





دانشکده فنی مهندسی مکانیک

پایان نامه

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

عنوان :

مطالعه تجربی و عددی کاویتاسیون لبه حمله در یک پمپ گریز از مرکز

اساتید راهنما :

دکتر محمد تقی شروانی تبار

دکتر سید محمد سید محمودی

۱۳۸۲ / ۷ / ۳۰

استاد مشاور :

دکتر پرویز علوی

پژوهشگر :

رضا مهاجرین

شهریور ۱۳۸۲

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
گروه آموزشی مهندسی مکانیک  
شاهرود

۴۷۷۹۱

آنچه مقابل آنها باعث مقارنت من است،  
فردی من نیست  
عظمت رومشان است.

تقدیم به

پدر و مادرم

در زندگی انسان.....

ارزش مقدسی هست.....

که زیستنش را.....

معنا می بخشد،.....

و روح خویشتن.....

را فدای آن می کند.....

تقدیم به لیلا

## 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. همچنین از آقای دکتر سیدپرویز علوی تبریزی که مهر و محبت خود را پدرانۀ نثار من نمودند، تشکر می‌نمایم. بجاست از زحمات و راهنمایی‌های اساتید گرانقدرم جناب آقای دکتر اسماعیل اسماعیل‌زاده که در تمام مراحل این پایان‌نامه مرا یاری کردند، تشکر نمایم.

از برادر کوچکترم علی، بخاطر رفاقتش ممنونم.

از آقای مهندس سینا ستاری به پاس آموخته‌هاییم از ایشان تشکر می‌کنم.

سپاس و مراتب تشکر را نثار دوستان عزیزم، آقایان مهندسین علیرضا رضایی، امید خدیوی و

عادل سفیدی می‌کنم که در تکمیل این پایان‌نامه مرا یاری دادند.

رضا مهاجرین .

شهریور ۱۳۸۲

نام خانوادگی دانشجو : مهاجرین	نام : رضا
عنوان پایان نامه : مطالعه تجربی و عددی کاویتاسیون لبه حمله در یک پمپ گریز از مرکز	
اساتید راهنما : دکتر محمدتقی شروانی تبار دکتر سیدمحمد سیدمحمدی	
استاد مشاور : دکتر پرویز علوی	
مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد رشته : مکانیک گرایش : تبدیل انرژی دانشگاه : دانشگاه تبریز	
دانشکده : فنی تاریخ فارغ التحصیلی : تعداد صفحات :	
کلید واژه ها : پمپ، کاویتاسیون، CFD، بازده، پارامتر کاویتاسیون	
<p style="text-align: right;"><b>چکیده :</b></p> <p>بروز پدیده کاویتاسیون در پمپ‌های گریز از مرکز اثرات نامطلوبی روی بازده و طول عمر پمپ‌ها دارد و چون این نوع از پمپ‌ها کاربرد فراوانی در صنایع مختلف از جمله پتروشیمی، پالایشگاهها، صنایع غذایی و نظامی دارند، در مورد این پمپ‌ها تحقیقات فراوانی انجام می‌شود. برای تشخیص پدیده کاویتاسیون می‌توان با توجه به افت بازده، عدد کاویتاسیون، صدا و ارتعاشی که به هنگام فروپاشی حباب‌ها ایجاد می‌شود و یا عکس گرفتن از این پدیده عمل کرد. در این پایان‌نامه به بررسی عددی و تجربی کاویتاسیون لبه حمله یک پمپ گریز از مرکز آزمایشگاهی که در آزمایشگاه توربوماشین دانشکده فنی دانشگاه تبریز موجود است، می‌پردازیم. برای بررسی تجربی، ۴ آزمایش با اهداف مختلف انجام شده که در هر کدام از این‌ها از کاویتاسیون لبه حمله تا قفل بخار پیش رفتیم و اطلاعات مورد نیاز را برای مقایسه بازده و پارامتر کاویتاسیون یادداشت کردیم. همچنین برای مقایسه نتایج عددی گرفته شده با واقعیت از تمامی این مراحل عکس‌برداری صورت گرفته است. برای بررسی عددی ابتدا مدل هندسی پمپ با استفاده از روشهای طراحی پمپ بدست آمده سپس در نرم‌افزار gambit مدل شده است، البته برای ساده‌سازی و اینکه تمامی پروفیل‌های داخلی پمپ را نمی‌توانستیم بدست آوریم! پمپ به صورت دو بعدی مدل شده است. همچنین معادلات بصورت پایدار حل شده‌اند. مسئله مهم بعدی پس از مدل‌سازی این بود که بتوانیم شبکه‌بندی مناسبی برای</p>	

مدل پیدا کنیم تا :

۱- این جواب‌ها مستقل از نوع شبکه‌بندی باشند.

۲- جواب‌های به دست آمده قابل مقایسه با نتایج تجربی باشند.

