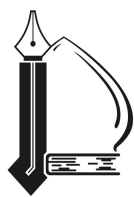


صلى الله عليه وسلم



دانشگاه فردوسی مشهد

دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

طرح بهینه شکل کاویتاتور برای پرتابه‌های زیرسطحی در جریان همراه با کاویتاسیون طبیعی و گازدهی شده به کمک روشهای عددی و تجربی

رساله برای دریافت درجه دکتری

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نگارش:

ایمان رشیدی طرقي

اساتید راهنما:

دکتر محمود پسندیده فرد

دکتر محمد پسندیده فرد

زمستان ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادرم

که وجودشان همواره برایم مأمنی سراسر عشق و آرامش بود

همسرم

شریک آرام و مایه آرامشم که در تمامی سختیها همراهیم نمود

و تقدیم به

پدر همسرم

که دنیایی از مهربانی است

با سپاس فراوان از اساتید ارجمندم

جناب آقای دکتر محمود پسندیده فرد

جناب آقای دکتر محمد پسندیده فرد

که بر خودداری از مساعدت ایشان در این رساله مایه افتخار من است

و با تشکر فراوان از همکاری صمیمانه

جناب آقای دکتر نوروز محمد نوری

جناب آقای دکتر مهدی مقیمی

و کلیه پرسنل آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت تهران

که با زحمت بی شائبه خود ما را در تهیه این مجموعه یاری فرمودند.



بسمه تعالی
مشخصات رساله / پایان نامه تحصیلی دانشجویان
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله: طرح بهینه شکل کاویتاتور برای پرتابه‌های زیرسطحی در جریان همراه با کاویتاسیون طبیعی و گازدهی شده به کمک روشهای عددی و تجربی

نام نویسنده: ایمان رشیدی طرقي

نام استادان راهنما: دکتر محمود پسندیده فرد و دکتر محمد پسندیده فرد

رشته تحصیلی: مکانیک - تبدیل انرژی

گروه: مکانیک

دانشکده: مهندسی

تاریخ دفاع: ۹۱/۱۱/۱۲

تاریخ تصویب: ۸۹/۴/۱۵

تعداد صفحات: ۱۸۴

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ○ دکتری ●

چکیده رساله / پایان نامه :

هدف از رساله حاضر، مطالعه جریان همراه با کاویتاسیون طبیعی و گازدهی شده بر روی پرتابه‌های زیرسطحی با هندسه‌های مختلف برای بدست آوردن شکل کاویتاتور بهینه در شرایط عملکردی متفاوت می‌باشد. برای دستیابی به هدف مورد نظر، در تحقیق حاضر روشهای المان مرزی بر پایه جریان پتانسیل، شبیه‌سازی عددی و مطالعات تجربی مورد توجه است. نتایج در دو بخش کاویتاسیون طبیعی و کاویتاسیون گازدهی شده ارائه شده‌اند. در بخش کاویتاسیون طبیعی نتایج روش المان مرزی و عددی بر روی هندسه‌های متقارن محوری ساده و کاربردی با نتایج تجربی موجود مقایسه شده‌اند که تأیید کننده دقت روشهای المان مرزی و عددی در شبیه‌سازی کاویتاسیون طبیعی می‌باشند. سپس به کمک روشهای المان مرزی و عددی و همچنین ترکیب روش المان مرزی با الگوریتم ژنتیک، شکل کاویتاتور بهینه برای پرتابه‌ها با شکلهای مختلف بدنه و در عددهای کاویتاسیون متفاوت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که کاویتاتوری بهترین است که در کمترین ضریب پسا، کاویته تولید کند که بخش مخروطی پرتابه را احاطه کند. همچنین با افزایش عدد کاویتاسیون، کاویتاتور بهینه دماغه کوچکتری خواهد داشت و به کاویتاتور دیسکی نزدیک می‌شود. در بخش کاویتاسیون گازدهی شده، ابتدا برای شناخت بهتر این پدیده، مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در تونل آب دانشگاه علم و صنعت ارائه می‌شود. سپس مطالعه عددی این پدیده به صورت سه بعدی و به کمک روش نسبت حجمی سیال (VOF) با استفاده از الگوریتم بازسازی مرز کاویته؛ الگوریتم یانگز انجام شده است. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهند که روش عددی استفاده شده به خوبی پدیده کاویتاسیون گازدهی شده را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی، معیار مناسب برای انتخاب کاویتاتور بهینه برای پرتابه‌ها با تکنولوژی دمش گاز، دست یافتن به طول کاویته یکسان با حداقل دمش گاز و کمترین ضریب پسا در نظر گرفته می‌شود. در پایان با عنایت به این معیار، کاویتاتورهای بهینه برای پرتابه‌ها با هندسه‌های مختلف و در شرایط عملکردی متفاوت با استفاده از روش المان مرزی ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در تمام طولهای کاویته با افزایش شعاع بدنه پرتابه و کاهش طول قسمت مخروطی، دماغه کاویتاتورهای بهینه کوچکتر شده و به کاویتاتور دیسکی نزدیک‌تر می‌شوند.

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

کلید واژه:

۱. کاویتاسیون
۲. پرتابه
۳. کاویتاتور
۴. بهینه
۵. تونل آب

فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه.....	۱
----------------	---

