





دانشکده مهندسی مکانیک

گروه: مکانیک حرارت و سیالات

مدل سازی عددی تاثیر حرکت ذرات داخل

مجرا بر میزان خوردگی

استاد راهنما:

دکتر علی سر رشته داری

دانشجو:

امین قاسمی

رساله جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور 1396

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امین قاسمی

تحت عنوان: مدل سازی عددی تاثیر حرکت ذرات داخل مجرا بر میزان خوردگی

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 علی سررشته داری
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر علی خالقی
			نام و نام خانوادگی : دکتر محسن نظری
			نام و نام خانوادگی :

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید

با سپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

و دوستان عزیزم آقایان مهندس محمد شکوریان پور، سید یاسر حسینی، جمال

مرادی، حمید اسماعیلی، احسان لکزیان، سید احسان آل نبی، مهدی کرد مصطفی،

مهران حسینی و ...

و با تشکر ویژه از حمایت‌های برادر و خواهر عزیزم

تعهد نامه

اینجانب **امین قاسمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "مدل سازی عددی تاثیر حرکت ذرات داخل مجرا بر میزان خوردگی" تحت راهنمایی دکتر علی سررشته داری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 بافت های 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده) 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.

چکیده

یکی از مشکلات بزرگ صنایع نفت و گاز، ذرات شنی است که همراه با نفت و گاز استخراج می‌شود، میزان شن استخراج‌شده در فرآیند استخراج نفت و گاز بسیار بااهمیت است، چون می‌تواند مشکلات فراوانی را در این صنایع به وجود آورد. در میان این همه مشکلات سه مشکل اصلی آن عبارت‌اند از: افت فشار، انسداد لوله و فرسایش. مشکل آخر یک فرآیند مکانیکی پیچیده است که در آن مواد سطح دیوار خطوط لوله به علت تکرار برخورد ذرات شن با دیواره لوله کنده می‌شود. آگاهی راجع به پارامترهای حاکم بر پدیده فرسایش و اینکه چگونه می‌توان آن را مدل‌سازی کرد مهم است. در کار حاضر عوامل کلیدی مؤثر بر فرسایش توصیف و معادلات فرسایش موجود بررسی شده است. علاوه بر آن مدل‌های مکانیکی و تجربی برای پیش‌بینی فرسایش در خطوط لوله مورد بحث قرار گرفته است. این مدل‌ها توسط شرکت‌های نفت و گاز به منظور بررسی ماکزیمم ضخامت از دست رفته‌هایجادشده در صنایع استفاده می‌شوند.

هدف از این تحقیق بررسی عددی حرکت ذره در داخل زانویی و تأثیر تغییر پارامترهایی نظیر سرعت ذرات، اندازه ذرات و... بر میزان خوردگی مربوط به آن است. این نوع از جریان در اکثر جریان‌های داخل لوله‌ها و کانال‌ها در صنایع گوناگون از جمله در صنایع نفت و گاز و نیروگاهی دیده می‌شود. ، هندسه مورد مطالعه در کار حاضر یک زانویی قائمه با جریان پایا، سه بعدی و مانند اکثر جریان‌های صنعتی آشفته است. میدان جریان پیوسته از حل معادلات بقای جرم و ممنتوم به دست می‌آید. سپس مسیر حرکت ذرات با استفاده از مدل ردیابی لاگرانژی ذره و با استفاده از کوپلینگ یک طرفه حاصل می‌شود. سرانجام، یک مدل خوردگی برای بررسی پدیده خوردگی حاصل از ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از فرضیات دیگر کار حاضر، نیمه گرد در نظر گرفتن ذره است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در میان پارامترهای مورد بررسی اندازه و سرعت ذرات بیشترین تأثیر را بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته دارد، به طوری که با افزایش دو برابری اندازه ذرات ماکزیمم ضخامت از دست

رفته حدود 25 درصد کاهش و با کاهش $2/5$ برابری اندازه ذرات ماکزیمم ضخامت از دست رفته حدود 80 درصد افزایش می یابد این تغییرات به دلیل گیر کردن ذرات کوچک در گردابه های جریان و برخورد مکرر آن ها به دیوار سبب افزایش ماکزیمم ضخامت از دست رفته می شود. هنگامی که مقدار سرعت ذرات را به نصف کاهش می دهیم ماکزیمم ضخامت از دست رفته حدود 80 درصد کاهش می یابد و با افزایش دو برابری سرعت ذرات ماکزیمم ضخامت از دست رفته حدود 430 درصد افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، جریان دو فاز سیال-ذره، مدل ردیابی لاگرانژی ذره، مدل خوردگی، نسبت فرسایش، کوپلینگ یک طرف

1- فصل اول: مقدمه	1
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مشکلات استخراج شن	۳
۱-۲-۱- راهکارهای پیشگیری از آسیب فرسایش	۴
۱-۱-۲-۱- مزایا	۴
۲-۱-۲-۱- معایب	۵
۳-۱- راهکارهای مدیریت فرسایش	۵
۴-۱- اهمیت کار حاضر	۶
2- فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین	7
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- مکانیزم فرسایش ذرات جامد	۸
۱-۲-۲- پارامترهای مهم در پیش‌بینی فرسایش ذرات جامد	۱۰
۲-۲-۲- خواص سیال	۲۰
۳-۲-۲- ویژگی‌های دیوار	۲۱
۴-۲-۲- سرعت برخورد ذرات	۲۲
۵-۲-۲- زاویه برخورد ذرات	۲۲
۶-۲-۲- تأثیر دما	۲۴
۷-۲-۲- برخورد ذره با ذره	۲۴
۳-۲- مدل‌سازی فرسایش ذرات جامد	۲۴
۱-۳-۲- معادلات فرسایش	۲۴
۲-۳-۲- پیش‌بینی تجربی فرسایش در خطوط لوله	۴۳
۳-۳-۲- مدل‌های مکانیکی برای پیش‌بینی فرسایش در جریان‌های تک فاز	۴۷
۴-۳-۲- مکانیزم مدل‌ها برای پیش‌بینی فرسایش در جریان چند فاز	۵۵
۱-۴-۳-۲- جریان حبایی	۶۲
۲-۴-۳-۲- جریان حلقوی	۶۳
۳-۴-۳-۲- جریان حلزونی	۶۶
۴-۴-۳-۲- جریان لخته‌ای	۶۹
3- فصل سوم: معادلات حاکم	71
۱-۳- مقدمه	۷۲

- ۲-۳- دینامیک سیالات محاسباتی ۷۲
- ۱-۲-۳- معادلات پیوستگی و ناویر استوکس در فرم کلی ۷۵

4- فصل چهارم: نتایج 85

- ۱-۴- مقدمه ۸۶
- ۲-۴- معرفی نرم افزار انسیس فلوئنت ۸۶
- ۳-۴- تعریف مسئله ۸۷
- ۴-۴- معادلات حاکم ۹۲
- ۵-۴- شرایط مرزی ۹۴
- ۶-۴- شبکه بندی ۹۴
- ۷-۴- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی ۹۷
- ۸-۴- اعتبار سنجی ۱۰۰
- ۹-۴- بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی ۱۰۱

5- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات 107

- ۱-۵- نتیجه گیری ۱۰۸
- ۲-۵- پیشنهادات ۱۰۸

فهرست شکل‌ها

- شکل 2-1: مکانیزم فرسایش مواد انعطاف‌پذیر [12]..... 9
- شکل 2-2: مکانیزم فرسایش در مواد ترد [13]..... 10
- شکل 2-3: نسبت فرسایش برحسب اندازه ذرات و سرعت برخورد ذرات [17]..... 12
- شکل 2-4: اثر اندازه شن بروی میزان فرسایش در سرعت جریان 3,62 متر بر ثانیه و غلظت 20 درصد [18]..... 13
- شکل 2-5: اثر اندازه ذرات بروی فرسایش، تعداد ذرات برخوردکننده و انرژی جنبشی برخورد بروی AA 6063 باوجود غلظت 20 درصد سیلیکا و در سرعت 3 متر بر ثانیه و در دو زاویه برخورد 30 و 90 درجه [21] و [22]..... 14
- شکل 2-6: اثر سختی ساینده بروی رفتار فرسایش الف [15] AISI 1020 ب [25] WC-12CO 17
- شکل 2-7: میزان فرسایش مواد مختلف، انواع زاویه برخورد ذرات، سرعت برخورد 153 متر بر ثانیه و شن سیلیکون کاربید [39]..... 23
- شکل 2-8: شماتیک ناحیه سکون در هندسه برخورد مستقیم [83]..... 48
- شکل 2-9: شماتیک ناحیه سکون در زانویی و سه‌راهی [83]..... 49
- شکل 2-10: الگوهای اصلی جریان در لوله افقی [12]..... 60
- شکل 2-11: الگوهای اصلی جریان در لوله عمودی [12]..... 61
- شکل 3-1: سه‌گام شبیه‌سازی فرسایش؛ مدل‌سازی جریان، ردیابی ذرات و محاسبه فرسایش [12]..... 83
- شکل 4-4: خطوط جریان 99
- شکل 4-5: مسیر ذرات 99
- شکل 4-6: نمودار مقادیر مقاله و مقادیر به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی‌ها 101
- شکل 4-7: اثر تغییر اندازه ذرات بر نسبت فرسایش 102
- شکل 4-8: اثر تغییر چگالی ذرات بر نسبت فرسایش 103
- شکل 4-9: اثر تغییر سرعت ذرات بر نسبت فرسایش 104
- شکل 4-10: اثر تغییر انرژی جنبشی جریان بروی نسبت فرسایش 106

فهرست جداول

جدول 1-2: ذرات ساینده و نسبت فرسایش فولاد AISI 1020	16
جدول 2-2: مروری بر تحقیقات پیشین	54
جدول 1-4: ثوابت معادلات بکار رفته	89
جدول 2-4: مقایسه سرعت خروجی در چهار نوع شبکه‌بندی به همراه خطای نسبی	97
جدول 3-4: مقایسه خطای مقادیر بدست آمده و مقادیر مقاله مورد نظر (درصد)	100

فهرست علائم و نشانه‌ها

a, b	
a_i	ثوابت
A	ضریب جبران
A	ثابت تجربی زاویه برخورد
A_{pipe}	سطح مقطع لوله
b	ثابت خواص مواد موردنظر
B	توان جبران
BH	سختی برینل مواد موردنظر
c	کسر برش ذرات در یک رفتار ایده ال
C	ثابت وابسته به دمای تنش جریان
C_p	گرمای ویژه ماده موردنظر
$C_{1,2,3,..}$	ثوابت
C_D	ضریب پسا
C_μ	ثابت مدل توربولانسی
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
d_p	قطر ذرات
D	قطر لوله
D_{ref}	قطر مرجع لوله معادل با 1 اینچ
d_0	قطر آستانه ذرات که پایین تر از این هیچ فرسایشی حساب نمی‌شود
d'	قطر استاندارد ذرات
$D_{1,2,...}$	ثوابت شکست
e	ضرایب جبران

e_n	ضریب جبران عمودی
e_t	ضریب جبران مماسی
E	کسر افزایشی قطره مایع در هسته گازی جریان حلقوی
E_p	مدول الاستیک ذرات
ER	میزان فرسایش
E_t	مدول الاستیک سطح
E_e	مدول الاستیک مؤثر
F	کسر حجم ازدست‌رفته به علت میانگین مکانیزم ورقه ورقه شدن
$F(t)$	عدد ثابت برخورد
$F(z)$	متغیر تابع در جهت Z
$F(\alpha)$	تابع زاویه برخورد ذرات
$F_{d,v}$	تکه‌تکه شدن برای شرایط تست
F_S	فاکتور شکل ذرات
F_D	نیروی پسا
F_V	نیروی جرم مجازی
F_P	نیروی تغییرات فشار
F_e	فاکتور مخصوص فرسایش
F_p	فاکتور نفوذ
F_M	ثابت تجربی بر اساس سختی ماده
$F_{r/D}$	فاکتور مطابق با شعاع زانویی
G	گرم وزن مولکولی موردنظر

g	شتاب جاذبه
H_p	سختی ذرات
H_t	سختی سطح
H_L	ارتفاع سیال
H_{LS}	ارتفاع سیال در حلزونی (لخته‌ها)
H_V	سختی ویکرز موردنظر
i	توان تجربی
l	نیروی گرانش یک‌ذره
k	ثابت توانی
$k_{1,2,3,...}$	ثابت تجربی
K	اجزای سرعت عمود به سطح که کمتر از این فرسایشی رخ نمی‌دهد در یک سختی معین
K_C	چقرمگی شکست
K_p	ثابت ویژگی‌های فیزیکی
K_S	ثابت فرسایش اتصالات
K_T	انرژی جنبشی منتقل شده از برخورد ذرات به سطح بر واحد جرم ذرات
$K_{1,2,3,...}$	ثوابت آماری
l_e	طول گردابه
L	عمق تغییر شکل
L_V	حجم ناحیه پلاستیک

L_{stag}	طول ناحیه سکون
L_{ref}	طول مرجع
L_S	طول جسم حلزونی
L_F	طول فیلم مایع
m_p	جرم یک ذره
M	جرم تمام ذرات برخوردکننده
$\dot{m}$	نسبت جرم ذرات در جسم حلزونی
$Mils$	میلی اینچ
n_h	توان کششی سختی
n_c	W_C ضریب کشش سختی لحظه‌ای در کشش
n_p	ثابت ویژگی‌های فیزیکی
n_S	ثابت شکل
$n_{1,2,...}$	ثابت شرایط برخورد
p	فشار
$\bar{p}$	تنش میانگین
p_n	جزء عمودی فشار
p_t	جزء مماسی فشار
P	ثابت تنش جریان پلاستیک
r	شعاع ذره
R	گردی ذرات
r_C	شعاع انحنای خم

Re_p	عدد رینولدز ذرات
Re_L	عدد رینولدز سیال
S	ثابت تجربی بین 0 تا 0,5
S_k	ثابت
S_m	ثابت وابسته به هندسه
SEM	تصویربرداری الکترو میکروسکوپی
T	چقرمگی
T_C	دمای دهانه
T_m	دمای ذوب
T_t	کل کار انجام شده به وسیله ساینده
T_x	کار انجام شده مماسی به وسیله ساینده
T_y	کار انجام شده عمودی به وسیله ساینده
T^*	دمای بی بعد
t	زمان
t_e	مقیاس زمان گردابه
TKE	انرژی جنبشی آشفتگی
T_{int}	زمان برخورد گردابه و ذره
t_{life}	طول عمر گردابه
t_{cross}	زمان عبور ذره از گردابه
V_{char}	سرعت مشخصه جریان
$V_{char-film}$	سرعت مشخصه جریان برای ذرات در فیلم مایع در جریان حلقوی

$V_{char-gas\ core}$	سرعت مشخصه جریان برای ذرات در هسته گازی در جریان حلقوی
$V_{Droplet}$	سرعت قطره در هسته گازی جریان حلقوی
V_e	سرعت فرسایشی
V_f	سرعت جریان مایع
V_{film}	سرعت فیلم مایع
V_f'	سرعت نوسانی
V_{G-Core}	سرعت هسته گاز در جریان حلقوی
V_{GLS}	سرعت گاز در جسم حلزونی
V_L	سرعت برخورد ذرات
V_{LLS}	سرعت مایع جسم حلزونی
V_m	سرعت مخلوط
V_p	سرعت ذرات
V_{pn}	جزء عمودی سرعت ذرات
V_{pt}	جزء مماسی سرعت ذرات
V_r	جزء موازی باقی مانده سرعت ذرات در زاویه برخورد کوچک
V_{ref}	سرعت استاندارد آزمایش ذرات
V_{SG}	سرعت سطحی گاز
V_{SL}	سرعت سطحی مایع
V_0	سرعت آستانه که پایین تر از این اعوجاج به طور کامل الاستیک است و بدون هیچ حادثه‌ای است
V'	سرعت برخورد استاندارد

W	نسبت نمونه(به وسیله وزن) در اندازه مشخص وسیعی بعد از آزمایش
W_0	نسبت نمونه(به وسیله وزن) در اندازه مشخص وسیعی قبل از آزمایش
$\dot{W}_p$	میزان جریان شن
W_e	عدد وبر اصلاح شده
χ_t	مختصه افقی
$\dot{\chi}'_t$	سرعت افقی نوک ذرات هنگام توقف برش
y_t	مختصه عمودی
z	توان انحراف تعیین شده از تغییرات کشش مربوط به هر برخورد

علائم یونانی

α	زاویه برخورد ذرات
α_g	کسر حجمی گاز
α_m	زاویه برخورد ماکزیمم فرسایش
α_{p0}	زاویه برخورد که در آن مؤلفه سرعت افقی صفر می شود وقتی که ذره از جسم برمی گردد
δ	فاکتور تغییر شکل پوشش، مقدار انرژی مورد نیاز برای حذف بر واحد حجم ماده
δ_{film}	ضخامت فیلم مایع در جریان حلقوی
ΔH_m	آنتالپی ذوب مورد نظر
ε_C	کشش معین
ε_0	شکل پذیری مواد
ε_D	میزان فرسایش به علت تغییر شکل
ε^*	مقدار کشش بدون بعد

ε_C	میزان فرسایش به علت برش
ε_m	مقدار فرسایش
ε_V	میزان فرسایش (حجم ازدست رفته بروی جرم برخورد)
ε_{VC}	حجم کنده شده ماده به وسیله مکانیزم برش
$\varepsilon_{VC1,2}$	حجم کنده شده ماده به وسیله مکانیزم برش 1 و 2
ε_{VP}	حجم کنده شده ماده به وسیله یک شن ساینده بر واحد جرم
ε_{VD}	حجم کنده شده به وسیله مکانیزم تغییر شکل
ε_{VT}	حجم نهایی کنده شده
ε_w	وزن کنده شده ماده مورد نظر
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	میزان فرسایش اولیه
$\hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2$	ماکزیمم فرسایش برای سرعت مرجع
ε_{90}	میزان فرسایش (حجم ازدست رفته بروی جرم برخورد)
θ	زاویه انحراف لوله
κ	نسبت نیروهای عمودی به افقی بروی ذرات
λ	فاصله بین مرکز جرم ذره و نقطه برخورد
μ	ضریب اصطکاک
μ_C	ضریب اصطکاک بحرانی
μ_f	ویسکوزیته سیال
μ_G	ویسکوزیته گاز
μ_L	ویسکوزیته مایع
μ_m	ویسکوزیته مخلوط سیال

μ_p	ضریب موقعیت ذرات
μ_t	ضریب موقعیت سطح
ρ_f	چگالی سیال
ρ_G	چگالی گاز
ρ_L	چگالی مایع
ρ_m	چگالی مخلوط سیال
ρ_p	چگالی ذرات
ρ_t	چگالی دیوار موردنظر
σ^*	نسبت تنش فشاری
χ	فاکتور برش پوشش، مقدار انرژی موردنیاز برای صدمه بر واحد حجم از یک سطح
ψ	نسبت عمق تماس به عمق برش
Ω_C	فشار بحرانی برای تشکیل لبه
$\Delta\Omega_m$	میانگین افزایش فشار ناشی از هر برخورد
ε	میزان پراکندگی آشفستگی
τ	زمان سکون ذرات
σ_n	انحراف استاندارد ضریب جبران در جهت عمودی
σ_t	انحراف استاندارد ضریب جبران در جهت افقی
α_g	کسر حجمی گاز
ΔP_{SB}	فشار قطره در جسم حلزونی
ΔP_{SU}	فشار قطره در یک حلزون
ξ	عدد تصادفی گوسی

1- فصل اول: مقدمه

1-1- مقدمه

جریان سیال در کانال‌ها و لوله‌ها، یک پدیده رایج در مهندسی می‌باشد که نیاز به توجه خاص دارد. برای به وجود آمدن یک جریان، باید اختلاف فشار بین ورودی و خروجی جریان وجود داشته باشد که این اختلاف فشار تعیین‌کننده دبی جریان می‌باشد. لذا یک طراح سیستم‌های جریان سیال نیازمند تخمین صحیح اختلاف فشار برای یک دبی مشخص می‌باشد تا از طریق آن قادر به تعیین پمپ مناسب برای سیستم مورد طراحی باشد. واضح است که یک تخمین غلط می‌تواند منجر به عمل کردن سیستم در شرایط غیر بهینه شود که حاصل آن عملکرد ضعیف سیستم و صرف هزینه بالا می‌باشد. در عمل، خطوط لوله همیشه مستقیم نبوده و لذا دارای جریان کاملاً توسعه‌یافته نمی‌باشند. یک سیستم جریان می‌تواند دارای انواع ورودی‌های، زانویی‌ها، شیرها و نیز تغییرات در سطح مقطع همانند انبساط یا انقباض ناگهانی باشند. زانویی جزء لاینفک سیستم‌های جریان در اکثر صنایع می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مبدل‌های حرارتی، بویلرها و سیستم‌های آبرسانی و گازرسانی و مواردی از این دست اشاره کرد. یکی دیگر از پرکاربردترین موارد استفاده زانویی در صنایع نفت و گاز می‌باشد. در بعضی صنایع نیز از زانویی‌ها با مقطع مستطیلی استفاده می‌شود که از جمله آن صنعت تهویه مطبوع می‌باشد. بنابراین، مطالعه پارامترهای زانویی، مشخصات جریان و ذرات و تأثیر هر کدام از آن‌ها بر میدان جریان سیال در زانویی از اهمیت فراوانی برخوردار است. بسته به نوع جریان در زانویی از نظر آرام یا آشسته بودن حالت‌های مختلفی در جریان زانویی می‌تواند رخ دهد. یکی از این حالت‌ها، تولید گردابه یا ادی¹ در زانویی است که منجر به اتلاف موضعی و در نتیجه افت فشار می‌شود که هر کدام جای بحث و مطالعه دارد. حالت‌های دیگر مربوط به تولید جریان ثانویه در زانویی، که جریانی عمود بر جریان اصلی است و این جریان نیز نقش فراوانی در اتلاف موضعی و افت فشار در زانویی دارد. لذا در زانویی علاوه بر افت حاصل از لوله، افت‌های دیگر نیز

¹ Eddy

وجود دارد که جهت به دست آوردن افت کلی فشار سیستم جریان باید لحاظ شوند.

1-2- مشکلات استخراج شن

یکی از فاکتورهایی که از اهمیت زیادی در کاربردهای صنعتی دارد، مسئله حرکت ذرات جامد در زانویی می باشد که در اثر برخورد آن ها با دیواره زانویی، دیواره لوله ها دچار خوردگی فیزیکی می شوند. این نوع خوردگی در اثر فرآیند کنده شدن فلز سطح از جداره لوله در اثر برخورد مکرر ذرات به دیواره لوله ها رخ می دهد که این پدیده در اکثر دستگاه های صنعتی چند فاز به خصوص صنایع نفت و پتروشیمی وجود دارد. در صنعت استخراج نفت نیز ذرات ماسه همراه نفت وارد خطوط انتقال شده و باعث تشدید پدیده خوردگی فیزیکی می شود. لازم به ذکر است که این نوع خوردگی بیشتر در محل اتصالات رخ می دهد.

در تحقیق حاضر، حرکت جریان دوفازی سیال-ذره جامد در یک زانویی و خوردگی حاصل از برخورد تک ذره به جداره زانویی مورد مطالعه قرار گرفته است. این نوع جریان و خوردگی حاصل از آن در کاربردهای صنعتی رایج همانند لوله ها و اتصالات انتقال نفت و گاز و همچنین کانال ها یک پدیده معمول می باشد. تحقیق حاضر بر روی سه مسئله متمرکز شده است: میدان جریان سیال در زانویی، مسیر حرکت ذره در داخل زانویی و خوردگی حاصل از برخورد ذره به دیواره زانویی. تقریب و حل عددی بر مبنای سیستم مختصات مرجع لاگرانژی¹ در نظر گرفته شده است. این نوع بررسی امکان استفاده از روش کوپل یک طرفه سیال به ذره² را برای هر ذره فراهم می سازد. برای این منظور دو مدل محاسباتی استخراج می شود که مدل اول، مدل فاز پیوسته (جهت به دست آوردن میدان سرعت جریان سیال) و مدل دوم، مدل ردیابی ذره (جهت پیش بینی مسیر حرکت ذره) می باشد. با استفاده از مدل ردیابی ذره، ذرات جامد

¹ - Lagrangian Reference Frame

² - One-way flow-to-particle coupling method

در یک میدان با بهره‌گیری از معادلات لاگرانژی حرکت ذره، ردگیری شده و مسیر حرکت آن‌ها به دست می‌آید. اطلاعات برخورد (سرعت و زاویه برخورد) برای ذره و بروی مرزهای جامد میدان حل جریان سیال استخراج شده و سپس برای محاسبه نرخ خوردگی، در یک مدل خوردگی استفاده می‌شوند.

استخراج ذرات شن از چاه‌های نفت و گاز همیشه اتفاق می‌افتد. نتیجه استخراج ذرات شن سبب فرسایش، انسداد خطوط لوله، سبب شکستن تجهیزات، نشت در خطوط لوله و در نتیجه حوادث زیست‌محیطی و آسیب احتمالی به پرسنل خواهد شد.

با وجود تمام منابع و امکاناتی که برای مطالعه و بررسی فرسایش صرف شده است مکانیزم فرسایش ذرات جامد هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است، انواع مدل‌ها و رویکردها متفاوتی توسط محققان ارائه شده است. معمولاً مدل‌های پیش‌بینی فرسایش به سه بخش تقسیم می‌شوند: تجربی، مکانیکی و بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی. از آنجاکه فرسایش مشکل پیچیده‌ای است بیشتر مدل‌های ارائه شده پیش‌بینی فرسایش ترکیبی از همه این دسته‌بندی‌ها است.

1-2-1- راهکارهای پیشگیری از آسیب فرسایش

هرچند مسائل فنی و اقتصادی زیادی برای جلوگیری و یا کنترل استخراج شن بخصوص در شرایط استخراج وجود دارد، که یکی از آن‌ها استفاده از صافی برای جداسازی ذرات شن از نفت و گاز استخراج شده و یا می‌توان از سیکلون برای جداسازی ذرات شن از جریان سیال استفاده کرد، در نتیجه استفاده از این موارد میزان فرسایش را می‌توان کنترل کرد.

1-1-2-1- مزایا

مزیت استفاده از صافی سادگی طراحی و ساخت صافی و دلیل استفاده از سیکلون مقاومت زیاد آن نسبت به شرایط عملکردی است و در هر دو هزینه اولیه کم و به دلیل عدم استفاده از قطعه متحرک

هزینه تعویض و نگهداری پایین اشاره کرد.

1-2-1-2- معایب

صافی معمولاً نمی‌تواند از عبور ذرات کوچک‌تر از 50 میکرومتر جلوگیری کند، عبور این ذرات کوچک از صافی و تأثیرپذیری زیاد آن‌ها از گردابه‌های جریان و افتادن آن‌ها در ناحیه سیرکولاسیون¹ باعث برخورد متعدد آن‌ها به دیوار لوله سبب افزایش فرسایش می‌شود. گیرکردن ذرات بزرگ و یا ساییدگی دهانه صافی و بزرگ شدن سوراخ‌های آن، سبب کاهش کارایی صافی و بالا رفتن سرعت در دیگر بخش‌های خطوط لوله و در نتیجه فرسایش بالا می‌شود. یکی از معایب سیکلون راندمان پایین جداسازی ذرات خیلی کوچک نسبت به ذرات بزرگ است.

باین‌حال، همیشه روش‌هایی برای بهبود وجود دارد، بخصوص برای شرایطی که مقدار فرسایش پیش‌بینی پایین است، از عواقب پیش‌بینی فرسایش پایین در صنایع نفت و گاز می‌تواند فاجعه‌بار باشد. از سوی دیگر، پیش‌بینی مقدار فرسایش زیاد تا حدودی به بهبود ایمنی کمک می‌کند، اما پیش‌بینی فرسایش زیاد درحالی‌که میزان فرسایش به وجود آمده کمتر از آن است از نظر اقتصادی تأثیر مهمی بر استخراج نفت و گاز دارد.

1-3- راهکارهای مدیریت فرسایش

با کاهش سرعت جریان، مقدار ذرات شن استخراج‌شده و در نتیجه میزان فرسایش کاهش می‌یابد. از این‌رو، کاهش میزان استخراج می‌تواند یک‌راه برای مدیریت فرسایش باشد. در طراحی خطوط لوله، برخی از مسائل برای به حداقل رساندن فرسایش باید در نظر گرفته شود، برای مثال، تغییر ناگهانی جریان (زانویی، انبساط و انقباض ناگهانی و سه‌راهی‌ها) حتماً باید از تغییر جهت جریان اجتناب شود که

¹. circulation

در نتیجه آن می‌تواند منجر به فرسایش شدید شود، راه دیگر، پوشش سطح لوله است که می‌توان با یک سطح پوششی در برابر فرسایش مقاومت ایجاد کرد کولکارنی و شینده [1].

1-4- اهمیت کار حاضر

کار حاضر جریان دو فاز سیال (آب و ذره) را از داخل یک زانویی که دارای یک طول اولیه ورودی و یک طول ثانویه خروجی می‌باشد، نشان می‌دهد. این کار از یک واقعیت مهم در صنعت روز و در ارتباط با انتقال سیال - جامد مخصوصاً در تولید نفت و گاز سرچشمه می‌گیرد. ذرات جامدی همانند ماسه که وارد سیال می‌شوند و به دیوار لوله‌ها، اتصالات و دستگاه‌ها برخورد می‌کنند منجر به کنده شدن مواد از سطح آن‌ها خواهند شد..

در تحقیق حاضر مدل‌سازی میزان خوردگی با استفاده از مدل جدیدی که در سال 2015 میلادی توسط عرب نژاد¹ و همکاران [2] ارائه شده، انجام شده است. در این مدل ویژگی‌های مختلفی از جمله شکل ذرات، ویژگی‌های دیوار و زاویه برخورد ذرات در نظر گرفته شده است. محاسبات نرخ خوردگی با استفاده از مدل مذکور از طریق یو دی اف² نوشته شده برای این منظور، استفاده شده است. در این محاسبات از حالت کوپل یک طرفه برای ردیابی ذرات و محاسبه میزان فرسایش استفاده شده است، در این حالت ابتدا پاسخ میدان جریان به دست می‌آید سپس از این پاسخ برای محاسبه مسیر ذرات و میزان فرسایش به وجود آمده استفاده می‌شود. سپس به منظور تأثیر تغییر پارامترهای سرعت ذرات، چگالی ذرات و.... بر میزان فرسایش یک مسئله نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

¹ Arabnejad

² User Define Function

2- فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین

2-1- مقدمه

برای محاسبه هر فرآیندی نیاز به شناخت دقیق عوامل مؤثر بر آن فرآیند است و هر چه آگاهی خود را درباره این عوامل بیشتر شود این فرآیند را دقیق تر می توان بررسی کرد محاسبه میزان فرسایش به

وجود آمده به وسیله ذرات در شبیه سازی ها نیازمند استفاده از معادله فرسایش است و هرچقدر که این معادله، پارامترها و ویژگی های ذرات و سیال را مؤثرتر در نظر گیرد، مقادیر به دست آمده به وسیله آن دقیق تر خواهد بود.

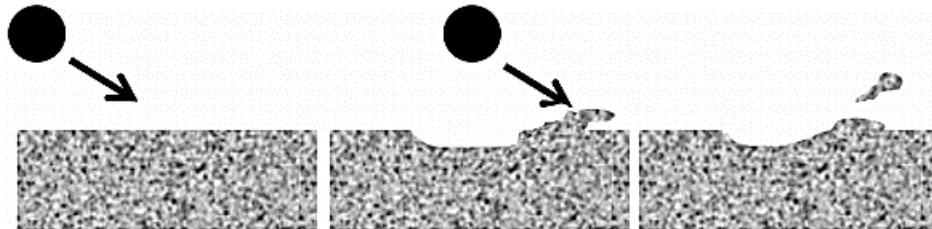
2-2- مکانیزم فرسایش ذرات جامد

هنگامی که یک ذره به سطح برخورد کند آن را شکاف می دهد. شکل این شکاف ها به پارامترهای مختلفی از جمله جنس، سطح و اندازه ذرات و زاویه برخورد بستگی دارد. محققان مطالعات وسیعی راجع به این شکاف ها انجام دادند و بیان کردند که مکانیزم فرسایش بر اساس انعطاف پذیری سطح تغییر می کند. فینی [3] مدل میکرو هندسی برای مواد انعطاف پذیر ارائه و پیشنهاد داد که فرسایش در مواد انعطاف پذیر نتیجه میکرو برش است. وقتی یک ذره در زاویه برخورد کم به سطح برخورد کند، منجر به ایجاد یک حفره خواهد شد. در اثر برخوردهای ذرات دیگر حفره بزرگ تر و همچنین باعث تجمع مواد در اطراف حفره خواهد شد، مواد جمع شده اطراف حفره سرانجام به وسیله برخوردهای ذرات دیگر در ادامه پاک می شوند. مدل میکرو هندسی ذراتی که با زاویه زیاد به سطح برخورد می کنند میزان فرسایش کمتری در مقایسه با داده های آزمایشگاهی پیش بینی می کند. بعدازآن، فینی [4] این ضعف مدل را اصلاح کرد. براساس مدل میکرو هندسی فرسایش، سخت کاری سطح فلز میزان فرسایش را کاهش می دهد. هرچند، لوی [5] نشان داد که مقدار فرسایش اولیه از فرسایش سطوح به وسیله برخوردهای بعدی ذرات کمتر است. بلمن¹ و لوی [6] یک مکانیزم فرسایش ماکروسکوپی پیشنهاد کرد. آن ها پیشنهاد دادند هنگامیکه ذرات اصابت کننده به سطوح یک حفره کم عمق ایجاد و با برخوردهای دیگر جمع شدن برادها را ایجاد می کند. این ورقه ها به آسانی از سطوح با برخورد ذرات بعدی جدا می شوند شکل 2-1. در طی شکل گیری ورقه ها حرارت برشی آدیاباتیک بروی سطوح و سخت کاری سطح زیر رخ می دهد. وقوع این دو فرآیند

¹. Bellman

کمک می‌کند تا فرم دهی ورقه‌ها برای شرایط دائمی در مقایسه با اولین برخورد میزان فرسایش بیشتری را ایجاد کند. مکانیزم‌های فرسایش ذرات جامد برای مواد انعطاف‌پذیر به‌وسیله دیگر محققان پیشنهاد شده و در مقالات چیس¹ و همکاران [7]، هوتچینگز [8] یافت می‌شود.

