

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه:

تحلیل جریان همراه با کاویتاسیون اجسام متقارن محوری با استفاده
از روش المان مرزی بر پایه پتانسیل با مدل سازی جت بازگشتی

نگارش:

مهدی نوروزی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته
مهندسی هوا فضا گرایش آیرودینامیک

استاد راهنما:

دکتر محمود پسندیده فرد

شهریور ۱۳۸۸

تأییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان

«تحلیل جریان همراه با کاویتاسیون اجسام متقارن محوری با استفاده از روش المان

مرزی بر پایه پتانسیل با مدل‌سازی جت بازگشتی»

که توسط آقای مهدی نوروزی تهیه و به هیات داوران ارائه گردیده است؛ به‌عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته هوافضا در گرایش آیرودینامیک، مورد تأیید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

درجه ارزشیابی:

نمره نهایی:

تاریخ دفاع: ۱۳۸۸/۶/۳۱

اعضای هیات داوران:

امضا	مرتبه علمی	سمت	نام و نام خانوادگی
	دانشیار	استاد راهنما	دکتر محمود پسندیده‌فرد
	استاد	استاد دفاع	دکتر اصغر برادران رحیمی
	دانشیار	استاد دفاع	دکتر محمدحسن جوارشکیان
	دانشیار	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن کهرم

دروود بر

مطهری و چمران

دانشمندانی که مبارزه کردند و

شهید ماندند . . .

فهرست مطالب

<i>i</i>	نمادها
۷	چکیده
	فصل اول: معرفی کاویتاسیون و تاریخچه آن
۱	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ تاریخچه مطالعات مدل سازی کاویتاسیون
۲	۱-۲-۱ روش های تئوری
۴	۲-۲-۱ روش های المان مرزی
۶	۳-۲-۱ تاریخچه استفاده از مدل جت بازگشتی
	فصل دوم: پدیده کاویتاسیون و جت بازگشتی
۸	۱-۲ مقدمه
۹	۲-۲ آشنایی با پدیده کاویتاسیون
۹	۱-۲-۲ مفهوم کاویتاسیون و مقایسه آن با پدیده جوشش
۱۱	۲-۲-۲ عدد کاویتاسیون و رابطه آن با سرعت
۱۱	۳-۲-۲ ناپایداری مرز کاویتی
۱۲	۴-۲-۲ موارد شکل گیری کاویتاسیون
۱۲	۵-۲-۲ نقطه شروع کاویتاسیون
۱۳	۶-۲-۲ رژیم های کاویتاسیون
۱۳	۱-۶-۲-۲ کاویتاسیون اولیه
۱۳	۲-۶-۲-۲ کاویتاسیون جزئی
۱۴	۳-۶-۲-۲ کاویتاسیون گسترده
۱۵	۷-۲-۲ انواع کاویتی از نظر شکل
۱۵	۱-۷-۲-۲ کاویتی بسته
۱۵	۲-۷-۲-۲ کاویتی باز
۱۶	۸-۲-۲ کاویتاسیون مصنوعی
۱۶	۳-۲ جت بازگشتی
۱۶	۱-۳-۲ مفهوم جت بازگشتی

۱۷	۲-۳-۲ توجیه فیزیکی جت بازگشتی
۱۸	۲-۳-۳ مراحل شکل‌گیری جت بازگشتی و ابر کاویتی
۱۹	۲-۳-۴ سرعت جت بازگشتی
۲۰	۲-۳-۵ رفتار ناپایای جت بازگشتی
۲۱	۲-۳-۶ نقش جت بازگشتی در تولید ابر کاویتی
۲۲	۲-۳-۷ ضخامت جت بازگشتی
۲۵	۲-۳-۸ رابطه طول جت بازگشتی و بیشینه ضخامت کاویتی
۲۵	۲-۳-۹ رابطه طول جت بازگشتی و گرادیان فشار
۲۶	۲-۳-۱۰ شرایط ایجاد جت بازگشتی

