





دانشکده مهندسی مکانیک

برآورد تأثیر تخریبی پدیده کاویتاسیون به شیوه عددی

دانشجو:

سعید عشقی

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته‌داری

استاد مشاور:

دکتر مجتبی قطعی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیرماه ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مکانیک

گروه : تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید عشقی

تحت عنوان:

برآورد تأثیر تخریبی پدیده کاویتاسیون به شیوه عددی

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 : دکتر مجتبی قطعی		نام و نام خانوادگی : دکتر علی سررشته‌داری
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر محمد محسن شاهمردان		نام و نام خانوادگی : دکتر محمود نوروزی
			نام و نام خانوادگی : دکتر محمود چهارطاقی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ

پدر مہربان

و

مادر دلسوزم

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس خداوند، که هر آن چه داریم از فضل بیکران اوست و هر آن چه که نداریم از حکمت بی پایان اوست. در ابتدا لازم می دانم از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به ویژه آقای دکتر علی سررشته داری استاد راهنمای پایان نامه ام که با راهنمایی های مدبرانه خود، نظارت و سرپرستی این پایان نامه را به عهده داشتند، نیز از آقای دکتر مجتبی قطعی استاد مشاور پایان نامه، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین باید مراتب قدردانی خود را از آقای مهندس وحید نجفی از فارغ التحصیلان مقطع کارشناسی ارشد که بدون هیچ چشم داشتی، برادرانه در صدد یاری اینجانب در حل مشکلات مواجهه در این پایان نامه داشته اند، بیان کنم.

همچنین از زحمات و راهنمایی های دلسوزانه برادر عزیزم آقای مهندس وحید عشقی، برادران دو قلویم آقایان، مهندس نوید و فرید عشقی که همیشه بعنوان راهنما، مشوق و پشتیبان علمی بنده در دوران تحصیلی ام بوده اند، تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **سعید عشقی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "**برآورد تأثیر تخریبی پدیده کاویتاسیون به شیوه عددی**" تحت راهنمایی دکتر **علی سررشته‌داری** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده‌است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده‌است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

پدیده تشکیل کاویتاسیون و اثرات ناشی از آن در بسیاری از جریان‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. لیکن هزینه بسیار بالای کارهای آزمایشگاهی از یک طرف و زمان‌بر بودن مشاهده آثار این پدیده از طرف دیگر، موجب افزایش روزافزون برتری حل عددی در این حوزه شده است.

هدف این پایان‌نامه مطالعه و بررسی برآورد تأثیر تخریبی پدیده کاویتاسیون به شیوه عددی می‌باشد بمنظور برآورد تأثیر تخریبی پدیده کاویتاسیون به محاسبه کمیتی به نام نرخ خوردگی کاویتاسیون^۱ پرداخته شده است. در این تحقیق پس از تعریف پدیده کاویتاسیون، معادلات اساسی حاکم برای تحلیل این پدیده آورده شده است و در ادامه مدل موجود که برای حل تحلیلی و عددی این پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، معرفی شده است. با در نظر گرفتن دو حالت سرعت ثابت و حالت اصل انتقال نرخ خوردگی و نیز حالت سوم که سرعت متغیر نام دارد و در واقع بعنوان یک هدف برای توسعه کد استفاده شده است به محاسبه نرخ خوردگی پرداخته شده است. وارد کردن کدهای عددی با استفاده از زبان برنامه نویسی C++ تحت لینوکس بوده که از آن نسبت به تهیه حلگرهای عددی که توانایی شبیه‌سازی و محاسبه کمیت نرخ خوردگی مورد استفاده در تحقیق را دارد اقدام شده است و در ادامه برای اجرای کدهای عددی از نرم‌افزار آپن‌فوم^۲ استفاده گردیده است.

هندسه مورد استفاده یک نازل است که متناسب با نتایج آزمایشگاهی موجود انتخاب شده است. به‌منظور محاسبه کمیت نرخ خوردگی کاویتاسیون در حالات بیان شده از جنس‌های استیل و آلومینیوم در فشارهای مختلف استفاده شده است. در حالات سرعت ثابت و اصل انتقال نرخ خوردگی، نرخ خوردگی حاصل از نتایج عددی و به کمک روابط بیان شده در فصل سوم، بدست آمده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی موجود، بررسی و مقایسه شده است. نیز در پایان بمنظور توسعه کد عددی و با هدف توسعه مدل خوردگی، نتایج نرخ خوردگی در حالت سرعت متغیر بدست آمده و نتایج حاصل از حل عددی با

^۱ Pitting rate

^۲ Openfoam

نتایج آزمایشگاهی موجود برای حالت سرعت ثابت مقایسه شده است. در پایان روش اصل انتقال نرخ خوردگی برای ادامه تحقیقات توصیه می گردد.

واژه‌های کلیدی:

کاویتاسیون، نرخ خوردگی کاویتاسیون، اصل انتقال خوردگی کاویتاسیون.

فهرست مطالب

فصل ۱. معرفی پدیده کاویتاسیون	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- نحوه شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون	۴
۱-۳- عدد کاویتاسیون	۷
۱-۴- فشار داخل حفره کاویتاسیون	۹
۱-۵- چرخه تشکیل ابر کاویتاسیون ثابت و جت بازگشتی	۹
۱-۶- انواع کاویتاسیون	۱۲
۱-۶-۱- کاویتاسیون متحرک یا حبابی	۱۲
۱-۶-۲- کاویتاسیون صفحه‌ای	۱۳
۱-۶-۳- کاویتاسیون ابری	۱۴
۱-۶-۴- سوپر کاویتاسیون	۱۵
۱-۶-۵- کاویتاسیون گردابه‌ای	۱۵
۱-۷- کمیت‌های موثر در مدل‌سازی تغییر فاز در کاویتاسیون	۱۶
۱-۷-۱- خصوصیات جریان‌های کاویتاسیون	۱۷
۱-۷-۲- عوامل موثر بر پدیده کاویتاسیون	۲۲
۱-۸- خوردگی کاویتاسیون	۲۶
۱-۹- روش‌های کاهش کاویتاسیون در صنعت	۲۸
۱-۱۰- روش‌های بررسی کاویتاسیون	۲۹
۱-۱۰-۱- تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی	۳۰
۱-۱۰-۲- روش‌های تحلیلی	۳۶
۱-۱۰-۳- شبیه‌سازی عددی	۳۸
فصل ۲. بررسی معادلات اساسی حاکم بر پدیده کاویتاسیون	۴۱

۴۲	۱-۲- معادلات حاکم
۴۳	۲-۲- معرفی جریان‌های کاویتاسیون از دیدگاه مدل‌سازی عددی
۴۴	۳-۲- مدل انتقال کسر حجمی
۴۶	۴-۲- مدل ردیابی مرز مشترک
۴۷	۵-۲- مدل ریاضی کاویتاسیون بر اساس رویکرد حجمی مدل‌سازی
۴۸	۶-۲- تأثیر آشفتگی در پدیده ابرکاویتاسیون
۴۹	۷-۲- مدل‌های آشفتگی کلاسیک
۵۰	۱-۷-۲- مدل $K - \varepsilon$
۵۰	فصل ۳. شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون
۵۲	۱-۳- پیش درآمدی بر انواع مدل‌های موجود
۵۳	۱-۱-۳- مدل کانز
۵۴	۲-۳- معرفی نرخ خوردگی
۵۴	۱-۲-۳- معرفی رابطه کمیت نرخ خوردگی مقاله تجربی
۵۴	۳-۳- نحوه مدل‌سازی خوردگی در مقاله تجربی
۵۷	۴-۳- نحوه مدل‌سازی خوردگی در تحقیق
۵۷	۱-۴-۳- معرفی رابطه کمیت نرخ خوردگی تحقیق
۵۸	۲-۴-۳- شرح فیزیکی کمیت‌های δ^* و τ^*
۵۸	۵-۳- شرح فیزیکی کمیت‌های δ و τ
۵۸	۱-۵-۳- بدست آوردن رابطه بین فشار و سرعت سیال
۵۹	۲-۵-۳- محاسبه کمیت‌های δ و τ برای استیل و آلومینیوم
۶۰	۶-۳- بدست آوردن رابطه نرخ خوردگی برای استیل و آلومینیوم
۶۱	۷-۳- اصل انتقال نرخ خوردگی برای استیل و آلومینیوم
۶۲	۸-۳- بدست آوردن رابطه نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر

- ۳-۸-۱- محاسبه کمیت‌های δ و τ استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر..... ۶۳
- ۳-۹- تشریح چگونگی بدست آوردن نرخ خوردگی حاصل از حل عددی..... ۶۴
- فصل ۴. کد عددی و نتایج شبیه‌سازی عددی..... ۶۵
- ۴-۱- ویژگی‌های حل عددی..... ۶۶
- ۴-۲- مدل‌سازی نرخ خوردگی کاپیتاسیون..... ۶۶
- ۴-۳- جریان همراه با پدیده کاپیتاسیون در نازل..... ۶۶
- ۴-۳-۱- شرایط مرزی..... ۶۷
- ۴-۳-۲- مدل کانز..... ۷۲
- ۴-۴- نرخ خوردگی برای استیل در حالت سرعت ثابت..... ۷۲
- ۴-۴-۱- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۱۰ بار..... ۷۲
- ۴-۴-۲- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۱۵ بار..... ۷۴
- ۴-۴-۳- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۴۰ بار..... ۷۶
- ۴-۴-۴- نتایج عددی نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار..... ۷۸
- ۴-۴-۵- نتایج عددی نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار..... ۸۰
- ۴-۵- بحث روی نمودارهای نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت ثابت..... ۸۳
- ۴-۶- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم..... ۸۴
- ۴-۶-۱- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۱۰ بار..... ۸۴
- ۴-۶-۲- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۴۰ بار..... ۸۷
- ۴-۷- نرخ خوردگی برای استیل در حالت سرعت متغیر..... ۹۰
- ۴-۷-۱- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۱۰ بار..... ۹۰
- ۴-۷-۲- نتایج عددی نرخ خوردگی برای فلز استیل در فشار ۱۵ بار..... ۹۱
- ۴-۷-۳- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۴۰ بار..... ۹۲
- ۴-۷-۴- نتایج عددی نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار..... ۹۳

۹۴	۴-۷-۵- نتایج عددی نرخ خوردگی برای فلز آلومینیوم در فشار ۴۰ بار.....
۹۶	۴-۸- بحث روی نمودارهای نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر.....
	۴-۹- بحث بر روی برتری روش اصل انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون نسبت به دیگر روش
۹۷	های محاسبه نرخ خوردگی کاویتاسیون.....
۹۸	فصل ۵. بحث، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها.....
۹۹	۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری.....
۱۰۲	۵-۲- پیشنهادها.....
۱۰۲	مراجع.....
۱۰۶	پیوست.....
۱۰۷	پیوست ۱.....
۱۱۰	پیوست ۲.....
۱۱۸	پیوست ۳.....
۱۲۸	پیوست ۴.....
۱۳۲	پیوست ۵.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ تغییرات فشار بخار آب بر حسب دما [۱] ۲
- شکل ۲-۱ مقایسه پدیده کاویتاسیون و جوشش در دیاگرام فاز [۷] ۵
- شکل ۳-۱ خوردگی پره های کشتی بواسطه کاویتاسیون ۷
- شکل ۴-۱ چرخه تشکیل و جدایی کاواک [۶] ۱۲
- شکل ۵-۱ کاویتاسیون متحرک یا حبابی [۱۶] ۱۳
- شکل ۶-۱ کاویتاسیون صفحه‌ای [۱۶] ۱۴
- شکل ۷-۱ کاویتاسیون ابری [۱۶] ۱۵
- شکل ۸-۱ سوپر کاویتاسیون [۱۶] ۱۵
- شکل ۹-۱ کاویتاسیون گردابه‌ای [۱۶] ۱۶
- شکل ۱۰-۱ منحنی سرعت صوت بر اساس کیفیت ترمودینامیکی [۱۷] ۲۱
- شکل ۱۱-۱ نحوه تعیین زاویه چسبندگی دیوار و موقعیت آن در شکل‌گیری فاز ثانویه [۹] ۲۵
- شکل ۱۲-۱ چگالش حباب کاویتاسیون در نزدیکی دیواره [۷] ۲۷
- شکل ۱۳-۱ خوردگی در اثر فروپاشی حباب‌های شکل گرفته در پره‌های خروجی یک توربین
فرانسسیس [۱] ۲۸
- شکل ۱۴-۱ یک نمونه استخر دینامیکی (دانشگاه پنسیلوانیا) [۱] ۳۲
- شکل ۱۵-۱ تغییر شکل شماتیک نرخ از دست دادن جرم در برابر مدت زمان [۱۹] ۳۵
- شکل ۱-۳ دسته بندی مدل‌های مختلف مورد استفاده در مدل‌سازی کاویتاسیون ۵۲
- شکل ۲-۳ تأثیر سرعت سیال روی قطر حفره خوردگی [۲۸] ۵۵
- شکل ۳-۳ تأثیر سرعت سیال روی زمان پوشش [۲۸] ۵۵
- شکل ۴-۳ نرخ خوردگی تجمعی بر حسب قطر معادل حفره برای استیل [۲۸] ۵۶
- شکل ۵-۳ نرخ خوردگی تجمعی بر حسب قطر معادل حفره برای عنصر آلومینیوم [۲۸] ۵۶
- شکل ۱-۴ طرحی از ناحیه تحت آزمایش [۲۸] ۶۸
- شکل ۲-۴ شبکه‌بندی و شرایط مرزی نازل [۲۹] ۶۸
- شکل ۳-۴ بررسی استقلال از شبکه محاسباتی نازل ۶۹
- شکل ۴-۴ فرآیند ایجاد و جدایی کاواک ابری در نازل ۷۱
- شکل ۵-۴ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت ثابت

۷۳	 آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۶ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۵ بار در حالت سرعت ثابت
۷۵	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۷ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت ثابت
۷۷	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۸ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت ثابت
۷۹	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۹ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت ثابت
۸۲	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۰ نتایج حل عددی برای استیل و آلومینیوم در حالت سرعت ثابت و مقایسه آنها با نتایج تجربی
۸۲	 تجربی
	شکل ۴-۱۱ نتایج اصل انتقال خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۱۰ بار و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
۸۲	 آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۲ نتایج اصل انتقال خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۴۰ بار و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
۸۲	 آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۳ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر
۹۰	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۴ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۵ بار در حالت سرعت متغیر
۹۱	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۵ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر
۹۲	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۶ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر
۹۴	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۷ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر
۹۵	 و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
	شکل ۴-۱۸ نتایج حل عددی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر و مقایسه آنها با نتایج تجربی
۹۴	

نمادها

C_{dset}	ضریب عددی ثابت در جمله تبخیر مدل کانز
C_{prod}	ضریب عددی ثابت در جمله چگالش مدل کانز
V	سرعت سیال
U_{tot}	سرعت کل
D	قطر معادل خوردگی
δ	قطر حفره خوردگی
τ	زمان پوشش
N_p	نرخ خوردگی
$\dot{m}$	نرخ اتلاف جرم
T_i	دوره پایدار
SS	فلزاستیل
AL	فلز آلومینیوم
f	کسر جرمی مایع
t_{∞} (s)	زمان مشخصه جریان آزاد
U_{∞}	سرعت جریان آزاد
y (m)	محور مختصات عمودی

نمادهای یونانی

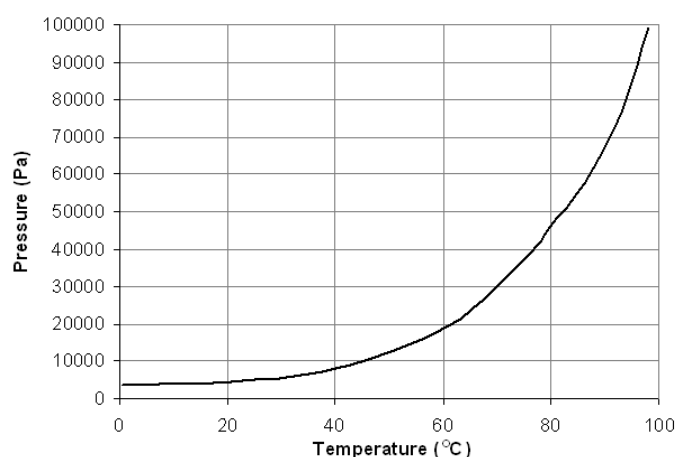
α	کسر حجمی بین ۰ و ۱
ρ_l	چگالی مایع

ρ_v	چگالی بخار
σ	عدد کاویتاسیون
μ_t	لزجت مربوط به جریان مغشوش
μ	لزجت دینامیکی سیال
γ	کشش سطحی
	زیر نویس ها و بالا نویس ها
l	فاز مایع
v	فاز بخار

فصل ۱. معرفی پدیده کاویتاسیون

۱-۱- مقدمه

هنگامی که یک جسم در داخل آب حرکت می کند محیط آب پیرامون خود را تحت تأثیر قرار می دهد. این تأثیرات در قالب گرادیان های فشار و سرعت قابل درک است. هنگامی که فشار استاتیک موضعی آب در یک ناحیه کاهش پیدا کند بطوریکه فشار آب کمتر از فشار اشباع در دمای متناظر گردد (در حالت ایده آل) ذرات آب مایع تبدیل به حباب های بخار می شوند این پدیده را کاویتاسیون می نامند. کاویتاسیون را همچنین می توان به عنوان تسلیم^۱ سیال مایع تحت فشارهای بسیار کوچک تعریف نمود. می توان مکانیزم تبخیر در کاویتاسیون را به این نحو بیان کرد که با کاهش فشار سیال به مقداری پایین تر از فشار بخار اشباع (به عنوان مثال ۲/۷۶۳ Kpa در دمای 25°C) یک تنش کششی حاصل از برهم خوردن تعادل نیروهای بین مولکولی، بر اجزای سیال اعمال می شود. این تنش کششی، باعث ناپیوستگی و تغییر چگالی می شود. این ناپیوستگی نیز در سیال، بصورت حباب های ریز و حباب های درشت که توسط بخار پر شده اند ظاهر می شود. از طرفی، فشار بخار اشباع، تابعی از نوع سیال و دمای آن می باشد، در شکل ۱-۱ تغییرات فشار بخار آب بر حسب دما نشان داده شده است. با توجه به روابط ترمودینامیکی، وابستگی شدیدی بین فشار بخار و دما ملاحظه می شود.



شکل ۱-۱ تغییرات فشار بخار آب بر حسب دما [۱]

^۱ Yield

اولین بار فرود^۱ این اثر را بررسی کرد و نام کاویتاسیون را که از کلمه یونانی کاویته^۲ گرفته شده بود بر آن گذارد [۲]. پدیده کاویتاسیون را عموماً می‌توان در جریان آب اطراف پره‌های چرخان، باله‌ها و گلوگاه یک نازل همگرا مشاهده نمود. کاویتاسیون همچنین در جریان‌های ساکن یا شبه ساکن نیز اتفاق می‌افتد. هنگامی که میدان فشار نوسانی به سطح آزاد یک مخزن اعمال می‌شود اگر دامنه نوسانات این میدان فشار به قدر کافی بزرگ باشد، حباب‌های کاویتاسیون در مخزن شکل می‌گیرد. این نوع کاویتاسیون را کاویتاسیون آکوستیکی^۳ می‌نامند [۳].

در ادامه در فصل اول مفصل به معرفی پدیده کاویتاسیون، نحوه شکل‌گیری و آثار ناشی از وقوع آن پرداخته شده است. در ادامه این فصل انواع پنجگانه کاویتاسیون، خوردگی کاویتاسیون و روش‌های بررسی کاویتاسیون معرفی شده است. در انتها مروری اجمالی به کارهای انجام شده در زمینه خوردگی کاویتاسیون و لزوم انجام تحقیقاتی از این دست برای بیان نقاط ضعف و قوت هر یک از روش‌ها و بیان راهکارهایی برای تقویت نقاط قوت و بهبود نقاط ضعف هر یک بیان شده است.

در فصل دوم، معادلات اساسی جریان لزج، همچنین چگونگی بررسی جریان‌های چندفازی معرفی شده‌اند.

در فصل سوم هم شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون به همراه معرفی مدل‌های ارائه شده برای مطالعه پدیده خوردگی آورده شده است.

در فصل چهارم در ابتدا به طور اجمالی به معرفی کدهای عددی تهیه شده، جهت محاسبه نرخ خوردگی و همچنین به بیان شرایط مرزی هندسه مورد نظر پرداخته شده و سپس نتایج بدست آمده از حل‌های عددی به همراه داده‌های آزمایشگاهی موجود برای هندسه مورد نظر بیان شده‌اند.

¹ Froude

² Cavity

³ Acoustic Cavitation

در فصل پنجم، ابتدا به بحث و نتیجه‌گیری در مورد نتایج بدست آمده که در فصل قبل آورده شده، پرداخته شده و سپس تحلیل و بررسی روی آنها انجام پذیرفته است. نیز در انتها با ارائه پیشنهادهایی برای ادامه کارهای آتی فصل به اتمام می‌رسد.

۱-۲- نحوه شکل‌گیری پدیده کاویتاسیون

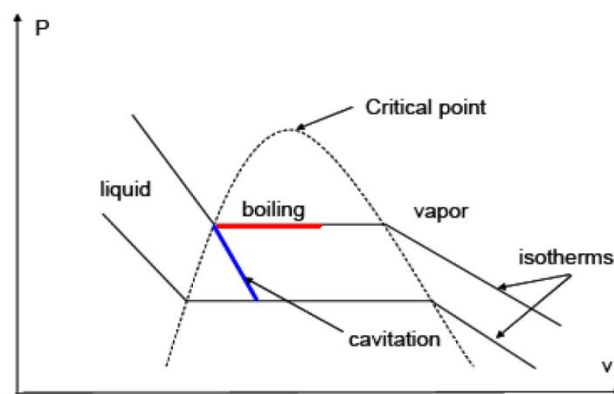
همان‌طور که از تعریف کاویتاسیون هم بر می‌آید، در ماشین‌های آبی در اثر سرعت زیاد جریان و رسیدن مایع به فشارهای کمتر از فشار بخار به وجود می‌آید. همان‌گونه که می‌دانیم، یک سیستم هیدرودینامیکی شامل مایع و گاز تراکم‌ناپذیر، بایستی دارای نسبت جرمی تعادلی در دمای مفروض، متناسب با فشار جزئی گاز تراکم‌ناپذیر باشد. در نتیجه اگر فشار کل مخلوط در دما و نسبت جرمی داده شده، کمتر از مقدار تعادلی باشد، فاز گازی حل شده از مایع خارج می‌شود و بدین صورت یک کاویتا از فاز گازی به وجود می‌آید. با فرض اینکه سیال مورد بررسی همگن باشد، به آن فشار تعادلی که در آن فاز گازی پدیدار می‌شود، نقطه حباب گفته می‌شود. اگر فشار محیط کمتر از فشار نقطه حباب شود، کاویتاسیون گازی رخ می‌دهد. اگر فشار کمتر از فشار بخار سیال خالص شود، هر دو جزء گاز و بخار سیال در ناحیه کاویتا دیده می‌شوند [۴،۵].

در جدول (۱-۱) خواص آب در دمای ۳۰۰ کلوین و فشار یک اتمسفر آورده شده است.

جدول (۱-۱) خواص آب در شرایط استاندارد [۶]

مشخصات		در شرایط استاندارد (۳۰۰ کلوین)
فشار بخار (کیلوپاسکال)	p_v	۳/۵۳۱
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ρ_L	۹۹۷
	ρ_v	۰/۰۲۵۶
لزجت (نیوتون ثانیه بر متر مربع)	μ_L	۰/۰۰۰۸۵۵
	μ_v	۰/۰۰۰۰۰۹۰۹
کشش سطحی (نیوتون بر متر)	σ	۰/۰۷۱۷
آنتالپی (کیلو ژول بر کیلوگرم)	h_L	۱۱۱/۷
	h_v	۲۵۵۰/۱

کاویتاسیون از نظر نحوه پدیدار شدن حباب‌ها و رشد حباب‌ها با پدیده جوشش مشابهت دارد. ولی از لحاظ نحوه‌ی تشکیل با جوشش دارای تفاوت است. همان‌طور که در دیاگرام شکل ۱-۲ نشان داده شده است؛ کاویتاسیون، تغییر فاز توسط کاهش فشار در دمای تقریباً ثابت است، ولی جوشش در اثر افزایش دمای مایع در فشار ثابت رخ می‌دهد. علاوه بر آن در ایجاد کاویتاسیون، پدیده‌های دیگری مثل جریان لزج ناپایدار، سه بعدی و پیچیده که در اثر تغییر شکل‌های ناپایدار کاویتاها ایجاد می‌شود، نیز سهمیم هستند.



شکل ۱-۲ مقایسه پدیده کاویتاسیون و جوشش در دیاگرام فازی [۷]

در اغلب موارد (به خصوص برای آب سرد)، تنها مقدار ناچیزی گرما برای تشکیل حجم مشخصی از بخار نیاز است. بنابراین مایع محیطی حباب (که دارای منبع حرارتی برای تبخیر است) تغییر دمای بسیار ناچیزی را از خود نشان می‌دهد. در نتیجه مسیر فرایند کاویتاسیون در دیاگرام فازی عملاً همدماست. با این وجود در برخی موارد، گرمای مورد نیاز برای تبخیر به گونه‌ای است که تغییر فاز در دمای T' کمتر از دمای مایع محیطی T رخ می‌دهد. به اختلاف دمایی $T - T'$ در کاویتاسیون “تأخیر حرارتی”^۱ گفته می‌شود. این اختلاف دمایی، زمانی که دمای محیط به دمای بحرانی سیال نزدیک است بسیار بزرگتر می‌شود [۷].

^۱ Thermal Delay

شروع کاویتاسیون در اثر حضور حفره داخل مایع، پرشدن این حفره با بخار و در نهایت اشباع این حفره از بخار انجام می‌پذیرد. تعاریف بیان شده از کاویتاسیون سبب شکل‌گیری مفهومی با عنوان "فشار سرحد" می‌گردد بطوریکه در فشارهای زیر این فشار نیروی پیوستگی مولکول‌های مایع کاهش می‌یابد. تا آنجا که در نقاط شکل‌گیری حباب‌های اولیه بخار آب، این نیرو از بین می‌رود [۸].

بطور کلی می‌توان گفت که با دوفاز شدن جریان سیال در طی فرآیند کاویتاسیون، خصوصیتی رخ می‌نماید که شاید در جریان‌های تک فاز، آن را تنها بتوان با جریان تراکم‌پذیر مافوق صوت قابل مقایسه دانست. این مسئله بیشتر به علت تغییر ناگهانی چگالی در هردو پدیده است چراکه بواسطه این تغییر ناگهانی، سرعت صوت کاهش یافته و در نتیجه عدد ماخ افزایش می‌یابد. شباهت در تغییر نیروهای بر^۱ و پسای^۲ وارد بر جسم، همین‌طور کنترل ناپایداری‌ها نیز دیده می‌شود. از طرفی این دو جریان دارای تمایزهای بسیار زیادی نیز می‌باشند. از جمله نتایج وقوع کاویتاسیون عبارتند از:

۱. تخریب عملکردی: از نتایج این پدیده کاهش عملکرد وسایل مورد استفاده، افت شدید بازدهی و اختلال در جریان اصلی آن‌ها می‌گردد؛ از جمله باعث شکست محوری و پیچشی در ملخ کشتی‌ها و همچنین باعث کاهش هد فشاری در پمپ‌ها می‌گردد. قطعات ماشین را می‌ساید، بازده ماشین را کاهش می‌دهد (۱۱ الی ۳ درصد در نقطه طراحی).
۲. ارتعاش: بی‌ثباتی جریان و نوسانات فشار ناشی از کاویتاسیون منجر به ایجاد ارتعاش در ساختارهای مجاور می‌گردد، که باعث بروز خطری به شکل رزونانس با سایر بخش‌های مورد استفاده گردد.
۳. سروصدا: به دلیل جابجایی حجم بخار، پدیده کاویتاسیون همراه با سروصدا می‌باشد. هنگامی که حباب‌ها می‌ترکند یک موج شوک با سطح صدای بالا از آن ساطع می‌شود. البته بایستی ذکر شود که از این اثر برای تشخیص کاویتاسیون در پمپ‌ها و لوله‌ها استفاده می‌شود.

¹ Lift² DDrag

۴. فرسایش: در اثر پدیده کاویتاسیون، بعلت فشار و درجه حرارت بالا در نزدیکی سطح جامد،

فرسایش در مواد همراه با خوردگی^۱ و ساییدگی^۲ لجنی^۳ بوجود می آید.

همچنین فروپاشی حباب‌های شکل گرفته در کاویتاسیون موجب آسیب رسیدن به ماشین‌های

آبی می‌شود. شکل ۱-۳ خوردگی پره‌های کشتی بواسطه کاویتاسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ خوردگی پره‌های کشتی بواسطه کاویتاسیون

۱-۳- عدد کاویتاسیون

عدد بی بعد کاویتاسیون^۳ کمیت بیان‌کننده نسبت تأثیر عوامل موثر بر جریان کاویتاسیون است و

در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_v = \frac{P_r - P_v(T)}{\Delta P} \quad (1-1)$$

که در این رابطه P_r بیان‌کننده فشار در دور دست جریان و ΔP بیان‌کننده افت فشار جریان از

بینهایت تا حباب شکل گرفته است. این عدد بر مبنای نوع کاویتاسیون به صورت‌های مختلف بر مبنای

عوامل موثر قابل تعریف است. به عنوان نمونه در حالتی که یک هیدروفویل در عمق غوطه وری h در

کانال با سطح آزاد افقی با فشار بر سطح P_0 و سرعت جریان سیال V_∞ مد نظر قرار گیرد. این عدد به

صورت معادله (۱-۲) قابل بیان است [۹]:

¹ Corrosion

² Silt Erosion

³ Cavitation Number

$$\sigma_v = \frac{P_0 + \rho gh - P_v(T)}{0.5 \rho V_\infty^2} \quad (2-1)$$

کاویتاسیون ابتدایی: در این حالت عدد کاویتاسیون بین ۱/۶ و ۱/۱ است.

کاویتاسیون جزئی: در این حالت عدد کاویتاسیون بین ۱/۱ و ۰/۵ است.

کاویتاسیون کاملاً توسعه یافته یا سوپر کاویتاسیون: در این حالت عدد کاویتاسیون کمتر از ۰/۵ است.

به بیانی دیگر عدد کاویتاسیونی نشان دهنده مقاومت جریان سیال به وقوع پدیده کاویتاسیون می باشد.

هر چقدر مقدار این عدد کمتر باشد امکان تشکیل ناحیه کاواک بیشتر است و هر چقدر بیشتر باشد این

امکان کمتر می باشد. کاهش عدد کاویتاسیونی هم با کاهش فشار استاتیکی و هم با افزایش سرعت

امکان پذیر است و افزایش این عدد باعث جلوگیری از وقوع کاویتاسیون است. در این حالت ناحیه کاویته

به صورت شفاف و بسیار بزرگتر از جسم، مشخص می گردد. اولین بار، فردی به نام مارشال تولین^۱ نام

سوپر کاویتاسیون را بر آن گذاشت. در این نوع طول کاویته بزرگتر از جسم گردیده و حبابها در انتهای

کاویته (دور از سطح جسم) می ترکند.

در جدول (۲-۱) فشار بخار اشباع آب در دماهای مختلف آورده شده است.

جدول (۲-۱) فشار اشباع آب در دماهای مختلف [۶]

فشار بخار (پاسکال)	دما (سانتی گراد)
۸۷۲	۵
۱۲۳۰	۱۰
۲۳۴۰	۲۰
۴۲۵۰	۳۰
۷۳۸۰	۴۰
۱۲۳۰۰	۵۰
۲۰۰۰۰	۶۰
۳۱۲۰۰	۷۰
۴۷۴۰۰	۸۰
۷۰۱۰۰	۹۰
۱۰۱۳۰۰	۱۰۰

^۱ Marshall Tulin

۱-۴- فشار داخل حفره کاویتاسیون

به حفره ایجاد شده توسط کاویتاسیون، کاواک گفته می‌شود. داخل کاواک از مخلوطی از بخار آب و گازهای مختلف پر شده است که در شرایط جریان تغییر فاز نمی‌دهند. بنابراین فشار کاواک را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$P_C = P_v + P_g \quad (۳-۱)$$

در رابطه فوق P_v فشار جزئی بخار و P_g فشار جزئی گازهای مختلف می‌باشد. در بسیاری از تحلیل‌ها، فشار P_C در کل ناحیه کاواک و در طول زمان ثابت در نظر گرفته می‌شود. وجود گازهای میعان ناپذیر در کاواک به خاطر وجود گازهای حل شده در مایع و نفوذ آنها از دیواره کاواک می‌باشد. در تونل‌های آب عموماً بخشی برای جداسازی این گازها وجود دارد که اصطلاحاً به این عمل هوازدایی می‌گویند. در عمل، مقدار P_g در مقایسه با فشار بخار کوچک و قابل صرف نظر است.

روی مرز کاواک، تنش‌های برشی به سبب وجود اصطکاک بین دو فاز بخار و مایع وجود دارد ولی عموماً مقدار آن ناچیز است زیرا نسبت چگالی بخار داخل کاواک نسبت به چگالی مایع خیلی کوچک و اختلاف سرعت داخل و مرز کاواک اندک است و از آن صرف نظر می‌شود [۶].

۱-۵- چرخه تشکیل ابر کاویتاسیون ثابت و جت بازگشتی

تصویربرداری با دوربین‌های سرعت بالا از پدیده کاویتاسیون، فرضیات در نظر گرفته شده در فرایند تشکیل کاواک ثابت را مورد تردید قرار دادند. تصاویر نشان می‌دهند که کاواک ثابت پایدار نیست و چرخه‌ای منظم از تشکیل و جدایی کاواک در واقعیت مشاهده می‌شود. جزئیات تشکیل کاویتاسیون جزئی به کمک دوربین‌های سرعت بالا توسط کناپ^۱ [۱۰] در سال ۱۹۷۰ در تونل آب سرعت بالای دانشگاه کالیفرنیا مورد مطالعه دقیق قرار گرفت. در سال ۱۹۹۸ دولانگ^۲ و دوبروین^۳ [۱۱] آزمایشاتی در

^۱ Knapp

^۲ De Lange

^۳ De Bruin

تونل کاویتاسیون در دانشگاه دلفت^۱ انجام دادند و با تصویربرداری سرعت بالا جزئیات بیشتری از فرآیند تشکیل و جدایی کاواک به دست آمد. هر چه ابر حبابی ایجاد شده بزرگتر باشد، اغتشاشات بیشتری در جریان ایجاد می‌کند. مشاهدات دولانگ و دوبروین^[۱۱] نشان داد که اگر زاویه حمله جریان کم باشد یا عدد رینولدز کوچک باشد، مُمنتوم جت بازگشتی کم بوده و آثار لزجت و کشش سطحی بر رفتار مرز کاواک غالب می‌باشند. بنابراین جت بازگشتی به ابتدای ناحیه کاواک نمی‌رسد. اگر زاویه حمله بزرگتر شود ضخامت کاواک بیشتر شده و مُمنتوم جت بازگشتی کمتر می‌شود. با این وجود یک جت بازگشتی با سرعت کم شکل می‌گیرد که باعث می‌شود الگوی نامنظمی در جدایی کاواک و گردابه اطراف آن ایجاد شود.

