامت لایه مرزی، میزان تغییرات به ترتیب برابر خواهد بود با ۰.۳، ۰.۵، ۳۰ برابر قطر ذره جامد.

جزئیات بیشتر در جدول ۴-۵ بیان شده است.

جدول ۴-۵: جزئیات اصلاح مش در لایه مرزی

شماره مش	تعداد کل المان ها	شکل مش در مقطع عرضی	تعداد المان ها در مقطع عرضی	ضخامت لایه مرزی (میکرومتر)	اندازه المان ها در جهت طول لوله (میکرومتر)
۱	۲۷۵۰۰۰		۶۷۲	۹	۲۵۴۰
۲	۲۷۵۰۰۰		۶۷۲	۱۲۷	۲۵۴۰
۳	۱۴۴۰۰۰		۳۲۰	۷۶۲	۲۵۴۰



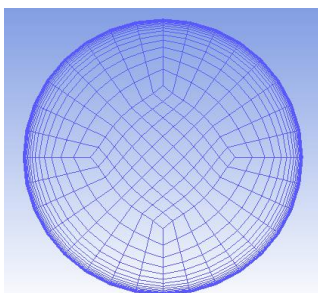
شکل ۴-۱۲: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه به اصلاح شبکه در لایه مرزی

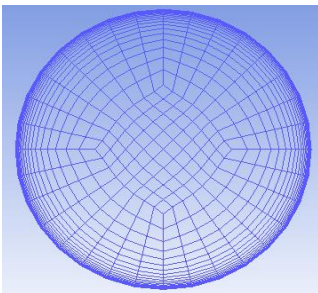
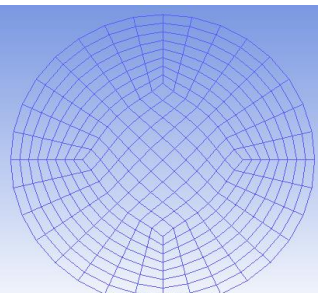
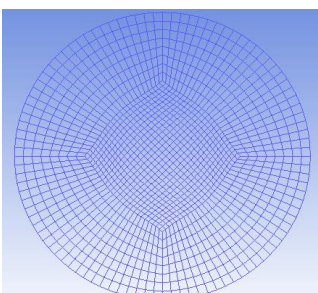
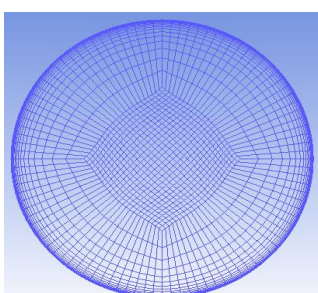
با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۴-۱۲، Mesh ۱، ۲ نشان می‌دهد که کاهش ضخامت لایه مرزی مجاور دیواره، باعث می‌شود که حداکثر میزان فرسایش در زاویه ۳۰ درجه رخ دهد، در حالی که حداکثر میزان فرسایش ناشی از کار تجربی [۳۸] در زاویه صفر درجه رخ می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج Mesh ۳ می‌توان اینطور بیان کرد که افزایش ضخامت اولین لایه مرزی مجاور دیواره، ماکزیمم میزان فرسایش را در زاویه صفر درجه پیش بینی می‌کند. که در مقایسه با نتایج تجربی مناسب ترین حالت می‌تواند باشد. در حالت کلی می‌توان به این نتیجه رسید که، با توجه به نوع تابع دیواره ای که جهت شبیه سازی ناحیه نزدیک دیواره استفاده می‌شود، مقدار y^+ ناشی از تغییر ضخامت لایه مرزی باید به اندازه ای باشد که علاوه بر لزجت مولکولی، لزجت گردابه ای نیز در ناحیه نزدیک دیوار در نظر گرفته شود. در این حالت موقعیت ماکزیمم میزان فرسایش ناشی از شبیه سازی عددی با نتایج تجربی همگرایی مناسب تری نشان می‌دهد.