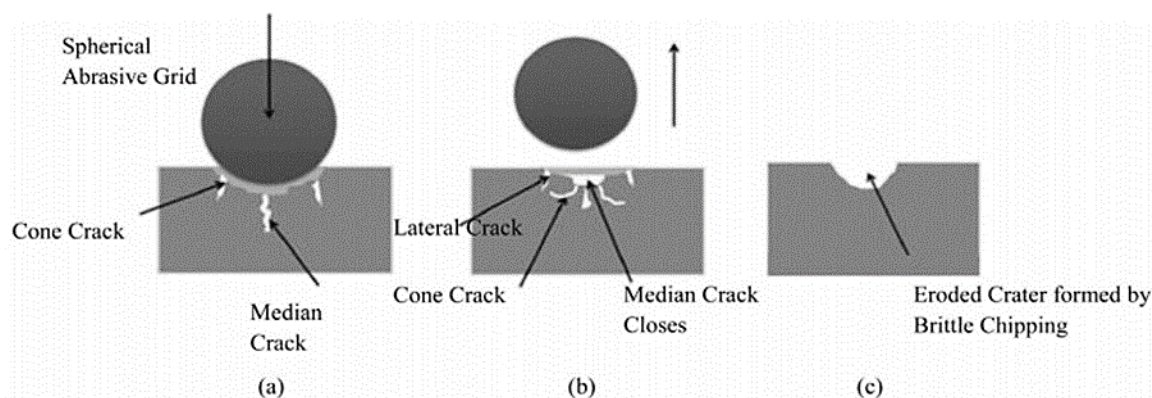
برخلاف مکانیزم فرسایش ذرات جامد انعطاف‌پذیر، مکانیزم فرسایش برای مواد شکننده (ترد) گستردگی بیشتری دارد. سیرین واسان [9]، ساندراجان [10]، کلیز [11] بیان کردند که فرسایش در مواد شکننده به علت تشکیل شکاف است.



شکل 2-1: مکانیزم فرسایش مواد انعطاف‌پذیر [12].

وقتی یک‌ذره به سطح ترد برخورد می‌کند، آن ذره شکاف‌های عرضی و شعاعی ایجاد می‌کند. برخوردهای دیگر سبب آن می‌شود که این شکاف‌ها رشد کنند. این ترک‌ها سطح را به تکه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کنند که می‌تواند به‌وسیله برخورد دیگر ذرات از سطح جدا شود. شکل 2-2.

¹. Chase



شکل 2-2: مکانیزم فرسایش در مواد ترد [13]

1-2-2- پارامترهای مهم در پیش‌بینی فرسایش ذرات جامد

پارامترها مؤثر بسیاری بر فرسایش یافت شده‌اند. بر پایه این پارامترها، محققان معادلات نسبت فرسایش مختلفی ارائه کردند که مربوط به ویژگی ذرات است (شکل، اندازه، جنس، چگالی، سختی و غیره) و اطلاعات برخورد ذرات و جرم ازدست‌رفته از دیوار بستگی به ویژگی‌های جنس دیوار دارد. شرح برخی پارامترهای مهم که بر فرسایش مؤثرند در ادامه آمده است. قبل از اینکه اطلاعات فرسایش سنجیده شود باید توجه داشت که اطلاعات فرسایش مختلفی به‌وسیله محققان گزارش شده است. مثلاً، میزان فرسایش به‌طور معمول جرم ازدست‌رفته یا ضخامت ازدست‌رفته از ماده، به‌عنوان یک تابعی از زمان به‌عنوان مثال کیلوگرم در ساعت یا میلی‌متر در هر سال است. برخی از نویسندگان داده‌های فرسایش را در واحد جرم ازدست‌رفته، حجم ازدست‌رفته یا ضخامت ازدست‌رفته در واحد جرم ذرات برخوردکننده گزارش داده‌اند.

ویژگی‌های ذرات

ویژگی‌های ذرات از قبیل اندازه، چگالی، سختی و شکل تأثیر قابل‌توجهی بر روی فرسایش ذرات جامد دارند. برای داشتن فهم بیشتر از تأثیر ویژگی ذرات بر روی فرسایش، لازم است تأثیر هر ویژگی بر روی فرسایش به‌صورت جداگانه موردبررسی قرار گیرد.

الف - شکل ذرات

بدیهی است که شکل ذرات تأثیر قابل توجهی بر روی مقدار فرسایش دارد. سالیک¹ و همکاران [14] نشان دادند که شکل ذرات می‌تواند مقدار فرسایش را تغییر دهد. لوی² و چیک [15] گزارش دادند که تیزی ذرات تأثیر زیادی بر روی مقدار فرسایش دارد، آن‌ها دو شکل مختلف از ذرات، یعنی ذرات تیز گوشه‌دار و ذرات کروی را به کار بردند. نتایج فرسایش به‌وسیله ذرات گوشه‌دار در مقایسه با نتایج ذرات گرد چهار برابر بزرگ‌تر بود. همچنین هوتچینگز³ و همکاران [16] گزارش دادند که زاویه برخورد که منجر به فرسایش بیشتری شود بستگی به شکل ذرات دارد و مبتنی بر تیزی ذرات تغییر می‌کند. بدلیل اینکه شکل ذرات در محاسبه مقدار فرسایش مؤثر است فاکتور شکل ذرات در بیشتر معادلات نسبت فرسایش به‌وسیله محققان مختلف ارائه شده است.

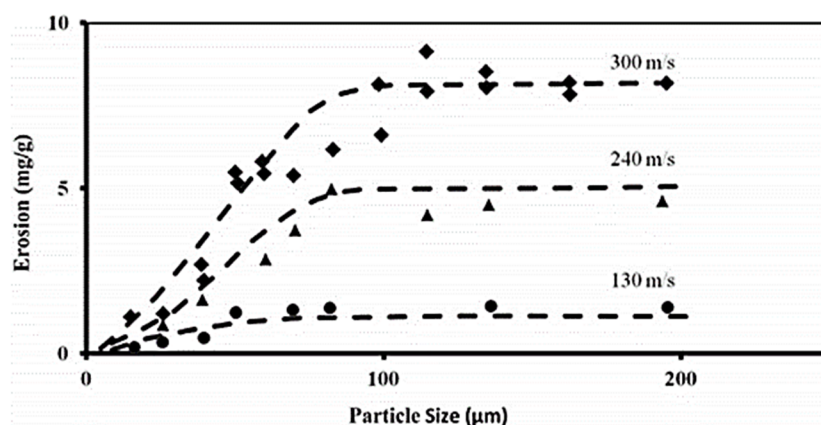
ب - اندازه ذرات

از دیگر ویژگی‌های مهم مؤثر بر مقدار فرسایش اندازه ذرات است چون ذرات بزرگ‌تر انرژی جنبشی بیشتری دارند، اگر دو ذره کوچک و بزرگ با سرعت یکسان به یک هدف حمله کنند میزان آسیب ذرات بزرگ‌تر بیشتر است. برخی از اطلاعات فرسایش به‌وسیله تیلی [17] به‌عنوان تابعی از اندازه ذرات گزارش شده که در شکل 2-3 نشان داده شده است. این شکل که شامل نسبت فرسایش (جرم مواد پاک شده از سطح / جرم ذرات برخورد کننده به سطح) است تقریباً هنگامی مستقل از اندازه ذرات است که ذرات از حدود 100 میکرومتر بزرگ‌تر باشند.

¹. Salik

². Levy

³. Hutchings

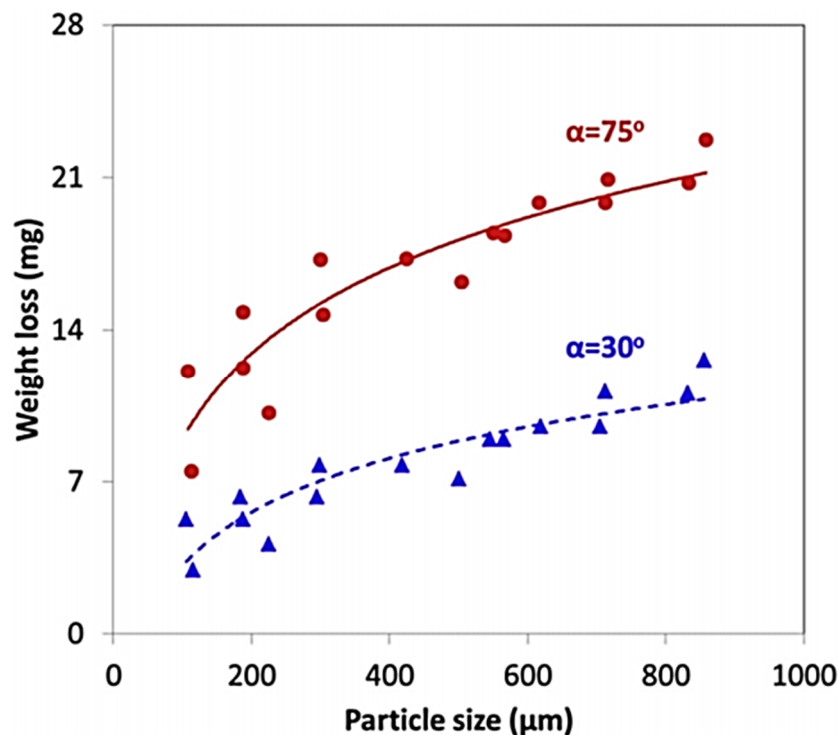


شکل 2-3: نسبت فرسایش برحسب اندازه ذرات و سرعت برخورد ذرات [17].

گراندی¹ و بورس [18] اثر اندازه ذرات شن بر روی رفتار فرسایش چدن برای دو زاویه برخورد 30 و 75 درجه و سرعت سیال حامل 3/62 متر بر ثانیه و غلظت ذرات شن² حدود 20 درصد بود، را بررسی کردند. با توجه به شکل 2-4، آن‌ها یک رابطه خطی بین اندازه شن و میزان فرسایش مشاهده کردند. همچنین این رفتار به وسیله دیگر محققان گزارش شده است مثلاً الخولی [19] و کلارک [20] نشان دادند که این نتایج تحت تأثیر سرعت برخورد ذرات ثابت نیست و با اندازه ذرات زمانی که در جریان سیال حرکت می‌کنند، تغییر خواهد کرد.

¹. Gandhi

². sand concentration

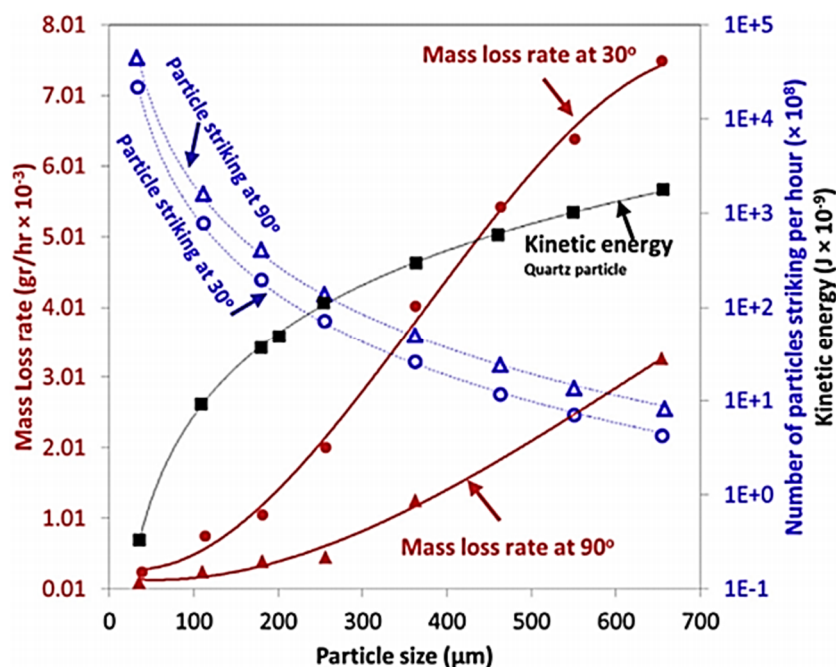


شکل 4-2: اثر اندازه شن بر روی میزان فرسایش در سرعت جریان 3,62 متر بر ثانیه و غلظت 20 درصد [18].

دسالی و همکاران [21] اثر اندازه ذرات بر روی عملکرد فرسایش از آلیاژ آلومینیم 6063 AA را برای هشت اندازه مختلف از ذرات سیلیکا در محدوده بین 37/5 _ 655 میکرون را مورد بررسی قرار داد. سرعت سیال حامل 3 متر بر ثانیه و غلظت ذرات شن 20 درصد بوده است. آن‌ها دو زاویه برخورد 30 و 90 درجه را انتخاب کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که در یک غلظت شن ثابت، افزایش اندازه ذرات شن میزان فرسایش را حتی با وجود کاهش تعداد ذرات و برخوردهایشان افزایش می‌دهد. سرعت برخورد ذرات و انرژی جنبشی در هر برخورد تحت تأثیر اندازه ذرات است. متأسفانه، با وجود در نظر گرفتن فرسایش دوغاب¹، جرم از دست رفته می‌تواند تحت تأثیر دیگر فاکتورها از قبیل سرعت مختلف برخورد ذرات در امتداد سطح، اثرات ویسکوزیته سیال، غلظت ذرات و همچنین اثرات متقابل ذره با ذره قرار گیرد

¹ . slurry

شکل 2-5- نتایج آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 2-5: اثر اندازه ذرات بر روی فرسایش، تعداد ذرات برخوردکننده و انرژی جنبشی برخورد بر روی AA 6063 باوجود غلظت 20 درصد سیلیکا و در سرعت 3 متر بر ثانیه و در دو زاویه برخورد 30 و 90 درجه [21] و [22].

دسالی¹ و همکاران [21] یک رابطه بین میزان فرسایش و اندازه ذرات ارائه دادند که به‌وسیله چندین محقق دیگر استفاده شد.

$$Erosion\ rate = (Particle\ size)^n \quad (1-2)$$

مقادیر برای n هر عددی بین 0/3_0/2 می‌تواند باشد و به تفاوت در خواص مواد، شرایط آزمایشگاهی، سرعت ذرات، اندازه ذرات و توزیع اندازه ذرات بستگی دارد. آن‌ها در بیشتر موارد n را یک در نظر می‌گیرند و یک رابطه خطی بین اندازه ذرات و میزان فرسایش مشاهده می‌شود.

¹. Desale

اوکا¹ و همکاران [23, 24] فاکتور اندازه ذرات را در مدل نسبت فرسایش (نه میزان فرسایش) مطرح

کردند که به توان 0/19 می‌رسد.

به‌طور کلی، ذرات شن کوچک‌تر سبب میزان فرسایش کمتری می‌شوند چون آن‌ها انرژی جنبشی و نیروی برخورد کوچک‌تری برای فرسایش سطوح دارند اما به‌طور کلی ذرات شن بزرگ‌تر سبب آسیب فرسایش بیشتر برای سرعت برخورد، شکل، چگالی و سختی یکسان با دیگر ذرات می‌شود. همین‌طور ذرات شن کوچک‌تر بیشتر تحت تأثیر آشفستگی هستند. تبادل ممنتیم بین سیال و ذرات برای ذرات کوچک‌تر بیشتر برجسته‌تر است، بطوریکه آن‌ها در پاسخ به نوسانات در جریان خیلی راحت‌تر هستند. همین‌طور ذرات کوچک‌تر ممنتیم بیشتری از دست می‌دهند و همچنین آن‌ها از طریق زیر لایه چسبناک جریان می‌یابند و می‌توانند در زیر لایه به دام بیفتند. این می‌تواند سبب آن شود که ذرات کوچک‌تر به کنار دیوار منتقل شوند و پشت سر هم به دیوار برخورد کنند، اما این رفتار به‌شدت به هندسه جریان بستگی دارد. همین‌طور ممکن است فرسایش ذرات کوچک تحت تأثیر برخورد ذره با ذره باشد و برای همان جرم از ذرات برخوردکننده تعداد ذرات به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد.

به‌عنوان یک نتیجه معمولاً برای سرعت برخورد مشابه ذرات شن کوچک‌تر سبب مقادیر فرسایش کمتری در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر به دلیل انرژی جنبشی کمتر می‌شوند. باین‌حال باید در نظر گرفته شود که ذرات کوچک نیز می‌توانند فرسایش بیشتری از ذرات بزرگ گرد یا نیمه گرد ایجاد کنند. این ذرات کوچک بیشتر تحت تأثیر آشفستگی هستند و آن‌ها می‌توانند سبب فرسایش بیشتر در هندسه‌های با آشفستگی بالا و مکان‌های چرخش² شوند. به‌طور کلی هر دو رابطه‌ای خطی و پاورلو³ بین اندازه ذرات شن و

¹. Oka

². recirculating

³. Power law

میزان فرسایش به وسیله چندین محقق پیشنهاد شده است. متأسفانه این روابط متأثر از چندین فاکتور از جمله جنس دیواره، شرایط آزمایشگاهی، سرعت برخورد ذرات، برخورد ذره با ذره، خواص سیال و توزیع اندازه ذرات شن هستند.

ج - جنس ذرات

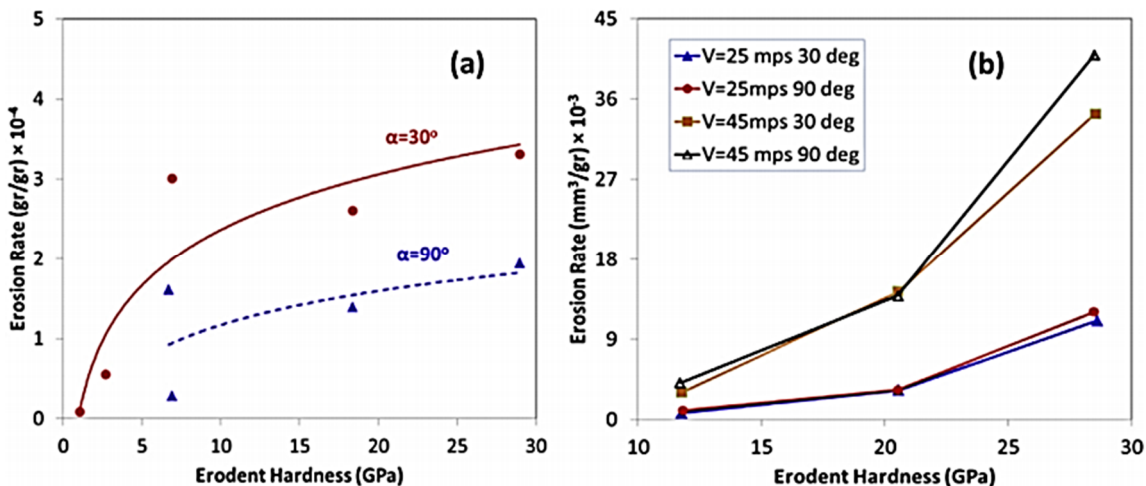
لوی¹ و چیک [15] اثر ترکیب ذرات را بر روی رفتار فرسایش فولاد کربنی AISI 1020 را مورد مطالعه قرار دادند. در جدول 1-2 آن‌ها پنج ذره ترد (شکننده) با شکل گوشه‌دار و محدوده اندازه 180-250 میکرون را برای فرسایش فولاد در دو زاویه جریان مختلف از 30 تا 90 درجه و سرعت سیال 80 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. در شکل 2-6 (الف) زمانی که ذرات فرسایش دهنده نرمی از قبیل calcite ($CaCO_3$) و apatite ($Ca_5(PO_4)_3$) برای فرسایش فولاد استفاده شد، apatite ($Ca_5(PO_4)_3$) سختی بیشتری در مقایسه با calcite ($CaCO_3$) دارد به همین علت باعث فرسایش کمی بیشتر از calcite ($CaCO_3$) می‌شود. هرچه سختی ویکرز ذرات به حدود 700 ویکرز افزایش یابد، سختی ذرات ساینده میزان فرسایش را خیلی افزایش نمی‌یابد، به دلیل این که ذرات به اندازه کافی سخت وقتی به دیوار برخورد می‌کنند آن را خرد نمی‌کنند. رابطه 2-2 بین سختی دیوار، سختی ذرات و آسیب فرسایش مشاهده شده است.

جدول 1-2: ذرات ساینده و نسبت فرسایش فولاد AISI 1020

¹. Levy

Particle composition	Density (g/cm ³)	Mohs hardness	Vickers hardness	Erosion ratio (g/g)	
				$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
CaCO ₃	—	3	115	0.03	—
Ca ₅ (PO ₄) ₃	—	5	300	0.5	0.3
SiO ₂	2.7	7	700	3.0	1.6
Al ₂ O ₃	4.0	9	1900	2.6	1.4
SiC	3.2	>9	3000	3.3	1.9
Steel grit	7.9	—	—	5.3	—
Steel shot	7.9	—	—	1.4	—

بابو¹ و همکاران [25] فرسایش ذرات SiO₂ که سختی ویکرز آن چهار برابر کمتر از SiC است را بررسی کردند، میزان فرسایش به دست آمده به وسیله آن‌ها برای فولاد کربنی AISI 1020 در شکل 6-2 (الف) نشان داده شده است، هرچند برای جنس دیوار سخت تراز قبیل WC-12Co ذرات SiC و SiO₂ طبق شکل 6-2 (ب) خوردگی متفاوتی دارند.



شکل 6-2: اثر سختی ساینده بروی رفتار فرسایش (الف) [15] AISI 1020 (ب) [25] WC-12Co
وقتی یک ذره نرم به دیوار برخورد می کند ممکن است به دو قسمت با جرم کمتر تبدیل شود و انرژی

¹. Babu

جنبشی و متعاقباً ساییدگی¹ آن کمتر شود. آنالیز تصویربرداری الکترو میکروسکوپی به وسیله لوی² و چیک [15] از فرسایش سطح فولاد پس از یک برخورد نشان داد که شکستن و چسبندگی ذرات نرم به سطح دیوار انرژی جنبشی را کاهش می دهد و همچنین پوشش سطح دیوار با یک لایه ذرات باقی مانده میزان فرسایش را کاهش می دهد. بنا براین ذرات سخت تر می توانند سبب فرسایش بیشتری شوند زیرا وقتی آن ها به سطح دیوار برخورد می کنند به ذرات کوچک تر تبدیل می شوند. هرچند ذراتی که دارای سختی بیش از مقدار سختی بحرانی هستند وقتی به سطح برخورد می کنند خرد نمی شوند، افزایش بیش از حد سختی ذرات خوردگی آن را افزایش نمی دهد.

وادا³ و واتانابه [26] رابطه زیر را برای بیان ارتباط بین میزان فرسایش و نسبت سختی ذرات موردنظر مطرح کردند:

$$Erosion Rate \propto \left(\frac{H_t}{H_p} \right)^n \quad (2-2)$$

که در آن H_t سختی ماده موردنظر و H_p سختی ذرات خورنده و توان n یک ثابت تجربی است. سپس شیپوی⁴ و هوتچینگز [27] اثر جنس دیوار و ذرات را بر روی فرسایش بررسی کردند، آن ها مواد با سختی های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که افزایش نسبت سختی ماده مورد نظر به سختی دیوار فرسایش را سریعاً افزایش می دهد و کاهش توان، سرعت میزان فرسایش را کم می کند.

1. Erosion

2. Levy

3. Wada

4. Shipway

د- چگالی ذرات

چگالی ذرات فرسایش دهنده از دیگر فاکتورهای مهم در تعیین فرسایش دهنده‌ها است. ذرات با چگالی بالاتر انرژی جنبشی بیشتری دارند و نیروی برخورد بیشتری ایجاد می‌کنند که سبب افزایش فرسایش می‌شوند. ذرات فولادی چگالی بیشتری در مقایسه با اکسید آلومینیم Al_2O_3 و SiC و SiO_2 دارد و متعاقباً سبب میزان فرسایش بیشتری می‌شوند. SiO_2 ، SiC و Al_2O_3 تقریباً همان چگالی را دارد و سبب همان میزان فرسایش برای جنس دیوار فولاد کربنی وقتی شکل ذرات و اندازه مشابهی دارند می‌شوند.

به‌طور کلی، ترکیب ذرات مشخص شده برحسب چگالی و سختی آن‌ها از جمله عوامل مهم در خرابی و فرسایش است. شکل و اندازه ذرات نیز از پارامترهای مهم برای فرسایش است، برای ذرات با اندازه و شکل مشابه چگالی و سختی بالاتر معمولاً سبب میزان فرسایش بیشتر (بسته به سختی مواد موردنظر) خواهد شد. ذرات با چگالی بالاتر انرژی جنبشی و نیروی برخورد بیشتری دارند و میزان فرسایش را افزایش می‌دهند، سختی ویکرز بالاتر از 700 میزان فرسایش را افزایش می‌دهد. سولفات باریم *Barite*، کربنات کلسیم، کربنات آهن و سیلیس برخی از ذرات جامدی هستند که در طی استخراج نفت و گاز وارد خطوط جریان می‌شوند.

سختی موس¹ سولفات باریم (*Barite*) 3 است که شبیه به کربنات کلسیم (*calcite*) است (سختی موس: این مقیاس قابلیت مقاومت خراش ماده سخت‌تر بر ماده نرم‌تر را نشان می‌دهد. معدن شناس آلمانی فردریک موس این مقیاس را در سال 1812 ابداع نمود). بنابراین از نظر اثر سختی بر فرسایش شباهت نزدیکی برای همان اندازه، شکل و چگالی ذرات دارد. کربنات آهن دارای سختی موس از 3 تا 4 است که مشابه سولفات باریم و کربنات کلسیم است و انتظار می‌رود دارای فرسایش مشابه باشد. پیش‌بینی می‌شود

¹ . Mohs hardness

زمانی که سولفات باریم و کربنات کلسیم به دیوار فولاد کربنی برخورد کنند خرد و سبب میزان فرسایش پائینی شوند. از سوی دیگر سیلیکا (*silica*) و سیلیکات (*silicate*) سختی بالایی دارند و بنابراین سبب فرسایش بیشتری خواهند شد. برای دیوار با مواد سخت تر از قبیل پوشش WC-12Co سیلیکات سبب فرسایش بیشتری از سیلیکا به دلیل سختی بالاتر از آن می شود اگرچه آن ها فرسایشی مشابه برای دیوار با جنس فولاد کربنی داشته باشند.

$$\begin{aligned} \hat{E}_{Barite} \approx \hat{E}_{Calcium Carbonate} \approx \hat{E}_{Iron Carbonate} < \hat{E}_{Silica} \approx \hat{E}_{Silicate} \\ (valid \text{ for carbon steel target}) \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{Barite} \approx \hat{E}_{Calcium Carbonate} \approx \hat{E}_{Iron Carbonate} < \hat{E}_{Silica} < \hat{E}_{Silicate} \\ (valid \text{ for WC-12Co coating target}) \end{aligned}$$

که در آن $\hat{E}$ نشان دهنده میزان خوردگی ذرات است.

2-2-2- خواص سیال

سیال حامل بیشترین تأثیر را روی نسبت فرسایش دارد زیرا سرعت برخورد ذرات را تحت تأثیر خود قرار می دهد. که در کاربردهای عملی شامل فرسایش ذرات جامد، ذرات به وسیله سیال حامل به سمت دیوار منتقل می شوند. ویژگی های سیال حامل از قبیل ویسکوزیته و چگالی روی رفتار ذرات اثر می گذارد و در نتیجه الگوی فرسایش و مقدار آن را تحت تأثیر قرار می دهد. میزان تأثیر سیال حامل بروی فرسایش بستگی به هندسه مسئله و الگوی جریان دارد. برای مثال در یک هندسه برخورد مستقیم سیال ذرات را به سمت سطح لوله هدایت می کند. در دیگر هندسه ها مثل لوله مستقیم، سیال حامل به موازات دیوار حرکت می کند. در این نوع هندسه ها نوسانات آشفتگی عامل تغییر مسیر ذرات و حرکت آن ها به سمت سطح لوله هستند. هاینزه [28] و هامفر [29] تأثیر خواص سیال بر روی رفتار سیال را مورد بررسی قرار دادند. آن ها بیان کردند که خواص سیال به طور مستقیم بروی غلظت محلی ذرات تأثیر می گذارد. این

بدان معنی است که حتی اگر غلظت کلی ذرات کم باشد، غلظت محلی ذرات با توجه به الگوی جریان می‌تواند بالا رود و می‌تواند مقدار و الگوی فرسایش را تحت تأثیر قرار دهد. غلظت محلی زیاد ذرات به معنی برخورد بیشتر ذره با ذره است و اثر سپر¹ مشاهده شده توسط چن [30] می‌تواند رخ دهد. برخورد ذرات با دیوار به‌طور مستقیم تحت تأثیر لایه مرزی سیال است. کلارک² و بورمیستر [31] یک مدل لایه فشرده ارائه دادند که شامل اثر لایه مرزی سیال بر روی رفتار ذرات است.

2-2-3- ویژگی‌های دیوار

باوجود اطلاعات تجربی بسیار، ارتباط بین جنس دیوار و میزان فرسایش ذرات جامد هنوز مشخص نیست. فانی³ و همکاران [32] بر این باور بودند که مواد با سختی بالاتر، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش دارند. هرچند، لوی⁴ و هیکی [33] نشان دادند که استفاده از مواد با سختی بالاتر می‌تواند منجر به میزان فرسایش بیشتر در مقایسه با مواد با سختی کمتر شود. بر اساس این مشاهدات آن‌ها پیشنهاد دادند که سطوح شکل‌پذیر اجازه توزیع انرژی جنبشی ذرات برخوردکننده به وسیله تغییر شکل پلاستیک که به کاهش میزان فرسایش منجر شوند را می‌دهند. چقرمگی⁵ (در علم مواد به مقاومت مواد در برابر شکست در اثر اعمال تنش گفته می‌شود. چقرمگی به صورت میزان انرژی جذب شده قبل از وادادگی در واحد حجم مواد تعریف می‌شود) جنس مواد سطوح موردنظر ممکن است شاخص بهتری برای فرآیند فرسایش باشد به دلیل آن که افزایش سختی ممکن است شکل‌پذیری را کاهش دهد و در نتیجه افزایش میزان فرسایش ناشی از مکانیزم شکنندگی (تردی) را به همراه داشته باشد. افزایش چقرمگی شامل افزایش سختی مواد

¹ . Shielding

² . Clark

³ . Finnie

⁴ . Levy

⁵ . Toughness

بدون کاهش شکل پذیری آنهاست. این امر برای توسعه یک رابطه برای چقرمگی مواد و عملکرد فرسایش آنها می تواند معقول تر باشد. فولی¹ و لوی [34] مشاهده کردند که اگر مقاومت محلی ماده مورد نظر کمتر از یک مقدار معین باشد ذرات قادر خواهند بود مواد با تغییر شکل پلاستیک را حذف کنند.

4-2-2- سرعت برخورد ذرات

میزان فرسایش با سرعت برخورد ذرات رابطه مستقیم دارد:

$$Erosion Rate \propto (V_L)^n \quad (4-2)$$

که در آن V_L سرعت برخورد ذرات و n یک مقدار ثابت است. محققان مختلف مقادیر متفاوتی برای n ارائه دادند. فانی [3] بر پایه کارهای تئوری پیشنهاد داد که n معادل 2 است. لیتون [35, 36] پیشنهاد کرد که با توجه به تغییر در سرعت سیال حامل بسته به تجربیات، ثابت n تا 4 هم می تواند افزایش یابد. در مشاهدات دیگر از اسملتز و همکاران [37] و بورت و همکاران [38] n می تواند از 0/3 تا 0/45 تغییر کند.

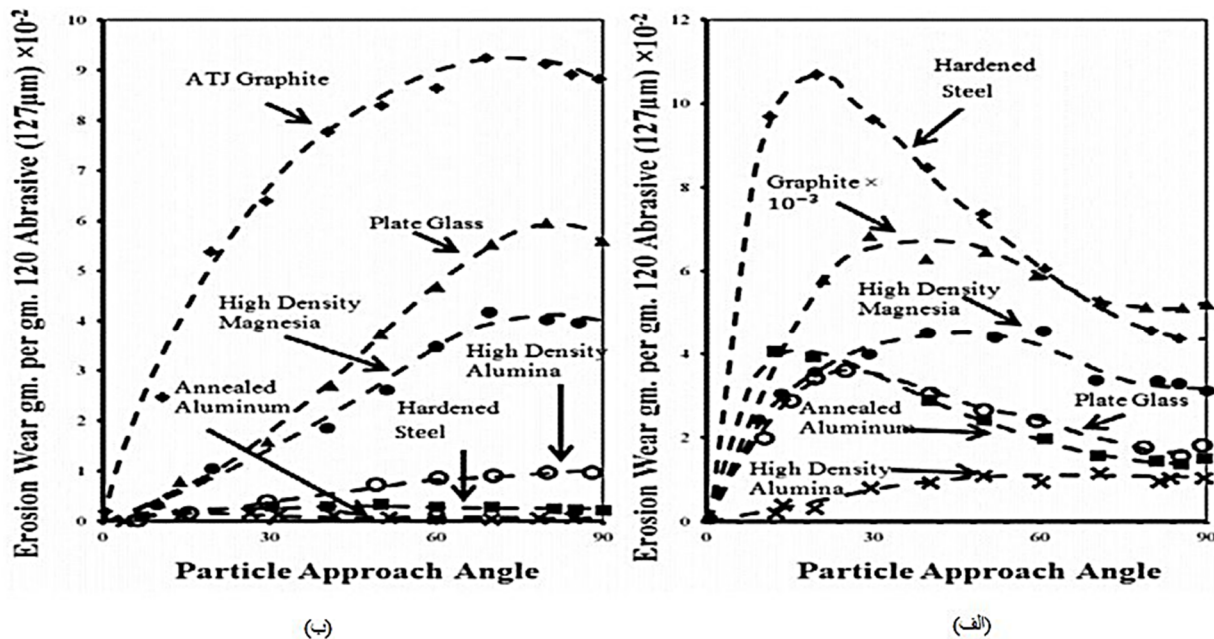
اخیراً، اوکا و همکاران [23, 24] پیشنهاد کردند که n ثابت نیست و وابسته به سختی مواد ساینده است. مقادیر مختلف استفاده شده برای n از 1/6 تا 2/6 متغیر است.

