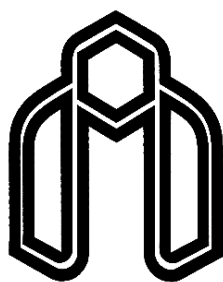


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی جریان سوپرکاویتاسیون روی کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های

غیرهم‌مرکز

نگارنده: مصطفی یزدانی

اساتید راهنما

دکتر پوریا اکبرزاده

دکتر محمدحسن کیهانی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۸/۲۹۶/۱۳۴
تاریخ: ۱۳۹۶/۷/۲۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی یزدانی با شماره دانشجویی ۹۳۳۳۰۱۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان شبیه سازی عددی جریان سوپرکاویتاسیون روی کاواک زای دیسکی با سوراخ های غیر هم مرکز که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۶/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۷/۷۸ درجه (.....) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر پوریا اکبرزاده	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمود چارطاقی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمدحسن شاهمردان	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی سررشته داری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تصريح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز، تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان

تقدیم می نمایم به

والدینی که بودند تاج افتخاری است بر سرم

و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از

پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این

وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

برادرانم که بودند یار دگر می من می باشد

پاسکزاری

پاس مخصوص اوست که بیایه ترین است برای ستایش. پاس خدای را که سخنران، در ستودن او بماند و شانه‌نگان، شمردن نعمت‌های او نماند و گوشه‌گاه، حق او را کزاردن نتوانند و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و اندام وجودمان است. خدایا! دست یاری هر لحظه تو در فراز و نشیب‌های دشوار، پشتیبان من و روشنی نور تو در تاریکی‌های تاریکی من بوده است. مرا بیایه تمنای جان کن و در غریب و قریب، آمل و عاجل مرا سزاوار انعام کن. ای نهایت مهربانی!

بر خود لازم می‌دانم در پیمان این منتخ تحصیلی از افرادی که مراد امر پژوهش یاری نموده‌اند، تشکر کنم. از اساتید محترم و بزرگوار آقاخان، دکتر پوریا اکبرزاده و دکتر محمد حسن کیبانی، به پاس همراهی صمیمانه، نکته‌سنجی‌های علمی و از همه مهم‌تر، رفتار و برخورد نیکویشان و همچنین فراهم آوردن محیطی مناسب و آرام برای فعالیت پاسکزارم. همچنین از اساتید داور که زحمت داور این پیمان نامه را پذیرفته‌اند پاسکزارم.

به علاوه از زحمات، حمایت‌ها و دگرگونی‌های همه دوستان خوبم در دانشگاه صنعتی شاهرود تشکر می‌نمایم و در پیمان از خانواده مهربانم که دعای خیرشان، همواره پشتیبان من بوده است، بی‌نهایت پاسکزارم.

اینجانب **مصطفی یزدانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شبیه‌سازی عددی جریان ابرکاواک روی کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های غیر هم‌مرکز تحت راهنمایی دکتر پوریا اکبرزاده و دکتر محمدحسن کیهانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

کاواک‌زایی پدیده‌ای است که با کاهش فشار مایع به مقداری کمتر از فشار بخار اشباع به وجود آمده و باعث تبدیل فاز مایع به فاز بخار می‌شود. این پدیده در اجسام متحرک و مستغرق در سیال مانند توربو ماشین‌های آبی اتفاق می‌افتد و دارای مشخصه‌ها و کاربردهای مطلوب و نامطلوب است. از کاربردهای مطلوب آن می‌توان به کاهش نیروی پسا در اجسام زیرسطحی و تمیزکاری سطوح اشاره کرد و از آثار نامطلوب آن می‌توان به خوردگی سطوح فلزی، ارتعاشات، کاهش راندمان تجهیزات و سروصدا اشاره نمود. کاواک‌زا وسیله‌ای است برای ایجاد ابرکاواک روی وسایل زیرآبی همانند اژدر که در دماغه آن‌ها نصب می‌شود. انواع کاواک‌زاهای مورد استفاده مخروط، مخروط ناقص، نیم‌کره و دیسک می‌باشد. در این پایان‌نامه برای ایجاد جریان ابرکاواک از کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های غیر هم‌مرکز استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر سایز (قطر) و جانمایی سوراخ‌های غیر هم‌مرکز بر طول و قطر کاواک ایجادشده، همچنین مقدار ضریب پسا روی کاواک‌زا می‌باشد. برای شبیه‌سازی پدیده کاواک‌زایی از نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل آشفتگی $k\omega - SST$ ، مدل چند فازی مخلوط، همچنین مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکندر استفاده می‌نمائیم.

کاواک‌زای شماره ۳ و ۲۴، به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین کاواک را نسبت به کاواک‌زاهای دیگر ایجاد می‌نمایند و کاواک‌زای دوم دارای ضریب پسای بزرگ‌تری می‌باشد. کاواک‌زای دارای سوراخ ضریب پسای فشار کوچک‌تری نسبت به کاواک‌زای بدون سوراخ دارد و دارای کاواکی با طول و قطر کمتر است.

واژه‌های کلیدی: ابرکاواک، کاواک‌زا، مدل کاواک‌زایی، مدل آشفتگی $k\omega - SST$ ، مدل چند فازی

مخلوط

فهرست مطالب

- فصل اول مقدمه و آشنایی با پدیده کاواک‌زایی ۱
- ۱-۱- کاواک‌زایی ۲
- ۲-۱- ترمودینامیک پدیده کاواک‌زایی ۳
- ۳-۱- کاواک‌زا ۵
- ۴-۱- عدد کاواک‌زایی ۷
- ۵-۱- آثار و پیامدهای کاواک‌زایی ۸
- ۶-۱- علل شروع کاواک‌زایی ۹
- ۷-۱- فشار کاواک ۱۰
- ۸-۱- شرایط مطلوب برای ایجاد پدیده کاواک‌زایی ۱۰
- ۹-۱- انواع کاواک ۱۱
- ۱۰-۱- کاواک‌زایی هیدرودینامیکی ۱۲
- ۱-۱۰-۱- کاواک متحرک ۱۲
- ۲-۱۰-۱- کاواک ابری ۱۳
- ۳-۱۰-۱- کاواک گردابه‌ای ۱۳
- ۴-۱۰-۱- کاواک صفحه‌ای ۱۴
- ۵-۱۰-۱- ابر کاواک ۱۵
- ۱-۱۱-۱- ابر کاواک ۱۵

- ۱۲-۱- طول ناحیه کاواک‌زایی ۲۰
- ۱۳-۱- نمونه‌هایی از کاربردهای پدیده ابرکاواک ۲۱
- ۱-۱۳-۱- اژدرها ۲۱
- ۲-۱۳-۱- زیردریایی‌ها ۲۲
- ۳-۱۳-۱- پروانه کشتی‌ها ۲۳
- ۴-۱۳-۱- کاواک‌زایی در انژکتورهای سوخت ۲۳
- ۱۴-۱- اثرات نامطلوب کاواک‌زایی ۲۵
- ۱-۱۴-۱- پمپ‌ها ۲۶
- ۲-۱۴-۱- شیرهای کنترل ۲۷
- ۳-۱۴-۱- توربین ۲۸
- ۴-۱۴-۱- کاواک‌زایی در یاتاقان‌ها ۲۹
- ۱۵-۱- نقش پدیده ابرکاواک در کاهش نیروی پسا ۳۰
- فصل دوم مروری بر تحقیقات انجام شده ۳۳
- ۱-۲- مقدمه ۳۴
- ۲-۲- مطالعات عددی پدیده کاواک‌زایی ۳۴
- ۳-۲- اهمیت روش‌های عددی حل جریان ۳۴
- ۴-۲- معرفی مدل‌های حل عددی ۳۵
- ۱-۴-۲- مدل ردیابی مرز مشترک ۳۵
- ۲-۴-۲- مدل جریان تعادلی همگن ۳۶

- فصل سوم معادلات حاکم و روش حل ۵۱
- ۱-۳- مقدمه ۵۲
- ۲-۲- رژیم‌های جریان‌های چند فازی ۵۲
- ۱-۲-۳- جریان‌های مایع-گاز یا مایع-مایع ۵۲
- ۲-۲-۳- جریان‌های گاز-جامد ۵۳
- ۳-۲-۳- جریان‌های مایع-جامد ۵۴
- ۴-۲-۳- جریان‌های سه فازی ۵۴
- ۳-۳- نمونه‌هایی از سیستم‌های چند فازی ۵۵
- ۴-۳- مدل‌سازی انتقال جرم در جریان‌های چند فازی ۵۵
- ۱-۴-۳- جمله‌های چشمه ناشی از انتقال جرم ۵۶
- ۲-۴-۳- معادله جرم ۵۶
- ۳-۴-۳- معادله ممنتوم ۵۶
- ۴-۴-۳- معادله انرژی ۵۶
- ۵-۴-۳- معادله اجزا ۵۷
- ۵-۳- مدل‌سازی کاواک‌زایی ۵۷
- ۱-۵-۳- مدل‌های کاواک‌زایی در نرم‌افزار انسیس فلونت ۵۷
- ۲-۵-۳- فرضیات هنگام استفاده از مدل‌های کاواک‌زایی دوفازی استاندارد ۵۸
- ۳-۵-۳- محدودیت‌های مدل‌های کاواک‌زایی ۵۸
- ۴-۵-۳- معادله انتقال بخار ۵۹

- ۵۹..... ۳-۵-۵- مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکنر
- ۶۱..... ۳-۵-۶- نحوه تشخیص منطقه حبایی در مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکنر
- ۶۴..... ۳-۶-۶- فرضیه مدل مخلوط
- ۶۵..... ۳-۶-۱- محدودیت‌های مدل مخلوط
- ۶۶..... ۳-۶-۲- معادله پیوستگی
- ۶۷..... ۳-۷-۷- معادله ممنوم
- ۶۷..... ۳-۷-۱- معادله انرژی
- ۶۸..... ۳-۷-۲- سرعت نسبی (لغزش) و سرعت راندگی (رانش)
- ۷۰..... ۳-۷-۳- معادله کسر حجمی برای فازهای ثانویه
- ۷۰..... ۳-۸-۸- مقدمه‌ای کوتاه بر آشفتگی
- ۷۳..... ۳-۹-۹- مدل‌های اغتشاشی $k - \omega$
- ۷۴..... ۳-۱۰-۱۰- مدل اغتشاشی انتقال تنش برشی (SST $k-\omega$)
- ۷۵..... ۳-۱۰-۱- معادلات انتقال برای مدل SST $k-\omega$
- ۷۵..... ۳-۱۰-۲- مدل‌سازی پخش موثر
- ۷۶..... ۳-۱۰-۳- مدل‌سازی تولید اغتشاشات
- ۷۷..... ۳-۱۰-۴- مدل‌سازی اتلاف اغتشاشات
- ۷۸..... ۳-۱۰-۵- اصلاح انتشار متقابل
- ۷۸..... ۳-۱۰-۶- مدل‌سازی لزجت گردابه‌ای
- ۷۹..... ۳-۱۰-۷- ثابت‌های مدل SST $k-\omega$

- ۷۹..... ۳-۱۰-۸- میرایی اغتشاشات
- ۸۰..... ۳-۱۰-۹- شرایط مرزی در مدل‌های $k - \omega$
- ۸۳..... فصل چهارم نتایج حاصل از جریان ابر کاواک‌زایی و بررسی آن‌ها
- ۸۴..... ۴-۱- مقدمه
- ۸۴..... ۴-۲- شرایط حاکم بر شبیه‌سازی
- ۸۸..... ۴-۳- روابط ارائه شده برای محاسبه طول و قطر کاواک و ضریب پسا
- ۹۰..... ۴-۴- بررسی استقلال از شبکه
- ۹۴..... ۴-۵- نیروی پسا
- ۹۷..... ۴-۶- ضریب پسا
- ۹۸..... ۴-۶-۱- نتایج بدست آمده برای ضریب پسای فشاری در عدد کاواک‌زایی ۰/۲
- ۱۰۲..... ۴-۷- کسر حجمی بخار
- ۱۰۲..... ۴-۷-۱- نتایج نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۲
- ۱۰۶..... ۴-۷-۲- نتایج نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۲
- ۱۰۷..... ۴-۸- نتایج حاصله در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵
- ۱۰۸..... ۴-۸-۱- فرایند رشد ابر کاواک
- ۱۱۱..... ۴-۹- نتایج شبیه‌سازی جریان پشت دیسک همراه با میله استوانه‌ای
- ۱۱۳..... ۴-۱۰- بررسی جریان ابر کاواک روی اژدر در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵
- ۱۱۵..... ۴-۱۰-۱- شکل‌گیری ابر کاواک
- ۱۱۹..... فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۲۰..... ۱-۵- بحث و نتیجه گیری

۱۲۱..... ۲-۵- پیشنهادها

۱۲۳..... منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تخریب پروانه کشتی به وسیله پدیده کاواک‌زایی [۲]..... ۳
- شکل ۲-۱: انواع رژیم‌های مختلف جریان در پدیده کاواک‌زایی [۳]..... ۴
- شکل ۳-۱: تفاوت میان پدیده‌های جوشش و کاواک‌زایی در نمودار فشار-حجم مخصوص [۴]..... ۵
- شکل ۴-۱: ابر کاواک ایجاد شده پشت کاواک‌زای دیسکی و کاواک‌زای مخروطی با زاویه راس مختلف [۵]..... ۶
- شکل ۵-۱: ناحیه ابر کاواک، نتایج تجربی از تونل آب. کاواک‌زای دیسکی (راست)، کاواک‌زای مخروطی (چپ) [۶]..... ۷
- شکل ۶-۱: نمونه‌ای از جریان ابر کاواک پشت یک هیدروفویل دو بعدی [۸]..... ۱۰
- شکل ۷-۱: نمونه‌ای از یک کاواک متحرک بر روی یک هیدروفویل [۴]..... ۱۳
- شکل ۸-۱: نمونه‌ای از یک کاواک ابری بر روی یک هیدروفویل [۴]..... ۱۴
- شکل ۹-۱: نمونه‌ای از یک کاواک گردابه‌ای حول پروانه چرخان [۴]..... ۱۴
- شکل ۱۰-۱: نمونه‌ای از یک کاواک صفحه‌ای روی یک هیدروفویل [۴]..... ۱۵
- شکل ۱۱-۱: نمونه‌ای از ابر کاواک‌های مصنوعی (بالا) و ابر کاواک طبیعی (پائین) [۴]..... ۱۶
- شکل ۱۲-۱: پرتابه با تکنولوژی ابر کاواک و دارای کاواک‌زای مخروطی..... ۱۸
- شکل ۱۳-۱: پرتابه با تکنولوژی ابر کاواک و دارای کاواک‌زای دیسکی..... ۱۸
- شکل ۱۴-۱: نمایی از اژدر ابر کاواکی به همراه بالک‌ها..... ۱۸
- شکل ۱۵-۱: پرتابه واقعی با تکنولوژی ابر کاواک (راست)، ناحیه ابر کاواک بر روی این پرتابه (چپ)..... ۱۹
- شکل ۱۶-۱: یک پرتابه ابر کاواکی..... ۱۹
- شکل ۱۷-۱: جریان ابر کاواک اطراف یک هیدروفویل در عدد کاواک‌زایی کوچک [۱۱]..... ۲۰
- شکل ۱۸-۱: جریان ابر کاواک متقارن محوری [۱۱]..... ۲۰
- شکل ۱۹-۱: نمایی از رابطه نسبی بین طول کاواک با عدد کاواک‌زایی برای سه مقدار متفاوت از عمق غوطه‌وری [۸]..... ۲۲
- شکل ۲۰-۱: اژدر اشکوال و حباب تشکیل شده اطراف آن [۱۲]..... ۲۳
- شکل ۲۱-۱: زیردریایی با تکنولوژی ابر کاواک..... ۲۴
- شکل ۲۲-۱: پروانه کشتی با تکنولوژی ابر کاواک [۱۳]..... ۲۴
- شکل ۲۳-۱: توزیع تغییرات چگالی (بالا) و تغییرات سرعت (پایین) در یک نازل [۱۴]..... ۲۵
- شکل ۲۴-۱: کانتور کسر حجمی برای یک نازل در سرعت ۲۰۰ متر در ثانیه [۱۴]..... ۲۵
- شکل ۲۵-۱: تشکیل پدیده‌ی کاواک‌زایی در پمپ [۱۵]..... ۲۷
- شکل ۲۶-۱: صدمات ناشی از کاواک‌زایی روی پروانه پمپ [۱۵]..... ۲۷
- شکل ۲۷-۱: خرابی اجزاء شیر کنترل در اثر کاواک‌زایی (راست) تشکیل منطقه کاواک‌زایی (وسط) منحنی تغییرات فشار سیال در

- ۲۹ یک شیر کنترل (چپ) [۱۶].....
- شکل ۲۸-۱: کانتور کسر حجمی روی توربین کاپلان (چپ) نمونه واقعی از توربین کاپلان و صدمات وارده به آن بعد از ۶۱ سال
- ۲۹ سرویس (راست) [۱۷].....
- شکل ۲۹-۱: کاواک‌زایی در یاتاقان محوری ساده [۱۲].....
- شکل ۳۰-۱: تولید ابر کاواک به روش طبیعی [۱۹].....
- شکل ۳۱-۱: تولید ابر کاواک به روش مصنوعی به کمک میکرو حباب [۱۹].....
- شکل ۳۲-۱: تولید ابر کاواک به روش مصنوعی به کمک حباب‌های درشت [۱۹].....
- شکل ۳۳-۱: تشکیل ابر کاواک به روش ترکیبی [۱۹].....
- شکل ۱-۲: کاواک‌زای مورد استفاده در پایان‌نامه آقای طهماسبی [۱۲].....
- شکل ۲-۲: کاواک‌زاهای سه‌بعدی در پژوهش آهن و همکاران [۱۸].....
- شکل ۱-۳: رژیم‌های جریان چند فازي [۱۹].....
- شکل ۲-۳: تغییر چگالی ناشی از ایجاد ناحیه کاواک بر روی یک هیدروفویل [۳۰].....
- شکل ۳-۳: جریان حول یک استوانه در اعداد رینولدز مختلف [۱۹].....
- شکل ۴-۳: مقایسه دقت و هزینه محاسباتی مدل‌های اغتشاشی موجود در نرم افزار انسیس فلونت [۱۹].....
- شکل ۱-۴: نمایی از دیسک مورد استفاده در تحقیق حاضر با ایجاد چهار سوراخ و جانمایی آن‌ها (جانمایی ۱ تا ۳ به ترتیب الف تا پ) [۱۹].....
- شکل ۲-۴: دامنه محاسباتی میدان حل جریان و شرایط مرزی جریان [۱۹].....
- شکل ۳-۴: مش ایجاد شده برای یک چهارم ناحیه محاسباتی [۱۹].....
- شکل ۴-۴: مش لایه مرزی روی دیواره کاواک‌زای دیسکی [۱۹].....
- شکل ۵-۴: مقایسه نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا برای دیسک بدون سوراخ [۱۹].....
- شکل ۶-۴: مقایسه نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا برای دیسک بدون سوراخ [۱۹].....
- شکل ۷-۴: مقایسه ضریب پسای فشاری روی دیسک بدون سوراخ [۱۹].....
- شکل ۸-۴: ضریب فشار روی دیسک [۱۹].....
- شکل ۹-۴: + لا گزارش شده برای دیواره کاواک‌زای دیسکی [۱۹].....
- شکل ۱۰-۴: بردار سرعت روی دیسک در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ (جهت حرکت سیال از چپ به راست) [۱۹].....
- شکل ۱۱-۴: کانتور فشار روی دیسک با سه سوراخ در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ و نقاط سکون تشکیل شده [۱۹].....
- شکل ۱۲-۴: خطوط جریان روی کاواک‌زای دیسکی [۱۹].....
- شکل ۱۳-۴: کانتور فشار روی دیسک بدون سوراخ و سوراخ‌دار [۱۹].....

- شکل ۴-۱۴: ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۱ قطر دیسک..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۵: ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۲ قطر دیسک..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۶: ضریب پسای فشار ایجاد شده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۳ قطر دیسک..... ۱۰۲
- شکل ۴-۱۷: ابر کاواک شکل گرفته پشت دیسک در تست آزمایشگاهی [۵۱]..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۸: کاواک تشکیل شده در پشت کاواک‌زای شماره ۳ در عدد کاواک‌زایی ۰/۲..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۹: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۱ قطر دیسک..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۰: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۲ قطر دیسک..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۱: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۳ قطر دیسک..... ۱۰۵
- شکل ۴-۲۲: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۱ قطر دیسک..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۳: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۲ قطر دیسک..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۴: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۳ قطر دیسک..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۵: ابر کاواک شکل گرفته پشت دیسک : (الف) مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل انتقال جرم
سوئر_اسکندر (ب) مدل آشفتگی $\omega - SST k$ و مدل انتقال جرم سوئر_اسکندر..... ۱۰۸
- شکل ۴-۲۶: تست تجربی ابر کاواک پشت کاواک‌زای دیسکی [۵۱]..... ۱۰۹
- شکل ۴-۲۷: ضریب پسای فشاری در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۸: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۹: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۰: دیسک بدون سوراخ همراه به میله استوانه‌ای پشت آن..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۱: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۲: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای..... ۱۱۴
- شکل ۴-۳۳: ضریب پسای فشاری برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۴: ابعاد اژدر مورد بررسی در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵..... ۱۱۵
- شکل ۴-۳۵: ابر کاواک شکل گرفته روی اژدر با کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ..... ۱۱۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: خواص فیزیکی آب در شرایط استاندارد [۴] ($P=1 \text{ ATM}, T=300 \text{ K}$) ۵
- جدول ۱-۳: مثال‌های جریان‌های سیستم‌های چند فاز ۵۵
- جدول ۲-۳: رینولدر بحرانی در جریان داخلی و خارجی ۷۱
- جدول ۳-۳: ثابت‌های مدل $SST k - \omega$ ۷۹
- جدول ۱-۴: مشخصات کاواک‌زاهای مورد استفاده ۸۶
- جدول ۲-۴: مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ۹۰
- جدول ۳-۴: مشخصه‌های جریان ابرکاواک شکل گرفته در عدد کاواک‌زایی 0.105 ۱۱۷

فهرست نشانه‌ها

A_i	چگالی سطح مشترک برای فاز i
B	پارامتر میرایی
d	قطر کاواک‌زا
D	قطر کاواک
D_{ω}	انتشار متقابل (پخش مشترک)
D_{ω}^+	بخش مثبت انتشار متقابل
F_1	تابع تغییر وضعیت
\vec{F}	نیروی حجمی
f_{drag}	تابع دراگ
G_{ω}	جمله تولید فرکانس به دلیل اغتشاشات
G_k	جمله تولید انرژی جنبشی اغتشاشی
h_k	آنتالپی مشهود
$h_p^{f,i}$	آنتالپی تشکیل جزء i فاز p
H_p	چشمه انرژی در یک سلول برای فاز p
k_s	متوسط ارتفاع زبری‌های دیواره
K_{eff}	ضریب هدایت موثر
$m_{p^i q^j}$	نرخ انتقال جرم بر واحد حجم از جزء i ام فاز p به جزء j ام فاز q
P_{∞}	فشار استاتیکی مرجع سیال
P_v	فشار بخار
P_g	فشار جزئی گازهای مختلف
P_c	فشار کاواک
Re_t^3	عدد رینولدز جریان مغشوش
R_c	جمله چشمه انتقال جرم مربوط به رشد حباب

R_e	جمله چشمه انتقال جرم مربوط به فروپاشی حباب
R	نرخ انتقال جرم
Re	عدد رینولدز
R_B	شعاع حباب
S_ω	توابع منبع
S	ضریبی از متوسط نرخ تانسور کرنش
\vec{V}_v	سرعت فاز بخار
V_∞	سرعت بالادست جریان
y	فاصله از نزدیک‌ترین دیوار
Y_ω	نرخ اتلاف فرکانس آشفستگی
Y_k	نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی
a	کسر حجمی بخار
$\vec{\alpha}$	شتاب ذرات فاز ثانویه
β	ضریب اتلاف
Γ_ω	پخش موثر برای فرکانس اغتشاشات
Γ_k	پخش موثر برای انرژی جنبشی اغتشاشی
γ_γ	مقیاس زمانی آشفستگی فعال
Δn	ارتفاع سلول عمود بر سطح مشترک
η_t	قابلیت پخش آشفستگی
μ_m	لزجت مخلوط
μ_i	لزجت فاز i
\vec{V}_{dr}	سرعت راندگی
\vec{V}_m	سرعت جرمی متوسط
ρ_m	چگالی مخلوط

ρ_v	چگالی بخار
ρ_i	چگالی فاز i
ρ	چگالی سیال
σ	عدد کاواک زایی
σ_k	عدد پранتل اغتشاشی انرژی جنبشی اغتشاشی
σ_ω	عدد پранتل اغتشاشی فرکانس اغتشاشات
σ_t	عدد پранتل / اشمیت
τ_p	زمان آسایش ذره
ω_w	مقدار فرکانس اغتشاشات بر روی دیوار
ω^+	جمله بدون بعد فرکانس اغتشاشات
$ \nabla a_i $	اندازه تغییرات کسر حجمی
زیرنویس و بالانویس	
i, j	اندیس فازهای جریان
k	انرژی جنبشی اغتشاشی
v	مشخصه فاز بخار
ω	فرکانس اغتشاشات
∞	شرایط جریان آزاد

فصل اول مقدمه و آشنایی با پدیده

کاواک‌زایی

۱-۱- کاواک‌زایی

منظور از کاواک‌زایی^۱ شکل‌گیری، رشد، توسعه و فروپاشی ناگهانی تعدادی حفره در یک مایع ساکن و یا در حال حرکت می‌باشد. منظور از شکل‌گیری، تشکیل یک حفره جدید و یا انبساط یک حفره موجود به اندازه‌ای است که تاثیر ماکروسکوپیک آن قابل مشاهده باشد. این حفره‌ها ممکن است در داخل مایع، در شکاف‌های موجود روی سطوح در برگیرنده مایع و یا در ذرات جامد معلق داخل مایع، بدام افتاده و می‌توانند حاوی بخار، گاز و یا مخلوطی از بخار و گاز باشند. پدیده کاواک‌زایی به صورت فروپاشی محیط مایع در اثر کاهش فشار نیز تعریف می‌شود که این تعریف کاواک‌زایی را به محیط‌های پیوسته مرتبط خواهد ساخت و برای حالت‌هایی که مایع ساکن و یا در حال حرکت است به کار برده می‌شود. برای نخستین بار فرود در مورد این پدیده تحقیق کرد و آن را کاواک نامید که از لغت یونانی کویتی^۲ سرچشمه می‌گیرد [۱].

شباهت بین دو پدیده کاواک‌زایی و جوشیدن را می‌توان به وسیله اصل برنولی توضیح داد. هرگاه سرعت سیالی افزایش یابد با نگرش به اصل بقای انرژی، از فشار آن کاسته می‌شود. هرگاه دمای مایع، در فشار ثابت افزایش و یا فشار آن در دمای ثابت کاهش یابد، در نهایت حالت مایع شروع به تغییر کرده و حباب‌های پر شده از بخار آب و یا گاز تولید می‌گردند. این حباب‌ها را می‌توان به عنوان فضاهای خالی در مایع در نظر گرفت. بنابراین هم به وسیله افزایش دما در فشار ثابت و هم کاهش فشار در دمای ثابت، حباب در مایع به وجود می‌آید. نخستین روش جوشیدن و دومین روش کاواک‌زایی نام دارد. بنابراین کاواک‌زایی باعث ایجاد حباب در یک مایع در اثر کاهش فشار آن مایع می‌گردد.

کاواک‌زایی از اهمیت قابل توجهی در هیدرودینامیک برخوردار است و آثار آن باید در نظر گرفته شود. کاواک‌زایی علاوه بر کاهش کارایی پروانه‌ها، توربین‌ها و پمپ‌ها، باعث ایجاد خرابی شدید در آنها می‌شود. به همین دلیل تا مدت‌ها کاواک‌زایی به عنوان پدیده‌ای مخرب و نامطلوب شناخته می‌شد [۲].

^۱ Cavitation

^۲ cavity

با توجه به میزان گسترش پدیده کاواکزائی می توان آن را به سه بخش زیر تقسیم بندی کرد:

- کاواکزائی اولیه مرحله ی تشکیل حبابها است که همراه با صدای فروپاشی حبابها می باشد و از ویژگی های این مرحله ایجاد تخریب در اجسام جامد می باشد. برای مثال در پروانه کشتی ها، پمپها و توربینها.



شکل ۱-۱: تخریب پروانه کشتی به وسیله پدیده کاواکزایی [۲]

- کاواکزائی جزئی^۱ زمانی اتفاق می افتد که حبابهای ایجاد شده روی بخشی از جسم را می پوشانند. این حبابها نوسان می کنند و ناپایدارند.
- کاواکزائی کاملا گسترش یافته^۲ یا ابرکاواکزائی^۳ مرحله ای است که ابعاد حفره ایجاد شده بزرگتر از ابعاد جسم می باشد.

انواع رژیم های مختلف جریان در حال کاواکزائی بیان شده، در شکل ۱-۲ دیده می شود.

۲-۱- ترمودینامیک پدیده کاواکزایی

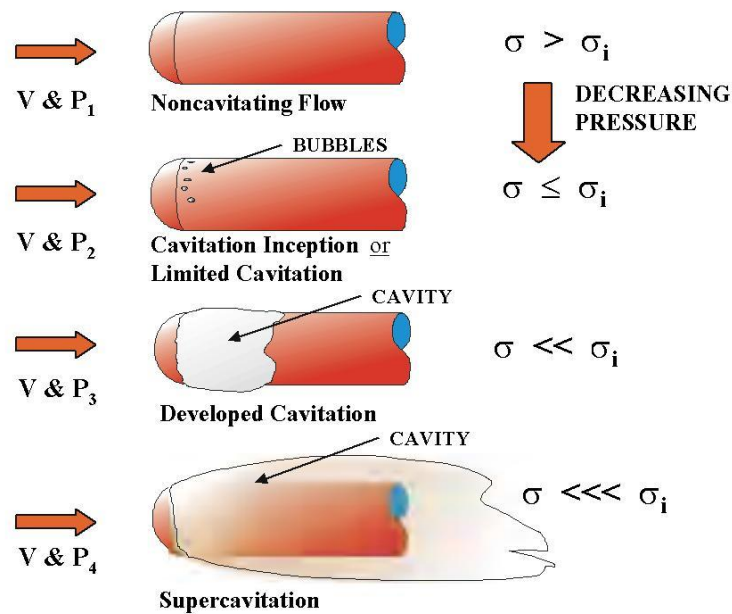
تبخیر یک مایع به دو روش اعمال حرارت و یا کاهش فشار مایع امکان پذیر است. با توجه به این دو روش می توان جوشش و کاواکزائی را از هم متمایز ساخت. تفاوت دیگر آن است که پدیده کاواکزائی همراه با رشد و فروپاشی حبابهای هوا همراه است در حالیکه در جوشش با رشد یکنواخت

¹ Partial Cavitation

² Developed Cavitation

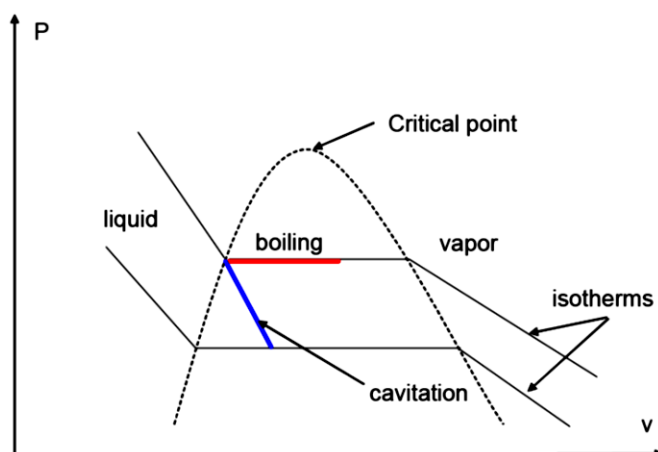
³ Supercavitation

حباب‌ها مواجه هستیم. تفاوت این دو پدیده متفاوت در نمودار فشار برحسب حجم مخصوص در شکل ۳-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱: انواع رژیم‌های مختلف جریان در پدیده کاواکزائی [۳]

همانطور که در نمودار این شکل نشان داده شده است، پدیده جوشش یک پدیده دما ثابت است و تغییر فاز بدلیل افزایش میزان حرارت در یک فشار ثابت صورت می‌پذیرد. این در حالی است که تغییرات دما در طی پدیده کاواکزائی قابل مشاهده است. اگرچه غالباً برای سیال‌هایی نظیر آب در دمای اتاق، اثرات دمایی صرف‌نظر می‌شوند اما این تأثیرات در سیال‌هایی که در سیستم‌های برودتی مورد استفاده قرار می‌گیرند غیر قابل صرف‌نظر است. خواص فیزیکی مورد استفاده برای آب که در اکثر تحقیقات مدنظر قرار می‌گیرد در جدول ۱-۱ بیان شده است [۴].



شکل ۳-۱: تفاوت میان پدیده‌های جوشش و کاواکزائی در نمودار فشار-حجم مخصوص [۴]

جدول ۱-۱: خواص فیزیکی آب در شرایط استاندارد [۴] ($P=1 \text{ atm}$, $T=300 \text{ K}$)

کمیت	نماد	واحد	مایع	بخار
چگالی	ρ	Kg/m^3	997	0.0256
لزجت مولکولی	μ	N.s/m^2	8.55×10^{-4}	9.09×10^{-6}
فشار بخار	P_v	KPa	-	3.531
کشش سطحی	σ_f	N/m	7.17×10^{-2}	7.17×10^{-2}

۳-۱- کاواکزا

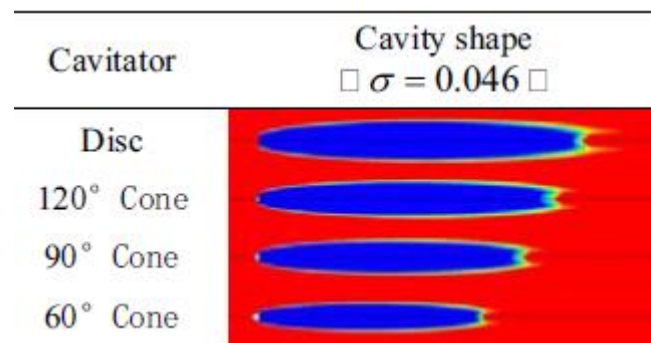
برای به حداقل رساندن نیروی بازدارندگی، طراحی کاواکزا^۱ یک مسأله بسیار حساس می‌باشد، کاواکزا تنها قسمت وسیله‌ای همانند یک یک اژدر^۲ است که در تماس مستقیم با آب می‌باشد. کاواکزا باعث تولید کاواک حول جسم می‌شود. کاواکزا باید به گونه‌ای طراحی شود که پدیده کاواکزائی را آغاز نماید، کاواکی با طول مناسب که اژدر را می‌پوشاند تولید کند و نیروی بازدارندگی را به حداقل برساند تا حرکت در سرعت‌های بالا ممکن شود. برای مثال پارامتر اصلی که یک کاواکزای مخروطی را مشخص

^۱ Cavitator

^۲ Torpedo

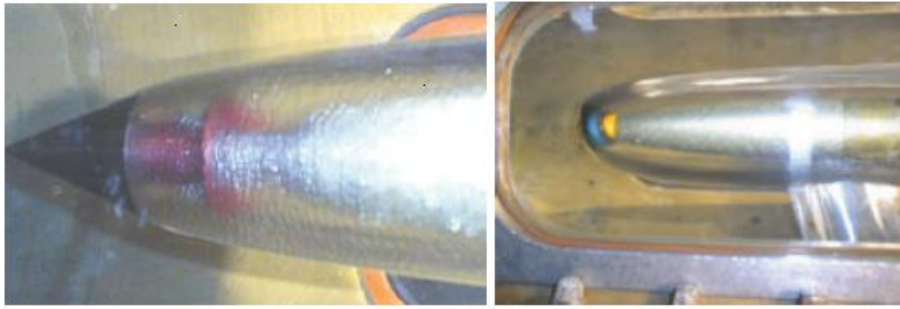
می‌کند، نیم‌زاویه آن می‌باشد. یک کاواکزا معمولاً دارای یک درجه آزادی حول محور عمود بر محور تقارن می‌باشد. شکل و موقعیت کاواک یک تابع غیرخطی از زاویه انحراف و نیم‌زاویه مخروط کاواکزا می‌باشد. بنابراین مقدار مساحت خیس شده اژدر که بیانگر میزان کارایی ابرکاواک می‌باشد، به این دو زاویه بستگی دارد. با توجه به اینکه بیشتر بدنه اژدر داخل کاواک قرار دارد، نیروی برآ^۱ تولید شده بوسیله کاواکزا به علاوه نیروی برآ تولید شده بوسیله بالک‌ها، به تعادل وزن جسم کمک می‌کند [۳].

کاواک‌زاهای مورد استفاده با هندسه‌های مخروط، مخروط ناقص، دیسک، نیم‌کره می‌باشد. با توجه به اینکه پدیده کاواک‌زایی یک پدیده سه‌بعدی است لذا در مقالات مختلف به صورت دو بعدی و سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به شکل ۴-۱ مشاهدات دو بعدی که روی یک کاواک‌زای گوه‌ای و صفحه تخت انجام گرفته، مشاهده شده که کاواک‌زایی تشکیل شده پشت کاواک‌زای صفحه تخت از کاواک‌زای گوه‌ای بیشتر است [۵]. در شکل ۵-۱ ابرکاواک ایجاد شده پشت کاواک‌زای دیسکی همچنین ناحیه ابرکاواک پشت کاواک‌زای مخروطی بر اساس آزمایش تونل آب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، مقدار قطر کاواک روی کاواک‌زای دیسکی بیش‌تر از کاواک‌زای مخروطی است.



شکل ۴-۱: ابرکاواک ایجاد شده پشت کاواک‌زای دیسکی و کاواک‌زای مخروطی با زاویه راس مختلف [۵]

^۱ Lift



شکل ۱-۵: ناحیه ابر کاواک، نتایج تجربی از تونل آب. کاواکزای دیسکی (راست)، کاواکزای مخروطی (چپ) [۶]

۱-۴- عدد کاواکزایی

عدد کاواکزایی^۱ که یک عدد بی بعد می باشد، کمیتی برای بیان نسبت تأثیر عوامل موثر بر جریان

کاواکزایی است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{0.5\rho V_{\infty}^2} \quad (1-1)$$

که در رابطه بالا P_{∞} فشار استاتیکی مرجع سیال، P_v فشار بخار، V_{∞} سرعت مرجع سیال و ρ چگالی سیال می باشد [۷]. همان طور که در بالا نیز ذکر شد سه نوع کاواکزایی ابتدایی، جزئی و توسعه یافته داریم که با توجه به تعریف عدد کاواکزایی محدوده این نوع از کاواکزایی ها را با مطالعه در مقالات مختلف و با کسب تجربه از مدل سازی این پدیده به صورت زیر مشخص می کنیم.

