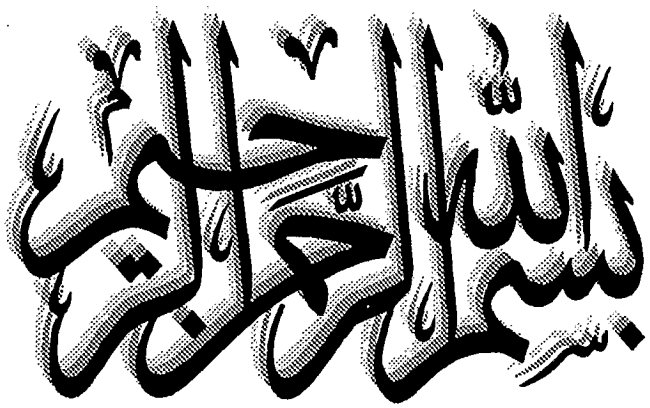

٤٧١٨٨

دانشکده فنی
گروه مکانیک

پایان‌نامه

جهت اخذ درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ مهندسی مکانیک -تبدیل انرژی

عنوان:

بررسی تقسیم یک حباب کاویتاسیون در مجاورت یک مرز صلب

استاد راهنما:
دکتر محمد تقی شروانی‌تبار

۱۳۸۲ /۶/ ۱۰

استاد مشاور:
دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

پژوهشگر:
بابک امیرکامور

خرداد ماه ۱۳۸۲

۴۷۱۵۸

تقدیم به

دو شمع فروزان:

پدرم و مادرم

که این مجموعه بازتابی از روشنایی آنهاست

تقدیر و تشکر

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت، هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون برآید مفرح ذات، پس در هر نفسی دو نعمت است و بر هر نعمتی شکری واجب.

اینک که به فضل پروردگار مهربان، پس از ماهها سعی و تلاش، نگارش این پایان‌نامه به سرانجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم در ابتدا از زحمات بیدریغ و راهنمائی‌های بسیار ارزنده استاد بزرگوار جناب آقای دکتر شروانی تبار نهایت تقدیر و تشکر بنمایم. همچنین از راهنمایی‌های استاد مشاور جناب آقای دکتر اسماعیل‌زاده کمال امتنان را دارم. همچنین بر خود واجب می‌دانم که از یاری و الطاف دوستان عزیزم بویژه جناب آقای مهندس علی توکل آقایی، جناب آقای مهندس امیرهوشنگ قدامی و جناب آقای مهندس حمید توتونکوب که به انجام رسیدن این پایان‌نامه نقش بسزائی را ایفاء نموده‌اند نهایت تقدیر و سپاسگذاری را بنمایم و در پایان از کلیه اساتید و کارکنان دانشکده فنی و تمامی دوستانی که در تکمیل کردن این پایان‌نامه سهیم بوده‌اند تشکر می‌نمایم.

بابک امیرکامور

اسفند ۱۳۸۱

نام خانوادگی: امیرکامور **نام:** بابک

عنوان پایاننامه: بررسی تقسیم یک حباب کاویتاسیون در مجاورت یک مرز صلب

استاد راهنما: دکتر محمد تقی شروانی تبار
استاد مشاور : دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** تبدیل انرژی

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فنی **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۸۲/۴/۱۱ **تعداد صفحه:** ۱۱۹

کلید واژه‌ها : کاویتاسیون- روش المان مرزی – Necking - Splitting

چکیده:

یکی از عوامل مهم در کاهش بازده و عمر تجهیزات هیدرولیکی، پدیدهٔ کاویتاسیون می‌باشد که در چند دههٔ گذشته به شدت مورد توجه محققان بوده است.

پدیدهٔ کاویتاسیون همان رشد و فروپاشی حباب‌ها می‌باشد که تحت شرایط مختلف در داخل مایعات مختلف اتفاق می‌افتد رشد و فروپاشی حبابهای کاویتاسیون در مجاورت مرزهای مختلف تا حدودی بررسی شده است و تحقیقات در این زمینه ادامه دارد. تحقیقات قبلی نشان داده است که در هنگام رشد و فروپاشی یک حباب کاویتاسیون در کنار یک سطح صلب تحت شرایط خاصی پدیدهٔ Necking و به دنبال آن پدیدهٔ تقسیم شدن حباب اتفاق می‌افتد. در این پایاننامه این پدیده‌ها و شرایط وقوع آنها و رفتار دو قسمت حباب بعد از تقسیم آن با با استفاده از روش المانهای مرزی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است وچگونگی رشد و فروپاشی حبابهای کوچکتر، تغییرات حجم حباب، تغییرات فشار داخل حباب و وضعیت مرکز حباب نسبت به زمان محاسبه شده است.