5-2-2- زاویه برخورد ذرات

بسیاری از محققان مشاهده کردند که میزان فرسایش به نوعی تابعی از زاویه برخورد ذرات است. اثر زاویه برخورد ذرات بروی فرسایش بر پایه جنس دیوار متفاوت است. شکل 2-7 نشان دهنده رابطه بین زاویه برخورد ذرات و میزان فرسایش برای مواد ترد و نرم است. با توجه به شکل 2-7 روند میزان فرسایش برای مواد شکننده متفاوت از مواد شکل پذیر است. برای مواد انعطاف پذیر مقادیر فرسایش بالا در زاویه

¹. Foley

برخورد کم رخ می‌دهد. این بیشتر به دلیل تأثیر شکل‌پذیری و برش سطوح به‌وسیله برخورد ذرات در زاویه کم است. از سوی دیگر، ماکزیمم فرسایش برای مواد ترد در زاویه برخورد نزدیک به عمود رخ می‌دهد چون علت اصلی فرسایش در مواد ترد شکست و ترک‌خوردگی است. بیشتر مواد مورد استفاده در صنایع نفت و گاز دارای هر دو ویژگی تردی و نرمی هستند. در نتیجه، انواع توابع زاویه به‌وسیله محققان ارائه شده است. بسیاری از توابع زاویه ارائه شده تجربی‌اند و تنها برای شرایط محدودی معتبر هستند. از آنجاکه بسیاری از توابع زاویه تجربی هستند، انتخاب یک تابع زاویه بر پایه سیال حامل و همچنین خواص دیوار و ذرات ضروری است.



شکل 2-7: میزان فرسایش مواد مختلف، انواع زاویه برخورد ذرات: سرعت برخورد 153 متر بر ثانیه و شن سیلیکون کاربرد [39].

2-2-6- تأثیر دما

فرضیات متفاوتی ارائه شده تا نقش دما را بروی مکانیزم فرسایش بیان کند. اسملتز¹ و همکاران [37] مشاهده کرد که با افزایش دما میزان فرسایش کاهش می یابد. بعداً لوی [40] نشان داد که با افزایش دما، شکل پذیری فلزات افزایش می یابد. بنابراین، وقتی ذرات به دیوار برخورد می کنند، بیشتر انرژی جنبشی آن ها، به وسیله تغییر شکل پلاستیک جذب می شود. باین حال، اثر دقیق دما بروی فرسایش هنوز مشخص نیست اما از آن به عنوان فاکتور با تأثیر محدود در نظر گرفته می شود.

2-2-7- برخورد ذره با ذره

در اغلب مدل ها، محققان برخورد ذره با ذره را در نظر نمی گیرند، اما در فرسایش دوغاب برخورد ذره با ذره یک اثر مهم بر روی مقدار فرسایش است. اثر برخورد ذره – ذره بر روی فرسایش به وسیله محققان از جمله، لیبهارد² و لوی [41] مشاهده شده است. محققان مکانیزم های مختلفی که رابطه بین میزان فرسایش و غلظت شن را بیان می کند، ارائه کرده اند. دنگ³ و همکاران [42] پیشنهاد دادند که در غلظت شن بالا، ذرات بعد از برخورد به دیوار به ذراتی که به سمت دیوار حرکت می کنند برخورد می کنند و سرعت آن ها را کاهش می دهند، به این پدیده سپر شدن⁴ گفته می شود. بنابراین، بسته به شرایط هندسی، سیال حامل و غلظت شن بالا ممکن است منجر به کاهش میزان فرسایش شود.

2-3- مدل سازی فرسایش ذرات جامد

2-3-1- معادلات فرسایش

با توجه به اهمیت صنعتی، مطالب بسیاری در مورد فرسایش ذرات جامد در کتب و مقالات در

1. Smeltzer

2. Liebhard

3. Deng

4. shielding

دسترس است. درحالی که برخی از این مطالعات این پدیده را تجربی بررسی کردند، مطالعات دیگری موجود است که سعی در توصیف ریاضی فرسایش به وسیله ذرات جامد دارد که مدل‌هایی بر پایه آن‌ها پیشنهاد شده است. از نظر تئوری، مطالعات پیشین مکانیزم‌های مختلف برای توصیف ویژگی‌های فرسایش ذرات جامد ارائه کرده‌اند شاید آن علت اصلی افزایش پارامترهای فیزیکی در مدل‌سازی فرسایش ذرات جامد باشد.

فینی [4] اولین معادلات فرسایش ذرات جامد روی جنس سطح دیوار را که به صورت پایه‌ای مورد بررسی قرار داده است، ارائه داد. او در مطالعه خود اظهار داشت که فرسایش بروی سطح یک جسم خورده شده به وسیله ذرات جامد به سرعت ذرات و ویژگی‌های مواد بستگی دارد. او مواد را به دودسته تقسیم‌بندی کرد: انعطاف‌پذیر که در آن فرسایش به وسیله تغییر شکل پلاستیک است و شکننده (ترد) که در آن تجمع ترک‌ها (شکاف‌ها) دلیل اصلی فرسایش است. بر اساس برخی از فرضیات، او دو معادله برای پیش‌بینی حجم مواد پاک‌شده به وسیله یک‌دانه ساینده و برای تعداد کم و زیاد ذرات با توجه به زاویه برخوردشان به شرح زیر ارائه کرده است:

$$\varepsilon_{VP} = \frac{m_p V_p^2}{P \psi K} \left(\sin(2\alpha) - \frac{6}{K} \sin^2(\alpha) \right) \quad \text{for } \tan \alpha \leq \frac{K}{6} \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_{VP} = \frac{m_p V_p^2}{P \psi K} \left(\frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \text{for } \tan \alpha \geq \frac{K}{6} \quad (6-2)$$

برای توسعه این معادلات، فرضیات زیر در نظر گرفته شد: 1- نسبت عمق برخورد با عمق برش ثابت است 2- پهنای صفحه برش ذرات یکنواخت و در مقایسه با عمق برش بیشتر است 3- به محض برخورد ذرات جریان پلاستیک ثابتی به وجود می‌آید. این مدل هیچ فرسایشی را که بر اثر برخورد معمولی ذرات رخ می‌دهد پیش‌بینی نمی‌کند. همچنین فینی [4] حجم پاک‌شده پیش‌بینی شده برای یک‌دانه ذره

ساینده را با داده‌های آزمایشگاهی برای تعداد زیاد ذرات را مقایسه و بیان کرد که تحلیل فرسایش یک ذره می‌تواند برای پیش‌بینی فرسایش ناشی از افزایش ذرات در زاویه کم برخورد استفاده شود.

بیتر [44, 43] بیان کرد که تغییر شکل مکرر و برش به‌عنوان دو مکانیزم برای فرسایش هستند و دو مدل برای پیش‌بینی میزان فرسایش به علت این دو مکانیزم برای مواد شکل‌پذیر و شکننده توسعه داد. در بخش اول از مطالعه خود، او یک معادله بر پایه تعادل انرژی برای یک برخورد الاستیک - پلاستیک برای پیش‌بینی فرسایش ناشی از مکانیزم تغییر شکل ارائه داد:

$$\varepsilon_{VP} = \frac{1}{2} \frac{(V_p \sin \alpha - K)^2}{\delta} \quad (7-2)$$

او مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل خود را با داده‌های تجربی مقایسه کرد، و گزارش کرد که تطابق خوبی بین مقادیری پیش‌بینی‌شده مدل و اطلاعات فرسایش برای جسم تردد در زوایای مختلف برخورد وجود دارد. در بخش دوم از این مطالعه، او دو حالت برای برخورد ذرات در نظر گرفت شامل ذراتی که سطح جسم را ترک می‌کنند هنوز هم مؤلفه افقی سرعت دارند و ذرات با مؤلفه سرعت افقی صفر در طی برخورد. او دو مدل برای مکانیزم برش بر پایه این حالت‌ها ارائه کرد:

$$\varepsilon_{VC1} = \frac{2MV_p (V_p \sin \alpha - K)^2}{(V_p \sin \alpha)^{1/2}} \left\{ V_p \cos \alpha - \frac{C(V_p \sin \alpha - K)^2}{(V_p \sin \alpha)^{1/2}} \chi \right\} \quad \text{For } \alpha \geq \alpha_{p0} \quad (8-2)$$

$$\varepsilon_{VC2} = \frac{\frac{1}{2} M \left[V_p^2 \cos^2 \alpha - K_1 (V_p \sin \alpha - K)^{3/2} \right]}{\chi} \quad \text{For } \alpha < \alpha_{p0} \quad (9-2)$$

میزان فرسایش نهایی مجموع فرسایش ناشی از این دو مکانیزم تغییر شکل و برش مکرر است:

$$\varepsilon_{VT} = \varepsilon_{VP} + \varepsilon_{VC} \quad (10-2)$$

نیلسون¹ و گیلچرست [45] دو مدل برای پیش‌بینی فرسایش ذرات در زاویه برخورد بزرگ و کوچک بر پایه کارهای قبلی به‌وسیله فینی [2] و بیتر [43, 44] ارائه کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که مؤلفه عمودی انرژی جنبشی برخورد ذرات باعث تغییر شکل پوشش می‌شود، درحالی‌که مؤلفه موازی انرژی جنبشی باعث برش پوشش می‌شود. آن‌ها فاکتورهای تغییر شکل و برش پوشش را معرفی کردند و پیشنهاد دادند که فرسایش نهایی بروی یک سطح به ترتیب برابر با مجموع فرسایش به علت مکانیزم‌های برش و تغییر شکل است.

در معادلات زیر، اولین و دومین ترم از سمت راست معادلات نشان‌دهنده فرسایش به علت برش و تغییر شکل است:

$$\varepsilon_v = \frac{\frac{1}{2} M [V_p^2 \cos^2 \alpha - V_r^2]}{\chi} + \frac{1}{2} \frac{M (V_p \sin \alpha - K)^2}{\delta} \quad \text{for } \alpha \leq \alpha_{p0} \quad (11) \quad (2-)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\frac{1}{2} M V_p^2 \cos^2 \alpha}{\chi} + \frac{1}{2} \frac{M (V_p \sin \alpha - K)^2}{\delta} \quad \text{For } \alpha > \alpha_{p0} \quad (12) \quad (2-)$$

او ذکر کرد که معادلات بیشتری برای تعریف فاکتورهای تغییر شکل و برش پوشش نیاز است. فینی [46] مدل قبلی خود را برای پیش‌بینی فرسایش مواد انعطاف‌پذیر اصلاح کرد. او معادله حرکت یک ذره ساینده را حل کرد و معادله زیر را برای پیش‌بینی میزان فرسایش ارائه کرد.

$$\varepsilon_v = \frac{c M V_p^2}{4 P \left(1 + \frac{m_p r^2}{I} \right)} \left(\cos^2 \alpha - \frac{\dot{\chi}_t'}{V_p} \right) \quad (13-2) \quad ($$

¹. Neilson

$$\dot{\chi}'_t = V_p \cos \alpha - \frac{2V_p}{P} \sin \alpha \quad (14-2)$$

فینی [46] دو احتمال که مکانیزم برش را متوقف می کند مطرح کرد. احتمال اول این است زمانی که که برش پایان می یابد که اجزا سرعت افقی نوک ذرات صفر باشد، احتمال دیگر این است که هنگامی که ذرات سطح را ترک می کنند هنوز نوک آن ها به صورت افقی حرکت می کند. بر پایه این دو احتمال، او با ساده سازی های بیشتر معادلات بالا، معادلات زیر را ارائه نمود:

$$\varepsilon_v = \frac{cMV_p^2}{4P \left(1 + \frac{m_p r^2}{I}\right)} \cos^2 \alpha \quad \text{for } \dot{\chi}'_t = 0 \quad (15-2)$$

$$\varepsilon_v = \frac{cMV_p^2}{4P \left(1 + \frac{m_p r^2}{I}\right)} \left(\sin(2\alpha) - \frac{2\sin^2 \alpha}{P} \right) \quad \text{for } y_t = 0 \quad (16-2)$$

این مدل دقت کمی در زاویه برخورد 90 درجه دارد. در مطالعه دیگری شلدون¹ و کانهره [47] یک مدل فرسایش بر پایه ویژگی های سختی فرورفتگی مواد برای یک ذره توسعه دادند. آن ها از یک رابطه تجربی بین بار اعمالی و قطر فرورفتگی پیشنهاد شده توسط میر [48] استفاده کردند. فرض آن ها بر این بود که رابطه میر برای فرسایش در سرعت پایین و زاویه برخورد عمودی معتبر است. به وسیله معادل سازی حداکثر مقدار انرژی جنبشی مصرف شده در طی فرآیند فرورفتگی و با استفاده از برخی ساده سازی های جبری و داده های تجربی، مدل ساده زیر را برای پیش بینی ماده کنده شده پیشنهاد کرد:

$$\varepsilon_{VT} = \frac{d_p^3 V_p^3 \rho_p^{3/2}}{H_v^{3/2}} \quad (17-2)$$

با مقایسه این مدل با داده های آزمایشگاهی آن ها مدعی شدند که توان سرعت در این مدل 3 به

¹. Sheldon

دست می‌آید با تطابق بیشتر نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی با در نظر گرفتن انرژی جنبشی توان بیشتر از 2 به دست آمد.

تیلی [17] یک مکانیزم دومرحله‌ای برای فرسایش مواد انعطاف‌پذیر پیشنهاد کرد. اولین مرحله مکانیزم فرسایش زمانی رخ می‌دهد که ذرات به سطح موردنظر برخورد می‌کنند و براده‌ها را از روی آن‌ها حذف می‌کنند. مرحله دوم فرسایش به وسیله برخورد ذرات به سطح موردنظر و شکستن آن‌ها به تکه‌های کوچک در اطراف شکاف اولیه ناشی از اولین مرحله فرسایش است. میزان خرد شدن تابعی از اندازه و سرعت ذرات است و بر این اساس او یک اندازه و سرعت آستانه پایین برای ذرات که منجر به هیچ‌گونه فرسایشی نمی‌شود، معرفی کرد. برای فرسایش اولیه (مرحله اول)، او یک مدل بر پایه بالانس انرژی بین انرژی موردنیاز برای ایجاد فرسایش پیشنهاد کرد، انرژی لازم برای ایجاد تغییر شکل الاستیک و انرژی جنبشی اولیه در زیر آمده است:

$$\varepsilon_1 = \hat{\varepsilon}_1 \left(\frac{V_p}{V_{ref}} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^{3/2} \frac{V_0}{V_p} \right]^2 \quad (18-2)$$

تیلی [17] فرض کرد که فرسایش ثانویه زمانی رخ می‌دهد که ذرات خرد می‌شوند، و میزان آن متناسب با میزان خرد شدن و انرژی جنبشی اولیه ذرات است.

$$\varepsilon_2 = \hat{\varepsilon}_2 \left(\frac{V_p}{V_{ref}} \right)^2 F_{d,v} \quad (19-2)$$

$$F_{d,v} = \frac{W_0 - W}{W_0} \quad (20-2)$$

بنابراین، فرسایش نهایی برابر مجموع فرسایش مرحله اول و دوم است:

$$\varepsilon_V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (21-2)$$

$$\varepsilon_V = \hat{\varepsilon}_1 \left(\frac{V_p}{V_{ref}} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_p} \right)^{3/2} \frac{V_0}{V_p} \right]^2 + \hat{\varepsilon}_2 \left(\frac{V_p}{V_{ref}} \right)^2 F_{d,V} \quad (22-2)$$

جنینگز¹ و همکاران [49] به صورت آزمایشگاهی گزارش داد که ذوب سطح موردنظر یک مکانیزم اصلی در فرسایش مواد انعطاف پذیر است. بر اساس فرضیات او یک تحلیل ابعادی برای توسعه یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن عواملی که پدیده فرسایش را تحریک یا مقاوم می کنند انجام داد:

$$\varepsilon_V = \frac{K_T^{5/2} G^{1/3}}{R \rho_t^{1/3} k T_m \Delta H_m} \quad (23-2)$$

هوتچینگز² و همکاران [16] با استفاده از یک سری آزمایشات تأثیر ذرات فولاد گرد، روی فولاد نرم را بررسی کرد و گزارش داد که نتایج آزمایشگاهی با موفقیت فرسایش ذرات شن را روی فلزات شبیه سازی کرده است، آن ها وابستگی ابعاد دهانه را با سرعت و زاویه برخورد بررسی کردند. همچنین یک روش فیلم برداری با سرعت بالا برای مطالعه بالانس انرژی در طی یک برخورد بکار گرفته شد. رابطه زیر برای پیش بینی میزان فرسایش بر پایه داده های آزمایشگاهی را ارائه کردند:

$$\varepsilon_m = 5.82 \times 10^{-10} V_p^{2.9} \quad (24-2)$$

آوانس³ و همکاران [50] آسیب برخورد ذرات بر مواد شکننده (ترد) در ناحیه پاسخ الاستیک-پلاستیک را مورد مطالعه قرار دادند، آن ها شکاف های شعاعی (روی سطح)، شکاف های جانبی (نفوذ) و آستانه شکستگی را با استفاده از یک بحث ساده خصوصیت برخورد دینامیک و مکانیک شکست، به منظور

1. Jennings

2. Hutchings

3. Evans

مشخص کردن شکستگی ناشی از برخورد را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها همچنین یک مدل فرسایش با پیدا کردن رابطه بین شکل شکاف شعاعی و چقرمگی شکاف مواد مورد نظر ارائه کردند.

$$\varepsilon_{VP} \propto \frac{V_P^{19/6} r^{11/3} \rho_P^{1/4}}{K_c^{4/3} H_t^{1/4}} \quad (25-2)$$

یک مدل نیمه تجربی برای پیش‌بینی میزان فرسایش در سرعت‌ها و زوایای برخورد مختلف به وسیله تاباکوف¹ و همکاران [51] توسعه داده شد. آن‌ها تصور کردند که فرآیند فرسایش را می‌توان به وسیله دو مکانیزم زوایای برخورد کوچک، متوسط و بزرگ و همچنین ترکیبی از آن‌ها است. در مدل آن‌ها، اثر ضریب جبران مماسی ذرات به عنوان یک پارامتر که بر میزان فرسایش اثر می‌گذارد به حساب آمده است:

$$\varepsilon_m = K_1 f(\alpha) V_P^2 (\cos^2 \alpha) (1 - e_t^2) + f(V_P, n) \quad (26-2)$$

$$e_t = 1 - 0.0016 V_P \sin \alpha \quad (27-2)$$

$$f(\alpha) = \left\{ 1 + K_4 \left[K_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{\alpha}{\alpha_m} \right) \right] \right\}^2 \quad (28-2)$$

$$f(V_P, n) = K_3 [V_P \sin(\alpha)]^4 \quad (29-2)$$

$$K_4 = \begin{cases} 1, & \alpha \leq 3\alpha_m \\ 0, & \alpha > 3\alpha_m \end{cases} \quad (30-2)$$

مدل مکانیکی دیگری برای پیش‌بینی میزان فرسایش برای فلزات که به وسیله ذرات کرووی با زاویه برخورد 90 درجه توسط هوتچینگز [52] توسعه داده شده است. او مدل زیر را به وسیله فرموله کردن معادله بالانس انرژی بین ذرات برخوردکننده و سطح فلز ارائه کرد:

¹. Tabakoff

$$\varepsilon_m = 0.033 \frac{\alpha \rho_t P^{0.5} V_p^3}{\Omega_c^2 H_t^{1.5}} \quad (31-2)$$

فرض اصلی مدل این است که ذرات تغییر شکل نمی‌دهند، خرد نمی‌شوند و اثرات الاستیک قابل اغماض است. باید ذکر شود که ترم α/Ω_c^2 می‌تواند به‌طور مستقل اندازه‌گیری شود. آن‌ها همچنین به این نتیجه دست یافتند که اگرچه سختی دینامیکی و انعطاف‌پذیری در معادله بالا لحاظ شده است، برای ترکیب کردن آن‌ها در معادله (19-2) به بررسی‌های بیشتری نیاز است تا مقادیرشان به دست آید.

ساندرا راجان [53] یک بیان تحلیلی برای میزان فرسایش بر پایه یک مفهوم متمرکزسازی ارائه کرد. مفهوم متمرکزسازی نشان می‌دهد که کرنشی که در آن تغییر شکل پلاستیک بروی سطح متمرکز موردنظر سبب تشکیل لبه به نام کرنش بحرانی می‌شود که به‌نوبه خود منجر به حذف مواد از سطح موردنظر و یا فرسایش می‌شود.

در مرحله اول، آن‌ها با انجام محاسبات جبری یک بیان برای تعداد برخورد بحرانی توسعه دادند. چهار پارامتر نامعلوم در معادله فرسایش آن‌ها شامل کرنش بحرانی ε_c میانگین افزایش کرنش $(\Delta \varepsilon_m)$ ، حجم تغییر شکل و یک توان وجود دارد. معادله ساختاری برای تنش جریان به‌عنوان یک تابعی از کرنش بحرانی ارائه شده است. آن‌ها با ساده‌سازی بیشتر معادله ساختاری را برای تنش جریان به‌عنوان یک تابعی از کرنش بحرانی ارائه کردند. آن‌ها با ساده‌سازی بیشتر معادله ساختاری و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در نهایت یک معادله برای کرنش بحرانی به‌عنوان تابعی از گرمای ویژه موردنظر و نقطه ذوب ارائه کردند. تابور [54] از رابطه زیر برای به دست آوردن یک معادله برای میانگین افزایش کرنش استفاده کرد، آن‌ها همچنین فرض کردند که حجم تغییر شکل پلاستیک متناسب با حجم دهانه (سوراخ) است و معادله فرسایش زیر ارائه کردند:

$$\varepsilon_m = \frac{0.085 V_p^{2.5} \rho_p^{0.25} \rho_t^{1-b} \alpha (z+1)^{5a} [1 - (z+1)/(z+2)] F(z)}{6.06^b (1-CT_C)^{1.25} [n_C C_p T_m^{0.75} (1-436/T_m)^{0.75}]^b (K_1 H_t)^{1.25-b}} \quad (32-2)$$

$$a = \frac{0.25 n_C^{1-a_1 S} (z+1)^S (K_1 H_t)^{a_1 S}}{[6.06 \rho_t C_p T_m^{0.75} (1-436/T_m)^{0.75}]^{a_1 S}} \quad (33-2)$$

$$b = (1+5a) a_1 \quad (34-2)$$

همچنین آن‌ها یک فرم مدل فرسایش جایگزین با استفاده از تعداد برخورد بحرانی، معادله پیشنهاد شده به وسیله هوتچینگز [52] را ارائه کردند:

$$\varepsilon_m = \frac{3.6 \times 10^{-3} V_p^3 \rho_p^{0.5} \rho_t^{1-j} \alpha (z+1)^{6a}}{6.06^j (1-CT_C)^{1.5} [n_C C_p T_m^{0.75} (1-436/T_m)^{0.75}]^j (K_1 H_t)^{1.5-b}} \quad (35-2)$$

$$j = (2+6a) a_1 \quad (36-2)$$

آن‌ها مدل ارائه شده را با داده‌های آزمایشگاهی مامون [55] و مدل خستگی¹ هوتچینگز [52]

مقایسه کردند و گزارش دادند که میزان فرسایش پیش‌بینی شده به وسیله مدل متمرکز در مقایسه با مدل‌های خستگی دقیق‌تر بوده است.

$$\varepsilon_m \approx \frac{6.5 \times 10^{-3} V_p^{2.5} \rho_p^{2.5}}{C_p T_m^{0.75} H_t^{0.25}} \quad (37-2)$$

ونوگوپال ردی² و ساندراراجان [56] آزمایشی روی دو مواد انعطاف‌پذیر در یک سرعت ثابت 40 متر

بر ثانیه و سه زاویه برخورد 30، 60 و 90 درجه انجام دادند. آن‌ها گزارش دادند که تشکیل لبه و شکست،

¹ . fatigue model

² . V. Reddy

مکانیزم اصلی فرسایش بر اساس تحلیل تصویربرداری الکترومیکروسکوپی¹ هستند. نتایج آن‌ها در تضاد با مطالعات قبلی، نشان می‌دهد که ماکزیمم فرسایش در زاویه برخورد عمودی است. آن‌ها همچنین یک مدل متمرکز استفاده کردند که نشان می‌داد میزان فرسایش متناسب است با:

$$\varepsilon_{vp} \propto \frac{L^3 \Delta \Omega_m}{\Omega_C} \quad (38-2)$$

جانسون² و همکاران [57] یک مدل آماری برای پیش‌بینی میزان فرسایش مواد تک کریستال شکننده توسعه دادند. آن‌ها بیان کردند که کنده شدن مواد ناشی از برخورد ذرات جامد به سطح از این قبیل مواد به وسیله شکست ترد کنترل می‌شود. با توجه به گزارشات، او دو نوع مختلف از مکانیزم پوسته‌پوسته شدن پیشنهاد داد: پوسته‌پوسته شدن جانبی (عرضی) و پوسته‌پوسته شدن میانی. وقتی یک ذره به سطح برخورد می‌کند، حجم ورقه ورقه شدن بستگی به مساحت و عمق ورقه ورقه شدن دارد. بنابراین، او فرض کرد که مساحت ورقه ورقه شدن و عمق ورقه ورقه شدن متناسب با عمق منطقه پلاستیک برای پوسته‌پوسته شدن جانبی و متناسب با گسترش شکاف میانی برای پوسته‌پوسته شدن میانی است. میانگین حجم ورقه ورقه شدن برابر است با مجموع کسر جرم ازدست‌رفته به علت ورقه ورقه شدن میانی و ورقه ورقه شدن جانبی است. او یک رابطه بین اندازه شکاف میانی و عمق ناحیه پلاستیک با خواص مواد را توسعه داد و معادله زیر را برای میزان فرسایش ارائه کرد. در این معادله، حداکثر نیروی برخورد با خواص مواد مرتبط است، مانند:

$$\varepsilon_m = (1-f) K_1 \frac{\rho_t \rho_p^{2/9} E_t^{2/3} V_p^{22/9} d_p^{2/3}}{H_t^{5/9} K_C^{4/3}} + f K_2 \frac{\rho_t \rho_p^{1/3} E_t V_p^{8/3} d_p}{H_t^{1/3} K_C^2} \quad (39-2)$$

¹. scanning electron microscope

². Johansson

سانداراجان [10] یک مدل برای پیش‌بینی میزان فرسایش برای مواد ترد، برای تمام زوایا و اشکال مختلف ذرات ارائه کرد. ایده اصلی پشت متمرکز سازی، تغییر شکل پلاستیک است که در آن یک کرنش بحرانی وجود دارد. که ε_c باعث می‌شوند بجای شکستن سطوح، لبه‌ها بروی سطح ایجاد شوند. بنابراین، وقتی فرسایش اتفاق می‌افتد که کرنش برابر کرنش بحرانی برای مواد پاک‌شده (کنده‌شده) شود. او پیشنهاد داد که برای زاویه برخورد عمودی، کار پلاستیک در ناحیه پلاستیک معادل با انرژی جذب‌شده در طی برخورد روی تغییر شکل پلاستیک بر پایه بالانس انرژی در ناحیه پلاستیک است. او معادله زیر را برای فرسایش بی‌بعد تحت زاویه برخورد عمودی با اجرای معادله‌ی ساختاری برای تغییر شکل پلاستیک ارائه کرد.

$$\varepsilon_m = \left(\frac{2^{n_h} C}{n_h C_p} \right) F(t) V_p^2 \sin^2 (1 - e^2) \quad (40-2)$$

$$e = \frac{1.9 H_p^{5/8}}{E_e^{1/2} \rho_p^{1/8} V_p^{1/4}} \quad (41-2)$$

$$F(t) \approx 0.02 - 0.05 \quad (42-2)$$

او از روابط انرژی جذب‌شده توسعه داده‌شده به‌وسیله باراج [58] به‌منظور پیش‌بینی میزان فرسایش در برخورد مورب برای مدل تغییر شکل پلاستیک متمرکز قبلی استفاده کرد. بر اساس یک بالانس انرژی، او پیشنهاد داد که میزان انرژی تلف‌شده در ناحیه برشی ناشی از انرژی جنبشی لحظه برخورد یک‌ذره معادل با کار پلاستیک موردنیاز برای کرنش حجمی لبه از صفر تا مقدار کرنش بحرانی (موردنیاز برای ایجاد فرسایش) است. او از معادله انرژی اتلافی ارائه‌شده به‌وسیله باراج [58] استفاده کرد و معادله زیر را برای میزان فرسایش تحت شرایط برخورد مایل به دست آورد:

$$\varepsilon_m = \left\{ C(n_h + 1) \frac{V_p^2}{2^{2-n_h} (n_h C_p (1 + \lambda))} \right\} \left(\frac{\mu}{\mu_C} \right) \left(2 - \frac{\mu}{\mu_C} \right) \cos^2 \alpha \quad (43-2)$$

در آخر، او پیشنهاد داد که میزان فرسایش کلی برابر با مجموع میزان فرسایش در زاویه برخورد

حالت عمودی معادله (40-2) و حالت مورب معادله (43-2) است:

$$\varepsilon_m = \left(2^{n_h} C V_p^2 \sin^2 \alpha F(t) / (n_h C_p) \right) \left[1 + \left\{ (n_h + 1) \left(\frac{\mu}{\mu_C} \right) \left(2 - \left(\frac{\mu}{\mu_C} \right) \right) \right\} / (4(1 + \lambda) \tan^2 \alpha F(t)) \right\} - e^2 \right] \quad (44-2)$$

یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی میزان فرسایش برای فولاد کربن با سطح خشک یا مرطوب در

دانشگاه تولسا، مرکز تحقیقات فرسایش/خوردگی در سال 1994 به وسیله آهلت [59] ارائه شد. این مدل

بر اساس یک سری آزمایشات برخورد مستقیم برای اشکال و زوایای برخورد مختلف ذرات برای محاسبه

نسبت فرسایش است:

$$\varepsilon_m = 2.17 \times 10^{-7} \times (BH)^{-0.59} F_s V_p^{2.41} F(\alpha) \quad (45-2)$$

مطابق با ژانگ¹ و همکاران [60] تابع زاویه برخورد ذرات را به صورت زیر تعریف کردند:

$$F(\alpha) = \sum_{i=1}^5 A_i \alpha^i \quad (46-2)$$

که در آن مقادیر A_i و F_s به صورت تجربی پیشنهاد شده است. یک مطالعه فرسایش بروی شیر

اختناق که به طور گسترده در صنایع نفت و گاز استفاده می شود به وسیله هاگن² و همکاران [61] انجام

شد. آن‌ها یک رابطه عمومی فرسایش را استفاده کردند و به صورت تجربی ضرایب معادله را تعیین کردند:

¹. Zhang

². Haugen

$$\varepsilon_W = MK_p F(\alpha) V_p^{n_p} \quad (47-2)$$

چن¹ و همکاران [62] یک مدل برای فرسایش در زاویه عمودی برخورد بر پایه یک مکانیزم تنش کششی باقی مانده ارائه کردند. آن‌ها فرض کردند که تنش کششی باقی مانده باعث حذف مواد از ناحیه دهانه می شود و آن‌ها یک معادله بر اساس نسبت $\left(\frac{\text{حجم ماده پاک شده}}{\text{حجم فرورفتگی}} \right)$ توسعه دادند. در مرحله بعد، بر اساس فرض مکانیزم فرسایش، آن‌ها از مدل شکست جانسون² و کوک [63] برای تعریف کرنش بحرانی برای فرسایش استفاده کردند. آن‌ها همچنین از تئوری گام تصادفی همراه با یک رابطه تجربی برای تخمین میانگین تعداد برخوردهای مورد نیاز به منظور حذف مواد استفاده کردند.

