٨٧٠٨٤

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

عنوان :

بررسی عددی میدان‌های فشار و سرعت جریان مایع حول یک حباب کاویتاسیون در مجاورت یک سطح صلب به هنگام Necking و Splitting

۱۳۸۲ /۷/ ۳۰

اساتید راهنما :

دکتر محمد تقی شروانی تبار

دکتر سیدمحمد سیدمحمودی

اساتید مشاور :

دکتر اسماعیل اسماعیل زاده

دکتر احمد فرزدی

پژوهشگر :

علیرضا رضایی برمی

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
شماره مدرک

شهریور ۱۳۸۲

۴۸۰۸۷

آنچه مقابل آنها باعث حقارت من است،

فردی من نیست

عظمت روحشان است.

تقدیم به

پدر و مادرم

دفتر عمر

مرا با تو

شکوهی دیگر،

رونقی دیگر هست ...

تقدیر و تشکر

سپاس خداوندی که از همه مهربانتر و نزدیکتر به خلق عالم است و الطاف بیکرانش را در هیچ حال و هیچ مکانی از بندگانش دریغ نمی‌کند.

اینک که به فضل پروردگار مهربان، پس از ماهها سعی و تلاش، نگارش این پایان‌نامه به سرانجام رسیده است، شایسته است که از زحمات و هدایت‌های بیدریغ جناب آقای دکتر محمدتقی شروانی تبار که مطمئنا اصلی‌ترین تکیه‌گاه علمی در تهیه این پایان‌نامه بوده است، تشکر نمایم. جا دارد از جناب آقای دکتر سیدمحمد سیدمحمودی که راهنمایی اینجانب را در این پایان‌نامه بر عهده داشتند تشکر نمایم. بجاست از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر احمد فرزدی و جناب آقای دکتر اسماعیل اسماعیل‌زاده که مشاوره اینجانب را بر عهده داشتند تشکر نمایم. در اینجا لازم است از جناب آقای دکتر سیدپرویز علوی تبریزی که ارزیابی این پروژه را بر عهده داشتند، قدردانی کنم.

از برادر کوچکترم، میثم ، که در نگارش این پایان‌نامه مرا همراهی کرد، تشکر می‌کنم.

سپاس و مراتب تشکرم را نثار دوستان عزیزم، آقایان مهندس رضا مهاجرین، امید خدیوی و عادل سفیدی می‌کنم که در تکمیل این پایان‌نامه مرا یاری دادند.

علیرضا رضایی برمی

شهریور ۱۳۸۲

نام خانوادگی دانشجو : رضائی برمی **نام :** علیرضا

عنوان پایان‌نامه : بررسی عددی میدان‌های فشار و سرعت جریان مایع حول یک حباب کاویتاسیون در مجاورت یک سطح صلب به هنگام Necking و Splitting

اساتید راهنما : دکتر محمدتقی شروانی‌تبار
دکتر سیدمحمد سیدمحمودی

اساتید مشاور : دکتر احمد فرزدی
دکتر اسماعیل اسماعیل‌زاده

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد **رشته :** مکانیک **گرایش :** تبدیل انرژی **دانشگاه :** دانشگاه تبریز
دانشکده : فنی **تاریخ فارغ التحصیلی :** شهریور ۱۳۸۲ **تعداد صفحات :** ۱۰۷

کلید واژه‌ها : حباب کاویتاسیون، سطح صلب، میدان فشار و سرعت، اجزای مرزی، تفاصلات محدود،

چکیده :