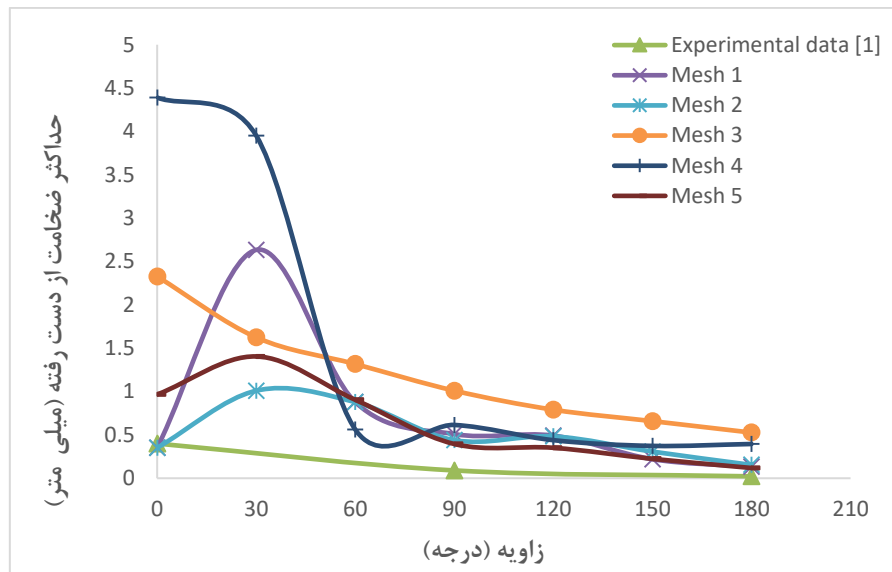
۴-۸-۲-۳- بررسی اصلاح شبکه در مقطع عرضی در نرخ فرسایش

در کلیه اصلاحات شبکه که در قسمت های قبلی انجام شده است، اندازه المان ها در مقطع عرضی در مرکز هندسه درشت در نظر گرفته شده اند. در این قسمت اثر ریز کردن المان های شبکه در مرکز هندسه زانویی در نتایج فرسایش در مقایسه با حالتی که المان های مرکز هندسه درشت در نظر گرفته شده اند بررسی می شود. با توجه به اینکه تغییرات ضخامت لایه مرزی تاثیر مشخصی در روند فرسایش داشته است، در این قسمت نیز به جهت دستیابی به یک مش بهینه اثرات تغییر اندازه المان ها در مرکز هندسه با توجه به تغییرات ضخامت لایه مرزی بیان شده است. جزئیات در جدول ۴-۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۱۰، ۳، ۲، ۱ Mesh مشهایی هستند که در قسمت های قبل بررسی شده اند و هدف از نمایش آنها در این بخش فقط به جهت مقایسه بوده است. Mesh ۴، ۵ مشهایی هستند که در آنها اندازه المان ها در مرکز هندسه زانویی اصلاح شده است.

جدول ۴-۶: جزئیات اصلاح شبکه در مقطع عرضی لوله

اندازه المان ها در جهت طول لوله (میکرومتر)	ضخامت لایه مرزی (میکرومتر)	تعداد المان ها در مقطع عرضی	شکل مش در مقطع عرضی	تعداد کل المان ها	شماره مش
۲۵۴۰	۹	۶۷۲		۲۷۵۰۰۰	۱

۲	۲۷۵...		۶۷۲	۲۵	۲۵۴.
۳	۱۴۴...		۳۲.	۷۶۲	۲۵۴.
۴	۶۴۵...		۱۴۲۵	۷۶۲	۲۵۴.
۵	۱۱۳....		۲۵۲۵	۹	۲۵۴.