فصل دوم: پدیده کاویتاسیون و تاریخچه مطالعات آن

۱-۲ مقدمه.....	۵
۲-۲ کلیات پدیده کاویتاسیون.....	۶
۱-۲-۲ عدد کاویتاسیون.....	۷
۲-۲-۲ فشار داخل کاویتی.....	۷
۳-۲-۲ رژیمهای کاویتاسیون.....	۸
۴-۲-۲ جت بازگشتی.....	۱۲
۳-۲ سوپر کاویتاسیون، روشی مؤثر برای کاهش نیروی پسا.....	۱۳
۴-۲ سوپر کاویتاسیون گازدهی شده (مصنوعی).....	۱۵
۱-۴-۲ رژیمهای سوپر کاویتاسیون گازدهی شده.....	۱۶
۵-۲ تاریخچه مطالعات کاویتاسیون.....	۱۸
۱-۵-۲ روشهای تئوری.....	۱۹
۱-۱-۵-۲ روش المان مرزی.....	۲۲
۲-۵-۲ روشهای عددی.....	۲۳
۱-۲-۵-۲ معرفی مدل های عددی.....	۲۴
۲-۲-۵-۲ مدل های مبتنی بر معادله ی انتقال.....	۲۵
۳-۲-۵-۲ مدل عددی انتقال جرم کاویتاسیون.....	۲۵
۴-۲-۵-۲ حل معادله ی انتقال.....	۲۷
۳-۵-۲ روشهای عددی.....	۳۰
۴-۵-۲ بهینه سازی شکل کاویتاتور در جریان همراه با کاویتاسیون.....	۳۲
۶-۲ تبیین مسأله مورد مطالعه و هدف از انجام رساله.....	۳۴

فصل سوم: معادلات حاکم و شیوه حل آنها

۳۶	..... ۱-۳ مقدمه
۳۷	..... ۲-۳ روش المان مرزی
۳۷	..... ۱-۲-۳ علت شبیه‌سازی کاویتاسیون به کمک جریان پتانسیل
۳۷	..... ۱-۱-۲-۳ ورتیسیته
۳۷	..... ۲-۱-۲-۳ تلاطم
۴۰	..... ۲-۲-۳ معادله حاکم بر جریان پتانسیل
۴۱	..... ۱-۲-۲-۳ عناصر جریان پتانسیل
۴۴	..... ۳-۲-۳ تئوری گرین (میدان‌های همبند مرکب)
۴۵	..... ۴-۲-۳ تعمیم تئوری گرین برای جریانهای متقارن محوری
۴۶	..... ۵-۲-۳ تئوری گرین در جریانهای متقارن محوری همراه با کاویتاسیون
۴۷	..... ۱-۵-۲-۳ شرایط مرزی
۵۰	..... ۲-۵-۲-۳ شروع و پایان کاویتا
۵۱	..... ۳-۵-۲-۳ فرم انتگرالی معادلات حاکم
۵۲	..... ۴-۵-۲-۳ گسسته‌سازی معادلات حاکم
۵۳	..... ۵-۵-۲-۳ معادله کمکی
۵۴	..... ۶-۵-۲-۳ کمیت‌های مهم دیگر
۵۵	..... ۷-۵-۲-۳ شیوه حل معادلات حاکم
۵۶	..... ۸-۵-۲-۳ شرط همگرایی
۵۸	..... ۶-۲-۳ حل کاویتاسیون به روش نسبتاً غیرخطی
۶۳	..... ۷-۲-۳ حل کاویتاسیون در یک عدد کاویتاسیون معلوم
۶۵	..... ۳-۳ روشهای عددی
۶۶	..... ۱-۳-۳ روش مخلوط
۶۷	..... ۲-۳-۳ روش نسبت حجمی سیال
۷۰	..... ۱-۲-۳-۳ الگوریتم‌های رایج در تخمین مرز میان دو فاز
۷۱	..... ۲-۲-۳-۳ روش یانگز در تخمین مرز میان دو فاز
۷۳	..... ۳-۲-۳-۳ مدل‌سازی کاویتاسیون در روش نسبت حجمی سیال

فصل چهارم: نتایج کاویتاسیون طبیعی

۷۴	۱-۴ مقدمه
۷۴	۲-۴ شبیه سازی کاویتاسیون طبیعی به کمک روشهای المان مرزی و نسبت حجمی سیال
۷۵	۱-۲-۴ بررسی استقلال از شبکه روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال
۷۶	۲-۲-۴ اعتبار سنجی روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال
۸۱	۳-۲-۴ کاویتاسیون جزئی بر روی یک پرتابه کاربردی
۸۱	۱-۳-۲-۴ تأثیر طول بخش مخروطی
۸۵	۲-۳-۲-۴ تأثیر شعاع بخش استوانه‌ای
۸۸	۳-۴ بهینه‌سازی کاویتاتور پرتابه‌های متقارن محوری در کاویتاسیون طبیعی
۸۹	۱-۳-۴ مدلسازی کاویتاتور
۹۰	۲-۳-۴ روش انتخاب بهترین کاویتاتور
۹۲	۳-۳-۴ نتایج انتخاب بهترین کاویتاتور
۹۲	۱-۳-۳-۴ بررسی استقلال از شبکه روش عددی
۹۳	۲-۳-۳-۴ اعتبار سنجی روش عددی
۹۵	۳-۳-۳-۴ نتایج برای یک هندسه پایه پرتابه
۱۰۰	۴-۳-۳-۴ مقایسه نتایج کاویتاتور بهینه با کاویتاتور دیسکی برای هندسه پایه پرتابه
۱۰۳	۵-۳-۳-۴ تأثیر شعاع بدنه پرتابه
۱۰۸	۶-۳-۳-۴ تأثیر طول قسمت مخروطی پرتابه
۱۱۳	۴-۳-۴ بهینه سازی کاویتاتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۱۱۳	۱-۴-۳-۴ تکنیک بهینه‌سازی
۱۱۶	۲-۴-۳-۴ نتایج بهینه‌سازی

فصل پنجم: نتایج سوپر کاویتاسیون گازدهی شده

۱۱۹	۱-۵ مقدمه
۱۲۰	۲-۵ مطالعات آزمایشگاهی
۱۲۱	۱-۲-۵ مشخصات تونل آب و تجهیزات اندازه‌گیری
۱۲۲	۱-۱-۲-۵ سامانه اندازه‌گیری فشار
۱۲۳	۲-۱-۲-۵ سامانه اندازه‌گیری دبی (سرعت) آب و هوای دمش شده
۱۲۵	۳-۱-۲-۵ مشخصات دوربین مورد استفاده