مشاهدات تجربی دیگری توسط فرنس^۲ و هاتن^۳ [۱۲] در سال ۱۷۹۵ انجام شد. آزمایشات بر روی جریان دو بعدی سیال در یک کانال همگرا-واگرا به منظور مطالعه رفتار چرخه تشکیل و جدایی ابر کاواک انجام گرفت. همانند تشکیل جت بازگشتی بر روی هیدروفویل، مشاهدات نشان داد که جت بازگشتی از کناره دیواره به طرف بالادست جریان حرکت می‌کند. همچنین تشکیل جت بازگشتی تا زمانی که ابر کاواک به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسد به تأخیر می‌افتد. نکته دیگر اینکه بیشینه سرعت جت بازگشتی در این حالت کمتر از سرعت جریان آزاد گزارش شده است.

لی^۴ و همکاران [۱۳] در سال ۱۹۹۳ در تحقیقی دیگر بر روی هیدروفویل حرکت ابر حباب‌ها و نحوه تأثیر آن از جت بازگشتی و چرخه تشکیل و جدا شدن کاواک را بررسی کردند. مشاهدات آنها تأییدی بر این مطلب بود که در کاواک با ضخامت بیشتر مُمنتوم جت بازگشتی هم بیشتر شده و می‌تواند سبب

^۱ Delft

^۲ Furness

^۳ Hutton

^۴ Le

جدایی کاواک از سطح جسم شود. در نقطه مقابل آن کاواک با ضخامت کم است که مُمنتم جت بازگشتی هم کم بوده و توان لازم برای جدایی ابر کاواک را ندارد.

نکته جالب دیگری که از آزمایشات دولانگ و دوبروین^[۱۱] مشاهده شد ماهیت سه بعدی جت بازگشتی می باشد. هر چند مشاهدات آنها بر روی پروفیل دو بعدی انجام گرفت ولی بعد سوم بر روی سرعت جت بازگشتی تأثیر می گذاشت. با این وجود در محل بسته شدن کاواک می توان جریان را دو بعدی در نظر گرفت. در نتیجه اگر جریان سیال دو بعدی و توسعه یافته باشد، جت بازگشتی را نیز می توان دو بعدی در نظر گرفت. مطالعات تجربی زیادی توسط اسچون^[۱۴] در سال ۲۰۰۰ بر روی کاواک های گذرا و اتفاقات ناشی از آن و نحوه حرکت کاواک ها انجام گرفت. وجود جریان جت بازگشتی از پایین دست به بالادست جریان مشاهده شد و همچنین امکان وجود امواج شوک به واسطه افزایش محلی ضخامت جت بازگشتی مورد بررسی قرار گرفت.

مراحل تشکیل ابر کاواک و به وجود آمدن جت بازگشتی و جدا شدن ابر کاواک و تشکیل مجدد آن در شکل ۱-۴ به صورت نمادین بر روی یک هیدرو فویل نشان داده شده است. یک چرخه منظم شامل مراحل زیر می باشد:

۱. یک کاواک بلافاصله پس از جدایی کاواک قبلی از روی سطح شروع به رشد می کند.
۲. طول کاواک بیشتر می شود تا آنجا که به مقدار بیشینه خود می رسد و جت بازگشتی در محل بسته شدن کاواک شکل می گیرد.
۳. جت بازگشتی با سرعتی معادل سرعت بر روی مرز کاواک به سمت بالادست جریان حرکت می کند.
۴. جت بازگشتی به محل ابتدای تشکیل کاواک برخورد می کند و مرز کاواک را قطع می کند.

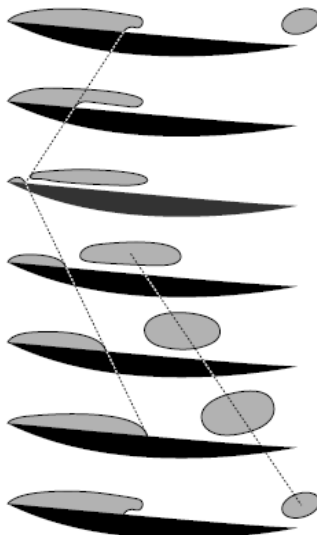
^۱ Schön

۵. کاواک از روی سطح جدا شده و ابری از حباب‌ها را تشکیل می‌دهد. وجود جت بازگشتی

در خلاف جهت جریان اصلی سبب ایجاد گردابه‌هایی در اطراف حباب می‌شود و همراه با

جریان اصلی به پایین دست جریان منتقل می‌شود.

۶. دوباره فرآیند تولید ابر کاواک روی سطح اتفاق می‌افتد و چرخه تکرار می‌شود.



شکل ۱-۴ چرخه تشکیل و جدایی کاواک [۶]

۱-۶- انواع کاویتاسیون

بر مبنای خصوصیات مختلف جریان و هندسه حاکم، مدل‌های مختلفی از کاویتاسیون قابل شکل-

گیری است. هر کدام از انواع مختلف کاویتاسیون دارای مشخصات متمایز کننده‌ای هستند. معمولاً پنج

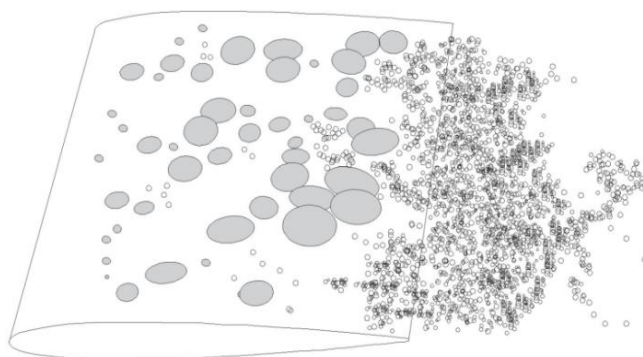
دسته عمده از انواع کاویتاسیون در نظر گرفته شده و معرفی می‌شوند. در ادامه هر یک از این نمونه‌ها به

اختصار مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۶-۱ کاویتاسیون متحرک یا حبابی^۱

^۱ Bubble Cavitation

در این حالت حباب‌های تشکیل شده بر روی سطح جسم به کمک جریان عبوری از روی جسم، از جسم جدا شده و به قسمت‌های پایین دست جریان انتقال می‌یابند. لازم به ذکر است که به صورت تجمع میکرو حباب‌ها پدید آمده و معمولاً در نواحی جریان جدا شده شکل می‌گیرد. به عنوان مثال در هیدروفویل‌هایی با زوایای حمله کوچک قابل مشاهده است. مقدار و هندسه حباب‌های بوجود آمده تا حدود زیادی به تعداد هسته‌های موجود در جریان ورودی وابسته است [۱۵]. کاویتاسیون متحرک بر روی یک نمونه هیدروفویل در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است.

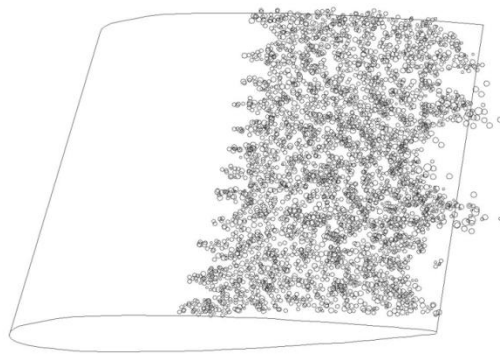


شکل ۱-۵ کاویتاسیون متحرک یا حبابی [۱۶]

۱-۶-۲- کاویتاسیون صفحه‌ای^۱

با کاهش عدد کاویتاسیون، شکل ناحیه کاویتی تغییر کرده و روند جریان وارد مرحله بعدی یا همان کاویتاسیون صفحه‌ای می‌گردد. این نوع کاویتاسیون به عنوان کاویتی ثابت (چسبیده) شناخته می‌شود. ماهیت این نوع کاویتاسیون در شکل ۱-۶ نشان داده شده است:

^۱ Surface Cavitation



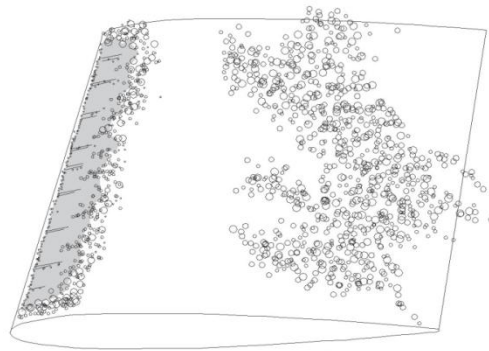
شکل ۱-۶ کاویتاسیون صفحه‌ای [۱۶]

در این حالت، اولین مرحله از مراحل کاویتاسیون چسبیده به بدنه که شکل صفحه‌ای دارد (کاویتاسیون صفحه‌ای) آغاز می‌شود. افزایش تعداد گردابه‌ها و میزان حباب درون آنها، همچنین ازدیاد طول گردابه‌ها نسبت به حالت کاویتاسیون اولیه از جمله مهم‌ترین خواص این نوع کاویتی می‌باشد. کاویتاسیون صفحه‌ای پایدار است و بدین ترتیب به نظر می‌رسد که جریان عبوری از روی جسم پایدار است. در این حالت سطح مشترک بین مایع و بخار شفاف و تا حدودی مشخص است.

۱-۶-۳ - کاویتاسیون ابری^۱

با کاهش بیشتر عدد کاویتاسیون، کاویتاسیون صفحه‌ای رشد کرده و با ناپایدارتر شدن کاویتی، کاویتاسیون ابری شکل می‌گیرد. این نوع کاویتاسیون بواسطه وارد شدن گردابه‌ها به داخل جریان شکل می‌گیرد. تغییرات و نوسانات انتهایی ناحیه کاویتی در این نوع کاویتاسیون بسیار زیاد بوده و به همین دلیل نیز دارای ارتعاش، صدا و خوردگی بیشتری نسبت به رژیم‌های دیگر کاویتاسیون است. به دلیل اینکه جدا شدن گردابه‌ها و وارد شدن آنها به داخل جریان به صورت نوسانی است لذا این نوع از کاویتاسیون خاصیت نوسانی دارد و با جدا شدن هر گردابه شرایط برای شکل‌گیری گردابه بعدی و پابرجا ماندن کاویتاسیون مهیا می‌شود (شکل ۱-۷).

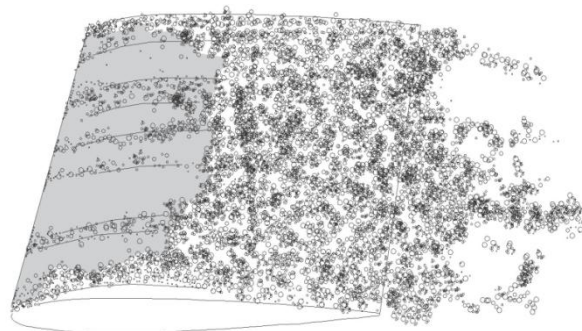
^۱ Cloud Cavitation



شکل ۱-۷ کاویتاسیون ابری [۱۶]

۱-۶-۴ - سوپر کاویتاسیون^۱

اگر کاویتاسیون صفحه‌ای رشد کند به طوریکه تمام سطح جسم را ابر کاویتیتی بپوشاند در آن صورت نوع دیگری از کاویتاسیون با نام سوپر کاویتاسیون شکل می‌گیرد. برای حفظ موقعیت و اندازه ابر کاویتیتی شکل گرفته می‌توان از تزریق هوا استفاده نمود.



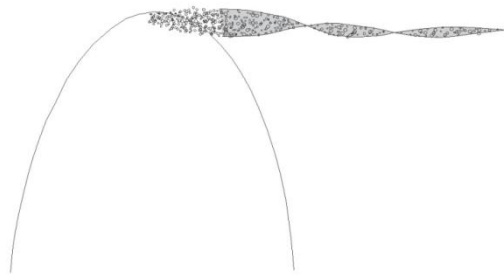
شکل ۱-۸ سوپر کاویتاسیون [۱۶]

۱-۶-۵ - کاویتاسیون گردابه‌ای^۲

^۱ Supercaviattion

^۲ Vortex Cavitation

نوعی از کاویتاسیون است که در نوک پره‌های چرخان بوجود می‌آید و به کاویتاسیون گردابه‌ای نوک معروف است. (شکل ۹-۱) در این حالت ناحیه کاویتی در هسته گردابه‌ها در ناحیه‌ای که بیشترین تنش برشی وجود دارد، شکل می‌گیرد [۱۶].



شکل ۹-۱ کاویتاسیون گردابه‌ای [۱۶]

۷-۱- کمیت‌های موثر در مدل‌سازی تغییر فاز در کاویتاسیون

هنگامی که فشار استاتیک مایع به زیر فشار بخار اشباع در دمای متناظر می‌رسد تغییر فاز از حالت مایع به بخار صورت می‌پذیرد و در جهت مقابل هنگامی که فشار بخار سیال به بالای فشار اشباع برسد چگالش شکل می‌گیرد. بنابراین به منظور مدل‌سازی پدیده کاویتاسیون بایستی تبخیر و چگالش را مدل‌سازی نمود. این دسته از مدل‌سازی‌ها از دسته مدل‌سازی‌های جریان دو فاز به شمار می‌روند، با این تفاوت که در این حالت بایستی تغییر فاز را نیز مدل‌سازی نمود که این امر سبب افزایش پیچیدگی مدل‌سازی می‌شود. مدل‌سازی تغییر فاز دارای پیچیدگی‌های متعددی از نحوه شکل‌گیری فاز ثانویه تا آثار متقابل سازه و سیال است. این امر در کنار پیچیدگی‌های هندسی موجود در مسائل کاربردی سبب گردیده است تا مدل‌سازی تغییر فاز در میان انواع مدل‌سازی‌ها موجود، جزو مدل‌سازی‌های سطح اول بشمار رود بطوریکه امروزه تلاش‌های گسترده‌ای برای افزایش دقت، سرعت و در عین حال سادگی این دسته از مدل‌سازی‌ها در حال انجام است. مصداق این تلاش‌ها مقالات علمی متعددی است که پیرامون این موضوع به چاپ می‌رسد. بر مبنای شرایط فیزیکی و هندسی حاکم بر شکل‌گیری تغییر فاز، کمیت‌های موثر بر تغییر فاز، از دیدگاه مدل‌سازی کاویتاسیون به صورت آنچه در ادامه می‌آید، قابل بیان است:

۱-۷-۱- خصوصیات جریان های کاویتاسیون

۱-۷-۱-۱- ماهیت غير دائم جریان های کاویتاسیون

جریان های کاویتاسیون ذاتاً وابسته به زمان هستند. اگرچه در مواردی همچون کاویتاسیون صفحه‌ای، به علت داشتن خاصیت پایداری آن، می‌توان از این تأثیر صرف‌نظر کرد اما در حالت کلی این تأثیرات قابل توجه و غیر قابل انکار است. دلیل این امر را می‌توان در جدا شدن گردابه‌های بخار از روی سطح جستجو کرد. هنگامی که یک گردابه بخار از روی سطح جدا می‌شود قسمت انتهایی ناحیه ابر کاواک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، که این امر در شکل‌گیری و گسترش کاویتاسیون در جلوی کاویتی نیز مؤثر می‌باشد.

۱-۷-۱-۲- حضور تغییر فاز در جریان های کاویتاسیون

شاید در نگاه اول مدل‌سازی کاویتاسیون هم مرتبه مدل‌سازی جریان‌های دو فاز سطح آزاد به نظر برسد. اما در عمل مدل‌سازی کاویتاسیون بسیار پیچیده‌تر از مدل‌سازی جریان‌های دو فاز سطح آزاد است. دلیل این امر را می‌توان حضور تغییر فاز بین فازها برشمرد. هنگامی که در یک جریان دو فاز تغییر فاز اتفاق می‌افتد دیگر نمی‌توان دیورژانس سرعت را برابر صفر در نظر گرفت. زیرا برای مدل‌سازی تغییر فازها عبارات منبعی به معادله انتقال کسر حجمی افزوده شده و بدین ترتیب مشتق مادی کسر حجمی دیگر برابر صفر نخواهد بود. از طرف دیگر مشتق مادی چگالی با مشتق مادی کسر حجمی متناسب است و همچنین دیورژانس سرعت با مشتق مادی چگالی مرتبط است. در نهایت این عوامل سبب می‌گردند تا دیورژانس سرعت مخالف صفر شود.

شکل‌گیری این موضوع سبب بوجود آمدن محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های زیادی در مدل‌سازی کاویتاسیون می‌شود. یکی از این مشکلات اضافه شدن عبارتی به سمت چپ معادله تصحیح فشار است. این عامل سبب کاهش پایداری حل می‌گردد.

۱-۷-۱-۳- اختلاف چگالی بسیار بالا بین مایع و بخار

بر مبنای قانون بقای جرم می‌توان بیان داشت که طی تغییر فاز، در معادله پیوستگی حاکم بر سیال همگن، هیچ عبارت تولید کننده جرمی وجود نخواهد داشت. حال اگر معادله پیوستگی برای هر یک از فازها نوشته شود به دلیل تغییر فاز، عبارتی به صورت منبع در معادله پیوستگی هر یک از فازها ظاهر می‌شود. عبارت منبع ظاهر شده در این حالت با چگالی فازها متناسب می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان به تأثیرات چگالی هر یک از فازها در مدل‌سازی تغییر فاز پی برد.

یکی از عوامل تأثیرگذار در مدل‌سازی جریان‌های چند فاز نسبت چگالی بین دو فاز است. در مدل‌سازی سطح آزاد این نسبت عموماً در حدود ۱۰۰۰ است زیرا در این حالت می‌توان چگالی آب برابر ۱۰۰۰ و چگالی هوا را تقریباً برابر ۱ در نظر گرفت. اما در مدل‌سازی کاویتاسیون این نسبت در حدود ۴۰۰۰۰ است زیرا چگالی بخار آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر 0.025 kg/m^3 است.

این اختلاف زیاد بین چگالی دو فاز سبب می‌گردد، تا به ناچار از روش‌هایی استفاده کنیم که پایداری بیشتری دارند. هنگامی که اختلاف چگالی بین دو فاز زیاد است، اولاً تفاوت بین جریان‌های جرمی سلول‌های مرزی بسیار زیاد است، ثانیاً عبارت منبع در نظر گرفته شده در معادله تصحیح فشار، ارتباطی مستقیم با چگالی سلول دارد. بدین ترتیب در سلول‌های مرزی این عبارت بین سلول‌های مجاور بر روی سطح مرزی دارای تفاوت بسیار زیاد است. این نکته زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که گرادیان فشار بین جریان‌هایی که تغییر فاز دارند با جریان‌های سطح آزاد مقایسه شود. در جریان‌هایی که دارای سطح آزاد هستند، گرادیان فشار هیدرواستاتیکی حضور دارد. در حالیکه در جریان‌های دو فاز به همراه تغییر فاز، با توجه به اینکه یک فاز در درون فاز دیگر شکل می‌گیرد؛ دیگر فشار هیدرواستاتیکی نقش غالب را ندارد و گرادیان فشار بر روی سطح مرزی در مقایسه با فشار مرکز سلول ناچیز است. بنابراین در سلول‌های مرزی از طرفی گرادیان فشار ناچیز است و از طرف دیگر عبارات منبع تفاوت نسبتاً زیادی با یکدیگر دارند. این دو عامل سبب می‌شود برای جلوگیری از واگرا شدن روند حل معادله فشار، از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر استفاده شود. استفاده از این روش‌ها به نوبه خود سبب افزایش هزینه محاسباتی، افزایش پیچیدگی‌های موجود، افزایش محدودیت و کاهش قابلیت تطابق است. به عنوان نمونه یکی از روش‌های

غلبه بر این اختلاف چگالی بالا استفاده از روش تراکم‌پذیری مصنوعی است. استفاده از این روش سبب می‌شود تا به ناچار، عبارات در فرم پایستار خود مورد استفاده قرار گیرند. اعمال محدودیت‌هایی از این دست سبب افزایش پیچیدگی‌های حاکم بر مدل‌سازی جریان‌های کاویتاسیون گردیده است.

۱-۷-۴- ناپایداری و مقادیر بسیار بالای کمیت‌های توصیفی سیال

در جریان‌های کاویتاسیونی جداری کاویتی از یک طرف در معرض فشار ثابت عملاً برابر فشار بخار قرار دارد. بر این اساس در اثر افزایش یا کاهش فشار بیرونی، سریعاً تغییر شکل و اندازه داده و جداره بین مایع و بخار در چنین جریان‌هایی عموماً بسیار ناپایدار است. ناپایداری فصل مشترک بخار و سیال منجر به انفجار یا فروپاشی حباب‌ها یا کاویتی شده که با تغییرات بزرگی در اندازه و سرعت و فشار همراه است. این تغییرات در زمان بسیار کوتاهی اتفاق افتاده، تحلیل ابعادی، تحلیل عددی و یا آزمایشگاهی کاویتاسیون را بسیار مشکل می‌کند.

۱-۷-۵- اختلاف فشار تا فشار بخار اشباع

فرض کنید فشار سیال بیشتر از فشار بخار اشباع باشد بدین ترتیب سیال در حالت مایع قرار دارد. در این حالت با کم شدن فشار سیال، عدد کاویتاسیون حاکم بر جریان نیز کاهش می‌یابد، احتمال شکل‌گیری فاز ثانویه (بخار) افزایش می‌یابد. در حالت دوم فرض کنید که فشار سیال زیر فشار بخار اشباع باشد که در این صورت سیال در حالت بخار قرار دارد. با افزایش فشار سیال، عدد کاویتاسیون افزایش می‌یابد و بدین ترتیب احتمال تشکیل فاز اولیه یعنی مایع افزایش می‌یابد. تأثیرات مقدار فشار در شکل‌گیری هر یک از فازها به صورت کاملاً ملموس در روابط موجود قابل بررسی است.

۱-۷-۶- اثر تراکم‌پذیری

توجه به این نکته که سرعت صوت در یک جریان دوفاز، نسبت به جریان‌های تک فاز چندان قابل مقایسه نبوده و از این رو پدیده‌های مرتبط با تراکم‌پذیری نیز دارای تفاوت‌های عمده‌ای با حالت تک فاز هستند، بررسی شرایط استفاده از مدل‌های تراکم‌پذیر را روی مطالعات کاویتاسیون، امری اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. اگرچه عمده‌ترین تحقیقات انجام گرفته تاکنون، تأثیر تراکم‌پذیری روی کاویتاسیون در شرایط

معمول را ناچیز دانسته‌اند، اما از آنجا که سرعت صوت در مرز مشترک دو فاز کاهش چشمگیری می‌یابد، مدل‌سازی تراکم‌پذیری و بررسی آن می‌تواند باعث افزایش دقت بیشتر در نتایج (حتی در شرایطی که سرعت‌های جریان بسیار کمتر از سرعت صوت است). شود. روش پیش‌شرط چندفازی^۱ توسط آهو^۲ و دیگران در حالت تراکم‌پذیر استفاده شده است. همین طور سنوکاک^۳ و شی^۴ روش پایه فشار^۵ را برای حالت تراکم‌پذیر گسترش داده‌اند. در هر دو دسته تحقیقات انجام گرفته، مدل‌های اعمال شده بر اساس تغییر چگالی به صورت تابعی از فشار (و نه دما) بوده‌است. لذا از این مدل‌ها به مدل‌های دما ثابت تراکم‌پذیر^۶ یاد می‌شود. شکل ۱-۱۵ منحنی سرعت صوت بر اساس کیفیت ترمودینامیکی در منطقه دو فازی آب در دمای 25°C را نمایش می‌دهد. بر اساس بسط تعاریف مربوط به سرعت صوت در ترمودینامیک اثبات می‌شود که در منطقه دو فازی، جریان با کاهش سرعت صوت مواجه است و در نتیجه عدد ماخ محلی که در این ناحیه تعریف می‌شود افزایش چشمگیری می‌یابد. از اینرو بررسی تراکم‌پذیری در ناحیه بین دو فاز مهم می‌نماید. اما نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با اطلاعات آزمایشگاهی، این تأثیر را مگر در شرایط خاص (مانند فشنگ‌های غواصی)، قابل چشم‌پوشی دانسته‌اند [۹].

¹ multiphase preconditioning algorithm

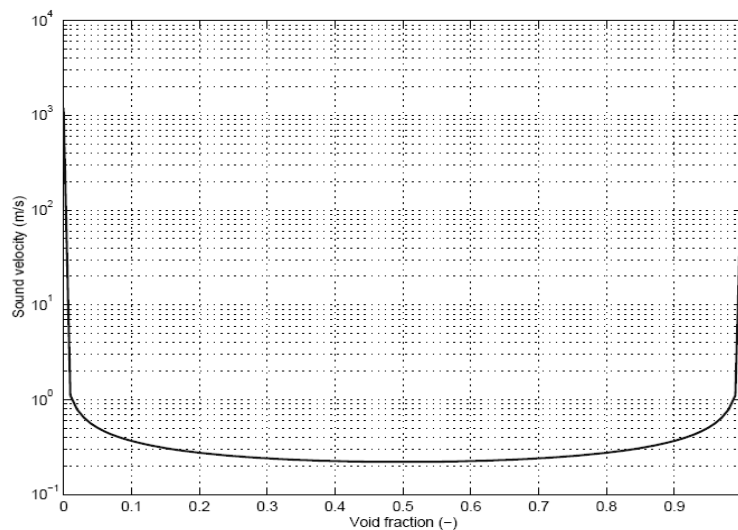
² Ahuja

³ Senocak

⁴ Shyy

⁵ pressure based algorithm

⁶ isothermal compressible model



شکل ۱-۱۰ منحنی سرعت صوت بر اساس کیفیت ترمودینامیکی [۱۷]

۷-۱-۷-۱- اثر آشفتگی جریان^۱

یکی از مباحث عمده در مدل سازی عددی، تأثیر آشفتگی جریان در نتایج حل است. اکثر پدیده‌های سیالاتی دارای درجاتی از آشفتگی می‌باشند، اما در بسیاری از موارد نیز می‌توان از فرض جریان لایه‌ای^۲ سود جست. اگرچه یک جریان دوفاز در مقایسه با جریان‌های تک فاز استعداد بیشتری در ایجاد شرایط آشفته دارد، اما هنوز یک تئوری یا روش مدل سازی مناسب برای چنین جریان‌هایی ارائه نشده‌است. تقابل دو فاز در مرز مشترک آنها با تولید نوعی آشفتگی و ایجاد گردابه‌های مرکب از هر دو فاز منجر می‌شود. همچنین مرز مشترک که به مانند یک دیواره انعطاف پذیر برای هر فاز عمل می‌کند رفتار کلی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نرخ تبدیل دو فاز به یکدیگر، طی فرآیندهایی از قبیل چگالش، جوشش، میعان، کاویتاسیون نیز در کاهش یا افزایش آشفتگی هر فاز بی تأثیر نیست. از یک منظر وجود فاز دوم در یک جریان، خود به تنهایی تداعی کننده یک نوع آشفتگی است. از این رو به نظر می‌رسد که برای تعریف دقیق آشفتگی در جریان دو فاز، مفاهیم دیگری علاوه بر انرژی جنبشی اغتشاش^۳ و نرخ

^۱ Turbulence

^۲ Laminar

^۳ Turbulent kinetic energy

استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش^۱ مورد نیاز است. حداقل اینکه در جریان چندفاز این مفاهیم به تعریف های دقیق تری نیاز دارند.

با نگاهی دقیق به سازوکار و عوامل مؤثر بر کاویتاسیون و شرایط ایجاد آن، می توان مواردی را که مفهوم آشفستگی قابل چشم پوشی بوده یا برعکس تأثیر بسزایی در جریان گذارده است را تقریباً مشخص نمود. در مورد جریان های خارجی، مانند جریان روی پرتابه ها، به علت کاهش شدید چگالی در فاز بخار (به عنوان نمونه، چگالی بخار آب تقریباً ۱۰۰۰ برابر کوچکتر از چگالی آب مایع در همان دماست)، عدد رینولدز بخار (که معیاری برای تعیین آشفستگی جریان است)، کاهش چشمگیری می یابد. از اینرو هنگامی که جریان بخار در شرایط کاویتاسیون بررسی می شود، نیازی به مدل سازی آشفستگی در این فاز نیست. از طرفی همین مسئله در شرایطی که سوپر کاویتاسیون حکم فرما باشد نیز در تمام جریان (هر دو فاز) برقرار است. مدل سازی های انجام گرفته در کاویتاسیون جزئی روی برخی پرتابه ها و کاویتاتورهای ساده و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی، عدم ضرورت بررسی اغتشاش در اینگونه موارد را نشان داده است.

در مورد جریان های داخلی، مانند کاویتاسیون داخل انواع پمپ ها، نازل ها و شیرآلات، به علت اهمیت تنش های برشی، وجود لایه مرزی و تأثیر بسیار زیاد لزجت در جریان، در اغلب موارد بایستی با دقت بیشتری با آشفستگی جریان برخورد شود. البته در اینجا نیز می توان از بررسی آشفستگی در جریان های بسیار لزج با عدد رینولدز پایین به علت لایه ای بودن ماهیت جریان، دوری کرد. نتایج بدست آمده در مورد شیرهای هیدرولیکی با سیالاتی مانند روغن های صنعتی و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، گواهی بر این مدعاست.

۱-۷-۲- عوامل مؤثر بر پدیده کاویتاسیون

از نظر آزمایشگاهی دو مشکل در مورد اندازه گیری فشار پدید می آید. اولین مشکل فشارسنج است که برای جلوگیری از اختلال در جریان اصلی بایستی در دیواره نصب شود، اطلاعات درستی در مورد فشار

^۱Dissipation rate

بدست نمی‌دهند. مشکل دوم از نظر فنی وجود دارد و آن این که فشارها در پدیده کاویتاسیون در حدود هزاران مگاپاسکال یا حتی گیگاپاسکال بایستی اندازه‌گیری شوند، در نتیجه مقاومت مکانیکی سنسورهای فشار به مسئله‌ای مهم تبدیل می‌شود.

مسئله‌ی دیگر در پدیده کاویتاسیون، فروپاشی حباب‌های با اندازه بسیار کوچک (کمتر از ۱ mm) و عمر کوتاه (در حدود کمتر از میکروثانیه) می‌باشد. این بدان معنی است که دوربین بایستی دارای رزولوشن^۱ خیلی بالایی باشد و از طرفی سرعت دیافراگم^۲ کوچکی داشته باشد. این دو شرط از نظر تکنیکی با هم سازگاری ندارند.

۱-۲-۷-۱- اثر مقیاس^۳

براساس قوانین تحلیل ابعادی، انتظار می‌رود که در مدل‌های هندسی مشابه، شروع و گسترش کاویتاسیون تنها به عدد کاویتاسیون بستگی داشته باشد. ولی در اکثر موارد اثر مقیاس موجب می‌شود که نتایج تجربی حاصل از مدل با نمونه اصلی تفاوت داشته باشند. زیرا کاویتاسیون یک فرایند فیزیکی پیچیده شامل تغییر فاز همراه با انتقال گرما و جرم است و گسترش و توسعه کاویتاسیون، بستگی به میزان هسته‌های اولیه شکل‌گیری کابیتی در حجم مایع دارد.

۱-۲-۷-۲- اثر ناخالصی‌های جریان و خصوصیات سطح

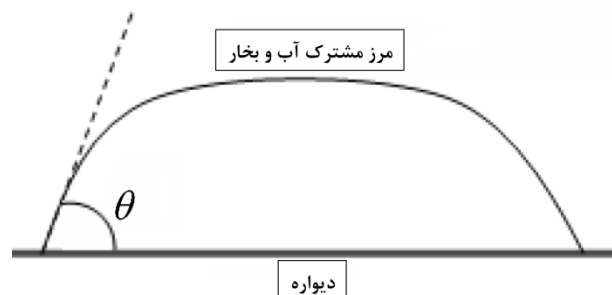
از بیش از ۲۴۰ سال پیش تحقیقات متعددی در مورد کاویتاسیون انجام شده است. برای بررسی پایداری آب مایع در برابر تغییرات فشار روش‌های متعددی به کار گرفته شده‌اند. پراکندگی نتایج بدست آمده نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه دیواره‌ها و ناخالصی‌های موجود در آب بر روی شکل‌گیری کاویتاسیون است. برای مایع همگن در نظر گرفتن شکل‌گیری حباب درون آن، بایستی خلوص سیال بسیار بالا باشد.

^۱ Resolution

^۲ Rise Time

^۳ Scale Effect

هنگامی که یک آلیاژ فلزی تحت کشش قرار می‌گیرد (بطوریکه از محدوده الاستیک عبور کرده و وارد محدوده پلاستیک شود) ترک‌هایی در قطعه آلیاژی شکل می‌گیرد و با افزایش تمرکز تنش این ترک‌ها در قطعه رشد پیدا می‌کند بطوریکه در نهایت سبب شکستن قطعه می‌شود. در بررسی دلایل آغاز و گسترش این ترک‌ها بیان می‌شود که به دلیل حضور ناخالصی‌هایی در قطعه آلیاژی، هنگامی که قطعه تحت کشش قرار می‌گیرد این ناخالصی‌ها همانند نقاط ضعف قطعه آلیاژی عمل می‌کنند به طوریکه دلیل اصلی شکل‌گیری ترک در چنین قطعاتی حضور این ناخالصی‌ها است. با برقرای آنالوژی بین آلیاژ فلزی و جریان سیال و همچنین ایجاد ارتباط بین فشار و کشش وارد بر قطعه می‌توان بیان داشت که؛ هنگامی که فشار سیال کاهش می‌یابد ناخالصی‌های موجود در سیال و همچنین ناخالصی‌ها و ناهمواری‌های موجود بر روی سطح همانند مراکز ضعف سیال عمل می‌کنند، بطوریکه به شکل‌گیری فاز ثانویه کمک می‌کنند. به این مراکز که همانند هسته‌های شکل دهنده فاز ثانویه عمل می‌کنند، "هسته"^۱ گفته می‌شود. در مقابل تأثیر این کمیت در مواردی نظیر ضرایب هندسی در نظر گرفته می‌شود. از طرفی کمیتی نظیر چسبندگی سطح نیز در گسترش و شکل‌گیری حباب‌ها بر روی سطح تأثیرگذار است. بدین منظور در بررسی‌هایی که در آنها تأثیرات دیواره مورد بررسی قرار می‌گیرد کمیتی با عنوان زاویه چسبندگی دیواره^۲ معرفی می‌شود. این زاویه در تناسب یا تعاریف مربوط به کشش سطحی عمل می‌کند. در شکل زیر می‌توان به نحوه تعیین این زاویه و موقعیت آن در شکل‌گیری فاز ثانویه پی‌برد [۹].