شکل ۴-۱۳: نتایج پیش بینی فرسایش با توجه اصلاح شبکه در مقطع عرضی لوله

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۴-۱۳ در Mesh ۵ که حالت اصلاح شده Mesh ۱ می باشد، سلول ها در مرکز هندسه ریز تر در نظر گرفته شده اند. در Mesh ۵ ماکزیمم میزان فرسایش در زاویه ۳۰ درجه رخ می دهد، و در مقایسه به نتایج تجربی اختلاف ۲۵۰ درصدی را نشان می دهد در حالتی که در Mesh ۱ این اختلاف در مقایسه با نتایج تجربی برابر ۵۲۵ درصد بوده است. در حالت کلی می توان به این نتیجه رسید که ریز کردن مش در مرکز هندسه زانویی در حالتی که ضخامت لایه مرزی اول مجاور دیواره برابر ۰,۳ قطر ذره جامد بوده است، باعث بهبود نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی [۳۸] می شود.

در Mesh ۴ که حالت اصلاح شده Mesh ۳ می باشد، سلول ها در مرکز هندسه بسیار ریزتر نسبت به Mesh ۳ در نظر گرفته شده اند و ماکزیمم میزان فرسایش مطابق Mesh ۳ در زاویه صفر درجه رخ می دهد. ماکزیمم میزان فرسایش در Mesh ۴ در مقایسه با نتایج تجربی اختلاف ۱۰۲۵ درصدی نشان می دهد. در صورتی که در Mesh ۳ این اختلاف در مقایسه با نتایج تجربی برابر ۵۰۰ درصد بوده است. با توجه به مطالب ارائه شده در این بخش، می توان در حالت کلی به این نتیجه رسید که با توجه به

محدودیت های کدهای عددی ریز کردن اندازه المان ها در مرکز هندسه باعث می شود که گردابه های ناشی از جریان های آشفته به اندازه المان ها در مرکز هندسه محدود شوند و با توجه به روش ردیابی تصادفی که در آن ذرات جامد از طریق گردابه ها انتقال پیدا می کنند، محدود شدن گردابه ها به اندازه المان ها در مرکز هندسه، از انتقال آزادانه ذرات جامد به سمت دیواره جلوگیری می کند. در نتیجه تعداد ذرات جامد برخورد کننده به دیواره هندسه کاهش می یابد که در نهایت کاهش میزان فرسایش را در پی خواهد داشت، این پدیده در Mesh ۳ در مقایسه با Mesh ۵ به وضوح قابل مشاهده است.

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

با بررسی مدل های مختلف آشفستگی جهت تعیین میزان فرسایش، به این نتیجه رسیدیم که مدل تنش های رینولدز میزان فرسایش را از نقطه نظر موقعیت رخ دادن ماکزیمم میزان فرسایش در مقایسه با نتایج تجربی به خوبی پیش بینی می کند، اما از نظر اجماع میزان فرسایش، نتایج حاصل از مدل تنش های رینولدز مطابقت خوبی با نتایج تجربی [۳۸] نشان نمی دهد. اما مدل آشفستگی کا اپسیلون از لحاظ اجماع میزان فرسایش، در مقایسه با نتایج تجربی نتایج قابل قبول تری ارائه می دهد. در نتیجه مدل کا اپسیلون مناسب ترین مدل برای شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز می تواند باشد.

ریز کردن سلولهای شبکه در جهت طول لوله به طور چشمگیری میزان فرسایش حداکثر را افزایش می دهد، در نتیجه اصلاح شبکه در جهت طولی لوله نه تنها باعث افزایش دقت محاسبات عددی نمی شود بلکه متغیر فرسایش را در مقایسه با نتایج تجربی افزایش داده و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نیز نخواهد بود.

با مطالعه اصلاح ضخامت لایه مرزی می توان به این نتیجه رسید که نتایج فرسایش ناشی از ذرات جامد با توجه به سیال حامل آب، می تواند از تغییرات ضخامت لایه مرزی تاثیر بگیرد. بنابراین درشت در نظر گرفتن ضخامت لایه مرزی می تواند محل رخ دادن حداکثر میزان فرسایش را در مقایسه با نتایج تجربی [۳۸] نسبت به حالتی که ضخامت لایه مرزی کوچک در نظر گرفته می شود، بهبود بخشد.