لیست نمادها

نمادهای انگلیسی

غلظت C

سرعت صوت c

انتگرال نمائی ..... E

توابع هموار ..... F

تابع گرین ..... G

شتاب ثقل ..... g

فاصله مرکز حباب از سطح آزاد،آنتالپی ..... H

فاصله مرکز حباب از سطح صلب ..... h

عدد ماخ ..... M

بردار عمود برسطح ..... n

فشار هر نقطه داخل سیال ..... P

فشاربخار اشباع ..... P_c

فشاراولیه حباب ..... P_i

فشارمایع در دیواره حباب ..... P_i

فشار در محیط بیکرانه..... P_∞

هر نقطه روی سطح حباب، شار حرارتی ..... q

شعاع حباب ..... R

ثابت گاز ..... R_g

شعاع ماکزیمم حباب ..... R_m

شعاع اولیه حباب ..... R_0

محور شعاعی در مختصات استوانه ای ..... r

سطح حباب ..... S

ظرفیت حرارتی ویژه ..... S_v

زمان بی بعد، دما ..... T

زمان ..... t

مؤلفه شعاعی سرعت ..... u

مؤلفه عمودی سرعت v

لیست نمادها

حجم حباب V

حجم اولیه حباب ..... V_i

نمادهای یونانی

زاویه دوران ..... θ

چگالی سیال ..... ρ

دامنه جریان ..... Ω

تبدیل بی بعد ..... ξ

نیروی شناوری بی بعد ..... δ

پتانسیل سرعت ..... ϕ

فاصله بی بعد اولیه مرکز حباب از سطح صلب ..... γ

فاصله بی بعد اولیه مرکز حباب از سطح آزاد ..... λ

پله زمانی ..... Δt

مؤلفه عمودی سرعت بر سطح حباب ..... ψ

زیر نویس ها

دامنه بی نهایت دور فیزیکی ..... ∞

نشانگر بتای ناقص ..... a

داخل حباب c

حالت اولی ..... i ,c

گاز ..... g

بخار v

ماکزیمم ..... m

فهرست عناوین

عناوین **صفحه**

فصل اول: مقدمه

معرفی پدیده کاویتاسیون ۲

فصل دوم: بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۲-۱پیشینه پژوهش ۱۰
۲-۲ معادلات عمومی دینامیک حباب ۲۱
۲-۳معادله دینامیکی حباب فروپاش کروی شکل ۲۳
۲-۳-۱ حباب خالی ۲۳
۲-۳-۲ حباب گاز ۲۴
۲-۳-۳ معادله مربوط به تراکم‌ناپذیری مایع ۲۶
۲-۴ اندازه‌گیری کاویتاسیون ۲۷
۲-۵ تحلیل Rayleigh برای یک حباب و گسترش آن ۳۲
۲-۵-۱ تحلیل Rayleigh برای فروپاشی یک حباب خالی ۳۲
۲-۵-۲ تحلیل Rayleigh برای رشد یک حباب ۳۸
۲-۶ پدیده Necking و تقسیم حباب ۳۹

فصل سوم: مواد و روشها

۳-۱ تابع گرین ۴۶
۳-۲ حل اساسی معادلهٔ لاپلاس ۴۹
۳-۳ فرم انتگرال گرین ۵۱
۳-۴ تقریب سازی شکل سطح، پتانسیل و مشتق عمودی آن ۵۶
۳-۴-۱ المان خطی - تابع ثابت ۵۷

۳-۴-۲ المان خطی-تابع خطی ۵۷
۳-۴-۳ المان درجهٔ دو – تابع درجهٔ دو ۵۸
۳-۴-۴ المان اسپلاین مکعبی- تابع ثابت ۵۹
۳-۵ انتگرال‌گیری عددی ۶۳
۳-۵-۱ منفرد بودن در نقطهٔ $\xi=0$ ۶۵
۳-۶ عضوهای قطری ماتریس H ۶۶
۳-۷ برنامه کامپیوتری ۶۷

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه ۷۱
۴-۲ شرایط اولیه و شرایط مرزی ۷۱
۴-۳ رشد و فروپاشی حباب در مجاورت سطح صلب و ۷۳
۴-۳-۱ نتایج رشد و فروپاشی حباب در کنار مرز صلب و ۷۴
۴-۴ وقوع پدیده Splitting در مجاورت یک مرز صلب ۹۵
۴-۴-۱ نتایج مربوط به پدیده Splitting یک حباب در مجاورت مرز صلب .. ۹۵
۴-۵ بحث و نتیجه‌گیری ۱۱۳
۴-۶ پیشنهادات برای پژوهشهای بعدی در این زمینه ۱۱۵
منابع ۱۱۸