نهایتاً، تمام معادلات به دست آمده را داخل مدل فرسایش هوتچینگز [52] قرار دادند و معادله زیر برای تخمین میزان فرسایش را ارائه کردند:

$$\varepsilon_m = 0.064 \frac{\rho_t \rho_p^{0.5} V_p^3}{\bar{P}^{3/2} \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \right]^2 \left[1 + D_4 \ln \varepsilon^* \right]^2 \left[1 + D_5 T^* \right]^2} \quad (48-2)$$

چن³ و همکاران [64] یک مدل محاسباتی برای پیش بینی میزان فرسایش با استفاده از مدل کلی برخورد اصطکاکی پیشنهاد کردند. در واقع، بر اساس مطالعات تجربی قبلی از ضریب اصطکاک، آن‌ها یک مدل ریاضی برای محاسبه ضریب اصطکاک به نام "مدل کلی برخورد اصطکاکی" پیشنهاد کردند. آن‌ها معادلات حاکم پیشنهادی برخورد مورب بر پایه مطالعه هوتچینگز [52] و ترکیب آن را با مدل کلی برخورد اصطکاکی را اصلاح کردند. معادلات اصلاح شده برای محاسبه اجزای سرعت و زاویه برخورد بحرانی به صورت عددی حل شد. آن‌ها با استفاده از این پارامترها معادلات زیر را برای محاسبه تغییر شکل و برش

¹. Chen

². Johnson

³. Chen

و مقادیر فرسایش نهایی ارائه کردند:

$$\varepsilon_D = \frac{T_y}{m_p \delta} = \frac{\sum m_p V_{pn} \Delta V_{pn}}{m_p \delta} \quad (49-2)$$

$$\varepsilon_C = \frac{T_x}{m_p \chi} = \frac{\sum m_p V_{pt} \Delta V_{pt}}{m_p \chi} \quad (50-2)$$

$$T_t = T_x + T_y \quad (51-2)$$

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C + \varepsilon_D \quad (52-2)$$

لوین¹ و همکاران [65] یک مدل برای فرسایش ذرات جامد آلیاژهای تغییر شکل پذیر ارائه کردند. او یک مدل دقیق برای نشان دادن مکانیزم مواد کنده شده ارائه کرد، او بیان کرد که اثرات ویژگی های مکانیکی سطح موردنظر و ذرات ساینده و همچنین اثرات سخت کاری در طی فرآیند فرسایش باید در نظر گرفته شود. به عنوان نتیجه، آن ها بیان کردند که بخشی از انرژی جنبشی اولیه سبب تغییر شکل پلاستیک می شود، تغییرات شکل ذرات موردنظر تابعی از نسبت $\left(\frac{\text{سرعت برگشتن ذره}}{\text{سرعت برخورد ذره}}\right)$ که ضریب جبران نامیده می شود هستند. این ضریب همچنین تابعی از ویژگی های مکانیکی ذرات و مواد موردنظر است. او یک پارامتر فرسایش بر پایه انرژی ازدست رفته در طی فرسایش در ترکیب با خواص مکانیکی آلیاژها و همچنین سیر تکامل این ویژگی ها در طی تغییر شکل ارائه کرد.

$$\varepsilon_m \propto E_{Parameter} = \frac{m_p V_p}{2} \left\{ \frac{\left[1 - \left(\frac{3.06 H_t^{\frac{5}{4}}}{\rho_p V_p^{\frac{1}{2}}} \right) \left(\frac{(1 - \mu_t^2)}{E_t} + \frac{(1 - \mu_p^2)}{E_p} \right) \right]}{T \cdot L_v} \right\} \quad (53-2)$$

¹. Levin

همچنین اوکا¹ و همکاران [24] یک رابطه تجربی مشابه معادله فرسایش موسسه تحقیقاتی فرسایش دانشگاه تولسا² ارائه کرد. آن‌ها معادله اساسی وابستگی فرسایش به سرعت برخورد در زاویه عمودی با در نظر گرفتن اثرات سختی مواد، قطر ذرات و خواص ذرات را اصلاح کردند:

$$\varepsilon_{90} = K_p (H_v)^{k_1} (V_p)^{k_2} (d_p \times 10^{-6})^{k_3} \quad (54-2)$$

که در آن k_1 و k_3 مقادیر توان تجربی و k_2 یک تابعی از سختی مواد و خواص ذرات است. k_p یک فاکتور مستقل هست که دلالت بر خواص ذرات از جمله شکل یا سختی دارد. آن‌ها معادلات بالا را برای تمام زوایای برخورد با معرفی یک تابع زاویه برخورد زیر تعمیم دادند:

$$f(\alpha) = (\sin \alpha)^{n_1} (1 + H_v (1 - \sin \alpha))^{n_2} \quad (55-2)$$

$$\varepsilon_v(\alpha) = \varepsilon_{90} f(\alpha) \quad (56-2)$$

که در آن n_1 و n_2 به وسیله سختی مواد یا دیگر شرایط برخورد تعیین می‌شود. آن‌ها بیان کردند که ترم اول از سمت راست تابع زاویه برخورد نشان‌دهنده تغییر شکل پلاستیک مکرر و ترم دوم نشان‌دهنده برش فعال است. تطابق خوبی بین مدل ارائه شده با داده‌های فرسایش آلومینیوم، مس، فولاد کربن دار و فولاد ضدزنگ در مطالعه‌شان گزارش شد.

در دیگر مطالعه اوکا³ و یاشودا [23] دیگر ویژگی‌های مکانیکی به غیر از سختی از جمله سخت کاری و نسبت بار مجاز اعمالی را در نظر گرفتند و یک رابطه برای پیش‌بینی میزان فرسایش در زاویه عمودی ارائه کرد:

¹. Oka

². E/CRC

³. Oka

$$\varepsilon_{90} = k_p (k_4 H_v)^{-bk_1} \quad 0 \leq k_4 H_v \leq 1 \text{ \& } b \geq 0 \quad (57-2)$$

آن‌ها با اصلاح بیشتر معادله (57-2) معادله زیر را برای زاویه و سرعت برخورد، اندازه مختلف ذرات و همچنین انواع مختلف مواد ارائه دادند:

$$\varepsilon_{90} = K_p (k_4 H_v)^{k_1 b} \left(\frac{V_p}{v'} \right)^{k_2} \left(\frac{d_p}{d'} \right)^{k_3} \quad (58-2)$$

$$\varepsilon_v(\alpha) = f(\alpha) \varepsilon_{90} \quad (59-2)$$

که در آن k_1 و k_3 ثوابتی که به وسیله ویژگی‌های ذرات تعیین می‌شود و k_2 تابعی از سختی مواد و ویژگی‌های ذرات است. v' و d' سرعت برخورد استاندارد و قطر استاندارد است که در آزمایش‌هایشان استفاده شد.

یک مدل پدیده‌شناسی برای فرسایش به وسیله هانگ¹ و همکاران [66] ارائه شد. آن‌ها اشاره کردند که برخورد ذرات به یک سطح جهت‌های مماسی و عمودی ایجاد می‌کند که باعث تغییر شکل می‌شود. آن‌ها در نظر گرفتند که جزء عمودی نیرو مسئول "کندن آسیب تغییر شکل" است و جزء مماسی برای "کندن آسیب برشی" می‌شود. آن‌ها با توجه به نیروی عمودی معادله‌ای برای ماکزیمم عرض و عمق حفره‌ها با استفاده از معادله حرکت در جهت عمودی پیدا کردند. آن‌ها یک معادله برای محاسبه حجم حفره اولیه پیشنهاد کردند. همچنین مشتق معادله را برای محاسبه کرنش متوسط ایجادشده در سطوح به وسیله برخورد عمودی معرفی کردند. از سوی دیگر، یک پروفیل برشی برای محاسبه حجم برش ناشی از نیروی مماسی به عنوان یک تابع از ماکزیمم عرض، عمق و طول برش پیشنهاد دادند. آن‌ها از معادلات کافین [67] و مانسون [68] همراه با معادله کرنش بحرانی برای محاسبه حجم کنده‌شده به وسیله تغییر

¹. Huang

شکل استفاده کردند:

$$\varepsilon_{VD} = C_1 \frac{m_p \rho_p^{\frac{1}{4b'}} (V_p \sin \alpha)^{\left(2 + \frac{1}{2b'}\right)}}{\varepsilon_C^{1/b'} P_n^{\left(1 + \frac{1}{4b'}\right)}} \quad (60-2)$$

برای حجم پاک‌شده واقعی برش به‌وسیله یک‌ذره، فرض آن‌ها متناسب با حجم برش بود اما با شکل‌پذیری مواد نسبت معکوس دارد.

$$\varepsilon_{VC} = \frac{C_2 m_p^{\left(1 + \frac{3(1-n_s)}{4}\right)} V_p^{\left(2 + \frac{3(1-n_s)}{2}\right)} (\cos \alpha)^2 (\sin \alpha)^{\frac{3(1-n_s)}{2}}}{d_p^{\frac{(1-n_s)}{4}} \varepsilon_0^i P_t P_n^{\frac{3(1-n_s)}{4}}} \quad (61-2)$$

آن‌ها در نهایت معادله زیر را برای پیش‌بینی حجم ازدست‌رفته نهایی پیشنهاد کردند، که برابر با مجموع حجم ازدست‌رفته به‌وسیله تغییر شکل و برش است:

$$\varepsilon_{VT} = \varepsilon_{VC} + \varepsilon_{VD} \quad (62-2)$$

او تأکید کرد که فرسایش پیشنهادی اثرات جرم ذره، اندازه، شکل، سرعت و همچنین زاویه برخورد و ویژگی‌های مواد را در نظر می‌گیرد. آن‌ها با تفسیر ساده معادله (62-2) برای حالتی که زاویه برخورد جامد جابجا شده کوچک و هنگامی که برش پوشش مکانیزم غالب فرسایش باشد معادله زیر را عنوان کردند:

$$\varepsilon_V = \frac{\varepsilon_{VT}}{m_p} \approx C_2 \rho_p^{0.1875} d_p^{0.5} V_p^{2.375} (\cos \alpha)^2 (\sin \alpha)^{0.375} \quad (63-2)$$

سویزی¹ و همکاران [69] با استفاده از داده‌های تجربی اصلاح‌شده مدل قبلی شلدون² و کانهره [47]

¹. Nsoesie

². Sheldon

که بر پایه تئوری سختی حفره بود، به صورت آزمایشگاهی میزان فرسایش را برای پنج آلیاژ فولادی در دو زاویه و سرعت برخورد متفاوت بررسی کردند. اندازه گیری های آن ها میزان فرسایش بیشتری برای آلیاژ فولادی در مقایسه با پیش بینی های مدل شلدون و کانهره [47] نشان دادند. نتایج آن ها نشان داد که چون این مدل بر پایه اطلاعات تجربی آلومینیم توسعه داده شده و آلومینیم انعطاف پذیری بیشتری نسبت به آلیاژهای فولادی دارد، سرعت بحرانی پیش بینی شده آن نسبت به آلیاژهای فولادی کمتر است. بر پایه این مشاهدات، آن ها یک ضریب تصحیح در این مدل معرفی کردند. آن ها مدل را با در نظر گرفتن اثر زاویه برخورد تغییر بیشتری دادند. فاکتور زاویه برخورد رابطه شامل دو ثابت تجربی به نام ضریب انتقال A و توان انتقال B که به ماده مورد نظر بستگی دارد. شکل نهایی معادله آن ها به صورت زیر است:

$$\varepsilon_V = \frac{C_1 d_p^3 \left(V_p \left(A \left(\sin(\alpha/2)^{1/3} \right) \right)^B \right)^3 \rho_p^{3/2}}{H_V^{3/2}} \quad (64-2)$$

در حالی که برخی از این مدل ها با اطلاعات فرسایش ذرات جامد اعتبار سنجی شده است، بسیاری از این مدل ها فرسایش ذرات شن را در نظر نمی گیرد. همان طور که در بالا اشاره شد، هیچ یک از این مدل ها اثرات سیال استخراج شده را در نظر نمی گیرد. حضور ذرات شن در سیالات استخراج شده علت اصلی آسیب فرسایش است و کاهش میزان استخراج یکی از روش های کنترل مورد استفاده برای جلوگیری از آسیب فرسایش است. در این نمونه، حداکثر سرعت استخراج به یک مقدار آستانه به نام سرعت فرسایشی (بالتر از این سرعت می تواند فرسایش بیشتری رخ دهد) محدود شده است. در نتیجه، میزان شن استخراج شده، سرعت های برخورد و همچنین میزان فرسایش کاهش می یابد. بدیهی است، کاهش میزان استخراج پیامد مالی را ایجاد می کند. شرکت های نفت و گاز به دنبال استفاده از روش های ساده برای پیش بینی میزان فرسایش هستند. در بخش زیر مدل های مکانیکی و تجربی موجود در مقالات ارائه شده است.

2-3-2- پیش‌بینی تجربی فرسایش در خطوط لوله

یکی از اولین معادلات تجربی برای به دست آوردن سرعت فرسایش توسط شرکت ملی نفت آمریکا¹ [70] پیشنهاد شده است:

$$V_e = \frac{C_1}{\sqrt{\rho_m}} \quad (65-2)$$

که در آن V_e سرعت فرسایش به فوت بر ثانیه و C_1 ثابت تجربی، و ρ_m چگالی مخلوط سیال به پوند بر فوت مکعب است. شرکت ملی نفت آمریکا استفاده از یک مقدار ثابت تجربی به ترتیب از 100 و 125 برای تمیزکاری با (مواد جامد غیر خورنده) به صورت مداوم و نوبتی را پیشنهاد داد. وقتی که مواد جامد و یا شرایط خورنده وجود دارد، شرکت ملی نفت آمریکا پیشنهاد کاهش فاکتور C_1 را داده اما هیچ دستورالعملی در مورد نحوه بکار بردن آن ارائه نمی‌دهد.

اساساً این معادله به دلایل مختلفی به‌غیر از فرسایش شن نسبت داده شده است. متعاقباً، مقادیر مختلفی برای فاکتور C توسط محققان مختلف از جمله سالما² و ونکاتشی [71]، هیدرزباچ [72] و گیپسون [73] پیشنهاد شده است، آن‌ها نشان دادند که این معادله برای انجام تمیزکاری خیلی قدیمی است .

برای استفاده از معادله شرکت ملی نفت آمریکا در کارهایی به‌غیر از تمیزکاری چندین محدودیت وجود دارد. زیرا بسیاری از عوامل مهم شامل اندازه ذرات جامد، شکل، میزان شن استخراج شده، ویژگی‌های جریان چند فاز در معادله در نظر گرفته نمی‌شود. به‌علاوه، این معادله مقادیر غیرواقعی سرعت فرسایش و کاهش چگالی سیال مخلوط را پیش‌بینی می‌کند. نیروهای اعمالی بر روی یک‌ذره با کاهش

1. API RP

2. Salama

چگالی سیال، کاهش می‌یابد، که باعث می‌شود ذرات با سرعت بالاتری برخورد کنند و در نتیجه فرسایش بیشتری به وجود آید. برخی از محققین به این نتیجه دست یافتند که معادله شرکت ملی نفت آمریکا برای خدماتی به‌غیر از تمیزکاری از جمله برخورد قطرات مایع معتبر نیست و تلاش فراوانی برای توسعه یک روش جایگزین برای پیش‌بینی فرسایش انجام شده است.

سالما¹ و همکاران [71] مدل فرسایش زیر را برای زانویی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی رابینوزک [74] برای نسبت فرسایش مواد تغییر شکل‌پذیر توسعه دادند:

$$ER = 1.86 \times 10^5 \frac{\dot{W}_p V_f^2}{P D^2} \quad (66-2)$$

که در آن ER نشان‌دهنده میزان فرسایش، $\dot{W}_p$ میزان جریان شن و V_f سرعت جریان سیال، D قطر لوله، P سختی مواد است. همچنین نشان دادند که میزان فرسایش در سهراهی‌ها حدود نصف میزان فرسایش در زانویی‌ها است. همچنین معادله (66-2) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$ER = S_k \frac{V_f^2 \dot{W}_p}{D^2} \quad (67-2)$$

مقادیر بیان شده برای ضریب S_k برای شعاع‌های کم زانویی و سهراهی به ترتیب از 0/019 تا 0/038 است. از آنجاکه این مدل بر پایه اطلاعات فرسایش در جریان هوا - شن توسعه داده شده است، مقادیر فرسایش پیش‌بینی شده دقت بیشتری برای سیستم‌ها با جریان‌ات گازی دارد.

بورگوینل [75] میزان فرسایش را در جریان‌ات جامد - گاز، جامد - مایع در یک دایورتور² تقسیم‌کننده نفت از چاه را ارائه کرد او یک معادله برای پیش‌بینی ضخامت ازدست‌رفته در جریان‌ات

¹. Salama

². diverter

پیوسته گازی پیشنهاد کرد (جریان گاز خشک یا جریان مرطوب).

$$ER = F_e \frac{\dot{W}_p}{A_{pipe}} \frac{\rho_p}{\rho_t} \left(\frac{V_{SG}}{100\alpha_g} \right)^2 \quad (68-2)$$

که در آن ER میزان فرسایش، F_e فاکتور مخصوص فرسایش، ρ_p و ρ_t به ترتیب چگالی ذره و دیوار، $\dot{W}_p$ میزان جریان شن، A_{pipe} سطح مقطع لوله، V_{SG} سرعت نسبی گاز و جامد و α_g کسر حجمی گاز است. فاکتور ویژه فرسایش به نوع هندسه، جنس دیوار و شرایط جریان (جریان گاز خشک یا مرطوب) بستگی دارد. بورگوینل [75] معادله دیگری برای جریان سیال پیوسته ارائه کرد:

$$ER = F_e \frac{\dot{W}_p}{A_{pipe}} \frac{\rho_p}{\rho_t} \left(\frac{V_{SL}}{100H_L} \right)^2 \quad (69-2)$$

که در آن V_{SL} سرعت سطحی سیال و H_L ارتفاع سیال است. معادلات بورگوینل [75] بر پایه داده‌های آزمایشگاهی که در مقادیر جریان بالا به دست آمده، توسعه یافته است. همچنین آزمایش‌های او تحت غلظت کم ذرات برای مقادیر جریان شن بالا که ممکن است در سیستم‌های دایورت و کارهای دیگر برای صنایع نفت و گاز تولید می‌شود، سؤال برانگیز است.

اسودمن¹ و آرنولد [76] قابلیت اجرای معادلات بورگوینل [75] را تحت سرعت جریان کم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها متوجه شدند که این مدل مقادیر بیشتری از داده‌های آزمایشگاهی موجود با یک مقدار متوسط 25 درصد پیش‌بینی می‌کند. اجزاء مختلف تشکیل دهنده پوشش پارامترهای کنترلی متفاوتی دارند. با توجه به این واقعیت اسودمن و آرنولد [76] پیشنهاد دادند که معیارها برای اندازه خطوط جریان چند فاز باید به چهار گروه تقسیم شود از جمله: خدمات تمیزکاری، فرسایشی، خورنده و سرویس

¹. Svedeman

فرسایشی - خوردگی. آن‌ها دوباره معادلات بورگوینل [75] را مرتب کردند و یک معادله سرعت فرسایشی برای فرسایش بر پایه مقدار فرسایش قابل قبول از 5 میل در سال پیشنهاد کردند.

$$V_e = K_S \frac{D}{\sqrt{\dot{W}_p}} \quad (70-2)$$

در معادله (70-2) V_e سرعت فرسایش، D قطر لوله، $\dot{W}_p$ مقدار جریان شن، ضریب K_S برای زانویی‌ها با شعاع بزرگ و سهرای به ترتیب از $1/34$ و $7/04$ است. توجه داشته باشید که سرعت فرسایشی مخلوط (مجموع سرعت سیال و سرعت سطحی گاز) است. اسودمن و آرنولد [77] مقادیر مختلفی برای ضریب S_k در معادله پیشنهادی به‌وسیله سالما و ونکاتشی [71] فرض کردند. مقادیر S_k برای شعاع بزرگ زانویی‌ها و سهرای‌های به ترتیب از $0/017$ و $0/0006$ بود. جردن [78] در نظر گرفت که مقدار حجم ازدست‌رفته ماده باید با مجذور سرعت ذره و نرخ حجمی که در آن ذرات بروی دیوار برخورد می‌کنند، به‌صورت خطی متفاوت باشد. جردن [78] اطلاعات بورگوینل [80] را اجرا کرد و معادله زیر را ارائه کرد:

$$ER = 10^{C_1} V_{SG}^{2.349} \dot{W}_p^{0.9535} \left(1 - \left(1 + \frac{1}{2r_C} \right)^{-2} \right)^{\frac{1.8885}{2}} \quad (71-2)$$

که در آن r_C شعاع خم منحنی است. واحد پارامترها، مشابه واحد در معادله بورگوینل [75] است. ضریب C_1 برای مواد قالب‌گیری شده و بدون درز به ترتیب $4/9619$ و $5/4355$ است. سالما [79] قطر ذره و چگالی مخلوط سیال برای به دست آوردن جریان چند فاز و معادله سالما¹ و ونکاتشی [71] را باهم ترکیب کرد.

¹. Salama

$$ER = \frac{1}{S_m} \frac{\dot{W}_p V_m^2 d_p}{D^2 \rho_m} \quad (72-2)$$

در معادله (72-2)، $\dot{W}_p$ و D به میلی‌متر در سال، کیلوگرم در روز و میلی‌متر هستند. d_p قطر ذره به میکرون، V_m سرعت مخلوط به متر بر ثانیه است و ρ_m چگالی مخلوط سیال است، ضریب S_m یک ثابت وابسته به هندسه است. به‌وسیله داده‌هایی از وینر و تولی [80] و بیرچینوک و همکاران [81] مقدار آن را کالیبره کردند. مقدار S_m برای زانویی‌ها را 5/5 تا 33 برای مواد بدون درز قالب‌گیری شده، 68 برای جریان گاز و مایع در سهراهی‌ها و 1379 برای جریان گاز در سهراهی به‌دست‌آمده است. به نظر می‌رسد مقدار S_m زانویی برای نمونه آخری بسیار بزرگ است و محققان بیان کردند که اعتبار سنجی بیشتری برای این نمونه (جریان گاز در سهراهی) موردنیاز است.

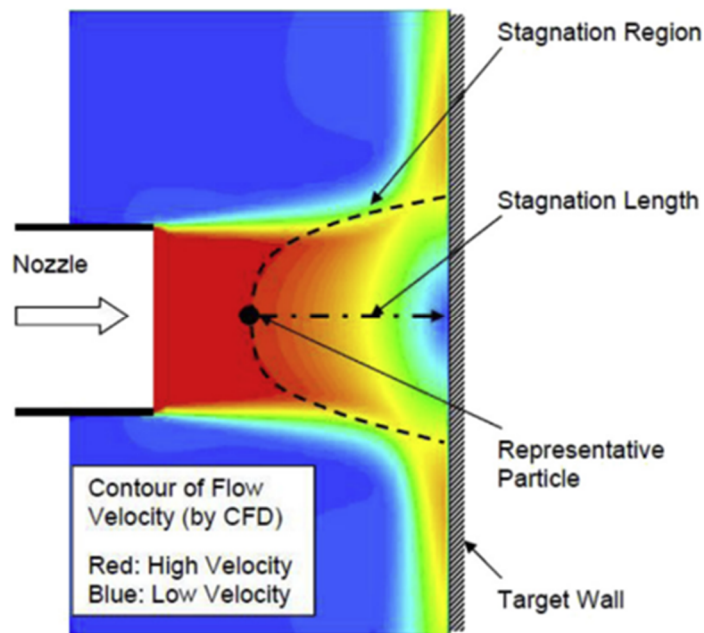
از آنجاکه نتایج آزمایشات تفاوت عمده‌ای بین فرسایش در انحنا با شعاع r_c ، 1,5 و 5 را نشان می‌دهد، سالما [79] اثر شعاع انحنا زانویی را در این معادله در نظر نمی‌گیرد.

معادلات تجربی آسان هستند اما اغلب عدم اطمینان برای اقتباس از آن‌ها وجود دارد، چون مکانیزم فرسایش در شرایط مختلف ممکن است تغییر کند و روند اصلی را دنبال نکند. برخی از محققان مدل‌های مکانیکی برای پیش‌بینی فرسایش جامع‌تری را توسعه دادند. این مدل‌ها بر پایه فیزیک و مکانیزم فرسایش و شامل پارامترهای مختلف که می‌توانند بر پدیده فرسایش اثر بگذارند، توسعه‌یافته است. در ادامه در مورد مدل‌سازی مکانیکی فرسایش بحث می‌شود.

2-3-3- مدل‌های مکانیکی برای پیش‌بینی فرسایش در جریان‌های تک فاز

در یک هندسه برخورد مستقیم، قبل از برخورد به دیوار، ذرات به داخل یک ناحیه‌ای در مجاورت دیوار وارد می‌شوند که در آن سرعت ذرات به‌وسیله سیال کاهش پیدا می‌کند. این ناحیه در شکل 2-8

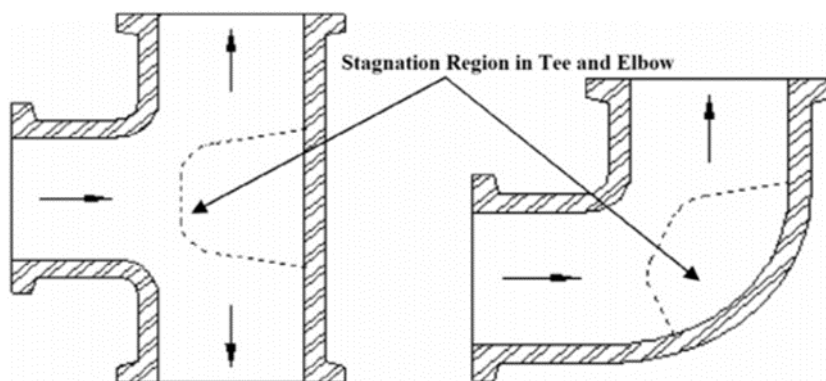
ناحیه سکون نامیده می‌شود برای گزارش این کاهش سرعت ذرات، شیرازی¹ و همکاران [82] یک‌روند مکانیکی برای پیش‌بینی فرسایش در جریان‌ات تک فاز در زانویی‌ها و سه‌راهی‌ها فرض کردند.



شکل 2-8: شماتیک ناحیه سکون در هندسه برخورد مستقیم [83].

روند فرضیه منظور شده آن‌ها برای ذراتی که به دیوار موردنظر برخورد می‌کنند به صورتی است که ذرات باید از طریق یک رژیم مشابه با ناحیه سکون به وسیله یک هندسه برخورد مستقیم مانند شکل 2-9 نفوذ کنند. برای پیاده‌سازی اثر اندازه و نوع هندسه بروی فرسایش آن‌ها مفهوم "معادل‌سازی طول سکون" را ارائه کردند. از آنجاکه این مدل اساس بسیاری از مدل‌های مکانیکی توسعه‌یافته بعدی است، جزئیات آن بیان‌شده است.

¹. Shirazi



شکل 2-9: شماتیک ناحیه سکون در زانویی و سه‌راهی [83].

در مدل ارائه‌شده به‌وسیله شیرازی و همکاران [82]، سرعت برخورد یک‌ذره در حال حرکت در ناحیه سکون از مبدأ L نشان داده‌شده محاسبه‌شده است. سپس از سرعت برخورد ذره برای تخمین میزان فرسایش استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که به‌طور کلی سرعت برخورد ذره همان سرعت توده سیال نیست. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، سرعت برخورد ذرات بستگی به عواملی مانند چگالی سیال، ویسکوزیته و چگالی ذرات دارد. برای محاسبه سرعت برخورد ذرات، پروفیل سرعت ذرات در ناحیه سکون باید مشخص باشد. فرض شده است که سرعت سیال V_f به‌طور خطی از سرعت تعیین‌شده سیال V_{char} در $x=0$ تا سرعت صفر در $x=L$ کاهش پیدا می‌کند و از معادله زیر پیروی می‌کند:

$$V_f = V_{char} \left(1 - \frac{x}{L_{stag}} \right) \quad (73-2)$$

سرعت برخورد ذرات V_L در یک نمونه یک‌بعدی رویکرد ردیابی ذرات در امتداد طول سکون ارزیابی و استفاده‌شده است. در این رویکرد معادلات حرکت ذرات به‌صورت عددی حل می‌شود. نیروی پسا تنها نیروی در نظر گرفته‌شده در معادله (74-2) است که در زیر نشان داده‌شده است:

$$m_p V_p \frac{dV_p}{dX} = 0.5 \rho_f (V_f - V_p) |V_f - V_p| C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (74-2)$$

در معادله (74-2) m_p جرم ذرات، V_p سرعت ذرات، V_L سرعت سیال در موقعیت ذرات، ρ_f چگالی سیال، C_D ضریب پسا هستند. ترم سمت راست معادله بالا نشان‌دهنده نیروی پسا است. ضریب پسا اعمالی از رابطه ساده زیر به‌دست آمده است:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + 0.5 \quad (75-2)$$

که در آن

$$Re_p = \frac{\rho_f |V_f - V_p| d_p}{\mu_f} \quad (76-2)$$

μ_f ویسکوزیته سیال و Re_p اصطلاحاً عدد رینولدز ذرات نامیده می‌شود. سرعت برخورد V_L محاسبه‌شده و سپس در رابطه تجربی معادله فرسایش زیر جایگذاری می‌شود:

$$ER = 1.73 \times 10^{-6} V_L^{1.623} \quad (77-2)$$

که در آن ER نسبت جرم کنده‌شده از ماده موردنظر (به علت برخورد ذرات) به جرم کل ذرات است.

معادلات فرسایش بر پایه داده‌های فرسایش برای فولاد کم‌کربن توسعه‌یافته‌اند. در معادله (73-2)، L_{stag}

طول ناحیه سکون است که می‌تواند با استفاده از یک معادله نیمه تجربی برای زانویی‌ها به‌دست آید:

$$\frac{L_{stag}}{L_{ref}} = 1 - 1.27 \tan^{-1} (1.01 D^{-1.89}) + D^{0.129} \quad (78-2)$$

که در آن L_{ref} ، $1/18$ اینچ است، برای سهرای‌ها، L_{stag} می‌تواند از معادله زیر به‌دست آید:

$$\frac{L_{stag}}{L_{ref}} = 1.35 - 1.32 \tan^{-1} (1.63 D^{-2.96}) + D^{0.247} \quad (79-2)$$

که در آن $L_{ref} / 06$ اینچ است. در این معادلات D قطر لوله به اینچ است. این فرمول‌های نیمه تجربی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی توسعه یافته است. برای قطرهای لوله کوچک‌تر طول سکون وابستگی بسیاری به قطر لوله دارد. اما برای قطر بزرگ‌تر لوله (قطرهای بزرگ‌تر از حدود 6 اینچ)، وابستگی طول سکون به قطر لوله ضعیف‌تر است. علاوه بر این، با افزایش قطر لوله، طول سکون افزایش می‌یابد و در نتیجه ذرات باید از طریق یک ناحیه با سیال بیشتر (در مقایسه با قطر لوله کوچک‌تر) برای برخورد به دیوار نفوذ کنند.

مدل شیرازی و همکاران [82] را در چهار مرحله می‌توان خلاصه کرد:

1- طول سکون از معادلات (78-2) و (79-2) به دست می‌آید به نوع هندسه وابسته است. برای

محاسبه این طول به پروفیل سرعت سیال معادله (73-2) نیاز است.

2- پروفیل سرعت جریان از معادله (73-2) تعیین می‌شود. در این معادله سرعت مشخصه جریان

V_{char} معادل با سرعت متوسط سیال تنظیم می‌شود.

3- سرعت برخورد ذرات با حل معادله حرکت ذرات (74-2) محاسبه می‌شود. سرعت سیال در

موقعیت ذرات از گام قبلی به دست می‌آید. توجه شود که در معادله حرکت ذرات، سرعت ذرات V_p در

$x=0$ به عنوان یک شرط مرزی اولیه مورد نیاز است، که در آن فرض می‌شود سرعت اولیه ذرات معادل با

سرعت مشخصه جریان V_{char} است. وقتی فاصله ذرات تا دیوار معادل با شعاع ذرات است ردیابی ذرات

متوقف می‌شود و سرعت ذرات در این موقعیت به عنوان سرعت برخورد ذرات در نظر گرفته می‌شود.

4- نهایتاً سرعت برخورد ذرات برای به دست آوردن نسبت فرسایش در معادله (45-2) جایگذاری

می‌شود.

مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل شیرازی و همکاران [82] با داده‌های آزمایشگاهی در [75] و [20]

مقایسه شد و تطابق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد.

مزیت‌های مدل، در این است که روش مناسبی برای محاسبه بسیاری از جریان‌ها، پارامترهای مؤثر بر میزان فرسایش از قبیل سرعت، چگالی ویسکوزیته سیال، شکل، اندازه و چگالی ذرات، اندازه و شکل هندسه در آن وجود دارد. این مدل از طریق معادلات حرکت ذرات و تغییر طول سکون مقادیر را برای پارامترهای ذکرشده محاسبه می‌کند.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در جریان سیال کم‌چگالی حاوی ذرات زیاد از قبیل جریان گاز - ذرات، اثرات تبادل ممنتم بین فاز سیال حامل و فاز پراکنده (ذرات) خیلی کم است از آنجاکه فاز حامل نمی‌تواند مسیر ذرات سنگین را تغییر دهد و در نتیجه، ذرات سنگین می‌توانند از خطوط جریان عبور کنند و به دیوار برخورد بکنند. در این مثال، ذرات در یک زاویه 90 درجه با سرعت برخورد مشابه با توده فاز حامل به دیوار موردنظر برخورد می‌کنند. این مکانیزم فرسایش، مکانیزم برخورد مستقیم نامیده می‌شود.

این روند به‌وسیله شیرازی و همکاران [82] توسعه‌یافته اما به دلیل دو محدودیت دارای مشکل است. اولاً، فرض حالتی که مسیر حرکت ذرات یک خط مستقیم است (مکانیزم برخورد مستقیم)، که این وضعیت برای ذرات کم در جریان سیال با چگالی زیاد از قبیل جریان ذرات - سیال قابل‌قبول نیست در این حالت، ذرات به پیروی از خطوط جریان تمایل دارند. در مرحله دوم، حالت جایگذاری اثرات آشفستگی بر روی مسیر ذرات وجود ندارد.

ژانگ¹ و همکاران [83] متوجه شدند که برای برخی نمونه‌ها، اجزای مماسی سرعت برخورد ذرات و نوسانات آشفتگی اجزای سرعت در محاسبات فرسایش مهم هستند. این فاکتورها برای پیش‌بینی فرسایش نسبت به اجزای عمودی سرعت برخورد ذرات مهم‌تر هستند. آن‌ها یک‌روند دوبعدی را برای رسیدگی به محدودیت‌های مدل یک‌بعدی شیرازی پیشنهاد کردند.

در گام اول ژانگ و همکاران [83] با میانمایی برخی اطلاعات شبیه‌سازی CFD ذخیره‌شده از قبل اطلاعات میدان جریان را به دست آوردند. شبیه‌سازی‌های CFD قبلی برای یک محدوده از اعداد رینولدز به‌دست‌آمده است. اطلاعات ذخیره‌شده قبلی CFD شامل اجزای سرعت سیال، فشار، انرژی جنبشی آشفتگی و میزان اتلافات جریان و تنش رینولدز است. درون‌یابی بر اساس عدد رینولدز حالت موردنظر انجام شد.