¹ Nuclei² Wall Adhesion Angel

شکل ۱-۱۱ نحوه تعیین زاویه چسبندگی دیوار و موقعیت آن در شکل‌گیری فاز ثانویه [۹]

۱-۷-۲-۳- اثر هندسه

علیرغم تمام تلاش‌هایی که تاکنون برای مدل‌سازی کاویتاسیون صورت گرفته است هنوز مطالب زیادی پیرامون ماهیت این پدیده به صورت علامت سؤال باقی مانده است. در این میان یکی از مواردی که تأثیرات آن بیش از موارد دیگر تعجب برانگیز است تأثیرات هندسه جریان است. این مسئله به نوبه خود شامل مواردی از جمله اندازه، تأثیرات هندسه اجسام داخل جریان است. در گذشته از تأثیر این کمیت مهم در شکل‌گیری کاویتاسیون نظیر مدل "ریلی-پلست" در مدل‌سازی شعاع حباب صرف‌نظر می‌گردید. اما امروزه برای افزایش دقت در مدل‌سازی کاویتاسیون، کمیت‌های با عنوان ضرایب هندسی (یا ضرایب تجربی) در نظر گرفته می‌شود تا تأثیرات هندسه جریان را به روابط موجود منتقل نمایند. این کمیت‌ها عموماً به کمک آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه‌ها و به کمک تونل‌های کاویتاسیون تعیین می‌شوند. در این میان برای راحتی کار مدل‌سازی، جریان‌هایی که دارای ماهیت هندسی یکسان هستند از ضرایب هندسی یکسان یا نزدیک به هم استفاده می‌کنند. بدین ترتیب با تعیین ضریب هندسی برای یک نمونه جریان، دیگر نیازی به محاسبه ضریب هندسی برای جریان‌های مشابه نیست.

۱-۷-۲-۴- تأثیرات دما

در حالت اشباع برای تعیین حالت سیال احتیاج به دو خصوصیت ترمودینامیکی است چرا که در حال اشباع دما و فشار متناظر با یکدیگر، ثابت باقی می‌مانند. به عبارت دیگر به ازای هر فشار اشباع تنها یک دمای اشباع وجود دارد. از طرفی پیشتر بیان گردید که فشار بخار اشباع از کمیت‌های تأثیرگذار در مدل‌سازی تغییر فاز است. به کمک مطالب بیان شده می‌توان به تأثیرات دما بر تبدیل شدن فازها به یکدیگر پی برد. از جمله کمیت‌های موثر بر تغییرات دما می‌توان به گرمای نهان تبخیر و گرمای نهان میعان اشاره کرد. با توجه به اینکه مقدار گرمای نهان ناشی از تغییر فاز ناچیز است و هیچ منبع حرارتی دیگری در جریان‌های کاویتاسیون وجود ندارد، جریان‌های کاویتاسیون را با دقت قابل قبولی می‌توان

دما ثابت برشمرده. در بسیاری از مدل‌های مورد استفاده با توجه به وابستگی بین دما و فشار اشباع، تأثیرات دمای اشباع به کمک فشار اشباع به مدل‌سازی منتقل می‌گردد.

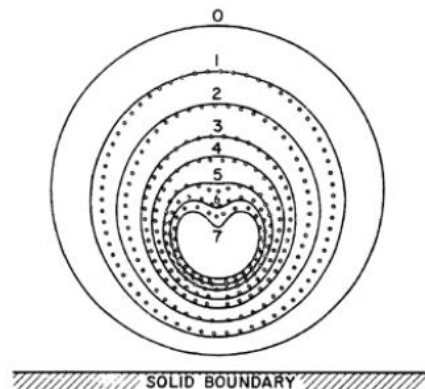
۱-۸- خوردگی کاویتاسیون

پدیده کاویتاسیون به علت سازوکار پیچیده خود در ردیف یکی از انواع جریان‌های دوفازی با عملکرد بسیار متنوع قرار می‌گیرد. در حالی که استفاده از کاویتاسیون در فناوری امروز جایگاه ویژه‌ای دارد، اما باید از مکانیزم‌های مخرب آن نیز بر حذر بود. خوردگی حاصل از کاویتاسیون ناخواسته، باعث تغییر شکل، ایجاد سروصدا و ناپایداری دستگاه‌ها می‌گردد. می‌توان تخریب حاصل از چگالش کاویتاسیون را به دو قسمت عمده تقسیم کرد. اولین عامل را می‌توان مربوط به این مسئله دانست که حباب کاویتا پس از ایجاد در ناحیه کم فشار جریان، وارد ناحیه پرفشار شده و تحت چگالش قرار می‌گیرد. اما در طی این چگالش، پیوسته در حال تغییر شکل خواهد بود. ناد^۱، الیس^۲ و بنجامین^۳ [۳۰،۳۱] نشان دادند که در نزدیکی مرز جسم، حباب شکل کروی خود را از دست داده و بر اثر توزیع نامتقارن فشار، یک میکروجت پرشتاب، دیواره حباب را شکافته و وارد آن می‌گردد. این پدیده در شکل ۱-۱۷ نمایش داده شده‌است. این میکروجت با سرعت زیادی به دیواره مقابل (دیواره زیرین در شکل ۱-۱۲) حباب برخورد کرده و یک موج شوک ایجاد می‌شود. این موج شوک، عمود بر مرز جسم حرکت کرده و به آن برخورد می‌کند. به این ترتیب، توالی این موج شوک در اثر نابودی حباب‌های مختلف، باعث صدمه به دیواره جسم و در نهایت خوردگی آن می‌گردد.

^۱ Naude

^۲ Ellis

^۳ Benjamin



شکل ۱-۱۲ چگالش حباب کاویتاسیون در نزدیکی دیواره [۷]

این تأثیر در شرایطی که اندازه حباب بزرگتر شود، بیشتر خواهد بود. زیرا در این صورت یک جت بازگشتی قوی نیز پس از چگالش حباب به وقوع می‌پیوندد که فرسایش دیواره جسم را افزایش می‌دهد. عامل دوم تخریب سطوح بلافاصله پس از چگالش اولیه حباب، (مطابق آنچه در بالا توضیح داده شد) آغاز می‌شود. اولین بار این پدیده توسط پلسه^۱ [۳۲] و هیکلینگ^۲ [۳۳] گزارش شده‌است. در این مرحله، فاز بخار باقی‌مانده به توده حباب‌هایی با کمترین شعاع تعادلی ممکن در شرایط ترمودینامیکی جریان، تبدیل می‌شود. بر اثر این تبدیل یک موج شوک ثانویه در نزدیکی مرز جسم شکل می‌گیرد که خود باعث تخریب و فرسایش بیشتر سطح جسم می‌گردد [۷]. در ادامه در شکل ۱-۱۳ یک نمونه تخریب توسط کاویتاسیون بعلت خوردگی ناشی از این پدیده در پره‌های خروجی یک توربین فرانسس به نمایش گذارده شده است:

^۱ Plesset

^۲ Hickling



شکل ۱-۱۳ خوردگی در اثر فروپاشی حباب‌های شکل گرفته در پره‌های خروجی یک توربین فرانسس [۱]

۱-۹- روش‌های کاهش کاویتاسیون در صنعت

در این بخش به برخی از شرایط و راهکارهای کاهش پدیده کاویتاسیون و همچنین کاهش آثار مخرب آن برای استفاده در صنعت اشاره می‌شود:

۱. **به حداقل رساندن تغییرات فشار:** تغییرات خیلی زیاد فشار در جریان سیال سبب ایجاد

حباب‌های گازی می‌شوند که در نهایت منجر به مشاهده کاویتاسیون می‌گردد. برای به حداقل رساندن اختلاف فشار، بایستی قسمتهایی که در معرض مستقیم جریان سیال قرار دارند تا حد امکان ساده گردند. بدین منظور می‌توان با از بین بردن برآمدگی‌ها، سطوح نامنظم، ناپیوستگی‌ها و گوشه‌های تیز در هندسه مورد نظر، احتمال رخ دادن این پدیده را کاهش داد.

۲. **افزایش فشار بخار:** دمای جوش یک مایع با فشار آن افزایش می‌یابد. همان‌طور که فشار سیال عامل افزایش می‌یابد؛ توانایی جریان برای تشکیل حباب گاز و در نتیجه ایجاد کاویتاسیون کاهش می‌یابد.

۳. **بهبود صافی سطح:** سطح صاف بخصوص بر روی قسمت انتهایی هندسه باعث پایین آمدن احتمال ایجاد حباب‌های گاز و کاویتاسیون می‌گردد.

۴. **افزایش سفتی^۱ هندسه:** افزایش سفتی قسمتی از جسم که در معرض جریان سیال قرار

دارد، ممکن است باعث کاهش احتمال مشاهده کاویتاسیون گردد. زیرا زمانیکه سفتی قسمتی از هندسه زیاد شود، فرکانس ارتعاش آن افزایش و دامنه ارتعاش آن کاهش می‌یابد در برخی موارد این روش می‌تواند ایجاد حباب‌های گاز در مایع را به حداقل برساند.

۵. **افزایش مقاومت مواد در برابر خوردگی:** از آنجا که یکی از آثار کاویتاسیون، فرسایش و

خوردگی می‌باشد؛ استفاده از مواد با مقاومت بیشتر برابر خوردگی می‌تواند در برخی از موارد صنعتی مفید باشد.

۶. **پوشش:** استفاده از پوشش‌های سطح نیز یکی از مواردی است که در به حداقل رساندن

آسیب‌های ناشی از کاویتاسیون در صنعت موفق می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از آن در برخی اجزای هیدروتوربین‌ها^۲ و یا سکان کشتی‌ها اشاره کرد.

۷. **حفاظت کاتدیک:** استفاده از حفاظت کاتدی کمک می‌کند تا با تشکیل حباب‌های

هیدروژن در سطح جسم، قسمت در معرض کاویتاسیون مورد محافظت قرار گیرد. اعتقاد بر این است که گاز هیدروژن تأثیر مخرب ناشی از فروپاشی حباب کاویتاسیون را کاهش می‌دهد.

۱-۱۰- روش‌های بررسی کاویتاسیون

در این بخش سعی شده تا سه روش عمده در بررسی پدیده کاویتاسیون به طور مجزا ارائه گردد. همانند اکثر پدیده‌های فیزیکی، روش‌هایی که در تحقیقات کاویتاسیون به کار برده شده است، عبارتند از روش‌های آزمایشگاهی، نظریه‌پردازی به همراه حل دقیق (حل تحلیلی) و نهایتاً بررسی عددی فرآیند کاویتاسیون. سعی شده روند پژوهش را به طور مجزا در هریک از روش‌های تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی بیان کرده و سپس اهمیت هر پژوهش و رابطه آن با دیگر زمینه‌ها را بیان نماییم. در سال ۱۹۶۷ گارسیا

¹ Stiffness

² Hydroturbin

^۱ و اهمیت^۲ به بررسی تخریب و خوردگی کاویتاسیون بوسیله خواص مکانیکی و سیال پرداختند. در سال ۱۹۹۰ ریچمن^۳ به مطالعه بررسی وابستگی رفتار خوردگی کاویتاسیون با خواص مکانیکی مواد پرداخت. در سال ۱۹۹۳ هاموند^۴، و همکارانش به مطالعه موضوع کارایی خوردگی کاویتاسیون بر روی کامپوزیت-های تقویت شده فیبری پرداختند. در سال ۱۹۹۷ جفری و همکارانش بر روی موضوع، کاویتاسیون و مقاومت خوردگی در پوشش‌های اسپری گرمایی متمرکز شدند. در سال ۲۰۰۱ سویاما^۵ و همکارانش یک پارامتر جدید را برای پیش بینی خوردگی کاویتاسیون معرفی کردند. در سال ۲۰۰۳، اسکالر^۶ و همکارانش به مطالعه بر روی آزمایشات خوردگی کاویتاسیون بر روی هیدروفویل دو بعدی با استفاده از موانع نصب شده ی صفحه ای پرداختند. در ادامه کارها، و در سال ۲۰۰۴ سان^۷ و همکارانش آزمایش خوردگی کاویتاسیون توسط جت آب را مطرح کردند. [۲۰]

۱-۱۰-۱- تحقیقات آزمایشگاهی و تجربی

از آنجا که کاویتاسیون پدیده‌ای بسیار گذرا و سریع می‌باشد، برای بررسی تجربی پدیده، تجهیزات بسیار دقیق و با سرعت بالا (به عنوان مثال دوربین‌هایی با قابلیت ضبط ۴۰۰۰۰ تصویر در ثانیه) مورد نیاز می‌باشد. این محدودیت، بررسی تجربی نحوه تشکیل، رشد و نابودی کاویتا را دشوار ساخته‌است. از همین رو، نظریه‌هایی که در مورد نحوه و محل پیدایش کاویتاسیون ارائه گردیده، با پیشرفت ابزارآلات اندازه‌گیری و در طی سال‌ها دچار تغییرات اساسی شده‌است.

واگنر^۸ در سال ۱۹۳۲ بر روی ورود اجسام به آب مطالعاتی انجام داد. کارهای او به پیشرفت تحقیقات سوپر کاویتاسیون کمک زیادی نمود. اولین بار کاهش نیرویی پسا، توسط تزریق گاز به لایه مرزی توسط

¹ Garcia

² Hammitt

³ Richman

⁴ Hammond

⁵ Soyama

⁶ Escaler

⁷ sain

⁸ Wagner

فبیاوسکی^۱ و لوستیانسکی^۲ در سال ۱۹۴۲ انجام گرفت. با تحقیق روی حباب‌های سوپرکاویته در موتور کشتی‌ها، پمپ‌ها و هیدروفرویل‌ها توسط پوسدونین^۳ در سال ۱۹۴۴ و تولین^۴ در سال ۱۹۵۵ پیشرفت قابل ملاحظه‌ای، صورت پذیرفت. ریچارد^۵ در سال ۱۹۴۶ بر روی ورود اجسام به آب تحقیقاتی انجام داد. در اواخر دهه ۹۰ تحقیقات زیادی روی دینامیک وسایل سوپرکاویته انجام گردید که از آن جمله می‌توان به کارهای پراتاپ^۶ و کولکارنی^۷ همچنین راند^۸ و همکاران در زمینه مطالعه روی دینامیک اژدرهای سوپرکاویته غیرهدایتی اشاره نمود [۱۸]. معمولاً اندازه‌گیری سرعت در ناحیه کاویته با روش‌هایی مانند *Laser Doppler Velocimetry (LDV)* و یا *Particle Image Velocimetry (PIV)* صورت می‌گیرد. علاوه بر ابزارآلات فوق، برای بررسی کاویتاسیون بایستی از تونل آب^۹ استفاده گردد. قدمت اولین تونل آب به بیش از یکصد سال (۱۸۹۵ میلادی- انگستان) می‌رسد و اولین آزمایش ملخ کشتی‌ها در این تونل انجام پذیرفته است.

در صورتیکه بررسی جریان کاویتاسیون نزدیک به سطح آزاد مد نظر باشد از محیط دیگری به نام استخر دینامیکی^{۱۰} استفاده می‌شود اگرچه از این محیط می‌توان برای بررسی کاویتاسیون در شرایط عمومی نیز سود جست. در این استخرها، آب ساکن است و مدل در داخل استخر با استفاده از موتوری که روی جسم تعبیه شده است حرکت می‌کند. شکل (۱-۱۴) نمونه یک استخر دینامیکی بزرگ متعلق به دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا را نمایش می‌دهد. یکی از عمده‌ترین مزایای استفاده از استخرهای دینامیکی در مقایسه با تونل‌های آب، عدم نیاز به تجهیزات نگهدارنده مدل است. این مهم باعث کاهش خطای اندازه‌گیری نسبت به حالت طبیعی حرکت جسم در واقعیت می‌شود. از طرفی استفاده از این استخرها

¹ Febyavsky

² Lostyansky

³ Posdunin

⁴ Tulin

⁵ Reichardt

⁶ Pratap

⁷ Kulkarani

⁸ Rand

⁹ Cavitation tunnel

¹⁰ Towing tank

دارای معایبی نسبت به تونل آب است. از جمله می‌توان به ناپایداری مدل اشاره کرد. زیرا ممکن است مدل از مسیر حرکت خود خارج شده یا با خطا این مسیر را دنبال کند. از طرفی تأمین سرعت ثابت برای جسم در طی مسیر از دیگر مشکلات این سیستم است.



شکل ۱-۱۴ یک نمونه استخر دینامیکی (دانشگاه پنسیلوانیا [۱]).

برای پیش‌بینی میزان خسارت ناشی از خوردگی کاویتاسیون، روش‌های تجربی در صنعت بسیار متعدد و گسترده استفاده می‌شوند. درکل، هدف از رویکرد تجربی، روش آینده‌نگری در حال توسعه می‌باشد که شامل انجام یک یا تعدادی از مراحل زیر است:

- اولین گام معمولاً شامل انجام آزمایشات هیدرودینامیکی بر روی یک مدل، به‌منظور شناسایی شرایط عملیاتی برای حالتی است که خوردگی کاویتاسیون اتفاق می‌افتد.
- مرحله دوم شامل انجام تست‌های فرسایش بر روی مواد با استفاده از یک دستگاه خوردگی آزمایشگاهی می‌باشد. هدف اصلی این است تا مواد بر اساس مقاومت‌شان در برابر خوردگی ناشی از کاویتاسیون طبقه‌بندی شوند و تا آنجا که امکان دارد وابستگی مواد به کمیت‌هایی از قبیل تنش تسلیم ماده، مقاومت کششی نهایی، انرژی کرنش بررسی شود. این امر به‌منظور سرعت بخشیدن به انجام تست‌های آزمایشگاهی خوردگی در یک حجم وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی و در مدت زمان کوتاه می‌باشد.

- آخرین مرحله، تقدم و تأخر داده‌های ناشی از خوردگی از مدل به نمونه اولیه که این نیازمند دانستن دانش قوانین حاکم بر پدیده می‌باشد. در واقع، روش‌های مختلف تجربی در طول سال‌ها همراه با تجربه صنعتی در ماشین‌های نمونه اولیه توسعه یافته‌اند که این به طراحان اجازه می‌دهد که برای هر وضعیت صنعتی و به دست آوردن یک دیدگاه کلی در تاثیر کمیت‌های اصلی حاکم بر فرآیند خوردگی ناشی از کاویتاسیون، ماده مناسب را انتخاب نمایند. در زیر به بیان بعضی از کمیت‌های مهم و تأثیرگذار بر فرآیند خوردگی ناشی از کاویتاسیون اشاره می‌کنیم.

(۱) تأثیر سرعت جریان:

در میان نتایج کلی بدست آمده، سرعت افزایش سریع خسارت ناشی از خوردگی کاویتاسیون با سرعت مایع وابسته به دیوار ارتباط دارد. وابستگی نرخ اتلاف جرم ($\dot{m}$) با سرعت جریان (V) معمولاً توسط یک قانون توان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{m} = k (V - V_0)^n \quad (۴-۱)$$

به طوری که در رابطه بالا، n در محدوده چهار تا نه و V_0 سرعت آستانه فرسایش حفره برای مواد تحت بررسی می‌باشد. برای سرعت‌های پایین‌تر از این آستانه، فرسایش حفره صفر است و یا به طور کامل قابل اغماض می‌باشد. بعنوان مثال برای آب و ضد زنگ استیل L316 سرعت آستانه نهفته و در حدود ۲۰ متر بر ثانیه است. رابطه (۴-۱) در یک محدوده ی خاصی از تنوع سرعت معتبر نیست.

ارزش بالای توان n که در رابطه بالا معرفی شد، بعنوان یک شاخصی از خسارات شدید ناشی از خوردگی کاویتاسیون معرفی می‌شود که می‌تواند سیستم‌های هیدرودینامیکی در سرعت‌های بالا را متحمل خسارات شدیدی نماید. در واقع خسارات دیدنی‌ای در گذشته ناشی از پدیده خوردگی

کاویتاسیون مشاهده شده است. بعنوان مثال می توان به دیوارهای تونل تاربلا^۱ در پاکستان اشاره کرد که بدلیل تخلیه مخزن در تابستان ۱۹۷۴ فرو ریخت.

(۲) تحول زمانی میزان از دست رفته توده:

ویژگی عمومی دوم فرسایش حفره، نمونه نوعی ای از تکامل تدریجی نرخ اتلاف توده با زمان در معرض قرارگرفتن آن می باشد. در ابتدا، و در طی یک دوره نهفتگی، هیچ اتلاف جرمی مشاهده نشده است. پس از آن نرخ اتلاف توده به طور صعودی افزایش می یابد. (دوره پر شتاب) و در نهایت به حالت پایدار و ثابت می رسد. برای تست های طولانی مدت، یک دوره میرایی اغلب مشاهده شده که در طی آن نرخ فرسایش حفره کاهش می یابد. در واقع، چنین تحول نرخ فرسایش حفره در برابر زمان در معرض قرارگرفتن آن بسیار شماتیک بوده، به طوری که برای آن انواع مختلف منحنی های تجربی بدست آمده که این منحنی ها همگی بستگی به دستگاه تست فرسایش حفره و ماده تحت آزمایش دارد.

در طول دوره نهفتگی، اثرات هیدرودینامیکی فقط باعث تولید حفره روی سطوح ماده می شوند، به بیان دیگر اثرات هیدرودینامیکی باعث تغییر شکل پلاستیک بر روی شکل دائمی ماده می شوند، بدون اینکه ماده دچار ازدست دادن جرم شود. حفره ها نسبتاً کوچک هستند، لذا احتمال تداخل در ابتدا بسیار کم است. آزمایشات حفره در مدت کوتاه اغلب برای تجزیه و تحلیل رفتار غیر عادی جریان بکار گرفته می شوند. پس از آن خود مواد بعنوان یک مبدل مجازی در نظر گرفته می شود به طوریکه آستانه سوراخ شدگی برای ماده، همان تنش تسلیم خود ماده معرفی می شود. کناپ^۲ و استینبرین^۳ دریافتند که نرخ ایجاد حفره از یک قانون توان به شکل V^α تبعیت می کند، به طوری که توان α نزدیک به شش است. در حالی که حجم کل حفره برای سرعت های بالاتر از ۶۰ متر بر ثانیه تقریباً از قانون توان V^5 پیروی

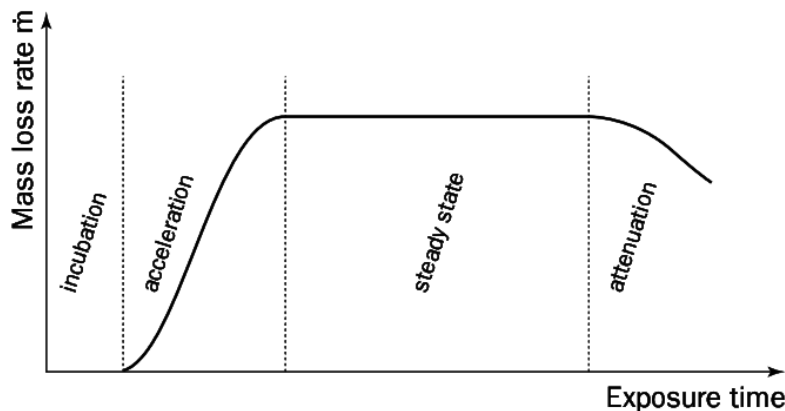
می کند. نتایج تجربی نشان دادند که مدت زمان T_i در سیکل نهفتگی با حداکثر نرخ خوردگی $\dot{m}$

¹ Tarbela

² Knapp

³ Stinebring

در طی دوره پایدار رابطه دارند. مشاهده شد که حاصلضرب $\dot{m}$ در T_i ، $(\dot{m} \times T_i)$ ، تقریباً مقداری ثابت است که ارزش این ثابت بودن بستگی به دستگاه تست خوردگی دارد.



شکل ۱-۱۵ تغییر شکل شماتیک نرخ از دست دادن جرم در برابر مدت زمان [۱۹].

۳) نظرات متفرقه:

به طور کلی، هنگامی که کمیت کاویتاسیون برای یک سرعت ثابت کاهش داده می‌شود، فرسایش به یک میزان حداکثر می‌رسد و سپس هنگامی که کاویتاسیون به خوبی توسعه یافته می‌شود، فرسایش یا خوردگی کاهش می‌یابد. کاهش در حد تجاوز جریان ممکن است در نتیجه تولید کمتر سازه‌های بخار یا فروپاشی ضعیف‌تر باشد که این خود به دلیل کاهش گرادیان فشار معکوس می‌باشد. حد تجاوز جریان‌های کویتی ممکن است به میزان قابل توجهی بوسیله جریان‌های ناپایدار افزایش یابد، به طوری که می‌تواند شدت فروپاشی را که وابسته به مشخصات فرکانسی است، وسعت ببخشد. در شرایط عملی ممکن است فرسایش محدود باشد و حتی بوسیله دستگاه‌های تهویه جریان، از خوردگی جلوگیری گردد. این عمل در حال حاضر در زمینه هیدرولیک سد بوسیله استفاده از توری‌های هوا دهنده، کاربرد رایج دارد. در مورد مایعات خورنده، آسیب را می‌توان توسط یک اثر کمک‌کننده خوردگی و فرسایش، افزایش داد. پدیده خوردگی یک اثر مکانیکی دارد و آن، از بین بردن لایه‌ای از فیلم پوشیده شده بر روی سطح

جسم و نیز بوجود آوردن مکان‌های بسیار واکنش‌پذیر خوردگی بر روی سطح جسم، به طوری که میزان کل سایش بسیار بیشتر از نرخ فرسایش خالص ناشی از خوردگی کاویتاسیون و مواد خورنده می‌باشد. تعاریف مختلفی برای شدت فرسایش یا شدت خوردگی بیان می‌شود که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

- نرخ سوراخ (نرخ ایجاد حفره): یعنی چگالی گودال در هر واحد زمان و واحد سطح. [۲۰]
- نرخ از دست دادن جرم کل: $(\dot{m} = \frac{dm}{dt})$ برای هر نمونه آسیب دیده یا نرخ از دست دادن حجم مربوط به ماده. [۲۰]
- عمق متوسط نرخ نفوذ^۱: حجم کاهش در نرخ واحد سطح، که اولین بار توسط کاتو^۲ پیشنهاد شد.

۱-۱۰-۲- روش‌های تحلیلی

برای اولین بار ریلی^۳ در سال ۱۹۱۷ یک تحلیل ریاضی در مورد رشد و نابودی حباب‌ها ارائه کرد. رابطه ریاضی ارائه شده که در حالت کلی معادله ریلی-پلست^۴ نامیده می‌شود اساسی‌ترین رابطه تحلیلی توصیف کننده دینامیک غیر خطی و گذرای حباب است.

افورس^۵ با استفاده از نگاشت‌های همدیس^۶ اولین تئوری در زمینه کاویتاسیون را در دهه ۴۰ میلادی ارائه داد. شاید بتوان گفت که عمده‌ترین بررسی‌های تحلیلی در زمینه کاویتاسیون بر اساس مبانی جریان پتانسیل بوده است. علت این مسئله را می‌توان در پیچیدگی‌های حل مجموعه معادلات ناویر-استوکس جستجو کرد. کوتبرت^۷ و استریت^۸ از ترکیب توابع پتانسیل چشمه^۹ و چاه^{۱۰} بر روی محور

^۱ MDPR

^۲ Kato

^۳ Rayleigh

^۴ Rayleigh- Plesset

^۵ Efors

^۶ Conformal mapping

^۷ Cuthbert

^۸ Street

^۹ Source

^{۱۰} Sink

تقارن یک جسم متقارن محوری و مدل ریابوچینسکی^۱ برای پیش‌بینی ناحیه کاویته روی برخی از هندسه‌های متقارن محوری استفاده کردند. مدل ریابوچینسکی یک مدل تئوری برای شکل ناحیه انتهایی کاویته (ناحیه بسته شدن کاویته) می‌باشد. چو^۲ با توسعه روش استفاده شده توسط کوتبرت و استریت و همین‌طور استفاده از نظریه جسم نازک^۳، از این روش برای تخمین ناحیه کاویته بر روی هندسه‌های متقارن محوری متعددی استفاده نمود. در سال ۱۹۶۷ وید^۴ اثر ضخامت را روی هیدروفویل-های صفحه‌ای-دایروی^۵ با تئوری خطی بررسی نمود. در سال ۱۹۷۱ لیهی^۶ تئوری سوپرکاویتاسیون هیدروفویل‌های سه بعدی را ارائه نمود. بسیاری از پیشرفت‌های تئوری‌های خطی روی کارهای فورویا^۷ و آکوستا^۸ در سال ۱۹۷۳ بوده است.

علاوه بر روابط تئوری توصیف کننده هندسه کاویتاسیون، مدل‌های تئوری متعددی برای بسته شدن سوپرکاویته ارائه شده است. چهار مدل اصلی برای بسته شدن کاویته عبارتند از: مدل ریابوچینسکی، مدل جت بازگشتی، مدل وو^۹، و مدل گردابه‌های چرخشی تولین. در مدل ریابوچینسکی، کاویته با یک بدنه جامد که فرض می‌شود از خارج در جریان نگه‌داشته شده است، بسته می‌شود. کاویته و عامل خارجی بستن جریان یک ناحیه بسته را تشکیل می‌دهند که در روی آن برآیند نیروی پسا صفر است. مدل جت بازگشتی فرض می‌کند که یک جت بازگشتی در ناحیه بسته شدن کاویته شکل می‌گیرد. فرض می‌شود که جت‌های بازگشتی به صورت دایمی تولید می‌شوند. با توجه به این فرض، جریانی که توسط جت‌های بازگشتی وارد کاویته می‌شود به صورت پیوسته از دیواره آن خارج می‌شود. از سوی دیگر، نقطه سکونی که در این جریان شکل می‌گیرد به شدت ناپایدار است.

¹ Riabouchinski

² Cho

³ Thin body theory

⁴ Wade

⁵ Plano-convex

⁶ Leehey

⁷ Furuya

⁸ Acosta

⁹ Wo

در مدل "وو" خطوط جریان ناحیه کاویتا به صورت دو دیواره جامد به موازات سرعت جریان آزاد امتداد داده می‌شوند و با یک دیسک عمود بر جریان بسته می‌شود. مدل گردابه‌های چرخشی تولین فرض می‌کند که ناحیه کاویتا با دو گردابه چرخشی که ناشی از برهم‌کنش دو شرط در ناحیه کاویتا و در ناحیه دنباله^۱ می‌باشد، بسته می‌شود.

۱-۱۰-۳- شبیه‌سازی عددی

در مطالعات اولیه در زمینه کاویتاسیون بیشتر از تئوری‌های مربوط به جریان پتانسیل استفاده می‌شد و استفاده از مدل‌های عددی هیدرودینامیک کاویتاسیون غیر مرسوم بود. از دلایل این مساله می‌توان به پیچیدگی‌های جریان دو فازی کاویتاسیون مانند تغییرات موضعی بسیار شدید در چگالی مایع تراکم ناپذیر در اثر وقوع کاویتاسیون، وجود مرزهای متحرک بین دو فاز و لزوم مدل‌سازی تغییر فاز اشاره کرد. استفاده از قدرت محاسباتی کامپیوتر در حل عددی کاویتا توسط گلدن^۲ در سال ۱۹۷۵ آغاز شد. وی تئوری خطی گرس^۳ را برای صفحه صاف بکار گرفت [۲۱].

روش‌های حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های با کاویتاسیون به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های ردیابی مرز مشترک^۴ و روش‌های جریان تعادلی همگن^۵. در ادامه دورنمایی کلی از مدل‌سازی‌های عددی به انجام‌رسیده براساس حل معادلات ناویر-استوکس آورده می‌شود:

کوبوتا^۶ و همکارانش در سال ۱۹۹۲ کاویتاسیون ابری را بر روی هیدروفویل‌ها به صورت عددی با استفاده از معادلات ریلی-پلست بررسی کردند [۱۶]. چن و هیسر^۷ در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۸ نتایج حل عددی خود را پیرامون توزیع فشار بر روی هندسه‌های متقارن محوری بدست آوردند [۲۲]. سینگال^۸ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ توزیع فشار و ضریب تخلیه برای آریفیس‌ها و هیدروفویل‌ها بر اساس معادلات

¹ Wake

² Golden

³ Grest

⁴ Surface tracking method

⁵ homogenous equilibrium flow model

⁶ Kubota

⁷ Chen and Heister

⁸ Singhal

کسر حجمی بخار محاسبه کردند [۱۵]. کانز^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ بر روی حل عددی توزیع فشار پیرامون اجسام متقارن محوری با استفاده از معادلات کسر حجمی همراه با معادلات پیوستگی و ممنتوم تحقیقاتی انجام دادند [۲۳]. در ادامه آهوچا^۲ و همکارانش و ادوارد و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۰ به شبیه‌سازی عددی جریان کاویتاسیونی پیرامون هیدروفویل‌ها و هندسه‌های با تقارن محوری با اعداد رینولدز متفاوت پرداختند. ونکاتسواران^۳ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به بحث و بررسی روش‌های عددی ارائه شده توسط کانز و همکاران و همچنین روش عددی آهوچا و همکاران پرداخته و با استفاده از این روش‌ها به توزیع فشار در اجسام با تقارن محوری را بررسی کردند. آنجلو کروون^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به تحلیل عددی توزیع ضریب فشار بر روی هیدروفویل NACA0015 با عدد رینولدز ثابت ۱۰^۵ × ۵ با استفاده از معادلات انتقال جرم پرداختند. پالائو سالوادور^۵ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ مدل‌سازی عددی جریان کاویتاسیون را در اُریفیس حلقوی، مستطیلی، همچنین نازل‌های حلقوی و مستطیلی و ونتوری مستطیلی با استفاده از معادلات کسر جرمی بخار انجام دادند. میتجا مورگات^۶ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به مقایسه مدل‌های انتقال جرم برای پیش‌بینی پدیده کاویتاسیون صفحه‌ای پیرامون یک هیدروفویل با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند. [۲۴].

با توجه به روندی که در تحقیقات قبلی ذکر شد، مشاهده می‌شود که کارهای عددی انجام شده با افزایش استفاده از مدل‌های انتقال جرم در سال‌های اخیر همراه است. از جمله نقاط ضعف این مدل‌ها استفاده از ضرایب تجربی برای تصحیح حل عددی می‌باشد که این ضرایب برای هندسه‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی می‌باشند. از جمله فرضیات دیگر درباره مدل‌های انتقال جرم این است که این مدل‌ها فشار بحرانی را در طول حل مقداری ثابت در نظر می‌گیرد و حال آنکه فشار بحرانی تابعی از دما بوده و در هر لحظه مقداری متفاوت از قبل را دارا می‌باشد. با توجه به تأثیر زیادی که پدیده کاویتاسیون

¹ Kunz

² Ahuja

³ Venkateswaran

⁴ Angelo Cervone

⁵ Palau-Salvador

⁶ Mitja Morgut

در صنعت می‌گذارد و از طرفی هزینه زیادی که یک آزمایش برای پیش‌بینی پدیده کاویتاسیون چه از لحاظ زمانی و چه از لحاظ اقتصادی بر جا می‌گذارد، اهمیت حل عددی برای بررسی این پدیده مشخص می‌گردد.

حال هر چه نتایج حاصل از حل عددی مدل‌ها به واقعیت فیزیکی مسئله نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده قدرت آن مدل در پیش‌بینی این پدیده می‌باشد. برای رسیدن به این مقصود سه مدل انتقال جرم که در کارهای اخیر دارای اقبال بیشتری بوده‌اند، انتخاب شده و مقایسه‌ای بین نتایج گرفته شده از حل عددی با استفاده از هر یک از این مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی موجود انجام پذیرفته است.