دینامیک یک حباب کاویتاسیون در مجاورت یک سطح صلب، یکی از مهمترین زمینه‌های مطالعاتی و تحقیقاتی در مورد رفتار یک حباب کاویتاسیون در داخل سیال می‌باشد. حباب‌های کاویتاسیون که در جریان‌های کاویتاسیونی تشکیل می‌شوند، هنگامی که فشار سیال به پایین‌تر از فشار بخار اشباع افت می‌کند بوجود می‌آیند. این حباب‌ها همراه جریان سیال حرکت کرده و در ناحیه‌هایی که فشار سیال بالاتر از فشار بخار اشباع می‌باشد، به سرعت فرو می‌پاشند. حباب‌های بخار همچنین می‌توانند با جوشش موضعی سیال به علت اعمال انرژی شدید موضعی در سیال بوجود آیند. در این حالت رشد حباب با فروپاشی سریع آن همراه است. یکی از ویژگی‌های مهم حباب گذرا در نزدیکی دیواره صلب تشکیل جت مایع با سرعت بالا است که در آن قسمت از حباب که دور از دیواره قرار دارد، تشکیل شده و طرف مقابل را سوراخ کرده و خود را بشدت به دیواره می‌کوبد. برخورد جت سیال حاصل از فروپاشی حباب‌ها به سطح صلب یکی از مهمترین پارامترها در تخریب کاویتاسیونی می‌باشد. در این پایان‌نامه با استفاده همزمان از روش اجزای مرزی و روش تفاضلات محدود، میدان‌های فشار و سرعت حول یک حباب کاویتاسیون در کنار یک سطح صلب بررسی شده و با نتایج موجود مقایسه می‌گردد. مطالعه عددی رشد و فروپاشی حباب کاویتاسیون و سیال اطراف آن، مکمل تحقیقات تجربی در این زمینه می‌باشد و جزییات بیشتری در مورد رشد و فروپاشی حباب به ما می‌دهد، در حالی که روش‌های تجربی تا بحال در بدست آوردن این اطلاعات ناموفق بوده‌اند.

فهرست مطالب

عناوین	صفحه
لیست نمادها	iii
مقدمه	۲
فصل اول : بررسی منابع و پیشینه پژوهش	
بررسی منابع و پیشینه پژوهش	۹
فصل دوم : مواد و روش‌ها	
۲-۱ مقدمه	۳۳
۲-۲ تابع گرین	۳۳
۲-۳ فرم متقارن انتگرال گرین	۳۴
۲-۴ تقریب سازی شکل سطح، پتانسیل و مشتق عمودی آن	۴۲
۲-۴-۱ المان خطی – تابع ثابت	۴۲
۲-۴-۲ المان خطی – تابع خطی	۴۳
۲-۴-۳ المان درجه دو – تابع درجه دو	۴۴
۲-۵ انتگرال‌گیری عددی	۴۵
۲-۵-۱ منفرد بودن در نقطه $\xi = 0$	۴۷
۲-۵-۲ منفرد بودن در نقطه $\xi = 1/2$	۴۹
۲-۶ عضوهای قطری ماتریس H	۵۰
۲-۷ روش حل عددی مساله	۵۱
۲-۷-۱ تعریف هندسی	۵۱
۲-۷-۲ بی بعد سازی	۵۲
۲-۷-۳ حباب محتوی مخلوطی از بخار فشار ثابت و گاز ایده‌آل	۵۳
۲-۷-۴ محاسبه شرایط اولیه برای یک حباب محتوی مخلوطی از بخار فشار ثابت و گاز ایده‌آل	۵۴
۲-۷-۵ رابطه هیدرودینامیکی	۵۶
۲-۷-۶ تقریب سازی	۵۸
۲-۷-۷ محاسبات عددی	۶۰
۲-۷-۸ محاسبه میدان‌های فشار و سرعت حول حباب	۶۲

عناوین	صفحه
فصل سوم : نتایج و بحث	
۳-۱ پدیده Necking	۶۶
۳-۲ شرایط اولیه و شرایط مرزی	۶۷
۳-۳ نتایج رشد و فروپاشی حباب در کنار مرز صلب و وقوع پدیده Necking	۶۸
۳-۳-۱ حالت اول	۶۸
۳-۳-۲ حالت دوم	۷۲
۳-۳-۳ حالت سوم	۸۴
۳-۴ پدیده Splitting	۹۲
۳-۵ نتایج مربوط به پدیده Splitting یک حباب در مجاورت مرز صلب	۹۲
۳-۶ نتیجه‌گیری کلی	۱۰۲
۳-۷ پیشنهادات برای تحقیقات بعدی	۱۰۳
منابع و ماخذ	۱۰۵