۱۲۶	..... ۲-۲-۵ هندسه مورد مطالعه.....
۱۲۸	..... ۳-۵ نتایج آزمایشگاهی سوپرکاویتاسیون هوادهی شده.....
۱۲۹	..... ۱-۳-۵ جت بازگشتی.....
۱۳۰	..... ۲-۳-۵ نحوه خروج هوا از انتهای کاویتی.....
۱۳۱	..... ۳-۳-۵ رفتار ناپایای کاویتی.....
۱۳۲	..... ۴-۳-۵ تکرارپذیری آزمایش و عدم قطعیت.....
۱۳۴	..... ۵-۳-۵ تأثیر شکل کاویتاتور بر پارامترهای مهم کاویتاسیون هوادهی شده.....
۱۳۷	..... ۴-۵ شبیه‌سازی عددی سوپرکاویتاسیون هوادهی شده.....
۱۳۸	..... ۱-۴-۵ شبکه، محیط محاسباتی و شرایط مرزی.....
۱۳۹	..... ۲-۴-۵ مقایسه نتایج عددی کاویتاسیون هوادهی شده با نتایج آزمایشگاهی.....
۱۴۳	..... ۳-۴-۵ رفتار ناپایدار جریان داخل کاویتی.....
۱۴۷	..... ۵-۵ بررسی عددی اثر دیواره مقطع آزمایش بر روی نتایج.....
۱۵۰	..... ۶-۵ بهینه‌سازی کاویتاتور اژدرهای متقارن محوری در کاویتاسیون هوادهی شده.....
۱۵۴	..... ۱-۶-۵ معیار انتخاب کاویتاتور بهینه.....
۱۵۷	..... ۲-۶-۵ تأثیر شعاع بدنه اژدر.....
۱۶۱	..... ۳-۶-۵ تأثیر طول قسمت مخروطی اژدر.....
۱۶۵	..... ۴-۶-۵ تأثیر طول کاویتی.....

فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

۱۶۶	..... ۱-۶ نتیجه‌گیری.....
۱۶۹	..... ۲-۶ ارائه پیشنهادات.....

۱۷۰	..... مراجع.....
۱۷۷	..... پیوست ۱.....

فهرست شکلها:

- شکل ۲-۱: کاویتاسیون صفحه‌ای روی هیدروفویل نیمه مسطح- نیمه دایروی (جهت جریان از سمت راست به چپ، زاویه حمله 6°) [۳].
- شکل ۲-۲: روند غیردائمی کاویتاسیون ابری روی هیدروفویل نیمه مسطح- نیمه دایروی، به روند جدایش کاویته و شکل‌گیری مجدد آن توجه شود (جهت جریان از سمت چپ به راست، $\sigma = 1$ ، زاویه حمله 3° ، سرعت جریان 6 m/s) [۳].
- شکل ۲-۳: سوپرکاویتاسیون روی هیدروفویل NACA0015 (زاویه حمله 8° ، جهت جریان از سمت چپ به راست) [۱].
- شکل ۲-۴: توسعه رژیم‌های کاویتاسیون روی یک پرتابه (جهت جریان از سمت راست به چپ، حالت نهایی: سوپرکاویتاسیون، K عدد کاویتاسیون است) [۳].
- شکل ۲-۵: جت بازگشتی روی مرز انتهایی کاویته (جهت جریان از سمت چپ به راست) [۳].
- شکل ۲-۶: پرتابه با تکنولوژی سوپرکاویتاسیون، کاویتاتور مخروطی [۵].
- شکل ۲-۷: پرتابه با تکنولوژی سوپرکاویتاسیون، کاویتاتور دیسکی [۵].
- شکل ۲-۸: الف) کاویتاتور دیسکی، ب) کاویتاتور مخروطی [۶].
- شکل ۲-۹: کاویتاسیون گازدهی شده متقارن محوری [۳].
- شکل ۲-۱۰: کاویتاسیون گازدهی شده تحت تأثیر شتاب گرانش از دو نمای مختلف [۳].
- شکل ۲-۱۱: سوپرکاویتاسیون گازدهی شده روی یک جسم متقارن محوری ($\sigma_c = 0.0334$ و $Fr = 24.5$) [۳].
- شکل ۳-۱: توزیع ورتیسیت در انتهای کاویته برای چهار زمان. الف: قبل از تشکیل ابر کاویته، ب: هنگام تشکیل ابر کاویته، ج: بعد از جدا شدن ابر کاویته، د: بعد از ترکیدن ابر کاویته [۸۷].
- شکل ۳-۲: تنش‌های رینولدز در سه جهت x, y, z برای چهار مرحله [۸۷].
- شکل ۳-۳: دستگاه مختصات کروی
- شکل ۳-۴: رینگ چشمه در دستگاه مختصات استوانه‌ای
- شکل ۳-۵: شبکه بندی مورد نیاز برای حل میدان جریان حول جسم متقارن دوبعدی به کمک روش المان مرزی
- شکل ۳-۶: شماتیکی از جریان متقارن محوری
- شکل ۳-۷: معرفی مرزهای جسم (S_B) و کاویته (S_C) در کاویتاسیون جزئی روی یک استوانه.
- شکل ۳-۸: استفاده از برهم نهی جریان آزاد با توزیعی از رینگ دوگان و چشمه در مرز جسم و کاویته جهت حل جریان کاویتاسیونی.
- شکل ۳-۹: معرفی پارامترهای هندسی پانل Γ ام
- شکل ۳-۱۰: مدل بسته شدن ساده
- شکل ۳-۱۱: چگونگی توزیع نقاط روی کاویته و جسم
- شکل ۳-۱۲: محاسبه سرعت‌های گره ای در روش المان مرزی پتانسیل ثابت.