در گام دوم، اطلاعات درون‌یابی تهیه‌شده در گام اول برای محاسبه اطلاعات برخورد ذرات شامل مکان ذرات، سرعت و زاویه برخورد استفاده شد. در حالت دوبعدی بسیاری از ذرات ردیابی شدند برخلاف مدل یک‌بعدی که در آن تنها یک‌ذره مشخص شده دنبال می‌شود. از آنجاکه نوسانات آشفتگی اجزا سرعت آنی و فاصله‌ها تصادفی هستند، نتایج آماری ردیابی بسیاری از ذرات مستقل از تعداد ذرات ردیابی شده را فراهم می‌کند. برای شبیه‌سازی مقادیر آنی نوسانات سرعت در موقعیت ذرات در طی ردیابی ذرات "مدل برخورد گردابه‌ها" [84] استفاده شده است. این مدل برای محاسبه پدیده‌های مختلف از قبیل آشفتگی غیریکنواخت [85] و اثر اینرسی ذرات [86] به‌وسیله بسیاری از محققان اصلاح و استفاده شده است.

در گام سوم معادله فرسایش (2-45) موسسه تحقیقات فرسایش دانشگاه تولسا² از اطلاعات برخورد

¹. Zhang

². E/CRC

ذرات برای محاسبه میزان فرسایش ناشی از برخورد ذرات استفاده می‌کند.

جدول 2-2: مروری بر تحقیقات پیشین

محققین	سال	نوع کار	سیال	شرح انجام کار	نتیج مرتبط
مجید صفار اول و گودرز احمدی [87]	2014	عددی	هوا	اثر زبری دیوار بر میزان فرسایش در دولوله هم مرکز، دوبعدی را بررسی کردند	میزان فرسایش با افزایش نسبت شعاع بیشتر می‌شود، همچنین با افزایش زبری میزان فرسایش بسیار افزایش می‌یابد
ویرا و منصوری [88]	2015	عددی و تجربی	هوا	فرسایش فولاد ضد زنگ در زانویی با قطر 77/2 و سرعت 11 تا 27 متر بر ثانیه در دو نوع ذره 150 و 300 میکرومتر بررسی کردند	میزان فرسایش در هر دو روش را با هم مقایسه کردند، نتایج عددی میزان فرسایش بیشتری پیش بینی می‌کنند، اما مکان ماکزیمم فرسایش را به درستی پیش بینی می‌کنند
پارسی و همکاران [89]	2015	عددی	هوا	آنها شش معادله میزان فرسایش، در یک زانویی 77/2 میلی متر با اندازه ذرات 150-300 میکرومتر را بررسی کردند	نتایج عددی ماکزیمم میزان فرسایش در جریان churn را بخوبی پیش بینی می‌کند
پارسی و همکاران [90]	2015	تجربی	هوا	تاثیر تغییر سرعت گاز، اندازه ذرات و ویسکوزیته سیال در میزان فرسایش زانویی V شکل و قائمه را مورد بررسی	میزان فرسایش در زانویی V شکل از زانویی قائمه به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است

	قراردادند				
نسبت فرسایش با افزایش سختی مواد ساینده وقتی سطح دیوار سخت‌تر از ذرات است افزایش می یابد، آنها رابطه‌ای بر حسب سختی ذرات، سرعت برخورد ذرات و تیزی ذرات ارائه کردند	اثر سختی ذرات ساینده بر فرسایش فولاد کربنی را بررسی کردند	آب، هوا	عددی و تجربی	2015	عرب‌نژاد و همکاران [91]

2-3-4- مکانیزم مدل‌ها برای پیش‌بینی فرسایش در جریان چند فاز

مدل‌سازی فرسایش در جریان چند فاز خیلی مشکل‌تر از مدل‌سازی فرسایش در جریان تک فاز است، زیرا شبیه‌سازی جریان و ردیابی ذرات پیچیده‌تر است. جردن [78] یک مدل برای پیش‌بینی فرسایش در جریان چند فاز بر پایه مدل فرسایش تک فاز ارائه‌شده به‌وسیله شیرازی¹ و همکاران [82] توسعه داد. جردن [78] اجزای جریان چند فاز را بر اساس "قطر مؤثر" برای هر فاز تقسیم کرد و میزان فرسایش را برای هر فاز به‌طور مجزا محاسبه و مقدار فرسایش کل برابر با مجموع مقادیر فرسایش در تمامی فازها است.

همچنین مک‌لوری² [92] و شیرازی [93] یک روش برای پیش‌بینی فرسایش در جریان چند فاز بر پایه مدل فرسایش تک فاز توسعه داده‌شده به‌وسیله شیرازی و همکاران [82] ارائه کردند. در این مدل، حداکثر مقدار فرسایش مواد فولادی در جریان‌ات چند فاز با استفاده از معادله زیر محاسبه شد.

¹. Shirazi

². McLaury

$$ER = F_M F_S F_P F_{r/D} \frac{\dot{W}_P V_L^{1.73}}{\left(\frac{D}{D_{ref}}\right)^2} \quad (80-2)$$

که در آن ER حداکثر مقدار فرسایش، F_m یک ثابت تجربی به دست آمده بر اساس ویژگی مواد است، F_S فاکتور شکل ذرات است، F_P فاکتور نفوذ، $F_{r/D}$ فاکتوری بر اساس شعاع زانویی است، $\dot{W}_P$ مقدار شن استفاده شده، V_L سرعت مشخصه برخورد ذرات، D قطر لوله، D_{ref} قطر مرجع لوله معادل با 1 اینچ است. معادله (81-2) بر اساس اطلاعات تجربی جمع آوری شده در موسسه تحقیقات فرسایش دانشگاه تولسا و وینر [80] توسعه داده شده است. در معادله بالا مقدار $F_{r/D}$ از رابطه توسعه داده شده به وسیله وانگ [94] می تواند به دست آید.

$$F_{r/D} = \exp\left(-\left(0.1 \frac{\rho_f^{0.4} \mu_f^{0.65}}{d_p^{0.3}} + 0.015 \rho_f^{0.25} + 0.12\right)(r_c - 1.5)\right) \quad (81-2)$$

در حالی که تمام پارامترها به واحد SI هستند. معادله (81-2) با استفاده از داده های تجربی بیک بایف [95]، توله [96]، ایلر [97] و بویگوینل [75] صحت سنجی شده است.

مشابه مدل ارائه شده به وسیله شیرازی و همکاران [82]، سرعت مشخصه برخورد ذرات V_L با استفاده از حل معادلات حرکت ذرات (73-2) به دست می آید. باین حال، معادله حرکت ذرات در جریان چند فاز، از خواص مخلوط سیال استفاده می شود. خواص مخلوط از قبیل ویسکوزیته مخلوط و چگالی از معادلات زیر می توانند به دست آید:

$$\mu_m = \frac{V_{SG}}{V_{SL} + V_{SG}} \mu_G + \frac{V_{SL}}{V_{SG} + V_{SL}} \mu_L \quad (82-2)$$

$$\rho_m = \frac{V_{SG}}{V_{SL} + V_{SG}} \rho_G + \frac{V_{SL}}{V_{SG} + V_{SL}} \rho_L \quad (83-2)$$

بعلاوه، معادلات تک متغیره زیر برای محاسبه سرعت مشخصه سیال V_{char} استفاده می‌شود.

$$V_{char} = \lambda_L^n V_{SL} + (1 - \lambda_L)^n V_{SG} \quad (84-2)$$

$$\lambda_L = \left(\frac{V_{SL}}{V_{SG} + V_{SL}} \right)^{0.11} \quad (85-2)$$

$$n = \left[1 - \exp \left(-0.25 \frac{V_{SG}}{V_{SL}} \right) \right] \quad (86-2)$$

شایان ذکر است که در مدل سازی جریان تک فاز، سرعت مشخصه سیال V_{char} معادل با میانگین سرعت جریان تنظیم می‌شود، درحالی که در مدل سازی جریان چند فاز آن از معادله (84-2) به دست می‌آید.

مکانیزم این مدل برای پیش بینی فرسایش در جریان چند فاز را می‌توان به شرح زیر برشمرد:

1- طول سکون از هر دو معادله (78-2) و (79-2) تعیین می‌شود.

2- پروفیل سرعت جریان از معادلات (73-2) و (86-2) تعیین می‌شود و طول سکون در گام اول حساب می‌شود.

3- معادلات (73-2) تا (76-2)، (82-2) و (83-2)، برای محاسبه سرعت برخورد ذرات استفاده

می‌شود. سرعت ذره V_p در $x=0$ معادل با سرعت سیال V_f در $x=0$ تنظیم می‌شود.

4- سرعت برخورد ذره در معادله (80-2) برای به دست آوردن نسبت فرسایش جایگذاری می‌شود.

موسسه DNV¹ یک دستورالعمل جامع در مورد ارزیابی فرسایش بر پایه نتایج CFD و داده‌های تجربی ایجاد کرد. این موسسه روند محاسبه فرسایش در هندسه‌هایی از قبیل لوله‌های مستقیم، زانویی‌ها، سه‌راهی‌ها، زانویی‌های جوشکاری شده و کاهنده‌ها را ارائه کرد.

در مدل‌های مکانیکی و تجربی ارائه‌شده برای پیش‌بینی فرسایش در جریان چند فاز به این نکته توجه کردند که میزان فرسایش برای سرعت غیرواقعی فازها و ویژگی‌های مخلوط سیال به‌دست‌آمده است. این مدل‌ها الگوهای جریان چند فاز را در محاسبات فرسایش در نظر نمی‌گیرند. ویرا [98-100] و پارسی [101] نشان دادند که برای سرعت‌های جریان یکسان، الگوی مختلف جریان چند فاز می‌تواند منجر به مقادیر فرسایش مختلف که با یک ضریب نزدیک به 10 متفاوت هستند. بنابراین، یک مدل مکانیکی قوی پیش‌بینی فرسایش باید اثرات الگوی جریان بروی میزان فرسایش را ترکیب کند.

از آنجاکه، مدل‌های پیش‌بینی فرسایش بر اساس الگوهای جریان تقسیم‌بندی و توسعه داده‌شده‌اند، باید این نکته موردتوجه قرار گیرد که به‌جز مدل چن² و همکاران [102]، تمام این مدل‌ها بر اساس مکانیزم مدل شیرازی³ و همکاران [93] توسعه‌یافته‌اند. فرضیات روند جریان چند فاز به‌عنوان یک جریان تک فاز یکنواخت بر اساس تحلیل و بررسی مکانیکی انجام‌گرفته است. در ادامه این روند، مدل‌سازی فرسایش بر اساس CFD برای جریان تک فاز انجام شد.

تفاوت مدل‌های زیر بر اساس روش‌های محاسبه سرعت مشخصه جریان V_{dr} و به‌تبع آن سرعت اولیه ذرات $V_p|_{x=0}$ است. با توجه به تأثیر زیاد سرعت اولیه ذرات بر سرعت برخورد ذرات، بنابراین سرعت

¹. Det Norske Veritas

². Chen

³. Shirazi

اولیه نقش مهمی را در محاسبه فرسایش ایفا می‌کند. بنابراین، پیش‌بینی دقیق سرعت اولیه ذرات در جریان چند فاز بسیار مهم است. این مدل‌ها سرعت مشخصه جریان را بر اساس فیزیک جریان چند فاز تخمین می‌زنند. قبل از بحث در مورد مکانیزم مدل‌ها، که بر پایه الگوی جریان چند فاز توسعه یافته‌اند، برخی از ویژگی‌های درباره رژیم جریان چند فاز به‌طور خلاصه معرفی شده است.

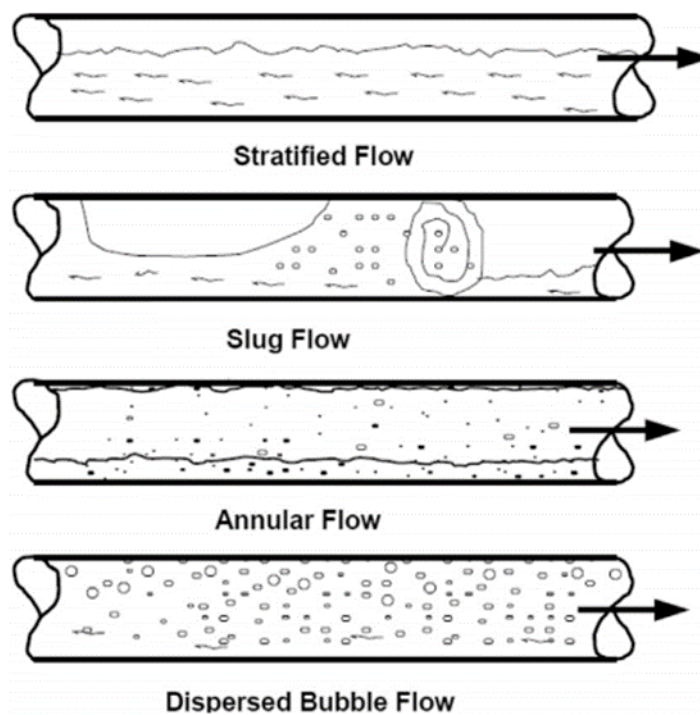
در جریان چند فاز، توزیع نیروهای سطحی بین فازها نسبت به الگوهای جریان متفاوت است. تغییر ویژگی فازها و سرعت سطحی در نتیجه باعث تغییر در الگوی جریان می‌شود. جهت جریان و زاویه شیب لوله از دیگر فاکتورهایی است که الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. الگوهای اصلی مشاهده شده در جریان چند فاز افقی به ترتیب جریان لایه‌ای¹، جریان حلزونی²، جریان حلقوی³، جریان حبابی⁴ شکل 10-2 است.

¹ . Stratified Flow

² . Slug Flow

³ . Annular Flow

⁴ . Dispersed Bubble Flow

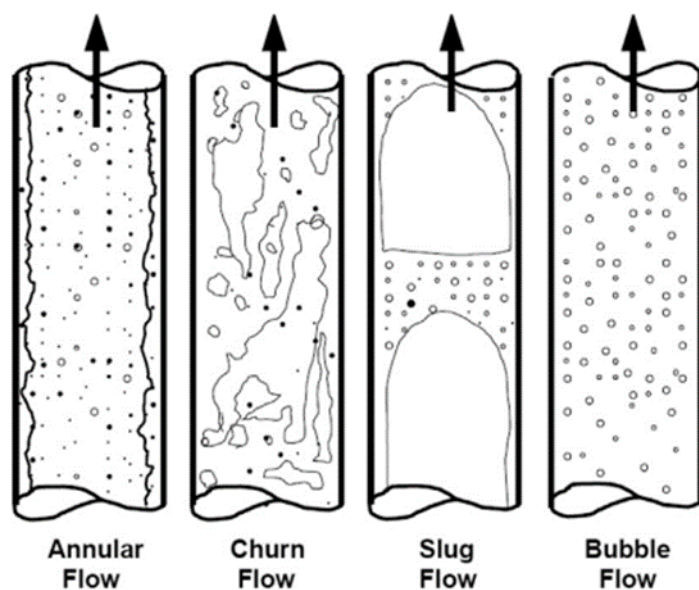


شکل 2-10: الگوهای اصلی جریان در لوله افقی [12].

در جریان چند فاز عمودی الگوهای اصلی جریان به ترتیب جریان حبابی، جریان حلزونی، جریان

لخته‌ای¹، جریان حلقوی که در شکل 2-11 نشان داده شده است.

¹. Churn Flow



شکل 2-11: الگوهای اصلی جریان در لوله عمودی [12].

جریان حبابی به عنوان یک جریان فاز مایع پیوسته که در آن حباب‌های کوچک تقریباً یکنواخت توزیع شده‌اند معرفی می‌شود. این جریان در لوله‌هایی با قطر نسبتاً بزرگ وجود دارد و در مواقعی به وجود می‌آید که جریان گاز کم و میزان جریان مایع زیاد باشد.

جریان حلقوی در میزان جریان گاز بسیار بالا و میزان جریان مایع کم رخ می‌دهد. این جریان به وسیله یک هسته‌ی گازی با قطرات پیوسته و فیلم مایع نازک پیوسته اطراف دیوار لوله مشخص می‌شود. تأثیرات ویسکوزیته مایع و گاز و مقادیر جریان مایع در جریان حلقوی افقی و عمودی را در کارهای ویرا [99, 100] می‌توان یافت. در جریان حلقوی کوچک ذرات در هر دو فیلم مایع و هسته جریان می‌تواند وجود داشته باشد. جریان حلزونی را می‌توان به عنوان یک جریان متناوب حباب‌های گاز (حباب تیلور) و مایع حلزونی در نظر گرفت. یک جریان رو به پایین اطراف فیلم مایع و حباب‌های تیلور در جریان حلزونی روبه جلو عمودی وجود دارد. جریان حلزونی در یک محدوده‌ی وسیعی از مقادیر جریان گاز و مایع به وجود می‌آید. در مقادیر جریان گاز بالا، حباب‌های تیلور از طریق مایع حلزونی و به شکل یک حلزون هوا

داده شده که "حلزون مصنوعی" نامیده می شود نفوذ می کند. متأسفانه، محدودیت مواد پخش شده در داخل جریان حلزونی در مقادیر جریان زیاد به وجود می آید. توضیح پیرامون ویژگی های جریان شبه حلزونی و اثر پارامترهای مختلف بروی آن را در مقالات کوال¹ و استانیسلاو [103] و کسانا² و همکاران [104]-106 یافت شده است.

جریان لخته ای در جریان عمود و نزدیک به عمود بین رژیم های جریان حلزونی و حلقوی قرار گرفته است. در جریان لخته ای هیچ مرز مشخصی بین فازها وجود ندارد. حباب های مایعی که به سمت بالا و پایین حرکت می کنند وجود دارد. با توجه به پیچیدگی آن، محدودیت مواد منتشر شده در جریان لخته ای که بیشتر در مقادیر جریان کم به وجود می آید. مطالب در مورد ساختار تناوبی جریان لخته ای در کارهای سکو کوچی [107] و اثر ویسکوزیته روی ساختار آن در مقادیر جریان بالا را در کارهای پارسی [101] مشاهده کرد.

در ادامه در مورد مکانیزم مدل ها برای پیش بینی فرسایش بر پایه الگوی جریان های دو فاز مختلف ارائه می شود.

2-3-4-1- جریان حبابی

مازومدر [108] پیشنهاد کرد که سرعت مخلوط جریان را به عنوان سرعت مشخصه جریان V_0 در مدل مکلوری و شیرازی [93] معادله (2-73) استفاده شود:

$$V_{char} = V_m = V_{SL} + V_{SG} \quad (87-2)$$

با فرض جریان حبابی به عنوان یک جریان همگن چن [102] جریان حبابی را به عنوان یک جریان

¹. Kokal

². Kesana

تک فاز با خواص مخلوط ساده در نظر گرفت. سپس، او شبیه‌سازی فرسایش CFD را برای جریان تک فاز انجام داد. او ویسکوزیته مخلوط را از معادله (2-82) به دست آوردند و چگالی مخلوط را از معادله زیر بجای معادله (2-83) محاسبه کردند:

$$\rho_m = (1-H_L)\rho_G + H_L\rho_L \quad (88-2)$$

که در آن H_L ارتفاع سیال است. آن‌ها تطابق خیلی خوبی بین روند پیش‌بینی شده و اطلاعات آزمایشگاهی سالما [79] برای فرسایش در جریان حبابی گزارش کردند.

2-4-3-2- جریان حلقوی

مازومدر [108] یک مدل مکانیکی که فرسایش ناشی از ذرات در فیلم مایع و همچنین ذراتی که در هسته گاز وجود دارند را در نظر می‌گرفت ارائه کرد. دو مجموعه از محاسبات ردیابی ذرات در این مدل انجام می‌شود:

برای یک‌ذره نشان داده‌شده در فیلم مایع و همچنین برای یک‌ذره مشخص‌شده در هسته جریان گاز. سرعت مشخصه جریان برای ذرات در فیلم مایع $V_{char-film}$ با سرعت مشخصه جریان برای ذرات در هسته جریان گاز $V_{char-gas\ core}$ متفاوت است. این سرعت مشخصه از سرعت‌های زیر به دست می‌آید:

$$V_{char-film} = V_{film} \quad (89-2)$$

$$V_{char-gas\ core} = V_{Droplet} \quad (90-2)$$

که در آن V_{film} و $V_{Droplet}$ به ترتیب سرعت قطرات و فیلم مایع هستند. سرعت فیلم مایع از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{film} = V_{SL} \frac{(1-E)D^2}{4\delta_{film}(D-\delta_{film})} \quad (91-2)$$

که در آن δ_{film} ضخامت فیلم مایع است و می‌تواند با استفاده از روش پاز¹ و شوهام [109] تعیین شود، E کسر اختلاط قطره مایع است که می‌تواند از رابطه ایشی² و میشیما [110] به دست آید.

$$E = \tanh(7.25 \times 10^{-7} We^{1.25} Re_L^{0.25}) \quad (92-2)$$

که در آن We و Re_L به ترتیب عدد وبر و عدد رینولدز مایع است، آن‌ها می‌توانند از معادلات زیر به دست آیند:

$$We = \frac{\rho_G V_{SG}^2 D}{\sigma} \left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{1/3} \quad (93-2)$$

$$Re_L = \frac{\rho_L V_{SL} D}{\mu_L} \quad (94-2)$$

که در آن σ کشش سطحی است.

به علت لغزش بین فازها سرعت قطره در هسته گاز از سرعت گاز کمتر است. مطابق با فوری [111] نسبت لغزش 0/8 است. به عنوان یک نتیجه، سرعت‌های قطره در هسته گاز از رابطه زیر می‌تواند تعیین شود.

$$V_{Droplet} = 0.8 V_{G_Core} \quad (95-2)$$

که در آن V_{G_Core} سرعت هسته گاز است، که می‌تواند از رابطه زیر تعیین شود:

¹. Paz

². Ishii

$$V_{G_Core} = V_{SG} \left(\frac{D}{D - 2\delta_{film}} \right)^2 \quad (96-2)$$

میزان فرسایش به علت ذرات در هر رژیم باید به وسیله کسر جرمی ذرات شن در هر رژیم اندازه گیری شود. سانتوز [112] توزیع ذرات شن به دست آمده در جریان حلقوی را نشان می دهد. کسر اختلاط قطره مایع و نسبت جرم ذرات در هسته جریان تقریباً مشابه به یکدیگر است. بر اساس آن کسر ذرات شن کشیده شده در هسته جریان می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$E = \frac{\text{جرم شن در هسته جریان}}{\text{جرم کل شن}} \quad (97-2)$$

کسر ذرات شن در فیلم مایع می تواند از رابطه زیر تعیین شود:

$$1 - E = \frac{\text{جرم شن در هسته جریان}}{\text{جرم کل شن}} \quad (98-2)$$

مقدار فرسایش نهایی مجموع مقدار فرسایش به وسیله ذرات در هر دو ناحیه است. برای جزئیات بیشتر راجع به این مدل می توان به مقالات مازومدر [116-113] مراجعه کرد. نسخه کمی اصلاح شده از این مدل را می توان در کارهای مکلوری¹ و همکاران [119-117] پیدا کرد.

قبل از توسعه مدل مورد بحث مازومدر [114] یک مدل مکانیکی اولیه توسعه داد که در آن سرعت مشخصه جریان به روش زیر تعیین می شود:

$$V_{char} = (1 - E)V_{film} + EV_{Droplet} \quad (99-2)$$

¹. McLaury

چن¹ و همکاران [102] روندی را فرض کردند که فرسایش عمدتاً ناشی از ذرات موجود در هسته گاز است و فرسایش ناشی از ذرات در فیلم مایع قابل اغماض است. علاوه بر این، جریان قطرات گاز-مایع می‌توانند به عنوان یک جریان همگن رفتار کنند. از این رو، رژیم هسته گاز را می‌توان به عنوان یک جریان تک فاز با خواص مخلوط در نظر گرفت. به طور مشابه با جریان حبابی معادلات (2-82)، (2-83) و (2-88) برای هسته گاز قابل استفاده هستند. هرچند، در این معادلات V_{SL} باید با سرعت قطرات مایع در هسته گاز حلقوی جایگزین شود. آن‌ها از مدل مکانیکی انصاری [120] برای ارزیابی سرعت قطرات مایع استفاده کردند. چن و همکاران [102] متوجه شدند که این فیلم نازک مایع می‌تواند از دیوار در برابر برخورد ذرات محافظت کند. در نتیجه، هنگامی که یک ذره به مابین فیلم مایع و گاز می‌رسد، ردیابی ذرات باید به طور پیوسته در سراسر فیلم مایع انجام شود.

2-3-4-3- جریان حلزونی

فرضیات مدل مازومدر [108, 114, 115] این است که ذرات در داخل سیال آرام سبب فرسایش در جریان آرام هستند و فرسایش به علت ذرات موجود در داخل فیلم مایع نادیده گرفته می‌شود. علاوه بر این، فرض می‌شود که ذرات در داخل فاز مایع یکنواخت توزیع می‌شوند. سرعت مشخصه جریان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{char} = H_{ILS} \times V_{ILS} \quad (100-2)$$

که در آن H_{ILS} و V_{ILS} ارتفاع و سرعت سیال در جسم حلزونی است، H_{ILS} از رابطه گومز [121] محاسبه می‌شود:

¹ Chen

$$H_{LLS} = e^{-\left(0.45\theta + 2.48 \times 10^{-6} \frac{\rho_L V_m D}{\mu_L}\right)} \quad (101-2)$$

که در آن زاویه شیب θ برحسب رادیان است.

V_{LLS} از مدل تیتل [122] که در زیر آمده است تعیین می‌شود:

$$V_{LLS} = \frac{V_m - V_{GLS}(1 - H_{LLS})}{H_{LLS}} \quad (102-2)$$

که در آن V_{GLS} سرعت گاز در جسم حلزونی است.

چن و همکاران [102] جریان حلزونی را به‌عنوان یک حالت جریان تک فاز ساده کردند. جریان تک فاز مخلوطی از خواص هر یک از حالت حلزونی یا جسم حلزونی را دارد. وقتی حالت جریان حلزونی استفاده می‌شود خواص مخلوط از معادلات (82-2) و (88-2) به دست می‌آید. برای دیگر نمونه‌ها خواص مخلوط از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho_m = (1 - H_{LLS})\rho_G + H_{LLS}\rho_L \quad (103-2)$$

$$\mu_m = (1 - H_{LLS})\mu_G + H_{LLS}\mu_L \quad (104-2)$$

سرعت مخلوط معادله (87-2) به‌عنوان سرعت جریان در هر دو نمونه استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های فرسایش بر پایه CFD برای پیش‌بینی میزان فرسایش با استفاده از خواص مخلوط برای جریان تک فاز انجام شده است. میزان فرسایش پیش‌بینی شده به‌وسیله نسبت جرم شن در جسم سیال حلزونی نرمالایز می‌شود که می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود:

$$\dot{m} = \frac{L_S H_{LLS} V_m}{L_S H_{LLS} V_m + L_F H_{LF} V_{film}} \quad (105-2)$$

که در آن L_S و L_F به ترتیب طول جسم حلزونی و طول فیلم مایع است. این پارامترها از رابطه ژانگ

[123, 124] به دست می‌آید.

بخشی از پیچیدگی فرسایش در جریان حلزونی به علت رفتار گذرا در این رژیم جریان است. زمانی که یک جسم حلزونی از یک زانویی عبور می‌کند، در جلوی مسیر جسم حلزونی یک ناحیه گازی قبل از برخورد به دیوار زانویی وجود دارد. به عنوان یک نتیجه، سرعت برخورد ذرات مایع جلو و عقب جسم حلزونی متفاوت است. مکلوری¹ و همکاران [118] نتیجه گرفتند که استفاده از یک مقدار واحد برای نشان دادن سرعت برخورد ذرات مناسب نیست و به جای آن، یک محدوده از سرعت‌های برخورد برای محاسبات فرسایش باید استفاده شود. این محدوده سرعت‌های برخورد بستگی به موقعیت اولیه ذرات در جسم حلزونی دارد. مکلوری² و همکاران [118] مدل مایع جسم حلزونی را به دو بخش تقسیم کردند: جلوی حلزونی (مایع جلوی جسم حلزونی) و دم حلزونی (بخش باقی مانده مایع جسم حلزونی). جلوی حلزونی یک طول معادل با قطر لوله است و به 500 بخش تقسیم می‌شود. برای هر بخش، سرعت برخورد ذرات مطابق با آن و در نتیجه مقدار فرسایش آن به دست می‌آید. نتایج 500 مقادیر فرسایش میانگین‌گیری می‌شود تا مقدار فرسایش برای جلوی حلزون به دست آید. برای دم حلزون، سرعت برخورد یک ذره و در نتیجه میزان فرسایش آن محاسبه شده است.

ژانگ³ و همکاران [125] جریان حلزونی را به عنوان جریان ساده تک فاز در نظر گرفتند، برای تعیین مقدار فرسایش آن‌ها از روش دوبعدی ژانگ و همکاران [83] برای فرسایش محاسبه شده در جریان تک فاز استفاده کردند. این روش ترکیب CFD و مدل سازی مکانیکی است.

1. McLaury

2. McLaury

3. Zhang

یک مدل مکانیکی برای پیش‌بینی فرسایش در جریان شبه حلزونی در لوله‌های افقی به‌وسیله کسانا¹ و همکاران [126] توسعه داده شده است. آن‌ها متوجه شدند که در جریان حلزونی در سرعت سطحی گاز بالا، قطرات مایع و متعاقباً ذرات به ناحیه گاز وارد می‌شوند. با این حال مدل‌های قبلی فرسایش جریان حلزونی، فرض می‌کند که فرسایش فقط به‌وسیله ذراتی که در جسم حلزونی وجود دارند ایجاد می‌شود. مدل آن‌ها برای فرسایش به علت ذرات موجود در ناحیه گاز است. علاوه بر این، آزمایشات نمونه‌برداری شن به‌وسیله کسانا و همکاران [127] نشان دادند که افزایش سرعت سطحی گاز، کسر جرمی ذرات برخوردکننده به دیوار لوله را افزایش می‌دهد. این مشاهدات در تضاد با معادله (2-105) است. آن‌ها از یک رویکرد بر اساس افت فشار در ترکیب با اثر سرعت سطحی گاز بروی کسر جرمی شن در جسم حلزونی استفاده کردند. نسبت جرم شن در جسم حلزونی در معادله (2-106) نشان داده شده است:

$$\dot{m} = \frac{-\Delta P_{SB}}{-\Delta P_{SU}} \quad (106-2)$$

که در آن ΔP_{SB} افت فشار در جسم حلزونی و ΔP_{SU} افت فشار در سراسر یک حلزون است. آن‌ها عملکرد مدلشان را با داده‌های آزمایشگاهی کسانا [104, 105] مقایسه کردند و تطابق خوبی بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده گزارش کردند.

2-3-4-4- جریان لخته‌ای

در جریان لخته‌ای، مشابه مدل‌های فرسایش برای سایر الگوهای جریان، فرض بر آن است که ذرات به‌طور غیریکنواخت در فاز سیال پخش می‌شوند. مازومدر² و همکاران [108] سرعت مشخصه برای جریان لخته‌ای را معادل با سرعت مخلوط معادله (2-101) ارائه کرد. اگرچه اطلاعات بسیاری در مورد فرسایش

¹. Kesana

². Mazumder

در جریان‌ات حلقوی و حلزونی وجود دارد، اما مطالعات کمی در مورد فرسایش در جریان لخته‌ای وجود دارد بنابراین فرضیه مازومدر و همکاران [108] نیاز به صحت سنجی بیشتری دارد.

در این فصل مروری بر معادلات فرسایش ارائه شده به وسیله محققین مختلف را انجام دادیم. هر یک از این معادلات پارامترهای مختلف مؤثر بر پدیده فرسایش را در نظر گرفته‌اند اما با تحقیقات بیشتر جنبه‌های گوناگون دیگری که بر پدیده فرسایش مؤثر هستند شناخته شد از جمله این موارد می‌توان به نوع جریان اشاره کرد که اخیراً در موسسه تحقیقات خوردگی و فرسایش در دانشگاه تولسا به تحقیق در مورد فرسایش در جریان چند فاز Churn پرداخته‌اند و یا اثر ویسکوزیته سیال بر پدیده فرسایش هنوز هم به‌طور دقیق شناخته شده نیست.

3- فصل سوم: معادلات حاکم

3-1- مقدمه

همان‌طور که قبلاً ذکر شد عوامل متعددی بروی میزان فرسایش اثر می‌گذارند که از جمله آن‌ها می‌توان به خواص مواد، اندازه ذرات شن، هندسه جریان، سرعت جریان، فشار عملکردی، آشفتگی، ارتفاع مایع و برخورد ذرات در جریان چند فاز اشاره کرد. این عوامل با دیگر عوامل مرتبط هستند، بنابراین مطالعات اثرات آشفتگی بروی فرسایش نیازمند تلاش زیادی است. CFD یک ابزار قدرتمند به‌منظور بررسی، اثر پارامترهای مختلف بر میزان فرسایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، پیش‌بینی حداکثر میزان فرسایش، پیدا کردن مکان‌های مستعد فرسایش، حتی در هندسه‌های پیچیده که مطالعه تجربی بروی آن دشوار است.

3-2- دینامیک سیالات محاسباتی

دنیای پیرامون، متشکل از پدیده‌های فیزیکی بسیاری که بخش قابل توجهی از این پدیده‌ها، در حیطه مکانیک شاره‌ها قرار می‌گیرد. جریان‌های اقیانوسی، جریان خون در رگ‌ها، مجراهای تنفسی، جریان سیال اطراف خودرو و بسیاری دیگر از پدیده‌های شاره‌ای، نمونه‌ای از این فیزیک‌ها هستند.