فصل سوم: روش المان مرزی بر مبنای پتانسیل

۲۸	۳-۱-۱ علت شبیه‌سازی کاویتاسیون به کمک جریان پتانسیل
۲۸	۳-۱-۱-۱ ورتیسیته
۲۹	۳-۱-۱-۲ تلاطم
۳۰	۳-۲ جریان پتانسیل
۳۱	۳-۳ کاویتاسیون از دیدگاه پتانسیل
۳۳	۳-۴ مدل‌های بستن کاویتی
۳۳	۳-۴-۱ مدل بستن ساده
۳۴	۳-۴-۲ مدل ریپورزینسکی
۳۴	۳-۴-۳ مدل جت بازگشتی
۳۵	۳-۴-۴ مدل وو (مدل باز)
۳۵	۳-۴-۵ مدل گردابه‌های چرخشی تولین
۳۶	۳-۵ عناصر جریان پتانسیل
۳۶	۳-۵-۱ عناصر جریان پتانسیل سه‌بعدی در مختصات کروی
۳۷	۳-۵-۲ تابع پتانسیل یک رینگ چشمه در مختصات استوانه‌ای
۳۸	۳-۵-۳ تابع پتانسیل یک رینگ دوگان در مختصات استوانه‌ای
۳۹	۳-۶ شرایط مرزی
۴۰	۳-۷ تئوری گرین (میدان‌های همبند مرکب)
۴۰	۳-۸ تعمیم تئوری گرین برای جریان‌های متقارن محوری
۴۱	۳-۹ روش المان مرزی بر پایه پتانسیل

۴۱	۳-۹-۱ شرایط مرزی روی جسم
۴۲	۳-۹-۲ روش پتانسیل ثابت
۴۵	۳-۱۰ مزیت نسبی روش المان مرزی نسبت به دیگر روش‌های حل جریان
۴۶	۳-۱۱ تفاوت روش‌های مختلف المان مرزی
	فصل چهارم: روابط تئوری و عددی حاکم بر جریان همراه با کاویتاسیون اجسام متقارن محوری
۴۷	۴-۱ معادلات تئوری حاکم بر جریان کاویتاسیون اجسام سه‌بعدی با تقارن محوری
۴۹	۴-۲ هندسه مساله
۴۹	۴-۲-۱ کاویتا
۵۰	۴-۲-۲ جت بازگشتی
۵۱	۴-۳ شرایط مرزی
۵۱	۴-۳-۱ شرط مرزی سینماتیکی روی جسم و کاویتا
۵۲	۴-۳-۲ شرط مرزی دینامیکی روی کاویتا
۵۳	۴-۳-۳ شرط مرزی جت بازگشتی
۵۴	۴-۴ فرم انتگرالی معادلات گرین روی مرزهای مساله
۵۵	۴-۵ گسسته‌سازی معادلات گرین
۵۷	۴-۶ معادله کمکی
۵۷	۴-۷ شرط سینماتیکی روی سطح کاویتا برای تصحیح شکل کاویتا در هر تکرار
۶۰	۴-۸ نحوه محاسبه کمیت‌های مهم
۶۰	۴-۸-۱ سرعت
۶۰	۴-۸-۲ ضریب فشار
۶۰	۴-۹ شرط همگرایی
۶۱	۴-۱۰ الگوریتم حل دستگاه معادلات
	فصل پنجم: ارائه نتایج و بررسی آنها
۶۳	۵-۱ مقدمه
۶۴	۵-۲ کاویتاسیون جزئی
۶۴	۵-۲-۱ هندسه
۶۴	۵-۲-۲ شکل اولیه
۶۷	۵-۳ استقلال حل از تعداد المان‌ها
۶۹	۵-۲-۴ شکل کاویتا

۷۷	۵-۲-۵ ضریب فشار
۸۱	۶-۲-۵ اثر طول جت بازگشتی
۸۳	۷-۲-۵ اثر طول جسم بر عدد کایتاسیون
۸۳	۸-۲-۵ ضخامت جت بازگشتی
۸۴	۹-۲-۵ اثر تغییر طول کایتی در یک هندسه با طول ثابت
۸۷	۳-۵ کایتاسیون گسترده
۸۷	۱-۳-۵ هندسه و شکل اولیه
۸۷	۲-۳-۵ استقلال حل از تعداد المان‌ها
۸۹	۳-۳-۵ شکل کایتی
۹۲	۴-۳-۵ ضریب پسا
۹۳	۵-۳-۵ اثر تغییر عدد کایتاسیون بر بیشینه قطر کایتی
۹۴	۶-۳-۵ اثر تغییر عدد کایتاسیون بر طول کایتی پشت دیسک

فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادات

۹۶	۱-۶ جمع بندی
۹۸	۲-۶ ارائه پیشنهادات

مراجع

	پیوست‌ها
۱۰۴	پیوست الف: به‌دست آوردن تحلیلی ضخامت جت بازگشتی
۱۰۹	پیوست ب: اثبات تئوری گرین

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) کاویتاسیون و جت بازگشتی ایجاد شده پشت یک پله ۲
- شکل (۱-۲) نمودار تغییرات دما برحسب حجم مخصوص آب ۱۰
- شکل (۲-۲) نمایی از کاویتاسیون اولیه و جفت گردابه های گیره‌ای شکل ۱۳
- شکل (۳-۲) کاویتاسیون جزئی ۱۴
- شکل (۴-۲) کاویتاسیون گسترده ۱۴
- شکل (۵-۲) جت بازگشتی در ناحیه انتهایی کاویتی جزئی ۱۷
- شکل (۶-۲) اختلاف سرعت انتقال خواص در فاز مایع و بخار ۱۸
- شکل (۷-۲) مراحل تشکیل و ترکیدن ابر کاویتی ۱۹
- شکل (۸-۲) طول‌های مختلف جت بازگشتی ۲۱
- شکل (۹-۲) نقش جت بازگشتی در تولید کاویتاسیون ابری ۲۱
- شکل (۱۰-۲) حجم کنترل برای معادلات پیوستگی و مومنتوم ۲۲
- شکل (۱۱-۲) حجم کنترل در نظر گرفته شده برای محاسبه ضخامت جت بازگشتی ۲۳
- شکل (۱۲-۲) افزایش ضخامت جت بازگشتی با افزایش عدد کاویتاسیون در جریان پشت یک پله واحد ۲۴
- شکل (۱۳-۲) رابطه ضخامت جت بازگشتی و طول کاویتی برای یک کاویتی دوبعدی در پشت پله واحد ۲۴
- شکل (۱۴-۲) تقسیم جریان آزاد سیال در انتهای کاویتی ۲۵
- شکل (۱۵-۲) کاهش گرادیان فشار با افزایش طول کاویتی ۲۶
- شکل (۱۶-۲) انواع مختلف کاویتاسیون بر روی یک هیدروفویل کوژ-تخت ۲۷
- شکل (۱-۳) توزیع ورثیسته در انتهای کاویتی برای چهار زمان ۳۰
- شکل (۲-۳) تنش‌های رینولدز (توربولانسی) در سه جهت xy, yz, xz برای چهار مرحله ۳۱
- شکل (۳-۳) توزیع سرعت (منحنی بالایی) و توزیع فشار (منحنی پایینی) ۳۲
- شکل (۴-۳) تشکیل کاویتی‌هایی با طول AB ، CD و EF با افزایش سرعت ۳۲
- شکل (۵-۳) مدل‌های مختلف بستن کاویتی ۳۶
- شکل (۶-۳) مختصات کروی برای جریان‌های سه‌بعدی ۳۷
- شکل (۷-۳) مختصات استوانه‌ای برای به‌دست‌آوردن رینگ چشمه ۳۸
- شکل (۸-۳) شماتیکی از جریان متقارن محوری ۴۱
- شکل (۹-۳) تعریف گره‌ها و پانل‌ها ۴۳
- شکل (۱۰-۳) محاسبه سرعت‌های گره‌ای در روش پانل پتانسیل ثابت ۴۴