- شکل ۳-۱۳: الگوریتم حل کاویتاسیون به روش المان مرزی ۵۷
- شکل ۳-۱۴: ارتفاع نسبی کاویته در نقطه انتهایی برای سه حالت ممکن از حدس طول کاویته ۶۱
- شکل ۳-۱۵: الگوریتم حل کاویتاسیون با روش نسبتاً غیرخطی ۶۲
- شکل ۳-۱۶: الگوریتم حل کاویتاسیون در یک عدد کاویتاسیون معلوم. ۶۴
- شکل ۳-۱۷: روش‌های ردیابی سطح مشترک (الف) ذرات نشانگر (ب) شبکه‌ی تطبیقی (ج) ردیابی حجمی [۵]. ۶۸
- شکل ۳-۱۸: مقایسه بین بازسازی مرز میان دو فاز [۵]. ۷۰
- شکل ۳-۱۹: چهار حالت کلی سطح آزاد بازسازی شده به روش یانگز [۹۱]. ۷۲
- شکل ۴-۱: تأثیر ریز کردن شبکه محاسباتی (با افزایش تعداد المانها برای شعاع ثابت دیسک) بر طول و ضریب پسای سوپرکاویته پشت دیسک در روش المان مرزی. ۷۶
- شکل ۴-۲: تغییر طول بی بعد کاویته بر حسب عدد کاویتاسیون، مقایسه نتایج المان مرزی و نسبت حجمی سیال با رابطه تئوری ریچارد و داده‌های تجربی (مرجع ۳). ۷۷
- شکل ۴-۳: تغییر ضریب پسا بر حسب عدد کاویتاسیون، مقایسه نتایج روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال با رابطه تئوری پلست-شافر (معادله ۴-۳) و داده‌های تجربی (مرجع ۳). ۷۸
- شکل ۴-۴: شکل پایدار کاویته بر روی استوانه بدست آمده از روشهای کسر حجمی (بالا) و المان مرزی (پایین) برای عدد کاویتاسیون ۰/۳۰. شکل سمت چپ بردارهای سرعت و ضریب فشار روش نسبت حجمی سیال بر روی استوانه را نشان می‌دهد. ۷۹
- شکل ۴-۵: تغییرات ضریب فشار بر روی استوانه، مقایسه نتایج روشهای المان مرزی و نسبت حجمی سیال با نتایج تجربی (مرجع ۹۵) در عدد کاویتاسیون ۰/۳۰. ۷۹
- شکل ۴-۶: شکل پایدار کاویته بر روی استوانه با دماغه کروی بدست آمده از روشهای نسبت حجمی سیال (بالا) و المان مرزی (پایین) برای عدد کاویتاسیون ۰/۲۰. شکل سمت چپ بردارهای سرعت و ضریب فشار روش کسر حجمی بر روی استوانه را نشان می‌دهد. ۸۰
- شکل ۴-۷: تغییرات ضریب فشار بر روی استوانه با دماغه کروی، مقایسه نتایج روشهای المان مرزی و نسبت حجمی سیال با نتایج تجربی (مرجع ۹۵) در عدد کاویتاسیون ۰/۲۰. ۸۰
- شکل ۴-۸: هندسه پرتابه متقارن محوری ۸۱
- شکل ۴-۹: پرتابه های تولید شده برای بررسی اثر طول بخش مخروطی ۸۲
- شکل ۴-۱۰: نتایج روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال برای بررسی اثر طول بخش مخروطی (یعنی R_c در شعاع استوانه و زاویه مخروط ثابت تغییر می‌کند) در عدد کاویتاسیون ۰/۰۷. ۸۳
- شکل ۴-۱۱: تغییرات طول بی‌بعد کاویته نسبت به عدد کاویتاسیون برای طولهای مختلف بخش مخروطی (با تغییر R_c). نتایج کاویتاسیون جزئی بر روی پرتابه دو روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال با نتایج سوپرکاویتاسیون پشت دیسک مقایسه شده است. ۸۴
- شکل ۴-۱۲: تغییرات ضخامت ماکزیمم بی‌بعد کاویته نسبت به عدد کاویتاسیون برای طولهای مختلف بخش مخروطی (با تغییر R_c). نتایج کاویتاسیون جزئی دو روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال بر روی پرتابه با نتایج سوپرکاویتاسیون پشت دیسک مقایسه شده است. ۸۴