در نهایت با توجه به اصلاح شبکه در مرکز هندسه لوله زانویی با توجه به اصلاح ضخامت لایه مرزی نتیجه می گیریم که اصلاح مش در مرکز هندسه در حالتی که ضخامت لایه مرزی کمترین مقدار در نظر گرفته شده باعث بهبود قابل توجهی در نتایج فرسایش می شود. اما در حالتی که ضخامت لایه مرزی در بزرگترین حالت قرار دارد، اصلاح شبکه در مرکز هندسه نه تنها باعث بهبود نتایج فرسایش نمی شود بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نخواهد بود. در این قسمت هدف از بیان نتایج بر اساس اصلاح لایه مرزی یک عملکرد محافظه کارانه می باشد، تا اینگونه تصور کرد که تلاش کافی در جهت بهتر مدل کردن

آشفتگی در مجاور دیوار شده است. در حالت کلی می توان اشاره کرد که تمامی نتایج بدست آمده در این قسمت ناشی از محدودیت کدهای عددی رایج، جهت شبیه سازی فرسایش ناشی از ذرات جامد ریز می باشد.

۵-۲-پیشنهادات

- در نظر گرفتن اثر اصلاح شبکه در مرکز هندسه بر روی ذره منفرد جامد، نیاز به بررسی دارد.
- تحقیقات بیشتری در ارتباط با انواع مدل های آشفتگی و تاثیر آنها بر روی شبیه سازی فرسایش نیاز است.
- جهت بهبود نتایج فرسایش، نیاز است که مدل های تجربی بازبینی شوند.