- شکل (۱-۴) هندسه دیسک و کاویتاسیون گسترده حول آن و نحوه نام‌گذاری مرزها ۴۸
- شکل (۲-۴) هندسه استوانه سر تخت و کاویتاسیون جزئی حول آن و نحوه نام‌گذاری مرزها ۴۸
- شکل (۳-۴) معرفی پارامترهای هندسی پانل زام ۵۲
- شکل (۴-۴) شرایط مرزی روی سطح مقطع جت بازگشتی ۵۴
- شکل (۵-۴) چگونگی توزیع نقاط روی مرز جسم، کاویتا و جت بازگشتی ۵۵
- شکل (۷-۴) تصحیح هندسه المان روی کاویتا در تکرار بعدی ۵۹
- شکل (۱-۵) نمای دوبعدی هندسه‌های استوانه‌ای شکل به همراه توزیع المان‌های روی سطح آن ۶۵
- شکل (۲-۵) نمای سه‌بعدی هندسه‌های استوانه‌ای شکل به همراه توزیع المان‌های روی سطح آن ۶۶
- شکل (۳-۵) شکل اولیه در نظر گرفته شده برای حل معادلات گرین در مورد استوانه سر تخت ۶۷
- شکل (۴-۵) نمودار تغییرات عدد کاویتاسیون نسبت به تعداد المان‌های توزیع شده روی سطح جسم ۶۸
- شکل (۵-۵) نمودار تغییرات عدد کاویتاسیون نسبت به تعداد المان‌های توزیع شده روی سطح کاویتا ۶۸
- شکل (۶-۵) نمای دوبعدی کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر تخت برای $\sigma = 0.3$ ۶۹
- شکل (۷-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر تخت برای $\sigma = 0.3$ ۷۰
- شکل (۸-۵) نمای دوبعدی کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر تخت برای $\sigma = 0.5$ ۷۱
- شکل (۹-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر تخت برای $\sigma = 0.5$ ۷۲
- شکل (۱۰-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر مخروطی برای $\sigma = 0.3$ ۷۳
- شکل (۱۱-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر مخروطی برای $\sigma = 0.5$ ۷۴
- شکل (۱۲-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر کروی برای $\sigma = 0.2$ ۷۵
- شکل (۱۳-۵) نمای سه‌بعدی از کاویتاسیون جزئی روی استوانه سر کروی برای $\sigma = 0.3$ ۷۶
- شکل (۱۴-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر تخت ($\sigma = 0.3$) ۷۸
- شکل (۱۵-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر تخت ($\sigma = 0.5$) ۷۸
- شکل (۱۶-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر مخروطی ($\sigma = 0.3$) ۷۹
- شکل (۱۷-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر مخروطی ($\sigma = 0.5$) ۷۹
- شکل (۱۸-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر کروی ($\sigma = 0.2$) ۸۰
- شکل (۱۹-۵) تغییر ضریب فشار بر روی بدنه استوانه سر کروی ($\sigma = 0.3$) ۸۰
- شکل (۲۰-۵) تغییرات عدد کاویتاسیون نسبت به طول بی‌بعد شده جت بازگشتی نسبت به طول کاویتا ۸۲
- شکل (۲۱-۵) پیش‌بینی جدا شدن قسمت عقب کاویتا در هنگام پیشروی بیش از حد جت به درون کاویتا ۸۲
- شکل (۲۲-۵) بررسی اثر تغییر طول جسم بر عدد کاویتاسیون در یک طول کاویتا مشخص ۸۳
- شکل (۲۳-۵) تغییرات ضخامت جت بازگشتی نسبت به عدد کاویتاسیون برای استوانه سر تخت ۸۴

- شکل (۲۴-۵) تغییر طول کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای استوانه سرتخت به طول ۸ ۸۵
- شکل (۲۵-۵) تغییر بیشینه ضخامت کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای استوانه سرتخت به طول ۸ ۸۵
- شکل (۲۶-۵) شکل کاویتی در طول کاویتی‌های مختلف بر روی استوانه سرتخت به طول ۸ ۸۶
- شکل (۲۷-۵) نمودار تغییرات بیشینه ضخامت کاویتی نسبت به طول کاویتی ۸۶
- شکل (۲۷-۵) نمای دوبعدی و سه‌بعدی شکل اولیه در نظر گرفته شده برای کاویتاسیون گسترده پشت دیسک ۸۸
- شکل (۲۸-۵) تغییرات عدد کاویتاسیون به تعداد المان‌ها برای کاویتاسیون گسترده پشت دیسک ۸۸
- شکل (۲۹-۵) نمای دوبعدی و سه‌بعدی کاویتاسیون گسترده پشت دیسک $\sigma = 0.2715$ و $\frac{L_{cavity}}{D_{disk}} = 5$ ۸۹
- شکل (۳۰-۵) نمای دوبعدی و سه‌بعدی کاویتاسیون گسترده پشت دیسک $\sigma = 0.1489$ و $\frac{L_{cavity}}{D_{disk}} = 10$ ۹۰
- شکل (۳۱-۵) نمای دوبعدی و سه‌بعدی کاویتاسیون گسترده پشت دیسک $\sigma = 0.0413$ و $\frac{L_{cavity}}{D_{disk}} = 30$ ۹۱
- شکل (۳۲-۵) تغییر ضریب پسا بر حسب عدد کاویتاسیون برای دیسک ۹۳
- شکل (۳۴-۵) تغییر بیشینه قطر کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای دیسک ۹۴
- شکل (۳۳-۵) تغییر طول کاویتی بر حسب عدد کاویتاسیون برای جریان کاویتاسیون گسترده پشت دیسک ۹۵