- شکل ۴-۱۳: پرتابه های تولید شده برای بررسی اثر شعاع بخش استوانه‌ای
- ۸۵
- شکل ۴-۱۴: نتایج روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال برای بررسی اثر شعاع بخش استوانه‌ای در طول بی‌بعد کاویتی ۱۵.
- ۸۶
- شکل ۴-۱۵: تغییرات طول بی‌بعد کاویتی نسبت به عدد کاویتاسیون برای شعاع بخش استوانه‌ای ۰/۵ و ۱/۱. نتایج کاویتاسیون جزئی بر روی پرتابه دو روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال با نتایج سوپرکاویتاسیون پشت دیسک مقایسه شده است.
- ۸۷
- شکل ۴-۱۶: تغییرات ضخامت ماکزیمم بی‌بعد کاویتی نسبت به عدد کاویتاسیون برای شعاع بخش استوانه‌ای ۰/۵ و ۱/۱. نتایج کاویتاسیون جزئی دو روش المان مرزی و نسبت حجمی سیال بر روی پرتابه با نتایج سوپرکاویتاسیون پشت دیسک مقایسه شده است.
- ۸۷
- شکل ۴-۱۷: کاویتاسیون جزئی روی یک پرتابه
- ۸۸
- شکل ۴-۱۸: هندسه پرتابه مورد مطالعه
- ۸۹
- شکل ۴-۱۹: پارامترهای طراحی هندسه کاویتاتور
- ۸۹
- شکل ۴-۲۰: شرایط مرزی
- ۹۲
- شکل ۴-۲۱: تأثیر ریز کردن شبکه محاسباتی (با افزایش تعداد المانها برای شعاع ثابت دیسک) بر طول و ضریب پسای سوپرکاویتی پشت دیسک در روش عددی (به کمک نرم‌افزار فلوئنت).
- ۹۳
- شکل ۴-۲۲: تغییرات طول کاویتی برحسب عدد کاویتاسیون- مقایسه نتایج روش المان مرزی و شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی [۳].
- ۹۴
- شکل ۴-۲۳: تغییرات ضریب پسای برحسب عدد کاویتاسیون- مقایسه نتایج روش المان مرزی و شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی [۳].
- ۹۴
- شکل ۴-۲۴: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به ضریب وزنی w_2 در b_1 های مختلف برای $b_2=0.2$. بدست آمده توسط تحلیل المان مرزی.
- ۹۶
- شکل ۴-۲۵: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به ضریب وزنی w_2 در b_1 های مختلف برای $b_2=0.25$. بدست آمده توسط تحلیل المان مرزی.
- ۹۶
- شکل ۴-۲۶: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به ضریب وزنی w_2 در b_1 های مختلف برای $b_2=0.3$. بدست آمده توسط تحلیل المان مرزی. کاویتاتورهای انتخاب شده با علامت ● در شکل مشخص شده‌اند.
- ۹۷
- شکل ۴-۲۷: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به ضریب وزنی w_2 در b_1 های مختلف برای $b_2=0.35$. بدست آمده توسط تحلیل المان مرزی. کاویتاتورهای انتخاب شده با علامت ● در شکل مشخص شده‌اند.
- ۹۷
- شکل ۴-۲۸: مقایسه طول کاویتی از روش المان مرزی و عددی برای هفت کاویتاتور ارائه شده در جدول ۴-۱.
- ۹۸
- شکل ۴-۲۹: مقایسه ضریب پسای فشاری از روش المان مرزی و عددی برای هفت کاویتاتور ارائه شده در جدول ۴-۱.
- ۹۹
- شکل ۴-۳۰: مقایسه شکل کاویتی از روش المان مرزی و عددی ($\alpha_v=0.5$) برای کاویتاتور بهینه هندسه پایه در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲.
- ۹۹
- شکل ۴-۳۱: مقایسه شکل و طول کاویتی بدست آمده از روش المان مرزی الف) کاویتاتور بهینه با ب) کاویتاتور
- ۱۰۰

دیسکی برای پرتابه پایه در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲.

- شکل ۴-۳۲: تغییرات ضریب پسای کل نسبت به عدد کاویتاسیون برای کاویتاتور بهینه و دیسکی. ۱۰۱
- شکل ۴-۳۳: توزیع ضریب فشار بدست آمده از روش عددی (Fluent 6.3) برای پرتابه پایه در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲ (الف) کاویتاتور دیسکی (ب) کاویتاتور بهینه. مرز کاویتیتی از روش المان مرزی نیز در شکل مشاهده می‌شود. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۴: مقایسه توزیع فشار روی کاویتاتور بهینه با کاویتاتور دیسکی بدست آمده از روشهای المان مرزی و عددی (Fluent 6.3) در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۵: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با شعاع بدنه ۰/۷ و طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۳
- شکل ۴-۳۶: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با شعاع بدنه ۰/۹ و طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۴
- شکل ۴-۳۷: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با شعاع بدنه ۱/۱ و طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۴
- شکل ۴-۳۸: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به شعاع بدنه پرتابه در عدد کاویتاسیون ۰/۱۵ برای طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۵
- شکل ۴-۳۹: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به شعاع بدنه پرتابه در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲ برای طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۵
- شکل ۴-۴۰: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به شعاع بدنه پرتابه در عدد کاویتاسیون ۰/۱ برای طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۶
- شکل ۴-۴۱: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به شعاع بدنه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۷
- شکل ۴-۴۲: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با طول قسمت مخروطی ۴ و شعاع بدنه ۰/۹. ۱۰۸
- شکل ۴-۴۳: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با طول قسمت مخروطی ۵ و شعاع بدنه ۰/۹. ۱۰۹
- شکل ۴-۴۴: کاویتاتورهای بهینه در اعداد کاویتاسیون مختلف برای پرتابه با طول قسمت مخروطی ۶ و شعاع بدنه ۰/۹. ۱۰۹
- شکل ۴-۴۵: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به طول قسمت مخروطی در عدد کاویتاسیون ۰/۱۵ برای شعاع بدنه ۰/۹. ۱۱۰
- شکل ۴-۴۶: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به طول قسمت مخروطی در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲ برای شعاع بدنه ۰/۹. ۱۱۰
- شکل ۴-۴۷: تغییرات پارامترهای هندسی کاویتاتورهای بهینه نسبت به طول قسمت مخروطی در عدد کاویتاسیون ۰/۱ برای شعاع بدنه ۰/۹. ۱۱۱
- شکل ۴-۴۸: تغییرات ضریب پسای کل پرتابه نسبت به طول قسمت مخروطی در اعداد کاویتاسیون مختلف و شعاع بدنه ثابت ۰/۹. ۱۱۲