در ادامه با توجه به این که این مدل‌ها فشار بحرانی را مقداری ثابت در نظر می‌گیرند ولی در واقعیت این مقدار تابعی از دما می‌باشد، با اضافه کردن معادله آگوست-مگنوس^۱ که تأثیر دما (بر حسب کلوین) بر فشار بحرانی را نشان می‌دهد؛ مدل‌های تصحیح شده‌ای که توانایی داشتن فشار بحرانی متناسب با دمایی که در آن لحظه در آن قرار دارد، ایجاد گردیده است و در انتها مقایسه‌ای میان نتایج بدست آمده از حل عددی این مدل‌ها با افزودن تأثیر کمیت دما و نتایج بدست آمده از حل عددی مدل‌ها بدون تأثیر دما و نتایج آزمایشگاهی موجود پرداخته شده است. [به جدول موجود در پیوست ۱ مراجعه گردد]

^۱ August-Roche-Magnus

فصل ۲. بررسی معادلات اساسی حاکم بر

پدیده کاویتاسیون

۲-۱- معادلات حاکم

در پی وقوع پدیده کاویتاسیون مقداری از مایع به گاز تبدیل می‌شود، این پدیده به علت کاهش فشار مایع تا رسیدن به میزان فشار حد می‌باشد و در این موقع است که تغییر فاز رخ می‌دهد. فاصله بین مایع و گاز در اصطلاح، سطح آزاد نامیده می‌شود. در پدیده کاویتاسیون، مرز ناحیه کاویتی یک سطح آزاد بین دو فاز مایع و بخار آن می‌باشد.

برای بررسی روابط حاکم بر حجم کنترل سیال نیاز به ابزارهایی است که می‌بایست توسط حساب-دیفرانسیل و انتگرال مهیا گردند. در این بخش با استخراج معادله انتقال عمومی، ارتباط بین حجم کنترل های متحرک با سرعت دلخواه و جرم کنترل‌ها بدست می‌آید. این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، زیرا معادلات اساسی مکانیک همگی برای سیستم (جرم کنترل) نوشته شده‌اند و از سوی دیگر بررسی سیال در حجم کنترل انجام می‌پذیرد. بنابراین ابزاری برای این تبدیل مورد نیاز است که قضیه انتقال عمومی آن را در اختیار می‌گذارد. با استفاده از قضیه انتقال عمومی، قوانین بقای جرم و ممنتوم خطی برای حجم کنترل سیال که با سرعت دلخواه جابجا می‌گردد، نوشته شده و بدین ترتیب معادلات اساسی حاکم بر جریان یعنی معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس بدست می‌آیند [۱۵].

$$\nabla \cdot U = \dot{m} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_g} \right) \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla U + (\nabla U)^T)] \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma U) = \frac{\dot{m}}{\rho_l} \quad (3-2)$$

در معادلات مذکور فازها غیرقابل تراکم در نظر گرفته شده‌اند و همه فازها در سرعت اولیه U سهیم هستند. معادلات بالا به ترتیب، معادله پیوستگی، معادله ممنتوم برای مخلوط مایع-بخار و معادله کسر حجمی برای فاز مایع می‌باشند.

علاوه بر این در این معادلات، کمیت U [m/s] سرعت مخلوط در متوسط زمان را بیان می‌کند و P [Pa] بیانگر فشار متوسط بوده و $\dot{m}$ [Kg/s] نیز نرخ انتقال جرم در حین تغییر فاز در طی

کاویتاسیون را نشان می‌دهد. μ_t (kg/ms) لزجت ناشی از آشفتگی می‌باشد α_l و α_v به ترتیب نشان دهنده کسر حجمی مایع و بخار می‌باشند، که به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\alpha_v = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{total}} \quad , \quad \alpha_l = \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_{total}} \quad (4-2)$$

و $\dot{m}_{total}$ هم عبارتست از نرخ جریان کلی:

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_l + \dot{m}_v \quad (5-2)$$

از طرفی رابطه‌ای به صورت زیر بین دو عبارت α و γ برقرار می‌باشد:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (6-2)$$

پس به این ترتیب ρ و μ مربوط به کل مخلوط به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_v \quad (7-2)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + (1 - \alpha_l) \mu_v \quad (8-2)$$

در این مطالعه فرض شده است که انتقال جرم مخصوص در جهت بخار به مایع مثبت است.

۲-۲- معرفی جریان‌های کاویتاسیون از دیدگاه مدل‌سازی عددی

از دیدگاه مدل‌سازی عددی، جریان‌های کاویتاسیون، جریان‌هایی دوفازی هستند که در آنها تغییر فاز رخ می‌دهد. در جریان‌های دوفاز معمولی نظیر مدل‌سازی سطح آزاد تلاش‌هایی که صورت می‌گیرد، بیشتر در راستای مدل‌سازی سطح آزاد و تعیین دقیق این مرز است اما در مدل‌سازی کاویتاسیون بیشتر تلاش‌ها در راستای مدل‌سازی دقیق تغییر فاز با توجه به کمیت‌های تأثیرگذار بر این پدیده است. اهداف کلی مدل‌سازی کاویتاسیون را می‌توان بدین صورت معرفی نمود: نخست تعیین دقیق نقطه شکل‌گیری اولین حباب‌ها و در ادامه تعیین نحوه رشد و گسترش حباب‌ها و تشکیل ناحیه کاویتی و در انتها بررسی نحوه جدا شدن حباب‌ها از روی سطح و از انتهای ناحیه کاویتی. در این میان جدا شدن حباب‌ها از روی سطح توأم با تشکیل گردابه‌هایی در انتهای کاویتی است که مدل‌سازی این کمیت به همراه پدیده جت بازگشتی از نکاتی است که ذهن محققان مربوطه را به خود مشغول ساخته است.

مدل‌سازی کاویتاسیون همانند سایر مدل‌سازی‌های سیالاتی، در حالت کلی، در دو دیدگاه تراکم-

پذیری و تراکم‌ناپذیری قابل بررسی است. در جریان‌هایی که در آنها عدد ماخ کوچک است (کمتر از ۰/۳)

(می‌توان از آثار تراکم‌پذیری صرف‌نظر نمود و با فرض تراکم‌ناپذیری ترکیب از مدل‌های تراکم‌ناپذیر استفاده نمود. اما در جریان‌های سرعت بالا و جریان‌هایی که در آنها عدد ماخ بزرگ است (بزرگتر از ۰/۳) دیگر نمی‌توان جریان را تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت و بایستی از الگوریتم‌هایی استفاده گردد که آثار تراکم‌پذیری را محاسبه نمایند.

در حالت کلی دو الگوریتم کلی برای حل جریان‌های کاویتاسیون با توجه به پیچیدگی‌های موجود، مورد استفاده قرار می‌گیرد این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم تراکم‌پذیری مصنوعی و الگوریتم تصحیح چگالی است. این میان روش‌های مشابه دیگری نیز توسط عده‌ای از محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد اما با توجه به محدودیت‌های موجود در این روش‌ها، این روش‌ها چندان فراگیر نشده‌اند. یکی دیگر از مواردی که در جریان‌های کاویتاسیون بایستی مد نظر قرار گیرد اختلاف قابل توجه چگالی بین دو فاز است. بدین جهت می‌بایست از الگوریتم‌هایی استفاده گردد که دارای پایداری مناسبی در این مورد باشند. در نهایت می‌توان بر این نکته تأکید کرد که در حالت کلی به دو طریق می‌توان مدل‌سازی کاویتاسیون را انجام داد، که یکی استفاده از معادله انتقال کسر حجمی یا کسر جرمی و دیگری استفاده از معادله حالت می‌باشد. با توجه به قابلیت‌های متعدد مدل‌هایی که از معادله انتقال کسر حجمی استفاده می‌کنند این دسته از مدل‌ها بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲-۳- مدل انتقال کسر حجمی^۱

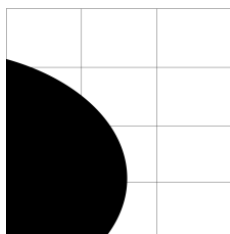
روش نسبت حجمی نخستین بار توسط هارت و نیکولاس در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. این روش برای مدل‌سازی دو یا چند فاز که از سیال‌های غیر قابل حل‌شونده در یکدیگر تشکیل شده باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که یافتن مرز بین فازها مد نظر باشد.

معادلات حاکم بر جریان سیال به طور کلی عبارت از معادلات بقای ناویر- استوکس و پیوستگی می‌باشند. در حالتی که جریان همراه با کاویتاسیون وجود داشته باشد، مدل‌سازی کاویتاسیون از اهمیت

^۱ VOF (Volume Of Fluid)

بالایی برخوردار بوده و با توجه به ماهیت مسأله و اهمیت مدل سازی پدیده های مختلف انتخاب رویکرد مناسب مدل سازی کاویتاسیون مطرح می شود. مانند دیگر روش های شبیه سازی چند فاز، مشکل اساسی در این است که در نظر گرفتن لایه ای به نازکی آنچه در طبیعت، بین فازها وجود دارد در عمل امکان پذیر نیست. نفوذ مصنوعی و عددی ایجاد شده باعث می شود که مرزهای غیر دقیقی به وجود بیایند. ساده ترین روش برای ترمیم این مشکل استفاده از روش های مخصوص تفاضلی است. از روش VoF برای شبیه سازی پدیده های چند فاز مختلفی از جمله جریان های دارای سطح آزاد، شبیه سازی جت ها و نیز شبیه سازی کاویتاسیون استفاده می گردد. این روش دارای کاربردهایی همچون پیش بینی برگشت جت، بررسی حرکت حباب های بزرگ داخل مایع، بررسی رفتار مایع پس از دریچه سد و در نهایت بررسی مرز مشترک بین ترکیب های مایع- گاز است.

روش حجم سیال یا VoF نیاز به تعریف و حل یک معادله انتقال اضافی برای مشخص شدن درصد هر یک از سیالات را مرتفع می کند. اساس روش بر این استوار است که متغیری که نشان دهنده نسبت حجم یکی از فازها به کل است، خصوصیات فازها را مشخص می کند [۲۵]. در این روش:



۱- حباب ها بزرگتر از سائز شبکه ها می باشند.

۲- دو فاز دارای یک حد فاصل می باشند.

نتیجه ای که از این مدل حاصل می گردد، عددی مثل α خواهد بود که بیانگر نسبت حجمی دو فاز سیال درون هر یک از سلول های محاسباتی می باشد. بدین ترتیب و برای مثال $\alpha = 1$ نشان دهنده پر بودن حجم کنترل از مایع و $\alpha = 0$ بیانگر پر بودن حجم کنترل از گاز خواهد بود.

محیط جریان به سه بخش تقسیم می شود:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{سیال اول} \\ 0 & \text{سیال دوم} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{منطقه گذار بین دو فاز} \end{cases}$$

طرح‌های مختلفی بر اساس روش فوق یعنی استفاده از معادله انتقال کمیت اسکالر سطح آزاد^۱، وجود دارد می‌توان دو سیال را به صورت یک سیال موثر با خواص متغیر در نظر گرفت:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_v, \quad \mu = \alpha_l \mu_l + (1 - \alpha_l) \mu_v$$

که در اینجا l و v بیانگر دو فاز است. در این حالت فصل مشترک به عنوان یک مرز در نظر گرفته نشده و شرط مرزی بر روی آن اعمال نمی‌شود، بلکه به عنوان یک غیر پیوستگی در خواص سیال ظاهر می‌گردد. از دیگر روش‌های حجمی مدل‌سازی سطح آزاد می‌توان به روش تعیین سطح اشاره نمود که توسط اوشر و ستیان ارائه گردیده است.

تابع تعیین سطح به صورت فاصله نقاط از سطح آزاد تعریف شده و علامت کمیت ϕ بیانگر نوع سیال خواهد بود. لازم به ذکر است که در این حالت نیز ϕ از معادله انتقال مشابه حالت قبل پیروی می‌کند. در این حالت تبدیل دو فاز سیال سریع اتفاق افتاده و مشکلاتی در هنگام محاسبات بوجود می‌آید. برای حل این مشکل لایه‌ای را به عنوان ضخامت منطقه گذر بین دو فاز تعریف می‌کنند.

۲-۴- مدل ردیابی مرز مشترک^۱

در روش‌های ردیابی مرز مشترک، برای ناحیه کاویتا فشار ثابتی برابر فشار بخار جریان مایع فرض شده و محاسبات فقط برای فاز مایع انجام می‌شود. فرض فشار ثابت برای ناحیه کاویتا از لحاظ تجربی تأیید شده است. مرز دو فاز با استفاده از این فرض قابل ردیابی بوده ولی تعیین شکل کاویتا نیاز به استفاده از یک مدل برای هندسه دنباله دارد. این روش‌ها قابلیت شبیه‌سازی جریان‌هایی که رشد و جدایش حباب‌ها در آنها رخ می‌دهد را ندارند و فقط برای مدل‌سازی کاویتاسیون صفحه‌ای در مسائل دو بعدی یا متقارن محوری قابل استفاده می‌باشند.

¹ Interface Tracking Model

۲-۵- مدل ریاضی کاویتاسیون بر اساس رویکرد حجمی مدل سازی

در پدیده کاویتاسیون، جرم حجمی و لزجت سیال در گذر بین دو فاز تغییرات پیوسته‌ای داشته و این مسئله برای معادلات حاکم بر جریان که به کمیت‌های پیوسته نیاز دارند، مناسب است. همان‌گونه که از تعریف کمیت مشخصه α بر می‌آید، می‌توان آن را یک کمیت لاگرانژی برای سیال در نظر گرفت. مقدار γ برای هر سیال مشخص است.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c) = 0 \quad (۹-۲)$$

و با استفاده از تعریف :

$$\rho = \gamma \rho_l + (1 - \gamma) \rho_v \quad (۱۰-۲)$$

با جایگزینی تعریف فوق در معادله پیوستگی:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\gamma \rho_l + (1 - \gamma) \rho_v)}{\partial t} + \nabla \cdot ((\gamma \rho_l + (1 - \gamma) \rho_v) c) = 0 \\ \rightarrow & (\rho_l - \rho_v) \left[\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right] + (\gamma \rho_l + (1 - \gamma) \rho_v) \nabla \cdot c + c \nabla \cdot (\gamma \rho_l + (1 - \gamma) \rho_v) = 0 \\ \rightarrow & (\rho_l - \rho_v) \left[\frac{\partial \gamma}{\partial t} \right] + (\rho_l - \rho_v) \gamma \nabla \cdot c + \rho_v \nabla \cdot c + c (\rho_l - \rho_v) \nabla \cdot \gamma = 0 \\ \rightarrow & (\rho_l - \rho_v) \left[\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma c) \right] - (\rho_l - \rho_v) c \nabla \cdot \gamma + \rho_v \nabla \cdot c + c (\rho_l - \rho_v) \nabla \cdot \gamma = 0 \\ \rightarrow & (\rho_l - \rho_v) \left[\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma c) \right] + \rho_v \nabla \cdot c = 0 \end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

همان‌طور که پیشتر بیان گردید، به منظور مدل‌سازی تغییر فاز می‌بایست عبارتی در سمت چپ معادله انتقال کسر حجمی قرار گیرد. این عبارت تعیین‌کننده نحوه و نرخ تغییر فاز بین هر یک از فازها خواهد بود. در جریان‌های دو فاز که تغییر فاز حضور ندارد، مثل سطح آزاد؛ با صرف‌نظر کردن از سلول‌هایی که بر روی مرز قرار دارند، می‌توان از تغییرات چگالی صرف‌نظر نمود و معادله دیورژانس سرعت برابر صفر را معادل معادله بقای جرم دانست. اما در مواردی که تغییر فاز وجود دارد، دیگر نمی‌توان از

تغییرات چگالی صرف نظر نمود. بنابراین در جریان های دو فاز به همراه تغییر فاز دیورژانس سرعت برابر صفر خواهد بود.

با تعریف کردن مقادیر S_α و S_m به عنوان عبارت های چشمه معادلات انتقال کسر حجمی و دیورژانس سرعت:

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma c) = S_\alpha & (12-2) \\ \nabla \cdot c = S_m & (13-2) \end{cases}$$

و با جایگذاری معادلات (12-2) و (13-2) در معادله (11-2) داریم:

$$(\rho_l - \rho_v) [S_\alpha] + \rho_v [S_m] = 0 \quad (14-2)$$

با مرتب کردن مقدار S_m بر حسب S_α داریم:

$$S_m = \frac{(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v} S_\alpha \quad (15-2)$$

همان گونه که دیدیم، رابطه ای برای عبارت چشمه معادله انتقال کمیت اسکالر کسر حجمی بدست آوردیم که مقدار آن را به دیورژانس سرعت مربوط می کند. در ادامه به کمک تئوری های مختلف موجود برای مدل سازی کاویتاسیون که رابطه های مختلفی برای S_α پیشنهاد می کنند، قادر خواهیم بود تا مقدار S_m را بدست آوریم. بدین شکل با کامل شدن مجموعه معادله های حاکم بر سیستم، دستگاه معادلات قابل حل خواهد بود. در فصل بعد با معرفی معادله انتقال کسر حجمی و نحوه مدل سازی تغییر فاز، تأثیرات تغییر فاز بر روی جریان و نحوه اعمال آن خواهد شد.

۲-۶- تأثیر آشفستگی در پدیده ابر کاویتاسیون

آشفستگی در پدیده کاویتاسیون به عنوان یکی از پیچیده ترین مسائل فیزیک جدید شناخته می شود. این در حالی است که هنوز تحقیقات در این زمینه از پیچیدگی های موجود در مقیاس فیزیک مولکولی بسیار دور می باشد. واقعیت آن است که تا به امروز کسی نمی داند که در یک لحظه چگونه جریانی در محدوده رینولدز بحرانی پس از ناحیه گذار به آشفته تبدیل می شود. همچنین با بزرگترین ابرایانه های

امروزی نمی‌توان به طور دقیق نیروی پسا بر روی یک جسم نظیر ماشین یا یک هواپیما را حساب کرد. از زمان ریچاردسون به کمک روش‌های عددی توانستند که با یک روش مشخص، معادلات حرکت با شرایط اولیه داده شده، با اعمال شرایط مرزی، بر پایه بقا مُمْتوم و انرژی را حل کنند. با این حال برای چنین حل‌هایی در حالت دقیق نیاز به قدرت بسیار زیاد محاسبات وجود دارد و شبیه‌سازی‌ها تنها برای رینولدزهای پایین میسر می‌باشد.

مطالعات بر روی پدیده کاویتاسیون در ابتدا به حل میدان پتانسیل جریان محدود می‌شد. اما با پیشرفت روش‌های محاسبات عددی و توان پردازش رایانه‌ها در میان محققان تمایل به حل معادلات ناویر-استوکس گسترش یافت. روش‌های محاسباتی که استفاده می‌گردند در حوزه معادلات میانگین رینولدز ناویراستوکس^۱ و روش‌های شبیه‌سازی مستقیم عددی^۲ می‌باشند. اما در اینجا ذکر این نکته لازم است که برای محاسبه سرعت در یک نقطه تأثیرات چندین میلیون نقطه تأثیرگذار باید لحاظ شوند. به طور کلی بیشتر مسائل مطرح در حوزه‌های صنعتی، اعم از پدیده‌های طبیعی و یا آنچه در آزمایش‌ها روی می‌دهد، در محدوده اعداد رینولدز بسیار بزرگی است که عملاً امکان حل آنها با روش شبیه‌سازی مستقیم عددی وجود ندارد [۲۶].

۷-۲- مدل‌های آشفتگی کلاسیک

یک مدل آشفتگی عبارتست از یک رویه محاسباتی برای بستن سیستم معادلات جریان متوسط، بگونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. برای بیشتر مسائل مهندسی لازم نیست که جزئیات نوسانات آشفته لحاظ شود و معمولاً فقط آثار آشفتگی روی جریان متوسط در نظر گرفته می‌شود. یک مدل آشفتگی در کد عددی باید دارای کاربرد وسیع، دقیق، ساده و از نظر اقتصادی قابل اجرا باشد. معمولترین مدل‌های آشفتگی بر اساس معادلات میانگین‌گیری شده زمانی

^۱ RANS; Reynolds Averaged Navier Stokes

^۲ DNS; Direct Numerical Solution

رینولدز عبارتند از مدل‌های صفر معادله‌ای مانند مدل طول مخلوط، مدل تنش جبری، مدل‌های دو معادله‌ای مانند $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ که در ذیل به معادلات مدل $k-\varepsilon$ به عنوان نمونه اشاره می‌شود که بعنوان مبنای مدل آشفتگی در تحقیق استفاده شده است.

۲-۷-۱- مدل $K-\varepsilon$

در این مدل دو معادله انتقال، یکی برای انرژی جنبشی k و دیگری برای نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته ε بصورت همزمان حل می‌شوند. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مدلی نیمه تجربی می‌باشد و شامل دو معادله زیر است [۳].

$$\rho_f \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho_f \varepsilon - Y_M \quad (۱۶-۲)$$

$$\rho_f \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3k} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۱۷-۲)$$

در نتیجه حل معادلات (۱۶-۲) و (۱۷-۲) مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان لزجت مربوط به جریان مغشوش را بصورت زیر محاسبه کرد:

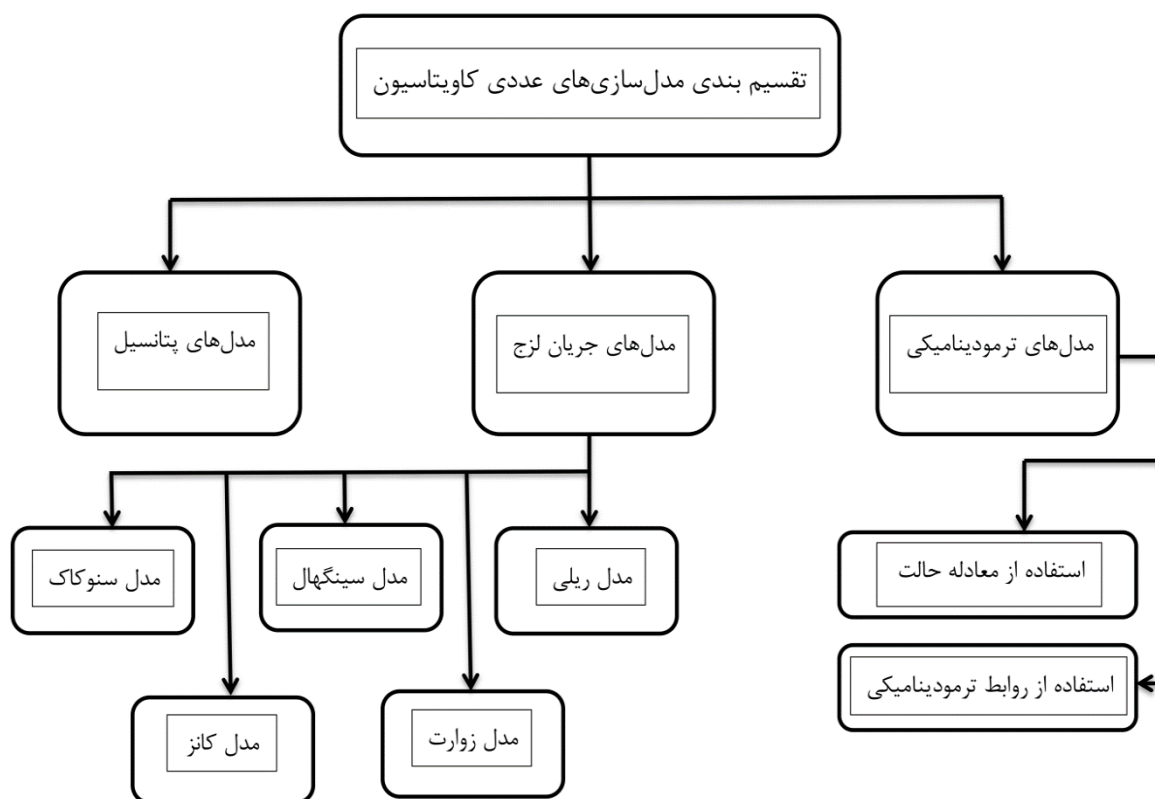
$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۸-۲)$$

فصل ۳. شیه‌سازی عددی کاویتاسیون

۳-۱- پیش درآمدی بر انواع مدل های موجود

برای شبیه سازی کاویتاسیون نیاز به شبیه سازی جریان های چند فاز داریم. روش های گوناگونی برای مطالعه جریان های چند فاز موجود است.

این مدل ها از مدل های ساده ای که تنها حباب های مجزا را در نظر می گرفتند آغاز و در نهایت به مدل هایی که قابلیت مدل سازی این پدیده در تمامی سرعت ها و با نسبت های چگالی مختلف را دارند ختم می شوند. در شکل زیر دسته بندی مدل های مختلف مورد استفاده در مدل سازی کاویتاسیون قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱ دسته بندی مدل های مختلف مورد استفاده در مدل سازی کاویتاسیون

با توجه به مدل استفاده شده در تحقیق، از بین مدل های فوق تنها به معرفی مدل کانز پرداخته شده است.

۳-۱-۱- مدل کانز^۱

پایه گذاری مدل کانز بر اساس کاری که بوسیله *Merkle* و همکارانش در سال ۱۹۹۸ انجام داده‌اند؛ قرار داده شده است، و امروزه یکی از مدل‌های انتقال جرم می‌باشد که در نرم افزار آپن‌فوم هم از آن استفاده شده است [۲۷].

این مدل بر اساس بقای دو مقدار جرمی برای مایع و گاز بنا نهاده شده است. این مدل اولین مدلی است که قادر به در نظر گرفتن گازهای بی‌اثر (علاوه بر دو فاز مایع و بخار) نیز هست. در این مدل بر عکس مدل‌های ذکر شده در بالا، انتقال جرم بر اساس دو استراتژی برای ایجاد و از بین رفتن مایع به ترتیب با $\dot{m}^+$ و $\dot{m}^-$ نشان داده می‌شود. میزان انتقال از فاز مایع به فاز بخار به صورت نسبتی محاسبه شده است به مقدار فشاری که پایین‌تر از فشار بخار است، وابسته می‌باشد. انتقال از فاز گازی (بخار) به مایع، در حالت دیگر بر اساس یک معادله چند جمله‌ای از نوع درجه سوم بر حسب کسر حجمی γ می‌باشد [به پیوست ۳ رجوع شود].

نرخ‌های انتقال جرم نیز به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\begin{cases} \dot{m}^+ = \frac{C_{prod} \rho_g \gamma^2 (1 - \gamma)}{t_\infty} \\ \dot{m}^- = \frac{C_{dest} \rho_g \gamma \min[0, P - P_g]}{\left(\frac{1}{2} \rho_l U_\infty^2\right) t_\infty} \end{cases} \quad (۱-۳)$$

$$\dot{m} = \dot{m}^+ + \dot{m}^-$$

در معادلات بالا U_∞ (سرعت جریان آزاد است و مقیاس زمانی جریان سیال $t_\infty = \frac{L}{U_\infty}$ که به صورت نسبت طول مشخصه (قطر ناحیه کاواک) به سرعت جریان آزاد است.

ضریب‌های C_{prod} و C_{dest} تجربی بوده و در فرمول اصلی $C_{dest} = ۱۰۰$ و $C_{prod} = ۱۰۰$ در نظر گرفته شده است. نکته مهمی که بایستی به آن اشاره شود آن است که تبخیر هنگامی رخ می‌دهد که فشار موجود پایین‌تر از فشار بخار باشد [۲۷].

^۱ Kunz

۲-۳- معرفی نرخ خوردگی

براساس نتایج اخیر تجربی در حوزه خوردگی، ابتدا به معرفی کامل کمیتی که بیانگر نرخ خوردگی ناشی از پدیده کاویتاسیون می باشد، پرداخته شده به طوری که در معرفی و بدست آوردن این کمیت از روابط و نتایج یک مقاله تجربی استفاده شده است [۲۸]. سپس به بیان نرخ خوردگی مدل شده و ویژگی های عددی اضافه شده به نرخ خوردگی مقاله تجربی و همچنین به معرفی کدهای عددی اعمال شده، پرداخته شده است.

۲-۳-۱- معرفی رابطه کمیت نرخ خوردگی^۱ مقاله تجربی

$$N_p = \frac{8}{\pi(\delta)^2 \tau} e^{-(2D/\delta)} \quad (2-3)$$

در رابطه فوق، N_p به عنوان کمیت نرخ خوردگی ناشی از پدیده کاویتاسیون، بیانگر تعداد حفره در واحد زمان و سطح واحد شمارش شده می باشد.^۲ δ و τ دو کمیت مناسب هستند به طوری که δ یک بعد طولی و بیانگر قطر حفره و τ یک بعد زمانی و بیانگر زمان پوشش بر واحد ساعت می باشد، به گونه ای که کمیت N_p به درستی بیانگر بعد نرخ خوردگی در واحد سطح را دارد. D قطر معادل حفره در ناحیه سطح تخت حفره و فاکتور $\frac{8}{\pi}$ برای ساده سازی توصیف های نرخ خوردگی معرفی شده است. رابطه ریاضی N_p برگرفته از مقاله تجربی ای می باشد که توسط ژان پیر فرانک^۳ و همکارانش، نوشته شده است. [۲۸]

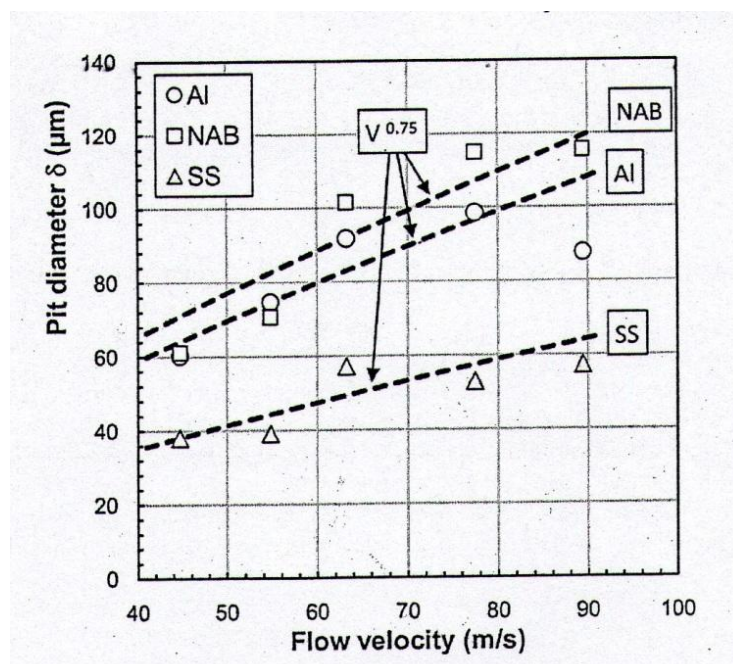
۳-۳- نحوه مدل سازی خوردگی در مقاله تجربی

آقای ژان پیر فرانک و همکارانش، با معرفی رابطه (۲-۳) بعنوان نرخ خوردگی، نشان دادند که مقادیر δ و τ به کمک نمودارهای تجربی که در زیر آورده شده است، بدست می آیند.

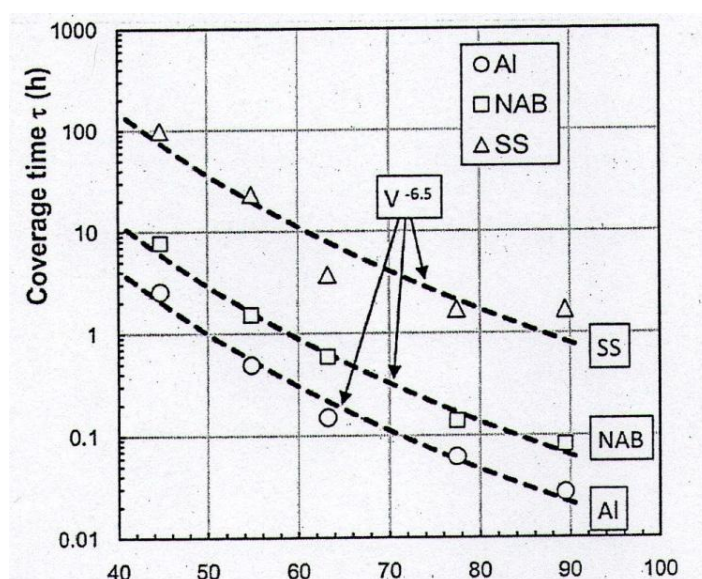
^۱ Pitting rate

^۲ Number of pits/(exposure time × analyzed surface)

^۳ Jean-Pierre Franc



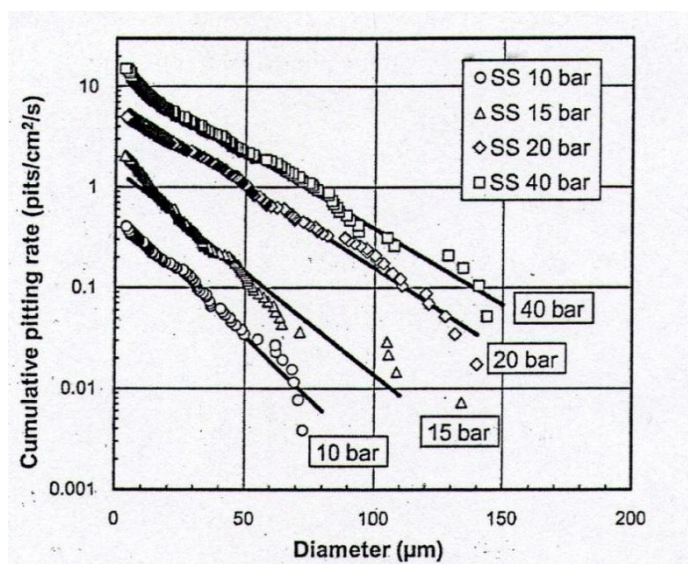
شکل ۳-۲ تأثیر سرعت سیال روی قطر حفره خوردگی [۲۸]



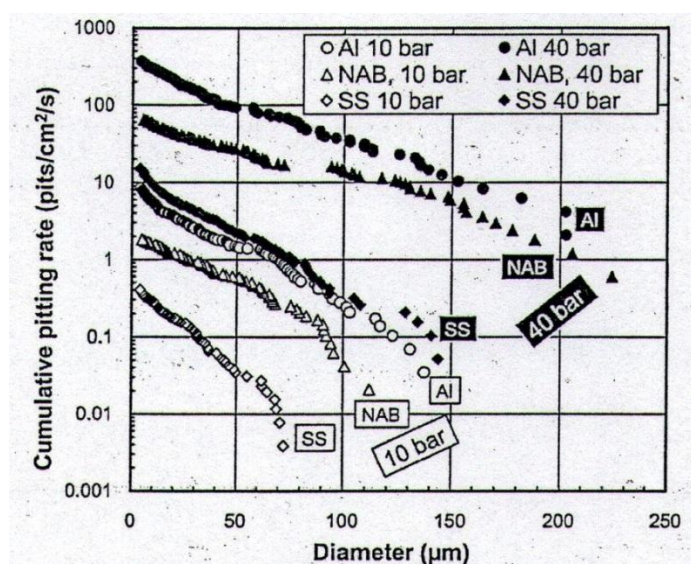
شکل ۳-۳ تأثیر سرعت سیال روی زمان پوشش [۲۸]

با توجه به نمودارها، مقادیر δ و τ بر اساس سرعت سیال از نمودارهای تجربی بدست آورده شده‌اند. نتایج نرخ خوردگی آزمایشگاهی موجود برای قطرهای مختلف و براساس سرعت ورودی سیال

و به صورت تجمعی، توسط آقای ژان پیر فرانک و همکارانش برای دو جنس استیل و آلومینیوم در فشارهای ۱۰، ۱۵ و ۴۰ بار در شکل‌های زیر آورده شده اند.