سپس به حل این مسئله در نرم‌افزار فلونت پرداختیم. مرزهای مناسب برای پمپ انتخاب شدند و برای مقایسه از سه مدل توربولانس  $k-\epsilon$ , Spalart – allmaras و RSM استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات از اسکیم مرتبه اول بالادست استفاده شده است و روند حل آنها بصورت ضمنی با استفاده از الگوریتم simple میباشد. در انتها نتایج به دست آمده از کانتورهای فشار و سرعت در مدل‌های توربولانس مختلف با هم و با نتایج تجربی مقایسه شده و مدل توربولانس مورد نیاز انتخاب شده است. سپس با استفاده از جریانات چند فاز معادلات کاویتاسیون در پمپ حل شده‌اند. نتایج حاصل از حل عددی که مهمترین آنها کانتور نسبت حجمی بخار به آب است با نتایج تجربی یعنی عکس‌های گرفته شده از کاویتاسیون تطابق بسیار خوبی دارند.

## فهرست مطالب :

iv	لیست نمادها
۱	مقدمه
۴	فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش
۵	۱-۱- مقدمه
۵	۱-۲- پمپ و انواع آن
۸	۱-۲-۱- پمپ‌های محوری
۱۰	۱-۲-۲-۱- پمپ‌های سانتریفوژ
۱۰	معلومات طراحی
۱۱	طراحی پروفیل پره‌ها
۱۲	پره‌های با یک قوس دایره
۱۴	پره‌های با دو قوس دایره
۱۵	رسم پره به روش نقطه به نقطه
۱۷	پره‌های لگاریتمی
۱۹	طراحی پروفیل جمع‌کننده
۲۰	۱-۳- روابط و معادلات اصلی حاکم بر پمپ‌ها
۲۰	۱-۳-۱- معادله پیوستگی
۲۲	۱-۳-۲- معادله مقدار حرکت خطی
۲۴	۱-۴- تشابه و پارامترهای بی‌بعد
۲۵	ضرایب بی‌بعد
۲۵	ضریب ارتفاع
۲۵	ضریب دبی
۲۶	ضریب قدرت
۲۷	بازده
۲۷	پارامتر کاویتاسیون
۲۷	۱-۵- بررسی پدیده کاویتاسیون در پمپ‌ها
۳۰	۱-۵-۱- کاویتاسیون لبه حمله
۳۱	۱-۵-۲- نقطه فشار مینیمم
۳۲	۱-۵-۳- ارتفاع مکش مجاز پمپ‌ها
۳۴	۱-۵-۴- ارتفاع مکش خالص مثبت
۳۵	۱-۵-۵- رابطه ارتفاع مکش مجاز و <i>NPSH</i>
۳۶	۱-۶- پیشینه پژوهش



۳۸	فصل دوم: مواد و روش‌ها
۳۹	۱-۲- مقدمه
۴۰	۲-۲- مرحله قبل از حل
۴۰	۲-۲-۱- ایجاد هندسه مدل
۴۰	رسم پروفیل‌های پره
۴۲	رسم پروفیل‌های جمع‌کننده
۴۴	۲-۲-۲- شبکه‌بندی مدل
۴۵	شبکه‌بندی باسازمان
۴۶	شبکه‌بندی بی‌سازمان
۴۷	سنجش کیفیت المان‌ها
۴۸	طریقه شبکه‌بندی هندسه پمپ آزمایشگاه توربوماشین
۴۹	۲-۳- تعیین شرایط مرزی
۴۹	طریقه تعیین شرایط مرزی پمپ آزمایشگاه توربوماشین
۵۱	۳-۲- حل معادلات جریان
۵۱	۲-۳-۱- روش‌های مختلف حل معادلات در CFD
۵۳	۲-۳-۲- گسسته‌سازی
۵۵	اسکیم مرتبه اول بالا دست
۵۵	اسکیم مرتبه دوم بالا دست
۵۶	اسکیم توانی
۵۷	اسکیم Quick
۵۸	۲-۳-۳- گسسته‌سازی معادله ممنتوم
۵۹	۲-۳-۴- اسکیم‌های میان‌یابی فشار
۶۰	۲-۳-۵- گسسته‌سازی معادله پیوستگی
۶۱	۲-۳-۶- رابطه بین میدان فشار و سرعت
۶۱	الگوریتم Simple
۶۲	الگوریتم Simplec
۶۲	الگوریتم Piso
۶۲	۲-۳-۷- انواع توربولانس و مدل‌سازی آن
۶۳	مدل تک معادله‌ای Spalart Allmaras
۶۴	مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$
۶۶	مدل RSM
۶۸	۲-۳-۸- طریقه حل مدل کاویتاسیون در فلوئنت
۶۸	محدودیت مدل کاویتاسیون در فلوئنت
۶۹	تئوری مدل کاویتاسیون
۶۹	معادله کسر جرمی
۷۰	محاسبه جرم انتقالی