طراحی صحیح و هوشمندانه بسیاری از تجهیزات مهندسی، نیازمند درک صحیحی از این پدیده‌هاست. بدین منظور از دانش مکانیک سیالات، بر پایه قوانین حرکت ارائه‌شده توسط نیوتن استفاده می‌شود. این قوانین به صورت کلی در قالب چهار معادله اصلی برای بقای ممنتوم و جرم ارائه می‌گردد.

این معادلات که با نام معادلات ناویر استوکس نیز معرفی میشوند، با وجود دقت کافی برای غالب پدیده‌های مکانیک سیالات در بسیاری از موارد، به دلیل پیچیدگی‌های بالای حل، به صورت مستقیم قابل ارزیابی نیستند و به دلیل حضور ترم‌های غیر خطی و همچنین وابستگی چهار معادله به یکدیگر، به‌عنوان

یکی از پیچیده ترین معادلات دنیای علم، معرفی می‌شوند. حل مستقیم و تحلیلی این معادلات، به جز در موارد بسیار محدود و با در نظر گرفتن بسیاری فرضیات ساده‌سازی ممکن نیست. جریان بین دو صفحه موازی، جریان آرام در لوله ها با سطح مقطع دایروی و جریان رینولدز پایین در اطراف یک گوی، نمونه هایی از فیزیک‌های ساده ای هستند که برای آنها حل تحلیلی معادلات ناویر استوکس وجود دارد.

در کنار این، پدیده‌های بسیاری در دنیای مهندسی وجود دارد، که دارای پیچیدگی‌های بسیاری بوده و به دلایل مختلفی، نیازمند درکی از رفتار معادلات جریان، بر روی آن‌ها هستیم. غالب جریان‌های کاربردی در فیزیک‌های صنعتی، مانند جریان درون یک راکتور، جریان اطراف هواپیمای مسافربری، جریان درون سیلند پیستون خودرو و بسیاری دیگر از جریان‌های صنعتی و طبیعی، نمونه هایی از پدیده‌هایی هستند که تحلیل آن‌ها با اهدافی همچون درک بالاتر از محیط پیرامون، بهبود زندگی و طراحی تجهیزات صنعتی صورت می‌پذیرد.

در این شرایط و با توجه به ضعف روش‌های ریاضیاتی در حل معادلات ناویر استوکس، نیازمند روش‌های دیگری هستیم. تجربه و آزمایش، یکی از گزینه های جایگزین است. در روش‌های تجربی، نمونه‌ای از فیزیک مورد نظر در ابعاد اصلی یا ابعاد کوچک‌شده آزمایشگاهی، ساخته و تحلیل جریان بر روی آن، از طریق اندازه گیری پارامترهای اساسی مانند نیرو، ضریب درگ، ضریب انتقال حرارت و مشابه آن، انجام می‌شود. این روش با وجود دقت بسیار بالا، به دلیل هزینه بالای انجام آزمایش از یک سو و عدم امکان انجام آن بر روی تمامی فیزیک های مورد نظر از سوی دیگر، دارای محدودیت های بسیار است. از این روش، غالباً بر روی طرح‌های نهایی در آستانه ساخت و به منظور اطمینان از صحت طراحی و تحلیل انجام شده به سایر روش‌ها، استفاده می‌شود.

دیدگاه سومی که در بسیاری از پروژه‌های امروزی، به فراوانی مورد توجه قرار می‌گیرد، استفاده از

عددی است. در روش‌های عددی، ابتدا دامنه حل به اجزای بسیار کوچکی به نام سلول محاسباتی، تقسیم می‌شود. مجموع سلول‌های محاسباتی، تشکیل یک شبکه محاسباتی می‌دهند. تقسیم دامنه حل به سلول‌های بسیار کوچک، موجب می‌شود بتوان تغییرات متغیرهای حل، در فاصله کوتاه یک سلول را خطی و بعضاً ناچیز فرض نمود. بدین ترتیب، امکان خطی سازی و ساده‌سازی معادلات ناویراستوکس، بر روی اجزای دامنه حل فراهم می‌شود. از یکپارچه‌سازی و برقراری ارتباط بین سلول‌ها در دامنه حل و به دنبال آن کوچک‌تر شدن سلول‌های محاسباتی، فرض خطی سازی برخی متغیرها و ثابت ماندن برخی دیگر در هر سلول، منطقی تر بوده و نتایج محاسبات به داده‌های واقعی، نزدیک تر خواهد شد. به این روش، روش حل عددی گفته می‌شود. روش حل عددی در حیطه مهندسی مکانیک، به صورت خاص، با نام دینامیک سیالات محاسباتی¹، شناخته می‌شوند و غالب نرم افزارهای شبیه سازی مکانیک سیالات، بر این اساس کار می‌کنند

مدل‌سازی فرسایش بر پایه CFD شامل سه مرحله است: مدل‌سازی جریان، ردیابی ذرات و اطلاعات مربوط به برخورد ذرات به دیوار و میزان آسیب فرسایش آن‌ها، هر مرحله به مرحله قبلی وابسته است. بنابراین هر نتیجه غیر فیزیکی در هر یک از این سه مرحله بروی نتایج نهایی فرسایش اثر می‌گذارد.

برای به دست آوردن اطلاعات میدان جریان نظیر (فشار، اجزای سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی)، نیاز است که معادلات ناویراستوکس حل شود. از نظر محاسبات زمان محاسبه مقادیر انتقال (ممنت، انرژی) هزینه محاسباتی زیادی دارد، معمولاً برای کاربردهای مهندسی از فرم میانگین‌گیری زمانی معادلات ناویراستوکس برای به دست آوردن این مقادیر استفاده می‌شود. هرچند، میانگین‌گیری زمانی

¹. Computational Fluid Dynamics

مقادیر کوچک نوسانات آشفتگی را صاف در نظر می‌گیرد.

3-2-1- معادلات پیوستگی و ناویر استوکس در فرم کلی

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (1-3)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2-3)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3-3)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4-3)$$

اما در حل عددی از فرم میانگین‌گیری شده معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود.

با جایگذاری

$$u_i(\bar{x}, t) = U_i(\bar{x}, t) + u'_i(\bar{x}, t) \quad (5-3)$$

که برابر مجموع سرعت متوسط و سرعت نوسانی است در معادلات ناویر استوکس، معادله به صورت زیر

بازنویسی می‌شود:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-\rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (6-3)$$

که در آن $\overline{\rho u'_i u'_j}$ متغیر ناشناخته در جریان آشفته [128] است که به عنوان تنش رینولدز¹ شناخته می شود و متعاقباً یک سری معادلات طبقه بندی شده ای برای حل آن مورد نیاز است. مدل های آشفتگی مختلفی وجود دارد RSM و $k-\varepsilon$, $k-\omega$ که معادلات طبقه بندی شده آن ها ارائه شده است. هر کدام از این مدل ها دارای مزیت ها و معایبی هستند. از آنجاکه آن ها پیش بینی میدان جریان را در شرایط مختلف و هندسه هایی با دقت مختلف ارائه می دهند، انتخاب یک مدل توربولانسی مناسب مهم است. انتخاب مدل توربولانسی مناسب مستلزم درک درست از ویژگی های جریان در هندسه های مورد نظر است. انتخاب مدل آشفتگی تنها آماده سازی برای مدل سازی CFD نیست. یک مطالعه استقلال از شبکه CFD نیز باید انجام گیرد تا اطمینان یابیم که پیش بینی درست میدان جریان مستقل از شبکه است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل سازی جریان برای پیش بینی فرسایش استفاده می شود، مدل سازی دقیق میدان جریان ضروری است. بنابراین، مک لوری و بوردن² [129] بیان کردند که پیش بینی درست میدان جریان قبل از پیش بینی مسیر ذرات مهم است.

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (7-3)$$

در مرحله دوم پیش بینی مقدار فرسایش با استفاده از CFD، معادلات حرکت ذرات تعیین شد. می توان از یک روش لاگرانژی یا اویلری برای شبیه سازی حرکت ذرات استفاده شود. در نمونه جریان با غلظت ذرات زیاد، هزینه محاسباتی روش لاگرانژی زیاد می شود. بنابراین، رویکرد اویلری می تواند راه جایگزین برای محاسبه فرسایش شود. در رویکرد اویلری، ذرات را به عنوان فاز پیوسته در نظر می گیرند. با این حال، استفاده از روش اویلری ممکن است در پیش بینی رفتار ذرات نزدیک به دیوار مشکل ساز باشد. نزدیک

¹ . Reynolds stress

² . Burden

دیوار، حرکت ذرات شامل برخورد و برگشت است و روش اوپلری تنها مقدار میانگین سرعت ذرات را در هر حجم کنترل به دست می آورد. این می تواند سبب پیش بینی نادرست سرعت برخورد ذرات شود که متعاقباً می تواند پیش بینی فرسایش را تحت تأثیر قرار دهد لی¹ و همکاران [130].

در رویکرد لاگرانژی، ذرات به عنوان یک فاز پراکنده در نظر گرفته می شوند که با سیال (فاز پیوسته) تعامل دارند. سرعت هر ذره به وسیله حل معادله حرکت ذرات که شامل نیروهای وارد بر ذرات است محاسبه می شود. معادله زیر معادله حرکت ذرات است که معمولاً در CFD استفاده می شود:

$$\frac{dV_p}{dt} = F_D + F_V + F_p + F_G \quad (8-3)$$

در معادله (8-3)، سمت راست نشان دهنده نیروهای وارد بر ذرات و سمت چپ نشان دهنده شتاب ذرات است.

نیروی پسا F_D مهم ترین نیروی وارد بر واحد جرم ذرات است:

$$F_D = \frac{18\mu_f C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} (V_f - V_p) \quad (9-3)$$

نیروی جرم مجازی نیروی دیگری است که بر مسیر ذرات مؤثر است. جرم مجازی، نشان دهنده حجم سیالی است که به وسیله یک ذره شتابدار یا بدون شتاب جایگزین می شود. این نیرو زمانی که نسبت چگالی سیال به چگالی ذرات زیاد است نمی تواند نادیده گرفته شود، این نیرو را می توان به صورت زیر نوشت:

$$F_V = \frac{1}{2} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{d}{dt} (V_f - V_p) \quad (10-3)$$

وقتی یک ذره از میان یک منطقه با تغییرات فشار زیاد عبور می کند، یک نیرو به دلیل تغییرات فشار

¹ . Lee

که تأثیر مهمی بروی مسیر ذرات داشته باشد، به وجود می آید. معادله زیر نیروی تغییرات فشار را توصیف می کند:

$$F_p = \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right) V_{pi} \frac{dV_f}{dx_i} \quad (11-3)$$

دیگر نیروهایی که می تواند روی مسیر ذرات اثر بگذارد نیروهای جاذبه و بویانسی است:

$$F_G = \frac{(\rho_p - \rho_f) g}{\rho_p} \quad (12-3)$$

نیروی لیفت سافمن¹ نیز می تواند در معادله (8-3) وارد شود. این نیرو به دلیل برش در جریان به وجود می آید. مسیر ذرات می تواند با حل معادله (8-3) پیش بینی شود.

در جریان آشفته، سرعت سیال دو جزء دارد: میانگین سرعت نوسانی و نوسانات تصادفی. نوسانات تصادفی سرعت می توانند بروی مسیر ذرات اثر بگذارند. در جریان آشفته، پراکندگی ذرات به اجزای نوسانی سرعت نسبت داده می شوند. آشفتگی پراکندگی ذرات را افزایش می دهد و این مکانیزم غالب پراکندگی ذرات است اما این حالت برای ناحیه خیلی نزدیک به دیوار صادق نیست. کازرونی² و همکاران [131]، پارسی³ و همکاران [86] در این زمینه تحقیقاتی انجام داده اند. همچنین پارسی و همکاران [132] اشاره کردند که مسیر ذرات کوچک نسبت به مسیر ذرات بزرگ خیلی بیشتر تحت تأثیر آشفتگی است. برای داشتن یک پیش بینی فیزیکی و دقیق تر رفتار ذرات، اثر نوسانات آشفتگی اجزای سرعت بروی مسیر ذرات باید در نظر گرفته شوند محققان مختلف روش های مختلفی برای محاسبه اثر نوسانات آشفتگی بروی ذرات پیشنهاد کردند که از آن جمله می توان به هاینزه [28] اشاره کرد. یکی از

¹. saffman lift

². Kazerooni

³. Parsi

معروف‌ترین مدل برخورد ذرات - گردابه، مدل گازمن¹ و لوآنیدز [84] است.

مدل برخورد ذرات - گردابه، اثرات نوسانات آشفتگی جریان را بروی مسیر ذرات پیش‌بینی می‌کند. این مدل فرض می‌کند که ذرات از طریق جریان آشفته انتقال می‌یابند و آن‌ها از طریق این ساختار آشفته مکرر که گردابه نامیده می‌شود عبور می‌کنند. مدل دو مرحله دارد: مرحله اول تعیین اجزای نوسانی سرعت جریان آشفته در محل ذرات، که برای معادله (2-73) نیاز است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، حل متوسط‌گیری شده معادلات ناویراستوکس این نوسانات را به دست نمی‌آورد. مرحله دوم، برای محاسبه زمان برخورد، هنگامی که ذرات با گردابه برخورد می‌کنند. مشخصه آشفتگی تصادفی هرکدام از این گردابه‌ها متفاوت است که به‌وسیله توزیع تصادفی سرعت نوسانی V_f' ، مقیاس زمان t_e و مقیاس طول l_e تعریف می‌شود. مقدار سرعت نوسانی آشفتگی، که در آن فرض می‌شود در طی زمان وجود گردابه ثابت باشد و از یک توزیع گوسی پیروی کند، به‌وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$V_f' = \zeta \sqrt{V_f'^2} \quad (13-3)$$

که در آن، ζ عدد تصادفی گوسی، $\sqrt{V_f'^2}$ مقدار میانگین مربع ریشه‌ها² نوسانات محلی سرعت و V_f' سرعت نوسانی است. برای محاسبه جداگانه اعداد تصادفی مربوط به اجزای مختلف سرعت مهم است و از آن گذشته نتایج مسیر ذرات را غیر فیزیکی پیش‌بینی می‌کند مقدار میانگین مربع ریشه‌ها محلی نوسانات سرعت با استفاده از مقدار محلی انرژی جنبشی آشفتگی می‌تواند محاسبه شود:

$$\sqrt{V_f'^2} = \sqrt{\frac{2TKE}{3}} \quad (14-3)$$

¹. Gosman

². RMS

با استفاده از مقدار سرعت نوسانی محاسبه شد، سرعت آنی محلی به وسیله مجموع میانگین و اجزای نوسانی سرعت می تواند محاسبه بشوند.

گام دوم مدل برخورد ذرات و گردابه برای محاسبه زمان برخورد یک ذره و یک گردابه مشخص شده است بر اساس این مدل، وقتی یک ذره وارد گردابه آشفته می شود، دو رفتار مختلف برای ذره ممکن است اتفاق بیفتد. اولاً، ذرات اینرسی بیشتری در مقایسه با گردابه دارد، در این حالت ذرات از گردابه عبور می کنند. زمان مورد نیاز مربوط به ذرات برای عبور از گردابه زمان عبور گردابه نامیده می شود. دوم، ذرات در داخل گردابه گیر می کنند و با آن تا زمان از بین رفتن گردابه حرکت می کنند. زمان برخورد گردابه و ذرات مینیمم زمان عبور ذرات و یا زمان طول عمر گردابه است.

$$T_{\text{int}} = \min \langle t_{\text{life}}, t_{\text{cross}} \rangle \quad (15-3)$$

زمان طول عمر گردابه به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_{\text{life}} = \frac{C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{TKE^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}}{\sqrt{V_f'^2}} \quad (16-3)$$

که در آن $C_{\mu} = 0.09$ یک ثابت مدل آشفته گی و ε میزان پراکندگی آشفته گی است.

زمان عبور یک ذره از گردابه به صورت زیر تعیین می شود:

$$t_{\text{cross}} = -\tau \ln \left(1 - \frac{l_e}{(\tau |V_f - V_p|)} \right) \quad (17-3)$$

که در آن τ

$$\tau = \frac{4 \rho_p}{3 \rho_f C_D} \frac{d_p}{|V_f - V_p|} \quad (18-3)$$

زمان پاسخگویی ذرات به سیال است.

هنگامی که زمان برخورد تمام می‌شود، یک گردابه جدید با مشخصات جدید جایگزین می‌شود، و

زمان جدید برخورد گردابه و ذرات محاسبه می‌شود.

هنگامی که ذرات به دیوار برخورد می‌کنند برخی از انرژی خود را از دست می‌دهند. در جهات مختلف، ضرایب جبران مختلفی برای به حساب آوردن این انرژی از دست رفته استفاده شده است. ضرایب جبران نشان‌دهنده نسبت اجزای سرعت ذره بعد از برخورد به اجزای سرعت ذره قبل از برخورد مطابق جهت آن‌ها است. ضرایب جبران e_n و e_t نشان‌دهنده تغییر در ممتم به وسیله برخورد ذرات به دیوار به ترتیب در جهات عمودی و مماسی است.

$$e_n = \frac{V_{pn2}}{V_{pn1}} \quad (19-3)$$

$$e_t = \frac{V_{pt2}}{V_{pt1}} \quad (20-3)$$

V_{pt} و V_{pn} به ترتیب اجزای عمودی و مماسی سرعت ذرات هستند. زیرنویس 1 اشاره به برخورد و زیرنویس 2 اشاره به بعد از برخورد است. ضریب جبران 1 نشان می‌دهد که ذرات هیچ نیرویی در طی برخورد از دست نمی‌دهد (برگشت الاستیک)، و ضریب جبران برابر با 0 بدان معنی است که ذرات تمام نیروی خود را بعد از برخورد از دست می‌دهد. از لحاظ فیزیکی، این بدان معنی است که ذرات بعد از برخورد به دیوار می‌چسبند.

ترکیب کردن یک مدل برگشت ذره از دیوار در شبیه‌سازی فرسایش ضروری است، از آنجایی که ذرات

چندین بار می‌توانند به دیوار برخورد کنند. محققان، روابط مختلفی برای ضریب جبران بر پایه ویژگی‌های ذرات و شرایط برخورد ارائه کردند. آزمایشات انجام‌شده به‌وسیله گران¹ و تاباکوف [133] و فورد² و همکاران [134] نشان داد که زاویه برخورد ذرات بروی ضرایب جبران اثر می‌گذارد. فورد و همکاران [134] پیشنهاد دادند که از روابط زیر برای ضرایب جبران استفاده شود:

$$e_n = 1 - 0.4159\alpha + 0.5994\alpha^2 - 0.292\alpha^3 \quad (21-3)$$

$$e_t = 1 - 2.12\alpha + 3.0775\alpha^2 - 1.1\alpha^3 \quad (22-3)$$

که در آن زاویه برخورد α به رادیان است. آن‌ها از کربن³ در آزمایش‌های خود استفاده کردند. گران و تاباکوف [133] با استفاده از یک رویکرد آماری به توسعه روابط برای این ضرایب پرداختند. آن‌ها مقادیر میانگین ضرایب و انحراف استاندارد مربوط به خودشان را با استفاده از ذرات شن به ابعاد 200 میکرون متر و آلومینیم 2024 (دیوار موردنظرشان) در آزمایش‌های خود، پیشنهاد دادند:

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha + 1.56\alpha^2 - 0.49\alpha^3 \quad (23-3)$$

$$e_t = 0.998 - 1.66\alpha + 2.11\alpha^2 - 0.67\alpha^3 \quad (24-3)$$

$$\sigma_n = -0.0005 + 0.62\alpha + 0.535\alpha^2 - 0.089\alpha^3 \quad (25-3)$$

$$\sigma_t = 2.15\alpha - 5.02\alpha^2 + 4.05\alpha^3 - 1.085\alpha^4 \quad (26-3)$$

چن⁴ و همکاران [135] اهمیت ترکیب کردن یک مدل تصادفی ارتجاعی ذرات برای پیش‌بینی فرسایش در سهراهی را نشان دادند.

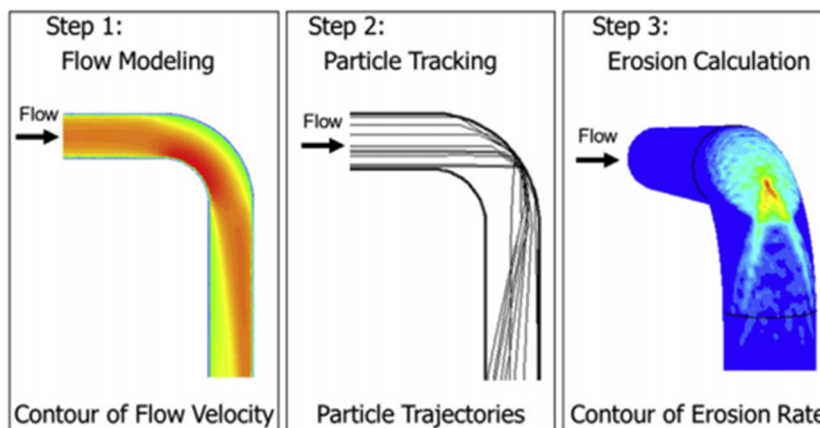
¹. Grant

². Forder

³. AISI 413

⁴. Chen

فرسایش زمانی رخ می‌دهد که ذرات از خطوط جریان سیال عبور می‌کنند و به دیوار برخورد می‌کنند. وقتی ذرات به دیوار برخورد می‌کنند اطلاعات برخورد از قبیل سرعت برخورد، زاویه برخورد هر ذره در هر سلول نزدیک به دیوار ذخیره می‌شود. گام سوم در پیش‌بینی میزان فرسایش انتقال اطلاعات برخورد به معادله فرسایش موردنظر است. اطلاعات به‌وسیله هر برخورد ذره در معادله فرسایش برای محاسبه جرم ازدست‌رفته سطح دیوار که هر ذره عامل آن است استفاده می‌شود. مقدار فرسایش کلی برابر مجموع تمام جرم ازدست‌رفته که تمام ذرات آن را ایجاد کرده‌اند است. شکل 3-1 سه مرحله شبیه‌سازی فرسایش بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی را خلاصه کرده است.



شکل 3-1: سه‌گام شبیه‌سازی فرسایش: مدل‌سازی جریان، ردیابی ذرات و محاسبه فرسایش [12].

برای داشتن یک توزیع فرسایش دقیق بروی سطح هندسه، لازم است یک تعداد قابل‌توجهی از مسیر ذرات محاسبه بشوند. تعداد ذرات موردنیاز برای ارزیابی فرسایش به هندسه و الگوی جریان بستگی دارد؛ برای مثال در یک هندسه برخورد مستقیم حرکت سیال حامل باعث حرکت ذرات به سمت دیوار می‌شود. بنابراین، تعداد مسیر ذرات که نیاز به محاسبه دارند از هندسه انبساط-انقباض ناگهانی کمتر است که در آن سیال حامل در جهت موازی با دیوار در بخش‌های مستقیم حرکت می‌کند.

دراین فصل مروری جامع بر معادلات حاکم بر جریان سیال-ذره که برای شبیه‌سازی جریان و فاز

ثانویه لازم است پرداختیم. که لازم است قبل از شبیه‌سازی با این نیروها و نحوه‌ی اعمال آنها در جریان آشنا شویم، اشتباه در نحوه‌ی حل معادلات و یا بکارگیری معادله کم اهمیت در جریان مربوطه برای فاز ثانویه منجر به نتایج نادرست در شبیه‌سازی‌ها و میزان فرسایش می‌شود.

4- فصل چہارم:نتایج

4-1- مقدمه

در این فصل، به تشریح روش عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر نحوه‌ی گسسته‌سازی معادلات حاکم و ... خواهیم پرداخت. در این تحقیق از نرم‌افزار Ansys Fluent به منظور شبیه‌سازی جریان، میزان فرسایش و ضخامت ازدست‌رفته در زانویی به وسیله جریان سیال-ذرات استفاده شده است. نرم‌افزار از روش عددی حجم محدود برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می‌کند. در ادامه به معرفی نرم‌افزار و روش حل در تحقیق به عمل آمده خواهیم پرداخت.

4-2- معرفی نرم‌افزار انسیس فلونت

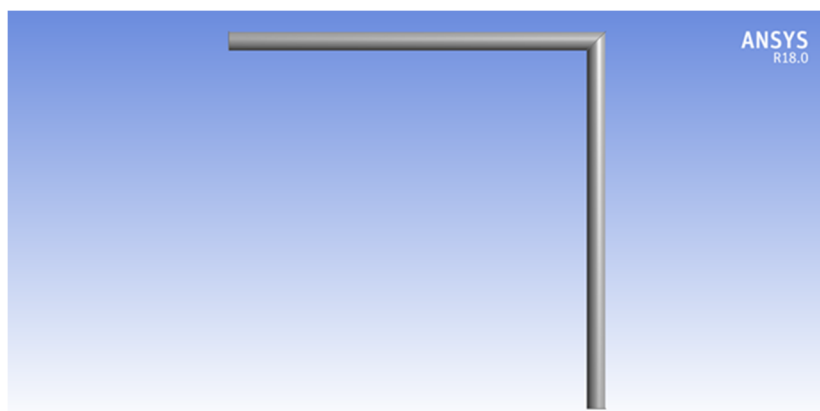
این نرم‌افزار یکی از قدیمی‌ترین نرم‌افزارها در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که ارائه اولین نسخه آن مربوط به سال 1983 است. این نرم‌افزار در آغاز، با کاربردهای دانشگاهی و امکانات محدود بر پایه حلگر سازمان یافته ارائه شد، اما با گذشت زمان و ارائه نسخه‌های جدید، مدل‌ها و قابلیت‌های آن اضافه گردید و از نسخه 6 به بعد، امکان شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های بدون سازمان فراهم شد. در سال 2006، این نرم‌افزار توسط شرکت Ansys [136] خریداری شد و از آن به بعد بانام تجاری [137] Ansys Fluent به صورت بخشی از مجموعه نرم‌افزاری Ansys منتشر می‌شود. در حال حاضر، نسخه‌های جدید توسعه و بهبود گسترده یافته‌اند، اما ساختار کلی و روش‌های شبیه‌سازی آن تفاوت خاصی نکرده است.

برای اعمال شبکه سازمان یافته از نرم‌افزار Ansys Icem استفاده شده است. این نرم‌افزار یکی از قوی‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای تولید شبکه است که در حال حاضر به صورت گسترده در دانشگاه و صنعت استفاده می‌شود. توانایی گسترده این نرم‌افزار در تولید شبکه سازمان یافته و بدون سازمان و همچنین ارتباط قوی و بدون نقص در فراخوانی هندسه‌های تولید شده در سایر نرم‌افزارهای تولید هندسه

مثل کتیا و سالیدورک موجب شده است، بسیاری از محققین در دانشگاه‌ها و شرکت‌های سازنده خودرو جزء کاربران این نرم‌افزار باشند.

3-4- تعریف مسئله

با توجه به نتایج موجود از منبع [138] هندسه مسئله، زانویی 90 درجه است که در شکل 4-1 نشان داده شده است. طول قسمت افقی و عمودی زانویی 508/0 متر و قطر لوله 254/0 متر است:



شکل 4-1: هندسه مسئله

برای اعتبار سنجی تحقیق حاضر از مقاله منصوری¹ و همکاران [138] استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده در مقاله موردنظر غلظت فاز ثانویه کمتر از 1 درصد بود به همین دلیل از حالت کوپل یک‌طرفه بین سیال حامل و ذرات کوارتز به عنوان فاز ثانویه استفاده شده است. در حالت کوپل یک‌طرفه ذرات شن روی جریان سیال اثر نمی‌گذارند. بنابراین ابتدا پاسخ میدان جریان به دست می‌آید سپس از حل جریان به دست آمده برای ردیابی ذرات جامد در دامنه محاسباتی استفاده می‌شود. در هر یک از برخورد ذرات به دیوار لوله، اطلاعات برخورد از قبیل زاویه برخورد و سرعت برخورد در هر سلول محاسباتی ذخیره می‌شود. در گام بعدی، اطلاعات برخورد ذرات با استفاده از یک معادله فرسایش به

¹. Mansouri

نسبت فرسایش تبدیل می‌شوند. محققان مختلف معادلات فرسایش مختلفی را برای پیش‌بینی نسبت فرسایش ارائه کرده‌اند. از آنجاکه فرمولهای تحلیلی نیازمند برآورد دقیق زاویه تماس، سرعت برخورد ذرات نیاز است که برای بدست آوردن این مقادیر نیاز به استفاده از روش عددی است، اخیراً عرب نژاد¹ و همکاران [2] در موسسه تحقیقاتی خوردگی و فرسایش دانشگاه تولسا یک معادله فرسایش نیمه مکانیکی را برای محاسبه نسبت فرسایش در لوله با جنس 13 درصد کروم ارائه کردند که مشخصات جنس لوله در جدول 1-4 آورده شده است. آنها در مدل‌سازی فرض کردند که فرسایش به وجود آمده به وسیله ذرات شن به دو مکانیزم دسته‌بندی می‌شود: برش و تغییر شکل مکرر، در معادله (1-4) نسبت فرسایش به علت برش نشان داده است:

$$ER_C = \begin{cases} C\rho F_s \frac{U_p^{2.41} \sin(\theta) [2K \cos(\theta) - \sin(\theta)]}{2K^2 P} & \theta \leq \tan^{-1} K \\ C\rho F_s \frac{U_p^{2.41} \cos^2(\theta)}{2P} & \theta \geq \tan^{-1} K \end{cases} \quad (1-4)$$

که مقادیر C، K در جدول 1-4 داده شده است و مقادیر ρ ، F_s و U_p به ترتیب چگالی لوله، ضریب شکل و سرعت برخورد ذره است. $F_s = 1$ برای ذرات گرد $F_s = 0.5$ برای ذرات نیمه گرد $F_s = 0.2$ برای ذرات تیز است. در مقاله مورد بررسی ذرات کوارتز با اندازه 256 میکرومتر و با ضریب شکل نیمه گرد بکار رفته است، P تنش جریان پلاستیک است که معادل با سختی ویکرز فرض شده است. نسبت فرسایش به دلیل تغییر شکل به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$ER_D = \frac{1}{2} F_s \rho \frac{(U_p \sin(\theta) - U_{tsh})^2}{\varepsilon} \quad (2-4)$$

در معادله (2-4) U_{tsh} سرعت آستانه نامیده می‌شود. برای سرعت‌های کمتر از این مقدار فرسایش به

¹. Arabnejad

علت تغییر شکل نادیده گرفته می‌شود. ε فاکتور پوشش سطح است، سرعت آستانه قرار داد شده در جدول 4- برای اندازه ذرات مرجع 150 میکرومتر است و برای به دست آوردن سرعت آستانه ذرات محاسبه شده در این مقاله (256 میکرومتر) از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{(U_{tsh})_2}{(U_{tsh})_1} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{3/2} \quad (3-4)$$

که R و m برابر اندازه و جرم ذرات شن است. نسبت فرسایش $ER_{tot} [kg/kg]$ مجموع فرسایش محاسبه شده به دلیل این دو مکانیزم است:

$$ER_{tot} [kg/kg] = ER_C + ER_D \quad (4-4)$$

ضخامت از دست رفته می‌تواند از نسبت فرسایش به دست آید:

$$\Delta h = \frac{ER_{tot} \dot{m}_{sand} t}{\rho_{wall} A_{cell}} \quad (5-4)$$

جدول 4-1: ثوابت معادلات بکار رفته برای دیوار با جنس 13 درصد کروم

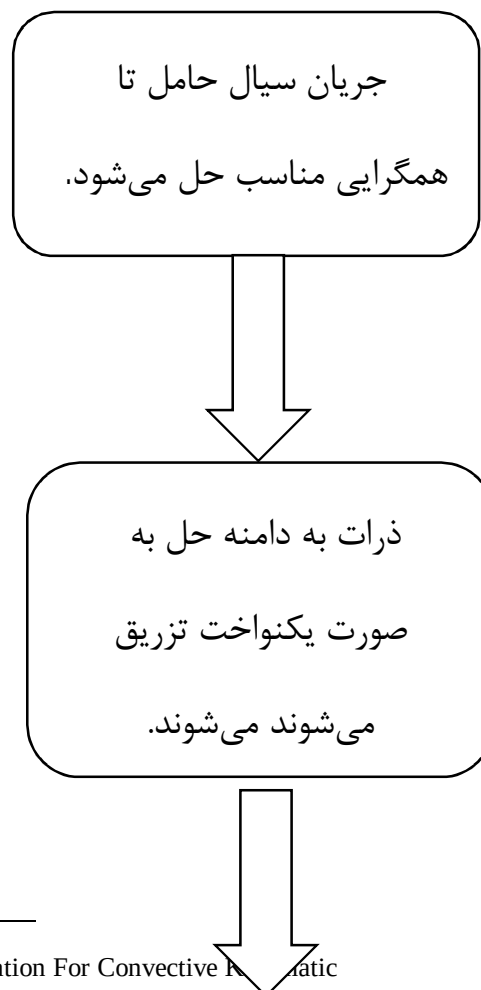
$P (Mpa)$	C	$\varepsilon (kg/ms^2)$	K	$U_{tsh} (m/s)$	ρ
90	0/014	$2/5 \times 10^1$	0/5	5/1	2650

$\dot{m}$ دبی جرمی جریان برخوردکننده به سطح، ρ_{wall} چگالی دیوار و A_{cell} سطح مقطع سلول محاسباتی است و t زمان انجام آزمایش هستند. از این معادلات به وسیله نوشتن یک یو دی اف¹ برای محاسبه فرسایش و ضخامت از دست رفته در یک قالب اوپلری-لاگرنژی استفاده شده است، در این رویکرد معادلات

¹. user define function

ناویراستوکس در یک قالب اویلری حل می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها به‌صورت پایا انجام‌شده است، طول بالادست و پایین‌دست در حدود 20 برابر قطر لوله انتخاب‌شده تا جریان کاملاً توسعه یابد. به‌منظور محاسبه اثرات آشفتگی جریان مدل $k-\varepsilon$ استفاده‌شده است. معادلات ممنتم، انرژی جنبشی آشفتگی و میزان پراکندگی آشفتگی با استفاده از روش کوئیک¹ گسسته‌سازی شده است. از الگوریتم سیمپل² برای کوپل بین سرعت و فشار استفاده‌شده است. فاز ثانویه در یک قالب مرجع لاگرانژی مدل فاز مجزا³ استفاده‌شده است.