- کاواکزایی ابتدایی: در این حالت عدد کاواکزایی بین $1/1$ و $1/6$ است.
 - کاواکزایی جزئی: در این حالت عدد کاواکزایی بین $0/3$ و $1/1$ است.
 - کاواکزایی کاملاً توسعه یافته یا ابر کاواک: در این حالت عدد کاواکزایی کمتر از $0/3$ است [۳].
- به بیانی دیگر عدد کاواکزایی نشان دهنده مقاومت جریان سیال به وقوع پدیده کاواکزایی 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 کاواکزایی هم با کاهش فشار استاتیکی و هم با افزایش سرعت امکان پذیر است و افزایش این عدد باعث جلوگیری از وقوع کاواکزایی است. در حالت ابر کاواک، ناحیه

^۱ Cavitation number

کاواک به صورت شفاف و بسیار بزرگتر از جسم، مشخص می‌گردد. اولین بار، فردی به نام مارشال تولین^۱ نام ابرکاواک را بر آن گذاشت. در این نوع کاواک‌زایی طول کاواک بزرگتر از جسم گردیده و حباب‌ها در انتهای کاواک (دور از سطح جسم) می‌ترکند.

۱-۵- آثار و پیامدهای کاواک‌زایی

در ای قسمت به طور خلاصه به معرفی برخی از آثار و پیامدهای منفی بروز کاواک‌زایی در سیستم‌های هیدرولیکی می‌پردازیم [۱].

- تغییر و کاهش کیفیت عملکردی سیستم‌ها. نظیر نیروی برا و افزایش نیروی پسا^۲ در هیدروفویل‌ها، افت راندمان در توربوماشین‌ها، کاهش ظرفیت تخلیه سرریزها، اتلاف انرژی و غیره.
- آسیب و خوردگی سطوح جامد. ساختارهای بخار معمولاً ناپایدار و غیر دائمی هستند و از آنجا که فشار داخلی آن‌ها به سختی تغییر کرده و نزدیک به فشار بخار باقی می‌ماند، وقتی به یک ناحیه با فشار زیاد می‌رسند، اغلب به شدت متلاشی می‌شوند. فشار تولید شده در انهدام این حفره‌ها، به قدری زیاد است که می‌تواند به سطوح اجسام پیرامون خود آسیب جدی برساند.
- تولید ارتعاش و صدا

بنابراین در نگاه اول، کاواک‌زایی به عنوان پدیده‌ای مخرب شناخته می‌شود. با این وجود کاواک‌زایی در برخی از فرایندهای صنعتی جهت متمرکز کردن انرژی در یک سطح کوچک و تولید امواج فشاری پر قدرت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه به بیان مثال‌های از کاربردهای مثبت این پدیده می‌پردازیم.

- تمیز کردن سطوح به وسیله امواج فراصوتی و جت‌های کاواک‌زایی.
- پخش ذرات جامد در یک محیط مایع.

^۱ Marshal tolien

^۲ Drag

- تولید امولسیون در صنایع دارویی.
- تسریع در فرایند الکترولیز با برداشتن لایه‌های یون اطراف الکترودها.
- انهدام باکتری‌ها در زمینه مهندسی دارو.
- محدود کردن نرخ جریان در جریان‌های محدود شده^۱ به وسیله تولید و رشد حفره‌های کاواک‌زایی.

۱-۶- علل شروع کاواک‌زایی

شروع پدیده کاواک‌زایی می‌تواند به دلایل زیر باشد:

- (۱) افزایش شدید سرعت سیال در یک ناحیه به دلیل تغییر جهت خطوط جریان (پره پمپ‌ها و کشتی‌ها و گذرگاه‌های محصور شده جریان).
- (۲) وجود نوسان‌های فشار به علت ناپایداری جریان (انژکتور).
- (۳) ناصافی و معیوب بودن سطوح (سطوح سیستم‌های هیدرولیکی).
- (۴) وجود گردابه و تنش‌های برشی شدید در جریان (جت حباب).

همچنین شروع کاواک‌زایی بر روی اجسام هیدرولیکی تابع عواملی همچون ناخالصی‌های سیال، سطح دیواره و شرایط مرزی جریان نیز هست. یکی دیگر از ملاک‌های مهم در شروع تشکیل حباب در یک مایع که عموماً مطالعات پدیده کاواک‌زایی بر اساس آن صورت می‌گیرد و بیشتر جنبه استاتیکی دارد، افت فشار جریان تا رسیدن به فشار بخار آن مایع است. این دیدگاه نسبت به شروع کاواک‌زایی در بسیاری از موارد درست است. اما در شرایطی که مایع با یک سطح خشن در تماس باشد، دلیل شروع کاواک‌زایی تنها افت فشار نخواهد بود. آرنت و ایپن نشان دادند که شروع کاواک‌زایی به شدت به آشفتگی جریان در لایه مرزی حساس است و این حساسیت ممکن است در سطوح ناصاف تقویت شود [۱].

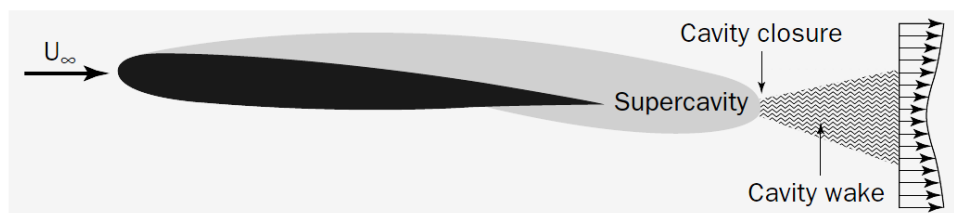
^۱ Confined flows

۷-۱- فشار کاواک

به حفره ایجاد شده توسط پدیده کاواک‌زایی، کاواک گفته می‌شود. به عنوان نمونه یک ابر کاواک متصل به یک هیدروفویل دو بعدی در شکل ۶-۱ نشان داده شده است. داخل کاواک به وسیله 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:

$$P_c = P_v + P_g \quad (۲-۱)$$

در رابطه بالا P_v فشار جزئی بخار و P_g فشار جزئی گازهای مختلف می‌باشد. در بسیاری از تحلیل‌ها، فشار P_c در کل ناحیه کاواک به صورت پایدار و ثابت در طول زمان در نظر گرفته می‌شود. وجود گازهای میعان‌ناپذیر 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 این عمل را هوازدایی می‌نامند. در عمل، مقدار P_g در مقایسه با فشار بخار کوچک و قابل صرف‌نظر است [۸].



شکل ۶-۱: نمونه‌ای از جریان ابر کاواک پشت یک هیدروفویل دو بعدی [۸]

۸-۱- شرایط مطلوب برای ایجاد پدیده کاواک‌زایی

در این قسمت شرایط مطلوب و مساعدی را که به بروز پدیده کاواک‌زایی کمک می‌نماید را به

اختصار بیان می‌کنیم [۱].

- هندسه دیواره جسم می‌تواند باعث افزایش سرعت موضعی سیال و در نتیجه کاهش فشار در داخل جریان شود. این شرایط در مواردی که سطح مقطع عبوری جریان در حال تغییر بوده (مانند شیپوره و ونتوری) و یا انحنای هندسی اجسام تغییر می‌کند (مانند زانویی و خمیدگی‌ها)

در لوله‌ها و سطوح فوقانی هیدروفویل‌ها) اتفاق می‌افتد.

- کاواک‌زایی در جریان‌های برشی^۱ مانند جت‌ها و دنباله‌ها، به خاطر نوسانات بزرگ فشاری توربولانس

نیز ایجاد می‌شود.

- در برخی از جریان‌ات مانند ضربه قوچ در مدارهای هیدرولیکی، کانال‌های آب‌بر نیروگاه‌ها و یا خطوط تغذیه سوخت در موتورهای درون‌سوز، طبیعت غیر دائمی جریان باعث شتاب گرفتن سیال و وقوع کاواک‌زایی در مناطقی که فشار به صورت لحظه‌ای کاهش می‌یابد، خواهد شد.
- زبری و ناهمواری‌های دیواره‌ها (نظیر دیوار بتنی سرریز سدها) باعث ایجاد دنباله‌های موضعی می‌شود که در آن حباب‌ها و حفره‌ها می‌توانند رشد و توسعه پیدا کنند.
- شتاب دادن سریع و ناگهانی یک جسم جامد با لبه تیز در یک سیال ساکن باعث کاهش موضعی فشار و بروز پدیده کاواک‌زایی می‌شود.

با توجه به عوامل موثر ذکر شده در شروع کاواک‌زایی، باید انتظار داشت که وقتی جریان مایع از روی جسم هیدرودینامیکی مانند یک هیدروفویل عبور می‌کند، ممکن است الگوهای متفاوتی از کاواک‌زایی (با توجه به خواص جریان مانند عدد رینولدز، زاویه حمله و فشار) در آن اتفاق بیافتد که در بخش بعدی این الگوها را معرفی خواهیم کرد.

۹-۱- انواع کاواک

به طور کلی کاواک‌زایی بر اساس چگونگی تولید آن به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شود [۱].

(۱) کاواک‌زایی هیدرودینامیکی^۲

(۲) کاواک‌زایی صوتی^۳

^۱ Shear flow

^۲ Hydrodynamic cavitation

^۳ Acoustic cavitation

۳) کاواک‌زایی نوری^۱

۴) کاواک‌زایی ذره‌ای^۲

در پژوهش حاضر موضوع مورد مطالعه، کاواک‌زایی هیدرودینامیکی است لذا فقط به توضیح این نوع کاواک‌زایی می‌پردازیم و از توضیح بقیه صرف‌نظر می‌کنیم.

۱-۱-۱- کاواک‌زایی هیدرودینامیکی

با توجه به شرایط جریان و هندسه آن، انواع متفاوتی از کاواک به وجود می‌آید که هر یک از این کاواک‌ها دارای مشخصاتی می‌باشند. در مطالعات و تحقیقات صورت گرفته، پنج نوع از کاواک‌ها شناسایی شده‌اند که در ادامه به توضیح مختصر هر یک پرداخته خواهد شد [۶].

۱-۱-۱-۱- کاواک متحرک

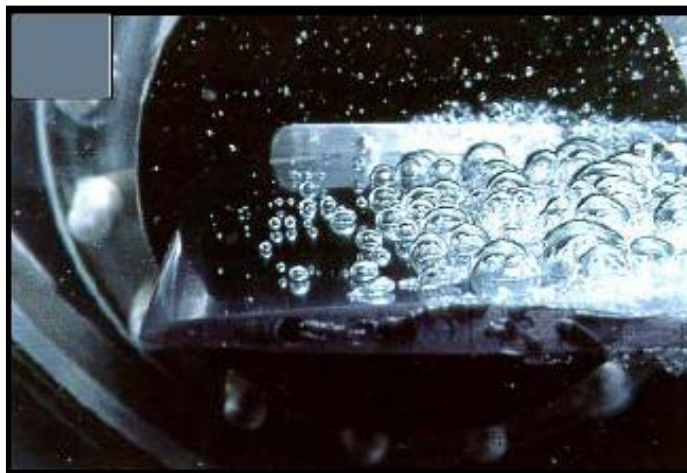
کاواک متحرک^۳ مانند حباب‌هایی در سیال شکل گرفته و با آن حرکت می‌کند و در طول عمر خود کوچک و بزرگ می‌شود. این نوع کاواک عموماً به عنوان مثال بر روی هیدروفویل‌هایی با زاویه حمله کوچک مشاهده می‌شود. هندسه و شکل حباب‌های شکل گرفته به میزان ناخالصی‌های جریان بالادست وابسته است. این نوع کاواک‌ها شباهت زیادی به کاواک صفحه‌ای^۴ دارند به طوری که با چشم غیر مسلح نمی‌توان تفاوت بین این دو نوع کاواک را تشخیص داد این حباب‌ها بوسیله عکس‌های لحظه‌ای قابل مشاهده هستند. نمونه‌ای از این نوع کاواک در شکل ۱-۷ بر روی یک هیدروفویل نمایش داده شده است [۴].

¹ Optic cavitation

² Particle cavitation

³ Traveling Cavitation

⁴ Sheet cavitation



شکل ۱-۷: نمونه ای از یک کاواک متحرک بر روی یک هیدروفویل [۴]

۱-۱۰-۲ - کاواک ابری

کاواک ابری^۱ بوسیله جدایش گردابه‌ها و حضور آن‌ها در جریان بوجود می‌آید. این کاواک‌ها باعث لرزش، صدا و خوردگی‌های شدید می‌شوند. جدایش کاواک‌های ابری به صورت متناوب انجام می‌شود و جت بازگشتی از جمله مکانیزم‌های ساده و ابتدائی ایجاد این نوع کاواک‌ها به شمار می‌آید. این نوع کاواک در شکل ۱-۸ نشان داده شده است [۴].

۱-۱۰-۳ - کاواک گردابه‌ای

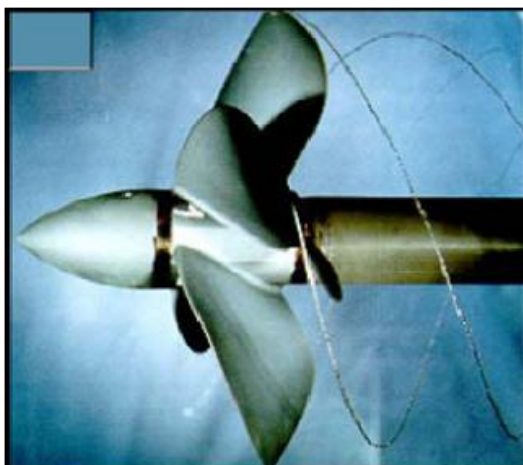
کاواک گردابه‌ای^۲ عموماً در نوک تیغه پروانه‌های چرخان بوجود می‌آید و یک نمونه از آن در شکل ۱-۹ نمایش داده شده است. کاواک‌ها در مراکز گردابه‌ها بوجود می‌آیند. این نوع کاواک‌ها محدود به تیغه‌های پروانه‌های چرخان نمی‌شوند بلکه می‌توانند در نواحی جدایش جریان از اجسام غوطه‌ور در سیال نیز شکل گیرند [۴].

^۱ Cloud Cavitation

^۲ Vortex Cavitation



شکل ۸-۱: نمونه‌ای از یک کاواک ابری بر روی یک هیدروفویل [۴]



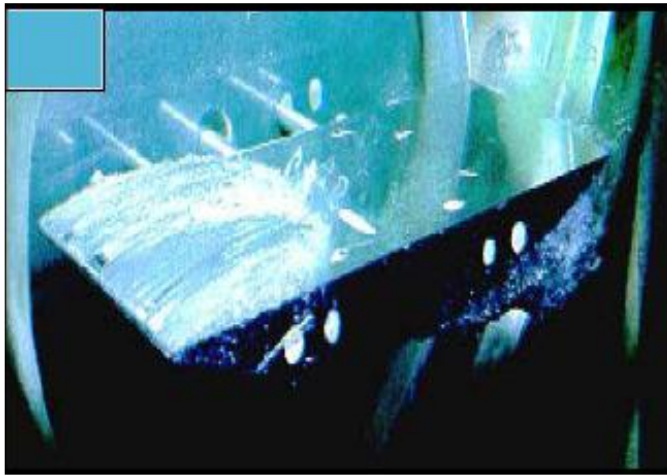
شکل ۹-۱: نمونه‌ای از یک کاواک گردابه‌ای حول پروانه چرخان [۴]

۴-۱۰-۱ - کاواک صفحه‌ای

این نوع کاواک‌ها تحت عناوین کاواک‌های ثابت و کاواک‌های چسبیده نیز شناخته می‌شوند. کاواک‌های صفحه‌ای در حالت نیمه پایا دارای پایداری و ثبات می‌باشند. نمایی از این کاواک در شکل ۱۰-۱ دیده می‌شود. سطح مشترک بین مایع و بخار می‌تواند صاف و شفاف و یا بسیار مغشوش باشد. این سطح مشترک در انتهای کاواک و در نواحی بسته‌شدن آن به صورت موج در آمده و نهایتاً فرو می‌ریزد. جریان پایین دست که حاوی گردابه‌های بزرگ جریان است مملو از بسته‌های حباب‌های هوا است [۴].

۱-۱۰-۵- ابر کاواک

ابر کاواک^۱ با رشد کاواک صفحه‌ای و فراگیر شدن آن بر روی تمامی سطح جسم بوجود می‌آید. به منظور شکل‌گیری صحیح این نوع کاواک گاهی از تزریق هوا یا بخار استفاده می‌شود. ابر کاواک‌ها که از انواع مطلوب کاواک‌ها محسوب می‌شوند به منظور کاهش نیروی بازدارندگی (نیروی پسا) وسایل در حال حرکت زیر سطح آب بشمار می‌آیند. افزایش نیروی برآ روی هیدروفویل‌ها در شرایطی که ابر کاواک تنها بر روی سطح فوقانی آنها شکل گرفته باشد از دیگر مزایای ابر کاواک‌ها بشمار می‌آید. نمایی از یک ابر کاواک بر روی یک هیدروفویل در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است [۴].



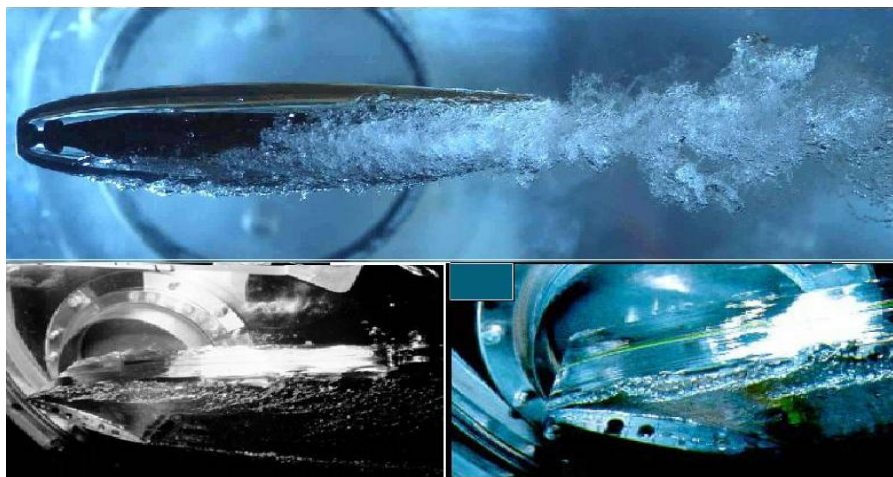
شکل ۱-۱۰: نمونه‌ای از یک کاواک صفحه‌ای روی یک هیدروفویل [۴]

با توجه به رویکرد تحقیق حاضر بر روی مزایای پدیده کاواک‌زایی و توجه به شبیه‌سازی رفتار ابر کاواک‌ها، در ادامه به تفصیل بیشتری در مورد این نوع از کاواک‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۱۱- ابر کاواک

ابر کاواک به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: ابر کاواک طبیعی و مصنوعی که در ادامه به توضیح هر کدام خواهیم پرداخت [۳].

^۱ Supercavitation



شکل ۱-۱۱: نمونه‌ایی از ابرکاواک‌های مصنوعی (بالا) و ابرکاواک طبیعی (پائین) [۴]

ابرکاواک طبیعی که موضوع این پایان‌نامه است در صورت افزایش سرعت حرکت جسم، و یا کاهش فشار محیط ایجاد می‌شود. در سرعت‌های کمتر از شرایط آغاز ابرکاواک نیز امکان وقوع ابرکاواک وجود دارد. در این شرایط ناحیه کاواک ایجاد شده با تزریق گاز پر می‌شود و با گسترش آن اصطلاحاً ابرکاواک مصنوعی یا گازدهی شده^۱ به وقوع می‌پیوندد. مکانیزم ایجاد کاواک مصنوعی با توجه به تعریف عدد کاواکزائی قابل توضیح است. با افزایش فشار کاواک (P_v در معادله عدد کاواکزائی) از طریق گازدهی به کاواک، عدد کاواکزائی کاهش یافته و ناحیه کاواک توسعه می‌یابد. گازدهی به معنی تحت فشار قرار دادن کاواک از درون می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که تزریق گاز در یک سرعت ثابت عدد کاواکزائی را کاهش و اندازه کاواک را افزایش می‌دهد. حتی برای پرتابه‌هایی که به منظور حرکت در شرایط ابرکاواک طبیعی طراحی می‌شوند نیز در لحظات اولیه پرتاب با ایجاد ابرکاواک مصنوعی نیروی بازدارندگی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که این پرتابه‌ها بتوانند تا شرایط لازم برای تشکیل ابرکاواک طبیعی شتاب بگیرند. دمش گاز منجر به پیچیدگی‌های بیشتری در رفتار ابرکاواک و از جمله افزایش ناپایداری‌های آن در اثر نوسانات شکل و ابعاد ناحیه کاواک می‌شود.

با توسعه یافتن کاربرد پرتابه‌های زیردریایی، توجه محققین به اثرات مثبت کاواکزائی کاملاً توسعه

^۱ Artificial or ventilated supercavitation

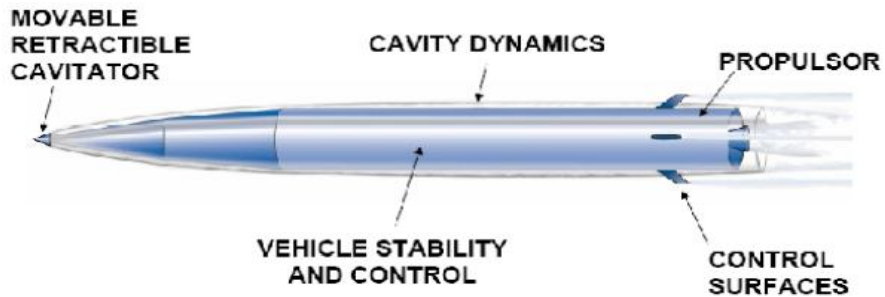
یافته (ابرکاواک) که تمام هندسه جسم را در بر می‌گیرد معطوف شد. در شرایط ابرکاواک، سیالی که جسم در آن حرکت می‌کند بخار است. با توجه به کمتر بودن چگالی و لزجت بخار در مقایسه با آب، نیروی بازدارندگی پوسته‌ای^۱ جسم شدیداً کاهش می‌یابد [۹].

برای درک اهمیت کاواک‌زایی در کاهش نیروی پسا، بهتر است به اثری که این عامل در افزایش سرعت اجسام داخل آب داشته توجه شود. عامل شکل جسم، تأثیری در حدود ۱۰ درصد بر افزایش سرعت داشته است. عامل جنس بدنه حدود ۲۰ درصد و میکرو حباب‌ها، تأثیری ۱۲ درصدی بر رشد سرعت داشته‌اند. نوع پوشش سطح نیز حدود ۴ درصد سرعت را بهبود بخشیده است. این در حالی است که ابرکاواک تأثیری ۶۵ درصدی بر افزایش سرعت داشته که عددی بسیار قابل توجه می‌باشد. لذا می‌توان گفت: عامل مهمی که در گسترش روش‌های عددی کاواک‌زایی مؤثر واقع شد، توسعه‌ی کاربرد پدیده‌ی ابرکاواک در صنایع نظامی-دریایی است. ابعاد اجسامی که از ابرکاواک استفاده می‌کنند، از فشنگ ابرکاواکی تا یک اژدر سنگین وزن تنوع دارد. افزایش سرعت بی‌نظیر و افزایش قابلیت مانور تجهیزات زیردریایی به کمک کاواک‌زایی، این پدیده را به عنوان فاکتوری مهم و منحصر به فرد در کنترل دریاها و برتری در نبردهای دریایی تبدیل کرده است. اژدرها پرتابه‌هایی هستند که تمام سطح آن‌ها توسط ابرکاواک پوشانده شده است. لازم به ذکر است که در پرتابه‌های همراه با پدیده کاواک‌زایی، کاواک‌زایی علاوه بر این که نیروی پسا را به شدت کاهش می‌دهد، باعث کاهش شدید نیروی برآ نیز می‌گردد. این اثر کنترل پرتابه را دشوار می‌کند. در پرتابه‌های دارای تکنولوژی ابرکاواک تنها سطحی که با آب در تماس است کاواک‌زا می‌باشد. بنابراین بخش عمده‌ی نیروی برآ توسط این قسمت ایجاد می‌شود که باید به اندازه‌ی مناسب برای خنثی کردن وزن پرتابه باشد [۹].

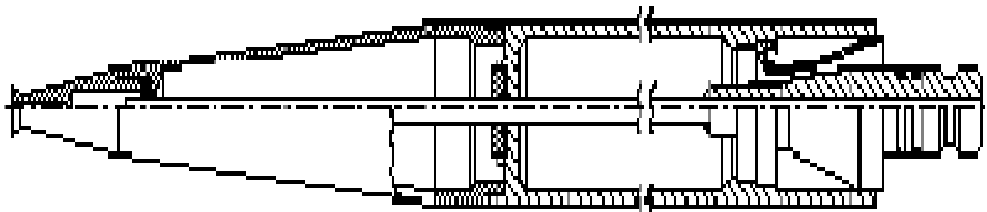
شکل ۱-۱۲، شکل ۱-۱۳ و شکل ۱-۱۴ نیز نمونه‌هایی از اژدر را نمایش می‌دهند. قسمت‌های اصلی اژدر، کاواک‌زا در قسمت جلویی و چهار بال انتهایی می‌باشند. از کاواک‌زا برای ایجاد و نگهداری کاواک

^۱ Friction drag

استفاده می‌شود. کاواک‌زا و بال‌ها با هم برای کنترل و پایداری اژدر به کار می‌روند. در شکل ۱-۱۵ یک پرتابه همراه با پدیده ابرکاواکزائی به نام اشکوال^۱ و ناحیه ابرکاواک روی آن نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲: پرتابه با تکنولوژی ابرکاواک و دارای کاواکزای مخروطی

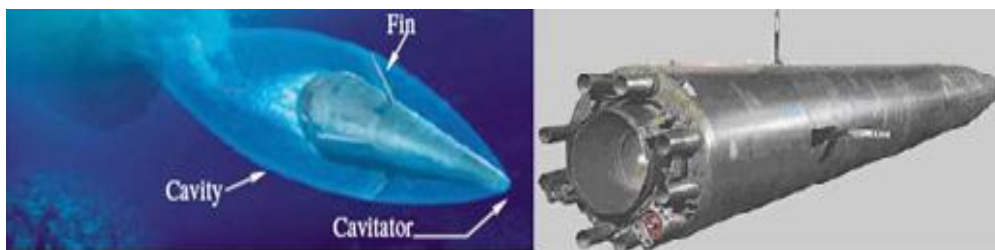


شکل ۱-۱۳: پرتابه با تکنولوژی ابرکاواک و دارای کاواکزای دیسکی



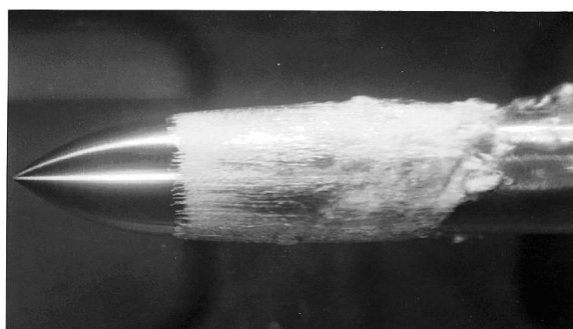
شکل ۱-۱۴: نمایی از اژدر ابرکاواکی به همراه بالک‌ها

^۱ Shkval



شکل ۱-۱۵: پرتابه واقعی با تکنولوژی ابرکاواک (راست)، ناحیه ابرکاواک بر روی این پرتابه (چپ)

در نمونه‌ی دیگری از پرتابه‌ها که پرتابه‌های کاواک‌زایی^۱ جزئی (پرتابه‌های کاویتاسیونی) نامیده می‌شوند، کاواک‌زایی تنها قسمتی از سطح جسم را می‌پوشاند و قسمت انتهایی جسم در تماس با آب می‌باشد. در قسمت انتهایی بال‌هایی وجود دارند که به کمک کاواک‌زا حرکت پرتابه را کنترل می‌کنند. مشکل اصلی در کنترل این پرتابه‌ها نوسانات انتهایی کاواک است که منجر به تغییر طول کاواک و تغییرات شدید نیروی برآ و پسا در پرتابه می‌شود. راه‌حل مناسب برای این مشکل ثابت کردن طول کاواک از طریق طراحی مناسب شکل پرتابه در محل بسته‌شدن کاواک و تزریق گاز در آن محل می‌باشد. نمونه‌ای از یک پرتابه با تکنولوژی ابرکاواک در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۶: یک پرتابه ابرکاواکی

جهت دست یافتن به پدیده ابرکاواک، راه‌های مختلفی پیشنهاد می‌شود که در ادامه آن‌ها را بیان

می‌کنیم [۱۰].

- افزایش سرعت بالادست جریان ($V_{\infty} > 45 \text{ m/s}$)
- کاهش عمق فرورفتگی وسایل زیرآبی یا کاهش P_{∞}

^۱ projectile cavitation

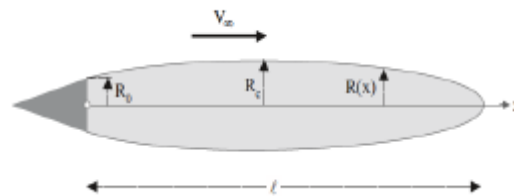
• افزایش فشار حفره به وسیله هوادهی

به طور کلی زمانی که عدد کاواک‌زایی کوچک ($\sigma < 0.2$) باشد احتمال ایجاد پدیده ابرکاواک بیشتر می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد با کم شدن عدد کاواک‌زایی طول حفره بزرگتر از کاواک‌زا و حتی جسمی مانند یک اژدر با ابعاد بزرگ شده و کاواک ایجاد شده در پایین‌دست جسم بسته شده و باعث تولید جریان ابرکاواک می‌شود [۱۰].

در جریان ابرکاواک متقارن محوری روی یک کاواک‌زا با هندسه مخروط، طول حفره ایجاد شده به علت وجود نوک تیز و طول بلند خود کاواک‌زا، در صورت وجود آشفتگی کم در جریان اصلی و سرعت جریان محوری، کاواکی بزرگتر از طول کاواک‌زا را ایجاد کرده و یک ابرکاواک پایدار را ایجاد می‌نماید. همچنین ابرکاواک به وسیله هوادهی یک گاز غیر قابل تراکم در انتهای کاواک‌زا رشد پیدا کرده و بزرگتر می‌شود اما ویژگی منحصر به فرد جریان‌های هوادهی امکان بروز رفتار نوسانی در جریان، بعد از ابرکاواک ایجاد شده (ناحیه گردابه‌ای) می‌باشد [۱۱].



شکل ۱-۱۷: جریان ابرکاواک اطراف یک هیدروفویل در عدد کاواک‌زایی کوچک [۱۱]



شکل ۱-۱۸: جریان ابرکاواک متقارن محوری [۱۱]

۱-۱۲- طول ناحیه کاواک‌زایی

طول ناحیه کاواک‌زایی معادل فاصله بین نقطه تفکیک تا محل بسته شدن کاواک است و یکی از

کمیت‌های قابل بررسی در پدیده ابرکاواک می‌باشد. طول کاواک متأثر از عوامل زیادی می‌باشد که یکی از مهمترین این عوامل عدد کاواک‌زایی است. با کاهش عدد کاواک‌زایی طول کاواک افزایش می‌یابد زیرا با کاهش اختلاف فشار جریان آزاد و فشار کاواک، گرادیان فشار کمتری در جریان ایجاد می‌شود (بجز در ناحیه بسته‌شدن کاواک) لذا خطوط جریان انحنای کمتری پیدا خواهند کرد و تمایل دارند موازی خطوط جریان بالادست رفتار کنند و طول کاواک افزایش می‌یابد. در مواردی این امکان وجود دارد که براساس داده‌های تجربی، بین طول کاواک 1 و عدد کاواک‌زایی رابطه‌ای توانی به صورت $\frac{1}{c} \cong A\sigma^{-n}$ برقرار شود که c طول مشخصه‌ی جسم است. در محیط بی‌کران $n=2$ و مقدار A تابع هندسه جسم و موقعیت قرارگیری در جریان است. در شکل ۱-۱۹ تاثیر عدد کاواک‌زایی بر طول بدون بعد کاواک را در مختصات لگاریتمی برای یک قطعه متقارن در یک کانال سطح آزاد برای سه مقدار متفاوت از عمق غوطه‌وری را مشاهده می‌نمائیم [۸].

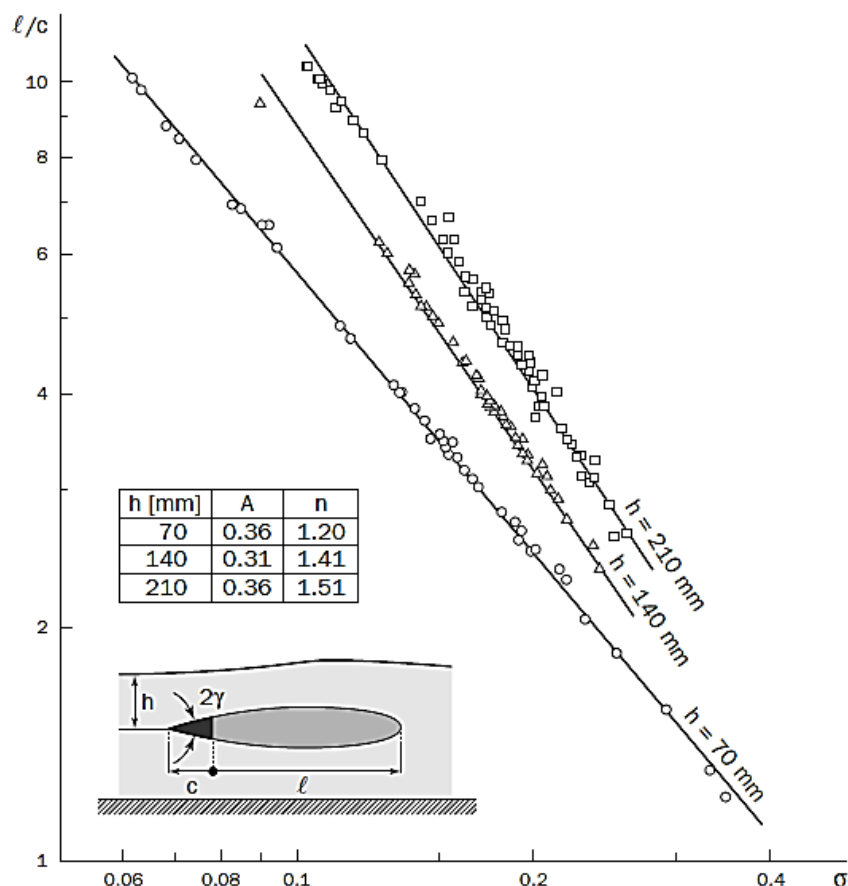
۱-۱۳-۱- نمونه‌هایی از کاربردهای پدیده ابرکاواک

در این بخش نمونه‌هایی از کاربردهای پدیده ابرکاواک در صنایع مختلف را معرفی می‌نماییم.

۱-۱۳-۱-۱- اژدرها

یک راه برای افزایش سرعت اژدرها احاطه کردن آن در داخل حباب گاز یا هوا است. اشکوال یک موشک زیر سطحی است و با سوخت جامد کار می‌کند. این اژدر با استفاده از پدیده‌ی ابرکاواک قادر است با سرعت‌های بسیار بالا (۳ تا ۴ برابر اژدرهای معمولی) و در یک راستا به سمت اهداف دریایی شلیک شود. با تولید حباب‌های گاز که از نوک دماغه و پوسته موشک خارج می‌شود (ابرکاواک مصنوعی) و همچنین کاواک‌زای دیسکی که در جلوی موشک قرار گرفته و باعث کنار رفتن آب از اطراف اژدر می‌شود. در این حالت اژدر در تماس مستقیم با آب نبوده و لذا نیروی پسای آن بسیار کاهش می‌یابد. اژدر اشکوال قابلیت پرتاب از روی شناورهایی مانند ناو، ناوچه و یا زیر دریایی در عمق ۱۰۰ متری را داراست و با سرعت اولیه ۹۰ کیلومتر بر ساعت پرتاب می‌شود. با فرو رفتن این موشک در آب و سپس

رسیدن به عمق مناسب، موتور موشک روشن شده و موشک به سمت هدف مورد نظر راهی می‌شود. لازم به ذکر است همانطور هم که قبلاً گفته شده بود، این موشک به واسطه وجود پدیده ابرکاواک، به سرعت‌های بالا و در نتیجه آن به کاهش نیروی پسا دست پیدا می‌کند لذا برای رسیدن به این هدف باید پایداری حباب‌های تشکیل شده اطراف این اژدر کنترل شود [۱۲].

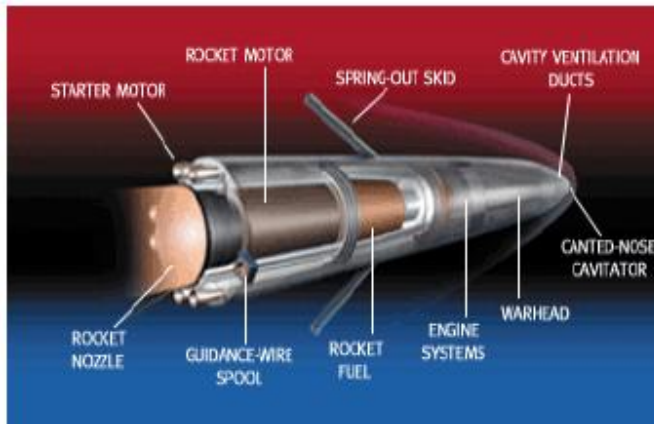


شکل ۱-۱۹: نمایی از رابطه نسبی بین طول کاواک با عدد کاواک‌زایی برای سه مقدار متفاوت از عمق غوطه‌وری [۸]

۱-۱۳-۱- زیردریایی‌ها

به دنبال پیشرفت‌های اخیر در نبردهای دریایی نیروی دریایی کشورهایمان و آمریکا نیز برنامه وسایل زیرآبی دیجیتالی را پیگیری و مورد آزمایش قرار داده است. پروژه مورد نظر مهندسان ساخت زیردریایی سریع‌السیر با ابعاد کوچکتر است که با سرعتی بالاتر از سرعت زیردریایی‌های معمولی حرکت می‌کنند. این زیردریایی‌ها به منظور جایگزینی با قایق‌های موتوری و برای نیروهای ویژه ساخته شده است. قایق‌های موتوری سر و صدای زیادی دارند و به راحتی قابل ردیابی می‌باشند، ولی این

زیردریایی سرعتی بالاتر از این قایق‌ها را دارند و به دلیل استفاده از پدیده‌ی ابرکاواک از سنسورها، رادارها و دستگاه‌های کشف امواج صوتی قابلیت ردیابی ندارد.