- [1] Y. Zhang, E. P. Reuterfors, B. S. McLaury, S. A. Shirazi, and E. F. Rybicki, "Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows," *Wear*, vol. 263, no. 1–6 SPEC. ISS., pp. 330–338, 2007
- [2] S. Srinivasan and R. O. Scattergood, "Effect of erodent hardness on erosion of brittle materials," *Wear*, vol. 128, no. 2, pp. 139–152, Dec. 1988,
- [3] M. Grötzbach, "Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials. Von Alan V. Levy, 220 Seiten, ASM International, Materials Park, Ohio 1995, £ 84.00, ISBN 0-87170-519-2," *Mater. Corros. und Korrosion*, vol. 47, no. 12, pp. 715–715, Dec. 1996,
- [4] "Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-Plastic Response Régime on JSTOR."
- [5] "Erosion of surfaces by solid particles," *Wear*, vol. 3, no. 2, pp. 87–103, Mar. 1960,
- [6] "A two stage mechanism of ductile erosion," *Wear*, vol. 23, no. 1, pp. 87–96, Jan. 1973,
- [7] "Some observations on the erosion of ductile metals," *Wear*, vol. 19, no. 1, pp. 81–90, Jan. 1972,
- [8] C. Smeltzer, M. Gulden, and W. Compton, "Mechanisms of metal removal by impacting dust particles," 1970, Accessed: Dec. 24, 2020. [Online].
- [9] A. J. Burnett, S. R. De Silva, and A. R. Reed, "Comparisons between 'sand blast' and 'centripetal effect accelerator' type erosion testers," *Wear*, vol. 186–187, no. PART 1, pp. 168–178, Jul. 1995,
- [10] J. A. Laitone, "Aerodynamic effects in the erosion process," *Wear*, vol. 56, no. 1, pp. 239–246, Sep. 1979
- [11] 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," in *Wear*, Jul. 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 95–101,
- [12] I. Finnie, G. R. Stevick, and J. R. Ridgely, "The influence of impingement angle on the erosion of ductile metals by angular abrasive particles," *Wear*, vol. 152, no. 1, pp. 91–98, Jan. 1992,
- [13] Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, and M. Matsumura, "The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact," *Wear*, vol. 203–204, pp. 573–579, Mar. 1997,
- [14] Y. I. 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,” in *Wear*, Jul. 2005, vol. 259, no. 1–6, pp. 102–109,
- [15] B. S. McLaury, J. Wang, S. A. Shirazi, J. R. Shadley, and E. F. Rybicki, “Solid Particle Erosion in Long Radius Elbows and Straight Pipes,” Jan. 1997,
 - [16] J. Salik and D. H. Buckley, “Effects of erodant particle shape and various heat treatments on erosion resistance of plain carbon steel,” *undefined*, 1981.
 - [17] A. V. Levy and P. Chik, “The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel,” *Wear*, vol. 89, no. 2, pp. 151–162, Aug. 1983,
 - [18] A. K. Cousens and I. M. Hutchings, “A critical study of the erosion of an aluminium alloy by solid spherical particles at normal impingement,” *Wear*, vol. 88, no. 3, pp. 335–348, Jul. 1983,
 - [19] G. P. Tilly, “A two stage mechanism of ductile erosion,” *Wear*, vol. 23, no. 1, pp. 87–96, Jan. 1973,
 - [20] A. V. Levy, “The solid particle erosion behavior of steel as a function of microstructure,” *Wear*, vol. 68, no. 3, pp. 269–287, May 1981,
 - [21] C. E. Smeltzer, M. E. Gulden, and W. A. Compton, “Mechanisms of metal removal by impacting dust particles,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 92, no. 3, pp. 639–652, Sep. 1970,
 - [22] F. Pourahmadi and J. A. C. Humphrey, “Modelling solid-fluid turbulent flows with application to predicting erosive wear,” *Math. Model.*, vol. 6, no. 1, p. 82, 1985,
 - [23] I. Finnie and D. H. McFadden, “On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence,” *Wear*, vol. 48, no. 1, pp. 181–190, May 1978,
 - [24] J. H. Neilson and A. Gilchrist, “Erosion by a stream of solid particles,” *Wear*, vol. 11, no. 2, pp. 111–122, Feb. 1968,
 - [25] B. S. McLaury, S. A. Shirazi, J. R. Shadley, and E. F. Rybicki, “How Erosion-Corrosion Patterns in a Choke Change as Material Losses in the Choke Progress,” Jan. 1996.
 - [26] “Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel (Book, 1994) [WorldCat.org].”
 - [27] M. M. Salama and E. S. Venkatesh, “Evaluation of API RP 14E erosional velocity limitations for offshore gas wells,” in *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, Jan. 1983, vol. 1983–May, pp. 371–376,
 - [28] H. Arabnejad, A. Mansouri, S. A. Shirazi, and B. S. McLaury, “Evaluation of solid particle erosion equations and models for oil and gas industry applications,” in *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Sep. 2015, vol. 2015–January, pp. 3603–3621,