فصل اول:

مقدمه

مقدمه :

معرفی پدیدهٔ کاویتاسیون

با پیشرفت روزافزون تکنولوژی، توجه به مسایلی که باعث کاهش بازده و عمر مفید تجهیزات می‌شوند، بیشتر شده است به دلیل هزینه‌های سنگین طراحی و ساخت مجموعه‌های بزرگ، شناخت دقیق فرآیندها و پیش‌بینی مشکلات احتمالی عملی بسیار بااهمیت می‌باشد و لذا انجام فعالیت‌های تحقیقاتی به سرعت در حال گسترش است.

یکی از عوامل مهم در کاهش بازده و عمر تجهیزات هیدرولیکی، پدیده‌ای به نام کاویتاسیون می‌باشد که در سالهای اخیر به شدت مورد توجه محققان و طراحان قرار گرفته است.

گرچه پدیدهٔ کاویتاسیون برای نخستین بار توسط نیوتن در سال ۱۷۰۴ میلادی مشاهده گردید، ولی علت اصلی بروز این پدیدهٔ مهم و نحوهٔ تخریب سطوح تا اوایل سال ۱۹۰۰ ناشناخته بود.

ارائهٔ یک تعریف مختصر و کوتاه از کاویتاسیون کاری مشکل می‌باشد. وقتی که یک ظرف حاوی سیال تحت فشار ثابت حرارت داده می‌شود و یا زمانیکه فشار آن در تحت شرایط دما ثابت کاهش می‌یابد به حالتی می‌رسیم که حبابهایی پدیدار می‌شوند و به تدریج شروع به رشد می‌کنند. رشد حبابها با آهنگ معینی ادامه پیدا می‌کند تا زمانیکه حباب به حالت انفجار یا فروپاشی برسد، اگر این روند تحت شرایط افزایش دما ادامه یابد جوشش نامیده می‌شود. ولی اگر این پدیده از کاهش فشار دینامیکی حاصل شده باشد کاویتاسیون گفته می‌شود. در واقع کاویتاسیون تشکیل حباب‌های بخار در داخل مایع در محیط‌های کم‌فشار و سپس فروپاشی و تقطیر سریع آنها در محیط‌های پرفشار می‌باشد. از لحاظ نظری کاویتاسیون در یک مایع زمانی شروع می‌شود که فشار استاتیکی متناظر با دمای مایع به فشار بخار اشباع کاهش یابد.

کاویتاسیون پدیده‌ای است که در مایعات رخ می‌دهد و در شرایط عادی به هیچ وجه در جامدات یا گازها روی نخواهد داد. از آنجا که پدیدهٔ کاویتاسیون نتیجهٔ کاهش فشار در مایعات است، می‌توان با کنترل میزان کاهش فشار مایع، تا حدی این پدیده را کنترل نمود. اگر عمل کاهش فشار تا مدت زمان معینی ادامه یابد تا اینکه به کمتر از فشار بحرانی (فشار بخار اشباع) برسد پدیدهٔ کاویتاسیون رخ خواهد داد در غیر اینصورت پدیدهٔ کاویتاسیون مشاهده نخواهد شد. کاویتاسیون یک پدیدهٔ دینامیکی است که رشد و فروپاشی حبابها ارتباط آن را بوجود می‌آورد کاویتاسیون با چشم غیرمسلح یا با دوربینهای معمولی قابل رویت نیست، چرا که این پدیده دارای سرعت بسیار بالایی می‌باشد و توسط دوربینهایی که سرعت عکسبرداری آنها آهسته‌تر از سرعت حرکت و پیدایش این پدیده است ثبت نمی‌شود. لذا برای ثبت این پدیده بایستی از فلاش‌های الکترونیکی با سرعت بسیار بالا استفاده گردد.

شروع کاویتاسیون در یک مایع ناخالص در فشارهای نزدیک به فشار بخار، احتیاج به وجود هسته‌هایی دارد که مقادیر بسیار کمی از بخار، گاز یا هر دو در آن موجود می‌باشند. کاویتاسیون تنها زمانی رخ می‌دهد که این هسته‌ها با قرار گرفتن در معرض کاهش فشار، ناپایدار شده و رشد کنند. شرایط چنین رشدی را می‌توان از تحلیل تعادل استاتیکی هستهٔ کروی به دست آورد.