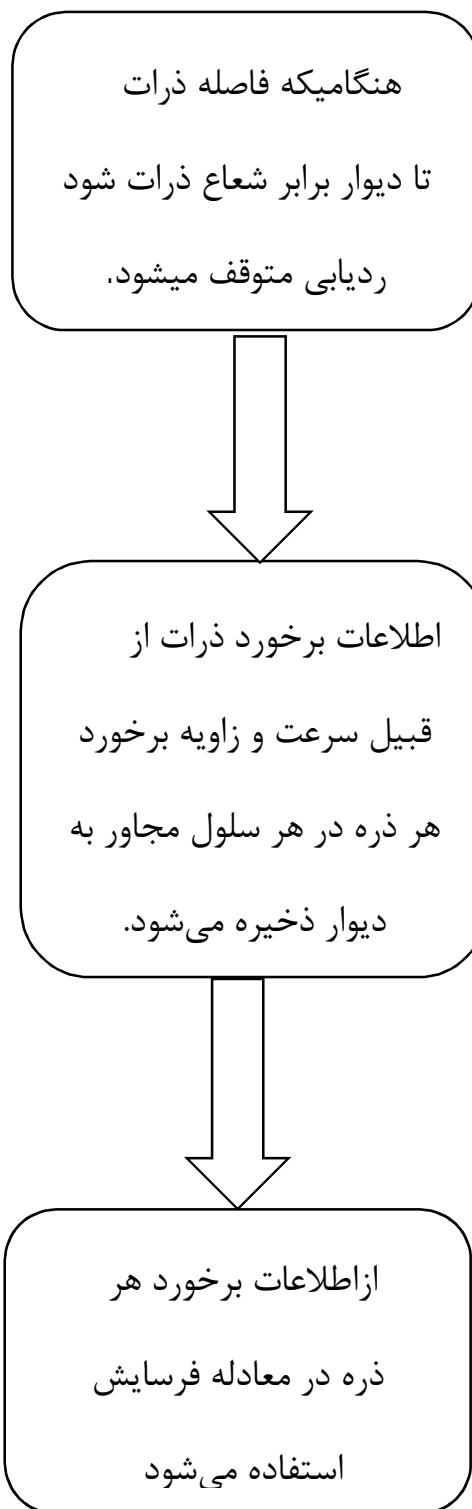
4-4- فلوچارت حل



¹. Quadratic Upstream Interpolation For Convective Kinematics

². Semi-Implicit Method For Pressure -Velocity

³. Discrete Phase Method



5-4- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی و بقای جرم هستند که در شرایط آشفته

به صورت زیر می باشند:

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\bar{V}_i) = 0 \quad (6-4)$$

معادله مومنتوم:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = B_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-\overline{\rho u'_i u'_j} \right]$$

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (7-4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.09$$

یکی از مدل های معروف جریان آشفته در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی که به عنوان یک مدل

استاندارد و پرکاربرد در صنعت شناخته شده است، مدل کا اپسیلون¹ است این مدل یک مدل دو معادله ای

است که از دقت و پایداری خوبی برای اهداف مدل سازی عمومی برخوردار است و به سبب قدمت و هزینه

محاسباتی پایین، یکی از پرکاربردترین مدل های اغتشاشی در مسائل مهندسی است. در این مدل فرض بر

آن است که جریان به شدت مغشوش بوده و اثر لزجت گردابه ای به لزجت مولکولی غالب است.

در این مدل سرعت ذرات با استفاده از بالانس نیروی ذرات به دست می آید، که این معادله در زیر

آورده شده است:

¹. k-epsilon

$$m \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_G + F_{other} \quad (8-4)$$

که در این معادله m ، U_p و t به ترتیب جرم ذره، سرعت ذره و زمان است. F_D نیروی پسا وارد بر ذرات، F_G نیروی گرانش و F_{other} سایر نیروها هستند که در این شبیه‌سازی‌ها نیروی تغییرات فشار و نیروی لیفت سافمن در نظر گرفته شده‌اند.

$$\vec{F}_{gravity} = \frac{\bar{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (9-4)$$

$$\vec{F}_{Drag} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} \quad (10-4)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d R_e} \quad (11-4)$$

$$R_e = \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu} \quad (12-4)$$

$$\vec{F}_{gradient\ pressure} = \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u}_p \nabla \vec{u} \quad (13-4)$$

$$\vec{F}_{suffman\ lift\ force} = \frac{2k\nu^{1/2} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{1/4}} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (14-4)$$

که ϕ فاکتور شکل، d_{ij} تانسور تغییر شکل، $k=2/594$ ، ρ چگالی سیال، ρ_p چگالی ذرات، d_p قطر ذرات، $\vec{u}$ سرعت سیال، $\vec{u}_p$ سرعت ذرات است.

ذرات برخوردکننده به سطح مقداری از انرژی خود را به صورت گرما یا تغییر شکل از دست می‌دهند که این انرژی به صورت ضریب جبران در معادلات محاسبه می‌شود که نسبت بین سرعت برخورد و بازگشت ذره است، در این تحقیق از مدل بازگشتی گرانت¹ و تاباکوف [133] استفاده شده است که این

¹. Grant

ضرایب به صورت زیر نوشته می شوند:

$$e_n = 0.993 - 1.76\alpha + 1.56\alpha^2 - 0.49\alpha^3 \quad (15-4)$$

$$e_t = 0.998 - 1.66\alpha + 2.11\alpha^2 - 0.67\alpha^3 \quad (16-4)$$

که در آن α زاویه برخورد ذره با سطح است.

4-6- شرایط مرزی

در مرز ورودی فرض بر این است که جریان با سرعت یکنواخت در راستای z و برابر با U_{in} وارد می شود. در این مرز میدان تنش و گرادیان فشار صفر در نظر گرفته شده است.

$$(z=0): V_z = U_{in} = cte, V_r = 0, \frac{\partial P}{\partial n} = 0$$

در مجاورت دیواره های لوله از شرط عدم لغزش برای سرعت استفاده شده است. همچنین، گرادیان فشار و تنش در راستای عمود بر دیوار صفر می باشد.

$$V_r = 0, V_z = 0, \frac{\partial P}{\partial n} = 0$$

در مرز خروجی نیز مشتق محوری برای کلیه متغیرها به جز فشار برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial V_r}{\partial z} = 0$$

بررسی شرط توسعه یافتگی جریان آشفته:

$$10 \leq \frac{x}{D} \leq 60$$

باید حاصل تقسیم طول به قطر بین 10 تا 60 قرار داشته باشد که برای مسئله ما 20 می باشد.

4-7- شبکه بندی

محاسبات با استفاده از شبکه سازمان یافته مربعی و در حالت سه بعدی مکعبی انجام شده است. در

شکل 2-4 و شکل 3-4 شبکه استفاده شده در شبیه سازی ها را نشان می دهد. در این شبیه سازی از شبکه بندی با تعداد 450000 سلول برای انجام محاسبات استفاده شده است. سطح مقطع ورودی دارای 2277 المان با نسبت رشد $1/2$ بوده و در این محاسبات فاصله اولین سلول مجاور به دیوار 225 میکرومتر است.

با استفاده از روابط ارائه شده فاصله اولین سلول مجاور به دیوار برای روش تابع استاندارد دیوار که در مقاله آمده را بررسی می کنیم:

$$\frac{\bar{C}_f}{2} \approx \frac{0.039}{\text{Re}_D^{1/4}}$$

$$U_\tau = U \sqrt{\frac{\bar{C}_f}{2}}$$

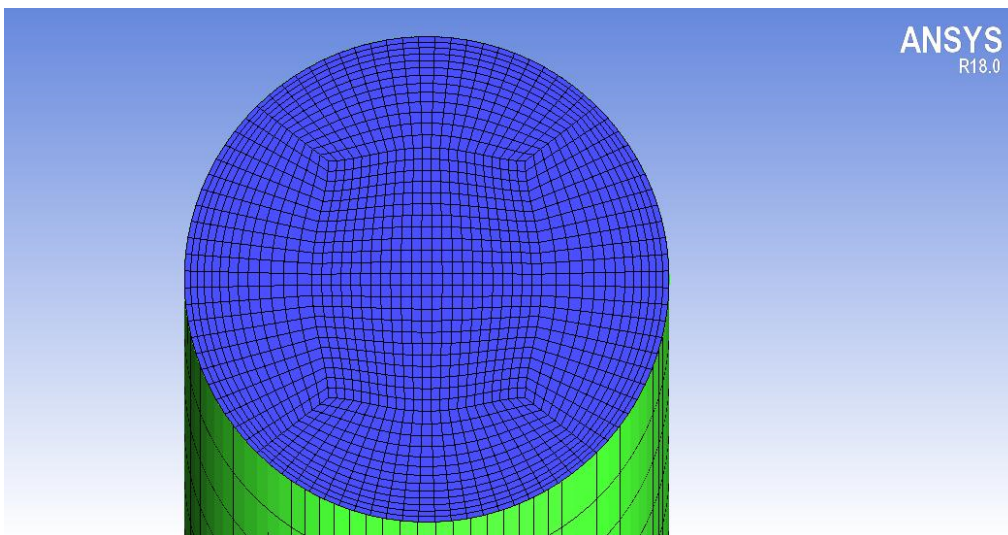
$$y_p^+ = 30 - 300$$

$$y_p = 0.000225$$

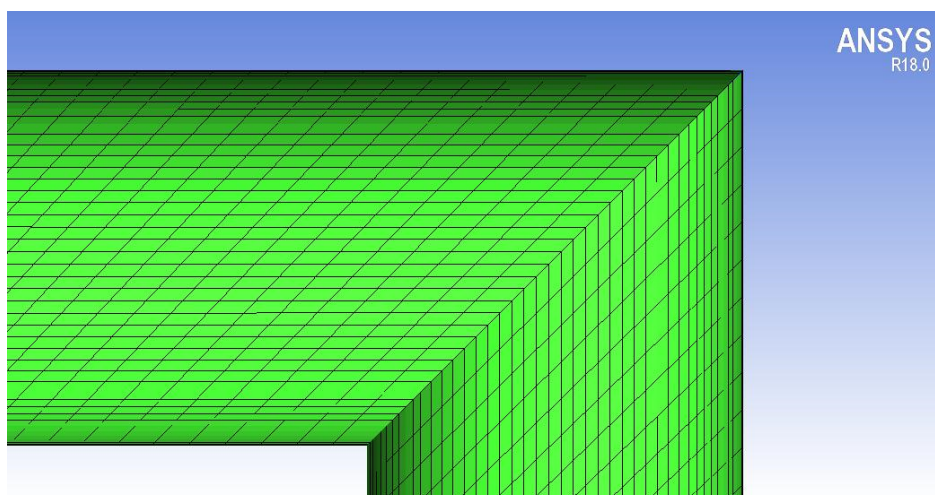
$$y_p^+ = \frac{y_p U_\tau}{\nu}$$

$$y_p^+ = 135$$

در مقاله مورد بررسی فاصله اولین سلول مجاور به دیوار را 225 میکرومتر در نظر گرفته شده بود که با توجه به فرمول این مقدار مورد بررسی قرار گرفت که نشان می دهد این مقدار در محدوده مورد نظر قرار دارد.



شکل 2-4: شبکه‌بندی در مقطع زانویی



شکل 3-4: شبکه‌بندی هندسه زانویی در قسمت تغییر جهت جریان

8-4- مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

سلول‌های شبکه محاسباتی بسته به پیچیدگی هندسه و همچنین ساختار کلی حل‌گر، دارای اشکال مختلف‌اند. شبکه‌های محاسباتی، به دو نوع کلی ساختاریافته و بدون ساختار، تقسیم‌بندی می‌شوند. در شبکه ساختاریافته، شناسایی سلول مجاور، به صورت ماتریسی انجام می‌شود و شبکه ساختاری منظم دارد. سلول‌های مورد استفاده در این نوع از شبکه، چهارگوش در دوبعد و شش‌وجهی در سه بعد‌اند. این نوع شبکه، به دلیل منظم بودن و الزامات هندسی خاص، برای بسیاری از هندسه‌های پیچیده، قابل استفاده نیستند.

در هندسه‌های پیچیده، از شبکه بدون ساختار استفاده می‌شود. این نوع از شبکه به صورت نامنظم و بعضاً تصادفی و البته با استفاده از روش‌های هوشمند، تولید می‌شوند. سلول‌های مورد استفاده در این نوع از شبکه، غالباً مثلث در دو بعد و چهاروجهی در سه بعد است. از سلول‌های هرمی و منشوری نیز در موارد خاص استفاده می‌شود. در کنار این‌ها، سلول‌های مورد استفاده در شبکه ساختاریافته، در شبکه بدون ساختار نیز کاربرد دارند که کاربرد آنها قدری کمتر است. در این قسمت، استقلال حل عددی را از شبکه محاسباتی بررسی می‌کنیم. به‌طور کلی کوچک کردن سلول‌های شبکه از یک‌سو سبب دقیق‌تر شدن حل عددی می‌گردد و از سوی دیگر هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. بنابراین، محدوده حل با شبکه‌های مختلفی بررسی شده است. در این مسئله مقدار ماکزیمم سرعت ذرات را برای استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده است مقدار مختلف، تعداد سلول‌های در راستای شعاعی و محوری در جدول 2-4 نشان داده شده است:

جدول 2-4: مقایسه سرعت ماکزیمم ذرات در چهار نوع شبکه‌بندی به همراه خطای نسبی

تعداد سلول‌ها	U(m/s)	خطا %
---------------	--------	-------

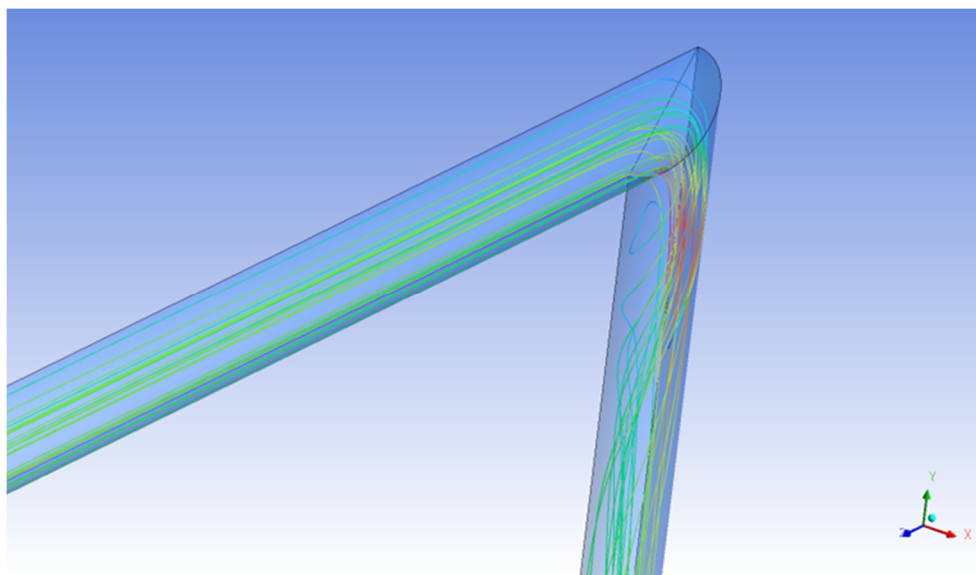
	33/9	124072
2/58	34/8	228204
1/41	35/3	445365
0/84	35/6	939716

میزان خطا برای محاسبه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی از رابطه زیر بدست می آید:

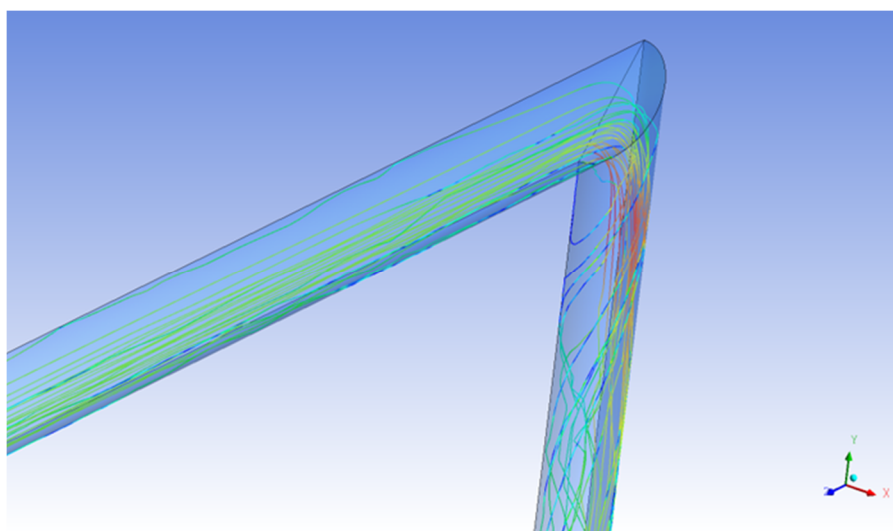
$$error = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_2} \times 100$$

در زانویی مورد مطالعه به ترتیب خطوط جریان شکل 4-4 و خطوط مسیر ذرات شکل 4-5 نشان

داده شده است:



شکل 4-4: خطوط جریان



شکل 5-4: مسیر ذرات

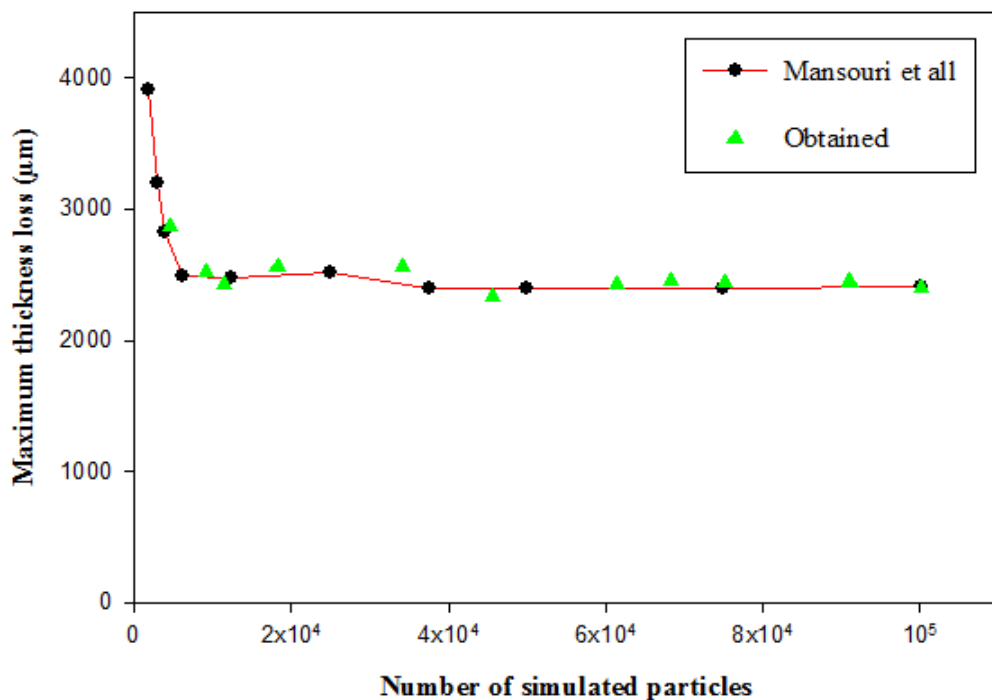
همان‌طور که از مقایسه خطوط جریان و مسیر ذرات شکل 4-4 و شکل 5-4 مشخص است، به دلیل هندسه جریان ذرات در محل تغییر جهت جریان از خطوط جریان جدا می‌شوند و یک سری گردابه‌هایی ایجاد می‌شود، که دلیل ایجاد این گردابه‌ها هندسه جریان است.

4-9- صحت سنجی

برای صحت سنجی مقادیر به دست آمده در شبیه سازی ها از مقاله مورد نظر مقدار ماکزیمم ضخامت از دست رفته دیوار لوله را مورد محاسبه قرار دادیم، برای محاسبه این مقدار از رابطه (4-5) محاسبه شود، سرعت و زاویه برخورد به صورت عددی محاسبه می شوند بنابراین از اندازه شبکه مجزا خواهد بود. مقادیر به دست آمده از شبیه سازی ها و مقادیر ارائه شده در مقاله، در شکل 4-6 مقایسه و میزان خطا مقادیر مقاله و مقادیر بدست آمده در جدول 4-3 نشان داده شده است.

جدول 4-3: مقایسه خطای مقادیر بدست آمده و مقادیر مقاله مورد نظر (درصد)

100188	91080	75141	68310	61479	45540	34155	18216	11385	9108	4554	تعداد ذرات
0/3	1/7	2	2/5	2/18	2/8	5/5	2/5	2/5	1/2	5/3	خطا

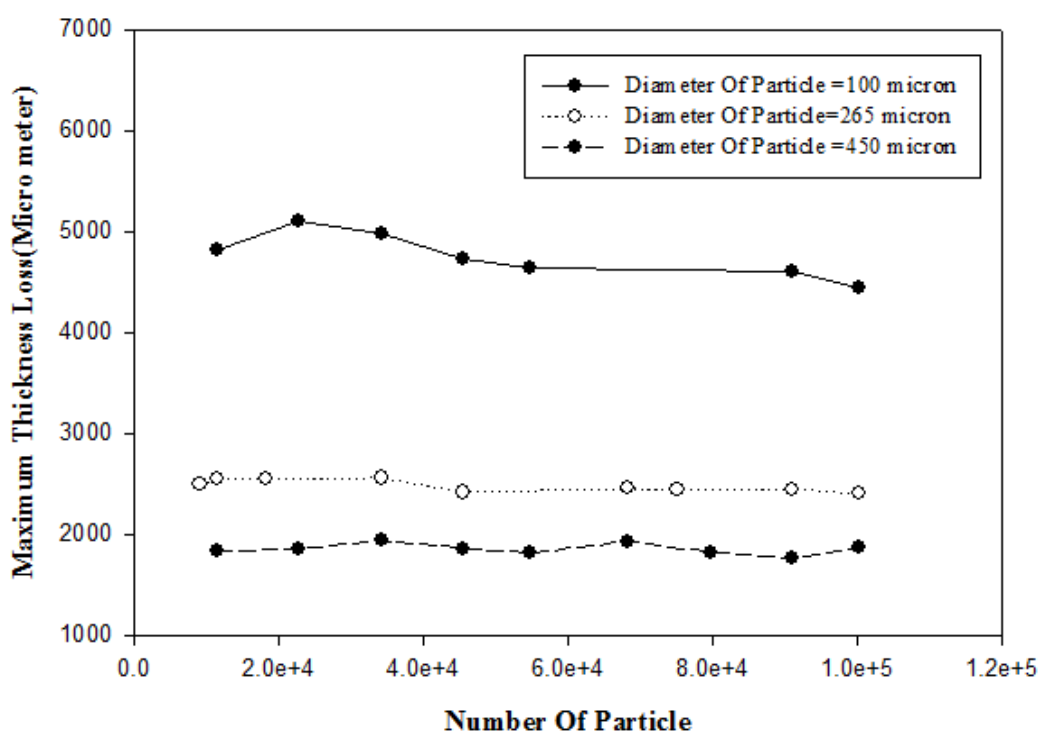


شکل 4-6: نمودار مقادیر مقاله و مقادیر به دست آمده در شبیه سازی ها

4-10- بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی

در شکل 4-7 اثر تغییر اندازه ذرات کوارتز در سرعت یکسان $15/2$ متر بر ثانیه و چگالی 2650 بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته نشان داده شده است، حداقل اندازه ذرات بررسی شده در مقالات برای فرسایش ذرات با اندازه 25 میکرومتر بوده است. همان طور که از نمودار مشخص است در هر اندازه از ذرات با افزایش تعداد ذرات ماکزیمم ضخامت از دست رفته کاهش می یابد، که این کاهش به دلیل اثر سپر شدن است، در نمودار ذرات با اندازه 100 میکرومتر می بینیم که تغییر مقدار فرسایش حدود 85 درصد افزایش داشته است و همچنین برای اندازه ذرات حدود 450 میکرومتر ماکزیمم ضخامت از دست رفته

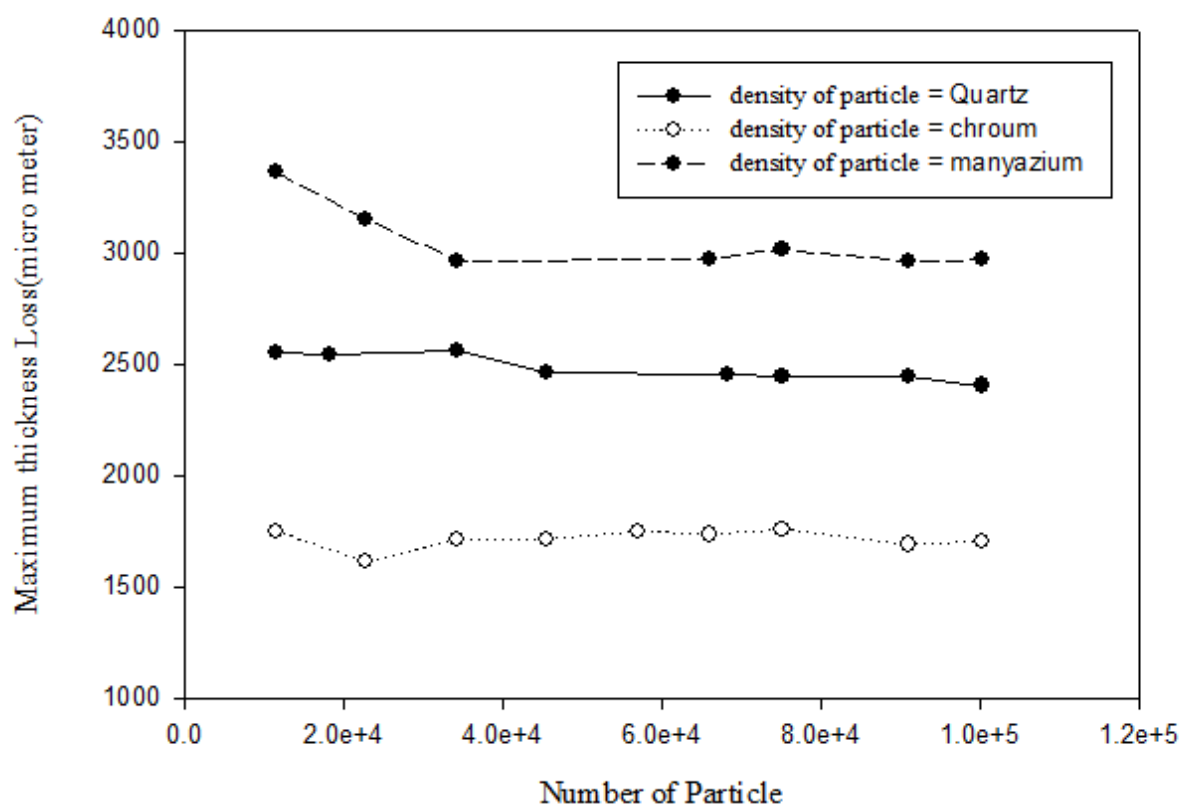
حدود 25 درصد کاهش می‌یابد. با بکارگیری روش تابع استاندارد دیوار به علت پیش بینی غیرفیزیکی پراکندگی آشفته‌گی در ناحیه نزدیک به دیوار تغییر مقدار فرسایش توسط ذرات کوچک را غیرطبیعی پیش‌بینی می‌کند، به این دلیل که ذرات کوچک‌تر به دلیل گیرکردن در گردابه‌ها به‌طور مکرر به دیواره لوله برخورد می‌کنند و لذا پیش بینی ماکزیمم ضخامت از دست رفته توسط آن‌ها در مقایسه با ذرات با اندازه بزرگ‌تر بیشتر خواهد بود [138].



شکل 4-7: اثر تغییر اندازه ذرات بر نسبت فرسایش

در شکل 4-8 اثر تغییر چگالی ذرات با اندازه 256 میکرومتر و سرعت 15/2 بروی ماکزیمم ضخامت از دست رفته نشان داده شده است، با توجه به نتایج بدست آمده با بکارگیری کروم به عنوان ذره ساینده با چگالی 7150 که در مقایسه با کوارتز دارای چگالی حدود 2/7 برابری تغییر مقدار فرسایش حدود 27 درصد کاهش می‌یابد و با بکارگیری منیزیم که دارای چگالی 1738 است که نسبت به کوارتز چگالی آن

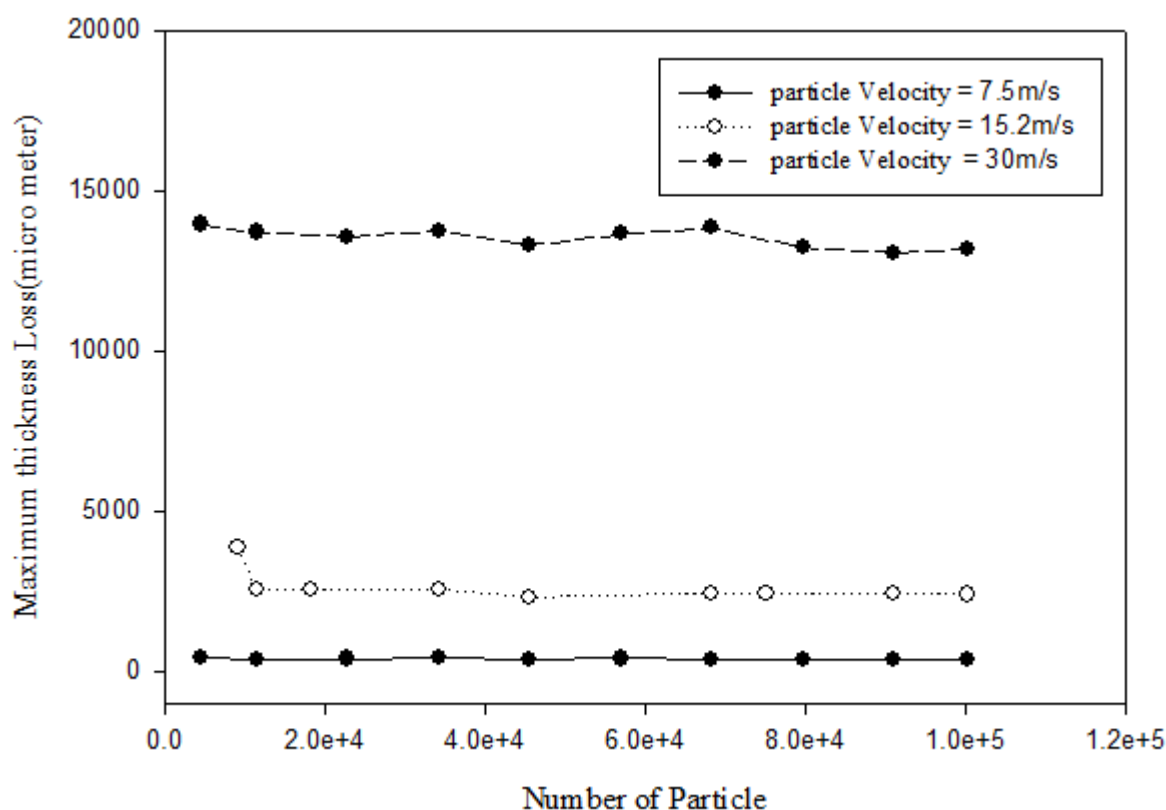
کاهش 1/5 برابری دارد ماکزیمم ضخامت از دست رفته حدود 23 درصد افزایش می‌یابد با مقایسه نتایج به دست آمده متوجه یک رابطه غیرخطی بین چگالی ذرات و ماکزیمم ضخامت از دست رفته خواهیم شد زیرا ذرات با چگالی پایین بیشتر تحت تأثیر جریان سیال خواهند بود و سبب ماکزیمم ضخامت از دست رفته بیشتری در مقایسه با ذرات با چگالی بیشتر خواهند شد.