- [29] H. Arabnejad, A. Mansouri, S. A. Shirazi, and B. S. McLaury, "Development of mechanistic erosion equation for solid particles," *Wear*, vol. 332–333, pp. 1044–1050, 2015
- [30] D. Pandya, B. Dennis, and R. Russell, "OMAE2014-23136," pp. 1–10, 2016.
- [31] V. Kannojiya, M. Deshwal, and D. Deshwal, "Numerical Analysis of Solid Particle Erosion in Pipe Elbow," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5021–5030, 2018,
- [32] M. Parsi, A. Jatale, M. Agrawal, and P. Sharma, "Effect of surface deformation on erosion prediction," *Wear*, vol. 430–431, pp. 57–66, Jul. 2019,
- [33] K. G. Jordan, "Erosion in Multiphase Production of Oil & Gas," Jan. 1998.
- [34] B. S. McLaury, E. F. Rybicki, S. A. Shirazi, and J. R. Shadley, "How Operating and Environmental Conditions Affect Erosion," Jan. 1999.
- [35] B. S. McLaury and S. A. Shirazi, "An alternate method to api rp 14e for predicting solids erosion in multiphase flow," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 122, no. 3, pp. 115–122, Sep. 2000,
- [36] S. A. Shirazi, J. R. Shadley, B. S. McLaury, and E. F. Rybicki, "A procedure to predict solid particle erosion in elbows and tees," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 117, no. 1, pp. 45–52, Feb. 1995,
- [37] M. Parsi *et al.*, "Characterizing slug/churn flow using wire mesh sensor," in *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, Dec. 2014, vol. 1D,
- [38] R. Russell, B. Oil, S. Shirazi, J. Macrae, and B. Oil, "SPE 90734 A New Computational Fluid Dynamics Model to Predict Flow Profiles and Erosion Rates in Downhole Completion Equipment," 2004.
- [39] "Predicting solid particle erosion resulting from turbulent fluctuations in oilfield geometries."
- [40] "Development, validation, and application of a three-dimensional, cfd-based erosion prediction procedure (Book, 2000) [WorldCat.org]."
- [41] X. Chen, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Application and experimental validation of a computational fluid dynamics (CFD)-based erosion prediction model in elbows and plugged tees," *Comput. Fluids*, vol. 33, no. 10, pp. 1251–1272, Dec. 2004,
- [42] Y. Zhang, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Improvements of particle near-wall velocity and erosion predictions using a commercial CFD code," *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 131, no. 3, pp. 0313031–0313039, Mar. 2009,
- [43] G. Grant and W. Tabakoff, "Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles," *J. Aircr.*, vol. 12, no. 5, pp. 471–478, May 1975,
- [44] A. Mansouri, H. Arabnejad, S. Karimi, S. A. Shirazi, and B. S. McLaury, "Improved CFD

- modeling and validation of erosion damage due to fine sand particles,” *Wear*, vol. 338–339, pp. 339–350, 2015,
- [45] F. N. Fard, B. McLaury, and S. Shirazi, “Effect of Cell Size on Particle-Eddy Interaction and Erosion Predictions Using Commercial CFD Software (FLUENT),” in *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 2012, vol. 1, no. PARTS A AND B, pp. 1287–1295,

Abstract

One of the major problems in the water and oil and gas industry is the production of solid sand particles along with the extraction process. The amount of solid particles produced in the extraction process can cause major problems such as erosion, pipe blockage and environmental problems. Erosion is a mechanical process in which the surface materials of the pipe are eroded by the collision of solid particles. Various parameters affect the erosion phenomenon, which can be summarized as particle size, particle velocity, solid particle shape, turbulence Flow and other things mentioned.

In the present study, a comprehensive method for predicting erosion caused by solid particles based on computational fluid dynamics in a 90 degree sharp elbow geometry has been performed. All the results obtained in the present numerical work have been validated with experimental results [1]. . First, to validate the present numerical work, erosion simulation is performed for a stable grid, and finally an appropriate turbulence model is selected to simulate erosion.

The following is a comprehensive study of the grid used in geometry to predict erosion caused by fine solid particles. In this process, it is determined that the erosion caused by fine solid particles is significantly affected by the grid configuration . Finally, this research proposes a meshing strategy that has the ability to optimize the erosion caused by fine solid particles according to common numerical codes.

The results show that different turbulence models can predict different results for erosion caused by fine solid particles and multiphase currents. Also, according to the obtained results, it can be said that in the situation that

the changes in the flow field are independent of the mesh, the simulation results of erosion caused by solid particles can be directly affected by the network configuration in different parts of the elbow geometry.

Keywords: Computational fluid dynamics, Two-phase fluid-particle flow, Erosion ratio



Shahrood University of Technology

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

**Numerical modeling and validation of erosion caused by solid
particles at a 90 degree angle**

By :

Mahmoud Avaridoghaei

Supervisor:

Dr. Ramin amini

January 2021