- شکل ۴-۴۹: چارت مراحل بهینه‌سازی ۱۱۵
- شکل ۴-۵۰: سیر تکاملی تابع هدف (CD) در طی مراحل بهینه‌سازی برای پرتابه با شعاع بدنه ۰/۹ و طول قسمت مخروطی ۵ در عدد کاویتاسیون ۰/۱۲. ۱۱۷
- شکل ۴-۵۱: کاویتاتورهای بهینه برای پرتابه با شعاع بدنه ۰/۷ و طول قسمت مخروطی ۵ در اعداد کاویتاسیون مختلف. مقایسه نتایج دو روش (۱) ترکیب روش المان مرزی با ژنتیک الگوریتم (GA & BEM) و (۲) ترکیب روش المان مرزی با روش عددی (BEM & CFD). ۱۱۷
- شکل ۴-۵۲: کاویتاتورهای بهینه برای پرتابه با شعاع بدنه ۰/۹ و طول قسمت مخروطی ۵ در اعداد کاویتاسیون مختلف. مقایسه نتایج دو روش (۱) ترکیب روش المان مرزی با ژنتیک الگوریتم (GA & BEM) و (۲) ترکیب روش المان مرزی با روش عددی (BEM & CFD). ۱۱۸
- شکل ۴-۵۳: کاویتاتورهای بهینه برای پرتابه با شعاع بدنه ۱/۱ و طول قسمت مخروطی ۵ در اعداد کاویتاسیون مختلف. مقایسه نتایج دو روش (۱) ترکیب روش المان مرزی با ژنتیک الگوریتم (GA & BEM) و (۲) ترکیب روش المان مرزی با روش عددی (BEM & CFD). ۱۱۸
- شکل ۵-۱: تونل آب آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت تهران ۱۲۰
- شکل ۵-۲: شماتیکی از تونل آب و تجهیزات آن ۱۲۱
- شکل ۵-۳: لانه زنبوری و پره‌های راهنما ۱۲۱
- شکل ۵-۴: جعبه فشارسنج ها ۱۲۳
- شکل ۵-۵: فشارسنج و اجزای داخل آن ۱۲۳
- شکل ۵-۶: دبی سنج مورد استفاده در تونل آب ۱۲۴
- شکل ۵-۷: روماتر برای اندازه‌گیری دبی هوا ۱۲۴
- شکل ۵-۸: دوربین D300 ۱۲۵
- شکل ۵-۹: لنز نیکون A-F Micro Nikkor 105mm 1:2.8G ED ۱۲۶
- شکل ۵-۱۰: میله باریک بلند ۱۲۶
- شکل ۵-۱۱: نقشه میله بلند ۱۲۷
- شکل ۵-۱۲: تعبیه سوراخ در سر میله نگهدارنده جهت الف) ورود هوا و ب) خروج هوا به منظور تولید کاویتاسیون هوادهی شده. ۱۲۷
- شکل ۵-۱۳: کاویتاتورهای مورد آزمایش. ۱۲۸
- شکل ۵-۱۴: جت بازگشتی ۱۲۹
- شکل ۵-۱۵: پایداری مرز کاویتی با افزایش طول کاویتی ۱۲۹
- شکل ۵-۱۶: نحوه خروج هوا از انتهای کاویتی برای کاویتی کوچک و بدون اثر گرانش ۱۳۰
- شکل ۵-۱۷: نحوه خروج هوا از انتهای کاویتی برای کاویتی بزرگ و تحت تأثیر گرانش ۱۳۰
- شکل ۵-۱۸: نحوه کنده شدن گردابه هوا از انتهای کاویتی ۱۳۰
- شکل ۵-۱۹: رفتار ناپایای کاویتی برای کاویتاتور دیسکی در $Fr=17$ و $CQ=0.113$. ۱۳۱

- شکل ۵-۲۰: تغییرات ضریب دمش هوا بر حسب طول کاویتی برای کاویتاتور دیسکی که نقاط، مقادیر متوسط سه تکرار (جدول ۵-۳) و میله‌های خطا عدم قطعیت (جدول ۵-۴) را نشان می‌دهند. ۱۳۳
- شکل ۵-۲۱: تغییرات عدد کاویتاسیون بر حسب طول کاویتی برای کاویتاتور دیسکی که نقاط، مقادیر متوسط سه تکرار (جدول ۵-۳) و میله‌های خطا عدم قطعیت (جدول ۵-۴) را نشان می‌دهند. ۱۳۳
- شکل ۵-۲۲: تغییرات ضریب دمش هوا (CQ) بر حسب طول متوسط بی‌بعد کاویتی در عدد فرود تقریباً ثابت ۱۷ برای کاویتاتورهای مختلف ۱۳۴
- شکل ۵-۲۳: کاویتی تولید شده توسط کاویتاتورهای الف) دیسکی ب) سهموی شماره ۱ ج) سهموی شماره ۳ برای طول کاویتی بی‌بعد ۱۷/۵. ۱۳۶
- شکل ۵-۲۴: تغییرات ضریب دمش هوا (CQ) بر حسب عدد کاویتاسیون متوسط در عدد فرود تقریباً ثابت ۱۷ برای کاویتاتورهای مختلف. ۱۳۶
- شکل ۵-۲۵: شبکه بندی روی جسم و صفحه تقارن. ۱۳۸
- شکل ۵-۲۶: شماتیک محیط محاسباتی و شرایط مرزی (بدون مقیاس). ۱۳۹
- شکل ۵-۲۷: شکل کاویتی هواده‌ی شده از الف) نتایج تجربی ب) شبیه‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم یانگز ج) شبیه‌سازی عددی بدون استفاده از الگوریتم یانگز در $CQ=0.092$ و $Fr=17$. ۱۴۰
- شکل ۵-۲۸: شکل کاویتی هواده‌ی شده از الف) نتایج تجربی ب) شبیه‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم یانگز ج) شبیه‌سازی عددی بدون استفاده از الگوریتم یانگز در $CQ=0.113$ و $Fr=17$. ۱۴۰
- شکل ۵-۲۹: تغییرات ضریب دمش هوا (CQ) نسبت به طول بی‌بعد کاویتی (L/d). بدست آمده از روش عددی با استفاده از الگوریتم یانگز و نتایج آزمایشگاهی برای $Fr=17$. ۱۴۱
- شکل ۵-۳۰: تغییرات ضریب دمش هوا (CQ) نسبت به عدد کاویتاسیون (σ_c). بدست آمده از روش عددی با استفاده از الگوریتم یانگز و نتایج آزمایشگاهی برای $Fr=17$. ۱۴۲
- شکل ۵-۳۱: جت بازگشتی در کاویتاسیون هواده‌ی شده بدست آمده از الف) نتایج آزمایشگاهی (فلش‌ها به جت بازگشتی اشاره می‌کنند) ب) شبیه‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم یانگز (کانتور کسر حجمی هوا نشان داده شده است). ۱۴۳
- شکل ۵-۳۲: خروج گردابه هوا از انتهای کاویتی بدست آمده از الف) نتایج آزمایشگاهی ب) شبیه‌سازی عددی با استفاده از الگوریتم یانگز. ۱۴۳
- شکل ۵-۳۳: جت بازگشتی داخل کاویتی ۱۴۳
- شکل ۵-۳۴: کانتور ضریب فشار بدست آمده از حل عددی با استفاده از الگوریتم یانگز برای ضریب دمش هوا $CQ=0.102$ و عدد فرود $Fr=17$. مرز کاویتی نیز در شکل مشاهده می‌شود. ۱۴۴
- شکل ۵-۳۵: کانتور ضریب فشار بدست آمده از حل عددی با استفاده از الگوریتم یانگز برای ضریب دمش هوا $CQ=0.113$ و عدد فرود $Fr=17$. مرز کاویتی نیز در شکل مشاهده می‌شود. ۱۴۵
- شکل ۵-۳۶: تغییرات عدد کاویتاسیون داخل کاویتی نسبت به زمان برای ضریب دمش هوا $CQ=0.102$ و عدد فرود $Fr=17$. مقدار متوسط عدد کاویتاسیون نیز مشاهده می‌شود. ۱۴۵
- شکل ۵-۳۷: تغییرات عدد کاویتاسیون داخل کاویتی نسبت به زمان برای ضریب دمش هوا $CQ=0.113$ و عدد ۱۴۶