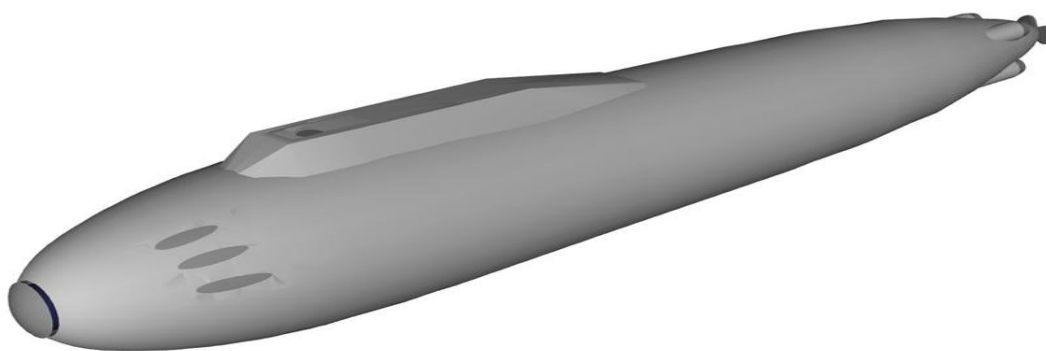
شکل ۱-۲۰: اژدر اشکوال و حباب تشکیل شده اطراف آن [۱۲]

۱-۱۳-۲- پروانه کشتی‌ها

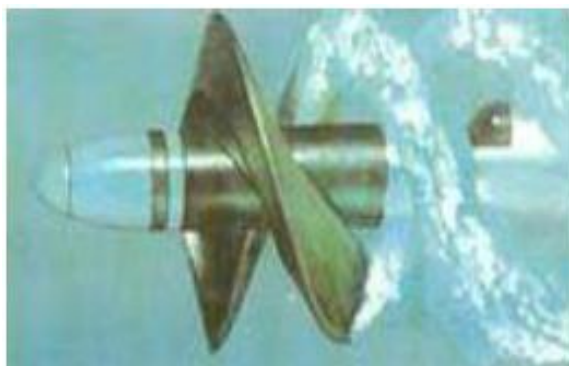
این پروانه‌ها برای مقاصد نظامی و همچنین در قایق‌های مسابقه‌ای کاربرد دارد. به طور کلی پروانه‌هایی که در شرایط معمولی که کاواک‌زایی ایجاد می‌شود بازدهی کمتری دارند. با استفاده از روش هواده‌ی این پروانه‌ها در شرایط ابرکاواک کار می‌کنند. تیغه‌های یک پروانه با تکنولوژی ابرکاواک به شکل گوه‌ای می‌باشد و با استفاده از این پدیده از فرسایش لبه جلویی تیغه جلوگیری می‌شود. این پروانه‌ها به صورت مصنوعی نیز از ابرکاواک استفاده می‌کنند. با استفاده از ایجاد شکاف در سطح تیغه و تزریق گاز و هواده‌ی به ایجاد پدیده ابرکاواک کمک کرده و با ایجاد لایه‌ای از گاز در اطراف تیغه‌های پروانه از تماس مستقیم آب با تیغه‌ها جلوگیری کرده و بنابراین نیروی پسا و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد [۱۳].

۱-۱۳-۳- کاواک‌زایی در انژکتورهای سوخت

وقوع کاواک‌زایی در انژکتورها اثرات مخربی همچون فرسایش قطعات، سرو صدا، لرزش و افزایش مقاومت هیدرولیکی را می‌تواند به دنبال داشته باشد. این پدیده علاوه بر خسارات احتمالی که در بالا ذکر شد، موجب بهبود کیفیت تزریق و تجزیه سوخت می‌شود.



شکل ۱-۲۱: زیردریایی با تکنولوژی ابر کاواک

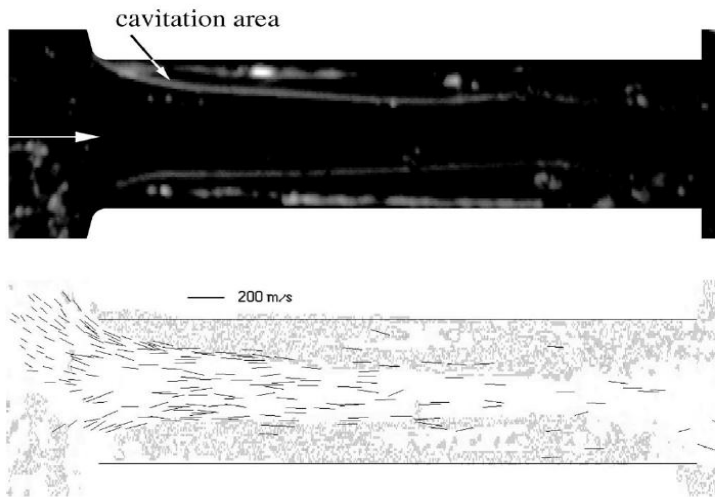


شکل ۱-۲۲: پروانه کشتی با تکنولوژی ابر کاواک [۱۳]

برای احتراق کاملتر، افزایش راندمان حرارتی، افزایش قدرت موتور، کاهش مصرف سوخت و کاهش آلایندگی در موتورهای دیزل، سیستم پاشش سوخت، اتمیزه کردن سوخت را باید بهتر انجام دهد. به همین دلیل تدابیر خاصی جهت انجام فرایند پاشش در محفظه احتراق توسط انژکتورهای تزریق انجام می‌شود. برای انجام این کار از مکانیزم کاواک‌زایی در خروجی انژکتور سوخت، که سرعت زیاد سوخت در طول مجاری تزریق انژکتورهای دیزل باعث افت فشار و در نتیجه تبخیر سوخت و وقوع کاواک‌زایی می‌گردد، استفاده می‌شود.

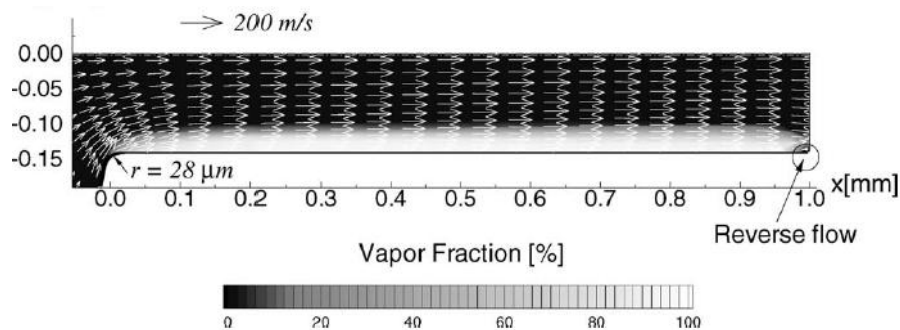
در شکل ۱-۲۳ شروع حباب بخار در مجرای خروجی سوخت به علت سرعت زیاد و در نتیجه کاهش فشار مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت سوخت تا ۲۰۰ متر در ثانیه افت فشار زیادی در مجرای نازل به وجود می‌آید و باعث تولید حباب می‌شود. در طول مجرای نازل افزایش فشار موجب متلاشی شدن

حباب‌ها و تولید حباب‌هایی در ابعاد میکرو می‌شود. نهایتاً میکرو حباب‌های ایجاد شده، باعث افزایش درصد اتمیزه شدن سوخت خروجی از مجرای نازل می‌شود [۱۴].



شکل ۱-۲۳: توزیع تغییرات چگالی (بالا) و تغییرات سرعت (پایین) در یک نازل [۱۴]

$$[۱۴] P_{Exit}=11 \text{ bar و } P_{Injection}=80 \text{ bar}$$



شکل ۱-۲۴: کانتور کسر حجمی برای یک نازل در سرعت ۲۰۰ متر در ثانیه [۱۴]

۱۴-۱- اثرات نامطلوب کاواک‌زایی

پدیده کاوک‌زائی با مطالعه خرابی ایجاد شده روی پروانه کشتی‌ها شناخته شد. این مسئله اثرات نامطلوب این پدیده را آشکار کرد. در ادامه بحث نمونه‌هایی از اثرات نامطلوب این پدیده را روی وسایل مختلف بررسی می‌کنیم.

۱-۱۴-۱ - پمپ‌ها

پمپ‌های محوری پمپ‌هایی هستند که دبی زیاد را در هد کم انتقال می‌دهند یعنی سرعت دورانی مخصوص زیاد دارند و چنین استنباط می‌گردد که خطر ایجاد کاواک‌زایی در این گونه پمپ‌ها نسبت به انواع دیگر پمپ‌ها به مراتب بیشتر باشد. بروز پدیده‌ی کاواک‌زایی در پمپ‌های سانتریفوژ نیز اثرات نامطلوب بر روی عملکرد این گونه پمپ‌ها می‌گذارد. عملکرد پمپ‌های سانتریفوژ در حالت بحرانی و ناپایدار می‌تواند سبب اختلال سیستم‌های مربوط گردد.

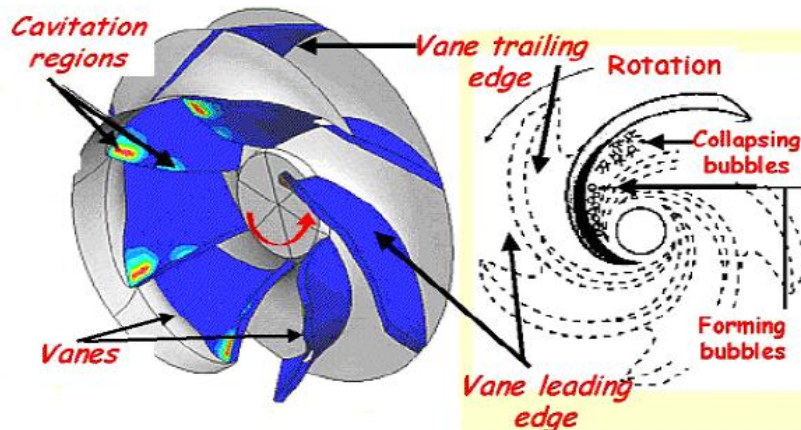
در برخی مواقع تعیین علت دقیق عملکرد ناپایدار پمپ، ممکن نیست. جریان آشفته و یا شرایط غیر عادی جریان می‌تواند موجب لرزش‌های شدید و خارج شدن پمپ از مدار شود. یکی از دلایل اولیه‌ی لرزش‌های پمپ سانتریفوژ پدیده‌ی کاواک‌زایی است. در اثر کاهش فشار سیال، تبخیر اتفاق می‌افتد و در سمت مکش پروانه، توده‌های حباب تولید و جهت تخلیه به خروجی پروانه ارسال و در ادامه‌ی مسیر در اثر افزایش فشار، حباب‌های تولید شده، فشرده می‌شوند. فشردگی حباب‌ها همراه با صدا (مشابه صدای ضربه‌ی به بادکنک) و ایجاد لرزش می‌باشد.

کاواک‌زایی یک خطر بالقوه است، به خصوص هنگامی که پمپ در دوره‌های بالا و یا در ظرفیت خیلی بیشتر و یا بسیار کمتر از نقطه‌ی بهترین بازده، کار کند. پدیده‌ی کاواک‌زایی می‌تواند در دراز مدت باعث تخریب سریع پمپ نیز گردد. از اثرات دیگر پدیده‌ی کاواک‌زایی بر عملکرد پمپ‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- تغییر در الگوی جریان با کاهش نتیجه بخش در خروجی (دبی جریان) و راندمان پمپ
- ایجاد پدیده خستگی ناشی از وجود پدیده‌ی کاواک‌زایی در قطعات و احتمال شکستن پره‌های پمپ
- خرابی گذرگاه‌های جریان و افت هد پمپ
- ایجاد خوردگی و چاله‌دار کردن قسمت‌های فلزی به علت عمل مداوم ساییده شدن که از

فروپاشی حباب‌ها حاصل شده است.

- ایجاد ضربات ارتعاشی و صدا در قسمت‌هایی از پره پمپ وقتی که فشار هیدرودینامیکی وارد شده بر سطوح حباب‌ها تغییر می‌یابد [۱۵].



شکل ۱-۲۵: تشکیل پدیده‌ی کاواکزایی در پمپ [۱۵]



شکل ۱-۲۶: صدمات ناشی از کاواکزایی روی پروانه پمپ [۱۵]

۱-۱۴-۲- شیرهای کنترل

سرعت سیال به هنگام عبور از محل آب‌بندی یک شیر کنترل افزایش یافته و پس از رسیدن به فضای باز خروجی، به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. بر اساس معادله انرژی جنبشی، کاهش و افزایش سرعت، باعث تغییرات انرژی جنبشی مولکول‌های سیال می‌شود. مطابق با قانون بقای انرژی در سیال، هر گونه افزایش انرژی جنبشی در اثر افزایش سرعت سیال، با کاهش انرژی پتانسیل یا همان فشار سیال همراه می‌باشد. این بدان معناست همواره فشار سیال به علت کاهش سطح مقطع در محل آب‌بندی

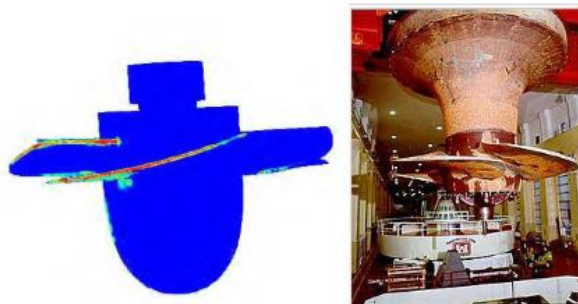
یک شیر کنترل کاهش یافته و پس از رسیدن به فضای باز خروجی دوباره افزایش می‌یابد. اگر سیال عبوری از شیر، مایع باشد و از طرف دیگر فشار در کمترین مقدار خود به پایین‌تر از فشار اشباع مایع در آن دما برسد، مایع شروع به جوشیدن می‌کند. حال اگر در فضای باز خروجی فشار مایع بیش از فشار اشباع در آن دما برسد حباب‌های به وجود آمده متراکم می‌شوند که این پدیده همان کاواک‌زایی است [۱۶].

۱-۱۴-۳- توربین

توربین‌های آبی کاپلان به منظور تولید برق در محدوده متوسط برخی نقاط کشور به کار می‌روند. مسئله بررسی کاواک‌زایی در این نوع توربین‌ها برای طراحی دقیق‌تر و رفع مشکلات و نواقص همیشه مورد بحث بوده است. کاواک‌زایی در توربین‌های آبی باعث تخریب پره‌ها و کاهش راندمان می‌شود. مطابق معادله برنولی، افزایش سرعت با کاهش فشار همراه است. در مایعات فشار نمی‌تواند به فشاری کمتر از فشار بخار، با توجه به وابستگی به دما و ارتفاع از سطح دریا در محل مورد نظر برسد. در هر بخشی از توربین که در آن فشار به کمتر از فشار بخار برسد، تعداد زیادی از حباب‌های بخار تشکیل می‌شوند. این حباب‌ها توسط جریان به ناحیه‌های پر فشارتر منتقل می‌شوند که در این نواحی بخار تقطیر شده و به طور ناگهانی متلاشی می‌گردند به طوری که دوباره به مایع تبدیل می‌شوند. این فرایند عامل شکل‌گیری یک حفره است که مایع اطراف جهت پر کردن این حفره، به شدت به سمت آن جاری می‌شوند. جریان مایع که از همه جهات وارد حفره می‌شود در مرکز حفره به یکدیگر برخورد می‌کنند که این عامل افزایش فشار محلی است که تا حدود ۷۰۰۰ اتمسفر می‌رسد. شکل‌گیری حفره و ایجاد فشار بالا چندین بار در ثانیه تکرار می‌شوند. این عامل باعث ایجاد حفره روی سطح پره‌های رانر می‌گردد. سپس ماده بر اثر پدیده خستگی که با خوردگی همراه است از بین می‌رود. پره‌های رانر ممکن است بر اثر این پدیده کاملاً از بین بروند [۱۷].



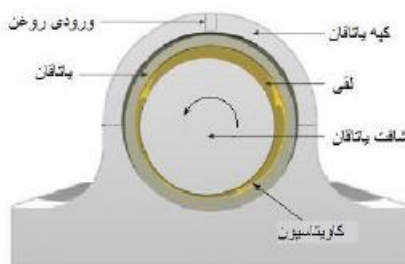
شکل ۱-۲۷: خرابی اجزاء شیر کنترل در اثر کاواک‌زایی (راست) تشکیل منطقه کاواک‌زایی (وسط) منحنی تغییرات فشار سیال در یک شیر کنترل (چپ) [۱۶]



شکل ۱-۲۸: کانتور کسر حجمی روی توربین کاپلان (چپ) نمونه واقعی از توربین کاپلان و صدمات وارده به آن بعد از ۶۱ سال سرویس (راست) [۱۷]

۱-۱۴-۴- کاواک‌زایی در یاتاقان‌ها

در روغنکاری یاتاقان‌های محوری ساده که برای بارهای زیاد شعاعی در سیستم‌های مختلف مکانیکی (دستگاه‌های فرز، میل‌لنگ ماشین‌ها، کمپرسورها، جعبه‌دنده‌ها و ...) استفاده می‌شود، یک فیلم خیلی نازک از روغن بین یاتاقان و محور قرار می‌گیرد. به دلیل نیروی وزن، محور و یاتاقان نسبت به هم به صورت خارج از مرکز درآمده و ضخامت فیلم روغن غیر یکنواخت می‌شود. در محورهای پر سرعت، یک ناحیه کم فشار در محل کم ضخامت روغن بین شافت و یاتاقان شکل می‌گیرد. اگر فشار به زیر فشار بخار برسد کاواک‌زایی رخ می‌دهد. کاواک‌زایی می‌تواند اثرات مهمی بر نیروهای وارده بر یاتاقان داشته باشد و همچنین باعث ایجاد اشکال در حرکت دورانی شافت می‌گردد.



شکل ۱-۲۹: کاواک‌زایی در یاتاقان محوری ساده [۱۲]

۱-۱۵- نقش پدیده ابر کاواک در کاهش نیروی پسا

امروزه افزایش سرعت حرکت وسایل نقلیه زیر آبی و کاهش نیروی پسای هیدرودینامیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. کاهش نیروی پسا، جهت افزایش سرعت همچنین کاهش صدا و آشفته‌گی در محیط مایع و کاهش اثرات زیست محیطی به کار می‌آید. به طور کلی دو راه مختلف برای ایجاد ابر کاواک وجود دارد. افزایش سرعت وسیله زیرآبی که ابر کاواک طبیعی نامیده می‌شود و یا کاهش فشار محیط اطراف وسیله زیرآبی با تزریق گاز حول آن که ابر کاواک مصنوعی نامیده می‌شود [۱۸]. راه‌های متفاوت جهت کاهش نیروی پسا، نیاز به یک اقدام کنترلی دارد که این اقدامات به فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [۱۲].

کنترل غیرفعال: تضمین کننده‌ی کاهش نیروی پسا بدون مصرف انرژی یا به وسیله‌ی انرژی جریان است.

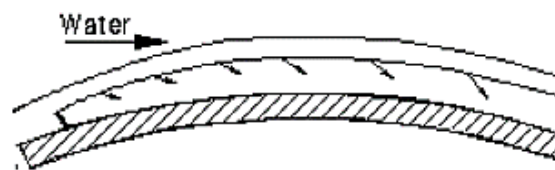
کنترل فعال: تضمین کننده‌ی کاهش نیروی پسا، به وسیله تزریق سیال مخصوص است.

انتخاب عمل کنترلی مطلوب روی جریان سیال برای تثبیت جریان کاواک‌زایی با نیروی پسای هیدرودینامیکی کم، دارای پیچیدگی زیادی است. کاهش نیروی پسا در سرعت‌های بالا که کاواک‌زایی طبیعی رخ می‌دهد کنترل غیر فعال می‌باشد که بدون مصرف انرژی انجام می‌شود.

روش تزریق گاز به لایه مرزی به منظور کاهش نیروی پسای اصطکاکی یک اقدام کنترلی فعال است. اولین بار روش تزریق گاز به لایه مرزی جهت کاهش نیروی پسای اصطکاکی توسط Loytsyansky

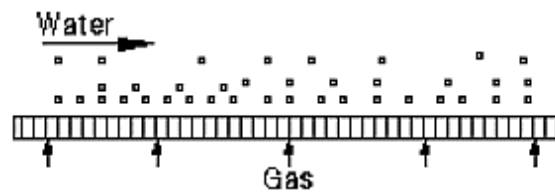
و Fedyacvsky در سال ۱۹۴۲ انجام شد که بیشتر تحقیقات انجام شده روی کاهش نیروی پسا، اشباع لایه مرزی توسط حباب‌های هوا در ابعاد میکرو می‌باشد.

شکل ۳۰-۱ نشان دهنده‌ی تشکیل حباب به روش طبیعی است که با تغییر در هندسه کاواک‌زا سرعت را در برخی از نقاط می‌توان افزایش داد که این موضوع باعث کاهش فشار و رسیدن به حد فشار بخار اشباع در آن نقاط شده و پدیده حفره‌زایی را در پی خواهد داشت [۱۹].

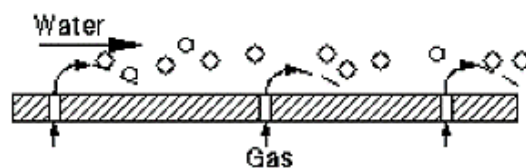


شکل ۳۰-۱: تولید ابرکاواک به روش طبیعی [۱۹]

شکل ۳۱-۱ و شکل ۳۲-۱ تولید حباب روی جسم به روش مصنوعی (هواده‌ی) را نشان می‌دهند. در این حالت برای ایجاد ابرکاواک به وسیله تزریق گاز از طریق منافذ موجود روی سطح جسم به داخل لایه مرزی استفاده می‌شود. در شکل ۳۱-۱ قطر منافذ جهت عبور گاز در حد میکرو ولی در شکل ۳۲-۱ گاز از طریق منافذی با قطر بزرگتر دمیده می‌شود و به همین علت قطر حباب‌های دمیده شده و سطح حفره‌زایی آن بیشتر است.



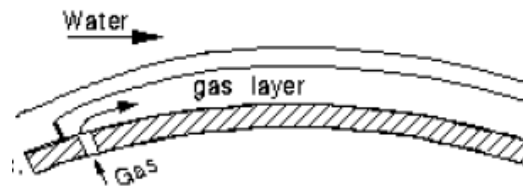
شکل ۳۱-۱: تولید ابرکاواک به روش مصنوعی به کمک میکرو حباب [۱۹]



شکل ۳۲-۱: تولید ابرکاواک به روش مصنوعی به کمک حباب‌های درشت [۱۹]

با ترکیب دو روش فوق یعنی روش طبیعی و روش مصنوعی (تزریق میکرو حباب‌های هوا) ابرکاواک

حول جسم ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۳۳: تشکیل ابرکاواک به روش ترکیبی [۱۹]

فصل دوم مروری بر تحقیقات انجام شده

در این فصل مروری به کارهای انجام شده طی سال‌های مختلف در حوزه تشکیل ابرکاواک، مشخصات ابرکاواک ایجاد شده همچنین کاواک‌زای مورد استفاده در آن خواهیم پرداخت.

۲-۲- مطالعات عددی پدیده کاواک‌زایی

اگرچه روش‌های تجربی و برخی روش‌های تئوری با دقت مناسبی پدیده کاواک‌زایی را پیش‌بینی می‌کنند؛ ولی هزینه بالای روش‌های تجربی و محدودیت روش‌های تئوری به هندسه‌های ساده، محققین را به استفاده از روش‌های عددی تشویق کرده است. با توجه به اهمیت پدیده کاواک‌زایی در سیستم‌های سیالاتی، هدف تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی ابرکاواک بر روی دیسک سوراخدار با سوراخ‌های غیرهم‌مرکز می‌باشد.

۲-۳- اهمیت روش‌های عددی حل جریان

دینامیک سیالات محاسباتی^۱ عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه آنها براساس شبیه‌سازی کامپیوتری. روش‌های عددی حل جریان از قابلیت بسیار بالایی برخوردار بوده و در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی مورد استفاده می‌باشند. مزیت‌های منحصر به فرد روش‌های عددی در طراحی سیستم‌های سیالاتی در مقایسه با روش‌های تجربی، مانند: کاهش اساسی در زمان و قیمت طراحی‌های جدید، و توانایی مطالعه سیستم‌هایی که انجام آزمایش روی آنها مشکل یا غیر ممکن است، استفاده از این روش‌ها را در طراحی تولیدات صنعتی و فرآیندها ضروری کرده است. با توجه به این مساله، امروزه در مهندسی از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری توانمند برای بهینه‌سازی و بهبود طراحی‌ها استفاده می‌شود [۳].

^۱ Computational fluid dynamic

۲-۴- معرفی مدل‌های حل عددی

مدل محاسباتی پدیده کاواکزائی سالهاست که مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات اولیه در زمینه پدیده کاواکزائی، بیشتر از تئوری‌های مربوط به جریان پتانسیل استفاده می‌شد و استفاده از مدل‌های عددی هیدرودینامیک کاواکزائی غیر مرسوم بود. از دلایل این مساله می‌توان به پیچیدگی‌های جریان دو فازی پدیده کاواکزائی، مانند تغییرات موضعی بسیار شدید در چگالی مایع تراکم‌ناپذیر در اثر وقوع کاواک، وجود مرزهای متحرک بین دو فاز و لزوم مدل‌سازی تغییر فاز اشاره کرد. با توجه به پیشرفت‌های قابل ملاحظه دینامیک سیالات محاسباتی در حل مسائل مختلف و افزایش توانایی محاسباتی رایانه‌ها، از دهه ۲۰ میلادی محققین زیادی به مدل‌سازی عددی پدیده کاواکزائی روی آوردند. روش‌های حل عددی معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های همراه با پدیده کاواکزائی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۲۰].

- روش‌های ردیابی مرز مشترک^۱
- روش‌های جریان تعادلی همگن^۲

۲-۴-۱- مدل ردیابی مرز مشترک

در روش‌های ردیابی مرز مشترک، برای ناحیه کاواک، فشار ثابتی برابر فشار بخار جریان مایع فرض شده و محاسبات فقط برای فاز مایع انجام می‌شود. فرض فشار ثابت برای ناحیه کاواک از لحاظ تجربی تایید شده است [۲۱]. مرز دو فاز با استفاده از این فرض قابل ردیابی بوده ولی تعیین شکل کاواک نیاز به استفاده از یک مدل برای هندسه دنباله دارد. در این روش‌ها، شبکه با تغییر شکل ناحیه کاواک خود را تطبیق می‌دهد. این روش‌ها قابلیت شبیه‌سازی جریان‌هایی که رشد و جدایش حباب‌ها در آنها رخ می‌دهد را ندارند و فقط برای مدل‌سازی کاواک صفحه‌ای در مسائل دو بعدی یا متقارن محوری قابل

^۱ Surface Tracking Methods

^۲ Hoemogenous Equilibrium Flow Models

استفاده می‌باشند. چن و هستر [۲۲]، دشپاند و همکارانش [۲۳] نمونه‌هایی از کاربرد این روش را ارائه داده‌اند.

۲-۴-۲- مدل جریان تعادلی همگن

در این مدل فصل مشترک مایع-بخار به صورت مستقیم از محاسبه جریان و با استفاده از یک مدل همگن تک فاز برای مخلوط بخار-مایع سیال به دست می‌آید (اساسا این مدل سازی یک رویکرد چندفازی است و در جریان‌های غیر دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرد). در این رویکرد یک تابع چگالی مجازی برای مخلوط مایع-بخار جهت تکمیل معادلات سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختلاف بین این دسته از مدل‌ها در چگونگی تعریف تابع چگالی می‌باشد [۱]. دلانوی و کنی [۲۴] در سال ۱۹۹۰ یک رابطه برای تغییرات چگالی بر حسب فشار مخلوط پیشنهاد دادند. مدلی نیز در سال ۲۰۰۰ توسط ونتیکاس [۲۵] ارائه گردید. که معادلات حالت سیال را به وسیله معادله آنتالپی بیان می‌کرد. کوبوتا و همکارانش [۲۶] در سال ۱۹۹۲ تابع چگالی مجازی را به کمک مدل دینامیکی حباب ریلی-پلست و با اعمال فرضیاتی پیرامون توزیع چگالی عددی حباب در یک فاز مایع پیوسته، معرفی کردند.

در سال‌های اخیر مدل‌سازی کاواک‌زایی به صورت مدل‌های مخلوط چند فازی و بر اساس یک معادله انتقال برای تغییر فاز مورد توجه قرار گرفته است. چن و هیستر [۲۷] در سال ۱۹۹۶ یک معادله انتقال چگالی به مجموعه معادلات حاکم اضافه کردند که تغییر فاز غیر تعادلی را بازتولید می‌کرد. سینگهال و همکارانش [۲۸] در سال ۱۹۹۷ و مرکل و همکارانش [۲۹] در سال ۱۹۹۸ یک معادله برای کسر حجمی بخار یا مایع که معرف جملات چشمه برای فرایند تبخیر و چگالش (یعنی رشد و انهدام حباب) بودند را به معادلات حاکم اضافه کردند. اسکندر و سوئر [۳۰] در سال ۲۰۰۰ و تانی و انگاشیما [۳۱] در سال ۲۰۰۲ این مدل را با اعمال معادله انرژی و با در نظر گرفتن تغییرات دما برای سیال حساس به دما توسعه دادند. به طور کلی مهمترین مزایای استفاده از مدل ردیابی مرز مشترک در مدل‌سازی کاواک‌زایی این است که در این روش‌ها نیازی به شبیه‌سازی دریچه حفره و دنباله تشکیل

شده در پایین دست آن نیست و همچنین این دسته از مدل‌ها می‌توانند علاوه بر کاواک‌زایی پیوسته، کاواک‌زایی رونده را هم پوشش دهند. بعلاوه محاسبات روی یک مجموعه از شبکه‌بندی‌های ثابت از فضای محاسباتی انجام می‌گیرد که در اصطلاح به آن روش شبکه ثابت می‌گویند و شامل روش‌های عددی نظیر روش نشانه‌گذاری^۱ و روش حجم سیال^۲ می‌باشد [۱].

در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر در مورد شبیه‌سازی پدیده کاواک‌زایی و مشخصات مورد بحث شامل کاوک‌زای مورد استفاده، نیرو و ضریب پسای وارد بر کاوک‌زا، مشخصات کاواک مانند طول و قطر کاواک و تاثیر عدد کاواک‌زایی روی پدیده کاوک‌زایی خواهیم پرداخت.

پدیده کاواک‌زایی اولین بار توسط اوپلر در سال ۱۷۵۴ و در تئوری هیدروتوربین‌ها پیشنهاد شد و توسط فرود برای اولین بار مورد استفاده قرار گرفت. پدیده کاواک‌زایی به معنای واقعی آن در سال ۱۸۹۳ توسط دو محقق به نام‌های بارنابی و پارسونز، هنگامی که دریافتند عامل اصلی خرابی پروانه کشتی‌های جنگی تندرو بریتانیا، تشکیل حباب بخار روی آن‌ها بود، شناخته شد و مورد بررسی قرار گرفت [۴]. رینولدز در سال ۱۸۹۴ به تشکیل حباب‌های بخار در جریان آب داخل لوله‌ها اشاره کرد و رشد و فروپاشی حباب‌های بخار را به صورت تجربی مشاهده نمود. پارسونز در سال ۱۸۹۵ اولین تونل آب را جهت مطالعه کاواک‌زایی طراحی کرد و رابطه بین کاواک‌زایی و آسیب‌های وارد بر پره‌ها را کشف نمود. دانشمندان در سال‌های اخیر به اهمیت و اثرات مفید ابرکاواک پی برده‌اند و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند [۱].

در سال ۲۰۰۶ چائو و همکاران [۳۲] جریان ابرکاواک ناپایدار گذرنده از روی مخروط‌ها (کاواک‌زای مخروطی) را بر اساس روش معادله انتگرالی بررسی کردند. آنها شکل و طول ابرکاواک ناپایدار را با استفاده از روش گسسته‌سازی زمانی تفاضل محدود پیش‌بینی و تاثیر عواملی مثل زاویه مخروط و عدد

^۱ Marker methods

^۲ Volume of fluid method

کاواک‌زایی را روی آنها بررسی کردند و همچنین نیروی پسای فشاری را بر اساس تئوری پتانسیل بدست آوردند.

در سال ۲۰۰۶ پینگ و همکاران [۳۳] شکل کاواک و نیروی پسای اعمال شده به جسم زیرآبی با کاواک‌زای دیسکی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آنها فرمول‌های تجربی بین شکل کاواک و عدد کاواک‌زایی، ارتباط بین زاویه حمله کاواک‌زا و عدم تقارن شکل کاواک، ارتباط بین نیروی پسا و شکل کاواک، روابط تجربی بین شکل کاواک مصنوعی و نرخ هوادهی و زاویه حمله^۱ صفر و همچنین یک فرمول برای شکل کاواک مصنوعی تحت شرایط کاواک‌زایی بدون بخار بدست آوردند. آنها دریافتند عدم تقارن در شکل کاواک به زاویه حمله کاواک‌زا وابسته است و در زاویه حمله $\pm 6^\circ$ درجه تفاوت ضخامت بالا و پایین دیواره کاواک حدوداً ۱۰ درصد است که در آزمایشات مهندسی می‌توان از آن صرف‌نظر کرد ولی وقتی زاویه در محدوده‌ی ذکر شده نباشد تفاوت‌ها سیر صعودی خواهند داشت. همچنین آنها مشاهده کردند زمانی که نسبت ضخامت کاواک به قطر جسم $0.2/0$ باشد تقریباً ضریب پسای کلی مینیمم می‌شود.

در سال ۲۰۰۷ امرومین [۳۴] پدیده ابرکاواک جسم متحرک در آب کم عمق که اثرات مرز صلب و مرز آزاد را داراست، تحلیل کرد. محاسبات انجام شده توسط امرومین با تئوری سیال ایده‌آل نشان داد که اثرات مرزهای جریان در آب کم عمق باعث تغییر شکل سه‌بعدی کاواک مخصوصاً با تورم در قسمت پایین کاواک همراه است. او دریافت اعداد کاواک‌زایی کوچک برای کاهش نیروی پسا توسط ابرکاواک ضروری است و فقط برای اجسام یا کاواک‌زاهای با اندازه کوچک به این مورد می‌توان دست یافت.

در سال ۲۰۰۷ وی و همکاران [۳۵] تحقیقات خود را روی شکل مشخصه‌های ابرکاواک طبیعی و مصنوعی در تونل آب و پرتابه‌ای با کاواک‌زای مخروطی بصورت تجربی انجام دادند. آنها شکل و اندازه ابرکاواک طبیعی و مصنوعی را در اعداد کاواک‌زایی کوچک و برابر برای هر دو بدست آوردند و شکل

^۱ Angle of attack

ابركاواک طبیعی و مصنوعی را با استفاده از فرمول تجربی ساوچنکو محاسبه کردند. آنها در محاسبات خود اثرات گرانش که باعث عدم تقارن در شكل كاواک ایجاد شده در ابركاواک مصنوعی، به خصوص در اعداد فرود^۱ كوچكتر را مشاهده نمودند. همچنین فرمولی تجربی برای محاسبه تغییر شكل محوری ابركاواک مصنوعی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آوردند.

در سال ۲۰۰۹ نوری و اسلام‌دوست [۷] جریان پتانسیل ابركاواک پایدار دو بعدی را به صورت عددی و به روش المان مرزی^۲ به واسطه وجود يك كاواک‌زای دیسکی تحلیل و با استفاده از فواید این روش يك الگوریتم تکراری برای بررسی مرز كاواک در جریان‌های متقارن معرفی کردند که در این الگوریتم طول كاواک معلوم است و برای یافتن رابطه‌ی بین عدد كاواک‌زایی و شكل كاواک استفاده شده است.

آنها برای یافتن طول محدود كاواک‌ها از يك مدل بسته‌شدن كاواک شاخدار^۳ استفاده کردند که با اعمال این مدل تغییر شكل بسته‌شدن كاواک در يك طول معین ممکن شد. آنها همچنین بهترین طول بسته‌شدن برای كاواک را مطالعه کردند که با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی دریافتند، طول كاواک بدست آمده از طول كاواک واقعی در طبیعت برای عدد كاواک‌زایی معین بزرگتر است. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که این الگوریتم تکراری يك روش قابل اطمینان است و به همراه روش المان مرزی و روش‌های عددی دیگر که توانایی ردگیری سطح آزاد را دارند برای پیش‌بینی مشخصات جریان ابركاواک روش مناسبی است.

در سال ۲۰۰۹ شفقت و همکاران [۳۶] به کمک يك روش ریاضی رفتار کمیت‌های اصلی در جریان‌های ابركاواک متقارن گذرنده از روی كاواک‌زاهای دیسکی و مخروطی در زاویه حمله صفر را با استفاده از روش المان مرزی بررسی کردند. آنها از مدل بسته‌شدن ریابوچینسکی^۴ برای مدل‌سازی

¹ Froude numbers

² Boundary element method

³ Cusped cavity closure model

⁴ Riabouchinsky closure model

ریاضی و جواب واحد استفاده کردند و برای یافتن مکان سطح کاواک ابتدا یک مکان اولیه را فرض، سپس با استفاده از یک طرح تکراری مکان دقیق آن را پیدا کردند. آنها رفتار ریاضی کمیت‌های اصلی جریان ابرکاواک متقارن شامل ضریب پسا، عدد کاواک‌زایی و ماکزیمم عرض کاواک را در یک محدوده از قطر دیسک و مخروط، زوایای سر مخروط و طول‌های کاواک بدست آوردند. آنها با بررسی نتایج بدست آمده از توابع موجود مثل توابع خطی، چندجمله‌ای، لگاریتمی، توانی و نمایی دریافتند فقط توابع توانی رفتار کمیت‌های بیان شده را به خوبی توصیف می‌کند.

در سال ۲۰۱۰ ژو و همکاران [۳۷] برای فهم تفاوت‌های ابرکاواک مصنوعی در تونل آب و میدان جریان بی‌نهایت، شبیه‌سازی سه‌بعدی برای یافتن شکل ابرکاواک مصنوعی ایجاد شده در پایین‌دست کاواک‌زای دیسکی بر اساس معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط^۱ و با استفاده از روش حجم محدود^۲ و مدل اغتشاشی انتقال تنش برشی^۳ در چارچوب مدل جریان دوفازی^۴ انجام دادند. آنها تاثیرات راه‌اندازی، بلوک‌بندی و دیوار در تونل آب را بررسی کردند و دریافتند با افزایش قطر تونل آب، قطر ابرکاواک نیز افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۰ زو و همکاران [۳۸] نرخ نشت گاز^۵ روی پدیده ابرکاواک مصنوعی ناپایدار روی میله‌ای باریک با کاواک‌زای دیسکی را بررسی کردند. آنها فرمولی برای نرخ نشت گاز ارائه کردند و نرخ تغییر حجم ابرکاواک را بر اساس اصل لاگوینوویچ^۶ به صورت عددی و با فرمول‌های تجربی مقایسه نمودند. آن‌ها فرمول بی‌بعد نرخ نشت گاز را با روش حداقل مربعات غیرخطی بر اساس معادله بالانس جرم گاز محاسبه و اثبات کردند.