نمادها

S	مرز خیس شده جسم - کاویتی
S_c	مرز خیس شده کاویتی
S_b	مرز خیس شده جسم
C_d	ضریب پسا
C_p	ضریب فشار
D	نیروی درگ
P	فشار
Q_c	سرعت روی مرز کاویتی
P_c	فشار روی مرز کاویتی
P_v	فشار بخار
P_∞	فشار جریان آزاد
V_∞	سرعت جریان آزاد
c	طول وتر هیدروفویل
l_{cav}	طول کاویتی
q	بردار سرعت در حالت سه بعدی
N_b	تعداد المان‌های واقع روی مرز خیس شده جسم
N_c	تعداد المان‌های واقع روی مرز خیس شده کاویتی
N_j	تعداد المان‌های واقع روی مرز مقطع عمودی جت بازگشتی
N	تعداد المان‌های روی مرز خیس شده جسم-کاویتی
\bar{n}	بردار عمود بر سطح و به سمت خارج
n_x, n_r	مؤلفه‌های بردار \bar{n}
\hat{e}_x, \hat{e}_R	بردارهای یکه در جهت X و Γ
\bar{Q}_c	بردار سرعت روی کاویتی
Q_x, Q_r	مؤلفه‌های سرعت روی کاویتی
x_i, y_i	مختصات گره \bar{A}_i
\bar{X}_i, \bar{Y}_i	مختصات مرکز المان \bar{A}_i
v_i	سرعت القایی توزیع دوگانه‌ها در گره \bar{A}_i
V_i	سرعت کلی در گره \bar{A}_i

A_{ij}	ضرائب ماتریس
d	فاصله بین مراکز دو المان مجاور هم
G	تابع پتانسیل رینگ چشمه
A, B, E, K	پارامترهای هندسی رینگ دوگان یا چشمه
x_n, x_s	مشتق X نسبت به Π و مشتق X نسبت به S
x, r	محور مختصات افقی و شعاعی
$g(x)$	منحنی کاویتی
h	ارتفاع کاویتی
D_{disk}, D_{cone}	قطر دیسک و مخروط
$D_{cavitator}$	قطر کاویتاتور
$d_{cav_{max}}$	قطر ماکزیمم کاویتی
s_0, x_0	طول قوس و موقعیت نقطه شروع کاویتی

نمادهای یونانی

α	زاویه حمله جریان
σ	عدد کاویتاسیون
ρ	چگالی
μ	قدرت دوقطبی
ϕ	پتانسیل کل
φ	پتانسیل اختلالی
φ_s	پتانسیل چشمه
Γ	گردش (سیرکولاسیون)
ξ	موقعیت رینگ دوگان یا چشمه رو محور X
ξ_x	مشتق ξ در جهت X
φ_0	پتانسیل در نقطه شروع کاویتی
δ_{ij}	دلتای کرونکر
θ_j	زاویه المان j ام با محور X