۷۰	۴-۲- مرحله بعد از حل
۷۴	فصل سوم: نتایج و بحث
۷۵	۳-۱- مقدمه
۷۵	۳-۲- نتایج تجربی
۷۵	۳-۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی
۷۶	۳-۲-۲- روش انجام آزمایش
۷۸	۳-۲-۳- الگوهای مختلف پدیده کاویتاسیون
۹۸	۳-۳- نتایج تئوری
۹۸	۳-۳-۱- حل جریان داخل پمپ
۱۰۹	۳-۴- نتیجه گیری کلی
۱۱۱	منابع و مراجع

$A$	بردار عمود بر سطح، مساحت
$C_{ij}$	جابجایی
$D_{ij}^T$	پخش متلاطم
$D_{ij}^L$	پخش ملکولی
$D_1$	قطر داخلی چرخ
$F$	نیرو
$f_{v1}$	میرلیبی لزجت
$G_{\bar{v}}$	چشمه لزجت متلاطم
$H$	ارتفاع
$H''$	قدرت بر واحد وزن
$J_f$	نرخ جریان جرمی
$\bar{J}_f$	تاثیر سرعت در سلول‌ها
$M''$	گشتاور متبادله بین چرخ و سیال
$\dot{m}_{pq}$	جرم انتقالی بین فاز اول و دوم
$NPSH$	ارتفاع مکش خالص مثبت
$P_v$	فشار بخار سیال
$P_u$	فشار مطلق
$P_{c0}$	فشار دو سلول در یک سطح
$Q$	دبی
$R$	شعاع حباب
$S_\phi$	جمله چشمه برای واحد حجم
$Y_0$	انحلال لزجت متلاطم
$Z_s$	ارتفاع مکش مجاز
$\beta'_1$	زاویه ورودی پره

$\beta'_2$	زاویه خروجی پره
$\varepsilon$	نرخ اتلاف تلاطم
$\Gamma$	ضریب پخش
$\eta$	بازده
$\kappa$	انرژی جنبشی متلاطم
$\mu_1$	لزجت تلاطم
$\nu$	زاویه مرکزی
$\omega$	سرعت دورانی
$\omega_s$	سرعت مخصوص
$\theta$	زاویه
$\rho$	چگالی
$\sigma$	پارامتر کاویتاسیون
$\nabla_\phi$	گرادیان

## مقدمه

آب یا هر مایع دیگر در هر درجه حرارتی، با ازای یک فشار معین موسوم به فشار بخار، تبخیر می‌شود. به عنوان مثال، آب در فشار اتمسفر استاندارد در  $100^{\circ}\text{C}$  و در فشار  $0.02$  اتمسفر در  $20^{\circ}\text{C}$  تبخیر می‌شود. هرگاه در حین جریان مایع در چرخ پمپ، فشار از فشار بخار مایع در درجه حرارت مربوط کمتر شود، حباب‌های بخار، بوجود آمده و همراه با مایع به نواحی با فشار بیشتر، حرکت می‌کنند. اگر در محل جدید، فشار به اندازه کافی، زیاد باشد، حباب‌های بخار، تقطیر شده و موجب ایجاد پدیده ضربه قوچ موضعی می‌شوند، یعنی فشار در آن ناحیه سریعاً و به مقدار زیاد بالا می‌رود. در نتیجه ذرات مایع اطراف حباب‌ها، برای پرکردن فضای خالی ناشی از ترکیدن ناگهانی آنها از مسیر خود، منحرف شده و با سرعت‌های بسیار زیاد به اطراف و از جمله پره‌ها، برخورد می‌نمایند. در چنین مکان‌هایی، بسته به شدت برخورد، سطح پره‌ها خورده شده و متخلخل می‌گردد. این پدیده را کاویتاسیون می‌نامند.

پدیده کاویتاسیون برای پمپ بسیار خطرناک بوده و ممکن است پس از مدت کوتاهی چرخ آن را از بین ببرد. بنابراین باید از به‌وجود آمدن آن در پمپ جدا جلوگیری نمود. مکانیزم خوردگی در اثر کاویتاسیون بسیار پیچیده است.

کاویتاسیون همراه با صداهای منقطع شروع می‌شود و در صورت کاهش فشار ورودی، شدت صداها زیاد می‌شود. صدای کاویتاسیون مخصوص و مشخص بوده شبیه به صدای برخورد گلوله‌هایی به یک سطح فلزی است. همزمان با تولید صدا، پمپ نیز به ارتعاش درمی‌آید. در انتها این صداها منقطع تبدیل به صدایی شدید و دائم می‌گردد و در همین حال، با اشغال فضای بین پره‌ها توسط بخارات سیال و کاهش سطح عبوری مایع، دبی پمپ نیز به شدت کاهش می‌آید یا قطع می‌شود.