پدیدهٔ کاویتاسیون بیشتر به خاطر اثرات آن مهم می‌باشد. اثراتی که اصول هیدرودینامیکی جریان سیال را تغییر می‌دهند و یا اثراتی که باعث ایجاد خرابی بر روی سطوح مرزی جامد داخل سیال می‌شوند که به تخریب کاویتاسیون (Cavitation Damage) مشهور هستند. متأسفانه برای میدان‌های هیدرودینامیکی، اثرات پدیدهٔ کاویتاسیون به غیر از چند مورد استثنائی، نامطلوب و ناخواسته می‌باشند. کاویتاسیون کنترل نشده اثرات بسیار خطرناک و پرهزینه‌ای خواهد داشت و طراحان مجبور هستند به خاطر کنترل کاویتاسیون و اثرات مخرب آن، محدودیت‌های زیادی را در طراحی ابزارهای

هیدرودینامیکی اعمال کنند. تخریب کاویتاسیون یک پدیدهٔ کاملاً قابل مشاهده با چشم می‌باشد. همهٔ مواد سخت یا نرم، ترد یا نشکن، از نظر شیمیایی فعال یا غیرفعال، در معرض تخریب کاویتاسیون قرار دارند. لاستیک‌ها، پلاستیک‌ها، شیشه، کوارتز، بتن و سایر جامدات غیرفلزی نیز تحت تأثیر اثرات تخریب کاویتاسیون قرار دارند. سایش ناشی از کاویتاسیون در سازه‌های بتونی عظیم موجود در کنار دریا نیز رخ می‌دهد. نمونهٔ دیگری که می‌توان ذکر کرد پدیدهٔ کاویتاسیون در توربوماشینها می‌باشد. در انتخاب یک توربوماشین هیدرولیکی جهت حصول هد و دبی حجمی باتوجه به تعریف سرعت ویژه، بایستی حتی‌المقدور سرعت ویژهٔ بالایی انتخاب شود. زیرا در این صورت از نظر ظرفیت و اندازه و وزن صرفه‌جویی کرده‌ایم. بر این اساس یک توربوماشین را می‌توان بسیار کوچک ساخت به طوریکه افزایش سرعت در قبال این کاهش ابعاد، کم نخواهد بود. برای این ماشینها که با مایعات کار می‌کنند عامل محدودکنندهٔ اندازهٔ ماشین، کاویتاسیون می‌باشد.(۱) این پدیده ممکن است در ورودی پمپها و یا در خروجی توربینهای آبی، در مجاورت تیغه‌های متحرک صورت بگیرد. عمل دینامیکی تیغه‌ها سبب کاهش فشار موضعی استاتیکی در ناحیه‌ای می‌گردد که قبلاً به طور طبیعی پائین‌تر از فشار اتمسفری است و بدین ترتیب کاویتاسیون رخ می‌دهد. این پدیده به دلیل وجود گازهای حل نشده در مایع که در اثر کاهش فشار به حبابهای ریز تبدیل می‌شوند، بیشتر تقویت می‌شود. البته کاویتاسیون دو مرحله دارد : مرحلهٔ اول همان ظاهر شدن حبابهای گاز و بخار است (مرحلهٔ رشد) و مرحلهٔ دوم ناپدید شدن آن حبابهاست (مرحلهٔ فروپاشی) در مرحلهٔ دوم امکان اینکه فشار به طور لحظه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد وجود دارد و این فشار موجب تنشی می‌شود که از حد مقاومت اکثر مواد صنعتی بیشتر می‌باشد و لذا مرحلهٔ فروپاشی اساساً تخریبی است.

در سالهای اخیر کاویتاسیون در موتورهای احتراق داخلی نیز مورد توجه قرار گرفته است. در داخل موتور، در هر دورهٔ نوسان برخی از جداره‌ها، مانند دیوارهٔ سیلندر، هنگامی که نوسانات با ارتعاشات قطعات متحرک تشدید شوند، حبابهای بخار (یا گاز) متناوباً ایجاد و ناپدید می‌شوند. فرکانس این پدیده قابل توجه می‌باشد و دامنهٔ این ارتعاشات وابسته به مشخصات هندسی دیواره (ضخامت طول قسمت آزاد و ...) ، مقدار نیروی محرک و لقی بین پیستون و سیلندر می‌باشد. لذا کاویتاسیون در موتورهایی که سرعت دورانی عملکردشان متغیر است مخربتر است تا در موتورهایی که سرعت دورانی اسمی ثابتی دارند. اثر تخریبی ناشی از این نوع کاویتاسیون (ارتعاشی)، سوراخ شدن دیوارهٔ سیلندرها می‌باشد که در نهایت منجر به کاهش قدرت و راندمان موتور و یا از کار افتادن آن خواهد گردید و این مسأله نشانه‌ای از اهمیت پدیدهٔ کاویتاسیون و شناخت روشهای پیشگیری از وقوع این پدیده می‌باشد.(۲)