زیر نویس ها

c	کاویتی
b	جسم
n	عمود بر المان
s	مماس بر المان
v	بخار
l	مایع
i, j	معرف المانها

بالا نویس ها

\wedge	بردار یکه
\rightarrow	بردار

چکیده

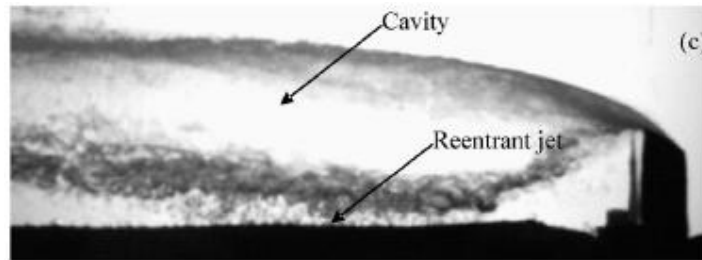
موضوع اصلی مورد بحث در این پایان‌نامه، تحلیل جریان همراه با کاویتاسیون حول اجسام متقارن محوری به کمک روش المان مرزی (*BEM*) بر مبنای پتانسیل و با استفاده از مدل جت بازگشتی برای منطقه انتهایی کاویتا می‌باشد. به این منظور، سطح کاویتا، سطح خیس شده جسم و سطح جت بازگشتی توسط المان‌هایی تقریب زده می‌شود و به کمک بیان انتگرالی تئوری گرین با این مضمون که «جریان پتانسیل روی هر سطح را می‌توان با یک توزیع چشمه و دوگان روی سطوح مقید آن شبیه‌سازی کرد»، جریان همراه با کاویتاسیون شبیه‌سازی می‌شود. در راستای این هدف، رینگ چشمه‌ها روی سطح کاویتا و رینگ دوگان‌ها روی سطح کاویتا و جسم توزیع می‌شوند. در اینجا، از شکل همگرا شده جریان کاویتاسیون که به روش المان مرزی بدون جت بازگشتی حل گردیده و در انتهای آن جت بازگشتی اضافه شده، به عنوان شکل اولیه مساله استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که قدرت رینگ چشمه‌ها و دوگان‌ها روی هر المان ثابت و از هر المان به المانی دیگر متغیر می‌باشد. با توجه به عدم توانایی روش المان مرزی در پیش‌بینی طول، طول کاویتا و جت بازگشتی ثابت و به عنوان ورودی مسئله مقدار مشخصی دارد که البته این روش تا محدوده وسیعی، از مقدار طول اختیار شده برای جت بازگشتی مستقل می‌باشد. با حل دستگاه معادلات خطی به دست آمده، قدرت چشمه‌های توزیع شده روی سطح کاویتا و هم‌چنین عدد کاویتاسیون به دست می‌آیند. به منظور ارضای شرط مرزی سینماتیکی بر روی سطح کاویتا، المان‌ها جابه‌جا می‌شوند تا اینکه مولفه عمودی سرعت بر روی سطح کاویتا برابر صفر شود و حل تا زمان همگرایی عدد کاویتاسیون، شکل کاویتا را اصلاح می‌نماید. در این پایان‌نامه، نتایج روش مذکور حول اجسام متقارن محوری با نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه شده است. نتایج بیانگر این است که استفاده از مدل جت بازگشتی در اصلاح خواص جریان کاویتاسیون اثرات مطلوبی دارد. این روش در مقایسه با روش المان مرزی بدون جت بازگشتی، موقعیت و مقدار بیشینه ضریب فشار در منطقه انتهایی کاویتا در کاویتاسیون جزئی (خصوصاً در اعداد کاویتاسیون کمتر و طول کاویتا بزرگتر) و هم‌چنین هندسه کاویتا در کاویتاسیون گسترده را به مقادیر عددی و تجربی آن نزدیک و یا منطبق می‌کند. سرعت بالا و دقت نسبتاً مطلوب در محاسبه هندسه کاویتا از مزایای قابل توجه این روش می‌باشد.

فصل اول

معرفی کاویتاسیون و تاریخچه آن

۱-۱ مقدمه

از جمله پدیده‌های فیزیکی که توجه و تحقیق بسیاری از دانشمندان مهندسی را به خود جلب کرده است، پدیده «کاویتاسیون» می‌باشد. کاویتاسیون زمانی رخ می‌دهد که فشار در حوزه‌ای از سیال به پایین‌تر از فشار بخار آن برسد [۱]. در این وضعیت در درون سیال، محدوده‌ای با سطوح معین شروع به رشد می‌کند که فاز درون آن به صورت بخار است و در سراسر ناحیه داخل حباب، فشار ثابتی - که به مراتب از فشار اتمسفر سیال کمتر است - وجود دارد. در شکل (۱-۱) نمونه‌ای از کاویتاسیون مشاهده می‌شود. نیوتن اولین کسی بود که در سال ۱۷۵۴ در حین آزمایش عدسی‌های محدب، این پدیده را مشاهده نمود و فرود^۱ اولین فردی بود که این پدیده را از کلمه یونانی کاویتا، «کاویتاسیون» نامید [۲].