شکل ۳-۴ نرخ خوردگی تجمعی برحسب قطر معادل حفره برای استیل [۲۸]



شکل ۳-۵ نرخ خوردگی تجمعی برحسب قطر معادل حفره برای عنصر آلومینیوم [۲۸]

۳-۴- نحوه مدل سازی خوردگی در تحقیق

در تحقیق حاضر محاسبه نرخ خوردگی در دو حالت سرعت ثابت و سپس در حالت اصل انتقال نرخ خوردگی برای دو جنس استیل^۱ و آلومینیوم^۲ در فشار و سرعت های مختلف سیال انجام شده است. برای محاسبه نرخ خوردگی نیاز به کمیت هایی است که در ادامه، روش بدست آوردن آنها تشریح شده است. نیز در پایان تحقیق و پس از محاسبه نرخ خوردگی برای دو جنس استیل و آلومینیوم در فشارهای مختلف و مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی مقاله، به کمک اصل انتقال، با داشتن داده های عددی نرخ خوردگی یک جنس مشخص، مثلاً استیل در یک فشار مشخص، داده های نرخ خوردگی جنس دیگر، مثلاً آلومینیوم در همان فشار مشخص بدست آورده شده و سپس این داده های عددی بدست آمده برای آلومینیوم با نتایج تجربی آن مقایسه شده است. استفاده از اصل انتقال یکی از مزیت های خوب تحقیق حاضر بوده که در پایان تحقیق به بررسی میزان دقت اصل انتقال در شبیه سازی عددی خوردگی ناشی از پدیده کاویتاسیون نسبت به روش های بکار گرفته شده پرداخته شده است.

۳-۴-۱- معرفی رابطه کمیت نرخ خوردگی^۳ تحقیق

در رابطه، نرخ خوردگی تحقیق که در رابطه (۳-۳) بیان شده است، کمیت های δ^* و τ^* جایگزین کمیت های δ و τ رابطه (۲-۳) شده اند. کمیت های δ^* و τ^* دو کمیت مناسب هستند که شرح فیزیکی آنها در ادامه آمده است.

$$N_p = \frac{8}{\pi(\delta^*)^2 \tau^*} e^{-(2D/\delta^*)} \quad (3-3)$$

^۱ SS

^۲ AL

^۳ Pitting rate

۳-۴-۲- شرح فیزیکی کمیت‌های δ^* و τ^*

شرح فیزیکی δ^* و τ^* به صورت زیر بیان شده است که در رابطه (۳-۳) برای محاسبه نرخ خوردگی استفاده شده است.

$$\begin{cases} \delta^* = DestructCoeff \times \delta \\ \tau^* = DestructCoeff \times \tau \end{cases} \quad (۴-۳)$$

کمیت $DestructCoeff$ ، که بعنوان ضریب خوردگی تعریف می‌شود، یکی از مزیت‌های خوبی است که در محاسبه نرخ خوردگی در رابطه نرخ خوردگی مقاله تجربی اعمال شده و بیانگر جاهایی از فلز می‌باشد که ابر کویتی دیده شده و یا ابر کویتی رویت نمی‌شود. به بیان دیگر این کمیت جدا کننده مکان‌هایی است که در آن نقاط پدیده کاویتاسیون و نرخ خوردگی وجود دارد و نقاطی است که نرخ خوردگی در آن نقاط برابر صفر می‌باشد. لذا با اعمال این ضریب خوردگی، کد مورد نظر قادر به تشخیص نقاط دارای خوردگی و نقاط دارای عدم خوردگی می‌باشد. روش اعمال کد ضریب خوردگی در ادامه بیان شده است [به پیوست ۴ رجوع گردد].

۳-۵-۲- شرح فیزیکی کمیت‌های δ و τ

۳-۵-۱- بدست آوردن رابطه بین فشار و سرعت سیال

با توجه به اینکه نمودارهای تجربی δ و τ مقاله بر حسب سرعت سیال معرفی شده‌اند، لذا برای بدست آوردن مقادیر δ و τ در فشارهای مختلف برای دو جنس استیل و آلومینیوم، با توجه به نمودارهای تجربی نرخ خوردگی که بر حسب فشار معرفی شده‌اند، با دانستن اینکه عدد کاویتاسیون (σ) در مقاله عدد ثابتی برابر ۰/۹ فرض شده است، رابطه بین فشار و سرعت سیال به صورت زیر بدست آمده است.

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\Delta P}{(1/2)\rho V^2} = \text{const} \\ \sigma_1 = \sigma_2 \rightarrow \frac{\Delta P_1}{(1/2)\rho V_1^2} = \frac{\Delta P_2}{(1/2)\rho V_2^2} \rightarrow \frac{\Delta P_1}{V_1^2} = \frac{\Delta P_2}{V_2^2} \rightarrow \Delta P_2 = \Delta P_1 \times \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \end{cases} \quad (5-3)$$

در رابطه بالا، σ عدد کاویتاسیون، ΔP اختلاف فشار سیال، ρ چگالی سیال و V سرعت سیال می باشد.

۳-۵-۲- محاسبه کمیت های δ و τ برای استیل و آلومینیوم

برای استیل در سه فشار ۱۰، ۱۵ و ۴۰ بار، و برای آلومینیوم در دو فشار ۱۰ و ۴۰ بار، سرعت سیال به کمک رابطه (۴-۳) برای فشار ۱۵ و ۴۰ بار با توجه به اینکه برای فشار ۱۰ بار، سرعت مبنای سیال، ۴۵ متر بر ثانیه در مقاله تجربی نظر گرفته شده است، در جدول (۱-۳) بدست آمده است.

جدول (۱-۳) محاسبه سرعت سیال با داشتن فشار

$P (bar)$	$V (m/s)$
15	55
40	90

به کمک نمودارهای تجربی δ و τ مقاله بیان شده که قبلاً اشاره شد و به کمک نرم افزار getdata مقادیر δ و τ در سرعت های ۴۵، ۵۵ و ۹۰ متر بر ثانیه برای فلز استیل^۱ و آلومینیوم^۲ بدست آمده است.

در جدول (۲-۳) مقادیر δ و τ بمنظور استفاده در رابطه (۴-۳) و برای تعیین دو کمیت δ^* و τ^* آورده شده است.

^۱ SS

^۲ AL

جدول (۳-۲) محاسبه δ و τ با داشتن سرعت سیال برای استیل و آلومینیوم به کمک نمودارهای تجربی

جنس فلز	P(bar)	V(m/s)	$\delta (\mu m)$	$\tau(h)$
SS	10	45	38	97.29
SS	15	55	39.96	22.53
SS	40	90	56.93	1.6
AL	10	45	60.05	2.497
AL	40	90	88.32	0.027

۳-۶- بدست آوردن رابطه نرخ خوردگی برای استیل و آلومینیوم

برای یک جنس مشخص، و بر اساس سرعت سیال ورودی، سه پارامتر δ ، τ و D مقدار ثابتی هستند. در زیر رابطه بین نرخ خوردگی برای قطرهای متفاوت با داشتن نرخ خوردگی بدست آمده از حل عددی برای یک قطر مشخص و در یک فشار معین، بیان می شود. با محاسبه نرخ خوردگی برای یک جنس مشخص و در یک فشار معین، و به کمک ضریب عددی K که در زیر معرفی شده است، نرخ خوردگی را برای سایر قطرها بدست آورده شده و سپس نمودار نرخ خوردگی بر حسب قطر معادل خوردگی در فصل چهارم ترسیم شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقاله مقایسه شده است [۲۸].

$$\left\{ \begin{array}{l} N_p = \frac{8}{\pi(\delta)^2 \tau} e^{-(2D/\delta)} \\ N_1 = \frac{8}{\pi(\delta)^2 \tau} e^{-(2D_1/\delta)}, N_2 = \frac{8}{\pi(\delta)^2 \tau} e^{-(2D_2/\delta)} \\ \frac{N_2}{N_1} = e^{(2D_1/\delta - 2D_2/\delta)} \rightarrow N_2 = N_1 \times e^{(2/\delta)(D_1 - D_2)} \end{array} \right. \quad (۳-۶)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K = e^{(2/\delta)(D_1 - D_2)} \\ N_2 = N_1 \times K \end{array} \right.$$

در رابطه (۳-۶)، K ضریب عددی ثابتی است که با ضرب در مقدار عددی نرخ خوردگی بدست آمده از حل عددی برای یک قطر مشخص، نرخ خوردگی را برای قطرهای دیگر بدست خواهد داد.

۳-۷- اصل انتقال نرخ خوردگی برای استیل و آلومینیوم

یکی از بهترین کارهای انجام شده در تحقیق، روش اصل انتقال خوردگی کاویتاسیون می باشد که این اصل انتقال به دو دسته تقسیم می شود. دسته اول، انتقال از یک شرایط فیزیکی جریان به شرایط فیزیکی جدید، مثلاً از یک فشار و سرعت مشخص به فشار و سرعت مشخص دیگر. دسته دوم شرایط جریان ثابت می باشد، اما ماده تحت آزمایش عوض می شود. روش اصل انتقال نرخ خوردگی، مبتنی بر داشتن داده های نرخ خوردگی کاویتاسیون برای یک فلز با جنس و فشار معلوم و در یک قطر مشخص می باشد. به بیان دیگر کافی است برای تعداد محدودی از جریان ها و تعداد محدودی مواد، نتایج خوردگی را داشته باشیم تا بتوانیم برای شرایط جریان دیگر و مواد دیگر، نتایج خوردگی را برون یابی کنیم. لذا برای یک جنس معلوم مثلاً استیل در یک فشار مشخص، با داشتن داده های نرخ خوردگی برای فلز استیل، داده های حاصل از نرخ خوردگی برای جنس دیگر، مثلاً آلومینیوم در همان فشار مشخص و قطر معلوم بدست آورده می شود که نتایج و نمودارهایشان در فصل چهارم آورده شده و نتایج حاصل از اصل انتقال با نتایج تجربی مقایسه و بررسی شده است.

$$\begin{cases} N_1 = \frac{8}{\pi \delta_1^2 \tau_1} e^{-(2D/\delta_1)}, N_2 = \frac{8}{\pi \delta_2^2 \tau_2} e^{-(2D/\delta_2)} \\ \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) e^{2D((1/\delta_1)-(1/\delta_2))} \\ N_2 = N_1 \times \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) e^{2D((1/\delta_1)-(1/\delta_2))} \end{cases} \quad (7-3)$$

$$\begin{cases} K = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right) e^{2D((1/\delta_1)-(1/\delta_2))} \\ N_2 = N_1 \times K \end{cases} \quad (8-3)$$

در رابطه (۸-۳) N_2 نرخ خوردگی فلزی است که با داشتن داده‌های نرخ خوردگی فلز دیگر یعنی N_1 ، به کمک ضریب عددی K بدست می‌آید.

۸-۳- بدست آوردن رابطه نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت

متغیر

بمنظور توسعه کد مدل نرخ خوردگی و با هدف انجام یک کار جدید و قابل قبول، و با توجه به اینکه نرخ خوردگی علاوه بر وابستگی به سرعت بالک جریان، که قبلاً اشاره شد، به سرعت محلی سیال وابسته است، از سرعت محلی سیال که در مکان‌های مختلف متفاوت می‌باشد، استفاده کرده و به محاسبه نرخ خوردگی در این حالت پرداخته شده است. در حالت قبل که سرعت بالک وجود داشت آقای ژان پیر فرانک و همکارانش برای بدست آوردن مقادیر δ و τ از نمودارهای تجربی که اشاره شد، بهره گرفتند. در این تحقیق چون باید در روابط، سرعت محلی جایگزین شود، لذا توابعی بر حسب سرعت پیشنهاد داده می‌شود. این توابع از نمودارهای تجربی δ و τ مقاله بدست آمده‌اند. برای بدست آوردن این معادلات از دو نقطه نمودارهای تجربی که فشار و سرعت سیال دقیقاً مشخص می‌باشند استفاده شده است. در ادامه به تشریح چگونگی استخراج معادلات پرداخته خواهد شد. لذا برای دو جنس استیل و آلومینیوم در فشارهای ۱۰، ۱۵ و ۴۰ بار، مقادیر نرخ خوردگی حفره از نتایج عددی بر حسب قطر معادل حفره، در قطرهای متفاوت بدست آمده‌اند که نتایج نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و مقایسه آن با نتایج تجربی موجود در نمودارهای مقاله که بر حسب سرعت بالک می‌باشند در فصل چهارم آورده شده است. باید این نکته را اشاره کرد که در حالت سرعت متغیر نتایج تجربی‌ای مبنی بر حالت سرعت محلی وجود نداشت و در تحقیق فقط جهت توسعه کد مدل خوردگی، نتایج عددی با نتایج تجربی موجود در حالت سرعت بالک مقایسه شده است. و ادعا می‌شود که اگر نتایج تجربی‌ای در حالت سرعت متغیر وجود داشت نتایج عددی نرخ خوردگی حاصل از سرعت متغیر ملاک درستی خواهد بود.

۳-۸-۱- محاسبه کمیت‌های δ و τ استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر

در حالت سرعت متغیر (سرعت محلی)، به ازای یک سرعت ورودی ثابت که بعنوان شرط مرزی مسأله تعریف می‌شود، سرعت برای هر سلول در مکان‌های مختلف، متغیر می‌باشد. طریقه اعمال کد مربوط به کمیت‌های δ و τ برای محاسبه نرخ خوردگی در فصل چهارم تشریح شده است. با توجه به نمودارهای تجربی δ و τ ، مقاله تجربی، کمیت δ برای جنس استیل و آلومینیوم، بر حسب سرعت سیال، به صورت توانی از ۷۵٪ تغییر کرده و در حال افزایش می‌باشد. پارامتر τ برای جنس استیل و آلومینیوم، بر حسب سرعت سیال، به صورت توانی از ۶/۵-، به صورت لگاریتمی تغییر کرده و در حال کاهش می‌باشد. معادلات تقریبی δ و τ به کمک نمودارها و با استفاده از اطلاعات δ و τ دو نقطه بر حسب سرعت ورودی ثابت شرط مرزی، به صورت زیر بدست آمده‌اند [۲۸].

$$\delta = aV^{0.75} + b$$

$$\begin{cases} (50, 40) \\ (80, 60) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 40 = 18.81a + b \\ 60 = 26.75a + b \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a = 2.52 \\ b = -7.3 \end{cases} \quad (9-3)$$

$$\delta = 2.52V^{0.75} - 7.3$$

رابطه (۹-۳) بیان‌گر، معادله δ بر حسب سرعت جریان متغیر برای جنس استیل می‌باشد.

$$\delta = aV^{0.75} + b$$

$$\begin{cases} (60, 80) \\ (80, 100) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 80 = 21.56a + b \\ 100 = 26.75a + b \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a = 3.85 \\ b = -3 \end{cases} \quad (10-3)$$

$$\delta = 3.85V^{0.75} - 3$$

رابطه (۱۰-۳) بیان‌گر، معادله δ بر حسب سرعت جریان متغیر برای جنس آلومینیوم می‌باشد.

$$\log \tau = b - 6.5 \log V$$

$$\begin{cases} \log 10 = b - 6.5 \log 60 \\ \log 1.69 = b - 6.5 \log 80 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 1 = b - 6.5 \log 60 \\ 0.23 = b - 6.5 \log 80 \end{cases} \rightarrow b = 12.56 \quad (11-3)$$

$$\log \tau = -6.5 \log V + 12.56 \rightarrow \tau = 10^{(-6.5 \log V + 12.56)}$$

رابطه (۱۱-۳) بیان‌گر، معادله τ بر حسب سرعت جریان متغیر برای جنس استیل می‌باشد.

$$\log \tau = b - 6.5 \log V$$

$$\begin{cases} \log 0.1 = b - 6.5 \log 70 \\ \log 1 = b - 6.5 \log 50 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -1 = b - 6.5 \log 70 \\ 0 = b - 6.5 \log 50 \end{cases} \rightarrow b = 11 \quad (12-3)$$

$$\log \tau = -6.5 \log V + 11 \rightarrow \tau = 10^{(-6.5 \log V + 11)}$$

رابطه (۱۲-۳) بیان‌گر، معادله τ بر حسب سرعت جریان متغیر برای جنس آلومینیوم می‌باشد.

۳-۹- تشریح چگونگی بدست آوردن نرخ خوردگی حاصل از حل عددی

برای بدست آوردن نرخ خوردگی^۱ حاصل از حل عددی، در مکان‌هایی که ابر کویتی به خوبی مشاهده می‌شود، مقادیر نرخ خوردگی در یک فاصله افقی برای هندسه مورد نظر، در زمان‌های مختلف بدست آمده و سپس از متوسط گیری تجمعی استفاده شده و یک مقدار نرخ خوردگی برای یک زمان مناسب که جواب‌های عددی همگرا شده‌اند، بدست آورده شده است.

^۱ Pitting rate

فصل ۴. کد عددی و نتایج شبیه سازی

عددی

۴-۱- ویژگی‌های حل عددی

یک ویژگی حل عددی ارائه شده، حل جریان به صورت غیر دائم و گذرا می‌باشد. تلفیق حل معادله انتقال نسبت حجمی با معادلات جریان در این تحقیق، یک الگوریتم عددی مناسب برای تحلیل گذرای کاویتاسیون ایجاد می‌نماید که پایدار بوده و سرعت همگرایی قابل قبولی دارد.

برای مدل‌سازی دو سیال، تراکم‌ناپذیر و غیر مخلوط شونده در نظر گرفته شده و از مدل روش نسبت حجمی بهره گرفته شده است چرا که یافتن مرز بین فازها در ناحیه کاویتی در این تحقیق دارای اهمیت می‌باشد.

خصوصیات سیال مورد بررسی بصورت ترکیبی از مایع و بخار به نسبت کسر حجمی هر یک در نظر گرفته می‌شود و یک معادله مُمَنتوم حل می‌گردد.

۴-۲- مدل‌سازی نرخ خوردگی کاویتاسیون

به منظور تحلیل نرخ خوردگی پدیده کاویتاسیون در تحقیق حاضر به کمک کدهای عددی، همان طور که در فصل سوم بیان شد، مدل استفاده شده مدل کانز می‌باشد که پایه و اساس کار انجام شده بر اساس حلگر `interPhaseChangeFoam` می‌باشد [به پیوست ۲ رجوع گردد].

بمنظور معرفی کدهای اعمال شده در تحقیق [به پیوست ۳ رجوع گردد].

۴-۳- جریان همراه با پدیده کاویتاسیون در نازل

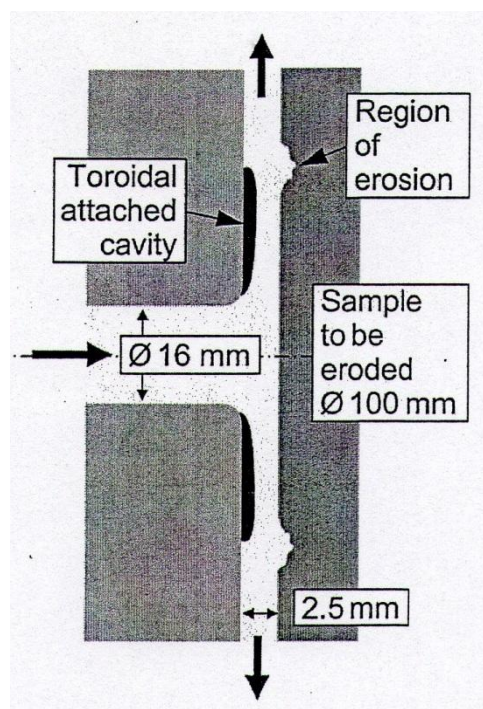
در تحقیق حاضر برای بررسی نرخ خوردگی و اصل انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون، ساختار جریان دو فاز بوده و در یک نازل مورد مطالعه قرار گرفته است. ژان پیر فرانک^۱ و همکارانش برای هندسه نازل مورد بررسی نتایج تجربی‌ای برای نرخ خوردگی حفره و اصل انتقال بدست آوردند که در ادامه با حل عددی، به مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی پرداخته شده است.

^۱ jean-Pierre Franc, Michel Riondet, Ayat Karimi, Georges L.Chahine

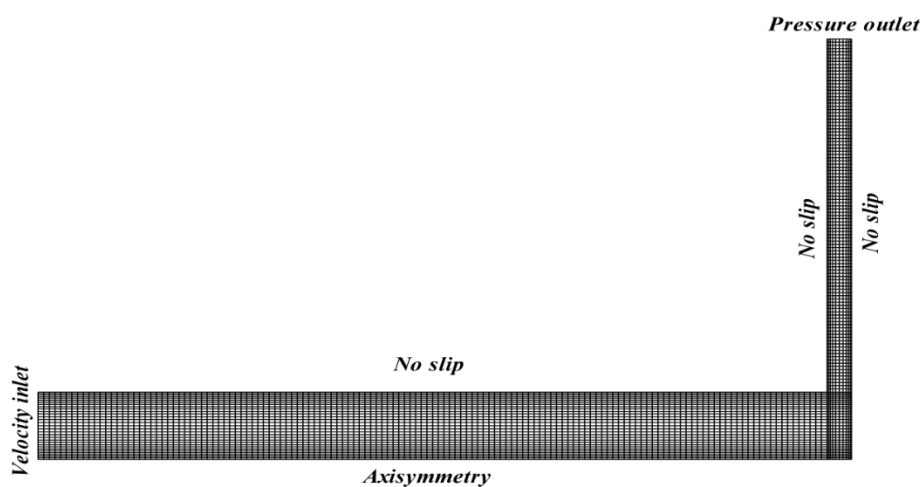
۴-۳-۱- شرایط مرزی

در شرط مرزی خروجی مقدار فشار ۱۰۰۰۰۰۰ پاسکال قرار داده می‌شود و گرادیان سرعت صفر در نظر گرفته می‌شود. در شرط مرزی ورودی مقدار سرعت برابر ۴۵ متر بر ثانیه قرار داده شده است. در تمام آزمایش‌ها، محدوده فشار به گونه‌ای تنظیم شده است که وقتی سرعت جریان تغییر می‌کند عدد کاویتاسیون ثابت باقی بماند. این تضمین می‌کند که طول حفره‌ها تقریباً برای تمام تست‌ها ثابت بماند و یک ثباتی بین جریان‌های مختلف در سرعت‌های مختلف وجود داشته باشد. در دیواره‌های پایین و بالا و اطراف، همان‌طور که در شکل ۴-۲ هم قابل مشاهده است شرط عدم لغزش اعمال شده است. مدل دو فازی حجم سیال برای مدل‌سازی جریان دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی پدیده کاویتاسیون از مدل کانز که بر مبنای معادله انتقال کسر حجمی مایع می‌باشد؛ بهره گرفته شده است. در شکل ۴-۱ طرحی از ناحیه تحت تست آورده شده است. قسمت تحت آزمایش متقارن محوری بوده [۲۹] و از یک نازل صاف با قطر ۱۶ میلی متر که سرعت بالایی به جریان می‌دهد، ساخته شده است. جریان توسط یک نمونه برای اینکه دچار خوردگی شود، منحرف می‌شود که این نمونه در فاصله ۲/۵ میلی متری از خروجی نازل واقع شده است و در بین دو صفحه دایره‌ای شکل توسط صفحه نمونه‌ای که دهانه خروجی نازل است منتشر می‌شود. ابر کاواک، شکل حفره‌های حلقوی که به دهانه نازل متصل هستند به خود می‌گیرد. خوردگی ناشی از کاویتاسیون در منطقه نزدیک حفره‌ها به شکل حلقه‌های مدوری که قطر متوسط آن‌ها ۵۰ میلی متر است مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۲ هم قابل مشاهده است شبکه‌بندی و شرایط مرزی برای نازل به صورت دو بعدی انتخاب شده است. برای این مقصود بایستی یک مرز به صورت متقارن محوری تعریف گردد؛ حال برای تعریف این مرز در نرم‌افزار آپن‌فوم، بایستی از یکسری دستورات و برنامه‌های اجرایی خاص این نرم‌افزار نظیر حلگر makeAxialMesh استفاده گردد. [به پیوست ۵ رجوع شود]

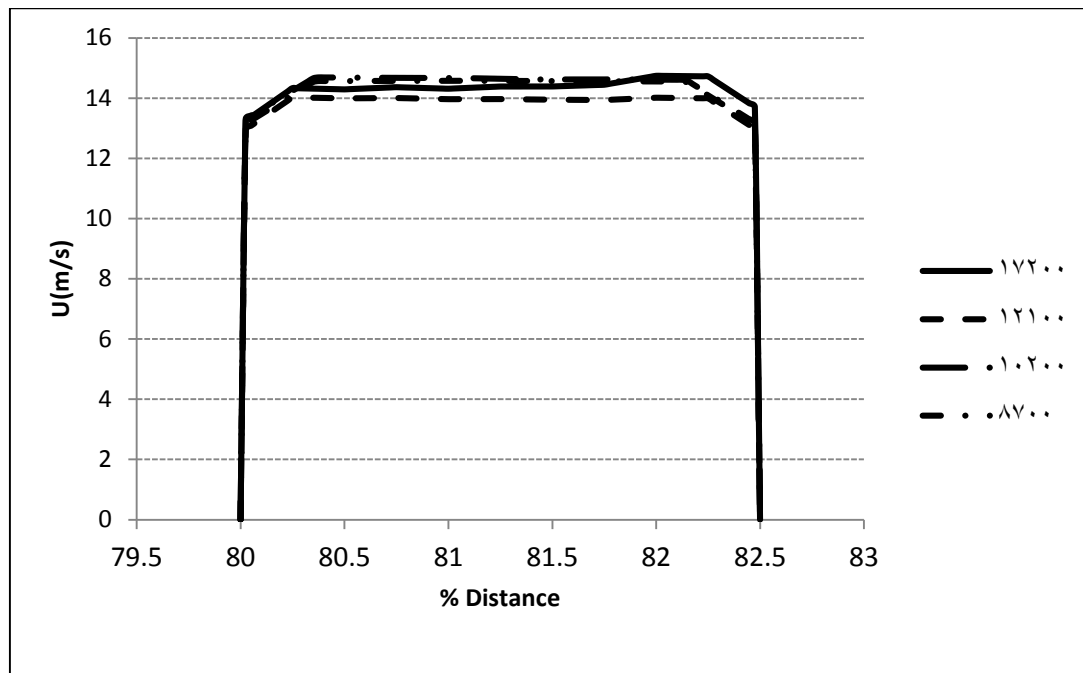
نتایج مربوط به استقلال از شبکه برای این هندسه، در نمودار شکل ۴-۳ آورده شده است. همان طور که از این نمودار هم قابل برداشت است، از تعداد ۱۷۲۰۰ گره در شبکه بندی، سرعت در ناحیه خروجی نازل تغییر چندانی با افزایش تعداد شبکه ها نمی یابد، پس با این تحلیل شبکه بندی با تعداد ۱۷۲۰۰ گره به عنوان شبکه ایده آل حل در نظر گرفته شده است. در این نمودار محور افقی فاصله بی بعد شده خروجی نازل را نشان می دهد و محور عمودی نیز سرعت جریان در راستای قائم را نمایش می دهد:



شکل ۴-۱ طرحی از ناحیه تحت آزمایش [۲۸]

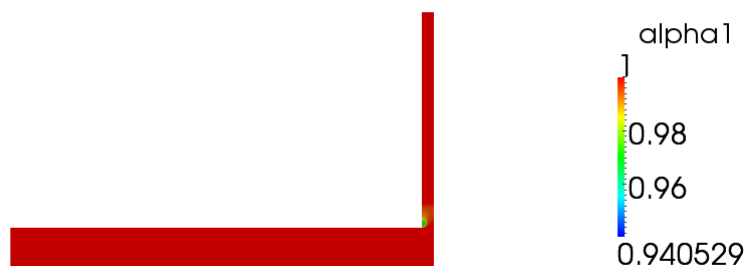


شکل ۴-۲ شبکه بندی و شرایط مرزی نازل [۲۹]

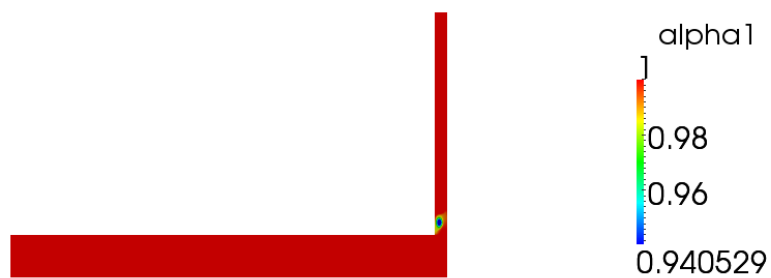


شکل ۳-۴ بررسی استقلال از شبکه محاسباتی نازل

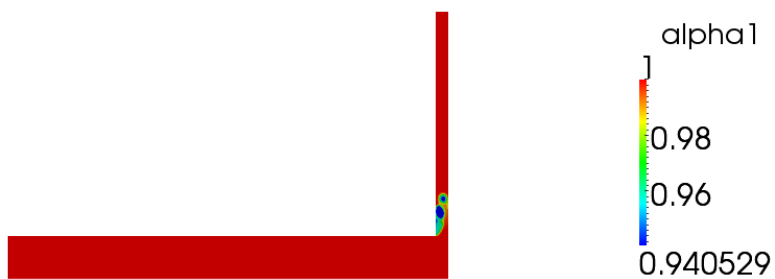
نتایج کیفی آورده شده در شکل ۴-۴ جدایی کاواک ابری را به عنوان نمونه با استفاده از مدل عددی کانز در بخش خروجی نازل نمایش می‌دهد. ابتدا یک کاواک کوچک در قسمت خروجی نازل شکل می‌گیرد. این ابر کاواک کم‌کم رشد کرده تا به انتهای خروجی نازل رسیده، سپس کاواک‌ها در انتهای نازل با گذشت زمان جدا می‌گردند. کاواک‌های جدا شده، به پایین دست جریان منتقل شده و با افزایش فشار به مایع تبدیل می‌شوند.



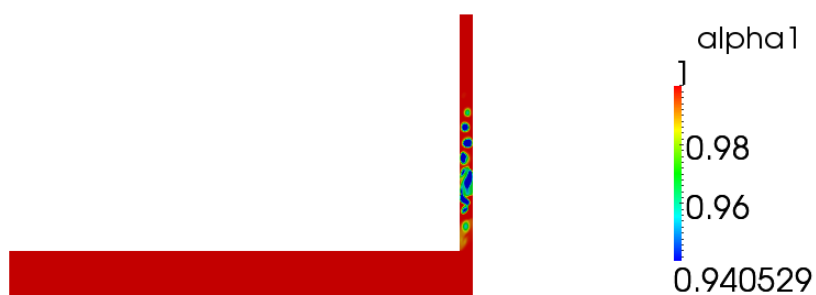
(۱)



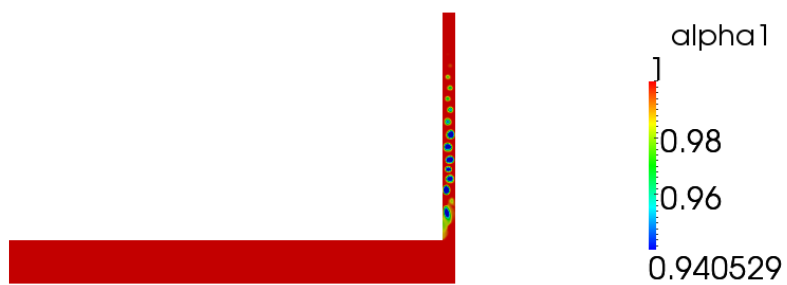
(۲)



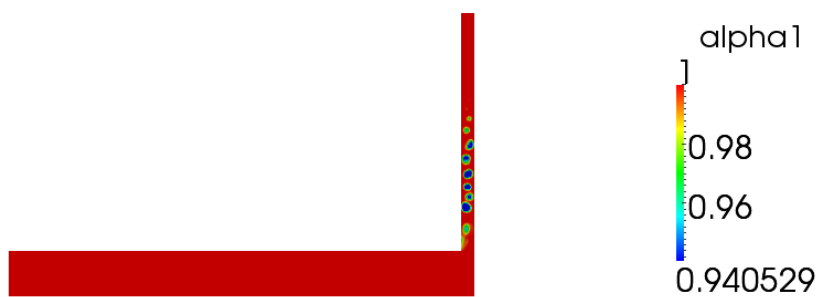
(۳)



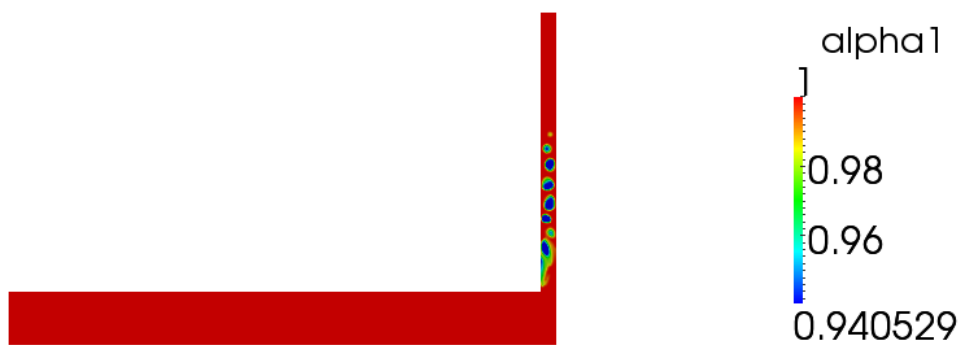
(۴)



(۵)



(۶)



(۷)

فرآیند ایجاد و جدایی کاواک ابری در نازل

شکل ۴-۴

در ادامه نتایج کمی بدست آمده از حل عددی مربوط به هر یک از حالات گفته شده در فصل سوم تحقیق مورد بحث آورده شده است. گام زمانی به گونه ای تنظیم شده است که عدد کورانت همواره کوچکتر از 0.5 باشد تا همگرایی صحت نتایج از دقت مناسبی برخوردار باشند. در نمودارهای شکل زیر نتایج مربوط به نرخ خوردگی کاویتاسیون بدست آمده برای هر حالت و جنس فلز مشخص نمایش داده شده است. این نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی ژان پیر فرانک^۱ و همکارانش مقایسه شده اند [۲۸].

۴-۳-۲- مدل کانز

همان طور که اشاره شد، مدل دو فازي حجم سیال برای مدل سازی جریان دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است. در این قسمت به منظور مدل سازی پدیده کاویتاسیون در مدل کانز که بر مبنای معادله انتقال کسر حجمی مایع است بهره گرفته شده است. ضرایب ثابت این مدل برای جریان به صورت پیش فرض $C_{prod} = 100$ و $C_{dest} = 100$ در نظر گرفته شده اند [به پیوست ۳ رجوع گردد].