البته بایستی در اینجا متذکر شد که کاویتاسیون نه تنها در برخی زمینه‌ها مضر نمی‌باشد، بلکه می‌توان با شناخت و کنترل این پدیده نتایج مفیدی از آن به دست آورد به طوریکه امروزه برای کاویتاسیون کاربردهای گوناگونی در زمینه‌های صنعتی، فیزیکی، علوم پزشکی و دارویی و زیست‌شناسی شناخته شده است. به طور مثال امروزه با استفاده از حباب‌های کاویتاسیون و انهدام کنترل شدهٔ آنها در علوم پزشکی، خرد کردن سنگ‌های کلیه و کیسهٔ صفرا و جراحی‌های دقیق چشم از آن بهره برده می‌شود (۴و۳) یکی از کاربردهای دیگر کاویتاسیون از بین بردن باکتریها در وسایل و ابزارهای پزشکی می‌باشد به این ترتیب که با قرار دادن این ابزارها در فیلمی از مایع و استفاده از امواج اکوستیک متناوب، میلیونها حباب در ابعاد کوچک رشد و فرد می‌پاشند و ضربه‌های حاصل از فروپاشی، باعث از بین رفتن این باکتریها می‌شود (Awad 1996) .

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

اهمیت مطالعه عددی دینامیک یک حباب در زیر آب در این است کـه بـا مقایسـهٔ نتـایج عـددی حاصل و نتایج تحلیلی مسأله، میزان دقت راه‌حـل عـددی معلـوم می‌شـود و در نتیجـه بـا اسـتفاده از روشهای عددی، می‌توان دینامیک یک حباب را در موقعیتـهای بسـیار پیچیـده بررسـی کـرد و رفتـار حباب را در نزدیکی دیواره‌های مختلف و سطوح آزاد آب و همچنین در نزدیکی حبابهای دیگر بررسـی نمود. در حالیکه روشهای تحلیلی فقط برای بررسی یک حباب کاویتاسیون که به شـکل کـاملاً کـروی رشد کرده و فرو می‌پاشد ارائه شده‌اند. آزمایشهای تجربی نشان داده است که یک حبـاب کاویتاسـیون در کنارهٔ دیواره‌های صلب، سطوح آزاد آبها، دیواره‌های ارتجاعی، در حضـور نیروهـای شـناوری، بـدون حضور نیروهای شناوری و یا در معرض جریانهای مختلف سیال، رفتارهایی کاملاً متفاوت نشـان داده و هنگام رشد و فروپاشی حباب، شکل کروی آن از بین می‌رود و در بعضی مواقع انحراف شکل حبـاب از حالت کروی به اندازه‌ای است که به هیچ وجه راه‌حل‌های تحلیلـی کـه حبـاب را کـروی شـکل فـرض می‌کنند، صادق نیست. اگرچه آزمایشهای تجربی با استفاده از عکسبرداری سریع که در بعضی از موارد حتی با سرعت یک میلیون عکس در ثانیه انجام شده است، اطلاعات زیادی در رابطه با رفتار حبـاب در موقعیتهای مختلف را بدست می‌دهد، اما این آزمایش‌ها نیز برای اندازه‌گیری سرعت دیـواره حبـاب در آخرین مراحل فروپاشی آن ناموفق بوده‌اند، لذا فقط روشهای عددی هسـتند کـه توانـایی شبیه‌سـازی رفتار حباب را مخصوصاً در آخرین مراحل فروپاشی آن دارند.

مطالعهٔ رفتار عددی و تحلیلی یک حباب کاویتاسیون در زیر آب در یـک حـالت بـر اسـاس ثـابت فرض کردن فشار بخار داخل حباب می‌باشد. (Blake 1986) و (Taib 1985) و در حالت دیگر، فـرض تغییرات فشار در داخل حباب بر اساس قانون سادهٔ گازها می‌باشد(۵) (Best 1992). این فرضها تحول انتقال انرژی حاصل از گرمای نهان را درنظر نمی‌گیرند. جذب شدن و آزاد شدن گرمای نهان به هنگـام