شکل (۱-۱) کاویتاسیون و جت بازگشتی ایجاد شده در پشت یک پله.

۲-۱ تاریخچه مطالعات مدل‌سازی کاویتاسیون

۱-۲-۱ روش‌های تئوری

اولین مطالعات تئوری با موضوع کاویتاسیون در حدود ۱۴۰ سال پیش انجام گردید. کیرشهوف^۱ (۱۸۶۹) با استفاده از تئوری توابع متغیر مختلط هودوگراف^۲ - یعنی روابط ریاضی که توسط هلمهولتز (۱۸۶۸) ارائه شده بود- جریان سوپرکاویتاسیون حول صفحه تخت را در عدد کاویتاسیون صفر حل نمود. وی یک حل غیرچرخشی برای جریان کاویتاسیون پشت صفحه تخت با زاویه حمله صفر ارائه نمود [۳]. این روش توسط لوی^۳ و سیویتا^۴ (۱۹۰۷) بر روی سطوح منحنی توسعه داده شد. افراد دیگری این روش را برای حل مساله کلاسیک جریان کاویتی و جت به‌کار گرفتند [۴]. برای اولین بار ریلی^۵ (۱۹۱۷) یک تحلیل ریاضی در مورد رشد و نابودی حباب‌ها ارائه کرد. رابطه ریاضی ارائه شده که در حالت کلی معادله ریلی- پلست^۶ نامیده شد، اساسی‌ترین رابطه تحلیلی توصیف‌کننده دینامیک غیرخطی و گذرای حباب است. واگنر^۷ (۱۹۳۲) تحقیقاتی را بر روی ورود اجسام به آب انجام داد. کارهای او به پیشرفت تحقیقات سوپرکاویتاسیون کمک زیادی نمود [۵]. تحلیل کاهش پسا با استفاده از تزریق گاز به لایه مرزی، برای اولین بار توسط فیباوسکی^۸ و لوستیانسکی^۹ (۱۹۴۲) انجام شد [۶]. با مطالعاتی که توسط پوسدونین^{۱۰} (۱۹۴۴) بر روی حباب‌های سوپرکاویتی موتور کشتی‌ها، پمپ‌ها و هیدروفویل‌ها

1 Kirchoff
 2 Hodograph
 3 Levi
 4 Civita
 5 Rayleigh
 6 Rayleigh-plesset
 7 Wagner
 8 Febyavsky
 9 Lostyansky
 10 Posdunin

انجام گرفت، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در تحقیقات سوپرکاویتاسیون صورت پذیرفت [۷]. ریچارد^۱ (۱۹۴۶) بر روی ورود اجسام به آب تحقیقات بیشتری انجام داد [۸]. وی همچنین نشان داد که اثر سوپرکاویتاسیون مصنوعی به وسیله دمش هوا به داخل یک کاویتا (در سرعت‌های خیلی پایین) را می‌توان به صورت آزمایشگاهی، مشاهده نمود. افورس^۲ (۱۹۴۶) از نگاشت‌های همدیس^۳ جهت تحلیل جریان سوپر کاویتاسیون استفاده نمود [۹]. تولین^۴ (۱۹۵۳) با استفاده از تئوری خطی، یک حل تحلیلی برای جریان سوپر کاویتا حول هیدروفویل صفحه تخت در عدد کاویتاسیون صفر ارائه نمود. وی در دو سال بعد (۱۹۵۵)، بر روی حباب‌های سوپرکاویتا موتور کشتی‌ها، پمپ‌ها و هیدروفویل‌ها مطالعاتی را انجام داد [۱۰، ۱۱]. آکوستا^۵ (۱۹۵۵) اولین حل کاویتاسیون جزئی حول هیدروفویل صفحه تخت را ارائه نمود [۱۲]. توسط وو^۶ (۱۹۵۶ و ۱۹۶۲) پیشرفت‌های زیادی در این خصوص صورت گرفته است [۱۳، ۱۴، ۱۵]. وی از مدل گردابه باز جهت مطالعه جریان کاویتا حول هیدروفویل صفحه تخت با زاویه حمله دلخواه استفاده نمود. گurst^۷ (۱۹۵۹) یک تئوری خطی برای کاویتاسیون جزئی در عدد کاویتاسیون کوچک بنیان نهاد و در سال بعد آن را برای هیدروفویل‌های سوپرکاویتا تکمیل نمود [۱۶، ۱۷، ۱۸]. تولین (۱۹۶۴) برای اولین بار از روش پرتوربیشن^۸ برای بررسی سوپرکاویتا‌های دو بعدی استفاده نمود [۱۹]. گاتبرت^۹ و استریت^{۱۰} (۱۹۶۴) با استفاده از روش المان مرزی، از ترکیب توابع پتانسیل چشمه و چاه بر روی محور تقارن یک جسم متقارن محوری و مدل ریوژینسکی^{۱۱} برای پیش‌بینی ناحیه کاویتا روی برخی از هندسه‌های متقارن محوری استفاده کردند [۲۰]. از دیگر کارهای خوب صورت گرفته در زمینه توسعه روش‌های تئوری، محاسبه کاویتاسیون حول دیسک‌ها، لبه‌ها و اجسام مخروطی بود که توسط لوگوینویچ^{۱۲} (۱۹۶۹)، ناپ^{۱۳} (۱۹۷۰) و اپشتین^{۱۴} (۱۹۷۰) صورت گرفت