۴-۴- نرخ خوردگی برای استیل^۲ در حالت سرعت ثابت

۴-۴-۱- نتایج عددی نرخ خوردگی برای استیل در فشار ۱۰ بار

جدول (۴-۱) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(CFD)$	D_1	D_2	$\delta(constant)$	K	$N_2(CFD)$
0.28	10	20	38	0.591	0.28
0.28	10	30	38	0.349	0.17
0.28	10	40	38	0.206	0.11
0.28	10	50	38	0.122	0.057
0.28	10	60	38	0.072	0.034
0.28	10	70	38	0.043	0.0201

^۱ Jean-Pierre Franc, Michel Riondet, Ayat Karimi, Georges L.Chahine

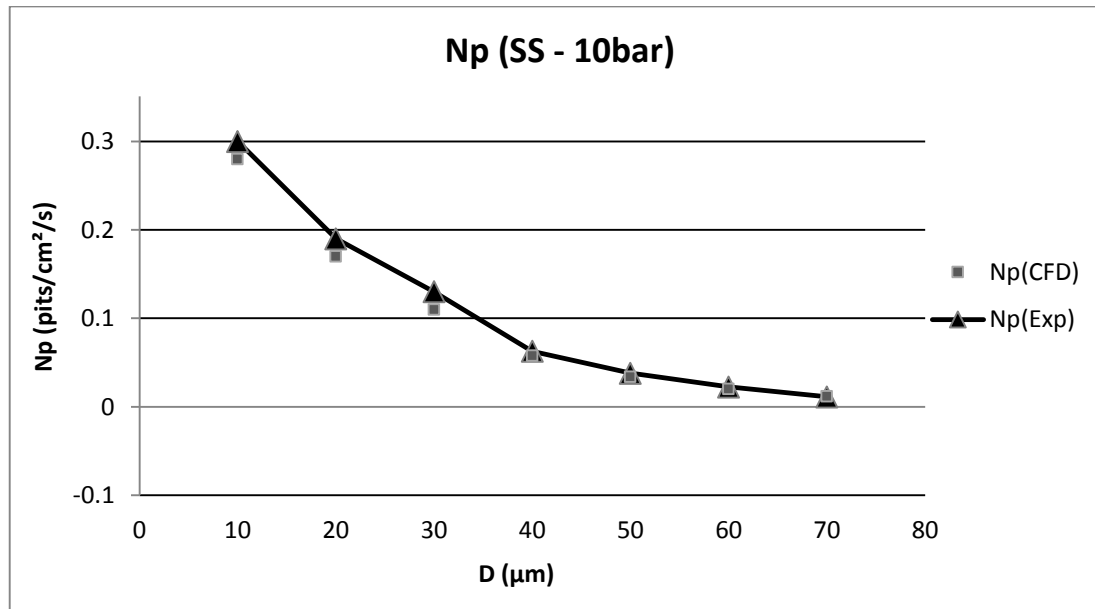
^۲SS

جدول (۴-۲) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی مدل کانز برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	0.28	0.3	6.67
20	0.17	0.19	10.53
30	0.11	0.13	15.38
40	0.057	0.063	8.12
50	0.034	0.038	10.53
60	0.0201	0.0224	10.27
70	0.0119	0.0112	6.25

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای استیل در

فشار ۱۰ بار در بازه‌ای با میزان کمینه ۶/۲۵ و میزان بیشینه ۱۵/۳۸ قرار گرفته است.



شکل ۴-۵ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت ثابت

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

داده‌های نمودار بالا در جدول (۴-۱) و (۴-۲) به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته شده؛ در ستون

اول جدول (۴-۱) مقادیر بدست آمده نرخ خوردگی از حل عددی برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت

سرعت ثابت نشان داده شده، در ستون دوم مقادیر مربوط به قطر ثابت و در ستون سوم مقادیر مربوط به قطرهای دیگر، در ستون چهارم مقدار ثابت δ ، در ستون پنجم ضریب ثابت K برای هر قطر که تشریح آن در فصل سوم بیان شد. در ستون ششم، مقدار نرخ خوردگی برای قطرهای دیگر به کمک ضریب ثابت K و بدون حل عددی بدست آورده شده است. در جدول (۴-۲) در ستون اول مقادیر قطر معادل نرخ خوردگی، در ستون دوم مقادیر مربوط به نرخ خوردگی عددی، در ستون سوم مقادیر مربوط به نتایج تجربی موجود و در ستون انتهایی میزان درصد خطای نسبی مربوط به این حالت در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است.

۴-۴-۲- نتایج عددی نرخ خوردگی استیل در فشار ۱۵ بار

همانند آنچه برای استیل در فشار ۱۰ بار توضیح داده شد، داده‌های مربوط به حل عددی برای استیل در فشار ۱۵ بار نیز که در نمودار شکل ۴-۶ مشاهده گردید، در جداول (۴-۳) و (۴-۴) میزان درصد خطای نسبی مربوط به این حالت در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی محاسبه شده و به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است :

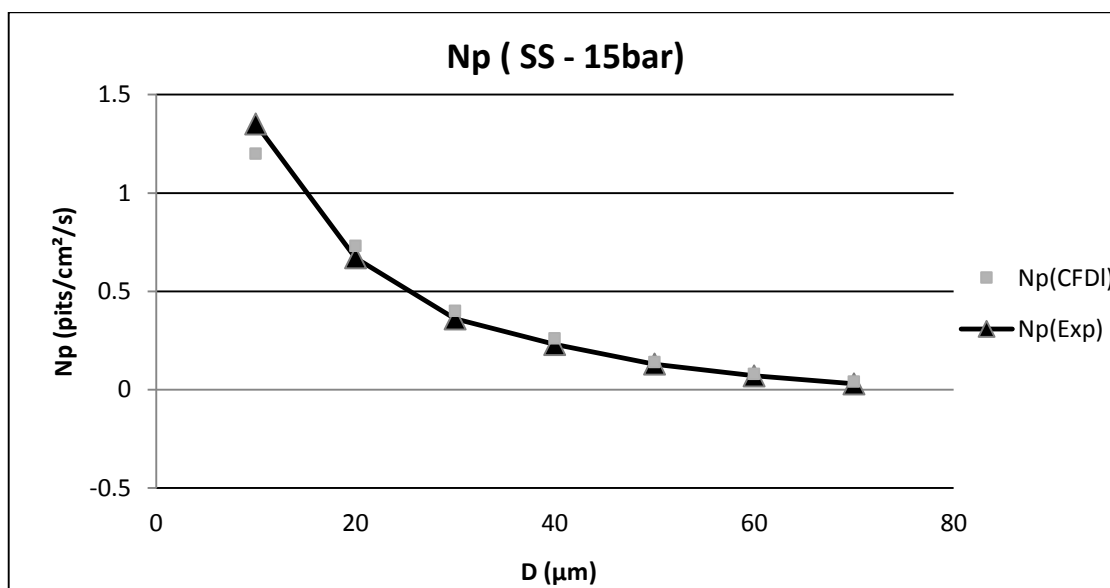
جدول (۴-۳) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(CFD)$	D_1	D_2	$\delta(constant)$	K	$N_2(CFD)$
1.2	10	20	39.96	0.606	0.73
1.2	10	30	39.96	0.368	0.4
1.2	10	40	39.96	0.223	0.26
1.2	10	50	39.96	0.135	0.14
1.2	10	60	39.96	0.082	0.08
1.2	10	70	39.96	0.050	0.04

جدول (۴-۴) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی مدل کانز برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	1.2	1.35	11.11
20	0.73	0.67	8.96
30	0.4	0.36	11.11
40	0.26	0.23	13.04
50	0.14	0.13	7.69
60	0.08	0.07	14.29
70	0.04	0.03	33.33

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای استیل در فشار ۱۵ بار در بازه‌ای با میزان کمینه ۷/۶۹ و میزان بیشینه ۳۳/۳۳ قرار گرفته است.



شکل ۴-۶ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۵ بار در حالت سرعت ثابت

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

۳-۴-۴- نتایج عددی نرخ خوردگی استیل در فشار ۴۰ بار

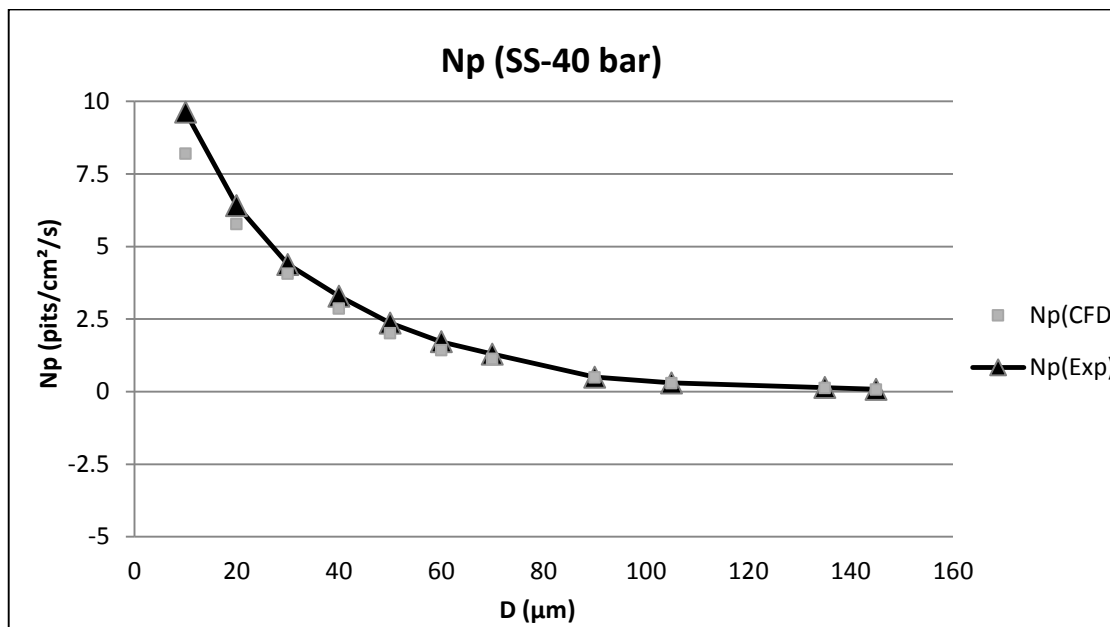
جدول (۵-۴) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(CFD)$	D_1	D_2	$\delta(constant)$	K	$N_2(CFD)$
8.2	10	20	56.93	0.704	5.77
8.2	10	30	56.93	0.495	4.06
8.2	10	40	56.93	0.349	2.86
8.2	10	50	56.93	0.245	2.01
8.2	10	60	56.93	0.173	1.42
8.2	10	70	56.93	0.121	1.12
8.2	10	90	56.93	0.060	0.49
8.2	10	105	56.93	0.036	0.29
8.2	10	135	56.93	0.012	0.12
8.2	10	145	56.93	0.008	0.07

جدول (۶-۴) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p(CFD)$	$N_p(Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	8.2	9.63	14.85
20	5.77	6.41	9.98
30	4.06	4.38	7.3
40	2.86	3.29	13.06
50	2.01	2.36	14.83
60	1.42	1.72	17.44
70	1.12	1.29	13.18
90	0.49	0.5	2
105	0.29	0.3	3.33
135	0.12	0.14	14.29
145	0.07	0.08	12.5

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای استیل در فشار ۱۵ بار در بازه ای با میزان کمینه ۲ و میزان بیشینه ۱۷/۴۴ قرار گرفته است.



شکل ۴-۷ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت ثابت

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

از سه نمودار نرخ خوردگی استیل در حالت سرعت ثابت و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود [۲۸] می توان دریافت که با ثابت بودن δ و τ برای یک جنس مشخص، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می یابد. در ادامه با بررسی نتایج نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار و ۴۰ بار و مقایسه نتایج عددی حاصل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود که نرخ خوردگی کاپیتاسیون روندی مشابه با نتایج استیل دارد. نیز این مورد قابل ذکر می باشد که می توان برای هر قطر به کمک ضریب عددی K مقدار نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای استیل بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است [۲۸].

۴-۴-۴ نتایج عددی نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار

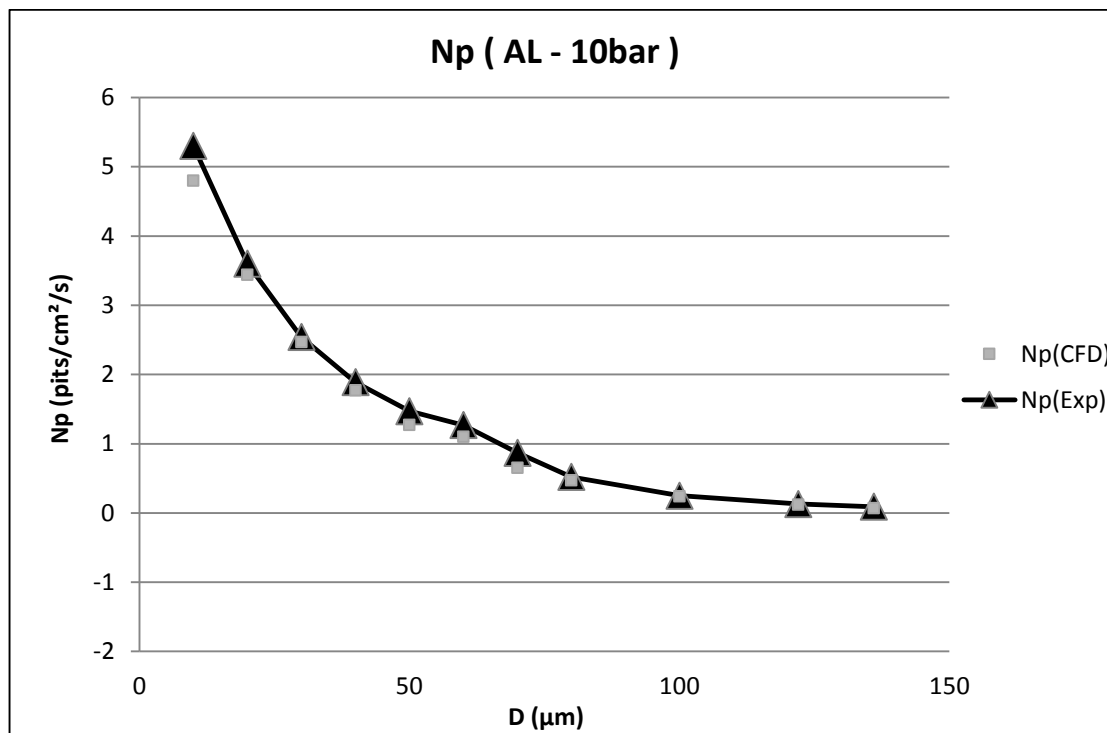
جدول (۷-۴) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(CFD)$	D_1	D_2	$\delta(constant)$	K	$N_2(CFD)$
4.8	10	20	60.05	0.646	3.1
4.8	10	30	60.05	0.473	2.27
4.8	10	40	60.05	0.368	1.77
4.8	10	50	60.05	0.264	1.27
4.8	10	60	60.05	0.189	1.1
4.8	10	70	60.05	0.136	0.65
4.8	10	80	60.05	0.097	0.47
4.8	10	100	60.05	0.042	0.20
4.8	10	122	60.05	0.024	0.12
4.8	10	136	60.05	0.0125	0.06

جدول (۸-۴) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p(CFD)$	$N_p(Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	4.8	5.3	9.43
20	3.1	3.6	4.44
30	2.27	2.54	2.76
40	1.77	1.89	6.35
50	1.27	1.47	13.61
60	1.1	1.27	13.39
70	0.65	0.87	25.29
80	0.47	0.52	9.62
100	0.20	0.25	4
122	0.12	0.13	7.69
136	0.06	0.09	22.22

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در بازه‌ای با میزان کمینه ۲/۷۶ و میزان بیشینه ۲۵/۲۹ قرار گرفته است.



شکل ۴-۸ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت ثابت

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

مشابه آنچه در نمودارهای استیل در سه فشار دیده شد، از دقت در نمودار نرخ خوردگی آلومینیوم در حالت سرعت ثابت و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می توان دریافت که با ثابت بودن δ و τ برای یک جنس مشخص، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی^۱ برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی^۲ کاتیتاسیون کاهش می یابد. توضیحات کامل تر در ادامه داده شده است.

^۱ Pit equivalent diameter based on pit flat surface area

^۲ Pitting rate

۵-۴-۴- نتایج عددی نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار

جدول (۹-۴) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از حل عددی و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(CFD)$	D_1	D_2	$\delta(constant)$	K	$N_2(CFD)$
225.2	10	20	88.32	0.797	179.57
225.2	10	30	88.32	0.636	143.18
225.2	10	40	88.32	0.507	114.17
225.2	10	50	88.32	0.404	91.03
225.2	10	60	88.32	0.322	72.58
225.2	10	70	88.32	0.257	57.88
225.2	10	80	88.32	0.205	46.15
225.2	10	95	88.32	0.146	32.85
225.2	10	125	88.32	0.074	16.66
225.2	10	145	88.32	0.047	10.59
225.2	10	165	88.32	0.030	6.73
225.2	10	182	88.32	0.020	4.58
225.2	10	203	88.32	0.013	2.25

این مورد قابل ذکر می باشد که می توان برای هر تعداد قطر لازم به کمک ضریب عددی K مقدار

نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار بدست آورد.

نیز این مورد قابل ذکر می باشد که می توان برای هر قطر به کمک ضریب عددی K مقدار نرخ

خوردگی کاپیتاسیون را برای آلومینیوم بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل

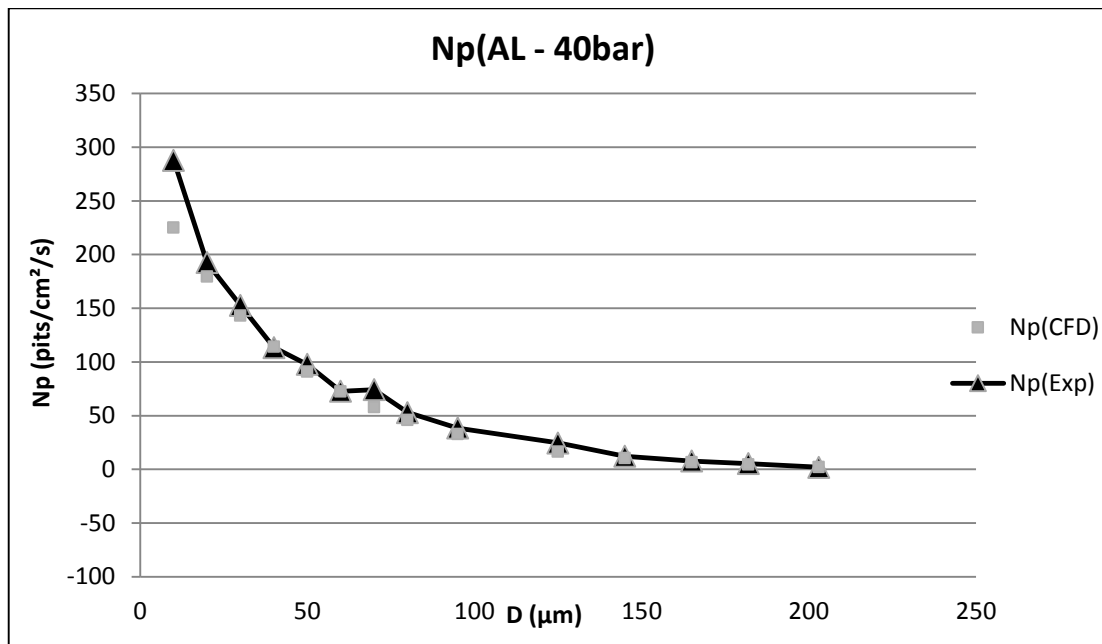
از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است [۲۸].

جدول (۴-۱۰) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	225.2	287.86	21.77
20	179.57	192.65	6.8
30	143.18	152.63	6.19
40	114.17	113.51	0.58
50	91.03	97.85	7.11
60	72.58	72.77	0.26
70	57.88	74.26	22.06
80	46.15	52.94	12.83
95	32.85	38.53	14.74
125	16.66	24.68	32.51
145	10.59	12.28	13.76
165	6.73	7.88	14.6
182	4.58	5.48	16.42
203	2.25	1.99	13.10

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای آلومینیوم

در فشار ۴۰ بار در بازه ای با میزان کمینه ۰/۲۶ و میزان بیشینه ۳۲/۵۱ قرار گرفته است.



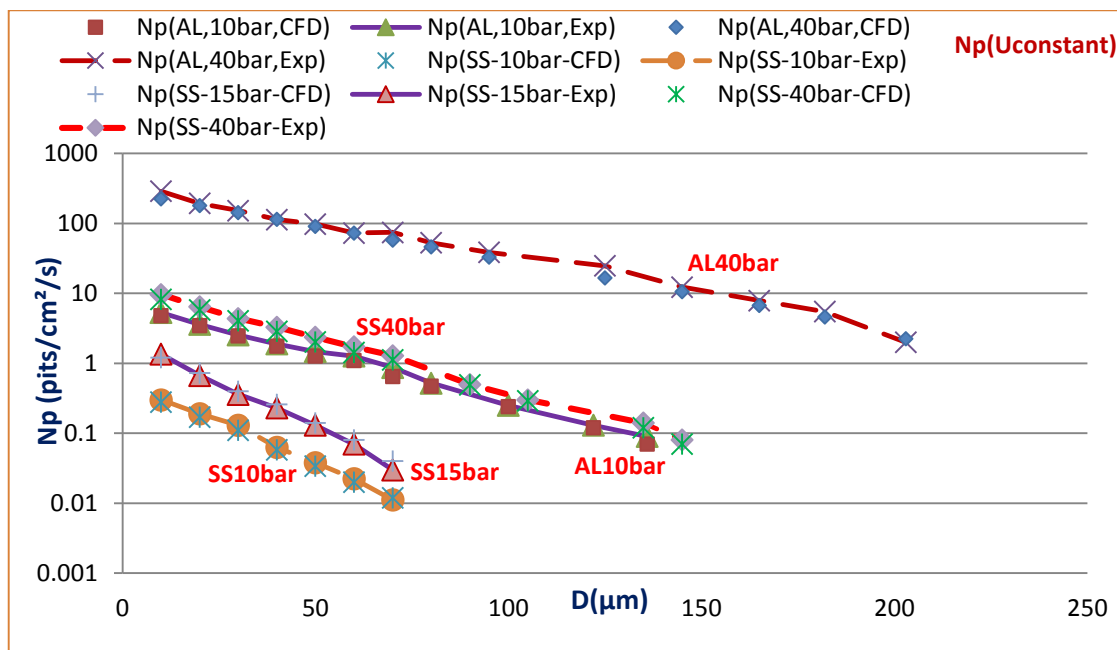
شکل ۹-۴ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت ثابت و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

از دو نمودار نرخ خوردگی آلومینیوم در حالت سرعت ثابت و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می‌توان دریافت که با ثابت بودن δ و τ برای یک جنس مشخص، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می‌یابد. در ادامه به بحث درباره روند تغییرات نرخ خوردگی با قطر معادل خوردگی برای هر دو جنس استیل و آلومینیوم در فشارهای آزمایش شده پرداخته شده است. نیز این مورد قابل ذکر می‌باشد که می‌توان برای هر قطر به کمک ضریب عددی K مقدار نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای هر فلز بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است.

۴-۵- بحث روی نمودارهای نرخ خوردگی برای استیل و آلومینیوم در حالت

سرعت ثابت

از پنج نمودار نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت ثابت که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است، و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می‌توان دریافت که با ثابت بودن δ و τ برای یک جنس مشخص، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می‌یابد. نرخ خوردگی کاپیتاسیون طبق روابط بیان شده در فصل سوم، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. نتایج تست نرخ خوردگی حفره نشان داد که، نرخ خوردگی کاپیتاسیون وابسته به دو کمیت قطر معادل حفره (δ) و زمان پوشش (τ) می‌باشد. نتایج آزمایشات تجربی بیان می‌کنند که قطر معادل حفره (δ) به طور مختصر با توانی از سرعت جریان ($V^{0.75}$) افزایش می‌یابد، نیز زمان پوشش (τ) به طور تصاعدی با سرعت جریان با یک توان با قوه ۶/۵- کاهش می‌یابد. این اثر احتمالاً به علت افزایش فرکانس حباب‌های فروپاشی شده و هم افزایش فشار ضربه ارتفاعی با سرعت جریان می‌باشد. هر دو دلیل موافق این هستند که زمان پوشش به طور زیادی با سرعت جریان در عدد کاپیتاسیون ثابت، افزایش می‌یابد. هر دو کمیت فوق در یک کمیت $\frac{1}{\delta^2 \tau}$ در رابطه نرخ خوردگی کاپیتاسیون ترکیب شده‌اند که واحد یکسانی مشابه نرخ حفره‌های خوردگی دارد. در ادامه نموداری از پنج حالت سرعت ثابت برای استیل و آلومینیوم آورده شده است و نتایج حل عددی با نتایج تجربی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴-۱۰ نتایج حل عددی برای استیل و آلومینیوم در حالت سرعت ثابت و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی

۴-۶- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم

۴-۶-۱- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۱۰ بار

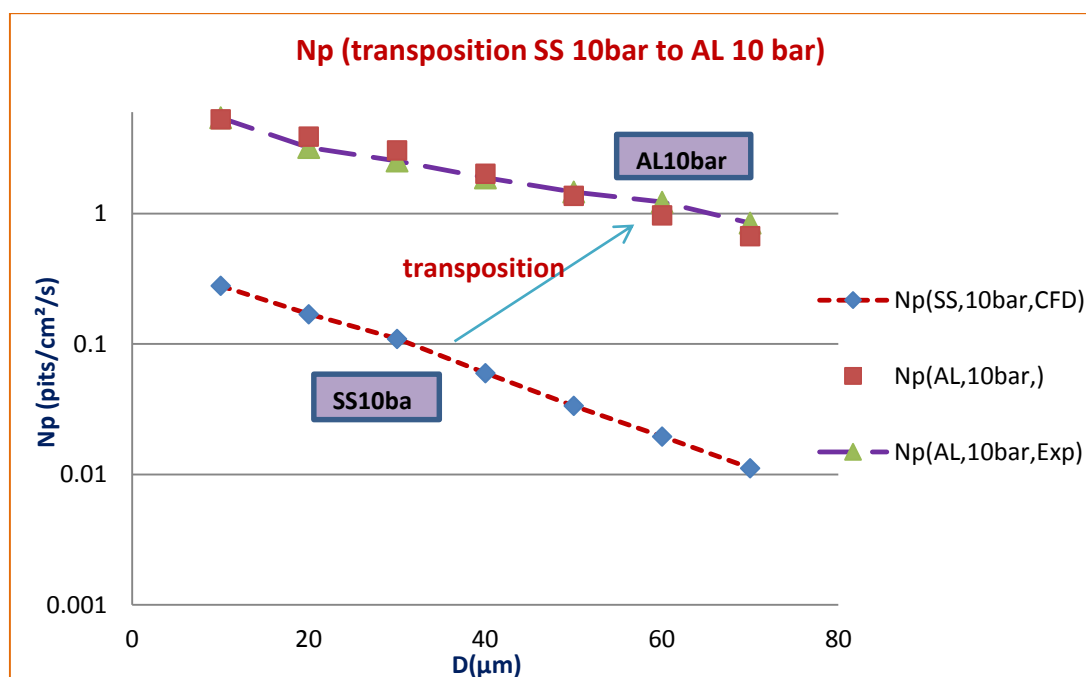
جدول (۴-۱۱) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از اصل انتقال و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(SS-10bar-CFD)$	D	$\delta(SS)$	$\delta(AL)$	$\tau(SS)$	$\tau(AL)$	K	$N_2(AL-10bar)$
0.28	10	38	60.05	97.29	2.497	18.92878	5.30005791
0.17	20	38	60.05	97.29	2.497	22.96436	3.903941108
0.11	30	38	60.05	97.29	2.497	27.86032	3.064635119
0.057	40	38	60.05	97.29	2.497	33.80009	2.02800533
0.034	50	38	60.05	97.29	2.497	41.00621	1.377808538
0.0201	60	38	60.05	97.29	2.497	49.74866	0.975073646
0.0112	70	38	60.05	97.29	2.497	60.35498	0.67597576

جدول (۴-۱۲) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (AL - 10bar)$	$N_p (AL - 10bar - Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	5.30	5.46	3
20	3.90	3.22	21
30	3.06	2.54	18
40	2.03	1.89	5
50	1.38	1.47	7
60	0.975	1.23	21
70	0.676	0.85	20

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای حالت انتقال استیل به آلومینیوم در فشار ۱۰ بار، در بازه ای با میزان کمینه ۳ و میزان بیشینه ۲۱ قرار گرفته است.



شکل ۴-۱۱ نتایج اصل انتقال خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۱۰ بار و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

از نمودار نرخ خوردگی آلومینیوم در فشار ۱۰ بار که به کمک اصل انتقال، و با داشتن داده های نرخ خوردگی استیل در فشار ۱۰ بار، در حالت سرعت ثابت بدست آمده است و مقایسه نتایج حل عددی با

نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می‌توان دریافت که با توجه به ثابت بودن مقادیر δ و τ برای هر جنس مشخص، و استفاده از ضریب عددی K که در فصل سوم تشریح شد، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می‌یابد. نیز این مورد قابل ذکر می‌باشد که می‌توان برای هر قطر به کمک ضریب عددی K مقدار نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای هر فلز با داشتن داده‌های نرخ خوردگی از فلز دیگر، در قطرهای متفاوت به کمک ضریب عددی K ، نرخ خوردگی را بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است.

۴-۶-۲- نتایج عددی اصل انتقال نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۴۰ بار

جدول (۴-۱۳) محاسبه نرخ خوردگی حاصل از اصل انتقال و استفاده از ضریب K برای مدل کانز در نازل

$N_1(SS - 40bar - CFD)$	D	$\delta(SS)$	$\delta(AL)$	$\tau(SS)$	$\tau(AL)$	K	$N_2(AL - 40bar)$
8.2	10	56.93	88.32	1.6	0.027	27.89627	228.7494424
5.74	20	56.93	88.32	1.6	0.027	31.60617	181.4194352
4.1	30	56.93	88.32	1.6	0.027	35.80945	146.8187429
2.87	40	56.93	88.32	1.6	0.027	40.57172	116.4408234
2.05	50	56.93	88.32	1.6	0.027	45.96731	94.23298717
1.5	60	56.93	88.32	1.6	0.027	52.08046	78.12069221
1.12	70	56.93	88.32	1.6	0.027	59.00659	66.08738578
0.49	90	56.93	88.32	1.6	0.027	75.74466	37.1148819
0.25	105	56.93	88.32	1.6	0.027	91.34622	22.83655563
0.12	135	56.93	88.32	1.6	0.027	132.8519	15.94222807
0.07	145	56.93	88.32	1.6	0.027	150.5198	10.53638274

در ادامه، جدول مربوط به نتایج حاصل از شبیه سازی عددی و نتایج تجربی موجود برای آلومینیوم

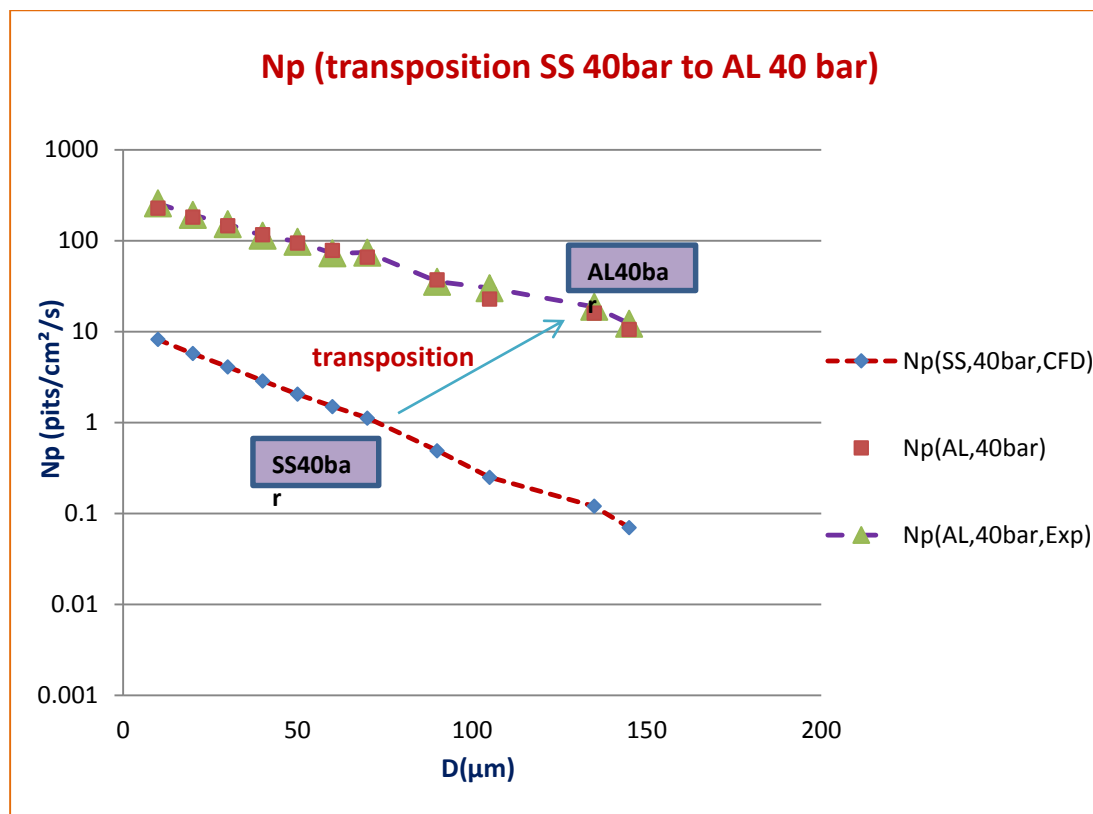
در فشار ۴۰ بار به همراه درصد خطای نسبی آورده شده است.

جدول (۴-۱۴) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (AL - 40bar)$	$N_p (AL - 40bar - Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	228.75	257.86	11.29
20	181.42	192.65	5.83
30	146.82	152.63	3.81
40	116.44	113.51	2.58
50	94.23	97.85	3.7
60	78.12	72.77	7.35
70	66.09	74.26	11
90	37.11	35.43	4.76
105	22.8۴	30.12	24.18
135	15.94	18.74	14.93
145	10.54	12.28	14.2

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای حالت انتقال

استیل به آلومینیوم در فشار ۴۰ بار، در بازه ای با میزان کمینه ۲/۵۸ و میزان بیشینه ۲۴/۱۸ قرار گرفته است.