همانطور که گفته شد، خوردگی‌های شدید فلز، توسط کاویتاسیون در محل به‌وجود آمدن حباب‌های بخار نیست، بلکه هنگامی که این حباب‌ها همراه با جریان به نزدیک محل خروج چرخ برسند، در اثر تقطیر ناگهانی موجب تغییرات شدید فشار با فرکانس خیلی بالا می‌گردد. فرکانس بین  $20$  تا  $25$  کیلوهرتز و فشار ماکزیمم (که بستگی به سرعت سیال دارد) تا چندین برابر فشار دینامیک (تا

حدود ۷ برابر) توسط هالر و هنساکر<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده است. ذرات سیال با سرعت بالا به‌طور مداوم به سطح چرخ، برخورد کرده و سبب خوردگی فلز و از بین رفتن آن می‌گردد.

فلزهای مختلف در مقابل کاویتاسیون، مقاومت‌های گوناگونی از خود نشان می‌دهند. به‌طور کلی تا به امروز هیچ فلزی یا کلی‌تر هیچ ماده‌ای یافت نشده که بتواند در مقابل کاویتاسیون مقاومت کند حتی الماس! باید توجه داشت که خوردگی مکانیکی بر اثر کاویتاسیون با خوردگی بر اثر واکنشهای شیمیایی یا الکتروشیمیایی، متفاوت می‌باشد. مقاومت فلزات در برابر کاویتاسیون بستگی به پارامترهای مختلفی از لحاظ نحوه ساخت و تولید فلز، آلیاژهای به‌کار رفته، یکنواخت بودن سطح فلز در موقع ریخته‌گری یا عملیات حرارتی و سرانجام درجه مقاومت فلز، در مقابل خستگی دارد.

در پمپ‌های گریزازمرکز، هنگام ورود مایع به داخل چرخ، به علت افزایش سرعت، فشار به‌طور موضعی کم می‌شود و در نقطه‌ای نزدیک به دهانه ورودی چرخ به حداقل خود می‌رسد. اگر در این نقطه (نقطه فشار مینیمم) فشار مایع از فشار بخار بیشتر باشد، مایع در طول حرکت خود در داخل چرخ همواره در یک فاز باقی مانده و کاویتاسیون رخ نخواهد داد. از این نظر، شناخت نقطه فشار مینیمم در چرخ حائز اهمیت است.

میزان کارایی و راندمان همچنین طول عمر پمپها به میزان قابل ملاحظه‌ای به ایجاد و عدم ایجاد کاویتاسیون بستگی دارد. پمپی که به گونه‌ای طراحی شده که در هنگام کار کاویتاسیون داخل آن ایجاد نمی‌شود، بازده بالاتری دارد، یعنی باعث کاهش مصرف انرژی و از طرف دیگر افزایش کارایی و طول عمر پمپ و در نهایت کاهش هزینه‌های اجرایی می‌شود. کاربرد فراوان پمپها بخصوص پمپ‌های گریزازمرکز (که بیشتر برای دبی‌های پایین و دوره‌های بالا بکار می‌روند) در صنایع مختلف کشور اهمیت این مسئله را افزایش می‌دهد. از دیگر مزایای عدم وجود کاویتاسیون کاهش سر و صدای ایجاد شده در محل کار و تاثیرات روانی آن بر روی افراد مختلف می‌باشد که این موضوع اهمیت مسئله را پررنگتر می‌کند.

<sup>۱</sup> Haller & Hunsaker

حال برای حل مسئله کاویتاسیون در پمپ‌ها ابتدا باید به مکانیزم کاویتاسیون و دلایل ایجاد آن در پمپ‌ها کاملاً اشراف داشت، که این مسائل در کتابها و مقالات بسیاری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سپس باید تکنولوژی محاسبه عددی کاویتاسیون را به دست آورد، تا بتوان بعد از طراحی پمپ و قبل از ساخت و آزمایش آن به دلیل هزینه‌های اجرایی بالا از طریق حل عددی و نرم‌افزارهای موجود مناسب بودن طرح را آزمایش کرد، و اگر جواب مطلوبی گرفته شد، اقدامات لازم برای ساخت پمپ مورد نظر به عمل آید.

در این پایان‌نامه سعی شده تا تکنولوژی محاسبه عددی کاویتاسیون در پمپ‌ها از لحاظ نوع انتخاب مرزها، شبکه‌بندی، روشهای حل معادلات، نوع توربولانس مطلوب، و ... به دست آید، و برای اثبات صحت این موارد آزمایشهای تجربی مختلفی برای به دست آوردن داده‌های معتبر جهت مقایسه با نتایج عددی انجام شده است.