1 Reichardt
2 Efors
3 Onformal mapping
4 Tulin
5 Acosta
6 Wu
7 Geurst
8 Perturbation
9 Cuthbert
10 Street
11 Riabouchinsky
12 Logvinovich
13 Knapp
14 Epshtein

[۲۳،۲۲،۲۱]. لیهی^۱ (۱۹۷۱) تئوری سوپرکاویتاسیون هیدروفویل‌های سه‌بعدی را ارائه نمود [۲۴]. بسیاری از پیشرفت‌های تئوری‌های خطی روی کارهای فورویا^۲ و آکوستا^۳ (۱۹۷۳) بوده است [۲۵]. چو^۴ (۱۹۷۴) با توسعه روش استفاده شده در مرجع [۲۰] و نیز تئوری جسم نازک، ناحیه کاویتی بر روی هندسه‌های متقارن محوری متعددی را تخمین زد [۲۶]. استفاده از قدرت محاسباتی کامپیوتر در حل عددی کاویتی توسط گلدن^۵ (۱۹۷۵) آغاز شد. وی تئوری خطی گریست را برای صفحه صاف به کار گرفت [۲۷]. جیانگ^۶ (۱۹۷۷) با استفاده از روش گردابه و چشمه، یک تئوری عددی ناپایدار همراه با در نظر گرفتن اثر لیفت برای جریان‌های سوپرکاویتی حول هیدروفویل سه‌بعدی پیشنهاد نمود [۲۸]. لی^۷ (۱۹۷۹) از آن روش برای حل ناپایدار پره‌های کاویتی استفاده نمود [۲۹].

۱-۲-۲ روش‌های المان مرزی^۸

مساله جریان پتانسیل می‌تواند توسط روش المان مرزی حل شود. در این روش توزیعی از عناصر جریان پتانسیل (گردابه، چشمه، چاه، دابلت و دوگان) روی مرز جریان قرار داده می‌شود. پس از مقاله هس^۹ و اسمیس^{۱۰} (۱۹۶۶) برای محاسبه جریان پتانسیل حول اجسام مختلف با استفاده از روش المان مرزی، کاربرد این روش به سرعت افزایش یافت. هس و اسمیس روشی برای جریان‌های دو بعدی پایدار دارای لیفت بدون کاویتاسیون، با استفاده از توزیع چشمه و گردابه حول سطح جسم ارائه نمودند [۳۰]. باسو^{۱۱} و هانکوک^{۱۲} (۱۹۷۸) روشی برای جریان‌های ناپایدار ارائه نمودند [۳۱]. پلون^{۱۳} و رو^{۱۴} (۱۹۸۱) روش مشابهی برای مساله هیدروفویل‌های دو و سه‌بعدی ارائه نمودند [۳۲].

1 Leehey
2 Furuya
3 Acosta
4 Chou
5 Golden
6 Jiang
7 Lee
8 Boundary Element Method
9 Hess
10 Smith
11 Basu
12 Hancock
13 Pellone
14 Rowe