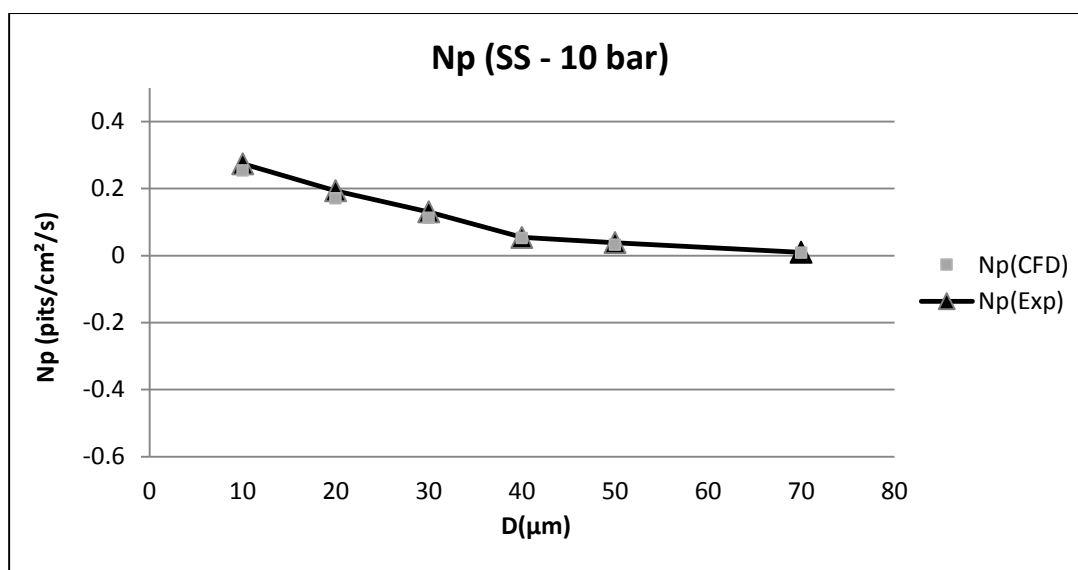
شکل ۴-۱۲ نتایج اصل انتقال خوردگی استیل و آلومینیوم در فشار ۴۰ بار و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی از نمودار نرخ خوردگی آلومینیوم در فشار ۴۰ بار که به کمک اصل انتقال، و با داشتن داده‌های نرخ خوردگی استیل در فشار ۴۰ بار، در حالت سرعت ثابت بدست آمده‌است و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می‌توان دریافت که با توجه به ثابت بودن مقادیر δ و τ برای هر جنس مشخص، و استفاده از ضریب عددی K که در فصل سوم تشریح شد، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می‌یابد. نیز این مورد قابل ذکر می‌باشد که می‌توان برای هر قطر به کمک ضریب عددی K مقدار نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای هر فلز با داشتن داده‌های نرخ خوردگی از فلز دیگر، در قطرهای متفاوت به کمک ضریب عددی K ، نرخ خوردگی را بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است.

۷-۴- نرخ خوردگی برای استیل^۱ در حالت سرعت متغیر

۷-۴-۱- نتایج عددی نرخ خوردگی استیل در فشار ۱۰ بار

جدول (۷-۴) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	0.2534	0.2739	7.5
20	0.1711	0.1933	11.48
30	0.1122	0.1301	13.77
40	0.053	0.054	1.85
50	0.0323	0.0385	16.1
70	0.00804	0.00958	16.08



شکل ۷-۴-۱ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر

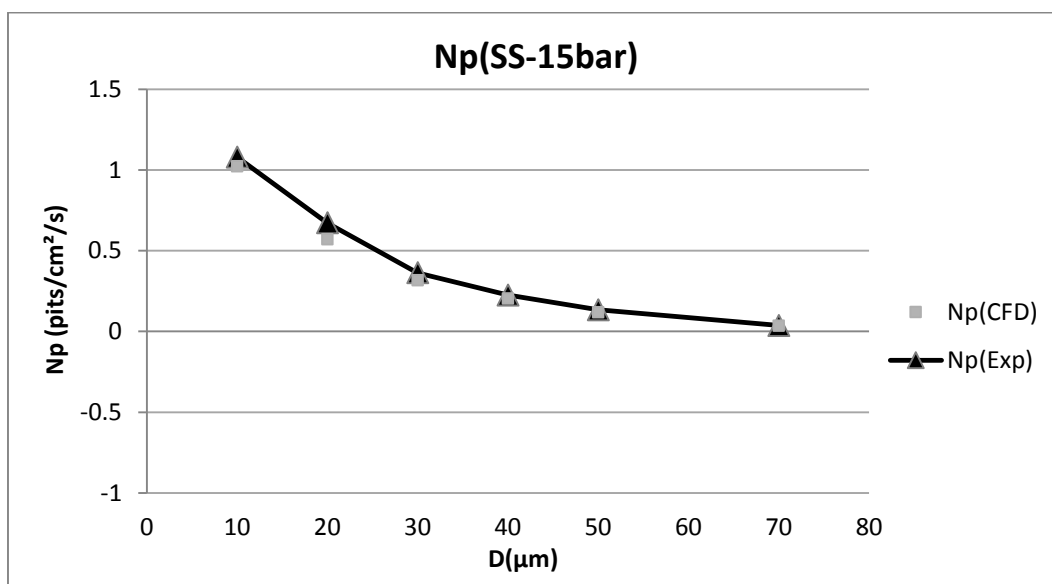
و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای استیل در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر، در بازه‌ای با میزان کمینه ۱/۸۵ و میزان بیشینه ۱۶/۰۸ قرار گرفته است.

۴-۷-۲- نتایج عددی نرخ خوردگی استیل در فشار ۱۵ بار

جدول (۴-۱۶) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	1.0222	1.0803	5.38
20	0.5702	0.6721	15.16
30	0.3153	0.3627	13.08
40	0.2026	0.2256	10.19
50	0.1177	0.1339	12.1
70	0.0337	0.0372	9.49



شکل ۴-۱۴ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۱۵ بار در حالت سرعت متغیر

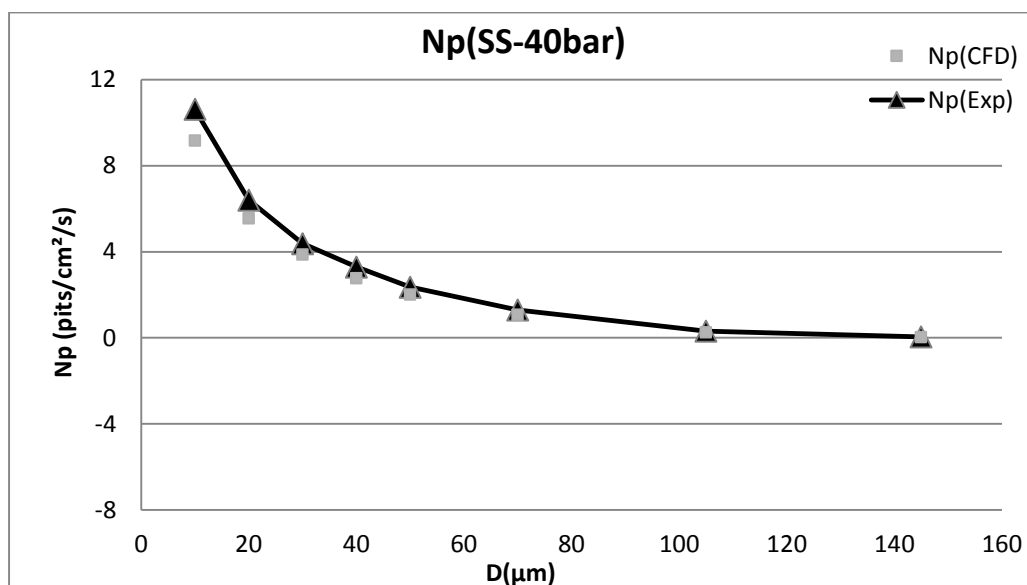
و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای استیل در فشار ۱۵ بار در حالت سرعت متغیر، در بازه‌ای با میزان کمینه ۵/۳۸ و میزان بیشینه ۱۵/۱۶ قرار گرفته است.

۴-۷-۳- نتایج عددی نرخ خوردگی استیل در فشار ۴۰ بار

جدول (۴-۱۷) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	9.17	10.63	13.73
20	5.55	6.41	13.42
30	3.87	4.38	11.71
40	2.77	3.29	15.92
50	2.013	2.362	14.78
70	1.0811	1.2932	16.40
105	0.26	0.31	17.19
145	0.0408	0.0467	12.63



شکل ۴-۱۵ نتایج بدست آمده از حل عددی برای استیل در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر

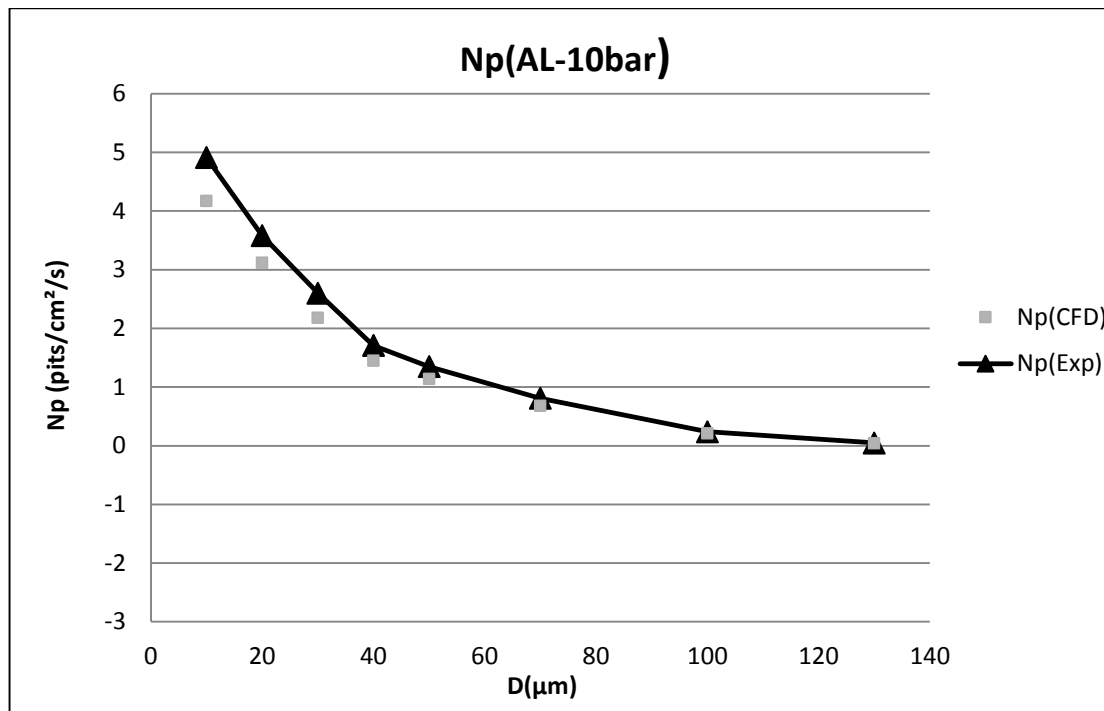
و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

از سه نمودار نرخ خوردگی استیل در حالت سرعت متغیر و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی [۲۸] می توان دریافت که با توجه به وابسته بودن معادلات δ و τ برای یک جنس مشخص، به سرعت کل با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاپیتاسیون کاهش می یابد. در ادامه با بررسی نتایج نرخ خوردگی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار و ۴۰ بار و مقایسه نتایج عددی حاصل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود که نرخ خوردگی کاپیتاسیون روندی مشابه با نتایج استیل در حالت سرعت متغیر دارد. نیز این مورد قابل ذکر می باشد که می توان برای هر قطر با حل عددی و انجام محاسبات نرم افزاری مقدار نرخ خوردگی کاپیتاسیون را برای فلز مورد نظر و در فشار مشخص بدست آورد. در این تحقیق فقط بمنظور مقایسه نمودار حاصل از حل عددی با نمودار حل تجربی به قطرهای اشاره شده اکتفا شده است.

۴-۷-۴- نتایج عددی نرخ خوردگی آلومینیوم در فشار ۱۰ بار

جدول (۴-۱۸) محاسبه درصد خطای نسبی نرخ خوردگی آزمایشگاهی و حل عددی برای نازل

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	4.17	4.91	15.07
20	3.12	3.58	12.85
30	2.18	2.6	16.15
40	1.45	1.71	15.20
50	1.14	1.35	15.56
70	0.68	0.81	16.05
100	0.21	0.24	12.5
130	0.0401	0.0467	14.13



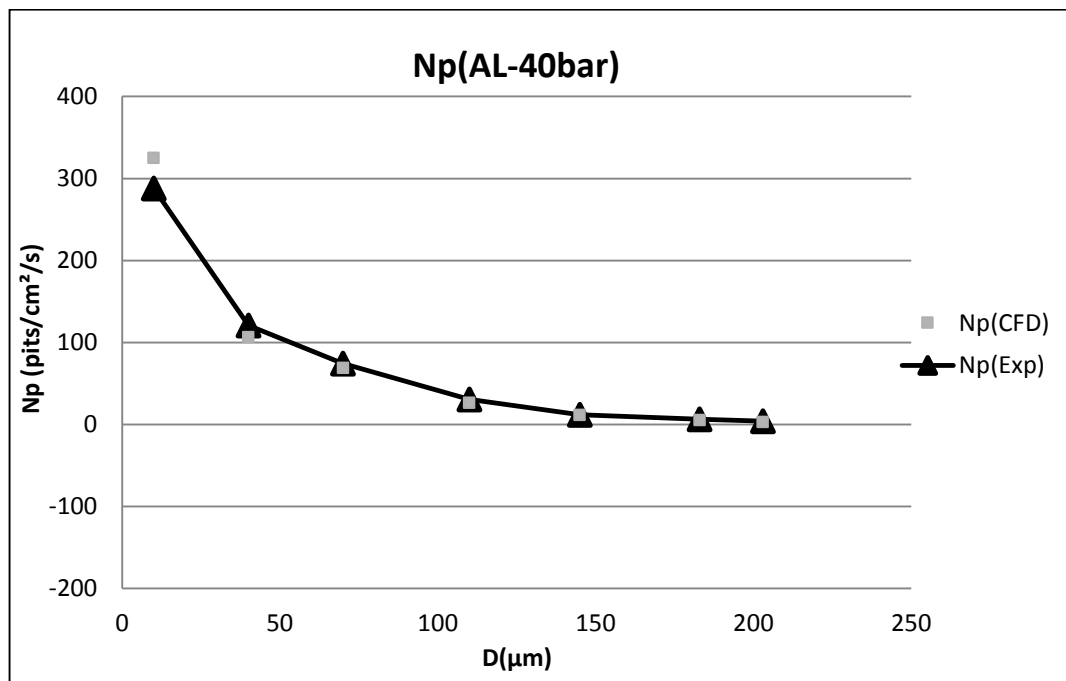
شکل ۴-۱۶ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای آلومینیوم در فشار ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر، در بازه‌ای با میزان کمینه ۱۲/۵ و میزان بیشینه ۱۶/۱۵ قرار گرفته است.

۴-۷-۵- نتایج عددی نرخ خوردگی آلومینیوم در فشار ۴۰ بار

D	$N_p (CFD)$	$N_p (Exp)$	%درصد خطای نسبی
10	325.376	287.856	13.03
40	106.46	120.921	11.96
70	69	74.25	7.07
110	26.61	30.52	12.81
145	11.78	12.02	2
183	5.47	6.24	12.34
203	3.17	3.91	18.93



شکل ۴-۱۷ نتایج بدست آمده از حل عددی برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر

و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

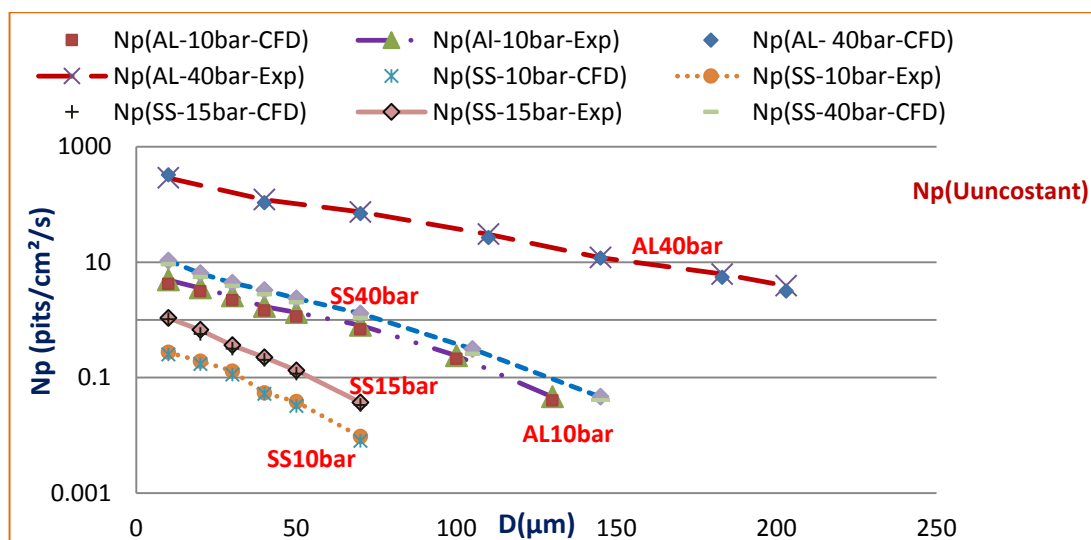
همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، درصد خطای نسبی بدست آمده برای آلومینیوم در فشار ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر، در بازه‌ای با میزان کمینه ۲ و میزان بیشینه ۱۸/۹۳ قرار گرفته است.

۴-۸- بحث روی نمودارهای نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت

متغیر

از پنج نمودار نرخ خوردگی استیل در حالت سرعت متغیر و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی می توان دریافت که با توجه به وابستگی δ و τ با توجه به روابط معادلات δ و τ در فصل سوم، برای یک جنس، با سرعت کل در هر نقطه، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاویتاسیون کاهش می یابد. این نرخ خوردگی کاویتاسیون طبق روابط بیان شده در فصل سوم، به صورت نمایی کاهش می یابد. مشخصه قطر معادل حفره خوردگی (δ) بستگی به ماده

دارد. مقایسه آزمایش‌های انجام شده توسط ژان پیر فرانک^۱ و همکارانش برای حفره‌های بسیار ریز در بارهای مساوی به نظر می‌رسد که پیش بینی کیفی خوبی برای اثر ماده بر روی اندازه حفره دارد. برای دو ماده استیل و آلومینیوم، قطر معادل حفره (δ) به طور مختصر با توانی از سرعت جریان ($V^{0.75}$) افزایش می‌یابد، نیز زمان پوشش (τ) به طور تصاعدی با سرعت جریان با یک توان باقوه ۶/۵- کاهش می‌یابد. این اثر احتمالاً به علت افزایش فرکانس حباب‌های فروپاشی شده و هم افزایش فشار ضربه ارتفاعی با سرعت جریان می‌باشد. هر دو دلیل موافق این هستند که زمان پوشش به طور زیادی با سرعت جریان در عدد کاویتاسیون ثابت، افزایش می‌یابد. هر دو کمیت فوق در یک کمیت $\frac{1}{\delta^2 \tau}$ در رابطه نرخ خوردگی کاویتاسیون ترکیب شده‌اند که واحد یکسانی مشابه نرخ حفره‌های خوردگی دارد.



شکل ۴-۱۸ نتایج حل عددی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی

^۱ jean-Pierre Franc, Michel Riondet , Ayat Karimi , Georges L.Chahine

۴-۹- بحث بر روی برتری روش اصل انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون نسبت

به دیگر روش های محاسبه نرخ خوردگی کاویتاسیون

جدول (۴-۱۹) مقایسه میانگین درصد خطای نسبی نرخ خوردگی حالت انتقال نسبت به دو حالت سرعت ثابت و متغیر

میانگین درصد خطای نسبی %	میانگین درصد خطای نسبی %	میانگین درصد خطای نسبی %
آلومینیوم ۱۰ بار در حالت انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون	آلومینیوم ۱۰ بار در حالت سرعت ثابت	آلومینیوم ۱۰ بار در حالت سرعت متغیر
13.57	14.83	14.7

جدول (۴-۲۰) مقایسه میانگین درصد خطای نسبی نرخ خوردگی حالت انتقال نسبت به دو حالت سرعت ثابت و متغیر

میانگین درصد خطای نسبی %	میانگین درصد خطای نسبی %	میانگین درصد خطای نسبی %
آلومینیوم ۴۰ بار در حالت انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون	آلومینیوم ۴۰ بار در حالت سرعت ثابت	آلومینیوم ۴۰ بار در حالت سرعت متغیر
9.42	13	11.16

همان طور که از جدول فوق هم مشاهده می شود، میانگین درصد خطای نسبی بدست آمده برای حالت انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون نسبت به دو حالت سرعت ثابت و سرعت متغیر، کمتر می باشد. لذا روش انتقال نسبت به دو روش دیگر ترجیح دارد. زیرا دو روش سرعت ثابت و روش سرعت متغیر نیازمند انجام محاسبات کامپیوتری طولانی، در دسترس نبودن فلز مناسب مورد نظر جهت انجام آزمایشات دقیق خوردگی، عدم وجود آزمایشگاه مجهز به وسایل تست خوردگی می باشد.

فصل ۵. بحث، نتیجه‌گیری و ارائه

پیشنهادها

۵-۱- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به هزینه و زمانبر بودن یک کار آزمایشگاهی و این که پیش‌بینی و مشاهده پدیده کاویتاسیون دارای اهمیت می‌باشد، بهترین رویه استفاده از بحث CFD و حل‌های عددی می‌باشد. اگرچه در یک حل عددی موفق، فاکتورهایی مانند: ترسیم صحیح هندسه، شبکه‌بندی با اندازه‌های بهینه و مدل‌های فیزیکی مورد استفاده و دخیل می‌باشند؛ ولی بحث و تحلیل روی تئوری‌های مورد استفاده در حل‌های عددی را هم نباید نادیده گرفت.

شکل‌گیری کاویتاسیون در بسیاری از فرآیندهای مرتبط با هیدرودینامیک سبب گردیده است تا این پدیده بخش مهمی از تحقیقات علمی و مهندسی رابه خود اختصاص دهد. ایجاد سرو صدا، خوردگی، نوسانات شدید ناشی از فروپاشی حباب‌ها، نیروهای نوسانی با فرکانس‌های شدید از جمله معایب بوجود آمدن کاویتاسیون است که سبب کاهش طول عمر و راندمان ماشین آلات هیدرودینامیکی می‌گردد. در نقطه مقابل افزایش راندمان پودر شدن (در فرآیند تزریق سوخت در داخل سیلندر)، بکارگیری در تجهیزات شستشوی دیوارها به کمک پاشش آب، کاهش نیروی پسا در سرعت‌های بالا در پرتابه‌ها، ایجاد عایق صوتی در اطراف پرتابه‌های آبی از جمله کاربردهای مفید این پدیده بشمار می‌رود. تحقیقات تجربی بر روی کاویتاسیون با توجه به معایب و ویژگی‌های خاص این پدیده از دیرباز مورد توجه بوده است.

از پنج نمودار نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت ثابت و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود می‌توان به این نتیجه رسید که با ثابت بودن δ و τ برای یک جنس مشخص با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کاویتاسیون کاهش می‌یابد. نرخ خوردگی کاویتاسیون طبق روابط بیان شده در فصل سوم، به صورت نمایی کاهش می‌یابد. نتایج تست نرخ خوردگی حفره نشان داد که، نرخ خوردگی کاویتاسیون وابسته به دو پارامتر قطر معادل حفره (δ) و زمان پوشش (τ) می‌باشد. نتایج آزمایشات تجربی بیان می‌کنند که قطر معادل حفره (δ) به طور مختصر با توانی از سرعت جریان ($V^{0.75}$) افزایش می‌یابد، نیز زمان پوشش (τ) به طور تصاعدی

با سرعت جریان با یک توان با قوه $6/5$ - کاهش می‌یابد. این اثر احتمالاً به علت افزایش فرکانس حباب-های فروپاشی شده و هم افزایش فشار ضربه ارتفاعی با سرعت جریان می‌باشد. هر دو دلیل موافق این هستند که زمان پوشش به طور زیادی با سرعت جریان در عدد کایتاسیون ثابت، افزایش می‌یابد. هر دو پارامتر فوق در یک پارامتر $\frac{1}{\delta^2 \tau}$ در رابطه نرخ خوردگی کایتاسیون ترکیب شده‌اند که واحد یکسانی مشابه نرخ حفره‌های خوردگی دارد. بمنظور توسعه کد مدل نرخ خوردگی و با هدف انجام یک کار جدید و قابل قبول، و با توجه به اینکه نرخ خوردگی علاوه بر وابستگی به سرعت جریان، که قبلاً اشاره شد، به سرعت محلی سیال وابسته است، از سرعت محلی سیال که در مکان‌های مختلف متفاوت می‌باشد، استفاده کرده و به محاسبه نرخ خوردگی در این حالت پرداخته شده است. بنابراین از پنج نمودار نرخ خوردگی استیل و آلومینیوم در حالت سرعت متغیر و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود می‌توان دریافت که با توجه به وابستگی δ و τ با توجه به روابط معادلات δ و τ در فصل سوم، برای یک جنس مشخص، به سرعت کل در هر نقطه، با افزایش قطر معادل نرخ خوردگی برای هر فشار مشخص، نرخ خوردگی کایتاسیون کاهش می‌یابد.

یکی از بهترین کارهای انجام شده در تحقیق، روش اصل انتقال خوردگی کایتاسیون می‌باشد که این اصل انتقال به دو دسته تقسیم می‌شود. دسته اول، انتقال از یک شرایط فیزیکی جریان به شرایط فیزیکی جدید، مثلاً از یک فشار و سرعت مشخص به فشار و سرعت مشخص دیگر. دسته دوم شرایط جریان ثابت می‌باشد، اما ماده عوض می‌شود. روش اصل انتقال نرخ خوردگی، مبتنی بر داشتن داده‌های نرخ خوردگی کایتاسیون برای یک فلز با جنس و فشار معلوم و در یک قطر مشخص می‌باشد. به بیان دیگر کافی است برای تعداد محدودی از جریان‌ها و تعداد محدودی مواد، نتایج خوردگی را داشته باشیم تا بتوانیم برای شرایط جریان دیگر و مواد دیگر، نتایج خوردگی را برون‌یابی کنیم. در انتها، همان‌طور که از جداول مشاهده شد، میانگین درصد خطای نسبی بدست آمده برای حالت انتقال نرخ خوردگی کایتاسیون نسبت به دو حالت سرعت ثابت و سرعت متغیر، کمتر می‌باشد. لذا روش انتقال نسبت به

دو روش دیگر ترجیح دارد. زیرا دو روش سرعت ثابت و روش سرعت متغیر نیازمند انجام محاسبات کامپیوتری طولانی، در دسترس نبودن فلز مناسب مورد نظر جهت انجام آزمایشات دقیق خوردگی و عدم وجود آزمایشگاه مجهز به وسایل تست خوردگی می‌باشد. انتخاب روش اصل انتقال نرخ خوردگی کاویتاسیون برای ادامه تحقیقات توصیه می‌گردد.

با این وجود لازم به ذکر است که هر چند فعالیت‌های مربوط به این تحقیق در این نوشته به انتها می‌رسد لیکن سؤالات بیشتری به مسأله مورد نظر افزوده شده که بررسی‌های مفصل‌تری در خصوص توسعه مطالب ارائه شده را می‌طلبد. بنابراین بدیهی است که این تحقیق تنها شروع و مقدمه‌ای برای بررسی و محاسبه نرخ خوردگی ناشی از پدیده کاویتاسیون مذکور بوده و نتایج به دست آمده از آن می‌تواند مقدمه‌ای برای کارهای آینده در این زمینه گردد. امید است که حاصل فعالیت‌های ارائه شده در این رویه تحقیقی، بستر همواری برای گام‌های تحقیقاتی آینده در هر دو شاخه کارهای تجربی و نظری (شامل مدل‌سازی و تحلیل‌های ریاضی جهت بدست آوردن پارامترهای خوردگی) فراهم آورد.

۵-۲- پیشنهادها

عناوین پیشنهادی برای ادامه تحقیقات آزمایشگاهی و مدل‌سازی موارد ذیل برای ادامه فعالیت‌های انجام شده در این تحقیق پیشنهاد می‌شود:

۱. محاسبه نرخ خوردگی کاویتاسیون با استفاده از سایر مدل‌های انتقال جرم مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های عددی پدیده کاویتاسیون که می‌توان به مدل‌های مشهور زوارت، سینگال، مرکل و سایر مدل‌های مورد استفاده اشاره کرد.
۲. استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و کدهای عددی آماده شده جهت اصلاح شرایط مرزی برای کاهش رخداد پدیده کاویتاسیون که منتج به ایجاد خوردگی می‌گردد.
۳. با اضافه کردن معادله انتقال دیگری به کد عددی توسعه داده شده امکان بررسی آثار سطح آزاد بر روی شکل‌گیری کاویتاسیون بر روی اجسام متحرک نزدیک آب فراهم می‌شود.
۴. تغییر معیار تعیین تکلیف ضریب خوردگی از عدد $0/5$ به عدد نزدیک به عدد ۱
۵. بررسی ارتعاشات نامطلوب تولید شده در وسایل هیدرودینامیکی مورد استفاده در صنعت که ناشی از ایجاد خوردگی توسط پدیده کاویتاسیون می‌باشد.
۶. بررسی تأثیر دو پارامتر قطر حفره خوردگی و زمان پوشش در ایجاد و گسترش خوردگی ناشی از رخداد کاویتاسیون.

مراجع

مراجع

- [۱] ح. معین, "پایان نامه کارشناسی ارشد: حل عددی پدیده کاویتاسیون بر روی هندسه‌های متقارن محوری به روش VOF", دانشگاه فردوسی, مشهد, ۱۳۸۷.
- [2] E. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics Christopher, California -New York: California Institute of Technology Pasadena, 1995.
- [3] H. M. Versteeg, "An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method," First Edition, Longman Group Ltd., Essex, UK, 1995.
- [4] J. E. D. J. W. L. a. R. F. K. David R. Stinebring, "Supecavitation research and development," 1995.
- [5] F. White, Fluid mechanics, 6th Edition, Mc Graw-Hill, 2001.
- [۶] م. مقیمی, "پایان نامه دکتری: تحلیل تجربی و عددی پایداری مرز کاواک", دانشکده مهندسی مکانیک, دانشگاه علم و صنعت ایران, اسفند ۱۳۸۸.
- [7] I. Senocak, Computational methodology for the simulation of turbulent cavitating flows, University of Florida, 2002.
- [8] T. Xing, Numerical modeling and simulation of laminar and transitional submerged cavitating jets, Purdue University, 2002.
- [۹] ا. اسنقی, "پایان نامه کارشناسی ارشد: شبیه سازی عددی کاویتاسیون در اطراف اجسام صلب متحرک در حالت گذرا", دانشکده مهندسی مکانیک, دانشگاه صنعتی شریف, دی ماه ۱۳۸۷.
- [10] R. D. J. H. F. Knapp, Cavitation, New York: McGraw-Hill Company., 1970.
- [11] D. d. B. G. de Lange, "Sheet Cavitation and Cloud Cavitation, Re-Entrant Jet and Three-Dimensionality," vol. 58, no. 91–114, 1998.
- [12] R. H. S. Furness, "Experimental and Theoretical Studies of Two-Dimensional Fixed-Type Cavities," no. 515–522, 1975.
- [13] Q. F. J. M. J. Le, "Partial Cavities: Global Behavior and Mean Pressure Distribution," vol. 115, no. 243–248, 1993.
- [14] J. Schön, "A Method for the Study of Unsteady Cavitation - Observations on Collapsing Sheet Cavities," PhD. thesis, Department of Naval Architecture and

Ocean Engineering, Chalmers University of Technology, 2000, Göteborg, Sweden.

- [15] A. L. N. A. M. J. Y. Singhal, "Mathematical basis and validation of the full cavitation model," FEDSM2001-18015, USA, 2001.
- [16] A. K. H. Y. H. Kubota, "A new modeling of cavitating Flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section," Vols. 240:59-96.
- [17] Y. N. Savchenko, "Supercavitation – Problems and Perspectives," National Academy of Sciences – Institute of Hydromechanics, Kyiv, Ukraine, 2001.
- [18] M. Tulin, "Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies,," David Taylor Model Basin Rep, 1953.
- [19] T. O. Y. M. I. Y. Shuji Hattori a, "Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure," *Wear*265, pp. 1619-1625, 2008.
- [20] K. H. Light, "Development of a Cavitation Erosion Resistant Advanced Material System," The University of Maine, 1993.
- [21] N. E. B.S, computational and Experimental Investigations of the Flow Around Cavitating Hydrofoils, University of Rochester, 1986.
- [22] Y. a. H. S. Chen, "Modeling hydrodynamic non equilibrium in cavitating flows," vol. 118, no. 172–178, 1996.
- [23] R. B. D. S. D. C. T. L. J. G. H. Kunz, "A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation," vol. 29, no. 849-875, 2000.
- [24] M. Morgut, "Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoi," *Multiphase Flow*, pp. 620-626, 2011.
- [25] V. Bertram, Practical ship hydrodynamics, Butterworth-Heinemann: Oxford., 2000.
- [26] P. Sagaut, Large Eddy Simulation for Incompressible Flow: An Introduction, Springer Publication, 2001.
- [27] C. Brennen, Fundamentals of Multiphase Flows, Cambridge Press, 2006.
- [28] M. R. ., A. K. ., G. L. jean-Pierre Franc, "Material and velocity effects on cavitation erosion pitting," *Wear*, pp. 274-275 , 248-259, 2012.

- [29] J.-. P. Franc, "Incubation time and cavitation erosion rate of work-hardening materials," *Fluid Engineering* 131(2), pp. 1039-1051, 2009.
- [30] Benjamin, T. B., and A. T. Ellis. "The collapse of cavitation bubbles and the pressure thereby produced against solid boundaries." *Phil. Trans. R. Soc. Lon.* 260, no. 1110, 1966.
- [31] Naude, C. F. and Elli, A. T. "On the mechanism of cavitation damage by nonhemispherical cavities collapse in contact with a solid boundary", *Transactions of the ASME D: Journal of Basic Engineering*, 83, pp.648-656 , 1961.
- [32] Plesset, M. S. "Topics in Ocean Engineering, ed. C. I. Bretschneider", Vol. 1, pp. 85-95. Houston : Gulf Publ.Co, 1969.
- [33]. Hickling "In Finite-Amplitude Wave Effects in Fluids", pp. 240-44. Guilford : I.P.C.Sci. Technol. Press, 1974.

پیوست

پیوست ۱

مدل سازی های انجام شده بر اساس حل معادله ناویر استوکس:

جدول زیر دورنمایی کلی از مدل سازی های عددی به انجام رسیده براساس حل معادلات ناویر-

استوکس را نمایش می دهد.