لیست نمادها

نماد انگلیسی

انتگرال نمایی	E
تابع گرین	G
شتاب ثقل	g
فاصله مرکز حباب از سطح	h
اندیس پلی تروپیکی	k
جرم بر واحد سطح	m
بردار عمود بر سطح حباب	n
فشار هر نقطه داخل سیال	P
فشار بخار اشباع	P_c
فشار اولیه حباب	P_i
فشار جزیی گاز ایده‌آل داخل حباب	P_g
فشار بخار اشباع سیال	P_v
فشار در محیط بیکران سیال	P_∞
فشار ثابت بخار	P_0
هر نقطه روی سطح حباب	q
شعاع حباب	R
شعاع بیشینه حباب	R_m
شعاع اولیه حباب	R_0
محور شعاعی در مختصات استوانه‌ای	r
سطح حباب	S
زمان	t, T
مولفه شعاعی سرعت	u
مولفه عمودی سرعت	v
حجم حباب	V
حجم اولیه حباب	V_0

نماد یونانی

زاویه دوران	θ
چگالی سیال	ρ
دامنه جریان	Ω
تبدیل بی بعد	ξ
تابع بتا	β
نیروی شناوری بی بعد	δ
پارامتر قدرت	ε
پتانسیل سرعت	Φ
پتانسیل اولیه سرعت	Φ_0
فاصله بی بعد اولیه مرکز حباب از سطح صلب	γ
مولفه مماسی سرعت بر سطح حباب	η
پله زمانی	Δt
مولفه عمودی سرعت بر سطح حباب	Ψ

زیر نویس‌ها

دامنه بی نهایت دور فیزیکی	∞
نشانگر ناقص بتا	a
حالت اولیه	$i,_0$
گاز	g
بخار	v
مایع	L

مقدمه

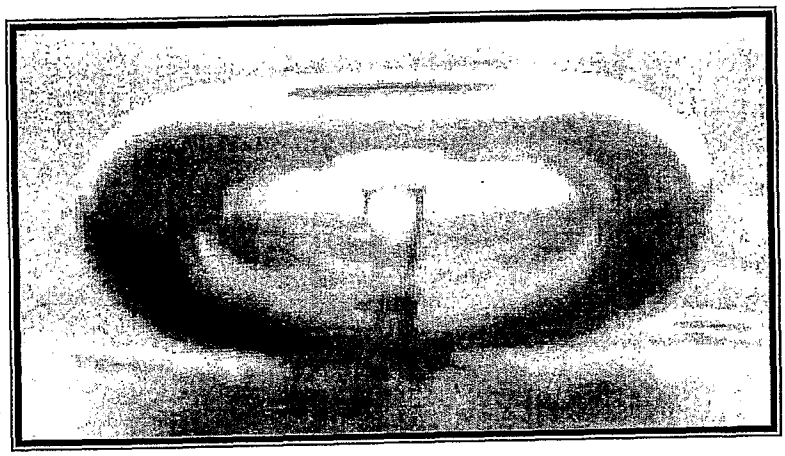
مقدمه

پس از بحران انرژی دهه هفتاد میلادی و با پیشرفت‌های سریعی که در زمینه صنعت و فن آوری صورت پذیرفته است به مرحله ای رسیده‌ایم که بهینه کردن و صرفه جویی در انرژی و سرمایه در سرعت بخشیدن به گام‌های بعدی نقش بسزایی بازی می‌کنند. در این میان نقش تحقیقات و نوآوری برای بخش صنعت بسیار مهم می‌باشد. با بررسی تاریخچه پیشرفت کشورهای توسعه یافته می‌توان به وضوح همپایی صنعت و بخش تحقیقات را دید. تا بحال بین مرحله تحقیق و عمل فاصله زیادی بوده است و باید سعی نمود در آینده این فاصله را از بین برد.