در سال ۲۰۱۰ اسمعیلی‌فر و همکاران [۳] جریان در ابرکاواک هوادهی شده را به صورت عددی و

¹ Reynolds-averaged Navier–Stokes equations

² Finite volume method

³ Shear–Stress Transport turbulent model

⁴ Two fluid multiphase flow model

⁵ Gas leakage

⁶ Logvinovich's Principle

آزمایشگاهی تحلیل کردند. آن‌ها در این پایان‌نامه مدل جدیدی برای شبیه‌سازی جریان ابرکاواک حول اجسام متقارن محوری نظیر دیسک و مخروط‌هایی با زاویه راس ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را ارائه دادند. آن‌ها از روش حجم سیال برای محاسبه پدیده کاواک‌زایی و از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به عنوان مدل آشفتگی به همراه لزجت مصنوعی به جای مدل‌های کاواک‌زایی استفاده کردند. آن‌ها در بررسی‌های خود دریافتند که ابرکاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زای دیسکی دارای ابعاد بزرگتری نسبت به کاواک‌زای مخروطی می‌باشد. آن‌ها با مقایسه نتایج به‌دست آمده حاصل از شبیه‌سازی دریافتند که روش استفاده از لزجت مصنوعی با مدل کاواک‌زایی نتایج بهتری نسبت به حالت استفاده از مدل‌های کاواک‌زایی بدون لزجت مصنوعی است.

در سال ۲۰۱۰ ژو و همکاران [۳۹] شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی پایدار و ناپایدار برای بیان روش نشت گاز ابرکاواک روی میله‌ای باریک همراه با یک کاواک‌زای دیسکی را با حل معادلات ناویراستوکس با روش حجم محدود بر اساس مدل جریان دو فازی و مدل‌های اغتشاشی انتقال تنش برشی و شبیه‌سازی گردابه جداشده^۱ بررسی کردند. آنها فرایند توسعه کاواک با جریان جت بازگشتی^۲ و روش نشت گاز دو لوله گردابه^۳ را مطالعه و تغییر فشار در یک نقطه ثابت در کاواک را با زمان، همچنین قانون تغییر نیروی برا، پسا، سرعت و جابجایی را بررسی کردند. آنها از یک مدل کاواک‌زای دیسکی برای پیش‌بینی دو نوع از روش‌های نشت گاز رایج استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان می‌داد که پدیده جریان جت بازگشتی عامل اصلی ایجاد ناپایداری در کاواک‌ها می‌باشد.

در سال ۲۰۱۰ کاپینگ و همکاران [۴۰] توزیع نیروی برا روی یک جسم ابرکاواکی مصنوعی با اعداد فرود کوچک را با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی و به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها برای شبیه‌سازی از یک کاواک‌زای دیسکی و از مدل جریان دوفازی و مدل اغتشاشی انتقال تنش

¹ Detached Eddy Simulation Model

² Re-entrant jet flow

³ Two vortex tube gas leakage way

برشی استفاده کردند. آنها علاوه بر نیروی برا، نیروی پسای بین فازها، اثرات گرانش همچنین تراکم پذیری گاز را شبیه سازی نمودند و بخاطر عدد کاواکزایی طبیعی بزرگ، از کاواکزایی طبیعی صرف نظر نموده و فقط اثرات آب و هوا را در پدیده ابرکاواک مصنوعی بررسی کردند و پدیده نشت گاز دو لوله گردایی را در شبیه سازی آزمایش مشاهده نمودند.

در سال ۲۰۱۰ آهن و همکاران [۴۱] مطالعه عددی و آزمایشگاهی جریان ابرکاواک گذرنده از روی کاواک زاهای متقارن محوری (گوه و مخروط) را بررسی کردند. آنها یک روش عددی بر اساس جریان لزج توسعه دادند و نتایج کار را برای چندین کاواکزا با شکل متفاوت ارائه کردند. آنها ابتدا کاواک زاهایی با شکل گوه را برای پیش بینی طول کاواک استفاده کردند و با استفاده از یک تابع پتانسیل بر اساس روش المان مرزی شکل مورد نیاز کاواک برای پوشش کامل جسم را استخراج کردند.

در سال ۲۰۱۰ طهماسبی و همکاران [۱۲] پایان نامه ارشد خود را تحت عنوان بررسی عددی نیروی درگ (پسا) و حباب بخار ابرکاواک بر روی کویتیتورها (کاواک زاهای) ارائه کردند. آنها با استفاده از تئوری های جریان و مدل چندفازی مخلوط^۱ در نرم افزار فلونت تاثیر ابرکاواک بر روی پایداری، عدد کاواکزایی، ضریب نیروی پسا و نسبت حجمی بخار را بررسی نمودند. آنها از یک کاواکزای استوانه ای با دماغه تخت که دارای سه قسمت بصورت پله ای که به شرح زیر می باشد استفاده کردند:

(۱) دیسک با قطر ۰/۰۳ و ضخامت ۰/۰۰۲ متر.

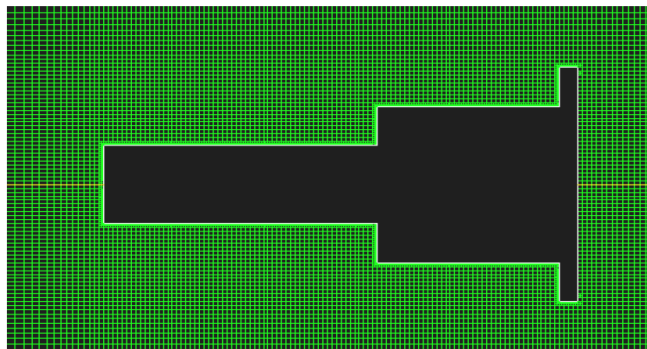
(۲) استوانه اول با قطر ۰/۰۲ متر و پارامتر طولی d که مقدار آن بین صفر تا ۰/۰۶ متر تغییر می کند.

(۳) استوانه دوم با قطر ۰/۰۱ متر و پارامتر طولی h که مقدار آن بین صفر تا ۰/۰۶ متر تغییر می کند.

^۱ Mixture

۴) حداکثر طول کاواک‌زا در شرایط مختلف بدون در نظر گرفتن ضخامت $0/06$ متر است.

آنها کاواک‌زای مناسب را از بین ۷۰ نوع کاواک‌زای استوانه‌ای که به خاطر شرایط بالا ایجاد شده بود را با توجه به دو شرط کاهش نیروی پسا و افزایش حجم حباب (ایجاد ابرکاواک بزرگتر) انتخاب نمودند که با شرط کاهش نیروی پسا یک سری از کاواک‌زها و با تکیه بر شرط تولید ابرکاواک بزرگتر یک سری دیگری از کاواک‌زها را انتخاب نمودند. آنها دریافتند برای کاهش نیروی پسا پارامتر h نقش موثرتری نسبت به پارامتر d دارد به عبارت دیگر در یک h ثابت تغییرات طول پارامتر d تاثیر خیلی کمی در نیروی پسا دارد. همچنین دریافتند برای کاهش نیروی پسا طول پله اول کاواک‌زا زیاد و طول پله دوم کم باشد، ولی برای افزایش حجم حباب باید طول هر دو پله کم باشد.



شکل ۱-۲: کاواک‌زای مورد استفاده در پایان‌نامه آقای طهماسبی [۱۲]

در سال ۲۰۱۱ چن و همکاران [۴۲] از مدل‌های اغتشاشی گردابه کوچک-ویسکوزیته^۱ غیر خطی درجه دوم و مکعبی (شامل مدل‌های اغتشاشی $k - \varepsilon$ و $k - \omega$) در محاسبات جریان ابرکاواک آشفته استفاده کردند. آنها مشاهده کردند مدل‌های استفاده شده در تحقیقشان دارای دقت و توانایی بالایی برای محاسبه شکل ماکروسکوپی و خواص هیدرودینامیکی ابرکاواک دارد. آنها از مدل اغتشاشی گردابه کوچک-ویسکوزیته غیر خطی مکعبی بیشتر برای پیش‌بینی عددی جریان ابرکاواک حول یک وسیله زیرآبی پیچیده استفاده کردند و نحوه شکل‌گیری کاواک پشت یک کاواک‌زای دیسکی، توزیع ضریب

^۱ Eddy-viscosity models

فشار و ضریب پسا را با مدل‌های اغتشاشی ذکر شده بدست آوردند.

در سال ۲۰۱۲ پارک و رهی [۲] جریان ابرکاواک حول کاواک‌زاهای گوه‌ای و کروی شکل را به صورت دوبعدی بررسی کردند. آنها از معادلات ناویر استوکس رینولدز متوسط ناپایدار بر اساس یک روش حجم محدود سلول مرکزی^۱، معادلات انتقال کسر حجمی، یک مدل کاواک‌زایی بر اساس مدل‌سازی جریان دوفازی، مدل اغتشاشی $k - \epsilon$ استاندارد و شرایط محاسباتی مختلف مثل زوایای مختلف گوه و اعداد کاواک‌زایی را برای شبیه‌سازی استفاده کردند. آنها طول کاواک، توزیع فشار سطح، نیروی پسا و سرعت را در سطح مشترک کاواک ارائه کردند و سرعت روی سطح مشترک کاواک را با استفاده از معادله برنولی^۲ بدست آوردند. آنها دریافتند زمانی که پدیده ابرکاواک برای کاهش نیروی پسای وسایل زیرآبی استفاده می‌شود، باید اندازه و شکل کاواک‌زا با بررسی عدد کاواک‌زایی، همچنین طول جسم و نتایج طول کاواک با همدیگر طراحی شود، پس یک کاواک‌زا با اندازه کوچک بر اساس نتایج بدست آمده را توصیه کردند.

در سال ۲۰۱۲ ساوچنکو [۴۳] جریان ابرکاواک گذرنده از روی یک کاواک‌زای دیسکی دارای سوراخی هم‌مرکز اما با قطرهای مختلف را بررسی کرد. او در آزمایشات خود نیروی پسای وارد شده به کاواک‌زا را با نسبت قطر داخلی به خارجی متفاوت بدست آورد و نمودارهای ضریب پسا و جرم اضافه شده در برابر نسبت قطرها را ارائه نمود. سپس فرمول‌هایی برای محاسبه ضریب پسا و عامل جرم اضافه شده بخاطر قطرهای مختلف سوراخ دیسک در جریان ابرکاواک ارائه کرد.

نتایج کار ساوچنکو به شرح زیر می‌باشد:

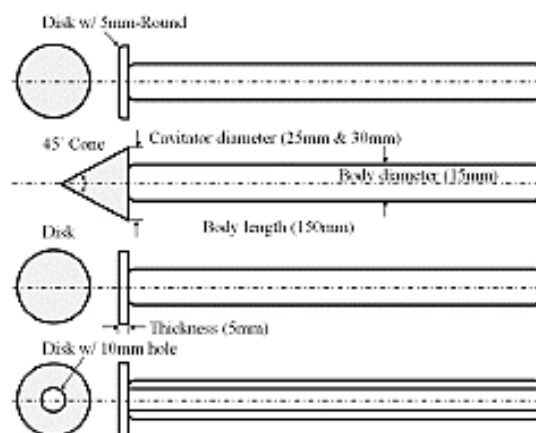
(۱) زمانی که نسبت قطر داخلی به خارجی به سمت یک میل کند ضریب نیروی پسای مدل (جسم دارای کاواک‌زا) به عدد دو میل می‌کند و وقتی نسبت قطر داخلی به خارجی به سمت صفر

¹ Cell-centered

² Bernoulli's equation

میل کند در واقع کاواک‌زای دیسکی سوراخدار و بدون سوراخ عملکردی مشابه خواهند داشت. (۲) در هنگام تشکیل ابر کاواک در پایین دست مدل، اگر نسبت قطر داخلی به خارجی کاواک‌زا بین صفر و یک باشد آنگاه ضریب نیروی پسا در محدوده ۰/۷۹ تا ۰/۸۹ قرار خواهد گرفت.

در سال ۲۰۱۲ آهن و همکاران [۱۸] مراحل شکل‌گیری کاواک در جریان‌های ابر کاواک را پشت کاواک‌زای گوه‌ای شکل دوبعدی با زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه مشاهده و ضریب پسا، طول و عرض کاواک را در اعداد کاواک‌زایی مختلف بدست آوردند همچنین موارد ذکر شده و شکل ابر کاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زاهای دیسکی با لبه تیز و لبه پخ‌دار، دیسکی سوراخدار هم‌مرکز و مخروطی را به صورت سه‌بعدی مشاهده و ارائه نمودند. در شکل ۲-۲ کاواک‌زاهای سه‌بعدی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. نتایج کار آنها به شرح زیر است.



شکل ۲-۲: کاواک‌زاهای سه‌بعدی در پژوهش آهن و همکاران [۱۸]

- در حالت دو بعدی کاواک تشکیل شده در پشت کاواک‌زای صفحه‌ای تخت بزرگتر از کاواک‌زای گوه‌ای است
- در حالت سه‌بعدی کاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زای دیسکی با لبه تیز از بقیه کاواک‌زاهای بزرگتر است.

در سال ۲۰۱۳ هو و همکاران [۴۴] ایجاد جریان‌های کاواک‌زایی ناپایدار (جریان‌ها توسط معادلات

اویلر تک سیالی تراکم‌پذیر^۱ با پدیده کاواک‌زایی مدل‌سازی شده‌اند) ناشی از تغییرات تدریجی یا ناگهانی در سرعت جریان آزاد و وجود کاواک‌زا را شبیه‌سازی کردند. آنها جریان‌های کاواک‌زایی متقارن محوری دوبعدی حول یک استوانه با یک سر ضخیم^۲ و لبه تیز، برای بررسی سیر تکامل کاواک در ارتباط با تغییر سرعت جریان آزاد و پیدایش کاواک‌زا را به ترتیب بررسی کردند. یافته‌های آنها بدین شرح است:

- (۱) بر اثر افزایش ناگهانی سرعت جریان آزاد ممکن است کاواک منقبض شده یا از بین برود.
- (۲) یک ابرکاواک که مشخصاتی با ثبات بالاتر نسبت به کاواک جزئی دارد در برابر تغییرات زیاد سرعت جریان آزاد می‌تواند ایستادگی کند.
- (۳) با تغییرات تدریجی در سرعت جریان آزاد تغییر شکل کمی در کاواک ایجاد شده، در حالی که اگر دامنه سرعت زیاد شود کاواک اصلی ممکن است منقبض شده و تغییر شکل قابل توجهی داشته باشد.
- (۴) در سرعت جریان آزاد نسبتاً کم، وجود یک کاواک‌زا می‌تواند به ایجاد کاواک کمک نماید و با افزایش سرعت جریان آزاد وجود کاواک‌زا می‌تواند باعث گسترش کاواک موجود تا یک طول قابل توجه شود (ابرکاواک) که در این صورت نیروی پسا نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۳ کو [۴۵] جریان‌های ابرکاواک ناپایدار حول جسم دارای کاواک‌زاهای مختلف متقارن محوری مخروطی و دیسکی را بررسی کردند. آنها با بکارگیری مدل سطح مشترک نفوذ یا پخش^۳ در رنج وسیعی از اعداد کاواک‌زایی شبیه‌سازی خود را انجام دادند. آنها ضریب پسا را از روی نیروی فشاری اعمال شده روی کاواک‌زا محاسبه نموده و همچنین مشاهده کردند که با کاهش عدد کاواک‌زایی طول کاواک ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد.

¹ One-fluid compressible Euler equations

² A blunt head

³ Diffuse interface model

در سال ۲۰۱۴ ایکسین و همکاران [۴۶] تحلیل عددی تاثیرات زاویه انحراف کاواکزای دیسکی روی ویژگی‌های جریان برای یک وسیله ابرکاواکی با حرکت آزاد را تحقیق کردند. آنها یک روش جریان چند فازی تک سیالی^۱ را به همراه یک مدل کاواک‌زایی طبیعی برای شبیه‌سازی عددی یک وسیله ابرکاواکی زیرآبی تحت اعمال یک نیروی محوری خارجی، همچنین تاثیرات زاویه انحراف کاواکزای دیسکی در محدوده‌ی ۳- تا ۳ درجه روی کاواک، هیدرودینامیک و مسیر حرکت در زیر آب را بررسی کردند و دریافتند که زاویه انحراف تاثیر خیلی کمی روی کاواک دارد. آنها همچنین دریافتند زمانی که زاویه انحراف افزایش می‌یابد، منحنی‌های تغییرات سرعت خطی عمودی و ضریب برا هموارتر می‌شوند.

در سال ۲۰۱۴ رشیدی و همکاران [۴۷] پدیده ابرکاواک مصنوعی را به صورت سه‌بعدی روی یک میله بلند و باریک^۲ که دارای یک کاواک‌زای دیسکی لبه تیز و سوراخ مخصوصی برای هوادهی می‌باشد را شبیه‌سازی کردند. آنها شبیه‌سازی‌ها را برای دو الگوریتم مختلف در رفتار سطح آزاد که هر دو با استفاده از روش حجم سیال که یکی از آنها با استفاده از الگوریتم یانگ^۳ در جمله جابجایی سطح آزاد و دیگری بدون آن بود را انجام دادند. آنها مشاهده نمودند شبیه‌سازی انجام شده با الگوریتم یانگ فیزیک پدیده کاواک‌زایی مصنوعی را که شامل طول کاواک، نشت گاز و جت بازگشتی است را به درستی و با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده است. آنها با استفاده از روش عددی یک رابطه بین سه پارامتر طول کاواک، ضریب هوادهی و عدد کاواک‌زایی تهیه کردند و دریافتند که ضریب فشار در یک لحظه درون کاواک ثابت است همچنین دریافتند رفتار ناپایدار جریان مانند سطح مشترک کاواک، جداسازی کاواک و جریان درون کاواک به خاطر وجود جت بازگشتی است.

در سال ۲۰۱۴ پن و ژو [۴۸] مشخصه‌های ابرکاواک طبیعی یک پرتابه زیرآبی^۴ دارای کاواک‌زای دیسکی را شبیه‌سازی کردند. آنها تاثیر عدد کاواک‌زایی را روی تشکیل کاواک‌زایی بررسی نمودند و

¹ Single-fluid multiphase flow method

² Slender rod

³ Youngs' algorithm

⁴ Underwater projectile

دریافتند با افزایش عدد کاواک‌زایی ضریب پسا بصورت غیر خطی افزایش، قطر و طول کاواک ایجاد شده کوچکتر می‌شود. همچنین دریافتند با اعمال گرادیان فشار معکوس جت بازگشتی در انتهای کاواک تشکیل می‌گردد و ضریب مقاومت به عدد کاواک‌زایی، نسبت باریکی کاواک‌زایی، قطر کاواک و سایر عوامل بستگی دارد.

در سال ۲۰۱۵ منگ و همکاران [۴۹] جریان‌های ابرکاواک روی کاواک‌زای دیسکی یک پرتابه زیرآبی مادون صوت را بررسی کردند. آنها برای بررسی اثرات سیالات تراکم‌پذیر، یک روش حجم محدود بر اساس تئوری پتانسیل تراکم‌پذیر ایده‌آل فرمول‌بندی کردند و با استفاده از معادله پیوستگی و معادله حالت تایت^۱ همچنین مدل بسته‌شدن ریابوچنسکی، حل یک مسئله معکوس برای جریان ابرکاواک ارائه کردند. آنها براساس شرط نفوذ ناپذیری بر روی سطح ابرکاواک، یک روش تکراری جدید برای شکل ابرکاواک به منظور ملاحظه اثر تراکم‌پذیری بر شکل ابرکاواک، ضریب پسای فشاری و میدان چگالی طراحی کردند که با استفاده از این روش اعداد کاواک‌زایی بسیار کوچک در محدوده 10^{-4} تا 10^{-2} قابل محاسبه هستند. آنها مشاهده کردند در شرایط مادون‌صوت تراکم‌پذیری سیال، طول و شعاع ابرکاواک را افزایش می‌دهد و ابرکاواک به شکل کروی گسترش می‌یابد که این اثرات روی یک سوم اول ابرکاواک مشهود نبود. همچنین آنها مشاهده کردند با افزایش عدد کاواک‌زایی یا عدد ماخ ضریب پسا افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۵ کیم و آهن [۵۰] جریان‌های ابرکاواک سه‌بعدی حول اجسام متقارن محوری در سرعت‌های مختلف و با تمرکز روی کاواک‌زای دیسکی را با روش ویسکوز-پتانسیل^۲ (یک روش برای محاسبه نیروی پسا اصطکاکی اعمال شده روی سطح جسم تر) شبیه‌سازی کردند. آنها با بکارگیری روش جریان پتانسیل، شکل کاواک و نیروی پسا که از ویژگی‌های مهم مباحث کاربردی برای اهداف ابرکاواک است را محاسبه کردند. آنها همچنین ویژگی‌های ابرکاواک و نیروی پسای یک اژدر ابرکاواکی

¹ Tait state equation

² Viscous- Potential Method

در ابعاد واقعی را بر اساس شرایط مختلف ارتفاع از سطح بدست آوردند.

در سال ۲۰۱۶ روحی و همکاران [۵۱] جریان کاواک‌زایی و ابرکاواک ناپایدار را پشت یک دیسک سه‌بعدی در سه عدد کاواک‌زایی $0/2$ ، $0/1$ و $0/05$ با تاکید ویژه روی مقایسه جزئیات مدل‌های مختلف اغتشاشی و انتقال جرم بررسی کردند. آنها برای شبیه‌سازی از روش مدل اغتشاشی انتقال تنش برشی کا-امگا و روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ به همراه انواع مختلف مدل‌های انتقال جرم کانز^۲، سوئر-اسکندر^۳ و زوارت^۴ و از روش حجم سیال متراکم برای ردگیری سطح مشترک فازهای مایع و بخار استفاده کردند. آنها مدل انتقال جرم زوارت را به مجموعه نرم افزار Open FOAM اضافه کردند و با اعمال مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به همراه مدل انتقال جرم کانز جواب‌های دقیق‌تری برای طول کاواک و ضریب پسا همچنین با ترکیب مدل سوئر و مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نتایج دقیق‌تری برای قطر کاواک بدست آوردند. آنها با مقایسه مدل زوارت با مدل کانز به همراه روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دریافتند که مدل زوارت نیز همانند مدل سوئر-اسکندر در محاسبه ابعاد و مشخصات پدیده ابرکاواک دارای خطا می‌باشند.

در سال ۲۰۱۶ پندار و روحی [۵۲] پدیده کاواک‌زایی و ابرکاواک روی جسمی با نوک کروی و یک کاواک‌زای مخروطی را بررسی کردند. آنها از مدل انتقال جرم کانز و سوئر به همراه مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و مدل اغتشاشی انتقال تنش برشی کا-امگا برای شبیه‌سازی کاواک‌زایی و از روش حجم سیال متراکم برای ردگیری سطح مشترک فازهای مایع و بخار استفاده کردند. در مطالعه ایشان یک رابطه بین طول و قطر کاواک برای جسم با نوک کروی شکل و همچنین جزئیات مقایسه بین مدل‌های انتقال جرم و اغتشاشی متفاوت در رنج وسیعی از اعداد کاواک‌زایی مخصوصاً در اعداد کاواک‌زایی کوچک مانند $0/07$ ، $0/05$ و $0/02$ ارائه شد. آنها تفاوت در ساختار جت

^۱ Large eddy simulation

^۲ Kunz

^۳ Schnerr-suaer

^۴ Zwart

برگشتی در مدل‌های مختلف، توزیع فشار در میدان جریان، خطوط همتراز سرعت و گردابه در ابر کاواک، جدایش لایه مرزی همچنین شکل ابر کاواک را مشاهده کردند.

با توجه به مطالب ارائه شده انواع کاواک‌زاهای مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان کاواک‌زایی دیسک، مخروط، مخروط ناقص، نیم‌کره و دیسک سوراخدار با سوراخ هم‌مرکز می‌باشد. از آنجایی که دیسک سوراخدار با سوراخ‌های غیر هم‌مرکز تا به حال در سال‌های قبل انجام نشده است، لذا این ضرورت احساس شده است تا مسئله مهم کاواک‌زایی را با استفاده از این کاواک‌زا بررسی نموده و نتایج حاصل شده از این شبیه‌سازی را با کارهای انجام شده قبلی مقایسه نماییم تا از بین کاواک‌زاهای مورد استفاده در مقالات بتوانیم کاواک‌زای ایده‌ال برای شروع و ایجاد ابر کاواک ثابت را معرفی نماییم.

فصل سوم معادلات حاکم و روش حل

۳-۱- مقدمه

در این فصل با توجه به اینکه شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام می‌شود، لذا با استفاده از منابع موجود پیرامون نرم‌افزار Fluent به بررسی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی با توجه به مدل مورد استفاده به معادلات مورد نیاز برای حرکت جسم در سیال، تولید حباب بر روی سطوح جسم و ایجاد جریان ابرکاواک پشت کاواک‌زای مورد نظر در این نرم‌افزار می‌پردازیم.

۳-۲- رژیم‌های جریان‌های چند فازی

تعداد زیادی از جریان‌های فرآیندی، مخلوطی از فازها هستند. فازهای فیزیکی مواد شامل گاز، مایع و جامد است. اما مفهوم فاز در سیستم جریان چند فازی به معنی گسترده‌تری به کار برده می‌شود. در جریان چند فازی، یک فاز قسمتی از جریان است که قابلیت تفکیک آن وجود دارد و نسبت به میدان پتانسیلی که در آن قرار می‌گیرد پاسخ داده و با سایر فازها برهم‌کنش دارد. مثلاً ذرات جامد با اندازه‌های مختلف از همان ماده را می‌توان به عنوان فازهای متفاوت در نظر گرفت چون هر مجموعه ذرات با اندازه یکسان دارای عکس‌العمل دینامیکی مشابه به میدان جریان خواهند.

رژیم‌های جریان‌های چند فازی به چهار نوع تقسیم می‌شود.

- جریان‌های مایع-گاز یا مایع-مایع
- جریان‌های گاز-جامد
- جریان‌های جامد-مایع
- جریان‌های سه‌فازی

۳-۲-۱- جریان‌های مایع-گاز یا مایع-مایع

رژیم‌های زیر جریان‌های مایع-گاز یا مایع-مایع را تشکیل می‌دهد.

- جریان حبابی^۱: جریان گسسته‌ی گازی یا از حباب‌های سیال در یک محیط (سیال) پیوسته

^۱ Bubbly flow

می‌باشد.

- جریان قطره^۱: جریان گسسته قطرات سیال^۲ در یک گاز پیوسته می‌باشد.
- جریان اسلاگ^۳: جریانی از حباب‌های بزرگ هوا در یک مایع پیوسته می‌باشد.
- جریان سطح-آزاد/ لایه‌ای^۴: جریانی از مایعات مخلوط نشدنی که توسط یک سطح مشترک جدا شده باشند.

۳-۲-۲- جریان‌های گاز- جامد

نواحی زیر شامل جریان‌های گاز- جامد می‌باشند:

- جریان پر-ذره^۵: جریان ذرات جامد با نسبت وزنی بالا در یک گاز است.
- انتقال با فشار هوا^۶: حمل ذرات جامد توسط جریان گاز است که به عواملی مانند عدد رینولدز، مقدار جامد و مشخصات ذرات بستگی دارد. الگوهای نمونه همانند جریان اسلاگ، جریان شنی^۷ و جریان همگن^۸ شامل این دسته می‌باشند.
- بستر سیال^۹: متشکل از یک استوانه عمودی حاوی ذرات است که در آن گاز از طریق توزیع کننده وارد می‌شود. گازی که از میان بستر بالا می‌آید، موجب معلق نگه داشتن ذرات جامد می‌شود. تشدید اختلاط داخل بستر به نرخ جریان گاز، ظاهر شدن و بالا رفتن حباب‌ها از میان بستر بستگی دارد.

برای درک بهتر از این رژیم‌ها به شکل ۳-۱ که انواع این رژیم‌ها را نمایش داده است مراجعه کنید.

^۱ Droplet flow

^۲ Fluid droplets

^۳ Slug flow

^۴ Stratified/free-surface flow

^۵ Particle-laden

^۶ Pneumatic transport

^۷ Dune flow

^۸ Homogeneous flow

^۹ Fluidized bed

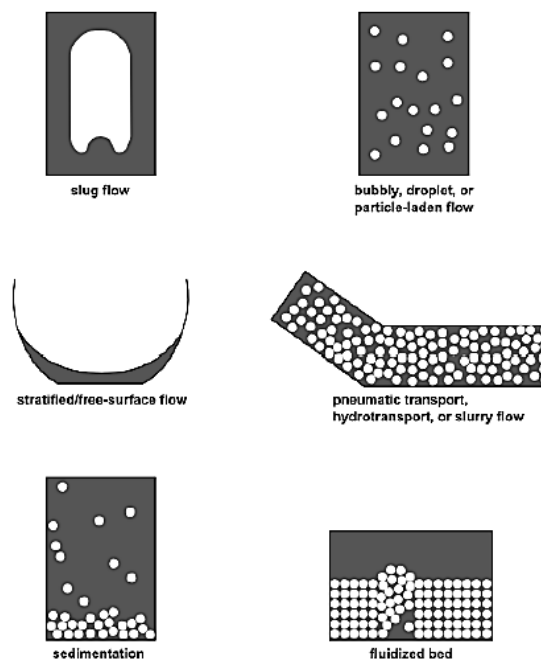
۳-۲-۳- جریان‌های مایع-جامد

رژیم‌های زیر جریان‌های مایع-جامد می‌باشند:

- جریان دوغابی^۱: جریانی شامل انتقال ذرات جامد در مایعات می‌باشد.
 - انتقال هیدرولیکی^۲: جریان ذرات جامد متراکم توزیع شده در یک مایع پیوسته می‌باشد.
- رسوب (ته‌نشینی)^۳: جریانی با شکل ابتدایی یک ستون بلند که شامل مخلوط یکنواخت و فشرده ذرات است. ذرات در پایین ستون به آرامی می‌نشینند و تشکیل یک لایه لجن می‌دهند. در بالا یک فصل مشترک شفاف ظاهر می‌شود و در وسط یک قسمت ته‌نشینی ثابت به وجود می‌آید.

۳-۲-۴- جریان‌های سه‌فازی

جریان‌های سه‌فازی ترکیبی از رژیم‌های جریان گفته شده در قسمت قبلی است.



شکل ۳-۱: رژیم‌های جریان چند فازی

^۱ Slurry flow

^۲ Hydro transport

^۳ Sedimentation

۳-۳- نمونه‌هایی از سیستم‌های چند فازی

مثال‌های خاص هر رژیم شرح داده شده در قسمت قبل در جدول ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱: مثال‌های جریان‌های سیستم‌های چند فازی

جریان حبابی	هوادهی مایعات، پمپ‌های رانش هوا، کاویتاسیون و تبخیرکننده‌ها، شناورسازی و اسکرابرها
جریان قطره	جذب کننده‌ها، اتمیزه کردن، جریان محفظه احتراق، پمپ‌های برودتی، خشک‌کن، تبخیر کننده و خنک کننده‌های گازی و اسکرابرها
جریان اسلاگ	حرکت حباب‌های بزرگ در لوله‌های انتقال یا مخازن
جریان سطح- آزاد / لایه‌ای	دستگاه‌های جدا کننده لجن، جوشش و میعان در رآکتور هسته‌ای
جریان پر ذره	جداکننده‌های سیکلون، جمع‌کننده‌های گرد و خاک و جریان‌های گاز همراه با غبار
انتقال پنوماتیکی	انتقال سیمان، دانه و پودر فلزات.
بستر سیال	راکتورهای بستر سیال، بسترهای سیال چرخشی
جریان دوغابی	انتقال دوغابی و فرایندهای معدنی
انتقال با آب	فرایندهای معدنی و سیستم‌های زیست فناوری
ته‌نشینی	فرایندهای معدنی

۳-۴- مدل‌سازی انتقال جرم در جریان‌های چند فازی

این بخش، مدل‌سازی انتقال جرم در چهارچوب مدل‌های چند فازی معمولی نرم افزار (مانند چند فازی اولری، چند فازی مخلوط و چند فازی حجم سیال) را توضیح می‌دهد. چندین نوع فرایند انتقال جرم وجود دارد که در انسیس فلونت قابل محاسبه می‌باشد. شما می‌توانید از مدل‌های قابل دسترس در نرم‌افزار (مثل مدل کاواک‌زایی) یا تعریف یک مدل انتقال جرم از طریق توابع تعریف شده توسط

کاربر استفاده کنید. نکته قابل توجه این است که مدل کاواک‌زایی در نرم افزار انسیس فلونت فقط برای مدل چند فازی مخلوط مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۴-۱- جمله‌های چشمه ناشی از انتقال جرم

فلونت فقط سهم ناشی از انتقال جرم را به معادلات ممنتوم، اجزا و انرژی اضافه می‌کند. هیچ جمله چشمه‌ای برای سایر کمیت‌های اسکالر مثل اغتشاش یا اسکالره‌ای تعریف شده توسط کاربر، اضافه نمی‌شود.

۳-۴-۲- معادله جرم

اگر $m_{p^i q^j}$ نرخ انتقال جرم بر واحد حجم از جزء i ام فاز p به جزء j ام فاز q باشد، سهم آن در جمله چشمه‌ی جرمی برای فاز p و q در یک سلول به صورت زیر است:

$$m_p = m_{p^i q^j} \quad (1-3)$$

$$m_q = m_{p^i q^j} \quad (2-3)$$

۳-۴-۳- معادله ممنتوم

برای مدل‌های حجم سیال و مخلوط، جمله چشمه‌ی ممنتوم وجود ندارد. برای مدل اولری، چشمه‌ی ممنتوم در داخل یک سلول فاز p و q برابر است با:

$$m_p \vec{u}_p = -m_{p^i q^j} \vec{u}_p \quad (3-3)$$

$$m_q \vec{u}_q = -m_{p^i q^j} \vec{u}_p \quad (4-3)$$

۳-۴-۴- معادله انرژی

برای همه مدل‌های چند فازی، چشمه‌های انرژی زیر اضافه می‌گردد. چشمه انرژی در یک سلول برای فاز p و q برابر است با:

$$H_p = -m_{p^i q^j}(h_p^i) \quad (5-3)$$

$$H_p = -m_{p^i q^j}(h_p^i + h_p^{f^i} - h_p^{f^j}) \quad (6-3)$$

که در آن h_p^i و h_p^j به ترتیب آنتالپی تشکیل جزء i فاز p و جزء j فاز q و آنتالپی جزء i فاز p (با مراجعه به آنتالپی تشکیل) است.

3-4-5- معادله اجزا

چشمه اجزا در سلول برای جزء i فاز p و برای جزء j فاز q برابر است با:

$$m_p^i = -m_{p^i q^j} \quad (7-3)$$

$$m_q^j = -m_{p^i q^j} \quad (8-3)$$

به معادلات اغتشاش و سایر کمیت‌های اسکالر، جمله‌های چشمه/چاه اضافه نمی‌شود. تغییر معادلات این کمیت‌های اسکالر ناشی از انتقال جرم است که می‌بایست با استفاده از جمله چشمه تعریف شده توسط کاربر ایجاد شود.

3-5- مدل سازی کاواک‌زایی

در این قسمت به بررسی مدل‌های کاواک‌زایی موجود در نرم افزار انسیس فلونت می‌پردازیم .

3-5-1- مدل‌های کاواک‌زایی در نرم‌افزار انسیس فلونت

- مدل سینگهال و همکاران^۱: هنگام استفاده از مدل مخلوط، مدل سینگهال و همکاران که شامل اثرات کاواک‌زایی در جریان‌های چندفازی می‌باشد، قابل استفاده است.
- مدل زوارت-گربر-بلامری^۲: به هنگام استفاده از مدل مخلوط و یا مدل چندفازی اوپلری، مدل

^۱ Singhal et al cavitation model

^۲ Zwart-Gerber-Belamri cavitation model

زوارت-گربر-بلامری قابل استفاده است.

- مدل سوئر-اسکتر: در نرم افزار انسیس فلونت این مدل به عنوان پیش فرض موجود است و به هنگام فعال سازی مدل مخلوط و یا مدل چند فازی اوپلری قابل استفاده است.

۳-۵-۲- فرضیات هنگام استفاده از مدل های کاواک زایی دوفازی استاندارد

به هنگام استفاده از مدل های کاواک زایی باید به نکات زیر توجه نمود.

- سیستم باید تحت بررسی دو فاز مایع و بخار قرار گیرد.
- فرض شود انتقال جرم بین فاز مایع و بخار صورت می گیرد.
- مدل های کاواک زایی بر اساس معادله ریلی-پلست، رشد بخار در مایع را توصیف می کنند.
- در مدل سینگهال، گازهای غیر چگالش پذیر به سیستم معرفی می شود.
- خصوصیات مواد ورودی استفاده شده در مدل های کاواک زایی تابع درجه حرارت، ثابت و یا توسط کاربر تعریف می شوند.

۳-۵-۳- محدودیت های مدل های کاواک زایی

مدل های کاواک زایی موجود در این نرم افزار دارای محدودیت هایی می باشند که در ادامه آن ها را

بیان می کنیم.

- مدل های کاواک زایی گفته شده برای جریان های همراه با حفره زایی که در یک مایع ساده رخ می دهند استفاده می شوند.
- هیچ کدام از مدل های کاواک زایی یاد شده با مدل حجم سیال قابل استفاده نیستند.
- مدل سینگهال فقط با مدل چند فازی مخلوط سازگار است و این مدل مستلزم داشتن یک فاز اولیه برای مایع و یک فاز ثانویه برای بخار است.
- مدل سینگهال با مدل چند فازی اوپلر نمی تواند استفاده شود.

- مدل کاواک‌زایی زوارت-گربر-بلامری و مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکندر اثرات گازهای تراکم‌ناپذیر را در محاسبات انجام نمی‌دهند.

۳-۵-۴- معادله انتقال بخار

با رویکرد مدل‌سازی کاواک‌زایی چند فاز، یک مدل کاواک‌زایی دو فاز اصلی شامل استفاده از معادلات انتقال حاکم بر جریان لزج استاندارد مخلوط (مدل مخلوط) یا مدل چند فاز (چند فاز اولری) و یک مدل اغتشاشی قراردادی (مدل k-ε) می‌باشد. در کاواک‌زایی انتقال جرم مایع-بخار (تبخیر و میعان) به وسیله معادله انتقال بخار کنترل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad (9-3)$$

اندیس v مشخصه فاز بخار، a کسر حجمی بخار، ρ_v لزجت بخار، \vec{V}_v سرعت فاز بخار و R_e و R_c بترتیب جمله‌های چشمه انتقال جرم مربوط به رشد و فروپاشی حباب‌های بخار می‌باشند، جمله‌های R_e , R_c در واقع انتقال جرم بین فازهای مایع و بخار در کاواک‌زایی هستند.

۳-۵-۵- مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکندر

معادله کسر حجمی در این مدل به صورت زیر قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{D\alpha}{Dt} \quad (10-3)$$

که عبارت منبع جرم خالص از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \frac{d\alpha}{dt} \quad (11-3)$$

بر خلاف دو مدل کاواک‌زایی دیگر در فلوئنت، مدل سوئر-اسکندر از جمله زیر برای ارتباط بین کسر

حجمی بخار به تعداد حباب‌ها در حجم مایع استفاده می‌کند:

$$\alpha = \frac{\frac{4}{3} n_b \pi R_B^3}{1 + \frac{4}{3} n_b \pi R_B^3} \quad (12-3)$$

R نرخ انتقال جرم و R_B شعاع حباب‌ها از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 \rho_l}} \quad (13-3)$$

$$R_B = \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14-3)$$

نرخ انتقال جرم در مدل سوئر-اسکندر با $\alpha_v(1 - \alpha_v)$ متناسب است.