- فرود $Fr=17$. مقدار متوسط عدد کاویتاسیون نیز مشاهده می‌شود.
- شکل ۳۸-۵: رفتار ناپایدار کاویتاسیون هوادهی شده در بازه زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای ضریب دمش هوا $Fr=17$ و $CQ=0.102$.
- شکل ۳۹-۵: رفتار ناپایدار کاویتاسیون هوادهی شده در بازه زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای ضریب دمش هوا $Fr=17$ و $CQ=0.113$.
- شکل ۴۰-۵: تغییرات عدد کاویتاسیون انسداد (σ_b) در برابر نسبت قطر یا عرض تونل آب به مدل (D/D) برگرفته از مرجع [۵۸].
- شکل ۴۱-۵: مقایسه شکل کاویته الف) محیط محاسباتی دارای مرزهای محدود ب) محیط محاسباتی دارای مرزهایی ۵۰ برابر قطر کاویتاتور برای $Fr=17$ و $CQ=0.092$.
- شکل ۴۲-۵: مقایسه شکل کاویته الف) محیط محاسباتی با مرزهای محدود ب) محیط محاسباتی با مرزهایی ۵۰ برابر قطر کاویتاتور برای $Fr=17$ و $CQ=0.113$.
- شکل ۴۳-۵: شکل کاویته برای ضریب دمش هوا $Fr=17$ و $CQ=0.113$ (مرزهای محیط محاسباتی ۵۰ برابر قطر کاویتاتور است).
- شکل ۴۴-۵: شکل کاویته برای ضریب دمش هوا $Fr=17$ و $CQ=0.13$ (مرزهای محیط محاسباتی ۵۰ برابر قطر کاویتاتور است).
- شکل ۴۵-۵: موقعیت سه حسگر فشار در راستای طولی میله
- شکل ۴۶-۵: تغییرات عدد کاویتاسیون سه نقطه داخل کاویته نسبت به زمان برای $Fr=17$ و $CQ=0.113$. مقدار متوسط عدد کاویتاسیون هم ترسیم شده است.
- شکل ۴۷-۵: تغییرات عدد کاویتاسیون سه نقطه داخل کاویته نسبت به زمان برای $Fr=17$ و $CQ=0.13$. مقدار متوسط عدد کاویتاسیون هم ترسیم شده است.
- شکل ۴۸-۵: مقایسه شکل کاویته هوادهی شده بدست آمده از روش عددی (کانتور کسر حجمی هوا) در $Fr=17$ ، $CQ=0.113$ و $\sigma_c=0.135$ با کاویته بدست آمده از روش المان مرزی برای عدد کاویتاسیون یکسان.
- شکل ۴۹-۵: مقایسه شکل کاویته هوادهی شده بدست آمده از روش عددی (کانتور کسر حجمی هوا) در $Fr=17$ ، $CQ=0.13$ و $\sigma_c=0.104$ با کاویته بدست آمده از روش المان مرزی برای عدد کاویتاسیون یکسان.
- شکل ۵۰-۵: الف) شکل پرتابه مورد مطالعه ب) پارامترهای طراحی هندسه کاویتاتور
- شکل ۵۱-۵: تأثیر ضریب m بر روی شکل کاویتاتور بهینه برای اژدر با شعاع استوانه‌ای ۱/۷، طول قسمت مخروطی ۱۲/۵ و طول کاویته ۲۵.
- شکل ۵۲-۵: کاویتاتورهای بهینه برای طول بی‌بعد کاویته ۲۰ و طول قسمت مخروطی ۱۲/۵ در شعاع‌های بدنه مختلف اژدر.
- شکل ۵۳-۵: کاویتاتورهای بهینه برای طول بی‌بعد کاویته ۲۵ و طول قسمت مخروطی ۱۲/۵ در شعاع‌های بدنه مختلف اژدر.
- شکل ۵۴-۵: کاویتاتورهای بهینه برای طول بی‌بعد کاویته ۳۰ و طول قسمت مخروطی ۱۲/۵ در شعاع‌های بدنه مختلف اژدر.
- شکل ۵۵-۵: درصد کاهش ضریب پسا و درصد کاهش حجم کاویته تولیدی توسط کاویتاتورهای بهینه نسبت به