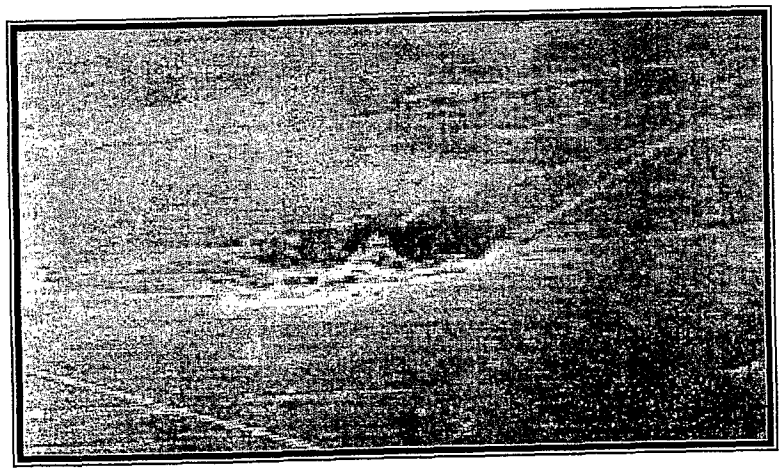
کاویتاسیون یکی از پدیده‌های مهم در سیالات می‌باشد که از دیرباز نظر مهندسان و محققان را به خود معطوف کرده است. دستگاه‌ها بایستی طوری طراحی شوند که از بوجود آمدن و توسعه بیشتر کاویتاسیون و نیز کنترل آن در صورت بوجود آمدن و نیز در جلوگیری از کاهش کارآیی آنها موثر و جوابگو باشند. وجود کاویتاسیون نه تنها منجر به صدا بلکه موجب تخریب کاویتاسیونی و همچنین موجب کارکرد ضعیف دستگاه‌های هیدرولیکی، پمپ‌ها و توربین‌ها در زیر خط کارآیی که در طراحی در نظر گرفته شده، خواهد بود.

وقتی که یک مایع در فشار ثابت گرم شود یا فشار آن در دمای ثابت کاهش یابد، حالتی می‌رسد که بخار یا گاز یا حباب‌های بخار قابل رویت شده و رشد می کنند. این حالت اگر در اثر افزایش دما باشد به جوش، منتهی خواهد شد و اگر در اثر کاهش فشار دینامیکی در دمای موثر ثابت انجام پذیرد موجب می‌شود که حباب‌ها همراه جریان به مناطق فشار بالا جاروب شده و در آنجا فروپاشند. به این پدیده رشد و فروپاشی حباب‌ها، کاویتاسیون، گفته می‌شود. اگر حباب‌های

کاویتاسیونی در هنگام فروپاشی نزدیک یا در تماس با جسم جامد باشند نیروی ناشی از فروپاشی حباب که همراه با تشکیل جت مایع می‌باشد، شکل ۱، باعث ایجاد فشار موضعی زیادی گشته و موجب ایجاد حفره در سطح جامد می گردد، شکل ۲ . این پدیده همراه با صدا و ارتعاش است و مانند حالتی است که سنگریزه ای در درون پمپ گریز از مرکز افتاده باشد.