علاوه بر این تابع $f(\alpha_v, \rho_v, \rho_l) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha(1 - \alpha)$ دارای یک خاصیت جذاب می‌باشد، که وقتی $\alpha=0$ و $\alpha=1$ نزدیک صفر و در بین این دو عبارت به حالت ماکزیمم می‌رسد. همچنین در این مدل، تعداد حباب‌های کروی در حجم مایع تنها عبارتی است که باید محاسبه شود. اگر شما در نظر بگیرید که هیچ حبابی ایجاد و یا از بین نمی‌رود، پس چگالی تعداد حباب ثابت است. شرایط اولیه برای محل هسته کسر حجمی و شعاع‌های تعادل حباب، برای تعیین عدد چگالی حباب^۱ (n) از معادله (۱۲-۳) و سپس انتقال فاز با معادله (۱۳-۳) کافی است. نرخ تغییرات جرم در این مدل به صورت زیر بدست می‌آید.

اگر $(P \leq P_v)$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 \rho_l}} \quad (15-3)$$

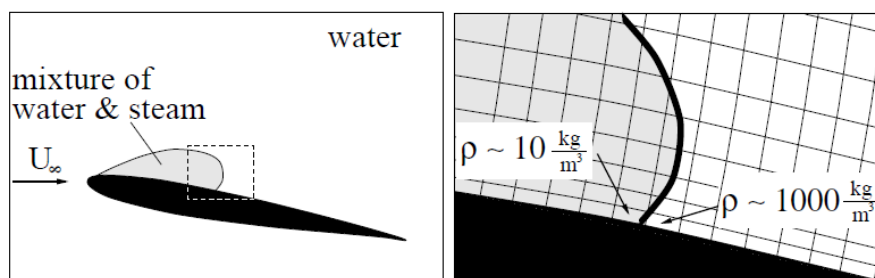
اگر $(P \geq P_v)$

^۱ Bubble number density

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3 \rho_l}} \quad (16-3)$$

۳-۵-۶- نحوه تشخیص منطقه حبابی در مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکندر

با ایجاد جریان کاواک‌زایی دو فاز ناپایدار از جریان را خواهیم داشت. با ایجاد پدیده کاواک‌زایی، داخل و یا خارج از منطقه کاواک، چگالی مخلوط از مقدار چگالی مایع خالص به مقدار بسیار کوچک‌تر تغییر پیدا می‌کند و بالعکس. این تغییر چگالی در داخل و بیرون ناحیه کاواک را در شکل ۲-۳ مشاهده می‌نماییم. برای غلبه بر مشکلات ناشی از توزیع غیر پیوسته چگالی از روش حجم سیال در این مدل استفاده شده است. که در ادامه بحث روش حجم سیال و توسعه این روش برای جریان‌های همراه با کاواک‌زایی را معرفی می‌کنیم [۳۰].



شکل ۲-۳: تغییر چگالی ناشی از ایجاد ناحیه کاواک بر روی یک هیدروفویل [۳۰]

الف) روش حجم سیال

به طور کلی روش حجم سیال، حرکت یک حجم مایع خالص را از طریق محاسبات دامنه، صرف‌نظر از اینکه آیا حجم شامل مایع خالص یا مخلوطی از حباب‌های بخار و مایع است، دنبال می‌کند. در محدوده روش حجم سیال جریان دوفازی به عنوان مخلوط همگن تلقی می‌شود و از این رو فقط یک مجموعه معادلات برای توصیف جریان استفاده می‌شود. روش حجم سیال علاوه بر معادله پیوستگی و ممنوم که با الگوریتم سیمپل^۱ ترکیب می‌شوند، به جواب معادله انتقال برای بخش بخار سلول α نیاز

^۱ SIMPLE algorithm

دارد که به صورت نسبت حجم بخار به حجم سلول تعریف می‌شود.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha v)}{\partial y} = 0 \quad (17-3)$$

معادلات حرکت با روابط سازنده برای چگالی و ولزجت دینامیکی تشکیل شده است.

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (18-3)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (19-3)$$

معادلات به دست آمده عمومی هستند و حرکت در مایع با سطح مشترک بین آن‌ها را توصیف

می‌کند. معادله پیوستگی به فرم غیر پایستار^۱ به صورت معادله (۲۰-۳) بیان می‌شود.

$$\nabla \cdot u = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (20-3)$$

استفاده از جریان حجمی به جای جریان جرم (شکل پایستار) برای مزیت عددی که جریان‌های

حجمی در سطح مشترک پیوسته هستند محاسبه شده است و به این ترتیب جواب معادله اصلاح فشار

را ساده می‌کند. برای کاربردهای روش حجم سیال استاندارد، به عنوان مثال هر دو مایعات غیرمتراکم

و بدون انتقال فاز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به معادله (۲۰-۳)، اگر مقدار این معادله به سمت

صفر میل نماید بدین معنی است که میدان جریان بدون واگرایی است.

ب) توسعه روش حجم سیال برای جریان‌های همراه با کاواک‌زایی

در مقایسه با کاربردهای روش حجم سیال استاندارد، کاواک‌زایی باعث ایجاد جریان دوفازی

پراکنده شامل فاز ناپایدار می‌شود. رشد و فروپاشی حباب‌ها علاوه بر انتقال همرفت، باعث تغییر کسر

حجمی در یک سلول محاسباتی می‌شود. روش حجم سیال استاندارد برای انتقال همرفت محاسبه

^۱ Non-conservative form

می شود و نه برای انتقال فاز. با توجه به پدیده کاواک زایی، کسر حجمی به صورت حجم بخار به حجم سلول تعریف می شود که فرمول آن برابر با معادله (۲۱-۳) می باشد.

$$\alpha = \frac{V_v}{V_{cell}} = \frac{N_{bubbles} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{V_v + V_l} = \frac{n_0 V_l \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{n_0 V_l \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 + V_l} = \frac{n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{1 + n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3} \quad (21-3)$$

در معادله (۲۱-۳)، V_{cell} حجم سلول محاسباتی، V_v و V_l به ترتیب حجمی که توسط بخار و مایع اشغال شده است، R و $N_{bubbles}$ شعاع حباب و تعداد حبابها در سلول محاسباتی می باشند. به عنوان یک نتیجه از روند رشد حباب، میدان سرعت آزادانه واگرا نمی شود (معادله (۲۲-۳)) و معادله بخش بخار (معادله (۲۳-۳)) توسط یک منبع تولید بخار توسعه داده شده است.

$$\nabla \cdot u = - \frac{\rho_v - \rho_l}{\alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l} \frac{d\alpha}{dt} \quad (22-3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha v)}{\partial y} = \frac{n_0}{1 + n_0 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3} \frac{d\alpha}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (23-3)$$

تولید بخار به وسیله عبارت منبع که در سمت راست معادله (۲۳-۳) قرار دارد محاسبه می شود. تغییر بخش بخار سلول به تعداد حبابها بر حجم سلول ضرب در تغییر حجم یک حباب و انتقال همرفت وابسته است. پارامتر n_0 به صورت غلظت حباب بر واحد حجم مایع خالص تعریف می شود. برای کامل شدن روش عددی استخراج شده یک رابطه برای مدل سازی رشد حباب مورد نیاز است. با فرض اثر متقابل حباب-حباب و همبستگی حباب می توان حباب را کروی فرض کرد و رابطه رایلی-پلست به همراه معادله انرژی برای مدل سازی رشد و فروپاشی حباب مناسب خواهد بود.

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{P(R) - P_\infty}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l R} - 4 \frac{\mu}{\rho_l R} \frac{dR}{dt} \quad (24-3)$$

در معادله (۲۴-۳)، σ و ρ_l به ترتیب کشش سطحی و چگالی مایع می باشند. توجه داشته باشید که معادله رایلی-پلست به عنوان یک معادله دیفرانسیل عددی معمولی تلقی می شود، حتی هنگام

برخورد با مشکلات جریان دوبعدی و سه‌بعدی می‌تواند با روش رانگ کوتاه حل شود. اگر فشار سیستم به اندازه کافی کاهش یابد و اختلاف فشار بزرگ شود، معادله رایلی (معادله ۳-۲۵)) می‌تواند به عنوان یک تعریف کافی برای رشد کنترل شده حباب در نظر گرفته شود.

$$R = \sqrt{\frac{2P(R) - P_{\infty}}{3\rho_l}} \quad (۳-۲۵)$$

در رابطه‌های بالا $P(R)$ فشار داخل مایع در مرز حفره و P_{∞} فشار مایع در فاصله دورتری از حباب است. اگر در شبیه‌سازی پدیده کاواک‌زایی در مایعی غیر از آب سرد، اگر اثرات حرارتی مهم باشند مانند سیال‌های آلی و آب گرم، این مدل با یک معادله ساده برای آنتالپی مخلوط گسترش یافته است تا تغییر دمای مخلوط ناشی از پدیده کاواک‌زایی را در نظر بگیرد.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{dP}{dt} \quad (۳-۲۶)$$

$$h = \frac{\alpha \rho_v h_v + (1 - \alpha) \rho_l h_l}{\rho} \quad (۳-۲۷)$$

که در معادله (۳-۲۷)، $h_l = C_{p,l}T$ و $h_v = C_{p,v}T + L$ است.

۳-۶- فرضیه مدل مخلوط

مدل مخلوط، یک مدل چند فاز ساده شده است که می‌تواند برای مدل کردن جریان‌های چند فاز که فازها با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند مورد استفاده قرار گیرد. در این مدل فرض می‌شود که فازها دارای تعادل موضعی در مقیاس‌های طولی فضایی کوتاه^۱ هستند. این عامل می‌تواند تاثیر فازها بر همدیگر را در نظر بگیرد. همچنین برای مدل کردن جریان‌های چند فاز همگن که شدیداً روی هم تاثیر می‌گذارند و سرعت فازها یکسان است، نیز استفاده می‌شود. به علاوه از مدل مخلوط برای محاسبه ویسکوزیته غیر نیوتنی می‌توان استفاده کرد. مدل مخلوط می‌تواند n فاز (سیال یا دانه‌ای) را با حل

^۱ Short spatial length scales

معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای مخلوط، معادلات کسر حجمی برای فازهای ثانویه، روابط جبری برای سرعت‌های نسبی مدل کند. کاربردهای نمونه این مدل شامل ته‌نشینی، جداکننده‌های سیکلونی، جریان‌های پر ذره با بارگیری پایین و جریان‌های حبابی که کسر حجمی پایین دارند می‌باشد.

مدل مخلوط، جانشین خوبی برای مدل چند فازي اوپلری در چندین حالت است. مواقعی که یک توزیع گسترده از فازهای دانه‌ای وجود دارد یا قوانین بین فازي نامعلوم یا اعتبار آن‌ها زیر سوال می‌باشد، مدل چند فازي کامل، عملی نمی‌باشد. یک مدل ساده‌تر مشابه مدل مخلوط می‌تواند به خوبی مدل چند فازي کامل عمل کند در حالیکه تعداد متغیرهای کمتری نسبت به مدل چند فازي کامل حل می‌کند. مدل مخلوط به شما اجازه انتخاب فازهای دانه‌ای را می‌دهد و تمامی خواص دانه‌ای را محاسبه می‌کند. بنابراین مدل چند فازي مخلوط برای جریان‌های مایع-جامد کاربرد دارد.

۳-۶-۱- محدودیت‌های مدل مخلوط

محدودیت‌های موجود برای مدل مخلوط در نرم‌افزار به شرح زیر است.

- باید از حل‌گرهای بر مبنای فشار^۱ استفاده شود. مدل مخلوط برای هیچ‌کدام از حل‌گرهای بر مبنای چگالی^۲ در دسترس نمی‌باشد.
- فقط یکی از فازها می‌تواند به عنوان گاز ایده‌آل تراکم‌پذیر تعریف شود. برای استفاده از مایعات تراکم‌پذیر با استفاده از توابع تعریف شده توسط کاربر^۳ محدودیتی وجود ندارد.
- جریان تناوبی مشخص شده با شدت جریان جرمی را نمی‌توان با مدل مخلوط شبیه‌سازی کرد (کاربر اجازه مشخص کردن یک افت فشار دارد).
- انجماد و ذوب نمی‌توانند با استفاده از مدل مخلوط شبیه‌سازی شوند.
- در صورتی که مدل کاواک‌زایی فعال شده باشد، مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

^۱ Pressure based

^۲ Density based

^۳ User define function

همزمان با مدل مخلوط نمی‌تواند استفاده شود.

- مدل مخلوط برای جریان‌های غیر لزج نمی‌تواند به کار برده شود.

مدل مخلوط همانند مدل حجم سیال از دیدگاه تک سیالی استفاده می‌کند و در دو مورد با آن

متمایز است:

- مدل مخلوط اجازه نفوذ فازها در داخل همدیگر را می‌دهد. بنابراین کسرهای حجمی α_q و α_p با توجه به حجم اشغال شده توسط فازهای q و p برای حجم کنترل می‌تواند هر مقداری بین صفر و یک باشد.
- مدل مخلوط اجازه حرکت فازها با سرعت‌های مختلف با استفاده از مفهوم سرعت لغزش را می‌دهد (توجه داشته باشید که فازها می‌توانند با سرعت یکسان فرض شوند و بنابراین مدل مخلوط به مدل چند فازی یکنواخت کاهش پیدا می‌کند).

مدل مخلوط معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی را برای مخلوط و معادله کسر حجمی را برای فازهای ثانویه و همچنین روابط جبری برای سرعت‌های نسبی (اگر فازها با سرعت‌های مختلف حرکت کنند) را حل می‌کند.

۳-۶-۲ - معادله پیوستگی

معادله پیوستگی برای مخلوط عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (28-3)$$

که در آن \vec{v}_m سرعت جرمی متوسط^۱ است. که ρ_m چگالی مخلوط و α_k کسر حجمی فاز k است و مقدار چگالی مخلوط از رابطه (۳-۳۰) بدست می‌آید.

^۱ Mass-averaged velocity

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (29-3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (30-3)$$

۳-۷- معادله ممنتوم

معادله ممنتوم مخلوط از مجموع معادلات ممنتوم منفرد همه‌ی فازها به دست می‌آید و می‌تواند

به صورت زیر بیان شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (31-3)$$

$$+ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)$$

که در آن n تعداد فازها، \vec{F} نیروی حجمی و μ_m لزجت مخلوط است. مقدار لزجت مخلوط از معادله

(۳۲-۳) بدست می‌آید. $\vec{v}_{dr,k}$ سرعت راندگی^۱ فاز ثانویه k نسبت به مخلوط است و از رابطه (۳۳-۳)

محاسبه می‌شود.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (32-3)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (33-3)$$

۳-۷-۱- معادله‌ی انرژی

معادله‌ی انرژی مخلوط شکل زیر را به خود می‌گیرد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + P)) = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla T) + S_E \quad (34-3)$$

^۱ Drift velocity

که K_{eff} ضریب هدایت موثر $(\sum \alpha_k (K_k + K_t))$ ضریب هدایت حرارتی اغتشاش، تعریف شده مطابق مدل اغتشاش مورد استفاده است. جمله اول معادله سمت راست معادله (۳-۳۴) بیانگر انتقال ناشی از هدایت است. S_E شامل هر نوع دیگر منابع حرارتی حجمی است. در معادله (۳-۳۴)، E_k به صورت زیر می‌باشد.

$$E_k = h_k - \frac{P}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (۳-۳۵)$$

برای فاز تراکم‌پذیر، و برای فاز تراکم‌ناپذیر $h_k = E_k$ که h_k آنتالپی مشهود^۱ فاز k است.

۳-۷-۲- سرعت نسبی (لغزش) و سرعت راندگی (رانش)

سرعت نسبی (که به سرعت لغزش هم شناخته شده است) به عنوان فاز ثانویه (p) نسبت به سرعت فاز اولیه (q) تعریف می‌شود.

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (۳-۳۶)$$

کسر جرمی هر فاز (k) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (۳-۳۷)$$

سرعت راندگی و سرعت نسبی (\vec{v}_{qp}) با رابطه‌ی زیر به هم مربوط می‌شوند.

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n C_k \vec{v}_{qk} \quad (۳-۳۸)$$

فرض اصلی مدل مخلوط در فلوئنت استفاده از یک رابطه‌ی جبری برای سرعت نسبی، بر اساس تعادل میان فازها در یک مقیاس طولی فضایی کوتاه می‌باشد. رابطه‌ی سرعت نسبی به شکل زیر تعریف

^۱ Sensible enthalpy

می‌شود که در آن زمان آسایش ذره^۱ است:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{\alpha} \quad (39-3)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (40-3)$$

d قطر ذرات (یا قطرات یا حباب‌ها) فاز پراکنده P ، $\vec{\alpha}$ شتاب ذرات فاز ثانویه است. تابع درآگ f_{drag} به صورت پیش فرض از رابطه‌ی نیومن-اسچیلر گرفته شده است. شتاب $\vec{\alpha}$ از رابطه (۳-۴۲) محاسبه می‌گردد.

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (41-3)$$

$$\vec{\alpha} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (42-3)$$

ساده‌ترین فرمولاسیون لغزش رابطه‌ی جبری است که مدل شار راندگی^۲ نیز نامیده می‌شود که در آن شتاب ذره با نیروی جاذبه یا نیروی گریز از مرکز^۳ و زمان آسایش ذره جهت در نظر گرفتن وجود ذرات دیگر اصلاح شده است. در جریان‌های مغشوش، سرعت نسبی باید حاوی جمله نفوذ ناشی از پراکندگی ظاهر شده در معادله ممنوم برای فاز پراکنده باشد. نرم‌افزار انسیس فلوننت این پراکندگی را به صورت زیر به سرعت نسبی اضافه می‌کند.

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m) d_p^2}{18\mu_q f_{drag}} \vec{\alpha} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left(\frac{\nabla_{ap}}{a_p} - \frac{\nabla_{aq}}{a_q} \right) \quad (43-3)$$

که σ_t عدد پرانتل / اشمیت که برابر ۰/۷۵ و (η_t) قابلیت پخش آشفستگی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

^۱ Particle relaxation time

^۲ Drift flux model

^۳ Centrifugal force

$$\eta_t = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \left[\frac{\gamma_\gamma}{1 + \gamma_\gamma} \right] (1 + C_\beta \zeta_\gamma^2)^{-1/2} \quad (44-3)$$

$$\zeta_\gamma = \frac{|\vec{v}_{pq}|}{\sqrt{2/3k}} \quad (45-3)$$

که در رابطه (44-3)، $C_\beta = 1.8 - 1.35 \cos^2 \theta$ ، $\cos \theta = \frac{\vec{v}_{pq} \cdot \vec{v}_p}{|\vec{v}_{pq}| |\vec{v}_p|}$ می‌باشند. γ_γ نسبت مقیاس زمانی آشفستگی فعال به واسطه اثر عبور ذرات و زمان آرام شدن ذرات است. برای محاسبه مدل مخلوط چند فاز با سرعت لغزشی می‌توان مستقیماً فرمولی برای تابع پسا تعیین کرد و یکی از گزینه‌های قابل دسترس زیر را انتخاب نمود.

- شیلر-نیومن، مورسی الکساندر، متقارن، گریس و همکاران، تومی‌یاما و همکاران، قوانین عمومی پسا، عدد ثابت و تعریف شده توسط کاربر

و برای محاسبه مدل مخلوط چند فاز با سرعت لغزشی، می‌توان یکی از گزینه‌های قابل دسترس زیر را انتخاب نمود:

- دوبعدی، متقارن محوری و متقارن محوری چرخشی

۳-۷-۳ - معادله کسر حجمی برای فازهای ثانویه

معادله پیوستگی برای فاز ثانویه p و معادله کسر حجمی برای فاز p ثانویه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_p \rho_p) + \nabla \cdot (a_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (a_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (46-3)$$

۳-۸-۸ - مقدمه‌ای کوتاه بر آشفستگی

در جریان آرام، لایه‌های سیال با سرعت‌های متفاوت (سرعت صفر روی دیوار تا سرعت جریان خارجی) در همان راستای حرکت جریان حرکت می‌کنند. اگر سرعت جریان به گونه‌ای تغییر یابد که

عدد رینولدز از عدد رینولدز بحرانی بیشتر شود، رژیم جریان عوض شده و جریان سیال تحت تاثیر حرکات نامنظم و شدید قرار می‌گیرد. جریان مورد نظر که از مشخصه‌های آن بی‌نظمی شدید، تصادفی بودن و حرکات نوسانی می‌باشد، جریان مغشوش، آشفته یا توربولانس نامیده می‌شود. شرایطی همانند اغتشاشات خود جریان اصلی، زبری سطح و اغتشاشات خارجی باعث عبور جریان از رژیم آرام به رژیم مغشوش می‌شوند. برای برخی از جریان‌ها مهم و پرکاربرد عدد رینولدز بحرانی که رژیم جریان از آرام به مغشوش یا درهم تغییر می‌کند آورده شده است.

یکی از ویژگی‌های مهم جریان‌های اغتشاشی، وجود گردابه‌هایی با ابعاد مختلف مکانی و زمانی است. بزرگترین گردابه‌ها از لحاظ اندازه با شاخص اندازه جریان اصلی برابری می‌کند و کوچکترین آن‌ها، انرژی جنبشی اغتشاشی را تلف می‌کنند. برای اینکه بتوان تمام طیف گردابه‌های موجود در جریان مغشوش را حل کرد، باید از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم، که در آن هیچ مدل‌سازی انجام نمی‌شود، استفاده نمود. البته با منابع کامپیوتری کنونی، استفاده از این روش برای مسائل کاربردی مهندسی، که شامل جریان‌های با اعداد رینولدز بالا می‌باشند، امکان‌پذیر نمی‌باشد. هزینه محاسباتی این روش متناسب با Re^3 (عدد رینولدز جریان مغشوش) می‌باشد. بنابراین در اعداد رینولدز بالا هزینه محاسباتی این روش بسیار زیاد می‌شود. البته گردابه‌های بزرگ مقیاس تاثیر بیشتری بر حرکت جریان دارند.

جدول ۲-۳: رینولدز بحرانی در جریان داخلی و خارجی

$Re_x \geq 5 * 10^5$	جریان خارجی روی یک صفحه تخت
$Re_D \geq 2 * 10^4$	جریان خارجی از روی یک مانع
$Re_{Dh} \geq 2.3 * 10^3$	جریان داخلی

دیدگاه رایج برای پیش‌بینی رفتار جریان‌های اغتشاشی، حل معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس برای مقادیر متوسط زمانی می‌باشد. در اغلی کاربردها، نتایج حل پایدار ترجیح داده می‌شود.

همچنین در اغلب مسائل مهندسی، یک مدل RANS مناسب، در کنار یک شبکه محاسباتی با کیفیت خوب، اکثر مشخصات جریان را با کیفیت مورد نظر حل خواهد کرد.







در شکل ۳-۳ جریان حول یک استوانه در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است که نمایانگر تغییر رژیم جریان از آرام به مغشوش است. برای حل جریان مغشوش از مدل‌های اغتشاشی مختلفی استفاده می‌شود. تاکنون مدل‌های اغتشاشی زیادی برای حل جریان درهم بر پایه معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده توسط رینولدز ارائه شده است اما یک مدل جامع و کامل برای حل همه‌ی جریان‌های مغشوش ارائه نشده است. مدل‌های اغتشاشی موجود در نرم‌افزار فلوئنت به شرح زیر می‌باشند.

- مدل‌های صفر معادله‌ای
- مدل‌های تک معادله‌ای
- مدل‌های دو معادله‌ای
- مدل‌های سه معادله‌ای
- مدل‌های چهار معادله‌ای
- مدل‌های بر پایه تنش رینولدز
- مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

برای انتخاب مدل اغتشاشی از بین مدل‌های موجود دو نکته مهم وجود دارد که با توجه به این دو

نکته می‌توان مدل مناسب را انتخاب نمود.

- دقت حل مدل اغتشاشی مورد استفاده
- هزینه محاسباتی مقذور برای کاربر

$Re < 5$		Creeping flow (no separation)
$5-15 < Re < 40$		A pair of stable vortices in the wake
$40 < Re < 150$		Laminar vortex street
$150 < Re < 3 \times 10^5$		Laminar boundary layer up to the separation point, turbulent wake
$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^6$		Boundary layer transition to turbulent
$Re > 3.5 \times 10^6$		Turbulent vortex street, but the separation is narrower than the laminar case

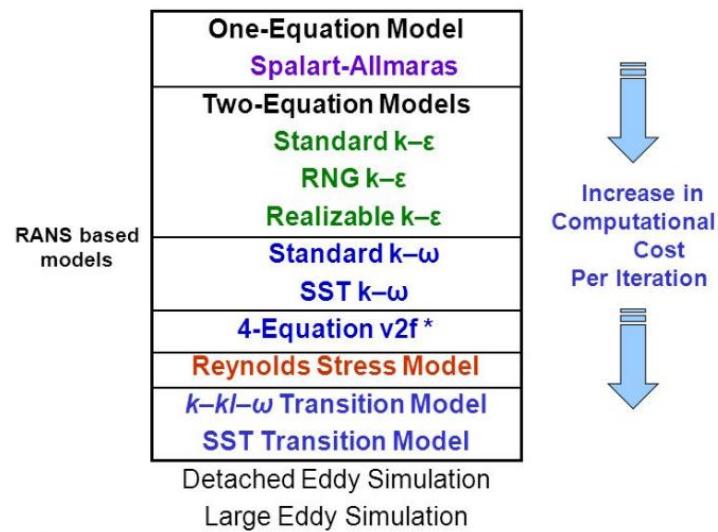
شکل ۳-۳: جریان حول یک استوانه در اعداد رینولدز مختلف

با توجه به شکل ۳-۴ مدل‌های دو معادله‌ای برای حل این مسئله در نظر گرفته شده است چرا که در این مدل‌ها توازن خوبی بین هزینه محاسباتی و دقت نتایج حاصله برقرار است.

۳-۹- مدل‌های اغتشاشی $k - \omega$

یکی از مشکلات عمده در مدل‌های اغتشاشی مورد استفاده در جریان آشفته، پیش‌بینی دقیق و مطمئن جدایش جریان (جریان داخلی و خارجی) از روی سطوح صاف می‌باشد. این موضوع در مسائلی مانند آیرودینامیک، هواپیماها و توربوماشین‌ها اهمیت دارد چرا که در مسئله‌ای مانند جریان عبوری از روی بال، پدیده واماندگی^۱ را شاهد خواهیم بود. همچنین میزان جدایش جریان برای محاسبه افت فشار در دیفیوزرها و مشخصه عملکردی توربوماشین‌ها حائز اهمیت است. مدل‌های اغتشاشی، همانند خانواده مدل اغتشاشی $k - \varepsilon$ در تعیین نقطه شروع جدایش و مقدار جدایش با وجود گرادیان فشار نامناسب دچار خطا هستند (شروع جدایش جریان را خیلی دیر پیش‌بینی کرده و مقدار آنرا کمتر گزارش می‌کنند).

^۱ Stall



شکل ۳-۴: مقایسه دقت و هزینه محاسباتی مدل‌های اغتشاشی موجود در نرم افزار انسیس فلونت

مدل انتقال تنش برشی $k-\omega$ SST جهت پیش‌بینی دقیق شروع و مقدار جدایش در حضور گرادیان فشار نامطلوب، با اعمال اثرات انتقال در معادله لزجت گردابه‌ای طراحی شده است. مدل‌های $k-\omega$ به صورت ذاتی مدل‌هایی با اعداد رینولدز پایین هستند و برای محدوده وسیعی از جریان‌های لایه مرزی مانند گرادیان فشار، دقیق و پایدار می‌باشند.

۳-۱۰- مدل اغتشاشی انتقال تنش برشی ($k-\omega$ SST)

این مدل اغتشاشی با استفاده از مدل $k-\omega$ Standard برای شبیه‌سازی در نزدیکی دیوار و استفاده از مدل $k-\epsilon$ Standard برای شبیه‌سازی جریان آزاد دور از دیواره و تغییر وضعیت پایدار و دقیق بین این دو مدل به وجود آمده است. در مدل انتقال تنش برشی از مدل $k-\epsilon$ که معادلات تلفات آن بر حسب ω بازنویسی شده است استفاده می‌شود، تا عملکرد مدل SST در جریان‌های برشی آزاد همانند مدل $k-\epsilon$ Standard باشد. این مدل بر اساس انتقال تنش برشی اغتشاشی (تنش برشی ایجاد شده به واسطه نوسانات سرعت) نوشته شده است. برای بهره‌گیری از مزایای این مدل در نزدیکی دیوار جامد، حداقل ۱۰ سلول محاسباتی در لایه مرزی باید اتخاذ شود. تفاوت مدل SST و BSL با مدل Standard در موارد زیر است:

- تغییر تدریجی از مدل Standard k- ω در لایه مرزی منطقه داخلی به یک اعداد رینولدز بالا از مدل k- ϵ در لایه مرزی بخش بیرونی (BSL, SST).

- اصلاح معادله لزجت گردابه‌ای، برای در نظر گرفتن اثرات اساسی انتقال تنش برشی فقط برای مدل SST

موارد فوق باعث کارکرد دقیق‌تر و قابلیت اطمینان بیشتر این مدل نسبت به دو مدل دیگر خانواده مدل اغتشاشی k-w، خصوصاً در جریان‌های با گرادیان معکوس، ایرفویل‌ها و امواج شوک مافوق صوت می‌گردد.

۳-۱۰-۱- معادلات انتقال برای مدل SST k- ω

معادلات انتقال مدل SST k- ω بسیار شبیه به مدل Standard k- ω است و به ترتیب برای k و ω به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (۴۷-۳)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (۴۸-۳)$$

در معادلات بالا G_k معرف انرژی جنبشی اغتشاشی، G_ω جمله تولید ω به دلیل اغتشاشات، Γ_ω و Γ_k به ترتیب پخش موثر برای ω و k هستند. Y_k و Y_ω نمایانگر اتلاف ω و k به دلیل اغتشاشات می‌باشد. D_ω جمله انتشار متقابل (پخش مشترک) همچنین S_k و S_ω توابع منبع که توسط کاربر می‌توانند وارد شوند، هستند.

۳-۱۰-۲- مدل سازی پخش موثر

پخش موثر برای این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (49-3)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (50-3)$$

که σ_k و σ_ω اعداد پراختی به ترتیب برای k و ω هستند که از روابط زیر قابل محاسبه‌اند.

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (51-3)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (52-3)$$

که F_1 تابع تغییر وضعیت می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$F_1 = \tanh(\phi_1^4) \quad (53-3)$$

$$\phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\partial_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (54-3)$$

که در رابطه (54-3) y فاصله از نزدیک‌ترین دیوار بوده و D_ω^+ بخش مثبت از عبارت پخش ضریبی

است و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\partial_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (55-3)$$

۳-۱۰-۳- مدل سازی تولید اغتشاشات

یکی از وظایف مدل آشفستگی محاسبه و حل میزان اغتشاشات در جریان است که در این مدل

مدل سازی اغتشاشات به صورت زیر انجام می‌شود.

الف) تولید k

جمله G_k معرف تولید انرژی جنبشی اغتشاشی است. از یک معادله دقیق برای انتقال k این جمله

به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (56-3)$$

این رابطه با استفاده از رابطه بوزینسک نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (57-3)$$

که S ضریبی از متوسط نرخ تانسور کرنش است و به صورت زیر تعریف می‌شود. مقدار S_{ij} از رابطه (59-3) قابل محاسبه خواهد بود:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (58-3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (59-3)$$

(ب) تولید ω

جمله تولید در معادله انتقال ω نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_\omega = \frac{aa^*}{v_t} G_k \quad (60-3)$$

۳-۱۰-۴ - مدل سازی اتلاف اغتشاشات

یکی از وظایف مدل آشفتگی محاسبه و حل میزان تلفات ناشی از اغتشاشات در جریان است که در این مدل مدل سازی اغتشاشات به صورت زیر انجام می‌شود.

الف) نرخ اتلاف k

نرخ اتلاف انرژی جنبشی اغتشاشی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (61-3)$$

ب) نرخ اتلاف ω

نرخ اتلاف ω نیز از رابطه (۶۲-۳) زیر بدست می‌آید.

$$Y_{\omega} = \rho\beta\omega^2 \quad (۶۲-۳)$$

۳-۱۰-۵- اصلاح انتشار متقابل

مدل $SST k - \omega$ بر اساس دو مدل $Standard k - \omega / Standard k - \epsilon$ می‌باشد. برای آمیختگی این دو مدل با همدیگر، مدل $Standard k - \epsilon$ به معالاتی بر اساس k و ω تغییر شکل می‌دهد که این عامل باعث پیدایش جمله‌ی با نام انتشار متقابل می‌شود که به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1)\rho \frac{1}{\omega\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۶۳-۳)$$

۳-۱۰-۶- مدل سازی لزجت گردابه‌ای

این مدل برای غلبه بر نقاط ضعف مدل‌های دیگر این مدل اغتشاشی، یعنی دقت کم در تخمین شروع جدایش و مقدار آن از روی سطوح هموار، توسعه داده شده است. علت این نقطه ضعف، لحاظ نکردن انتقال تنش برشی اغتشاشی در دو مدل $Standard k - \omega / Standard k - \epsilon$ است، که که لزجت گردابه‌ای را بیش از حد محاسبه می‌کنند. بنابراین مدل $SST k - \omega$ بر دو مدل یاد شده ارجحیت دارد. جهت اعمال انتقال تنش برشی اغتشاشی در مدل $SST k - \omega$ ، مقدار لزجت گردابه‌ای با اعمال یک محدود کننده، توسط رابطه زیر که در آن S اندازه نرخ کرنش می‌باشد، محاسبه می‌شود.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1\omega}\right]} \quad (۶۴-۳)$$

که در رابطه (۶۴-۳) و برای رینولدزهای بالا در مدل $k - \omega$ ، $\alpha^* = 1$ و F_2 از روابط زیر قابل محاسبه

هستند.

$$F_2 = \tanh(\phi_2^2) \quad (65-3)$$

$$\phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500y}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (66-3)$$

۳-۱۰-۷ - ثابت‌های مدل SST k - ω

در جدول ۳-۳ مقادیر ثابت‌های مدل آشفتگی SST k - ω را مشاهده می‌نمائیم

جدول ۳-۳: ثابت‌های مدل SST k-ω

$\sigma_{k,1} = 1.176$	$\sigma_{\omega,1} = 2.0$	$\sigma_{k,2} = 1.0$	$a_1 = 0.31$	$\beta_{i,1} = 0.075$
$\alpha = 5/9$	$a_{\infty}^* = 1.0$	$a_{\infty} = 0.52$	$a_0 = 1/9$	$\beta_{\infty}^* = 0.09$
$\beta^* = 0.09$	$\beta = 0.075$	$\sigma_k = 2.0$	$\sigma_{\omega} = 2.0$	$\sigma_{\omega,2} = 1.168$

۳-۱۰-۸ - میرایی اغتشاشات

در جریان‌های دوفازی با سطح آزاد گرادیان زیاد سرعت بر روی سطح مشترک دو فاز، باعث ایجاد اغتشاشات در هر دو فاز می‌گردد. برای مدل‌سازی درست جریان و همچنین سطح مشترک، باید اغتشاشات در سطح مشترک میرا شود. نکته قابل توجه این است که معادله میرایی اغتشاشات فقط در مدل k - ω وجود دارد. برای انجام این کار معادله زیر به عنوان یک چشمه به معادله انتقال ω اضافه می‌شود.

$$S_i = A_i \Delta n \beta \rho_i \left(\frac{6B\mu_i}{\beta \rho_i \Delta n^2} \right)^2 \quad (67-3)$$

که در رابطه (۶۷-۳) A_i چگالی سطح مشترک برای فاز i ، Δn ارتفاع سلول عمود بر سطح مشترک، β ضریب بسته‌شدن مدل k-ω از جمله اتلاف (ضریب اتلاف)، B پارامتر میرایی، μ_i لزجت فاز i ، ρ_i چگالی فاز i می‌باشد. چگالی سطح مشترک برای فاز i از رابطه (۶۸-۳) بدست می‌آید.

$$A_i = 2.0a_i |\nabla a_i| \quad (68-3)$$

که a_i کسر حجمی فاز i ، $|\nabla a_i|$ اندازه تغییرات کسر حجمی است. اندازه شبکه Δn با استفاده اطلاعات شبکه محاسباتی محاسبه می شود و مقدار پارامتر میرایی نیز از حالت اولیه خود که برابر ۱۰ است قابلیت تغییر دارد. گزینه مربوط به میرا کردن اغتشاشات، تنها در صورت استفاده از مدل های مخلوط، روش حجم سیال و مدل چند فازی اولری با سیال های مخلوط نشدنی فعال می گردد.

۳-۱۰-۹- شرایط مرزی در مدل های $k-\omega$

شرایط مرزی دیواره برای معادله k در مدل های $k-\omega$ ، مشابه مدل های $k-\epsilon$ زمانی که از روابط بهبود رفتار در نزدیکی دیواره استفاده می شود، می باشد. یعنی تمام شرایط مرزی در سلول هایی که متناسب با دیدگاه تابع دیواره تولید شده اند، بر اساس دیدگاه بهبود رفتار در نزدیکی دیواره محاسبه شده و برای سلول های ریز، شرط مرزی عدد رینولدز پایین اعمال می گردد. مقدار ω بر روی دیوار (ω_w) نیز توسط رابطه (۶۹-۳) محاسبه می شود.

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (69-3)$$

در رابطه (۶۹-۳) همان جمله بدون بعد ω است که بر اساس پارامتر k_s که متوسط ارتفاع زبری های دیواره است محاسبه می شود. مقدار مجانبی ω^+ یعنی حداقل مقدار ω^+ که می تواند به عنوان شرط مرزی برای معادله ω استفاده شود، برای زیر لایه لزج از رابطه زیر محاسبه می شود. جمله β_i از رابطه (۷۰-۳) بدست می آید:

$$\omega^+ = \min\left(\omega_w^+, \frac{6}{\beta_i (y^+)^2}\right) \quad (70-3)$$

$$k_s^+ = \max\left(1, \frac{\rho k_s u^*}{\mu}\right) \quad (71-3)$$

$$\omega_w^+ = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+}\right)^2 & k_s^+ < 25 \\ \left(\frac{500}{k_s^+}\right) & k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (72-3)$$

برای زیر لایه لگاریتمی مقدار ω^+ از رابطه (73-3) محاسبه می‌شود، که این رابطه در سلول مجاور

دیواره به رابطه (74-3) تبدیل می‌شود.

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+} \quad (73-3)$$

$$\omega^+ = \frac{u^*}{\sqrt{\beta_\infty^*} ky} \quad (74-3)$$

در صورتی که اولین سلول مجاور دیوار در زیر لایه بافر قرار گیرد، نرم افزار از ترکیب مقدار ω^+ در

روابط زیر لایه لزج و زیر لایه لگاریتمی به عنوان شرط مرزی استفاده می‌کند. بنابراین می‌توان برای این

مدل یک تابع اصلاح اثرات دیواره تعریف کرد که با توجه به شبکه محاسباتی، به صورت اتوماتیک از

رابطه مربوط به زیر لایه لزج به تابع دیواره تغییر حالت می‌دهد. این تابع بر اساس ضریب اصطکاک

پوسته‌ای و ضریب انتقال حرارت حل مستقل از شبکه جریان کوئت بهینه شده است و به صورت پیش

فرض نیز از این تابع تغییر وضعیت در نزدیکی دیواره استفاده می‌شود.