دورنمایی کلی از مدل سازی های عددی به انجام رسیده [۱]

<i>Reference</i>	<i>Cavitation model</i>	<i>Applications/Main Findings</i>
<i>Kubota et al. (1992)</i>	<i>Rayleigh-Plesset equation coupled to the Poisson equation. Cavity region is modeled as compressible fluid with variable density</i>	<i>Cloud cavitation on hydrofoils. Numerical instability for high-density ratio. $Re=3 \times 10^5$.</i>
<i>Chen and Heister (1994)</i>	<i>Interface tracking based on $P=P_{vap}$ Grid conforms to the cavity shape.</i>	<i>Pressure distribution on axisymmetric geometries. $Re=1.36 \times 10^5$.</i>
<i>Chen and Heister (1996)</i>	<i>Time and pressure dependent pseudo-density equation.</i>	<i>Pressure distribution on axisymmetric geometries. $Re=1.36 \times 10^5$.</i>
<i>Deshpande et al. (1997)</i>	<i>Interface tracking based on $P=P_{vap}$ with mass transfer. Grid conforms to the cavity shape.</i>	<i>Sheet cavitation for cryogenic fluids. Studying the thermal boundary layer over a cavity.</i>

<i>Singhal et al. (1997)</i>	<i>Vapor mass fraction equation with pressure dependent source terms.</i>	<i>Pressure distribution and discharge coefficient for orifices and hydrofoils. $Re=2.0 \times 10^6$.</i>
<i>Merkle et al. (1998)</i>	<i>Vapor mass fraction equation with pressure dependent source terms.</i>	<i>Pressure distribution on hydrofoils.</i>
<i>Kunz et al. (2000)</i>	<i>Volume fraction equation with pressure dependent source terms Nonconservative continuity equation. Preconditioning strategy.</i>	<i>Pressure distribution on axisymmetric geometries. $Re=1.36 \times 10^5$.</i>
<i>Ahuja et al. (2000)</i>	<i>Vapor mass fraction equation with pressure dependent source terms. Preconditioning strategy. Adaptive unstructured meshes</i>	<i>Simulations of cavitating flow over hydrofoils ($Re=2 \times 10^6$) and axisymmetric geometries. ($Re=1.36 \times 10^5$).</i>
<i>Edwards et al. (2000)</i>	<i>Temperature distribution is computed to determine density variation based. Sanchez-Lacombe equation of state.</i>	<i>Pressure distribution on axisymmetric geometries is poor convergence and pressure overshoots $Re=1.36 \times 10^5$.</i>
<i>Ventikos and Tzabiras (2000)</i>	<i>Temperature distribution is computed to determine density variation based on steam-water tables.</i>	<i>Pressure distribution over airfoils. $Re=2000$ in computations while $Re=2.5 \times 10^6$ in experiments.</i>
<i>Venkateswaran et al. (2001)</i>	<i>Discussed the preconditioning strategies utilized in Kunz et al. and Ahuja et al.</i>	<i>Pressure distribution on axisymmetric geometries. $Re=1.36 \times 10^5$.</i>

<i>Angelo Cervone et al. (2006)</i>	<i>Vapor mass fraction equation with pressure dependent source terms.</i>	<i>Pressure coefficient distribution on hydrofoil(NACA0015) $Re=5 \times 10^5$</i>
<i>G. Palau-Salvador et al. (2007)</i>	<i>Vapor mass fraction equation with pressure dependent source terms.</i>	<i>Numerical modeling of cavitating flows in Circular orifice, Rectangular Orifice, Circular nozzle, Rectangular Venture</i>
<i>Mitja Morgut et al. (2011)</i>	<i>Volume fraction equation with pressure dependent source terms Nonconservative continuity equation. Preconditioning strategy</i>	<i>Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil.</i>

پیوست ۲

آشنایی با بسته نرم افزاری *OpenFoam*

اُپن فوم^۱ اولین و معروفترین کتابخانه نرم افزاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که به زبان ++C نوشته شده است. این نرم افزار بر اساس روش حجم محدود^۲ و در شبکه های اختیاری سه بعدی عمل می کند.

اولین گام ها در این زمینه از سال ۱۹۹۰ آغاز شده و این پروژه بین سال های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰ در دستور کار گروه تحقیقاتی پروفسور گوسمن^۳ و بخش ترموسیالاتی دانشگاه امپریال کالج^۴ لندن قرار گرفت اما تاکنون از حمایت مالی هیچ مؤسسه ای برخوردار نبوده است. اولین کلاس های این نرم افزار در سال ۱۹۹۳ در پایان نامه دکترای چارلی هیل^۵ ارائه شد و در همان سال اولین کارهای عددی توسط هنری ولر^۶ و ژاساک^۷ شروع شد و در ادامه در قالب پایان نامه های دکترای این کار به مسائل مهندسی مختلف بسط داده شد.

زبان برنامه نویسی به کار رفته در این نرم افزار ++C بوده، و از دیگر خصوصیات این نرم افزار کد باز بودن آن می باشد که توسط آقای هنری ولر و گروه همراهش و با همکاری افراد دیگری از جمله پروفسور هروج جاساک از دانشگاه زاگرب توسعه داده شده است. زبان برنامه نویسی ++C این توانایی را به کاربرانش می دهد که موارد مورد نظر خود را در برنامه های موجود در اُپن فوم اضافه نمایند.

در این نرم افزار، فرد کاربر کتابخانه ای از برنامه های متفاوت را در اختیار دارد که به راحتی به کدهای نوشته شده در آن دسترسی داشته و توانایی اعمال تغییرات در آنها برای مقاصد خویش را دارا می باشد.

^۱ Open Source Field Operation and Manipulation

^۲ Finite volume

^۳ Gosman

^۴ Imperial college

^۵ Charlie Hill

^۶ Henry Weller

^۷ Hrvoje Jasak

لازم به ذکر است که زبان برنامه‌نویسی C++ یک زبان برنامه‌نویسی بسیار گسترده و در عین حال قدرتمند می‌باشد، ولی کاربر نرم‌افزار آپن فوم نیازی به آموختن همه این زبان با همه جزئیات آن را ندارد. در دهه ۱۹۷۰ در آزمایشگاه‌های بل زبانی به نام C ایجاد شد. انحصار این زبان در اختیار شرکت بل بود تا این که در سال ۱۹۷۸ توسط ریچی^۱ و کرینگان^۲ شرح کاملی از این زبان منتشر شد و به سرعت، نظر برنامه‌نویسان حرفه‌ای را جلب نمود. هنگامی که بحث شی‌گرایی و مزایای آن در جهان نرم‌افزار رونق یافت، زبان C که قابلیت شی‌گرایی نداشت ناقص به نظر می‌رسید تا این که در اوایل دهه ۱۹۸۰ دوباره شرکت بل دست به کار شد و استراس تروپ^۳ دانمارکی در آزمایشگاه T&AT به منظور الحاق شیوه شی‌گرایی در زبان برنامه‌نویسی C، زبان برنامه‌نویسی C++ را طراحی نمود.

معرفی حلگر interPhaseChangeFoam:

حلگر مورد بررسی برای دو سیال غیر قابل تراکم و ایزوترمال همراه با تغییر فاز (همانند پدیده کاویتاسیون) ایجاد شده است. این حلگر اساساً برای شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون طراحی شده است، ولی دیگر پدیده‌های همراه با تغییر فاز را هم می‌توان با این حلگر پشتیبانی کرد.

سه مدل کاویتاسیونی مختلف در حلگر *InterPhaseChangeFoam* مهیا شده است، که به عبارتند

از:

Merkle

Kunz

Saur

برای مشاهده مدل‌ها به دایرکتوری زیر می‌رویم:

/multiphase/interPhaseChangeFoam/phaseChangeTwoPhaseMixtures.

در این مدل‌ها α (Alpha) کسر حجمی مایع بوده و مقدار آن بوسیله فشار بحرانی بدست می‌آید، C_v

، و C_v و ثوابت تجربی می‌باشند؛ که بر اساس متوسط جریان تعیین می‌گردند. در زمان اجرای این حلگر

¹ Richie

² Kernighan

³ Stroustrup

معادلات به دو قسمت تقسیم می‌شوند؛ یکی $\alpha loop$ می‌باشد، که در آن مقدار α ثابت در نظر گرفته می‌شود و دیگری $pressure loop$ که در آن مقدار p ثابت فرض می‌گردد.

لازم به ذکر است که الگوریتم کلی جریان دو فاز در حلگر $interPhaseChangeFoam$ براساس روش $volume\ offluid(VOF)$ بوده که برای تعیین رابطه کسر حجمی جریان‌های دو فاز یا کسر فاز α ، در هر سلول محاسباتی بکار می‌رود. خواص مادی محاسبه شده مانند وزن میانگین براساس این کسر می‌باشد. روش VOF بدین معنی است که صفحه مشترک میان دو سیال دقیقاً محاسبه نشده اما با خصوصیات حوزه کسر فاز مشخص می‌گردد. از آنجا که کسر فاز می‌تواند مقادیری بین ۰ و ۱ داشته باشد، در صفحه مشترک میان دو سیال این عدد به وضوح بدست نمی‌آید اما در محاسبات انجام شده عددی در آن حوزه حاصل شده، که نشان‌دهنده آن است که صفحه مشترک نازکی میان دو سیال وجود دارد.

در پوشه $constant$ دایرکتوری‌هایی نظیر $controlDict$ وجود دارد. در پوشه ۰ شرایط اولیه وجود دارد. در این قسمت عباراتی نظیر $\alpha 1$ و P_rgh و U موجود است، که به ترتیب بیانگر:

$\alpha 1$: فاز جریان را نشان می‌دهد، مقدار ۱ به مایع (در اینجا آب) اشاره داشته و مقدار ۰ به گاز (در اینجا بخار آب) اشاره دارد.

P_rgh : نشان‌دهنده همان فشار می‌باشد، و به صورت P منهای ρgh است. در این حل مقدار اولیه برای جریان ورودی $100000\ Pa$ قرار داده شده است.

U : بیانگر سرعت جریان بوده، که در پیش فرض این حلگر سرعت ورودی جریان اولیه (۰, ۰, ۲۰) قرار داده شده است که بدین معنی است که جریان دارای سرعت $20\ m/s$ در جهت Z می‌باشد.

قبل از اجرای حلگر اگر تصمیم بر ایجاد تغییراتی در کد برنامه آن باشد، بایستی حلگر با یک نام جدید به مکان جدیدی منتقل گردد. نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره شود آن است که در این حلگر یک فایل با پسوند H از حلگر دیگری به نام $interFoam$ فراخوانی شده است، و برای اجرای حلگر

جدید ایجاد شده بایستی فایل مربوطه از حلگر *interFoam* به داخل حلگر جدید تولید شده منتقل گردد و سپس در دایرکتوری نشان داده شده، خط مورد نظر به صورتی که دیده می‌شود، اصلاح گردد:

```
#include "..../interFoam/correctPhi.H"
```

خط بالا را در دایرکتوری *myInterPhaseChangeFoam.C* پیدا کرده و سپس به صورت زیر:

```
#include "correctPhi.H"
```

تبدیل گردد.

بعد از انجام مراحل فوق به دایرکتوری *Make/files* وارد شده و تغییرات به صورت آنچه در زیر آورده شده است اعمال گردد. در داخل آن جمله زیر را پیدا کرده:

```
EXE = $(FOAM_APPBIN)/myInterPhaseChangeFoam
```

و سپس به صورت زیر عبارت *USER* وارد آن گردد.

```
EXE = $(FOAM_USER_APPBIN)/myInterPhaseChangeFoam
```

بعد از اتمام این فرایند در کانسول فرمان *wmake* نوشته و اجرا گردد. در صورت ندیدن هیچ خطایی در کانسول، حلگر جدید با موفقیت تولید شده است.

هندسه مسأله:

مختصات نقاط و صفحات در فایل *blockMeshDict* می‌باشد که در زیر آورده شده است. در شکل زیر مسیر فایل *blockMeshDict* آورده شده است:

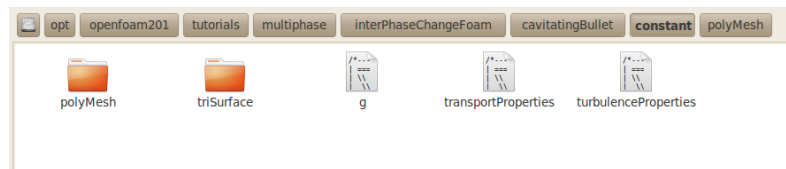


شکل (۱) مسیر فایل *blockMeshDict*

خواص سیال:

فایل *transportProperties* شامل خواص فیزیکی سیال می‌باشد که در این مسأله برای دو فاز ۱ و تفکیک شده است. مدل انتقال برای هر فاز توسط *transportModel* انتخاب شده است که در این

مساله برای هر دو فاز ۱ و ۲، *Newtonian* می باشد. nu بیانگر ویسکوزیته سینماتیکی بر حسب m^2 / s ، rho ، بیانگر چگالی بر حسب kg / m^3 و $sigma$ بیانگر کشش سطحی بر حسب kg / s^2 و N / m بوده که مقادیر آن ها برای هر دو فاز در جدول زیر داده شده است.



شکل (۲) مسیر فایل *transportProperties*

در این مساله فایل *environmentalProperties* شامل شتاب ثقل می باشد که برابر است با:

$$g \quad [0 \quad 1 \quad -2 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (0 \quad -9.81 \quad 0)$$

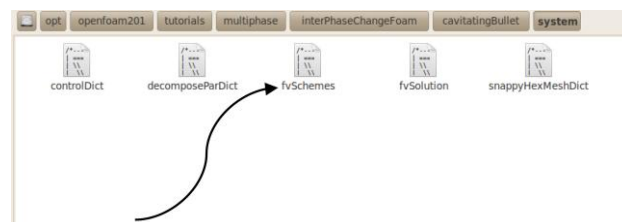
مقادیر داخل براکت بیانگر خصوصیات زیر و برای تعیین واحد کمیت مذکور می باشد.

$$[Kg \quad m \quad s \quad K \quad A \quad mol \quad cd]$$

که در این مساله ۱ توان m و ۲- توان s می باشد پس واحد g بر حسب m/s^2 می باشد.

حل کننده مساله :

نام حل کننده این مساله *interPhaseChangeFoam* می باشد که برای دو سیال غیرقابل تراکم و ایزوترمال همراه با تغییر فاز می باشد. برای مشاهده ی کدهای مربوطه بایستی به فایل *fvSchemes* رجوع کرد.



شکل (۳) مسیر فایل *fvScheme*

```
*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / O peration | Version: 2.0.1 |
| \ / A nd | Web: www.OpenFOAM.com |
```

```

| \V Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
version    2.0;
formatascii;
class      dictionary;
objectfvSchemes;
}
// ***** //
ddtSchemes
{
default      Euler;
}
interpolationSchemes
{
default      linear;
}
divSchemes
{
default      none;
div(rhoPhi,U)    Gauss linearUpwind grad(U);
div(phi,omega)   Gauss linearUpwind grad(omega);
div(phi,k)       Gauss linearUpwind grad(k);

div(phi,alpha)   Gauss vanLeer;
div(phirb,alpha) Gauss interfaceCompression;
}
gradSchemes
{
default      Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
default      Gauss linear limited 0.5;
}
snGradSchemes
{
default      none;
snGrad(pd)    limited 0.5;
snGrad(rho)    limited 0.5;
snGrad(alpha1) limited 0.5;
}
fluxRequired
{
default      none;
p_rgh;
pcorr;
alpha1;
}

```

```

}
// *****
//

```

اجرای برنامه از طریق Console

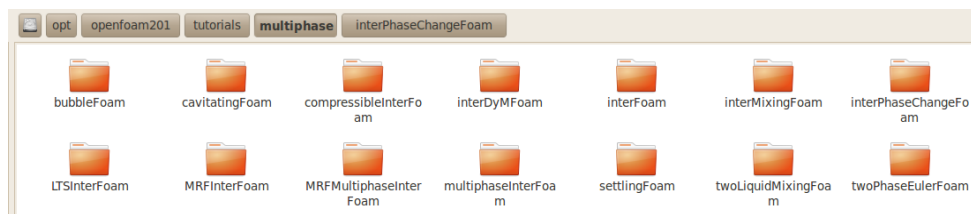
ابتدا بایستی فایل *interFoam* که در مسیر

opt>openfoam201>tutorials>multiphase>interPhaseChangeFoam

قرار دارد، کپی و در مسیر

Home >OpenFoam> ubuntu-1.5-dev > run

قرار داده شود.

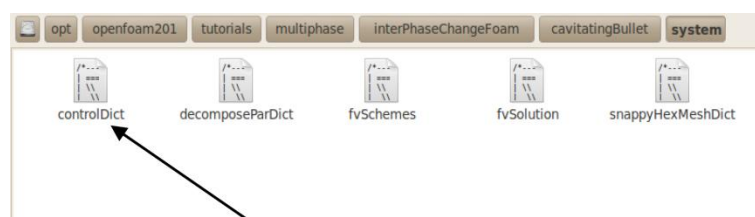


شکل (۴) مسیر فایل *interPhaseChangeFoam*

زمان شروع حل مساله ۰؛ زمان پایان ۱ و گام زمانی ۰/۵ می باشد که نتایج حل در بازه زمانی ۰/۰۱ به

۰/۰۱ چاپ می گردد. این اطلاعات در فایل *controlDict* قابل مشاهده می باشد. با کلیک بر روی فایل

controlDict، کد مورد نظر دیده می شود که در زیر آورده شده است.



شکل (۱۲) مسیر فایل *controlDict*

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ / O peration | Version: 2.0.1 |
| \ / A nd | Web: www.OpenFOAM.com |
| \ / M anipulation |

```

```

\*-----*/
FoamFile
{
    version    2.0;
    formatascii;
    class      dictionary;
    object      controlDict;
}
// ***** //

applicationinterPhaseChangeFoam;

startFromlatestTime;

startTime      0;      ← زمان شروع حل مساله

stopAtendTime;

endTime        0.05;   ← زمان اتمام حل مساله

deltaT         1e-8;    ← گام زمانی

writeControladjustableRunTime;

writeInterval   0.001;

purgeWrite      0;

writeFormatascii;

writePrecision  6;

writeCompression    uncompressed;

timeFormat      general;

runTimeModifiable    yes;

adjustTimeStep    on;

maxCo            1.0;

// *****
//

```


پس از حل، برای مشاهده‌ی شبکه و انیمیشن مسأله، بایستی دستور *paraFoam* در *console* تایپ شود.

پیوست ۳

کد عددی کمیت *DestructCoeff*:

```
{
word alphaScheme("div(phi,alpha)");
word alphasScheme("div(phirb,alpha)");

surfaceScalarField phir("phir", phic*interface.nHatf());

for (int gCorr=0; gCorr<nAlphaCorr; gCorr++)
{
    surfaceScalarField phiAlpha
    (
        fvc::flux
        (
            phi,
            alpha1,
            alphaScheme
        )
        + fvc::flux
        (
            -fvc::flux(-phir, scalar(1) - alpha1, alphasScheme),
            alpha1,
            alphasScheme
        )
    );

    Pair<tmp<volScalarField> > vDotAlpha1 =
        twoPhaseProperties->vDotAlpha1();
    const volScalarField& vDotcAlpha1 = vDotAlpha1[0]();
    const volScalarField& vDotvAlpha1 = vDotAlpha1[1]();

    volScalarField Sp
    (
        IOobject
        (
            "Sp",
            runTime.timeName(),
            mesh
        ),
```

```

        vDotvAlphal - vDotcAlphal
    );

    volScalarField Su
    (
        IOobject
        (
            "Su",
            runTime.timeName(),
            mesh
        ),
        // Divergence term is handled explicitly to be
        // consistent with the explicit transport solution
        divU*alpha1
        + vDotcAlphal
    );

    //MULES::explicitSolve
    //(
    //    geometricOneField(),
    //    alpha1,
    //    phi,
    //    phiAlpha,
    //    Sp,
    //    Su,
    //    1,
    //    0
    //);

    MULES::implicitSolve
    (
        geometricOneField(),
        alpha1,
        phi,
        phiAlpha,
        Sp,
        Su,
        1,
        0
    );

    rhoPhi +=
        (runTime.deltaT()/totalDeltaT)
        *(phiAlpha*(rho1 - rho2) + phi*rho2);
}

Info<< "Liquid phase volume fraction = "
<< alpha1.weightedAverage(mesh.V()).value()
<< " Min(alpha1) = " << min(alpha1).value()

```

```

    << " Max(alpha1) = " << max(alpha1).value()
    << endl;
}

forAll (alpha1 , celli)
{
    if (alpha1[celli] > 0.5)
    {
        DestructCoeff[celli]= alpha1[celli];
    }

    else
    {
        DestructCoeff[celli]=0;
    }
}

```

کد عددی مربوط به اضافه کردن کمیت های لازم در فایل **:CreatFiled**

```

Info<< "Reading field p_rgh\n" << endl;
volScalarField p_rgh
(
    IOobject
    (
        "p_rgh",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

Info<< "Reading field alpha1\n" << endl;
volScalarField alpha1
(
    IOobject
    (
        "alpha1",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

```

```

Info<< "Reading field U\n" << endl;
volVectorField U
(
    IOobject
    (
        "U",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

#include "createPhi.H"

Info<< "Creating phaseChangeTwoPhaseMixture\n" << endl;
autoPtr<phaseChangeTwoPhaseMixture> twoPhaseProperties =
    phaseChangeTwoPhaseMixture::New(U, phi);

const dimensionedScalar& rho1 = twoPhaseProperties->rho1();
const dimensionedScalar& rho2 = twoPhaseProperties->rho2();
const dimensionedScalar& pSat = twoPhaseProperties->pSat();

// Need to store rho for ddt(rho, U)
volScalarField rho
(
    IOobject
    (
        "rho",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::READ_IF_PRESENT
    ),
    alpha1*rho1 + (scalar(1) - alpha1)*rho2,
    alpha1.boundaryField().types()
);
rho.oldTime();

// Construct interface from alpha1 distribution
interfaceProperties interface(alpha1, U, twoPhaseProperties());

// Construct incompressible turbulence model
autoPtr<incompressible::turbulenceModel> turbulence
(
    incompressible::turbulenceModel::New(U, phi, twoPhaseProperties())
);

```

```

Info<< "Calculating field g.h\n" << endl;
volScalarField gh("gh", g & mesh.C());
surfaceScalarField ghf("ghf", g & mesh.Cf());

volScalarField p
(
    IOobject
    (
        "p",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::NO_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    p_rgh + rho*gh
);

label pRefCell = 0;
scalar pRefValue = 0.0;
setRefCell
(
    p,
    p_rgh,
    mesh.solutionDict().subDict("PIMPLE"),
    pRefCell,
    pRefValue
);

if (p_rgh.needReference())
{
    p += dimensionedScalar
    (
        "p",
        p.dimensions(),
        pRefValue - getRefCellValue(p, pRefCell)
    );
    p_rgh = p - rho*gh;
}
volScalarField DestructCoeff
(
    IOobject
    (
        "DestructCoeff",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh

```

```

);

volScalarField deltastar
(
    IOobject
    (
        "deltastar",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

volScalarField tavstar
(
    IOobject
    (
        "tavstar",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

volScalarField Np
(
    IOobject
    (
        "Np",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

```

کد عددی مدل کانز:

Model Kunzl(fileKunz.H):

```

/*-----*\

#ifdef Kunz_H

```

```

#define Kunz_H

#include "phaseChangeTwoPhaseMixture.H"

// * * * * *
namespace Foam
{
    namespace phaseChangeTwoPhaseMixtures
    {

        /*-----*\
                           Class Kunz
        \*-----*/

        class Kunz
        :
        public phaseChangeTwoPhaseMixture
        {
            // Private data

            dimensionedScalar UInf_;
            dimensionedScalar tInf_;
            dimensionedScalar Cc_;
            dimensionedScalar Cv_;

            dimensionedScalar p0_;

            dimensionedScalar mcCoeff_;
            dimensionedScalar mvCoeff_;

        public:

            //- Runtime type information
            TypeName("Kunz");

            // Constructors

            //- construct from components
            Kunz
            (
                const volVectorField& U,
                const surfaceScalarField& phi,
                const word& alpha1Name = "alpha1"
            );

```

```

//- Destructor
virtual ~Kunz()
{}

// Member Functions

//- Return the mass condensation and vaporisation rates as a
// coefficient to multiply (1 - alphas) for the condensation rate
// and a coefficient to multiply alphas for the vaporisation rate
virtual Pair<tmp<volScalarField> > mDotAlphas() const;

//- Return the mass condensation and vaporisation rates as an
// explicit term for the condensation rate and a coefficient to
// multiply (p - pSat) for the vaporisation rate
virtual Pair<tmp<volScalarField> > mDotP() const;

//- Correct the Kunz phaseChange model
virtual void correct();

//- Read the transportProperties dictionary and update
virtual bool read();
};

// * * * * *

} // End namespace phaseChangeTwoPhaseMixtures

} // End namespace Foam

// * * * * *

#endif

// *****
//

Model Kunz(fileKunz.C):
/*-----*/

#include "Kunz.H"
#include "addToRunTimeSelectionTable.H"

// * * * * * Static Data Members * * * * *

```



```

namespace Foam
{
namespace phaseChangeTwoPhaseMixtures
{
    defineTypeNameAndDebug(Kunz, 0);
    addToRunTimeSelectionTable(phaseChangeTwoPhaseMixture, Kunz,
components);
}
}

// * * * * * Constructors * * * * * //

Foam::phaseChangeTwoPhaseMixtures::Kunz::Kunz
(
    const volVectorField& U,
    const surfaceScalarField& phi,
    const word& alpha1Name
)
:
    phaseChangeTwoPhaseMixture(typeName, U, phi, alpha1Name),

    UInf_(phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("UInf")), // UInf =7.2;
    tInf_(phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("tInf")), // tInf
=0.00625;
    Cc_(phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("Cc")), // Cc =100;
    Cv_(phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("Cv")), // Cv =100;

    p0_("0", pSat().dimensions(), 0.0),

    mcCoeff_(Cc_*rho2()/tInf_),
    mvCoeff_(Cv_*rho2()/(0.5*rho1()*sqr(UInf_)*tInf_))
{
    correct();
}

// * * * * * Member Functions * * * * * //

Foam::Pair<Foam::tmp<Foam::volScalarField> >
Foam::phaseChangeTwoPhaseMixtures::Kunz::mDotAlphal() const
{
    const volScalarField& p = alpha1_.db().lookupObject<volScalarField>("p");
    volScalarField limitedAlpha1(min(max(alpha1_, scalar(0)), scalar(1)));

    return Pair<tmp<volScalarField> >
    (
        mcCoeff_*sqr(limitedAlpha1)
        *max(p - pSat(), p0_)/max(p - pSat(), 0.01*pSat()),

        mvCoeff_*min(p - pSat(), p0_)
    )
}

```

```

    );
}

Foam::Pair<Foam::tmp<Foam::volScalarField> >
Foam::phaseChangeTwoPhaseMixtures::Kunz::mDotP() const
{
    const volScalarField& p = alpha1_.db().lookupObject<volScalarField>("p");
    volScalarField limitedAlpha1(min(max(alpha1_, scalar(0)), scalar(1)));

    return Pair<tmp<volScalarField> >
    (
        mcCoeff_*sqr(limitedAlpha1)*(1.0 - limitedAlpha1)
        *pos(p - pSat())/max(p - pSat(), 0.01*pSat()),

        (-mvCoeff_)*limitedAlpha1*neg(p - pSat())
    );
}

void Foam::phaseChangeTwoPhaseMixtures::Kunz::correct()
{}

bool Foam::phaseChangeTwoPhaseMixtures::Kunz::read()
{
    if (phaseChangeTwoPhaseMixture::read())
    {
        phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_ = subDict(type() + "Coeffs");

        phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("UInf") >> UInf_;
        phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("tInf") >> tInf_;
        phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("Cc") >> Cc_;
        phaseChangeTwoPhaseMixtureCoeffs_.lookup("Cv") >> Cv_;

        mcCoeff_ = Cc_*rho2()/tInf_;
        mvCoeff_ = Cv_*rho2()/(0.5*rho1()*sqr(UInf_)*tInf_);

        return true;
    }
    else
    {
        return false;
    }
}
// *****
//

```

پیوست ۴

نحوه افزودن کد کمیت نرخ خوردگی کاویتاسیون به حلگر مورد استفاده:

پس از ورود به شاخه حلگر، ابتدا باید در صفحه اول آن و در پوشه createFields.H وارد شده و

خطوط زیر پس از خطوط معرفی آلفا، سرعت و فشار به آن اضافه گردد:

```
volScalarField DestructCoeff
(
    IOobject
    (
        "DestructCoeff",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

```
volScalarField deltastar
(
    IOobject
    (
        "deltastar",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

```
volScalarField tavstar
(
    IOobject
    (
        "tavstar",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

```

volScalarField Np
(
    IOobject
    (
        "Np",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);

```

توسط خطوط بالا کمیت‌های ضریب خوردگی^۱، قطر حفره خوردگی^۲، زمان پوشش^۳ و نرخ خوردگی^۴ برای حلگر مورد نظر ما تعریف می‌گردد.

بعد از افزودن خطوط بالا در پوشه آلفا با اضافه کردن خطوط زیر در انتهای خطوط پوشه آلفا کمیت ضریب خوردگی را تعریف می‌کنیم

```

forAll (alpha1 , celli)
{
    if (alpha1[celli] > 0.5)
    {
        DestructCoeff[celli]= alpha1[celli];
    }

    else
    {
        DestructCoeff[celli]=0;
    }
}

```

در ادامه در پوشه سرعت خطوط زیر را بمنظور ایجاد کدهای نرخ خوردگی کاویتاسیون در هر دو حالت سرعت متغیر و سرعت ثابت اضافه می‌کنیم

^۱ *DestructCoeff*

^۲ δ

^۳ τ

^۴ N_p

خطوط مربوط به کد عددی کمیت نرخ خوردگی کاویتاسیون در حالت سرعت متغیر:

```
volScalarField Ux=U.component(0);
volScalarField Uy=U.component(1);
volScalarField Uz=U.component(2);
volScalarField Utot=pow( ( (magSqr(Ux)) + (magSqr(Uy)) + (magSqr(Uz)) ), 0.5);

forAll (DestructCoeff,celli)
{
    if (DestructCoeff[celli]> 0.5)
    {

deltastar[celli]=DestructCoeff[celli]*((3.85*pow((pow(10,(Foam::log10(Utot[celli])))),(
3/4)))-3);

tavstar[celli]=DestructCoeff[celli]*pow(10,(-6.5*Foam::log10(Utot[celli])+11));

}

Np[celli]= 8/(3.14*pow(deltastar[celli],2)*tavstar[celli])*Foam::exp((2D/deltastar[celli]));

        else
        {
            Np[celli]=0
        }

    }
}
```

خطوط مربوط به کد عددی کمیت نرخ خوردگی کاویتاسیون در حالت سرعت ثابت:

```
volScalarField Ux=U.component(0);
volScalarField Uy=U.component(1);
volScalarField Uz=U.component(2);
volScalarField Utot=pow( ( (magSqr(Ux)) + (magSqr(Uy)) + (magSqr(Uz)) ), 0.5);

forAll (DestructCoeff,celli)
{
    if (DestructCoeff[celli]> 0.5)
    {

deltastar[celli]=DestructCoeff[celli]*  $\delta$  ;

tavstar[celli]=DestructCoeff[celli]*  $\tau$  ;

}

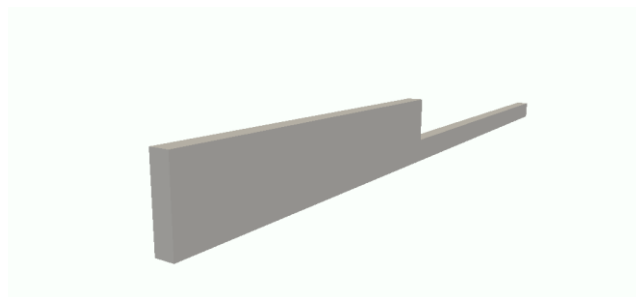
Np[celli]=8/(3.14*pow(deltastar[celli],2)*tavstar[celli])*Foam::exp((2D/deltastar[celli]
```

```
);
    else
    {
        Np[celli]=0
    }
}
```

اکنون حلگر ما توانایی این را دارد که کمیت نرخ خوردگی کاویتاسیون و سایر کمیت‌های مورد نیاز در تحقیق حاضر را حل نماید.

پیوست ۵

پس از وارد کردن شبکه مورد نظر به صورت دوبعدی به محیط آپن فوم با استفاده از حلگر makeAxialMesh شرط مرزی متقارن محوری ایجاد می‌گردد.



هندسه دوبعدی اولیه وارد شده در آپن فوم

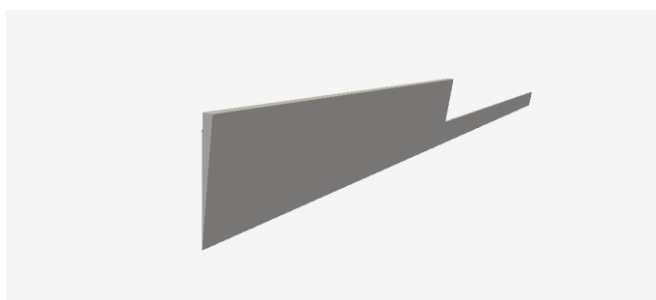
اولین گام استفاده از دستور زیر می‌باشد که بایستی در ترمینال لینوکس نوشته شود:

1- makeAxialMesh -axis center -wedge frontAndBack

با اتمام مراحل بالا هنوز فرآیند تولید مرز متقارن محوری به اتمام نرسیده است، حال باید دستور زیر برای اتمام کار وارد گردد:

2- collapseEdges 1e-8 180

حال هندسه مورد نظر که ابتدا به صورت دوبعدی وارد آپن فوم شده بود به صورت یک هندسه گوه‌ای شکل در آمده است که شرط متقارن محوری با این هندسه جدید قابل اعمال است، برای درک بهتر در شکل زیر نمونه‌ای از هندسه دوبعدی وارد شده به آپن فوم قبل انجام این فرآیند و پس از اعمال آن، آورده شده است:



هندسه دوبعدی تغییر یافته با شرط متقارن محوری در آپن فوم

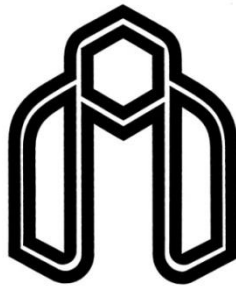
Abstract:

Prevention of cavitation is so important in internal flows such as valves and pumps and some external flows such as hydro power plants. On the other hand, this phenomenon has advantages in some external flows. Its formation around underwater projectile reduces the frictional drag force due to the reduction of viscosity in the vapor phase.

This is one of the main reasons for the use of natural or artificial cavitation of underwater projectiles. The high cost of laboratory works and time consuming to view this phenomenon, cause the increasing of numerical superiority in this field. This thesis presents the estimation of destructive cavitation phenomenon study in a numerical method. Quantitative measure which is called cavitation corrosion rate has been investigated to estimate the destructive impact of cavitation phenomenon. After defining the cavitation phenomenon, the governing fundamental equations are given and then existing model for analysis and numerical solutions for this phenomenon have introduced. In numerical study, first of all, cavitation corrosion rate has introduced, then by considering three states as fixed velocity, variable velocity and the transfer rate of corrosion mode and by entering code numbers using the C++ language program under Linux, numerical solutions have proposed which are capable of simulating and cavitation corrosion rate quantity calculation. The Open Foam software is used to run the numerical codes.

A nozzle geometry is chosen which is fitted with the experimental results. In order to calculate the quantity of cavitation corrosion rate in all states, two kinds of metals, steel and aluminum, are used in different pressures. In a fixed velocity and variable velocity cases, the numerical corrosion rate is obtained and the achieved results are compared with experimental results. By using the transfer of corrosion principle, cavitation corrosion rate is calculated. Finally, the average relative error percentage for each of three states is calculated. Based on the lowest average relative error percentage of transfer of corrosion principle compared with other cases, in order to obtain cavitation corrosion rate, using transfer of corrosion principle is recommended. Two other approaches require excessive computation memory, unavailability of metal for precise corrosion experiment, shortage of laboratory equipped with corrosion test equipment and other factors. As a result, the transfer of corrosion principle approach is recommended.

Keywords: Cavitation, Pitting rate erosion, Coverage time, Transfer the erosion rate, Cavitation, Mass transfer model kunz



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Numerical Estimation of Cavitations' Destructive Effect

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc)

By :

Saeed Eshghi

Supervisor :

Dr. A. Sarreshteh dari

Advisor :

Dr. M. Ghatte

Date: June 2013