- کاویتاتور دیسکی ($\Delta CD/CD_{disk}, \Delta Vol./Vol_{disk}$) برای اژدر با شعاع های بدنه مختلف، طول قسمت مخروطی ۱۲/۵ و طول کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۵۶: کاویتاتورهای بهینه برای طول های مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۴ و طول بی بعد ۱۶۲ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۵۷: کاویتاتورهای بهینه برای طول های مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۵ و طول بی بعد ۱۶۲ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۵۸: کاویتاتورهای بهینه برای طول های مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۶ و طول بی بعد ۱۶۳ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۵۹: کاویتاتورهای بهینه برای طول های مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۷ و طول بی بعد ۱۶۳ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۶۰: کاویتاتورهای بهینه برای طول مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۸ و طول بی بعد ۱۶۳ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۶۱: کاویتاتورهای بهینه برای طول مختلف قسمت مخروطی در شعاع بدنه اژدر ۱/۹ و طول بی بعد ۱۶۳ کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۶۲: کاویتی تشکیل شده توسط کاویتاتور دیسکی برای اژدر با شعاع بدنه ۰/۹ و طول قسمت مخروطی ۱۰ که غیرواقعی است.
- شکل ۵-۶۳: درصد کاهش ضریب پسا و درصد کاهش حجم کاویتی تولیدی توسط کاویتاتورهای بهینه نسبت به کاویتاتور دیسکی ($\Delta CD/CD_{disk}, \Delta Vol./Vol_{disk}$) برای اژدر با طول های قسمت مخروطی مختلف، شعاع بدنه ۱/۷ و طول کاویتی ۲۵.
- شکل ۵-۶۴: تأثیر طول کاویتی روی شکل کاویتاتورهای بهینه برای شعاع های بدنه مختلف و طول قسمت مخروطی ثابت ۱۲/۵.

فهرست جداول:

- جدول ۱-۲: تأثیر سوپرکاویتاسیون در افزایش سرعت یک پرتابه زیرآبی و مقایسه آن با دیگر عوامل افزایش سرعت [۵]. ۱۳
- جدول ۱-۳: مشخصات عناصر جریان پتانسیل ۴۱
- جدول ۲-۳: حالت سطح آزاد براساس زاویه سطح. ۷۲
- جدول ۱-۴: مشخصات کاویتاتورهای انتخاب شده از روش المان مرزی و تحلیل شده توسط روش عددی برای هندسه پایه پرتابه. ۹۸
- جدول ۲-۴: نتایج کاویتاتورهای بهینه برای شعاع‌های مختلف پرتابه و طول قسمت مخروطی ۵. ۱۰۷
- جدول ۳-۴: نتایج کاویتاتورهای بهینه برای طولهای مختلف قسمت مخروطی و شعاع بدنه ۰/۹. ۱۱۲
- جدول ۱-۵: پارامترهای قابل اندازه گیری و تجهیزات آزمایشگاهی ۱۲۲
- جدول ۲-۵: پارامترهای هندسی کاویتاتورهای سهموی ۱۲۸
- جدول ۳-۵: نتایج سه تکرار آزمایش برای کاویتاتور دیسکی. ۱۳۲
- جدول ۴-۵: عدم قطعیت عدد کاویتاسیون و ضریب دمش هوا برای کاویتاتور دیسکی در طولهای مختلف کاویتی. ۱۳۲
- جدول ۵-۵: مشخصات هندسی و عدد کاویتاسیون کاویتاتورهای بهینه برای شعاع‌های مختلف بدنه و طول‌های متفاوت کاویتی در طول قسمت مخروطی ثابت ۱۲/۵. ۱۵۸
- جدول ۶-۵: مشخصات هندسی و عدد کاویتاسیون کاویتاتورهای بهینه برای طولهای مختلف قسمت مخروطی در شعاع‌های مختلف بدنه و در طول کاویتی ثابت ۲۵. ۱۶۲

نمادها

A_{ij}	ماتریس ضرایب
b_1, b_2	پارامترهای هندسی کاویتاتور
A, B, E, K	پارامترهای هندسی رینگ دوگان یا چشمه
C_f	ضریب اصطکاک
CD	ضریب پسای کلی
CD_f	ضریب پسای اصطکاکی
CD_p	ضریب پسای فشاری
C_p	ضریب فشار
D	قطر کاویتاتور
$D_{cavitymax}$	قطر ماکزیمم کاویتی
D_{disk}	قطر دیسک
e_x و e_r	بردارهای یکه در جهت x و r
f	نشان دهنده ماهیت فاز
\vec{F}	نیروی حجمی
Fr	عدد فرود
\vec{g}	شتاب جاذبه
$g(x)$	منحنی کاویتی
G	تابع پتانسیل رینگ چشمه
h_c	ارتفاع کاویتی
k	انرژی جنبشی توربولانسی
L_c	طول کاویتی
$L_{cavitymax}$	طول ماکزیمم کاویتی
L_{cone}	طول قسمت مخروطی پرتابه
\dot{m}^+	انتقال جرم از فاز مایع به بخار
\dot{m}^-	انتقال جرم از فاز بخار به مایع

\vec{n}	بردار عمود بر سطح و به سمت خارج
N	تعداد المان‌های روی مرز جسم-کاویتی
n_x و n_y	مؤلفه‌های بردار \vec{n}
N_b	تعداد المان‌های واقع روی مرز خیس شده جسم
N_c	تعداد المان‌های واقع روی مرز کاویتی
N_s	تعداد المان‌های واقع در مقطع عمودی مکش
P	فشار
P_{air}	فشار گاز دمیده شده به داخل کاویتی
P_B	فشار داخل حباب
P_g	فشار جزئی گازهای غیرقابل چگالش
P_c	فشار داخل کاویتی
P_v	فشار بخار
P_∞	فشار جریان آزاد
Q_{vent}	دبی گاز دمیده شده
$R_{ey,l}$	عدد رینولدز
x و r	محور مختصات افقی و شعاعی
R_{cyl}	شعاع بخش استوانه‌ای پرتابه
R_c	شعاع کوچک مخروط
R_{disk}	شعاع دیسک
S	مرز خیس شده جسم-کاویتی
S_B	مرز خیس شده جسم
S_C	مرز کاویتی
t_∞	زمان مشخصه جریان
V	بردار سرعت در حالت سه بعدی
V_{air}	سرعت گاز دمیده شده
\vec{V}_c	بردار سرعت روی کاویتی
v_i	سرعت القایی توزیع دوگانه‌ها در گره i ام
V_i	سرعت کلی در گره i ام