شکل 4-8: اثر تغییر چگالی ذرات بر نسبت فرسایش

در شکل 4-9 مقادیر به دست آمده از اثر تغییر سرعت ذرات با اندازه 256 میکرومتر، جنس ذرات کوارتز و چگالی 2650 بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته نشان داده شده است، با توجه به نتایج بدست آمده اگر سرعت ذرات را در حدود 50 درصد کاهش دهیم ماکزیمم ضخامت از دست رفته در حدود 80 درصد کاهش می‌یابد و با افزایش دو برابری سرعت ذرات ماکزیمم ضخامت از دست رفته در حدود 430 درصد

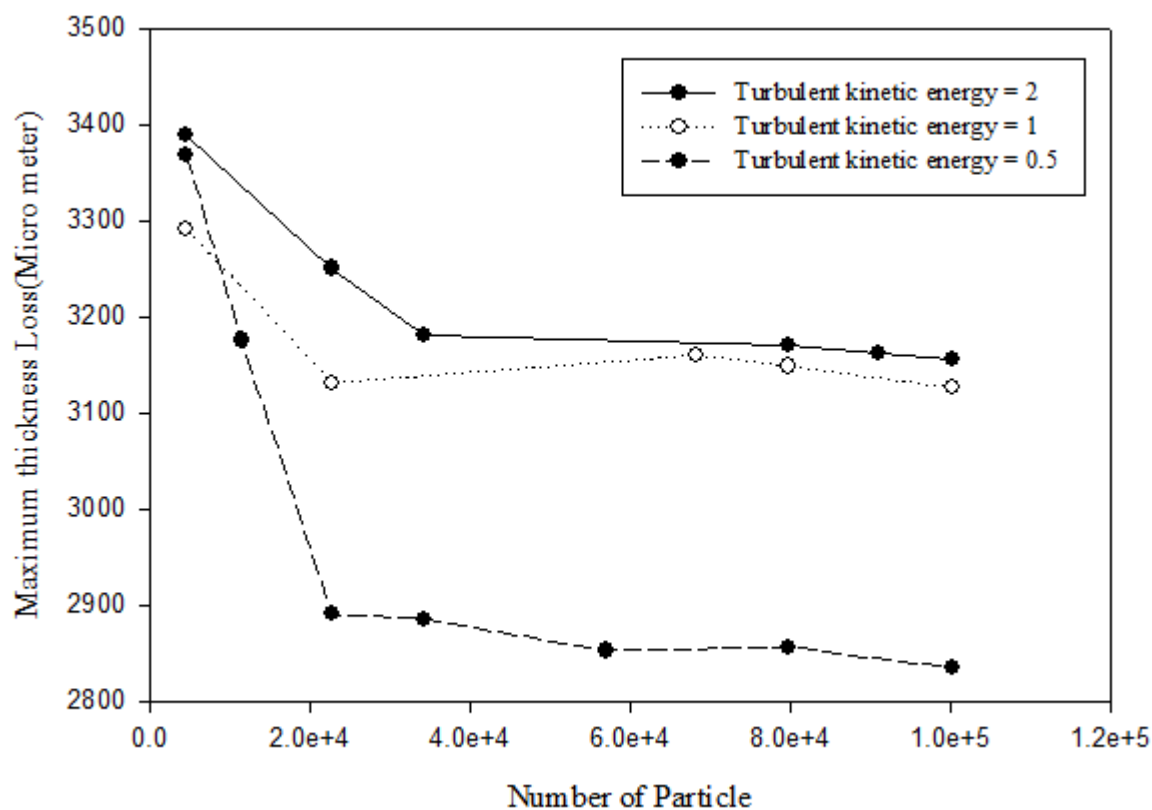
افزایش خواهد داشت با توجه به مقادیر به دست آمده متوجه یک رابطه غیرخطی بین سرعت ذرات و ماکزیمم ضخامت از دست رفته خواهیم شد، برای سرعت 30 متر بر ثانیه ماکزیمم ضخامت از دست رفته به وجود آمده چندین برابر ماکزیمم ضخامت از دست رفته در سرعت 7/5 متر بر ثانیه است. با توجه به فرمول ارائه شده، برای سرعت 30 متر بر ثانیه سرعت ذرات در هنگام برخورد بیشتر از سرعت آستانه است و نسبت فرسایش به دلیل تغییر شکل دائماً در نسبت فرسایش کل اضافه خواهد شد و ماکزیمم ضخامت از دست رفته را چندین برابر ماکزیمم ضخامت از دست رفته در سرعت 7/5 متر بر ثانیه خواهد کرد.



شکل 4-9: اثر تغییر سرعت ذرات بر نسبت فرسایش

در نمودار شکل 4-10 ماکزیمم ضخامت از دست رفته به دست آمده با تغییر انرژی جنبشی آشفستگی برای ذرات کوارتز با اندازه 256 میکرومتر و با سرعت 15/2 و چگالی یکسان برابر با 2650 نشان داده شده

است. تغییر مقدار انرژی جنبشی آشفته‌گی سرعت برخورد ذرات را تحت تاثیر قرار می‌دهد، با توجه به نتایج بدست آمده در تعداد ذرات کمتر از 12000 ذره ماکزیمم ضخامت از دست رفته به‌دست‌آمده برای هر مقدار تقریباً یکسان است اما با کاهش انرژی جنبشی آشفته‌گی به نصف برای تعداد ذرات بیشتر از 12000 ذره ماکزیمم ضخامت از دست رفته به وجود آمده در حدود 8 درصد کاهش می‌یابد اما با افزایش دو برابری انرژی جنبشی آشفته‌گی ماکزیمم ضخامت از دست رفته در حدود 5 درصد افزایش پیدا می‌کند، زمانی که انرژی جنبشی آشفته‌گی به سمت صفر میل می‌کند یعنی هنگامی که تمامی مولفه‌های سرعت نوسانی به سمت صفر میل می‌کنند و همین امر باعث حذف تدریجی حالت غیر ایزوتروپی موجود در یک جریان آشفته و حرکت این جریان به سمت ایزوتروپ شدن می‌شود، می‌تواند به این دلیل باشد که ذره مورد بررسی (ذرات 256 میکرومتر) کمتر تحت تاثیر نوسانات آشفته‌گی جریان قرار دارند و به این علت تغییر انرژی جنبشی آشفته‌گی جریان تأثیر قابل توجهی بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته برای ذرات مورد بررسی نخواهد داشت.



شکل 4-10: اثر تغییر انرژی جنبشی جریان بروی نسبت فرسایش

در تحقیق حاضر اثر پارامترهای مختلف از جمله اندازه ذرات، سرعت ذرات، چگالی ذرات و انرژی جنبشی آشفتگی بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته حاصل از ذرات جامد به صورت جزئی مورد بررسی قرار گرفت. معادلات تغییر مقدار فرسایش که توسط محققان مختلف توسعه داده شده ارائه شد. مدل‌های مختلف پیش‌بینی تغییر مقدار فرسایش تجربی و مکانیکی برای کاربرد صنعتی مورد بحث قرار گرفت. پیش‌بینی فرسایش بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک روش جامع برای پیش‌بینی ماکزیمم ضخامت از دست رفته به صورت جزئی مورد بحث قرار گرفت.

5- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

5-1- نتیجه گیری

با بررسی نتایج به دست آمده از تغییر پارامترهای اندازه ذرات، چگالی ذرات، سرعت ذرات و انرژی جنبشی آشفته روی ماکزیمم ضخامت از دست رفته نتیجه می گیریم که اندازه ذرات روی ماکزیمم ضخامت از دست رفته تأثیر بسیاری دارد به نحوی که هرچه اندازه ذرات را کاهش دهیم ذرات کوچکتر تحت تأثیر جریان قرار گرفته و به طور مکرر به دیواره لوله برخورد می کنند ماکزیمم ضخامت از دست رفته را به میزان قابل توجهی افزایش می دهند، تغییر پارامتر سرعت نیز تأثیر زیادی بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته دارد به نحوی که ماکزیمم ضخامت از دست رفته را افزایش چشم گیری خواهد داد، اما تغییر چگالی ذرات تأثیر زیادی بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته ندارد به طوری که با افزایش حدود 3 برابری چگالی ذرات ماکزیمم ضخامت از دست رفته در حدود 25 درصد کاهش خواهد داشت. همچنین بررسی تأثیر تغییر انرژی جنبشی آشفته جریان (هرچقدر این پارامتر نزدیک به صفر باشد نوسانات جریان کاهش پیدا می کند و هرچقدر که این پارامتر بیشتر باشد انرژی جنبشی آشفته جریان بیشتر خواهد شد) بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته مشخص شد، به نحوی که تأثیر تغییر این پارامتر بر ماکزیمم ضخامت از دست رفته، نسبت به پارامترهای دیگر کمتر است

5-2- پیشنهادات

- در نظر گرفتن تأثیر خواص سطح و بررسی سطوح انعطاف پذیر به بررسی بیشتری نیاز دارد.
- تحقیقات بیشتری برای تعیین اثر غلظت شن زیاد روی ماکزیمم ضخامت از دست رفته نیاز است، این نوع فرسایش بیشتر در طول استخراج در دریا اتفاق می افتد.
- پیش بینی فرسایش برای هندسه های پیچیده نظیر شیرآلات انجام شود، زیرا در حال حاضر مدل سازی ها محدود به سه راهی، زانویی و برخی دیگر هندسه های ساده انجام شده است.

توسعه مدل‌های فرسایش دقیق برای بهینه‌سازی استخراج و کاهش ریسک‌پذیری به‌وسیله محققان در دست بررسی است، زیرا مدل‌های فرسایش در حال حاضر بسیار محدود هستند.

مراجع

- [1] S. J. Kulkarni and N. L. Shinde, "Studies and Research on Cyclone Separators: A Review," 2016.
- [2] H. Arabnejad, A. Mansouri, S. Shirazi, and B. McLaury, "Development of mechanistic erosion equation for solid particles," *Wear*, vol. 332, pp. 1044-1050, 2015.
- [3] I. Finnie, "The mechanism of erosion of ductile metals," in *3rd US national congress of applied mechanics*, 1958.
- [4] I. Finnie, "Erosion of surfaces by solid particles," *wear*, vol. 3, pp. 87-103, 1960.
- [5] A. V. Levy, *Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials*: Asm International, 1995.
- [6] R. Bellman and A. Levy, "Erosion mechanism in ductile metals," *Wear*, vol. 70, pp. 1-27, 1981.
- [7] D. Chase, E. Rybicki, and J. Shadley, "A model for the effect of velocity on erosion of N80 steel tubing due to the normal impingement of solid particles," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 114, pp. 54-64, 1992.
- [8] I. Hutchings, "Some comments on the theoretical treatment of erosive particle impacts," 1979.
- [9] S. Srinivasan and R. O. Scattergood, "Effect of erodent hardness on erosion of brittle materials," *Wear*, vol. 128, pp. 139-152, 1988.
- [10] G. Sundararajan, "A comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials," *Wear*, vol. 149, pp. 111-127, 1991.
- [11] I. Kleis and P. Kulu, *Solid particle erosion: occurrence, prediction and control*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [12] M. Parsi, K. Najmi, F. Najafifard, S. Hassani, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 21, pp. 850-873, 2014.
- [13] V. Sooraj and V. Radhakrishnan, "Elastic impact of abrasives for controlled erosion

- in fine finishing of surfaces," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135, p. 051019, 2013.
- [14] J. Salik, D. Buckley, and W. A. Brainard, "The effect of mechanical surface and heat treatments on the erosion resistance of 6061 aluminum alloy," *Wear*, vol. 65, pp. 351-358, 1981,
 - [15] A. V. Levy and P. Chik, "The effects of erodent composition and shape on the erosion of steel," *Wear*, vol. 89, pp. 151-162, 1983.
 - [16] I. Hutchings, R. Winter, and J. Field, "Solid particle erosion of metals: the removal of surface material by spherical projectiles," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1976, pp. 379-392.
 - [17] G. Tilly, "A two stage mechanism of ductile erosion," *Wear*, vol. 23, pp. 87-96, 1973.
 - [18] B. Gandhi and S. Borse, "Effects of particle size and size distribution on estimating erosion wear of cast iron in sand-water slurries," 2002.
 - [19] A. Elkholy, "Prediction of abrasion wear for slurry pump materials," *Wear*, vol. 84, pp. 39-49, 1983.
 - [20] H. M. Clark, "On the impact rate and impact energy of particles in a slurry pot erosion tester," *Wear*, vol. 147, pp. 165-183, 1991.
 - [21] G. R. Desale, B. K. Gandhi, and S. Jain, "Particle size effects on the slurry erosion of aluminium alloy (AA 6063)," *Wear*, vol. 266, pp. 1009, 1071-1076.
 - [22] R. S. Lynn, K. K. Wong, and H. M. Clark, "On the particle size effect in slurry erosion," *Wear*, vol. 149, pp. 55-71, 1991.
 - [23] Y. Oka and T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2 :Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage," *Wear*, vol. 259, pp. 102-109, 2005.
 - [24] Y. I. Oka, K. Okamura, and T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation," *Wear*, vol. 259, pp. 95-101, 2005.
 - [25] P. S. Babu, B. Basu, and G. Sundararajan, "The influence of erodent hardness on the erosion behavior of detonation sprayed WC-12Co coatings," *Wear*, vol. 270, pp. 903-913, 2011.
 - [26] S. Wada and N. Watanabe, "Solid Particle Erosion of Brittle Materials. III. The Interaction with Material Properties of Target and That of Impingement Particle on Erosive Wear Mechanism," *Yogyo-Kyokai-Shi(J. Ceram. Soc. Jpn.)*, vol. 95, pp. 573-578, 1988

- [27] P. Shipway and I. Hutchings, "The role of particle properties in the erosion of brittle materials," *Wear*, vol. 193, pp. 105-113, 1996.
- [28] J. Hinze, "Turbulent fluid and particle interaction," *Progress in heat and mass transfer*, vol. 6, pp. 433-452, 1972.
- [29] J. Humphrey, "Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 11, pp. 170-195, 1990.
- [30] X. Chen, "Application of computational fluid dynamics (cfd) to single-phase and multiphase flow simulation and erosion prediction," Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2004.
- [31] H. M. Clark and L. Burmeister, "The influence of the squeeze film on particle impact velocities in erosion ", *International journal of impact engineering*, vol. 12, pp. 415-426, 1992.
- [32] I. Finnie, J. Wolak, and Y. Kabil, "Erosion of metals by solid particles," *Journal of Materials*, vol. 2, pp. 682-8, 1967.
- [33] A. Levy and G. Hickey, "Surface degradation of metals in simulated synthetic-fuels-plant environments," Lawrence Berkeley Lab., CA (USA)1981.
- [34] T. Foley and A. Levy, "The erosion of heat-treated steels," *Wear*, vol. 91, pp. 45-64, 1983.
- [35] J. Laitone, "Aerodynamic effects in the erosion process," *Wear*, vol. 56, pp. 239-246, 1979.
- [36] J. Laitone, "Erosion prediction near a stagnation point resulting from aerodynamically entrained solid particles," *Journal of Aircraft*, vol. 16, pp. 809-814, 1979.
- [37] C. Smeltzer, M. Gulden, and W. Compton, "Mechanics of metal removal by impacting dust particles: Trans. AIME," *Jour. of Basic Engineering*, vol. 92, p. 640, 1970.
- [38] A. Burnett, S. De Silva, and A. R. Reed, "Comparisons between "sand blast" and "centripetal effect accelerator" type erosion testers," *Wear*, vol. 186, pp. 168-178, 1995.
- [39] G. Sheldon, "Similarities and differences in the erosion behavior of materials," *Journal of Basic Engineering*, vol. 92, pp. 619-626, 1970.
- [40] A. V. Levy, "The role of plasticity in erosion," in *International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, 5 th, Cambridge, England, 1979, pp. 39-1.
- [41] M. Liebhard and A. Levy, "The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals," *Wear*, vol. 151, pp. 381-390, 1991.

- [42] T. Deng, A. Chaudhry, M .Patel, I. Hutchings, and M. Bradley, "Effect of particle concentration on erosion rate of mild steel bends in a pneumatic conveyor," *Wear*, vol. 258, pp. 480-487, 2005.
- [43] J. Bitter, "A study of erosion phenomena part I," *wear*, vol. 6, pp. 5-21, 1963.
- [44] J. Bitter, "A study of erosion phenomena: Part II," *Wear*, vol. 6, pp. 169-190, 1963.
- [45] J. Neilson and A. Gilchrist, "Erosion by a stream of solid particles," *Wear*, vol. 11, pp. 111-122, 1968.
- [46] I. Finnie, "Some observations on the erosion of ductile metals," *wear*, vol. 19, pp. 81-90, 1972.
- [47] G. Sheldon and A. Kanhere, "An investigation of impingement erosion using single particles," *Wear*, vol. 21, pp. 195-209, 1972.
- [48] E. Meyer and Z. Ver, "Contribution to the knowledge of hardness and hardness testing," *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, vol. 52, pp. 740-835, 1908.
- [49] W. H. Jennings, W. J. Head, and C. Manning, "A mechanistic model for the prediction of ductile erosion," *Wear*, vol. 40, pp. 93-112, 1976.
- [50] A. Evans, M. Gulden, and M. Rosenblatt, "Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1978, pp. 343-365.
- [51] W. Tabakoff, R. Kotwal, and A. Hamed, "Erosion study of different materials affected by coal ash particles," *Wear*, vol. 52, pp. 161-173, 1979.
- [52] I. Hutchings, "A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence," *Wear*, vol. 70, pp. 269-281, 1981.
- [53] G. Sundararajan and P. Shewmon, "A new model for the erosion of metals at normal incidence," *Wear*, vol. 84, pp. 237-258, 1983.
- [54] D. Tabor, "The Hardness of Metals, Clarendon," ed: Oxford, 1951.
- [55] M. Mamoun, "Analytical models for the erosive–corrosive wear process, Rep," ANL-75-XX-2, Appendix I, Argonne National Laboratory 1975.
- [56] A. V. Reddy and G. Sundararajan, "Erosion behaviour of ductile materials with a spherical non-friable erodent," *Wear*, vol. 111, pp. 313-323, 1986.
- [57] S. Johansson, F. Ericson ,and J.-Å. Schweitz, "Solid particle erosion—a statistical method for evaluation of strength properties of semiconducting materials," *Wear*, vol. 115, pp. 107-120, 1987.
- [58] R. M. Brach, "Impact dynamics with applications to solid particle erosion," *International journal of impact engineering*, vol. 7, pp. 37-53, 1988.

- [59] K. R. Ahlert, *Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel*: BUniversity of Tulsa, 1994.
- [60] Y. Zhang, E. Reuterfors, B. S. McLaury, S. Shirazi, and E. Rybicki, "Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows," *Wear*, vol. 263, pp. 330-338, 2007.
- [61] K. Haugen, O. Kvernfold, A. Ronold, and R. Sandberg, "Sand erosion of wear-resistant materials: Erosion in choke valves," *Wear*, vol. 186, pp. 179-188, 1995.
- [62] D. Chen, M. Sarumi, S. Al-Hassani, S. Gan, and Z. Yin, "A model for erosion at normal impact," *wear*, vol. 205, pp. 32-39, 1997.
- [63] G. R. Johnson and W. H. Cook, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering fracture mechanics*, vol. 21, pp. 31-48, 1985.
- [64] D. Chen, M. Sarumi, and S. Al-Hassani, "Computational mean particle erosion model," *Wear*, vol. 214, pp. 64-73, 1998.
- [65] B. Levin, K. Vecchio, J. DuPont, and A. Marder, "Modeling solid-particle erosion of ductile alloys," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, pp. 1763-1774, 1999.
- [66] C. Huang, S. Chiovelli, P. Minev, J. Luo, and K. Nandakumar, "A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow," *Powder Technology*, vol. 187, pp. 273-279, 2008.
- [67] L. F. Coffin Jr, "A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal," *trans. ASME*, vol. 76, pp. 931-950, 1954.
- [68] S. S. Manson, "Behavior of materials under conditions of thermal stress," 1954.
- [69] S. Nsoesie, R. Liu, K. Chen, and M. Yao, "Analytical modeling of solid-particle erosion of Stellite alloys in combination with experimental investigation," *Wear*, vol. 309, pp. 226-232, 2014.
- [70] A. P. I. P. Dept, *Recommended practice for design and installation of offshore production platform piping systems*: American Petroleum Institute, 1991.
- [71] M. Salama and E. Venkatesh, "Evaluation of API RP 14E erosional velocity limitations for offshore gas wells," in *Offshore Technology Conference*, 1983.
- [72] R. Heidersbach, "Velocity limits for erosion-corrosion," in *Offshore Technology Conference*, 1985.
- [73] F. Gipson, "Petroleum Production Engineering, Pits and Pieces," *Manual of Southwest Petroleum Short Course, Texas Tech University, April*, vol. 1, 1989.
- [74] E. Rabinowicz, "The wear equation for erosion of metals by abrasive particles," in

International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, 5 th, Cambridge, England, 1979, pp. 38-1.

- [75] A. Bourgoyne Jr, "Experimental study of erosion in diverter systems due to sand production," in *SPE/IADC Drilling Conference*, 1989.
- [76] S. Svedeman and K. Arnold, "Criteria for sizing multiphase flow lines for erosive/corrosive services. SPE 26569," in *68 th Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas*, 1993.
- [77] S. Svedeman and K. Arnold, "Criteria for Sizing Multiphase flowlines for Erosive," *Corrosive Service ,SPE*, vol. 26569, 1994.
- [78] K. Jordan, "Erosion in multiphase production of oil and gas," NACE International, Houston, TX (United States)1998.
- [79] M. M. Salama, "An alternative to API 14E erosional velocity limits for sand laden fluids," *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ENERGY RESOURCES TECHNOLOGY*, vol. 122, pp. 71-77, 2000.
- [80] P. D. Weiner and G. Tolle, *Condensed Version of Detection and Prevention of Sand Erosion of Production Equipment: Texas A & M Research Foundation*, 1976.
- [81] P. Birchenough, S. Dawson, T. Lockett, and P. McCarthy, "'Critical Flow Rates Working Party," *AEA Technology, UK*, 1995.
- [82] J. Shadley, B. McLaury, and E. Rybicki, "A procedure to predict solid particle erosion in elbows and tees," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 117, p. 45, 1995.
- [83] Y. Zhang, B. S. McLaury, S. A. Shirazi, and E. F. Rybicki, "A two-dimensional mechanistic model for sand erosion prediction including particle impact characteristics," in *CORROSION 2010*, 2010.
- [84] A. Gosman and E. Loannides, "Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustors," *Journal of Energy*, vol. 7, pp. 482-490, 1983.
- [85] M. Parsi, A. Noghrehabadi, and S. Bahreinian, "Numerical study of particle inertia effect using 3-Eddy Interaction Model," in *Proc. The WSEAS 8th Conference on Fluid Mechanics*, 2010, pp. 20-22.
- [86] M. Parsi, A. Noghrehabadi, and S. Bahreinian, "Numerical study of turbulence anisotropy effect on particle deposition rate using DNS data," in *Proc. The WSEAS 8th Conference on Fluid Mechanics*, 2010, pp. 20-22.
- [87] M. Jafari, Z. Mansoori, M. S. Avval, and G. Ahmadi, "The effects of wall roughness on erosion rate in gas–solid turbulent annular pipe flow," *Powder Technology*, vol. 271, pp. 248-254, 2015.
- [88] R. E. Vieira ,A. Mansouri, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Experimental and

- computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow," *Powder Technology*, vol. 288, pp. 339-353, 2016.
- [89] M. Parsi, M. Agrawal, V. Srinivasan, R. E. Vieira, C. F. Torres, B. S. McLaury, *et al.*, "CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 27, pp. 706-718, 2015.
 - [90] M. Parsi, R. E. Vieira, N. Kesana, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Ultrasonic measurements of sand particle erosion in gas dominant multiphase churn flow in vertical pipes," *Wear*, vol. 328, pp. 401-413, 2015.
 - [91] H. Arabnejad, S. Shirazi, B. McLaury, H. Subramani, and L. Rhyne, "The effect of erodent particle hardness on the erosion of stainless steel," *Wear*, vol. 332, pp. 1098-1103, 2015.
 - [92] B. S. McLaury, S. Shirazi, J. R. Shadley, and E. Rybicki, "How operating and environmental conditions affect erosion," NACE International, Houston, TX (United States)1999.
 - [93] B. S. McLaury and S. A. Shirazi, "An alternate method to API RP 14E for predicting solids erosion in multiphase flow," *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF ENERGY RESOURCES TECHNOLOGY*, vol. 122, pp. 115-122, 2000.
 - [94] J. Wang, S. A. Shirazi, J. R. Shadley, and E. F. Rybicki, "Application of flow modeling and particle tracking to predict sand erosion rates in 90 degree elbows," *ASME, NEW YORK, NY,(USA)*. 1996.
 - [95] F. A. Bikbaev, V. Krasnov, M. Maksimenko, V. Berezin, I. Zhilinski, and N. Otroshko, "Main factors affecting gas abrasive wear of elbows in pneumatic conveying pipes," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 9, pp. 73-75, 1973.
 - [96] G. Tolle and D. Greenwood, *Design of Fittings to Reduce Wear Caused by Sand Erosion* :Texas A & M Research Foundation, 1977.
 - [97] R. L. Eyler, *Design and analysis of a pneumatic flow loop*, 1987.
 - [98] R. Vieira, M. Parsi, C. Torres, S. Shirazi, B. McLaury, E. Schleicher, *et al.*, "Experimental study of vertical gas-liquid pipe flow for annular and liquid loading conditions using dual wire-mesh sensors," in *ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, 2014, pp. V002T11A007-V002T11A007.
 - [99] R. E. Vieira, *Sand erosion model improvement for elbows in gas production, multiphase annular and low-liquid flow*: The University of Tulsa, 2014.
 - [100] R. E. Vieira, N. R. Kesana, C. F. Torres, B. S. McLaury, S. A. Shirazi, E. Schleicher, *et al.*, "Experimental investigation of horizontal gas-liquid stratified and

- annular flow using wire-mesh sensor," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 136, p. 121301, 2014.
- [101] M. Parsi, R. Vieira, C. Torres, N. Kesana, B. McLaury, S. Shirazi, *et al.*, "Characterizing slug/churn flow using wire mesh sensor," in *ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, 2014, pp. V01DT32A009-V01DT32A009.
 - [102] X. Chen, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "A comprehensive procedure to estimate erosion in elbows for gas/liquid/sand multiphase flow," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 128, pp. 70-78, 2006.
 - [103] S. Kokal and J. Stanislav, "An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes—I. Flow patterns," *Chemical Engineering Science*, vol. 44, pp. 665-679, 1989.
 - [104] N. Kesana, R. Vieira, E. Schleicher, B. McLaury, S. Shirazi, and U. Hampel, "Experimental investigation of slug characteristics through a standard pipe bend," in *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2013, pp. V07AT08A040-V07AT08A040.
 - [105] N. Kesana, R. Vieira, E. Schleicher, B. McLaury, S. Shirazi, and U. Hampel, "Experimental study of slug characteristics: implications to sand erosion," in *ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, 2013, pp. V01CT17A007-V01CT17A007.
 - [106] N. Kesana, S. Grubb, B. McLaury, and S. Shirazi, "Ultrasonic measurement of multiphase flow erosion patterns in a standard elbow," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 135, p. 032905, 2013.
 - [107] K. Sekoguchi, "New development of experimental study on interfacial structure in gas-liquid two-phase flow ", in *Proc. 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Brussels*, 1997, pp. 1177-1188.
 - [108] Q. H. Mazumder, S. A. Shirazi, B. S. McLaury, J. R. Shadley, and E. F. Rybicki, "Development and validation of a mechanistic model to predict solid particle erosion in multiphase flow," *Wear*, vol. 259, pp. 203-207, 2005.
 - [109] R. Paz, "Film Thickness Distribution for annular flow in directional wells: Horizontal to vertical," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1994.
 - [110] M. Ishii and K. Mishima, "Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 32, pp. 1835-1846, 1989.
 - [111] L. B. Fore and A. E. Dukler, "The distribution of drop size and velocity in gas-liquid annular flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, pp. 137-

149, 1995.

- [112] G. Santos, *Effect of sand distribution on erosion and correlation between acoustic sand monitor and erosion test in annular multiphase flow*, 200.✓
- [113] Q. H. Mazumder, G. Santos, S. A. Shirazi, and B. S. McLaury, "Effect of sand distribution on erosion in annular three-phase flow," in *ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*, 2003, pp. 871-880.
- [114] Q. H. Mazumder, S. A. Shirazi, and B. S. McLaury, "A mechanistic model to predict erosion in multiphase flow in elbows downstream of vertical pipes," in *CORROSION 2004*, 2004.
- [115] Q. H. Mazumder, *Development and validation of a mechanistic model to predict erosion in single-phase and multiphase flow*, 2004.
- [116] Q. H. Mazumder, "Prediction of Erosion due to solid particle Impact in Single-Phase and Multiphase Flows," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 129, pp. 576-582, 2007.
- [117] B. S. McLaury, V. Viswanathan, S. A. Shirazi, and Q. H. Mazumder, "Effect of Upstream Pipe Orientation on Erosion/Corrosion in Bends for Annular Flow," in *CORROSION 2006*, 2006.
- [118] B. S. McLaury, S. A. Shirazi, and E. F. Rybicki, "Sand erosion in multiphase flow for slug and annular flow regimes," in *CORROSION 2010*, 2010.
- [119] B. S. McLaury, S. A. Shirazi, V. Viswanathan, Q. H. Mazumder, and G. Santos, "Distribution of sand particles in horizontal and vertical annular multiphase flow in pipes and the effects on sand erosion," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 133, p. 023001, 2011.
- [120] A. Ansari, N. Sylvester, O. Shoham, and J. Brill, "A comprehensive mechanistic model for upward two-phase flow in wellbores," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1990.
- [121] L. Gomez, O. Shoham, and Y. Taitel, "Prediction of slug liquid holdup: horizontal to upward vertical flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 26, pp. 517-521, 2000.
- [122] Y. Taitel and D. Barnea, "Two-phase slug flow," *Advances in heat transfer*, vol. 20, pp. 83-132, 1990.
- [123] H.-Q. Zhang, Q. Wang, C. Sarica, and J. P. Brill, "Unified Model for Gas-Liquid Pipe Flow Via Slug Dynamics: Part 1—Model Development," in *ASME 2002 Engineering Technology Conference on Energy*, 2002, pp. 811-820.
- [124] H.-Q. Zhang, Q. Wang, C. Sarica, and J. P. Brill, "Unified model for gas-liquid pipe flow via slug dynamics—part 1: model development," *Journal of energy resources*

- technology, vol. 125, pp. 266-273, 2003.
- [125] Y. Zhang, B. S. McLaury, S. A. Shirazi, E. F. Rybicki, and S. Nesic, "Predicting Sand Erosion in Slug Flows Using a Two-Dimensional Mechanistic Model," in *CORROSION 2011*, 2011.
 - [126] N. Kesana, J. Throneberry, B. McLaury, S. Shirazi, and E. Rybicki, "Effect of particle size and liquid viscosity on erosion in annular and slug flow," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 136, p. 012901, 2014.
 - [127] N. Kesana, R. Vieira, M. Parsi, B. McLaury, and S. Shirazi, "A mechanistic model for predicting erosion in pseudo slug flow," in *Proc. of: "The NACE 2014 Conference & Expo, June 8e11*, 2014.
 - [128] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD* vol. 2: DCW industries La Canada, CA, 1998.
 - [129] T. Burden and B. McLaury, "Laser Doppler velocimeter measurements to characterize turbulence in a constriction with sharp and rounded inlets," *Experiments in fluids*, vol. 32, pp. 472-480, 2002.
 - [130] B. Lee, J. Tu, and C. Fletcher, "On numerical modeling of particle-wall impaction in relation to erosion prediction: Eulerian versus Lagrangian method," *Wear*, vol. 252, pp. 17.۲۰۰۲, ۱۸۸-۹
 - [131] R. B. Kazerooni, A. Noghrehabadi, S. Bahrainian, and M. Parsi, "V 2 f Study of Nano and Micro-particles transportation in turbulent boundary layer in conjunction with Eddy Interaction Model," in *Proceedings of the WSEAS 8th Conference on Fluid Mechanics, Taipei, Taiwan*, 2010.
 - [132] M. Parsi, M. Mahdavianesh, A. Noghrehabadi, and G. Ahmadi, "Particle Deposition in a Turbulent Channel Flow," in *ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, 2013, pp. V01CT20A014-V01CT20A014.
 - [133] G. Grant and W. Tabakoff, "Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles," *Journal of Aircraft*, vol. 12, pp. 471-478, 1975.
 - [134] A. Forder, M. Thew, and D. Harrison, "A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves," *Wear*, vol. 216, pp. 184-193, 1998.
 - [135] X. Chen, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Numerical and experimental investigation of the relative erosion severity between plugged tees and elbows in dilute gas/solid two-phase flow," *Wear*, vol. 261, pp. 715-729, 2006.
 - [136] http://www.ansys.com/About-ANSYS/startup-program?utm_source=GWG&utm_campaign=Startup&utm_medium=CPC&gclid=CjwKCAjwos7NBRAWiAwAypNCE90giRHjJW7KEsDre57px6KNgmAW245S3ZbJXOLKHsevcQAJ26jcxoCvH0QAvD_BwE.

- [137] <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
- [138] 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, pp. 339-350, 2015.

Abstract

One of the major problems of the oil and gas industry is the sand particles found during the extraction procedure. The amount of extracted sand is of high importance since it may lead to many troubles. There are three main problems including pressure drop, tube obstruction and erosion. The erosion is a complex mechanical process in which the material of the pipelines wall surface are removed due to the repetition of the collision of sand particles with the tube wall. Finding the governing parameters on the erosion phenomenon and obtaining a method to model them is necessary. In the present thesis, the effective key factors on the erosion are described and the existing erosion equations have been investigated. In addition, mechanical and experimental models have been used to predict erosion in the pipelines. These models are employed by oil and gas companies to investigate the extent of erosion.

The purpose of this research is to numerically investigate the particle motion inside the pipeline elbow and the effect of a change in the velocity, size, and density of the particles, and the kinetic energy of turbulent flow on the erosion rate is also studied. The geometry of the study is a right angled elbow with a 3D steady turbulent flow like almost any other industrial flow. The continuous flow field is obtained by solving the continuity and momentum equations. The particle motion path is achieved by using the one-way coupling Lagrangian tracking model. Finally, a corrosion model is used to investigate the corrosion phenomenon of particles. Another assumptions considered herein is that the sand particles are semi-rounded.

The results indicated that the particle size and the particle velocity have the largest effect on erosion rate. As the particle size increased two times, the erosion rate decreases by about 25% and increases about 80% when the particle size decrease 2.5 times. This is caused because the small particles are trapped in

the vortices and frequently impact the wall. When the particle velocity is reduced two times, the erosion rate decreases about 80%, and when the particle velocity increased twice, the erosion rate increases 430%.

Key words: Computational Fluid Dynamics, Fluid-Particle Two-Phase Flow, Lagrangian Particle Tracking Model, Corrosion Model, erosion rate, One-way Coupling



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Numerical Modeling of Particle Effects in internal flow on corrosion

By:

Amin ghasemi

Supervisor:

Dr. Ali sarreshtehdari

September 2017