شکل ۱ تشکیل جت مایع در حین فروپاشی حباب کاویتاسیون، **Andrew et.al (1978)**



شکل ۲ تخریب سطح توسط حباب‌های کاویتاسیون

آزمایشات انجام شده بر روی مایعات خالص شیمیایی نشان داده است که این مایعات می‌توانند تنش‌های زیادی را تحمل نمایند. این مطلب متاقض با فرضیه ایجاد کاویتاسیون هنگامی که فشار مایع به فشار بخار می‌رسد، می‌باشد. چون معمولا هنگامی که فشار مایع به فشار بخار برسد مایع بی اختیار خواهد جوشید، در نتیجه بایستی هسته‌هایی در مایع وجود داشته باشند که حباب‌های بخار در اطراف آن‌ها ایجاد و رشد نمایند. ماهیت هسته‌ها به درستی فهمیده نشده است ولی امکان دارد این هسته‌ها همان ذرات میکروسکپی غبارها یا آلودگی‌هایی باشند که در مایعات صنعتی ایجاد می‌شود. حباب‌های کاویتاسیون می‌توانند در روی هسته‌ها، ایجاد و رشد کرده و به طرف ناحیه‌هایی که فشار زیاد دارد حرکت نمایند و در آنجا از بین بروند. در توربوماشین‌ها تمام این وقایع در یک چند هزارم ثانیه اتفاق میافتد. تشکیل و فروپاشی تعداد زیادی از این حباب‌ها در روی یک سطح موجب ایجاد تنش سطحی موضعی شدید می‌گردد و خستگی سطحی حاصل موجب انهدام سطح خواهد شد. بعضی از مواد نرم در مقابل ضربات فوق مدتی مقاومت می‌کنند، ولی مواد شکننده به سرعت مقداری از جرم خود را از دست خواهند داد. محافظت در مقابل کاویتاسیون را بایستی از هنگام طراحی سیستم شروع کرد و در صورت امکان از ایجاد نواحی کم فشار جلوگیری نمود. مطالعات اخیر نشان داده است که حفاظت کاتدیک یکی از روش‌های مفید برای جلوگیری از کاویتاسیون می‌باشد. پره‌های انحنادار مانند پره‌های پمپ یا توربین مستعد ایجاد کاویتاسیون هستند و ممکن است در بعضی نواحی موجب ایجاد حفره در سطح و یا شکستن تیغه‌ها و پره‌ها شود.

بعضی از خواص کاویتاسیون عبارت است از :

- کاویتاسیون یک پدیده در مایعات است و در گازها و جامدات تحت هیچ شرایطی بوجود نمی‌آید.

- کاویتاسیون نتیجه کاهش فشار در مایعات است و با کنترل مقدار فشار مطلق کنترل خواهد شد. اگر فشار مایع از فشار بحرانی، که خواص فیزیکی و حالت مایع را مشخص می کند، کمتر باشد کاویتاسیون بوجود خواهد آمد و در غیر اینصورت رخ نخواهد داد.
- کاویتاسیون نتیجه ظهور و از بین رفتن حباب‌ها در مایع است.
- کاویتاسیون یک پدیده دینامیکی با در نظر گرفتن رشد و فروپاشی حباب‌هاست.
- کاویتاسیون می‌تواند در مایع ساکن یا در حال حرکت بوجود آید.
- کاویتاسیون منحصر به مرز های جامد نمی‌باشد و هم در خود مایع و دور از مرزها و هم در همسایگی دیواره‌ها بوجود می‌آید.
- بوجود آمدن اولین حباب کاویتاسیون و رشد آن بستگی به شرایط مایع و میدان فشار در منطقه کاویتاسیون دارد.

در علوم مهندسی مطالعه و بررسی حباب کاویتاسیون در طراحی پره‌های توربین‌ها و پروانه پمپ‌ها و ملخ‌های کشتی‌ها و تجهیزات هیدرولیکی مثل هیدروفویل حایز اهمیت است و دلیل آن خوردگی مکانیکی ناشی از کاویتاسیون است که باعث ایجاد حفره های موضعی و رشد آنها و در نهایت تخریب و از کار افتادن اینگونه دستگاه‌ها خواهد شد. در علوم پزشکی مطالعه حباب‌های کاویتاسیون روز بروز از اهمیت بالایی برخوردار می شود و این بخاطر نقشی است که این حباب‌ها در شکستن سنگ کلیه و سنگ کیسه صفرا با استفاده از روش ESWL، و همچنین در جراحی چشم دارند، Volgel and Busch (1993).

اهمیت مطالعه عددی دینامیک یک حباب کاویتاسیون در زیر آب در این است که با مقایسه نتایج عددی حاصل و نتایج تحلیلی مساله، دقیق بودن راه حل عددی معلوم می‌شود و در نتیجه با استفاده از روش‌های عددی می توان دینامیک یک حباب را در موقعیت‌های بسیار پیچیده بررسی کرد و رفتار حباب را در نزدیکی دیواره‌های مختلف و سطوح آزاد آب و همچنین در نزدیکی حباب‌های دیگر بررسی نمود، در حالیکه روش‌های تحلیلی فقط برای بررسی یک حباب کاویتاسیون