فصل چهارم نتایج حاصل از جریان ابرکاواک‌زایی

و بررسی آنها

در این فصل نتایج عددی حاصل از حل جریان ابرکاواک طبیعی روی کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های غیر هم‌مرکز که به صورت منظم روی دیسک قرار دارند، گزارش می‌گردد. جهت بررسی اعتبار نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت، نتایج را با نتایج حاصل از حل تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مقایسه می‌کنیم. مدل اغتشاشی بکار گرفته شده برای شبیه‌سازی اغتشاشات، مدل آشفتگی $k - \omega$ SST می‌باشد. برای مشاهده کاواک تشکیل شده در پشت دیسک از مدل انتقال جرم (مدل کاواک‌زایی) سوئر-اسکتر استفاده می‌نماییم. همان‌طور که قبلاً هم بیان شده بود، جریان آب به صورت عمود بر دیسک و با زاویه انحراف (زاویه حمله) صفر درجه به دیسک مورد نظر برخورد می‌کند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر سایز (قطر) و جانمایی سوراخ‌های غیر هم‌مرکز بر طول و قطر کاواک ایجادشده، همچنین مقدار ضریب پسا روی کاواک‌زا می‌باشد.

۴-۲- شرایط حاکم بر شبیه‌سازی

شبیه‌سازی انجام شده بر اساس دامنه محاسباتی موجود در مرجع [۵۱] انجام شده است. اما تغییری در شرایط مرزی این پایان‌نامه با مرجع یاد شده وجود دارد. در حالت حل یک چهارم میدان محاسباتی (یک چهارم میدان حل محاسباتی با زاویه ۹۰ درجه)، برای دو سطح کناری میدان حل شرط مرزی متقارن را می‌توان در نظر گرفت. اما در حالت زاویه ۱۲۰ و ۷۲ درجه این شرط مرزی صادق نخواهد بود و برای دو سطح کناری مسئله از شرط مرزی متناوب^۱ باید استفاده شود.

دو عدد بی‌بعد استفاده‌شده در این پایان‌نامه عدد رینولدز و عدد کاواک‌زایی می‌باشد. که نتایج برای عدد رینولدز 10^5 و اعداد کاواک‌زایی $0/2$ و $0/05$ به‌دست‌آمده‌اند. با توجه به اینکه پدیده ابرکاواک‌زایی روی طیف وسیعی از اعداد کاواک‌زایی صورت می‌گیرد و این کار هزینه محاسباتی و زمان بالایی نیاز دارد، ابتدا همه کاواک‌زاهای در عدد کاواک‌زایی $0/2$ شبیه‌سازی شده‌اند. سپس با توجه به

^۱ periodic

مشخصاتی که مد نظر است مثل طول و عرض بیشینه کاواک، مناسبترین مدل انتخاب می‌گردد و جریان ابرکاواک روی این کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی $0/05$ شبیه‌سازی و مشخصات ابرکاواک شکل گرفته حاصل از این شبیه‌سازی را با مشخصات ابرکاواک تشکیل شده پشت دیسک بدون سوراخ مقایسه می‌نماییم. در جدول مشخصات کاواک‌زاهای مختلفی که برای شبیه‌سازی در این پایان‌نامه استفاده شده‌اند آورده شده است.

کاواک‌زای دیسکی مورد نظر برای انجام محاسبات دارای ۳ و ۴ و ۵ سوراخ است. دیسک داری ۳ سوراخ به صورت زاویه 120° درجه مدل می‌شود که برای کاهش حجم محاسبات یک سوم دیسک مدل شده و دو سطح مشخص شده کناری آن به صورت متناوب می‌باشد. قطر سوراخ ایجاد شده به ترتیب $0/1$ ، $0/2$ و $0/3$ قطر دیسک (کاواک‌زا) در نظر گرفته شده است. برای یافتن جانمایی مناسب از محل قرارگیری این سوراخ‌ها، جهت دستیابی به ضریب پسای کمینه محل سوراخ را روی خط نیم‌ساز زاویه دیسک تغییر می‌دهیم. اندازه تغییر مکان سوراخ روی نیم‌ساز با توجه به وضعیت مشی که در کنار دو سطح متناوب تشکیل می‌گردد تعیین می‌شود. برای دیسک داری ۴ و ۵ سوراخ نیز موارد بالا صادق خواهد بود. دیسک حاوی ۴ سوراخ به صورت 90° درجه (یک چهارم میدان حل کلی) و دیسک حاوی ۵ سوراخ به صورت 72° درجه (یک پنجم میدان حل کلی) مدل می‌شوند.

پس به طور کلی برای انجام این شبیه‌سازی سه حالت از محل قرارگیری سوراخ روی نیم‌ساز زاویه دیسک را در نظر می‌گیریم که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌نمائیم.

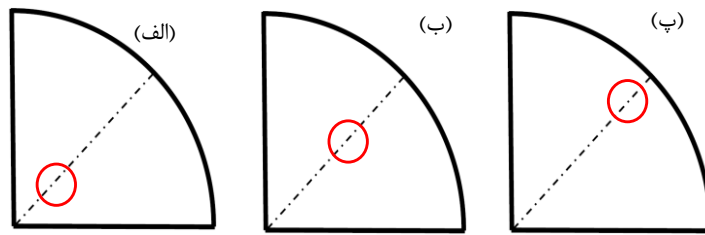
- ۱) فاصله مرکز سوراخ کمتر از نصف شعاع دیسک باشد (شکل الف).
- ۲) مرکز سوراخ روی نصف شعاع دیسک قرار داشته باشد (شکل ب).
- ۳) فاصله مرکز سوراخ بیشتر از نصف شعاع دیسک باشد (شکل پ).

البته باید دقت داشت، با توجه به قطر سوراخ ایجاد شده و تعداد سوراخ، محل قرارگیری سوراخ روی کاواک‌زای دیسکی مشخص می‌شود. به عنوان مثال اگر بخواهیم روی دیسک پنج سوراخ با قطری

برابر ۰/۳ قطر دیسک ایجاد نماییم با توجه به ابعاد سوراخ ایجاد شده، فقط یک جانمایی مناسب جهت قرار گیری سوراخ روی دیسک را شاهد خواهیم بود.

جدول ۴-۱: مشخصات کاواک‌زاهای مورد استفاده

شماره کاواک‌زا	تعداد سوراخ	قطر سوراخ	جانمایی سوراخ
۱	۳	0.1 D	۱
۲	۳	0.1 D	۲
۳	۳	0.1 D	۳
۴	۴	0.1 D	۱
۵	۴	0.1 D	۲
۶	۴	0.1 D	۳
۷	۵	0.1 D	۱
۸	۵	0.1 D	۲
۹	۵	0.1 D	۳
۱۰	۳	0.2 D	۱
۱۱	۳	0.2 D	۲
۱۲	۳	0.2 D	۳
۱۳	۴	0.2 D	۱
۱۴	۴	0.2 D	۲
۱۵	۴	0.2 D	۳
۱۶	۵	0.2 D	۱
۱۷	۵	0.2 D	۲
۱۸	۵	0.2 D	۳
۱۹	۳	0.3 D	۱
۲۰	۳	0.3 D	۲
۲۱	۳	0.3 D	۳
۲۲	۴	0.3 D	۲
۲۳	۴	0.3 D	۳
۲۴	۵	0.3 D	۲



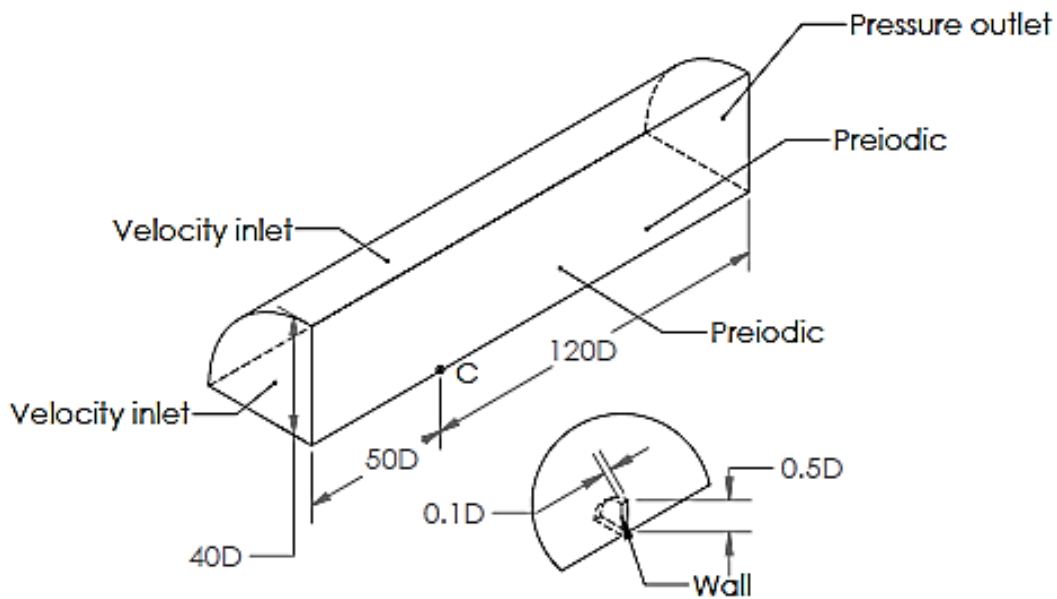
شکل ۱-۴: نمایی از دیسک مورد استفاده در تحقیق حاضر با ایجاد چهار سوراخ و جانمایی آن‌ها (جانمایی ۱ تا ۳ به ترتیب الف تا پ)

مقدار سرعت ورودی ۲۰ متر بر ثانیه و شرط مرزی خروجی برابر با فشار بالادست در نظر گرفته شده است. عدد کاواک‌زایی قبلاً تعریف و فرمول آن نیز بیان شده است و عدد رینولدز نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (1-4)$$

در معادله (۱-۴) D قطر دیسک، ρ چگالی و μ لزجت سیال و V_{∞} سرعت دور دست جریان (جریان بالا دست) می‌باشد. در شکل ۲-۴ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای حل جریان ابر کاواک‌زایی را مشاهده می‌نمائیم.

جهت دستیابی به عدد کاواک‌زایی مورد نظر، با توجه به اینکه سرعت ورودی را ثابت در نظر گرفته‌ایم، باید مقدار فشار بالادست را تغییر دهیم. همانطور که می‌دانیم برای ایجاد پدیده کاواک‌زایی و سپس تولید ابر کاواک باید مقدار عدد کاواک‌زایی را کاهش دهیم. با افزایش سرعت بالادست و یا کاهش فشار بالادست می‌توان مقدار این عدد را کاهش داد. وقتی فشار بالادست را کاهش دهیم اختلاف فشار، فشار بالادست و فشار بخار کمتر شده که در این صورت طبق فرمول عدد کاواک‌زایی مقدار صورت کسر (فشار استاتیک) کاهش یافته و مقدار عدد کاواک‌زایی نیز کاهش می‌یابد که در این صورت شانس رسیدن به ابر کاواک پایدار بیشتر می‌گردد.



شکل ۴-۲: دامنه محاسباتی میدان حل جریان و شرایط مرزی جریان

قطر دیسک محاسباتی 0.25 متر و ضخامت آن 0.025 متر است و ابعاد میدان حل انتخابی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. با توجه به اینکه مسائل مکانیک سیالات با معادلات ناویر استوکس حل می‌شوند و این معادلات فقط برای حالت جریان توسعه یافته نوشته شده‌اند، پس طول ورودی میدان حل را طوری در نظر گرفتیم که جریان سیال به صورت توسعه یافته به دیسک برخورد نماید. ابتدا جریان ابرکاواک مورد مطالعه روی دیسک، در عدد کاواک‌زایی 0.2 بررسی می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد هر چه مقدار عدد کاواک‌زایی کوچکتر باشد، کاواک ایجاد شده طول و قطر بزرگتری خواهد داشت و با بزرگ‌تر شدن کاواک، شانس رسیدن به نیرو و ضریب پسای کمینه نیز بیشتر می‌شود.

۴-۳- روابط ارائه شده برای محاسبه طول و قطر کاواک و ضریب پسا

جهت اعتبارسنجی^۱ روش حل و مدل‌های استفاده شده (مدل چند فاز، مدل آشفتگی و مدل کاواک‌زایی) ابتدا کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ را در عدد کاواک‌زایی 0.2 شبیه‌سازی می‌نمائیم. برای مقایسه نتایج به دست آمده می‌توان از نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی که توسط پژوهشگران متفاوتی

^۱ Validation

ارائه شده است.

استفاده کرد. یکی از روابطی که نسبت طول کاواک به قطر کاواک را برای جریان ابرکاواک پشت هندسه‌های متقارن محوری ارائه می‌دهد، توسط می^۱ [۵۳] بیان شده است. رابطه می به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{L}{d} = \sqrt{C_d}(1.24\sigma^{-1.123} - 0.6) \quad (۲-۴)$$

ریچاردت نیز رابطه‌ای برای طول و قطر کاواک (برای اعداد کاواک‌زایی کمتر از ۰/۱۲) بر حسب ضریب پسا را برای ابرکاواک‌های متقارن محوری به صورت زیر بیان نموده است:

$$\frac{L}{d} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(1.7\sigma + 0.066)} \left(\frac{D}{d}\right) \quad (۳-۴)$$

$$\frac{D}{d} = \left[\frac{C_d}{\sigma(1 - 0.132\sigma^{0/5})}\right]^{0.5} \quad (۴-۴)$$

$$C_d = C_{d0}(1 + \sigma) \quad (۵-۴)$$

در معادله (۵-۴) C_{d0} متغیری است که به هندسه کاواک‌زا وابسته می‌باشد. مقدار این متغیر برای دیسک ۰/۸۴ گزارش شده است [۵۴]. روابط دیگری نیز توسط گارابداین [8] برای محاسبه طول و قطر بیشینه کاواک معرفی شده است که به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{L}{d} = \frac{\sqrt{C_d \ln \frac{1}{\sigma}}}{\sigma} \quad (۶-۴)$$

$$\frac{D}{d} = \sqrt{C_d / \sigma} \quad (۷-۴)$$

در معادلات (۲-۴) الی (۷-۴) d قطر کاواک‌زا (برای دیسک ساده)، D و L به ترتیب قطر و طول ابرکاواک می‌باشند. با توجه به روابط ذکر شده در قسمت قبل می‌توان مشخصه‌های جریان ابرکاواک گذرنده از روی دیسک ساده را تعیین کرده و با نتایج حل سه‌بعدی مقایسه نمود.

^۱ May

۴-۴- بررسی استقلال از شبکه

جهت بررسی جریان در دینامیک سیالات محاسباتی یکی از اولین گام‌ها بررسی استقلال از شبکه می‌باشد. برای انجام محاسبات از شبکه محاسباتی با مش غیر سازمان یافته^۱ استفاده می‌نمائیم. برای شبیه‌سازی از سه شبکه محاسباتی با تعداد مش ۱۵۰۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰۰۰ استفاده می‌کنیم که برای انجام محاسبات باید یکی از این سه مش را انتخاب نمائیم. مبنای انتخاب بهترین مش مقایسه نسبت طول کاواک به قطر دیسک ($L_{cavity}/d_{cavitator}$)، قطر کاواک به قطر دیسک ($D_{cavity}/d_{cavitator}$) و ضریب پسای (C_d) وارد بر دیسک می‌باشد که پس از انجام محاسبات مقادیر موارد مذکور با نتایج آزمایشگاهی، تحلیلی ریچاردت، گارابداین و نتایج عددی مرجع [۵۱] در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ مقایسه و مقدار خطا را در جدول ۲-۴ بدست می‌آوریم.

جدول ۲-۴: مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

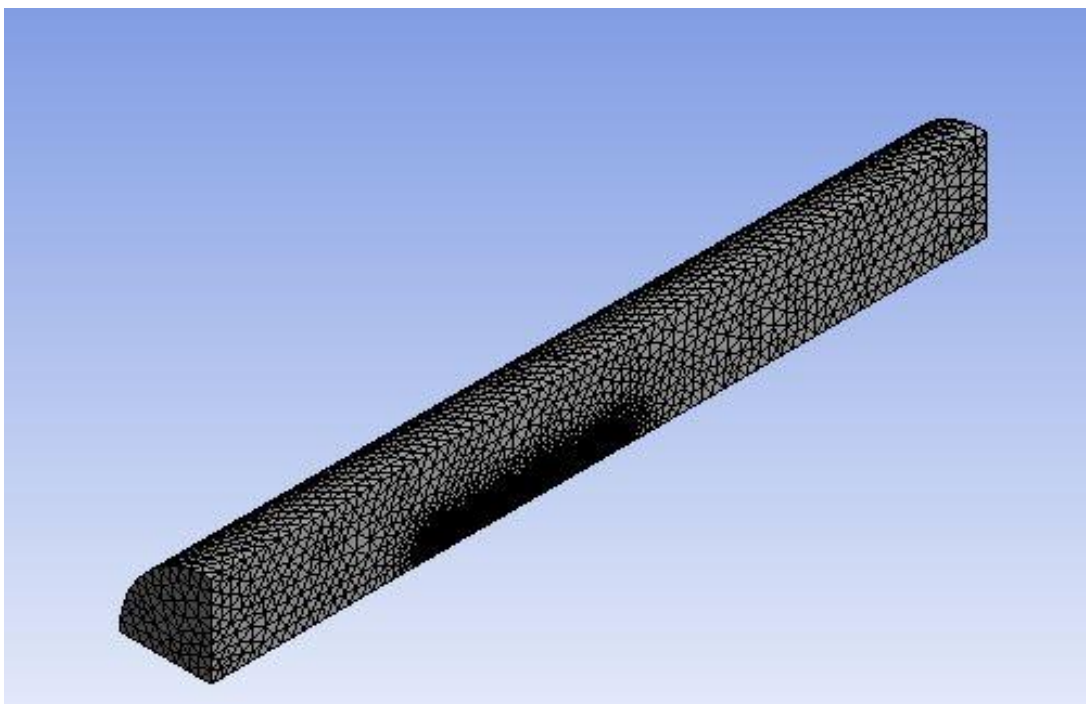
تعداد مش	$L_{cavity}/d_{cavitator}$	Error	$D_{cavity}/d_{cavitator}$	Error	C_{dp}	Error
آزمایشگاهی	۷		۲/۷		۱/۰۲۷	
نتایج ریچاردت	۵/۹۳	-	۲/۳۱	-	۱/۰۰۸	-
نتایج روحی و همکاران	۵/۳۷		۲/۱۴		۰/۹۲	
۱۵۰۰۰۰۰	۵/۱۱۸	۱۳/۶۹	۲/۵۱	۸/۶۵	۰/۹۹۵	۱/۳
۳۰۰۰۰۰۰	۵/۷۴	۳/۴۷	۲/۵۷	۱۱/۶۳	۱/۰۲۶	۱/۸
۴۵۰۰۰۰۰	۵/۳۴	۹/۹۶	۲/۴۴	۵/۶۶	۱/۰۲۷	۱/۸۸

در شکل ۴-۵ الی شکل ۴-۷ به ترتیب مقادیر نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا، قطر کاواک به قطر کاواک‌زا و ضریب پسای فشاری اعمال شده روی کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ ارائه شده است.

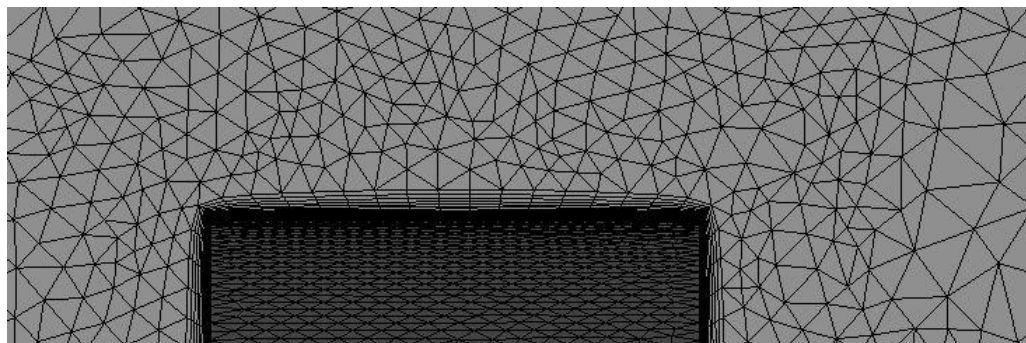
^۱ Unstructured

همان طور که مشاهده می‌کنیم مقادیر نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج شبیه‌سازی مرجع [۵۱] و نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارد که نشان از روش حل درست و مش استفاده شده جهت بررسی جریان ابر کاواک‌زائی و مشخصه‌های مربوط به این جریان می‌باشند.

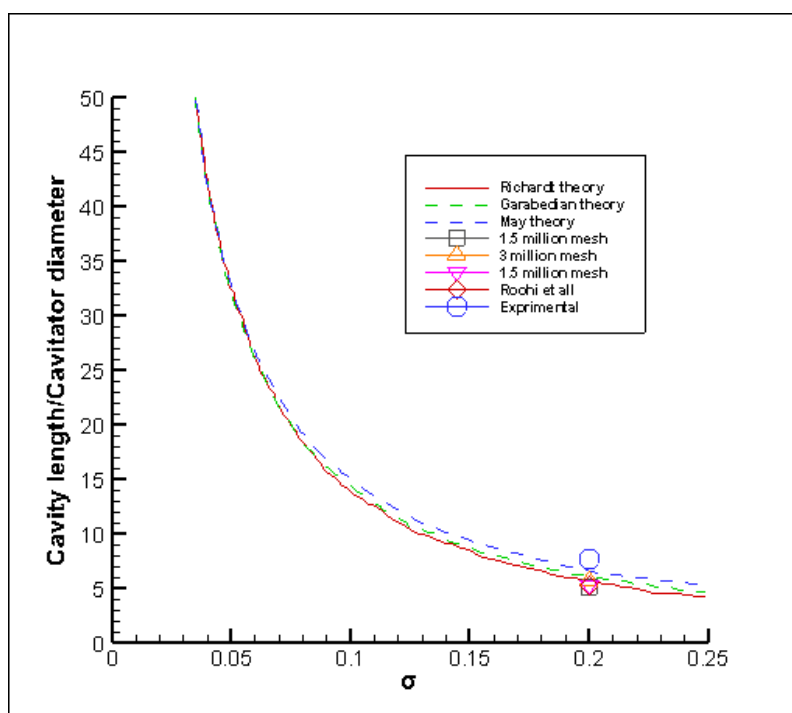
با توجه به شکل ۳-۴ مش ناحیه‌ای به طول و قطری ۵۰ و ۵ برابر قطر دیسک، ریز شده است. در این ناحیه احتمال ایجاد پدیده کاواک‌زایی وجود دارد، لذا مش این قسمت ریزتر است تا جریان کاواک‌زایی در این ناحیه به خوبی مدل شود. در شکل ۴-۴ مش لایه مرزی اطراف دیواره کاواک‌زا را مشاهده می‌نمائیم.



شکل ۳-۴: مش ایجاد شده برای یک چهارم ناحیه محاسباتی

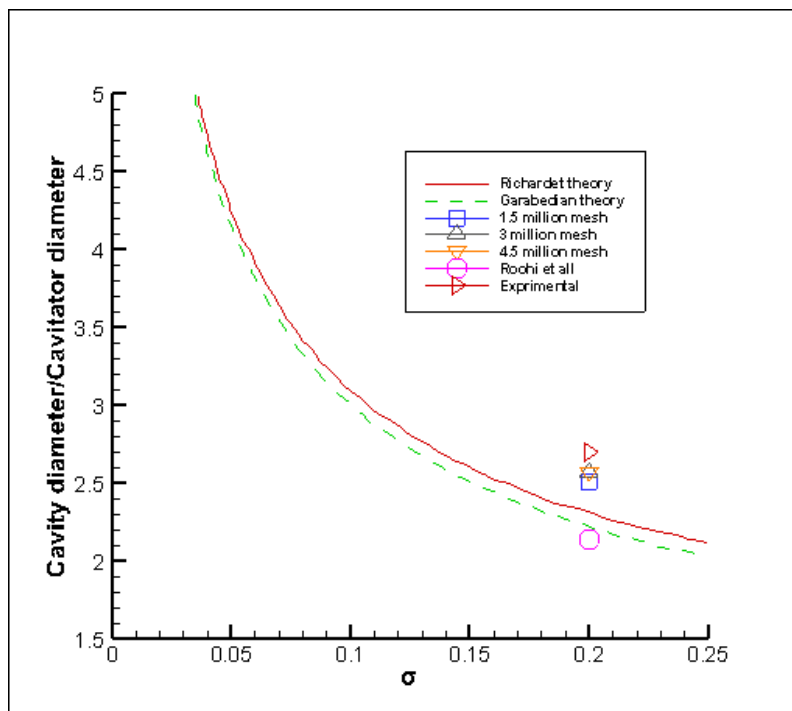


شکل ۴-۴: مش لایه مرزی روی دیواره کاواک‌زای دیسکی

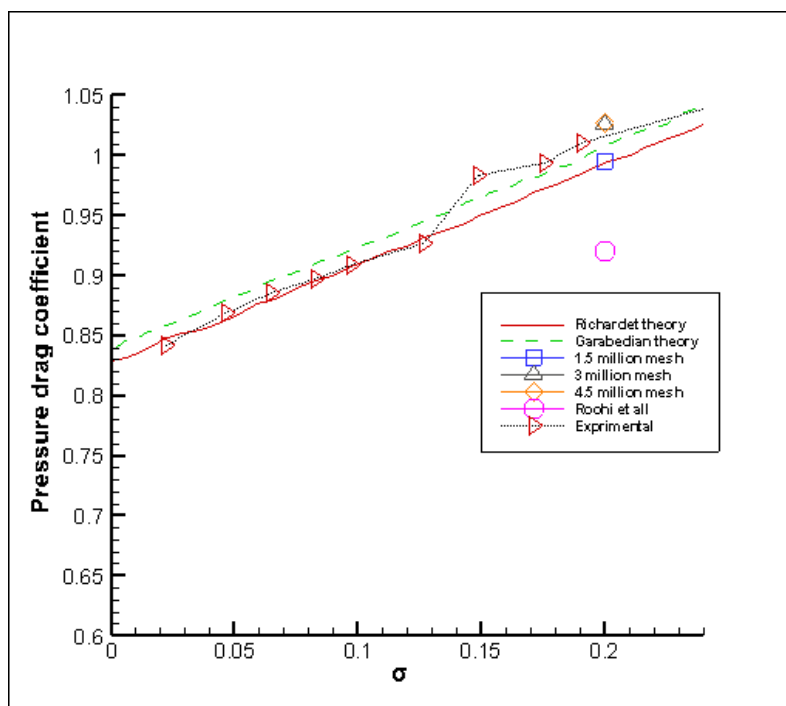


شکل ۴-۵: مقایسه نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا برای دیسک بدون سوراخ

جریان به دیسک مقدار ضریب فشار روی دیسک بالا رفته و در جلوی دیسک نقطه سکون (سرعت صفر) تشکیل می‌شود. سپس با تشکیل کاواک مقدار ضریب فشار منفی می‌شود و با تشکیل منطقه جت بازگشتی که جریان سیال سعی دارد به سمت ناحیه انتهایی کاواک نفوذ کند، ناحیه سکون دیگری ایجاد می‌گردد و در این قسمت به علت فروپاشی حباب‌ها فشار بالا می‌رود (فشار ایجاد شده از مقدار فشار در لحظه برخورد جریان با دیسک کمتر است) لذا در این ناحیه نیز مقدار ضریب فشار کمی بالا می‌رود و سپس صفر می‌شود.



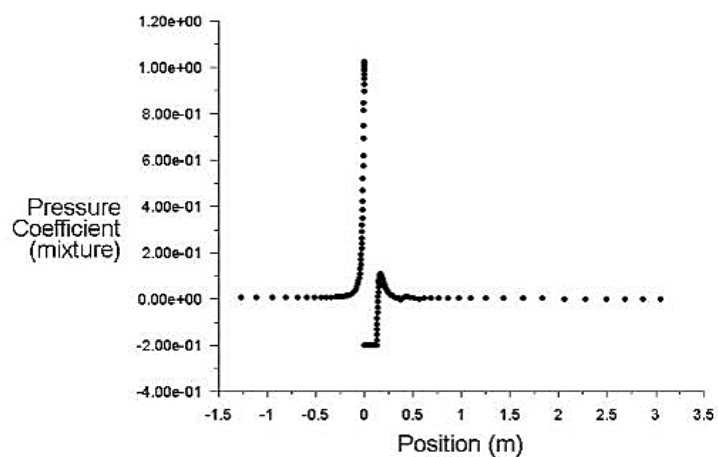
شکل ۴-۶: مقایسه نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا برای دیسک بدون سوراخ



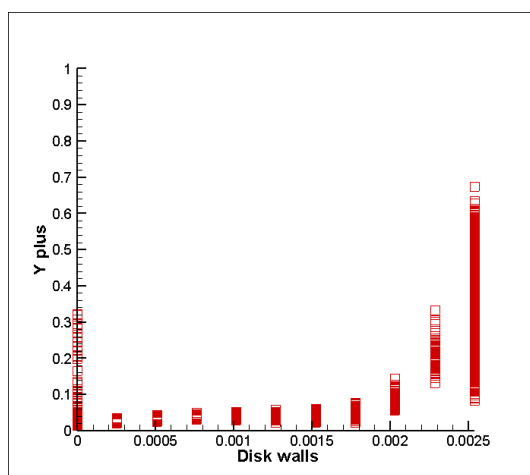
شکل ۴-۷: مقایسه ضریب پسای فشاری روی دیسک بدون سوراخ

در شکل ۴-۸ ضریب فشار ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی را مشاهده می‌نمائیم که با برخورد

یکی از پارامترهای موثر در حل جریان آشفته y^+ می‌باشد. مقدار پارامتر y^+ برای مدل اغتشاشی SST k- ω در نزدیکی دیواره جسم باید زیر یک باشد. مقدار این پارامتر روی دیوار در مسئله حاضر در شکل ۴-۹ نشان داده شده است و همانطور که مشاهده می‌کنیم مقدار این پارامتر روی دیواره دیسک زیر یک است که نشان دهنده این امر خواهد بود که این مدل اغتشاشی جریان سیال در نزدیکی دیواره دیسک را به خوبی مدل می‌نماید.



شکل ۴-۸: ضریب فشار روی دیسک



شکل ۴-۹: y^+ گزارش شده برای دیوار کاواک‌زای دیسکی

۴-۵- نیروی پسا

در دینامیک سیالات نیروی پسا به نیروهایی که در جهت بازداشتن اجسام از حرکت در درون سیال

می‌باشند، اطلاق می‌شود. حرکت یک جسم در آب به واسطه لزجت این سیال، با نیروی مقاومت قابل ملاحظه‌ای از طرف آب مواجه می‌شود. بخشی از این نیروی وارده بر جسم به خاطر وجود تنش برشی روی سطح تماس جسم با سیال به وجود می‌آید که نیروی پسای اصطکاکی یا لزجی نامیده می‌شود و بخش دیگر این نیرو در اثر وجود میدان فشار نامتقارن در اطراف جسم حاصل می‌شود که نیروی پسای فشاری نامیده می‌شود. این نیرو در جریان داخلی خود را به صورت افت فشار و در جریان خارجی به صورت افزایش توان مورد نیاز سیستم جلوبرنده نشان می‌دهد. با توجه به موارد گفته شده همواره تلاش محققان بر این بوده است که نیروی پسا را در حالت کمینه قرار دهند (چه جریان‌های داخلی و چه جریان‌های خارجی).

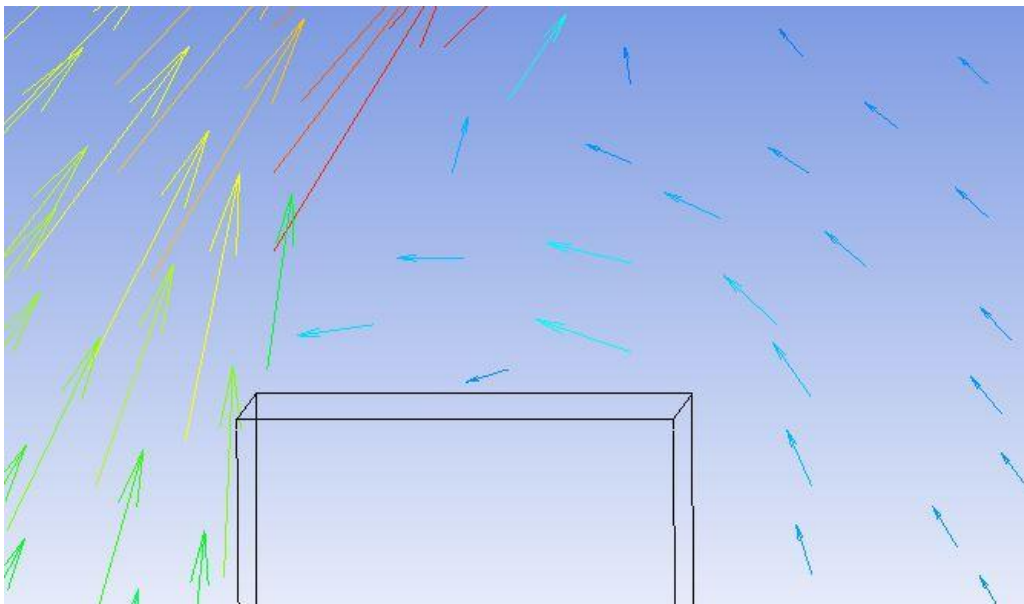
حال اهمیت پدیده ابرکاواک‌زایی در کاهش نیروی پسا روی یک جسم در حال حرکت در یک سیال، که به صورت جریان خارجی روی جسم اعمال می‌گردد مشخص می‌شود. با به‌کارگیری این پدیده در طی سالیان متمادی و پیشرفت روز افزون آن در صنایع نظامی، کاربرد آشکار این پدیده در کاهش نیروی پسا روی اجسامی همانند اژدرها برای برتری در نبردهای دریایی مشاهده می‌شود. با توجه به این نکته که گرانیروی یا لزجت بسیاری از سیالات همانند آب (سیال مورد مطالعه در این پایان‌نامه) کم است، لذا نیروی پسای اصطکاکی نقش کم رنگ‌تری در نیروی پسای کلی دارد. اگر بخواهیم بر اساس اعداد بدون بعد همانند عدد رینولدز این موضوع را بیان نماییم خواهیم داشت:

- در اعداد رینولدز بالا، نقش تنش برشی در نیروی پسا کم خواهد بود (نیروی پسای فشاری بر اصطکاکی غالب است).
- در اعداد رینولدز پایین، نیروی پسا ناشی از تنش برشی سطح جسم است (نیروی پسای اصطکاکی بر فشاری غالب است).

اگر بخواهیم نیروی پسای وارد بر یک جسم متحرک مستغرق را نسبت به عدد کاواک‌زایی σ بررسی نماییم، نتیجه به شرح زیر خواهد بود:

- در $\sigma \geq 0.3$ نیروی پسای فشاری مقداری ناچیز در حالی که پسای اصطکاکی بزرگ است.
- در $\sigma \leq 0.3$ با ایجاد کاواک پیرامون جسم درون سیال، نیروی پسای فشاری رفته رفته افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در اعداد کاواک‌زایی خیلی کوچک مثل $\sigma = 0.05$ نیروی پسای فشاری به قدری بزرگ است که از نیروی پسای اصطکاکی صرف‌نظر می‌شود [۱۲].

هرگاه در لایه‌مرزی بردارهای سرعت در جهت حرکت سیال و یا در خلاف جهت حرکت جسم باشد موجب افزایش ضریب پسای اصطکاکی خواهد شد. با توجه به شکل ۴-۱۰ بردارهای سرعت در جهت حرکت جسم یا خلاف جهت جریان می‌باشند و این امر موجب منفی شدن نیروی پسای اصطکاکی و در نتیجه نیروی پسای کل کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۰: بردار سرعت روی دیسک در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ (جهت حرکت سیال از چپ به راست)

جهت سهولت در نمایش و درک بهتر از شکل‌های ارائه شده، سعی بر آن است که از اشکال دو

بعدی استفاده شود. شکل ۴-۱۱ و

شکل ۴-۱۲ سطوح هم‌فشار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۱۱ گرادیان (تغییرات) خطوط

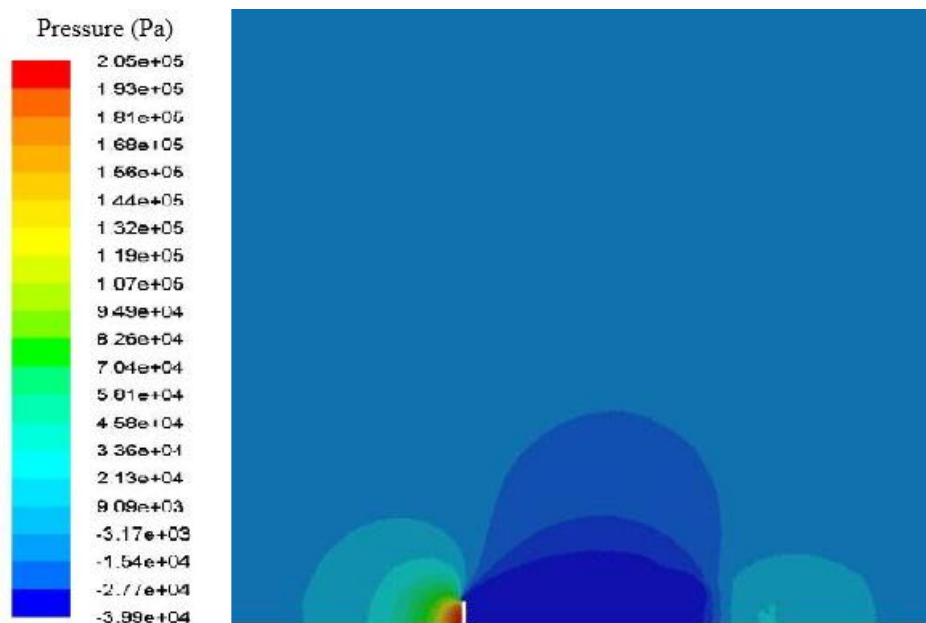
فشار ثابت در روی مرزهای خروجی صفر می‌باشد که این موضوع نشان دهنده‌ی این است که شرایط

مرزی به کار برده شده جهت حل جریان درست می‌باشد. در جلوی دیسک که جریان به صورت عمود بر آن برخورد می‌نماید، فشار به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و در این مکان نقطه سکون را مشاهده می‌کنیم. در خارج از ناحیه کاواک تشکیل شده، فشار به تدریج با فشار جریان آزاد برابر می‌شود. در انتهای کاواک ناحیه‌ای است که در آن به دلیل ریزش و فروپاشی حباب‌های تشکیل شده در اثر پدیده کاواک‌زایی افزایش فشار زیادی را شاهد خواهیم بود که این ناحیه محلی است که در آن پدیده جت بازگشتی روی می‌دهد. با توجه به

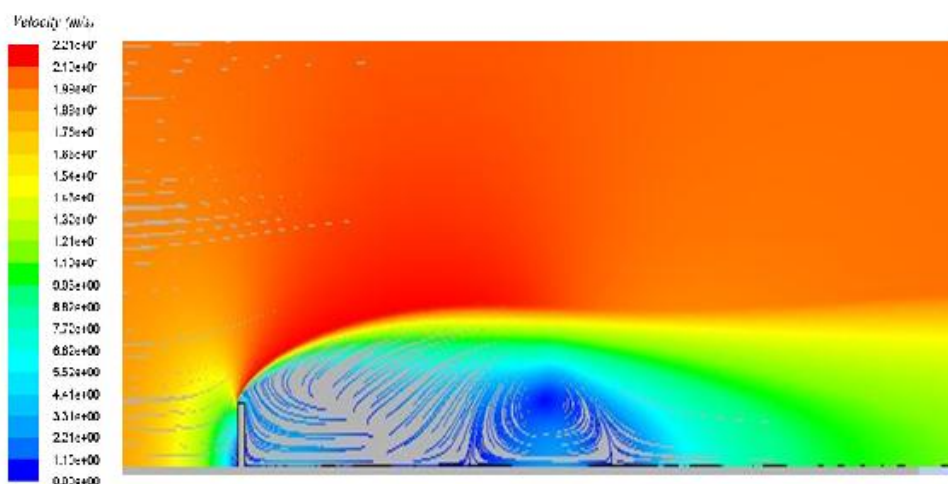
شکل ۴-۱۲ به خاطر جریان بازگشتی به داخل کاواک، گردابه‌هایی که در ناحیه جدایش جریان در پشت دیسک ایجاد می‌شوند، توسعه یافته و تمام کاواک را پر می‌نمایند. با توجه به خطوط جریان به واسطه وجود جریان کاواک‌زایی تمایل دارند تا به موازات جریان بالادست حرکت نمایند که در این صورت یک منطقه‌ای که در آن سیال جریان ندارد در پشت دیسک به وجود می‌آید که فشار در این ناحیه کاهش یافته و موجی به وجود آمدن کاواک می‌گردد.

۴-۶- ضریب پسا

همان‌طور که قبلاً هم اشاره کردیم، ضریب پسای کلی وارد بر یک جسم شامل ضریب پسای اصطکاکی و ضریب پسای فشاری می‌باشد. و برای جسمی مانند دیسک با توجه به نتایج آزمایشگاهی و حل‌های عددی گزارش شده در پدیده ابرکاواک‌زایی می‌توان دریافت که ضریب پسای فشاری، مقداری بزرگتر از ضریب پسای اصطکاکی دارد. در حالتی که روی دیسک سوراخ ایجاد کنیم در واقع می‌توان مشاهده کرد که میزان نیروی پسای اصطکاکی کمی افزایش می‌یابد اما مقدار این نیرو در مقابل نیروی پسای فشاری همچنان کمتر خواهد بود.



شکل ۴-۱۱: کانتور فشار روی دیسک با سه سوراخ در عدد کاواک‌زایی 0.2 و نقاط سکون تشکیل شده



شکل ۴-۱۲: خطوط جریان روی کاواک‌زای دیسکی

۴-۶-۱- نتایج بدست آمده برای ضریب پسای فشاری در عدد کاواک‌زایی 0.2

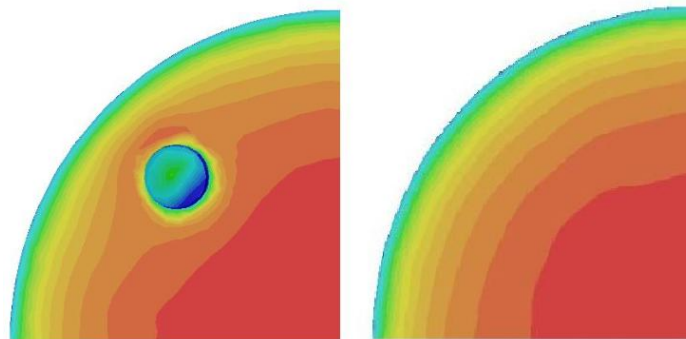
در ادامه ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زاهای ذکر شده در جدول ۴-۱ را مشاهده خواهیم نمود. با افزایش سطح برخورد موثر سیال به دیسک مقدار ضریب پسای ایجاد شده روی آن بیشتر خواهد بود که سهم بیشتر این ضریب مربوط به پسای فشاری است. با مقایسه ضریب پسای فشاری و اصطکاکی ایجاد شده روی یکی از کاواک‌زها مثلا کاواک‌زای شماره ۵ مقدار ضریب پسای فشاری برابر

۱/۰۰۷ و مقدار ضریب پسای اصطکاکی برابر ۰/۰۰۰۱۵ می‌باشد که مشاهده می‌شود سهم پسای اصطکاکی نسبت به پسای فشاری بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

وقتی ضریب پسای فشاری روی جسم بالا باشد نشان از اختلاف فشار زیادی است که در جلو و پشت آن به علت سرعت بالای جریان ایجاد شده است. پس در این صورت یک ناحیه کم فشار در پشت جسم ایجاد می‌گردد که پدیده کاواک‌زایی در این ناحیه مستعد تشکیل خواهد بود. اگر سرعت جریان ثابت باشد برای رسیدن به ابرکاواک پایدار باید مقدار فشار بالادست جریان را کاهش دهیم که با این کار در واقع قصد داریم اختلاف فشار جلو و پشت کاواک‌زا را کم کنیم. با توجه به فرمول عدد کاواک‌زایی هر چه مقدار فشار بالادست را کاهش دهیم، مقدار صورت کسر کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه مقدار مخرج کسر ثابت است مقدار عدد کاواک‌زایی کمتر می‌شود و در این صورت ابرکاواکی بزرگ و پایدار را خواهیم داشت.

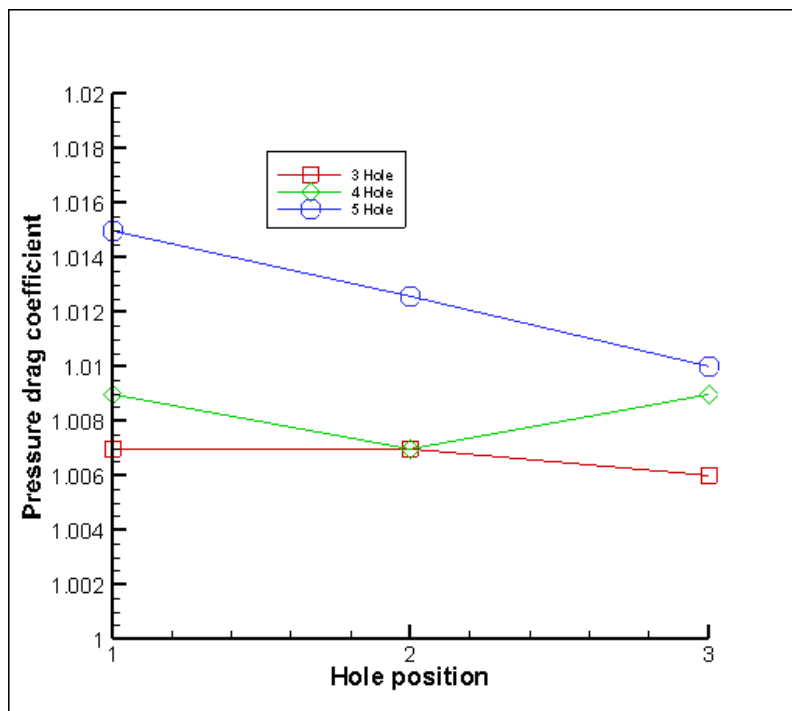
علاوه بر اینکه مقدار فشار بالادست را کاهش داده‌ایم، با ایجاد سوراخ روی دیسک سعی بر آن است تا با ورود جریان به سمت دیگر دیسک که با جریان سیال برخورد ندارد، مقدار اختلاف فشار جلو و پشت دیسک را بیشتر کاهش دهیم. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۴-۱۴ ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای شماره ۳ کمتر از سایر کاواک‌زاهای است. باید توجه داشت زمانی که روی دیسک سوراخ قرار می‌دهیم مقدار فشار اطراف سوراخ به صورت محلی بالا می‌رود. کانتور فشار ایجاد شده روی دیسک بدون سوراخ و سوراخدار را در شکل ۴-۱۳ مشاهده نمائیم. همانطور که مشاهده می‌کنیم خطوط هم فشار در اطراف سوراخ دیسک تغییر کرده و در قسمت بالای سوراخ یک منطقه پرفشار محلی را ایجاد می‌نمایند. که این عامل باعث می‌شود مقدار ضریب پسای فشاری افزایش داشته باشد. تاثیر این منطقه فشار بالا هنگامی که تعداد سوراخ و قطر سوراخ را بالاتر ببریم افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مقدار ضریب پسای فشاری در مقایسه با نتایج عددی و تحلیلی افزایش یابد. مقدار سطح موثر برخورد سیال، زمانی که قطر سوراخ ایجاد شده کوچکتر باشد، بیشتر است پس مقدار ضریب پسای

فشاری ایجاد شده روی آن نیز افزایش پیدا می‌کند و باعث ایجاد منطقه کم فشار بیشتری در پشت کاواک‌زا می‌شود پس انتظار داریم که روی این کاواک‌زا حجم بخار بیشتری ایجاد شود. البته باید یادآوری کنیم که ضریب پسای فشاری محلی ایجاد شده به واسطه سوراخ‌ها در ایجاد منطقه کم‌فشار در پشت کاواک‌زا نقشی ندارند. پس با افزایش سوراخ که باعث افزایش ضریب پسای فشاری می‌شود، (شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶) نمی‌توان گفت که حجم بخار بیشتری ایجاد می‌شود، بلکه برعکس با افزایش تعداد سوراخ‌ها حجم بخار نیز کاهش می‌یابد.

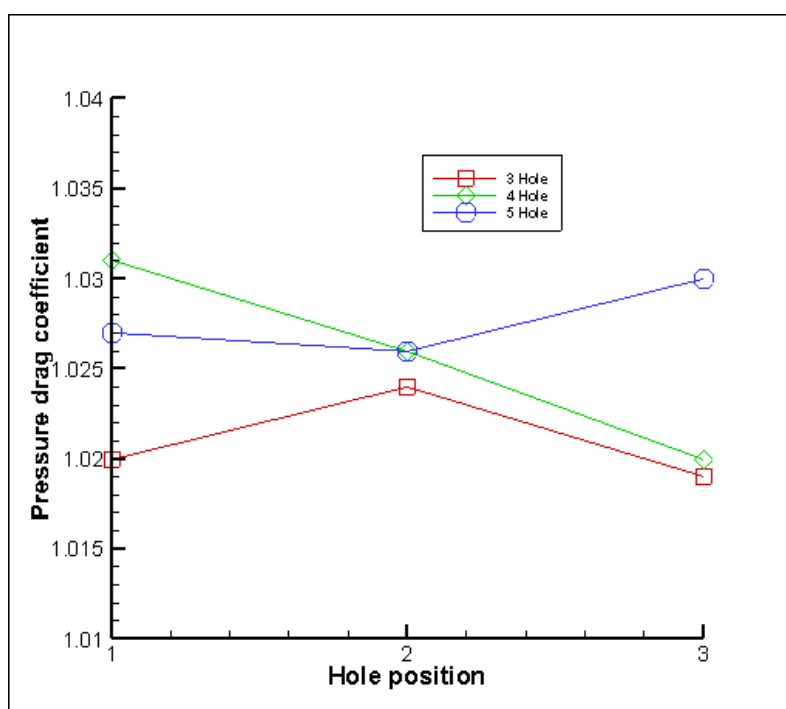


شکل ۴-۱۳: کانتور فشار روی دیسک بدون سوراخ و سوراخ‌دار

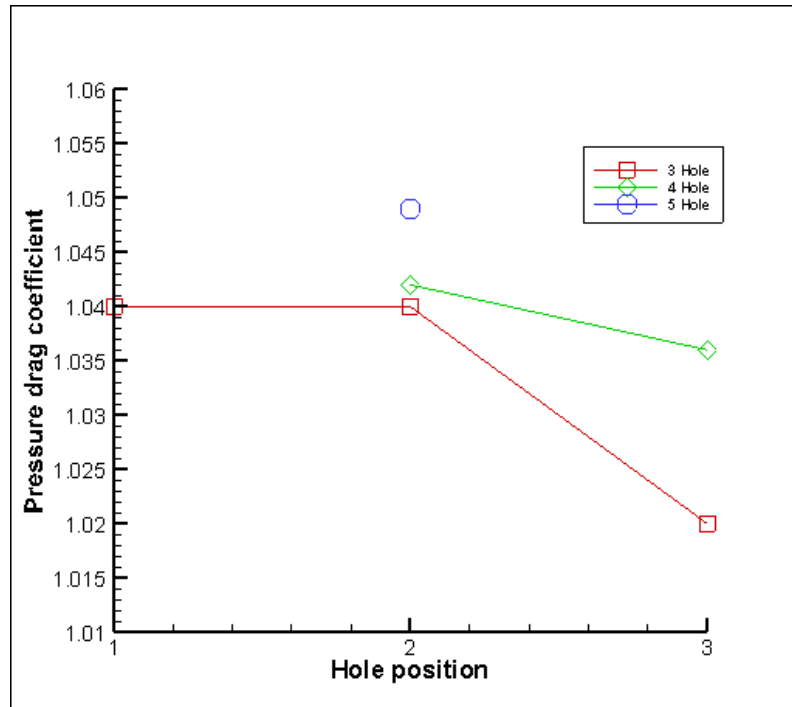
همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود مقدار ضریب پسای فشاری روی کاواک‌زای شماره ۲۴ افزایش یافته است. در این کاواک‌زا به علت ایجاد ضریب پسای فشاری محلی ناشی از ایجاد کاواک محلی اطراف سوراخ که به علت بالا رفتن سرعت درون سوراخ ایجاد می‌شود، مقدار ضریب پسای فشاری افزایش بیشتری دارد. ضریب پسای اصطکاکی در این کاواک‌زا برابر 0.0005 که نسبت به ضریب پسای فشاری عددی بسیار کوچک است.



شکل ۴-۱۴: ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۱ قطر دیسک



شکل ۴-۱۵: ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۲ قطر دیسک



شکل ۴-۱۶: ضریب پسای فشار ایجادشده روی دیسک با اندازه سوراخ ۰/۳ قطر دیسک

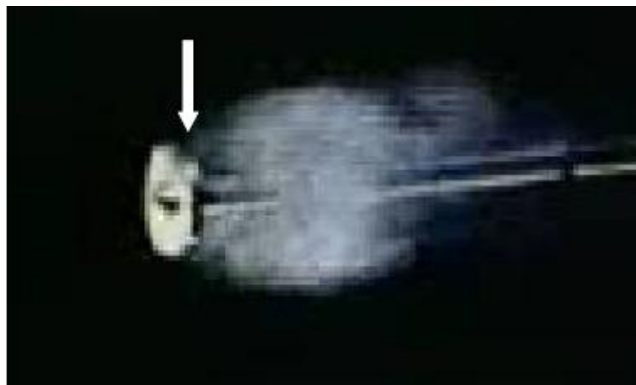
۴-۷- کسر حجمی بخار

یکی از پارامترهای مهم در جریان ابرکاواک نرخ تولید بخار \dot{m}_v است. وقتی که سرعت جریان سیال افزایش یابد یا سرعت حرکت جسم در سیال افزایش یابد حجم بخار تولیدشده افزایش خواهد یافت. در این حالت قسمت زیادی از کاواک‌زا (غیر از ناحیه برخورد سیال) و تمام جسمی که کاواک‌زا روی آن قرار دارد مانند یک اژدر، هیچ‌گونه تماسی با سیال نخواهد داشت و در هاله‌ای از بخار غوطه‌ور خواهد ماند (اعداد کاواک‌زایی خیلی کوچک). در این حالت نیروی پسای کلی (نیروی پسای فشاری و اصطکاکی) در حالت کمینه قرار می‌گیرد.

۴-۷-۱- نتایج نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۲

با بررسی کاواک ایجادشده در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ مشاهده می‌نماییم که مدل آشفتگی SST k- ω جریان جت بازگشتی را در اعداد کاواک‌زایی پایین پیش‌بینی می‌نماید. اما به طور کلی جریان جت بازگشتی ضعیفی را پیش‌بینی می‌کند همچنین این مدل مکانیزم ناپایداری و جدایش کاواک‌زایی در

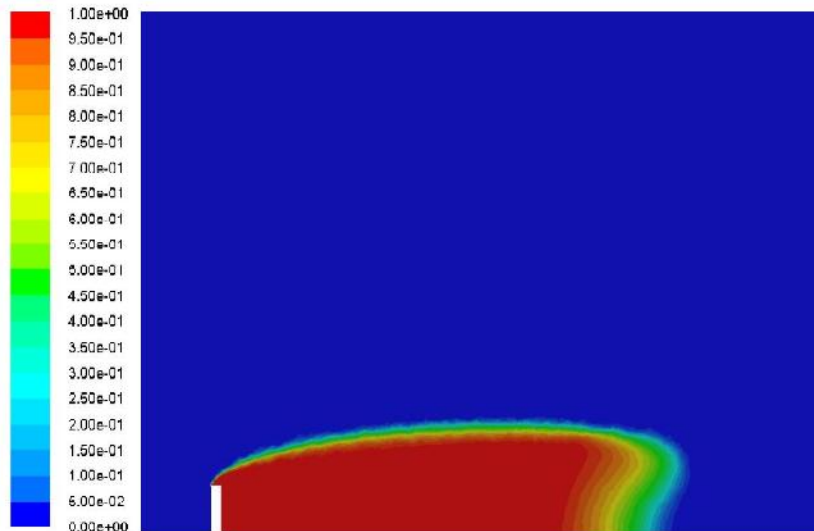
انتهای کاواک را نشان نمی‌دهد. با توجه به تست‌های آزمایشگاهی انجام شده که در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است، در این رنج از اعداد کاواک‌زایی کاواک از لبه دیسک جدا می‌گردد. کاواک نشان داده شده در شکل ۴-۱۸ توسط این مدل آشفتگی همواره به دیسک چسبیده است و پدیده جدایش و کنده شدن کاواک را ردگیری نمی‌کند. از دیگر ضعف‌های این مدل اغتشاشی عدم بررسی صحیح فشار می‌باشد. چرا که با توجه به مرجع [۵۱] مکانیزم ایجاد ضربه ناشی از فروپاشی و سپس میعان سریع بخار درون کاواک در کانتور فشار قابل رویت می‌باشد اما این مدل اغتشاشی این مورد را به خوبی گزارش نکرده است (شکل ۴-۱۱).



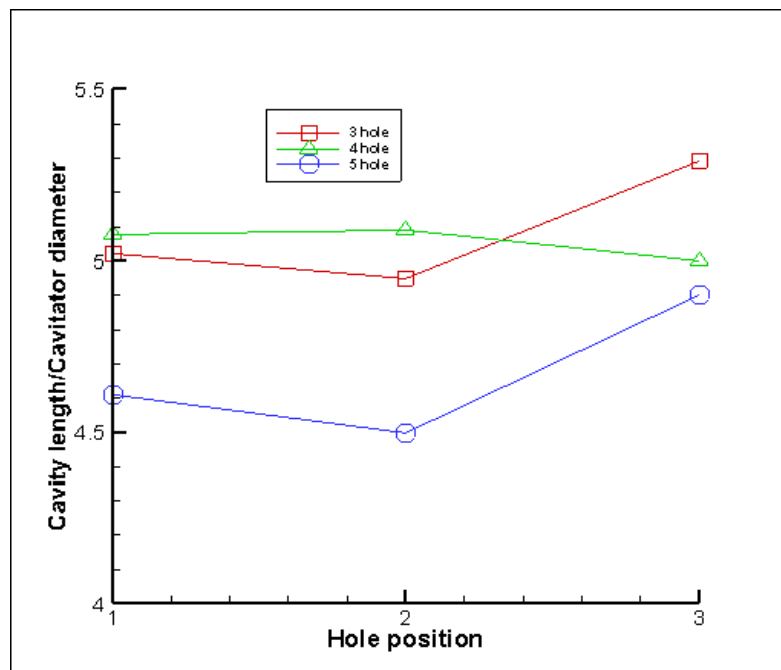
شکل ۴-۱۷: ابر کاواک شکل گرفته پشت دیسک در تست آزمایشگاهی [۵۱]

با توجه به شکل ۴-۱۹ و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان ابر کاواک روی کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های غیر هم مرکز مشاهده می‌کنیم که کاواک‌زای دیسکی شماره ۳ بیشترین طول کاواک را ایجاد نموده است و با توجه به شکل ۴-۲۱ کمترین طول کاواک ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی شماره ۲۴ می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۲۰ و شکل ۴-۲۱ و نتایج بدست آمده بیانگر این امر است که با کاهش سطح برخورد موثر سیال با کاواک‌زای سوراخ‌دار به خاطر افزایش تعداد و قطر سوراخ‌ها روی دیسک، مقدار ضریب پسای فشاری موثر در ایجاد منطقه کم‌فشار پشت دیسک کمتر شده که باعث می‌شود منطقه گردابه‌ای پشت دیسک کوچکتر و در نتیجه مقدار حجم بخار ایجاد شده و در نتیجه طول کاواک کوچکتر شود. کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ به دلیل سطح برخورد موثر بیشتر جریان

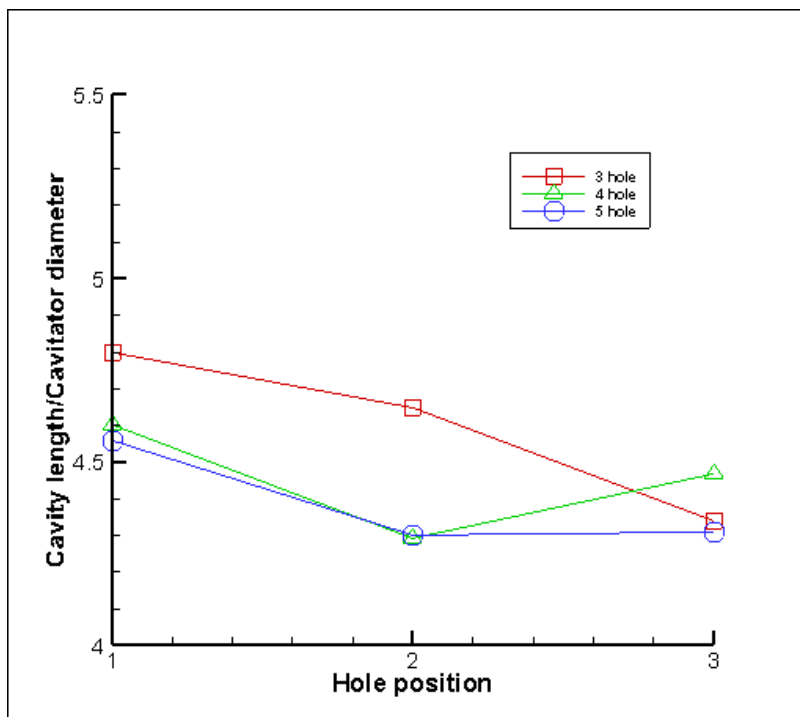
دارای ضریب پسای فشاری موثر بزرگتری است پس کاواک‌زای سوراخ‌دار در مقایسه با کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ، طول کاواک کمتری را ایجاد خواهد نمود.



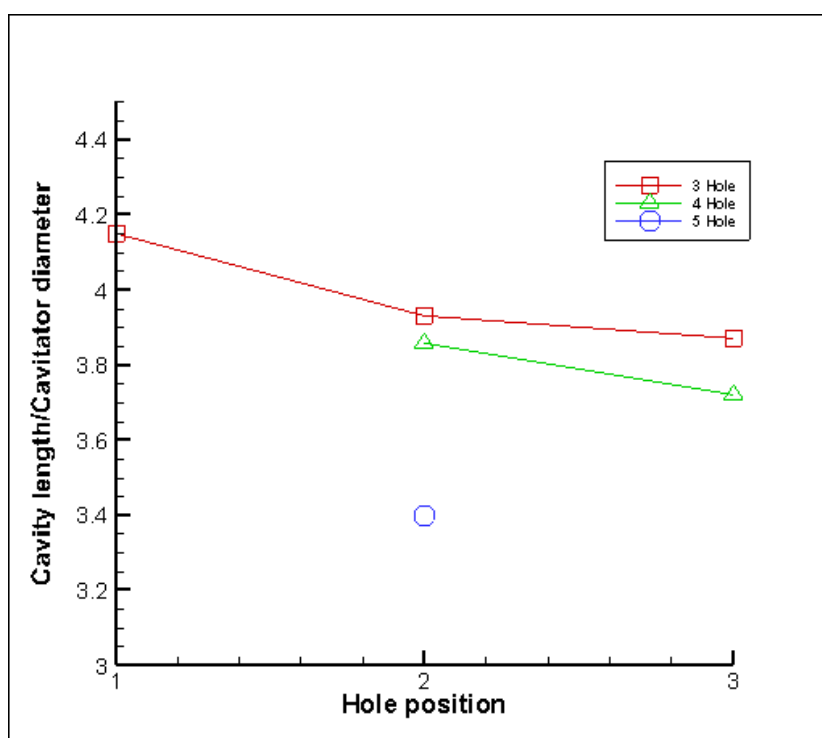
شکل ۴-۱۸: کاواک تشکیل شده در پشت کاواک‌زای شماره ۳ در عدد کاواک‌زایی ۰/۲



شکل ۴-۱۹: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۱ قطر دیسک



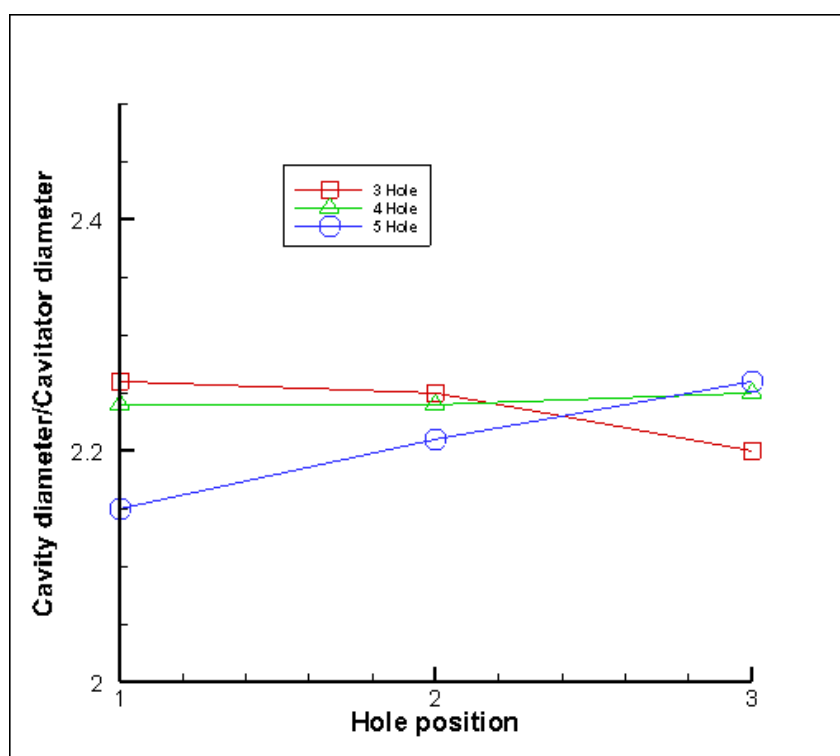
شکل ۴-۲۰: نسبت طول کاواک به قطر کاواک زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۲ قطر دیسک



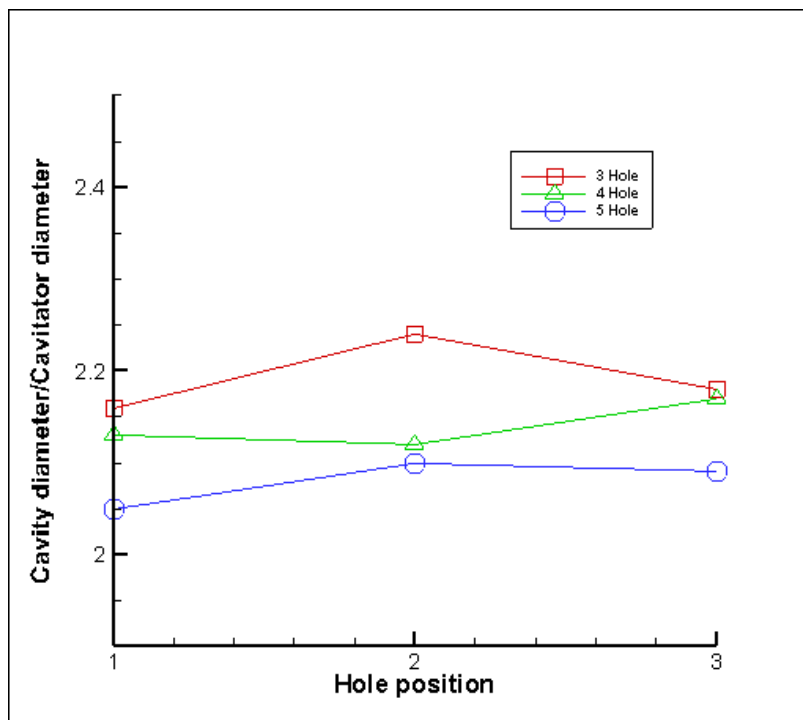
شکل ۴-۲۱: نسبت طول کاواک به قطر کاواک زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۳ قطر دیسک

۴-۷-۲- نتایج نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۲

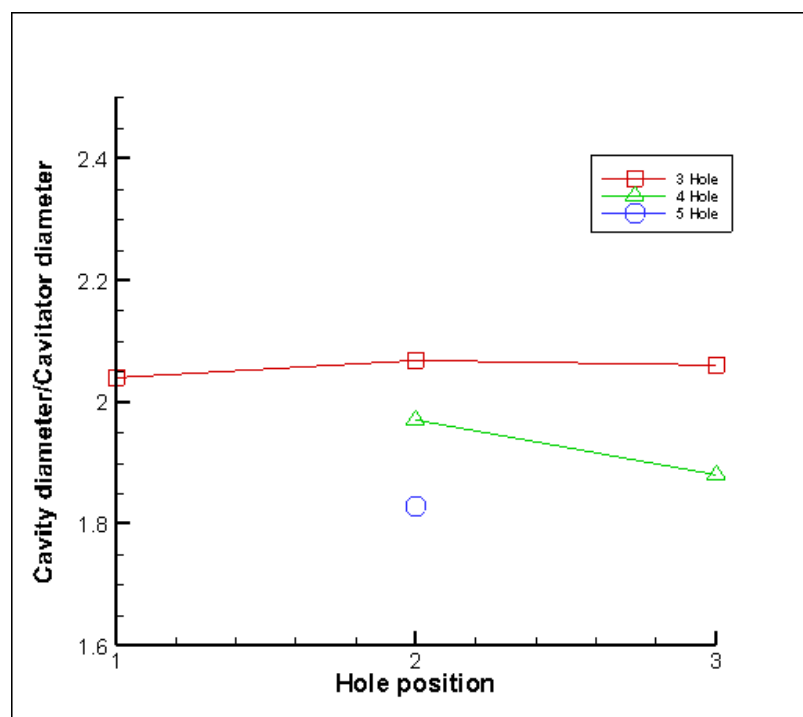
با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان ابرکاواک روی کاواک‌زای دیسکی با سوراخ‌های غیر هم مرکز، در شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌کنیم که کاواک‌زای دیسکی شماره ۱ بیشترین قطر کاواک را ایجاد نموده است و با توجه به شکل ۴-۲۴ کمترین قطر کاواک ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی شماره ۲۴ می‌باشد. نتایج به دست آمده بیانگر این امر است که با افزایش تعداد و قطر سوراخ‌ها روی دیسک باعث کاهش سطح برخورد موثر سیال با کاواک‌زا، در نتیجه ضریب پسای فشاری موثر جهت ایجاد منطقه کم‌فشار در پشت دیسک کاهش یافته و قطر کاواک کمتری ایجاد می‌شود (شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۲۴). همانطور که قبلاً بیان شد در کاواک‌زای شماره ۲۴ سطح برخورد موثر سیال کاهش یافته است، که ضریب پسای فشاری موثر برای ایجاد منطقه کم‌فشار روی این کاواک‌زا کاهش یافته است و این موضوع عاملی برای تاخیر در شروع پدیده کاواک‌زایی و ایجاد کاواکی با طول و قطر کمتر است.



شکل ۴-۲۲: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۱ قطر دیسک



شکل ۴-۲۳: نسبت قطر کاواک به قطر سوراخ ۰/۲ قطر دیسک با قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۲ قطر دیسک



شکل ۴-۲۴: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا روی دیسک با قطر سوراخ ۰/۳ قطر دیسک

۴-۸- نتایج حاصله در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵

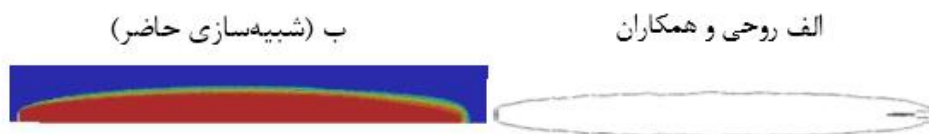
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان ابر کاواک در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵ برای کاواک‌زای

دیسکی شماره ۳ ارائه می شود. جهت بررسی کارکرد کاواک زای انتخاب شده، نتایج کاواک زای سوراخ دار را با نتایج کاواک زای دیسکی بدون سوراخ مقایسه می نمایم.

۴-۸-۱- فرایند رشد ابر کاواک

در ادامه مشخصات ابر کاواک ایجاد شده پشت کاواک زای دیسکی را در عدد کاواک زایی ۰/۰۵ بررسی می کنیم. مدل اغتشاشی $SST k - \omega$ و مدل اغتشاشی شبیه سازی گردابه های بزرگ که در مرجع [۵۱] به همراه مدل انتقال جرم (مدل کاواک زایی) سوئر_اسکندر به کار برده شده است را با هم مقایسه می کنیم. با مقایسه بین دو مدل آشفتگی به کار برده شده در عدد کاواک زایی ۰/۰۵ مشاهده می کنیم که مدل اغتشاشی $SST k - \omega$ که در این تحقیق استفاده شده است تشکیل جت بازگشتی را نمی تواند مدل نمایند و با توجه به

شکل ۴-۲۵ جت بازگشتی به طور کامل از بین رفته است. اما مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ به همراه مدل انتقال جرم سوئر_اسکندر، توانایی مدل سازی جریان جت بازگشتی را داراست. البته جریان جت بازگشتی با کاهش عدد کاواک زایی کم می شود ولی به طور کامل از بین نمی رود.



شکل ۴-۲۵: ابر کاواک شکل گرفته پشت دیسک : (الف) مدل آشفتگی شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل

انتقال جرم سوئر_اسکندر (ب) مدل آشفتگی $SST k - \omega$ و مدل انتقال جرم سوئر_اسکندر

با بررسی جریان ابر کاواک پشت کاواک زای دیسکی سوراخ دار مشاهده می شود که از زمان ۰/۱۴ ثانیه به بعد ابر کاواک پایدار تشکیل شده و نزدیک دیسک کاواکی تمیز و شفاف شکل می گیرد و با دور شدن از دیسک به ضخامت مرز ابر کاواک افزوده می شود. با گذشت زمان فقط مرز ابر کاواک و ناحیه انتهایی جریان تغییر شکل دارد و در لحظات پایانی ضخامت مرز ابر کاواک، در نواحی بسته شدن خود را به

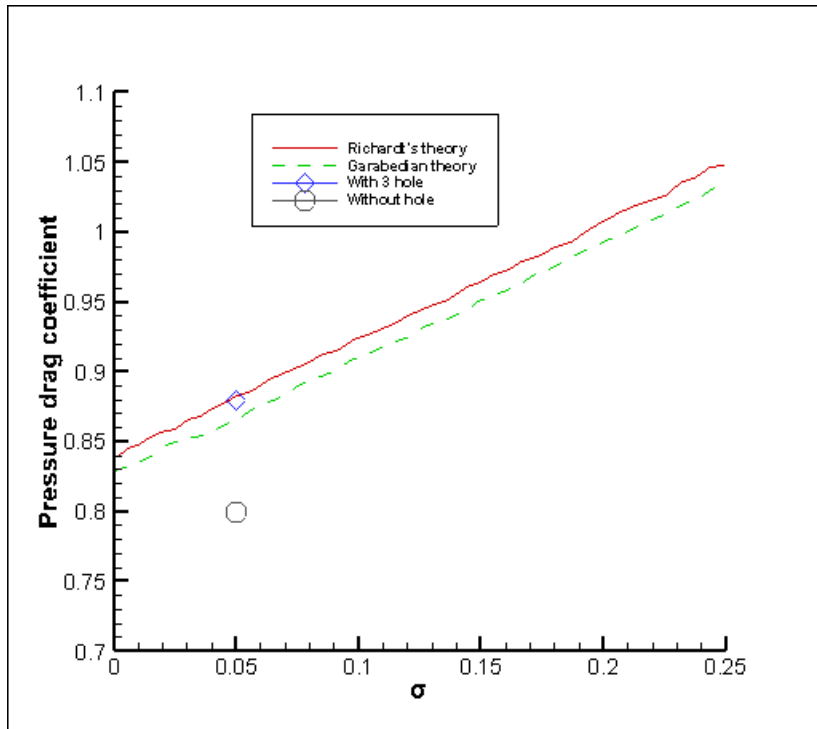
صورت مرزی مشخص نشان می‌دهد. در شکل ۴-۲۶ ابرکاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زای دیسکی در تست آزمایشگاهی را مشاهده می‌کنیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاواک‌های کوچکی به علت پدیده جت بازگشتی از ناحیه انتهایی ابرکاواک جدا می‌شود که در شبیه‌سازی حاضر این کاواک‌های جدا شده را مشاهده نمی‌کنیم

نتایج بدست آمده از کاواک‌زای شماره ۳ مانند ضریب پسای فشاری، طول و قطر ابرکاواک به ترتیب در شکل ۴-۲۷ الی شکل ۴-۲۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده به مشخصات ابرکاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ نزدیک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم این کاواک‌زا در مقایسه با بقیه کاواک‌زاهای عملکرد بهتری در ایجاد ابرکاواکی پایدار داشته است. مقدار ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی این کاواک‌زا به دلیل ایجاد ضریب پسای فشاری محلی نزدیک سوراخ نسبت به حالت بدون سوراخ بزرگ‌تر است، اما سطح برخورد موثر سیال در این کاواک‌زا کمتر است که باعث ایجاد ضریب پسای فشاری موثر کمتری برای ایجاد منطقه کم‌فشار در پشت دیسک می‌شود که باعث می‌شود کاواکی با طول و قطر کوچک‌تر را داشته باشیم.

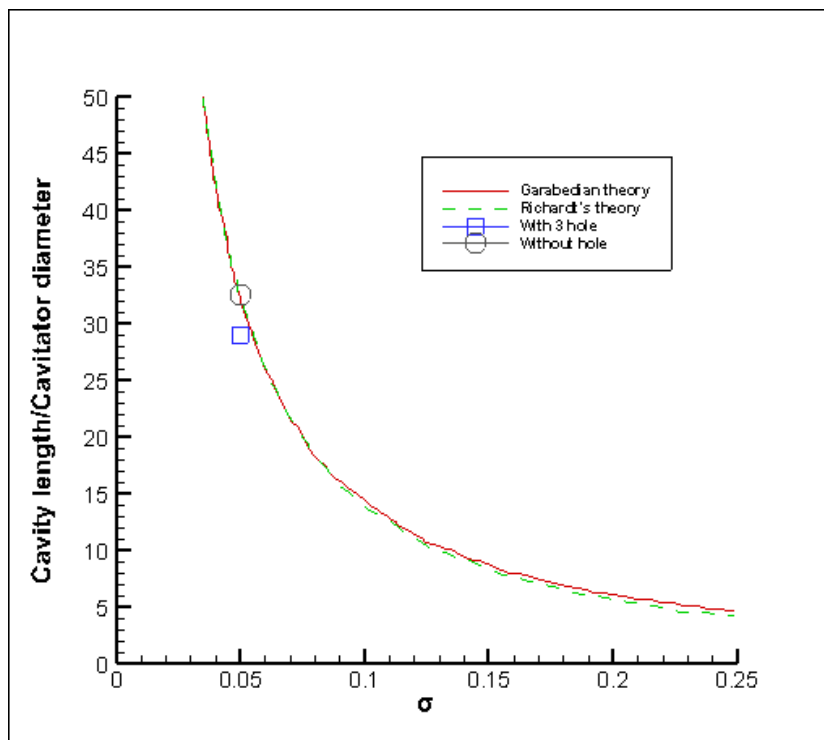
مقدار ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی، به علت کاهش فشار بالادست جریان کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. همان‌طور که قبلاً هم گفته شده بود با این کار قصد داریم اختلاف فشار جلو و پشت دیسک را کاهش دهیم و به ابرکاواکی بزرگ و پایدار دست پیدا کنیم.



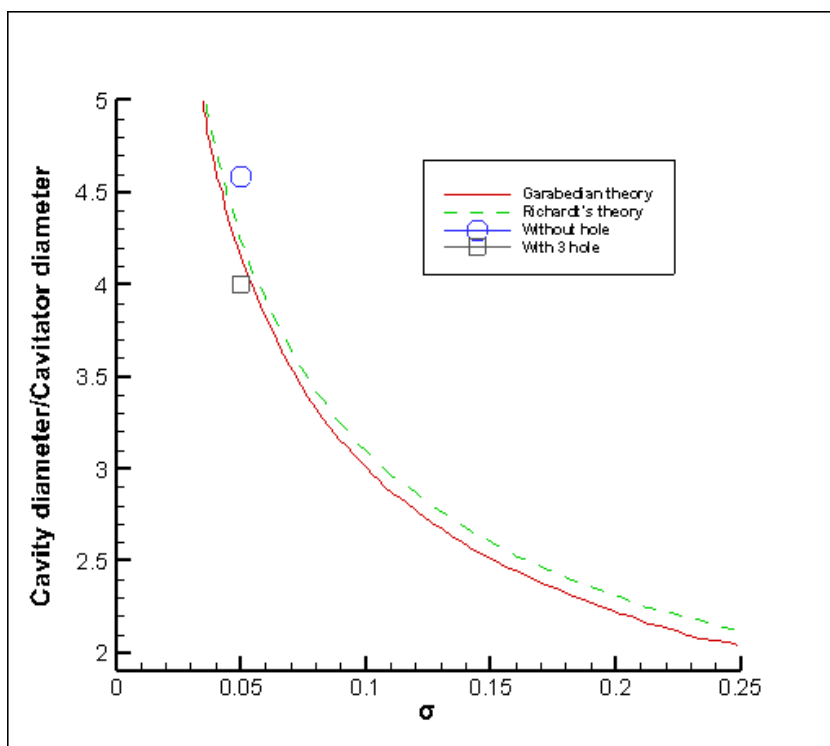
شکل ۴-۲۶: تست تجربی ابرکاواک پشت کاواک‌زای دیسکی [۵۱]



شکل ۴-۲۷: ضریب پسا فشاری در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵



شکل ۴-۲۸: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵

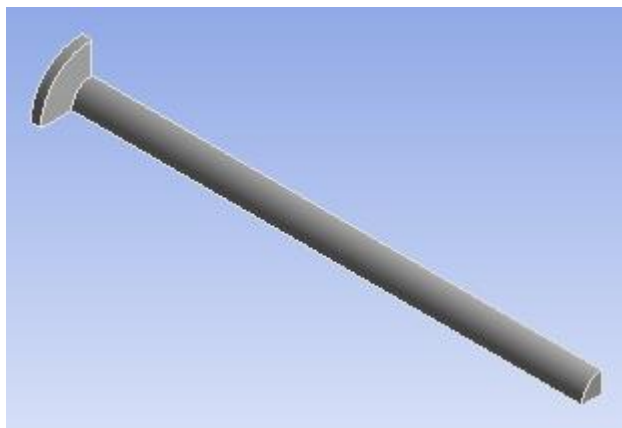


شکل ۴-۲۹: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵

۴-۹- نتایج شبیه‌سازی جریان پشت دیسک همراه با میله استوانه‌ای

در این قسمت جریان کاواک‌زایی در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ را پشت کاواک‌زای دیسکی به همراه میله استوانه‌ای به قطر ۰/۴ قطر کاواک‌زا و به طول پنج برابر قطر کاواک‌زا بررسی می‌کنیم. این شبیه‌سازی روی چهار کاواک‌زا با محل قراگیری سوراخ در موقعیت ۳ که دورترین فاصله از مرکز دیسک است و دارای قطری برابر با ۰/۱ قطر کاواک‌زا می‌باشد، انجام گرفته است که به ترتیب زیراند:

- دیسک بدون سوراخ (یک سوم میدان حل کلی مدل شده است)
- دیسک دارای سه سوراخ
- دیسک دارای چهار سوراخ
- دیسک دارای پنج سوراخ



شکل ۴-۳۰: دیسک بدون سوراخ همراه به میله استوانه‌ای پشت آن

با توجه به نتایج شبیه‌سازی که در این قسمت انجام گرفته است مشاهده نمودیم که کاواک شکل گرفته به طور کامل جسم استوانه‌ای پشت دیسک را در بر نگرفته است. در این حالت مقداری نیروی پسای اصطکاکی روی بدنه جسم ایجاد می‌شود اما در مقابل نیروی پسای فشاری بسیار ناچیز می‌باشد. اگر شبیه‌سازی در اعداد کاواک‌زایی کوچک انجام شود طول و عرض کاواک ایجاد شده به قدری است که تمام جسم پشت کاواک‌زا را در بر می‌گیرد، لذا می‌توان به این نکته پی برد که با ایجاد پدیده کاواک‌زایی در اجسامی همانند اژدرها و زیردریایی‌ها می‌توان نیروی پسای اصطکاکی را به حداقل یا صفر رساند.

با مقایسه کاواک تشکیل شده پشت کاواک‌زای دیسکی و کاواک‌زای دیسکی همراه با میله استوانه‌ای مشاهده می‌گردد که حجم بخار تشکیل شده در پشت دیسک تنها بیشتر از دیسک همراه با میله استوانه‌ای می‌باشد. با توجه به اینکه پدیده کاواک‌زایی به دلیل افت فشار تا فشار بخار اشباع اتفاق می‌افتد، اختلاف فشار در جلو و پشت دیسک تنها بیشتر از کاواک‌زای همراه با میله استوانه‌ای بوده و منطقه گردابه‌ای بیشتری را ایجاد می‌کند که این عامل باعث می‌شود احتمال رخداد پدیده کاواک‌زایی و ایجاد کاواک بیشتر شود. با توجه به شکل ۴-۳۱ و شکل ۴-۳۲ هنگامی که پشت دیسک میله استوانه‌ای را قرار می‌دهیم، با این کار اختلاف فشار بین جلو و پشت دیسک را کم می‌کنیم (با قرار دادن میله استوانه‌ای منطقه کم فشار پشت دیسک را کاهش می‌دهیم) که این کار، عاملی جهت مقاومت در برابر

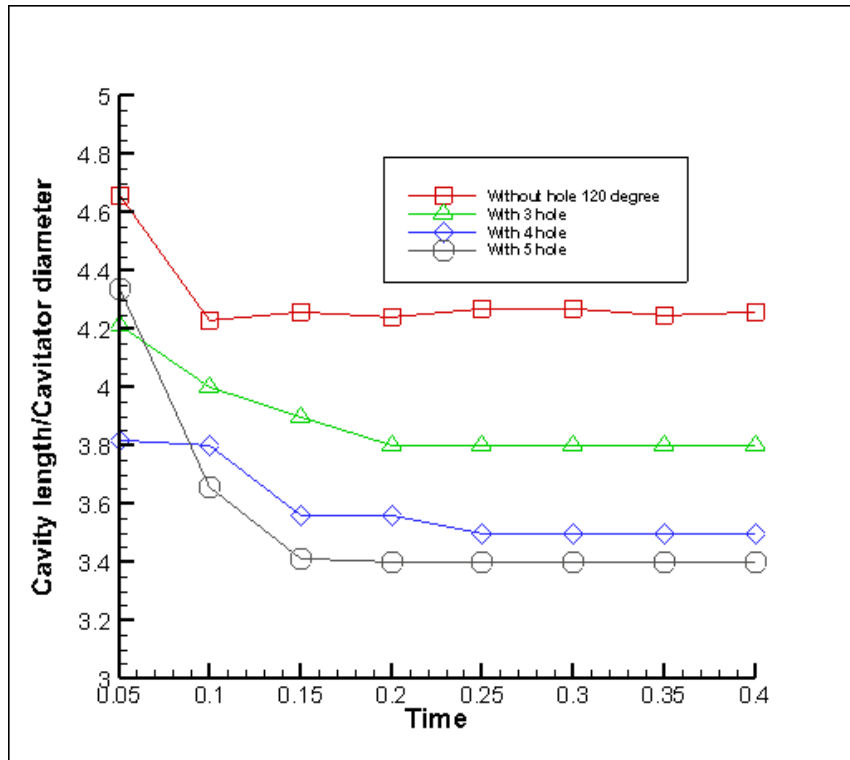
ایجاد پدیده کاواک‌زایی است که باعث تشکیل حجم بخار کمتر یعنی طول و قطر کاواک کوچک‌تر می‌شود.

همانطور که پیشتر گفته شد، با افزایش مقدار ضریب پسای فشاری، اختلاف فشار جلو و پشت کاواک‌زای دیسکی افزایش یافته پس منطقه کم فشار بزرگتری پشت دیسک شکل می‌گیرد که با شرایط گفته شده کاواک‌زای بدون سوراخ دارای طول و قطر بیشتری نسبت به سایر کاواک‌زاهای می‌باشد.

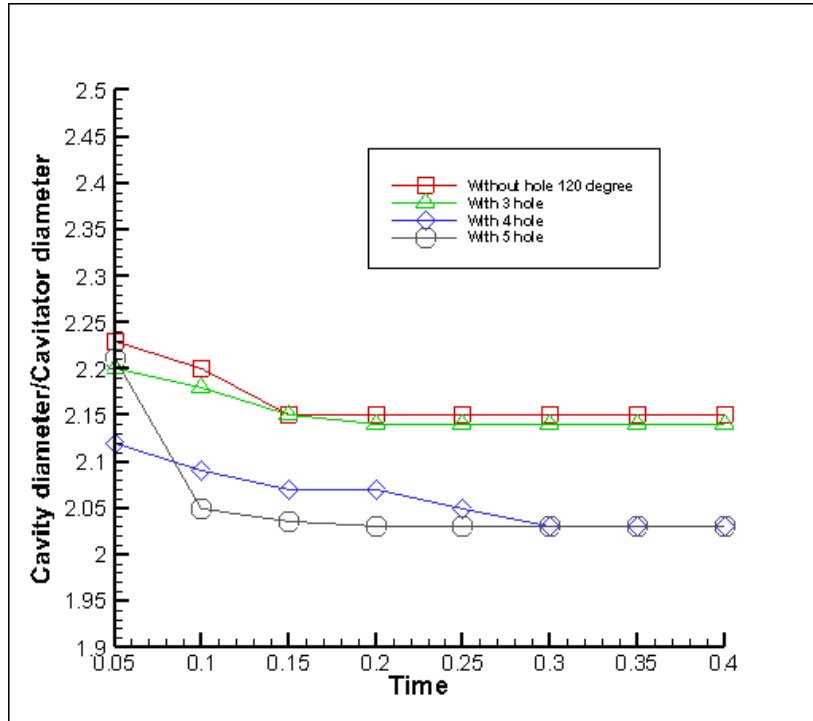
با توجه به شکل ۴-۳۳ ضریب پسای فشاری روی کاواک‌زای بدون سوراخ از بقیه کاواک‌زاهای کمتر شده است. وقتی روی کاواک‌زای سوراخ ایجاد می‌کنیم به هنگام عبور جریان سیال از داخل سوراخ به صورت محلی ضریب پسای فشاری افزایش می‌یابد که افزایش محلی ضریب پسای فشاری تأثیری در طول و قطر کاواک نخواهد داشت. سطح موثر برخورد جریان با کاواک‌زای بدون سوراخ بیشتر از کاواک‌زاهای دیگر می‌باشد و با افزایش تعداد سوراخ، مقدار سطح موثری که سیال با آن برخورد دارد کاهش می‌یابد. هرچه سطح برخورد موثر بیشتر باشد مقدار اختلاف فشار جلو و پشت دیسک بیشتر شده لذا ضریب پسای فشاری اعمال شده بر روی کاواک‌زای بیشتر است و کاواکی با طول و قطر بزرگ‌تر خواهیم داشت.

۴-۱۰- بررسی جریان ابرکاواک روی اژدر در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵

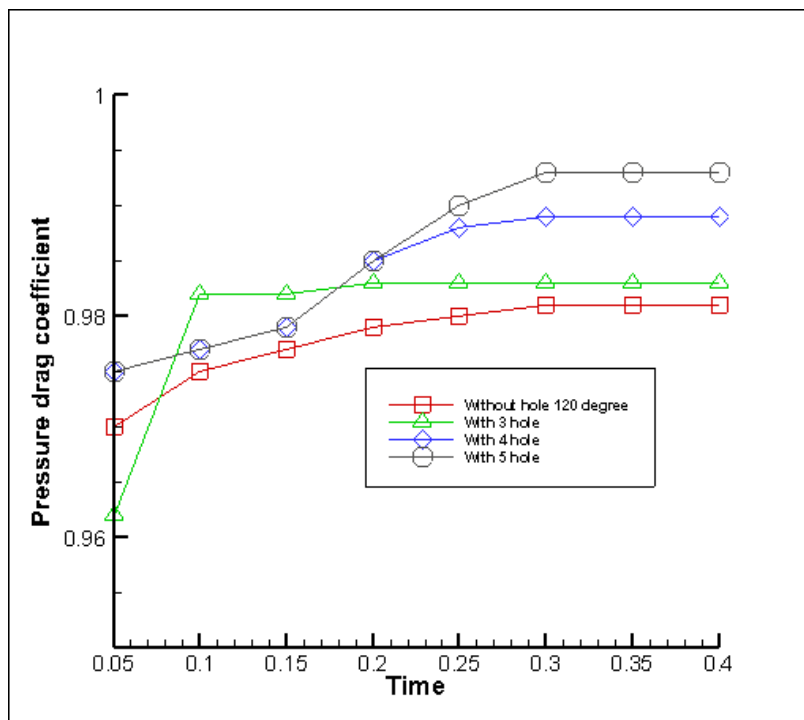
در ادامه بحث جهت بررسی تأثیر کاواک‌زای سوراخ‌دار روی مشخصه‌های جریان کاواک‌زایی شامل طول و قطر ابرکاواک و ضریب پسای فشاری اعمال شده، کاواک‌زای بدون سوراخ و کاواک‌زای شماره ۶ را به همراه جسمی همانند یک اژدر، در یک چهارم میدان حل در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵ بررسی می‌کنیم. ابعاد اژدر در شکل ۴-۳۴ و ابعاد میدان حل مانند شکل ۴-۲ است.



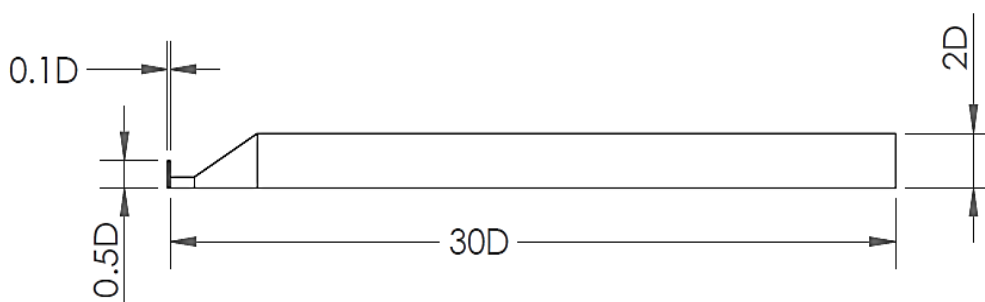
شکل ۳۱-۴: نسبت طول کاواک به قطر کاواک‌زا برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای



شکل ۳۲-۴: نسبت قطر کاواک به قطر کاواک‌زا برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای



شکل ۴-۳۳: ضریب پسای فشاری برای کاوک‌زای دیسکی با میله استوانه‌ای



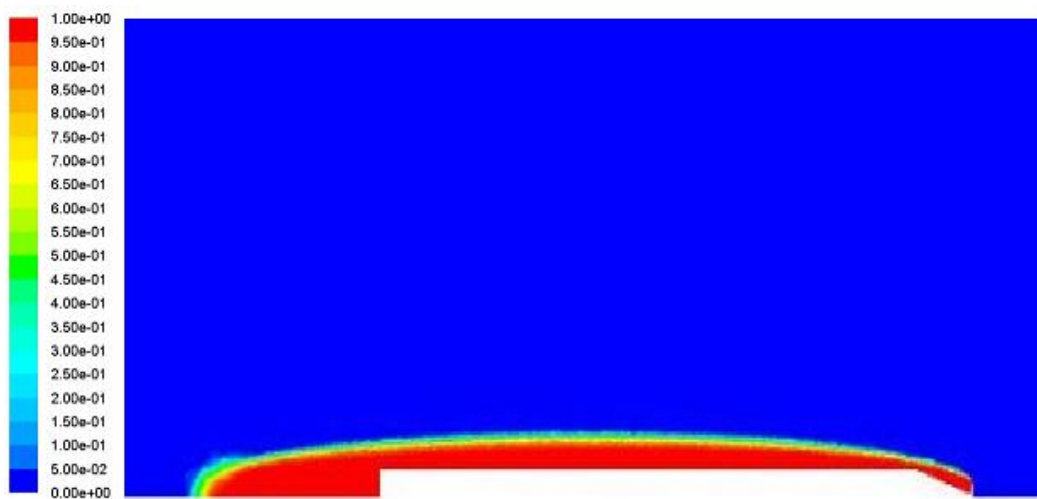
شکل ۴-۳۴: ابعاد اژدر مورد بررسی در عدد کاوک‌زایی ۰/۰۵

۴-۱۰-۱ - شکل‌گیری ابرکاواک

نمایی از ابرکاواک شکل گرفته روی اژدر با کاوک‌زای دیسکی بدون سوراخ در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است. ابرکاواک دائمی در زمان ۱۶۰ میلی ثانیه شکل می‌گیرد و پس از آن فقط در ناحیه جت بازگشتی تغییرات داریم. مدل آشفتگی SST $k - \omega$ در اوایل تشکیل ابرکاواک جریان جت بازگشتی را پیش‌بینی می‌نماید اما با گذشت زمان پدیده جت بازگشتی در انتهای ابرکاواک قابل مشاهده نیست. همانطور که قبلاً هم بیان شده بود، مقدار پدیده جت بازگشتی با کاهش عدد کاوک‌زایی کاهش پیدا

می‌کند، اما به طور کامل از بین نمی‌رود.

روند تشکیل ابرکاواک روی اژدر بدین صورت است که پس از برخورد جریان سیال به کاواک‌زای دیسکی ابتدا گردابه‌های کوچکی پشت دیسک، پشت بدنه اژدر و ابتدای بدنه اژدر بعد از سطح شیب‌دار ایجاد می‌گردد. سپس کاواک شکل گرفته در پشت دیسک بزرگ‌تر شده و روی سطح اژدر را می‌پوشاند. از طرفی کاواک شکل گرفته پشت بدنه اژدر ابتدا بزرگ شده و سپس با گذشت زمان کوچکتر می‌شود و در زمان ۱۲۰ میلی ثانیه این دو گردابه با هم ترکیب شده و تمام سطح اژدر را پوشش می‌دهند. بعد از ترکیب این دو گردابه همچنان که ابرکاواک در حال رشد است جریان جت بازگشتی شکل می‌گیرد و سپس با گذشت زمان جریان جت بازگشتی بسیار ناچیز می‌شود و در نهایت از بین می‌رود.



شکل ۴-۳۵: ابرکاواک شکل گرفته روی اژدر با کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ

پس از انجام شبیه‌سازی روی اژدر با کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ و کاواک‌زای سوراخ‌دار، مشاهده کردیم که ابرکاواک شکل گرفته تمام جسم را در بر گرفته است به گونه‌ای است که میزان ضریب پسای اصطکاکی بسیار ناچیز است و در مقابل ضریب پسای فشاری صرف‌نظر می‌شود. در هر دو نمونه لبه تیز بدنه اژدر تاثیر زیادی در تشکیل ابرکاواک روی بدنه اژدر دارد. مقدار ضریب پسای فشاری روی کاواک‌زای بدون سوراخ که در تماس مستقیم با آب قرار دارد بیشتر است. این کاواک‌زا نسبت به کاواک‌زای دیسکی سوراخ‌دار (فقط کاواک‌زا در تماس مستقیم با جریان سیال است) دارای سطح موثر برخورد بیشتری

است پس فشار ایجاد شده روی این کاواک‌زا بیشتر از نوع سوراخ‌دار آن می‌باشد، لذا ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی این کاواک‌زا نیز بیشتر می‌شود که به همین دلیل ابر کاواک تشکیل شده در پشت این کاواک‌زا دارای طول و قطر بزرگتری می‌باشد.

با ایجاد سوراخ روی دیسک تلاش بر آن است تا میزان اختلاف فشار در جلو و پشت دیسک را کاهش دهیم. با ورود جریان سیال به پشت کاواک‌زای دیسکی این امر تحقق می‌یابد. اما اطراف سوراخ‌های ایجاد شده فشار به صورت موضعی بالا می‌رود و همین امر باعث می‌شود تا مقدار ضریب پسای فشاری در این کاواک‌زا نیز افزایش یابد ولی همانطور که در جدول ۳-۴ مشاهده می‌کنید مقدار ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی این کاواک‌زا کوچک‌تر از ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ است.

جدول ۳-۴: مشخصه‌های جریان ابر کاواک شکل گرفته در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵

	L/d	D/d	$F_D(N)$	C_{dp}	C_{df}
اژدر با کاواک‌زای بدون سوراخ	۴۰/۸۷	۴/۸۵	۹۰/۰۴۸	۰/۲۲۲	۰/۰۰۳۵
اژدر با کاواک‌زای سوراخ‌دار	۳۶/۸	۴/۳	۸۵/۴۵۶	۰/۲۱۱	۰/۰۰۴
اژدر بدون کاواک‌زا	۳۲/۱	۴/۹۲	۸۶/۸	۰/۲۱۴	۰/۰۱

فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، پدیده کاواک‌زایی بر روی هندسه سه‌بعدی کاواک‌زای دیسکی سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیر هم‌مرکز و اژدر همراه با کاواک‌زای دیسکی سوراخ‌دار بررسی شده است. هدف اصلی تحقیقات انجام شده در این پایان‌نامه، مطالعه و بررسی تأثیر سایز (قطر) و جانمایی سوراخ‌های غیر هم‌مرکز بر طول و قطر کاواک ایجادشده، همچنین مقدار ضریب پسا روی کاواک‌زا می‌باشد. برای شبیه‌سازی پدیده کاواک‌زایی از نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل آشفتگی $k-\omega$ SST، مدل چند فازی مخلوط، همچنین مدل کاواک‌زایی سوئر-اسکتر استفاده می‌نمائیم. این تحقیق در دو عدد کاواک‌زایی ۰/۲ و ۰/۵ انجام شده است.

ابتدا با ایجاد سوراخ‌هایی با قطر و جانمایی متفاوت بر روی کاواک‌زای دیسکی، جریان کاواک‌زایی را در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ بررسی و از بین کاواک‌زاهای مورد مطالعه، کاواک‌زای شماره ۳ که مشخصات ابرکاواک مد نظر را بهتر از بقیه کاواک‌زاهای تولید می‌کرد، انتخاب کردیم. پدیده کاواک‌زایی را در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵ روی کاواک‌زای شماره ۳ بررسی کردیم و مشخصات ابرکاواک تشکیل شده مانند طول و قطر کاواک و ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای سوراخ‌دار را با مشخصات ابرکاواک تشکیل شده روی کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ مقایسه کردیم، که نتایج بدست آمده تطابق خوبی با آن داشت.

با بررسی مقادیر طول و قطر کاواک ایجاد شده روی کاواک‌زای سوراخ‌دار و بدون سوراخ مشاهده می‌شود که این دو پارامتر برای کاواک‌زای بدون سوراخ بزرگ‌تر از کاواک‌زای سوراخ‌دار است و هرچه تعداد سوراخ و قطر سوراخ‌های ایجاد شده روی دیسک بیشتر می‌شود مقادیر این دو مشخصه ابرکاواک کاهش می‌یابد. اما ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای دیسکی سوراخ‌دار بیشتر از کاواک‌زای بدون سوراخ است.

در ادامه بحث پدیده کاواک‌زایی روی کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ و کاواک‌زای سوراخ‌دار همراه

با یک میله استوانه‌ای در پشت کاواک‌زا را در عدد کاواک‌زایی ۰/۲ بررسی کردیم. بررسی‌ها نشان داد که مقدار طول و قطر کاواک روی کاواک‌زای دیسکی تنها بیشتر از کاواک‌زادیسکی همراه با میله‌استوانه‌ای است. همچنین طول و قطر کاواک روی کاواک‌زای دیسکی بدون سوراخ بزرگ‌تر از کاواک‌زای سوراخ‌دار است اما ضریب پسای فشاری با افزایش تعداد سوراخ افزایش می‌یابد.

پدیده ابرکاواک بر روی یک نمونه اژدر دریایی با ابعاد واقعی همراه با کاواک‌زای دیسکی سوراخ‌دار و بدون سوراخ در عدد کاواک‌زایی ۰/۰۵ بررسی شده است. ابرکاواک تشکیل شده روی اژدر، تمام اژدر را دربر می‌گیرد اما در حالت استفاده از کاواک‌زای سوراخ‌دار طول و قطر ابرکاواک کاهش پیدا می‌کند ولی ضریب پسای فشاری ایجاد شده روی کاواک‌زای سوراخ‌دار از بدون سوراخ کوچکتر است.

۵-۲- پیشنهادها

- بررسی پدیده کاواک‌زایی در اعداد کاواک‌زایی کوچک‌تر
- بررسی پدیده کاواک‌زایی روی کاواک‌زای دیسکی پخ‌دار (روی دیسک و سوراخ‌ها)
- بررسی پدیده کاواک‌زایی در حالت هوادهی اجباری
- بررسی پدیده کاواک‌زایی با مدل‌های آشفستگی و مدل‌های کاواک‌زایی مختلف
- بررسی پدیده کاواک‌زایی روی کاواک‌زای دیسکی غیر دایروی
- بررسی پایداری، ارتعاشات و صدای ایجاد شده بر روی اژدر به واسطه کاواک‌زای سوراخ‌دار

منابع و مراجع

- [۱] اکبرزاده پ.، "روش های پیش شرطی در شبیه سازی عددی جریان های کاویتاسیون"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.
- [۲] S. Park and S. H. Rhee, "Computational analysis of turbulent supercavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry," *Computers & Fluids*, vol. 70, pp. 73-85, 2012.
- [۳] اسمعیلی فر.ر.، "تحلیل جریان در ابر کاواک هوادهی شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۹.
- [۴] I. Şenocak, "Computational methodology for the simulation of turbulent cavitating flows," *University of Florida*, 2002.
- [۵] X. CHU, "Study of New Cavitator with Adjustable Drag Coefficient," *Proceedings of the Eighth International Symposium on Cavitation*, 2012.
- [۶] M. Cheng, J. Di, Z.-f. QIAN, and D.-h. FENG, "Study on cavitation flows of underwater vehicle," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 18, pp. 373-377, 2006.
- [۷] N. Nouri and A. Eslamdoost, "An iterative scheme for two-dimensional supercavitating flow," *Ocean Engineering*, vol. 36, pp. 708-715, ۲۰۰۹.
- [۸] J.-P. Franc and J.-M. Michel, *Fundamentals of cavitation* vol. 76: Springer Science & Business Media, 2006.
- [۹] عزت‌نشان ا.، "حل پیش شرطی معادلات اویلر/ناویر استوکس جهت شبیه سازی عددی جریان های کاویتاسیونی با استفاده از مدل باروتروپیک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۷.
- [۱۰] Y.-j. Gong, J.-m. Zhan, and T.-z. Li, "Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 28, pp. 431-441, 2016.
- [۱۱] L. d'Agostino and M. V. Salvetti, *Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps*: Springer Science & Business Media, 2008.
- [۱۲] طهماسبی ع.، "بررسی عددی نیروی درگ و حباب بخار سوپر کاویتاسیون بر روی کویتیتورها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شهید رجائی، ۲۰۱۰.

- [۱۳] J. Carlton, *Marine propellers and propulsion: Butterworth-Heinemann*, 2012.
- [۱۴] W. Yuan, J. Sauer, and G. H. Schnerr, "Modeling and computation of unsteady cavitation flows in injection nozzles," *Mécanique & industries*, vol. 2, pp. 383-394, 2001.
- [۱۵] طلوعیان، ا. "بررسی عملکرد تخریبی پدیده کاویتاسیون و روش های مقابله با آن در پمپ ها" اولین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و هوافضا، ۱۳۹۵.
- [۱۶] مسرور.ع. ا. "بررسی علل آسیبهای کاویتاسیون در شیرهای کنترل و ارائه راهکاری جدید و مقرون به صرفه"، اولین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و راهکارهای صنعتی، ۱۳۹۴.
- [۱۷] دارابی. م. "بررسی عددی تاثیر کاویتاسیون بر روی توربین آبی کاپلان"، کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی صنایع و مکانیک، ۱۳۹۰.
- [۱۸] B.-K. Ahn, T.-K. Lee, H.-T. Kim, and C.-S. Lee, "Experimental investigation of supercavitating flows," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 4, pp. 123-131, 2012.
- [۱۹] Y. Savchenko, "Supercavitation-problems and perspectives," <http://resolver.caltech.edu/cav2001:lecture.003>, 2001.
- [۲۰] G. Wang, I. Senocak, W. Shyy, T. Ikohagi, and S. Cao, "Dynamics of attached turbulent cavitating flows," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 37, pp. 551-581, 2001.
- [۲۱] J.-L. Reboud, B. Stutz, and O. Coutier, "Two phase flow structure of cavitation: experiment and modeling of unsteady effects," in *3rd International Symposium on Cavitation CAV1998, Grenoble, France, 1998*.
- [۲۲] Y. Chen and S. D. Heister, "A numerical treatment for attached cavitation," *Journal of fluids engineering*, vol. 116, pp. 613-618, 1994.
- [۲۳] J. Feng and C. L. Merkle, "Numerical modeling of the thermodynamic effects of cavitation," *Journal of fluids engineering*, vol. 119, p. 421, 1997.
- [۲۴] Y. Dellanoy and J. Kueny, "Two phase flow approach in unsteady cavitation modeling," in *Cavitation and Multiphase Flow Forum, 1990*, pp. 153-158.
- [۲۵] Y. Ventikos and G. Tzabiras, "A numerical method for the simulation of steady and unsteady cavitating flows," *Computers & Fluids*, vol. 29, pp. 63-88, 2000.

- [۲۶] A. Kubota, H. Kato, and H. Yamaguchi, "A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section," *Journal of fluid Mechanics*, vol. 240, pp. 59-96, 1992.
- [۲۷] Y. Chen and S. Heister, "Modeling hydrodynamic nonequilibrium in cavitating flows," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 118, pp. 172-178, 1996.
- [۲۸] A. Singhal, N. Vaidya, and A. Leonard, "1997, «Multi-dimensional Simulation of Cavitating Flows Using a PDF Model for Phase Change,» ASME Paper FEDSM97-3272," 1997.
- [۲۹] C. L. Merkle, J. Y. Sullivan, P. E. Buelow, and S. Venkateswaran, "Computation of flows with arbitrary equations of state," *AIAA journal*, vol. 36, pp. 515-521, 1998.
- [۳۰] J. Sauer and G. Schnerr, "Unsteady cavitating flow—a new cavitation model based on a modified front capturing method and bubble dynamics," in *Proceedings of 2000 ASME fluid engineering summer conference*, 2000, pp. 11-15.
- [۳۱] N. Tani and T. Nagashima, "Numerical analysis of cryogenic cavitating flow on hydrofoil—comparison between water and cryogenic fluids," in *Proceedings of 4th International Conference on Launcher Technology*, 2002.
- [۳۲] H. Chao, H.-l. YANG, C.-b. ZHAO, and W.-h. HUANG, "Unsteady supercavitating flow past cones," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 18, pp. 262-272, 2006.
- [۳۳] L.-p. JIA, W. Cong, Y.-j. WEI, H.-b. WANG, J.-z. ZHANG, and K.-p. YU, "Numerical simulation of artificial ventilated cavity*," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 18, pp. 273-279, 2006.
- [۳۴] E. Amromin, "Analysis of body supercavitation in shallow water," *Ocean engineering*, vol. 34, pp. 1602-1606, 2007.
- [۳۵] X.-w. ZHANG, Y.-j. WEI, J.-z. ZHANG, W. Cong, and K.-p. YU, "Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 19, pp. 564-571, 2007.
- [۳۶] R. Shafaghat, S. Hosseinalipour, N. Nouri, and A. Vahedgermi, "Mathematical approach to investigate the behaviour of the principal parameters in axisymmetric supercavitating flows, using boundary

- element method," *Journal of Mechanics*, vol. 25, pp. 465-473, 2009.
- [۳۷] J.-J. Zhou, K.-P. Yu, J.-X. Min, and Y. Ming, "The comparative study of ventilated super cavity shape in water tunnel and infinite flow field," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 22, pp. 689-696, 2010.
- [۳۸] W. Zou, K.-p. Yu, and X.-h. Wan, "Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated supercavity," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 22, pp. 778-783, 2010.
- [۳۹] J.-j. Zhou, K.-p. Yu, M. Yang, and X.-h. Wan, "On the gas leakage way of supercavity and vehicle vibration," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 22, pp. 866-871, 2010.
- [۴۰] Y. Kaiping, Z. Jingjun, M. Jingxin, and Z. Guang, "A contribution to study on the lift of ventilated supercavitating vehicle with low Froude number," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 132, p. 111303, 2010.
- [۴۱] B.-K. Ahn, C.-S. Lee, and H.-T. Kim, "Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitators," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 2, pp. 39-44, 2010.
- [۴۲] Y. Chen, C. Lu, and X. Chen, "Quadratic and cubic eddy-viscosity models in turbulent supercavitating flow computation," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 1, p. 032006, 201۱.
- [۴۳] G. Y. Savchenko, "Hydrodynamic Characteristics of a Disc with Central Duct in a Supercavitation Flow," in *Supercavitation*, ed: Springer, 2012, pp. 107-113.
- [۴۴] Z. Hu, B. Khoo, and J. Zheng, "The simulation of unsteady cavitating flows with external perturbations," *Computers & Fluids*, vol. 77, pp. 112-124, 2013.
- [۴۵] Y. K. Kwack and S. H. Ko, "Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 5, pp. ۲۰۱۳, ۳۳۲-۳۳۵ .
- [۴۶] C. Xin, C.-j. LU, C. Ying, and J.-y. CAO, "A numerical analysis of the influence of the cavitator's deflection angle on flow features for a free moving supercavitated vehicle," *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 26, pp. 697-705, 2۰۱۴
- [۴۷] I. Rashidi, M. Pasandideh-Fard, M. Passandideh-Fard, and N. M. Nouri, "Numerical and experimental study of a ventilated supercavitating vehicle," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 136, p.

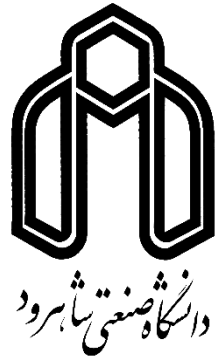
101301, 2014.

- [۴۸] S. L. Pan and Q. Zhou, "Natural Supercavitation Characteristic Simulation of Small-Caliber Projectile," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 1243-1247.
- [۴۹] Q. Meng, Z. Zhang, and J. Liu, "Numerical calculation of supercavitating flows over the disk cavitator of a subsonic underwater projectile," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 14, pp. 283-289, 2015.
- [۵۰] J.-H. Kim and B.-K. Ahn, "Numerical Simulation of Supercavitating Flows using a Viscous-Potential Method," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, p. 01212.
- [۵۱] رحیمی، ا. "شبیه سازی کاویتاسیون روی دیسک به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ و مدل باز سازی سطح (روش حجم سیال) " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.
- [۵۲] M.-R. Pendar and E. Roohi, "Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models," *Ocean Engineering*, vol. 112, pp. 287-306, 2016.
- [۵۳] E. Roohi, M.-R. Pendar, and A. Rahimi, "Simulation of three-dimensional cavitation behind a disk using various turbulence and mass transfer models," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, pp. 542-564, 2016.
- [۵۴] H. Rouse and J. S. McNown, "Cavitation and pressure distribution: head forms at zero angle of yaw," 1948.

Abstract

Cavitation is a phenomenon that occurs when the pressure of a liquid falls below the saturation vapor pressure and causes the change of liquid to vapor. This phenomenon occurs in fluid-handling machinery and has both desirable and undesirable features. Desirable features of cavitation can be utilized in applications like viscous drag reduction by microbubble generation and undesirable features such as corrosion, noise etc. Cavitator is a means that is installed on the nose of a submerged body such as a torpedo to generate supercavitation. Different kinds of cavitator are cone, hemicone, hemispherical and disk. In this thesis we used a disk cavitator with an eccentric hole to generate supercavitation. The purpose of this thesis is an investigation of the cavitation effects on the cavity length and diameters and the drag coefficient on the cavitator with different diameters and different hole positions. For simulation of the cavitation phenomenon, powerful available models in ANSYS Fluent software like $k\omega$ – SST turbulent model, multiphase mixture model and Saure-Schnerr cavitation model were used. Cavitator number 3 and 24 generate greater and smallest cavities respectively, and the latter one has a greater frictional drag coefficient. A cavitator with a hole has a less pressure drag coefficient than the one without a hole while having a cavity with a smaller length and diameter.

Keywords: Supercavitation - cavitator - Cavitation Model- $k\omega$ – SST turbulent model- multiphase mixture model



Mechatronics Engineering Faculty of Mechanical and

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Numerical simulation of Supercavitation flow over a
disk-shape cavitator with eccentric holes**

By: Mostafa Yazdani

Supervisor

Dr. Pooria Akbarzadeh

Dr. Mohammadhassan Keyhani

September 2017