بسم الله

الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

مدلسازی عددی ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی در حرکت شتابدار

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

آرش شادلاقانی

اساتید راهنما

دکتر سید محمدعلی بدری دکتر شهریار منصورزاده

۱۳۹۲

سپاس

(من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق)

سپاس بیکران پروردگار بی همتا را که این حقیر را یاری فرمود تا بتوانم در این راه قدم بردارم.

در اینجا بر خود لازم می دانم از تمامی عزیزانی که در طول این سال ها مرا در تحصیل علم، معرفت و فضایل اخلاقی یاری نموده اند تقدیر و تشکر کنم:

از زحمات بی شائبه و خالصانه اساتید ارجمند جناب آقای دکتر سید محمد علی بدری و شهریار منصورزاده که با تواضع، صبر و متانت خویش، در مراحل مختلف این پروژه مرا یاری نموده اند تشکر می کنم و همواره رهنمودهای استادانه و ارزنده ایشان فراروی داشته و از خداوند متعال برای ایشان و همه پویندگان علم و دانش آرزوی توفیق روزافزون در کلیه مراحل زندگی دارم.

از هیئت داوران که این پایان نامه را مورد مطالعه قرار دادند و در جلسه دفاعیه شرکت نموده اند، کمال تشکر را دارم. از کلیه اساتیدی که افتخار شاگردی در محضرشان را داشتم تشکر می کنم، و از تمامی دوستانم که در همه حال هم چون کوهی استوار حامی و پشتیبان من بودند سپاس گزارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر بزرگوارم

پدر و مادر عزیزم در راهی که برایم هموار کردید رفتن کار سختی نبود.

فهرست

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱- پیش گفتار ۲

۱-۲- معرفی شناورهای زیرسطحی ۳

۱-۲-۱- زیردریایی ۳

۱-۲-۲- شناور زیرسطحی هوشمند ۴

۱-۳- اجزای شناورهای زیرسطحی ۵

۱-۴- نیروها و گشتاورهای وارد بر یک شناور زیرسطحی ۵

۱-۵- روشهای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی ۶

۱-۵-۱- روش عددی یا دینامیک سیالات محاسباتی ۶

۱-۵-۲- روش تحلیلی ۷

۱-۵-۳- روش آزمایشگاهی ۷

۱-۶- مروری بر کارهای عددی و تحلیلی انجام شده ۸

۱-۷- اهداف پژوهش حاضر ۱۱

فصل دوم: معادلات و روابط حاکم بر مسئله ۱۲

۲-۱- پیش گفتار ۱۲

۲-۲- شرحی بر جریانات آرام وآشفته ۱۳

۲-۳- روشهای حل معادلات اغتشاشی ۱۴

۲-۳-۱- مدل متوسط گیری از معادلات ناویر-استوکس ۱۴

۲-۳-۲- مدلهای اغتشاشی ۱۶

۲-۴- توابع دیوار ۱۷

۲-۵- نحوه شبکه بندی در لایه مرزی ۱۷
۲-۶- معادلات شش درجه آزادی حرکت ۱۸
۲-۶-۱- ماتریس جسم صلب(M_{RB}) ۱۹
۲-۶-۲- ماتریس جرم افزوده(M_a) ۲۰
۲-۶-۳- ماتریس کریولیس هیدرودینامیکی($C_{(v)}$) ۲۱
۲-۶-۴- ماتریس میرایی هیدرودینامیکی($D_{(v)}$) ۲۱
۲-۶-۵- ماتریس نیروها و ممانهای جلوبرنده ۲۳
۲-۶-۶- ماتریس نیروها و ممانهای بازگرداننده (g_η) ۲۳
۲-۷- جمع بندی ۲۳
فصل سوم: شبیه سازی عددی و نتایج آن ۲۴
۳-۱- پیش گفتار ۲۴
۳-۲- مراحل شبیه سازی عددی ۲۵
۳-۲-۱-هندسه حل ۲۵
۳-۲-۲- تولید شبکه ۲۶
۳-۲-۳- آماده سازی فرایند حل در CFX ۲۷
۳-۴- محاسبه ضرایب میرایی ۲۸
۳-۴-۱- تاثیر زوایای حمله و انحراف و محاسبه ضرایب میرایی ۳۳
۳-۳- محاسبه ضرایب افزوده ۴۰
۳-۶- جمع بندی ۵۲
فصل چهار: محاسبه ضرایب جرم افزوده به روش تحلیلی ۵۳
۴-۱- پیش گفتار ۵۳
۴-۲- معادلات حرکت در سیال ایده آل ۵۴
۴-۳- روش بیضیگونهای معادل ۵۵

۴-۳-۱- بیضیگون جایگزین ۵۵
۴-۴- تعیین ضرایب جرم افزوده ۵۷
۴-۵- محاسبه ضرایب جرم افزوده سابوف ۶۰
۴-۵- تئوری نوار ۶۳
۴-۶- نتایج ۶۴
۴-۷- جمع بندی ۶۵
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۶
۵-۱- نتیجه گیری ۶۶
۵-۲- پیشنهادها ۶۷
مراجع ۶۸

چکیده

یکی از مراحل مهم در طراحی شناورهای زیرسطحی، تعیین نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور می‌باشد. نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی شامل نیروهای اینرسی، جرم افزوده، میرایی، کریولیس، پیشرانش و نیرو و ممانهای بازدارنده می‌باشد. روشهای مختلف نظیر روشهای آزمایشگاهی، نیمه تجربی، تحلیلی و عددی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وجود دارد. در سالهای اخیر با پیشرفت علوم کامپیوتری روشهای عددی(CFD) کاربرد روزافزونی در صنایع زیردریا پیدا کرده‌اند. دقت بالای روشهای عددی باعث افزایش استفاده از این روشها در تعیین مقاومت و نیروی رانش شناورهای زیرسطحی شده است. در در پژوهش حاضر به محاسبه دو دسته ضرایب میرایی و جرم‌افزوده یک شناور زیرسطحی مدل به کمک روشهای عددی پرداخته شده‌است. در روش عددی حاضر از معادلات متوسط گیری شده رینولدز برای حل معادلات اغتشاشی سیال استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب میرایی، آزمونهای یکنواخت همراه با زاویه حمله و انحراف و برای محاسبه ضرایب جرم-افزوده آزمونهای حرکت شتابدار خطی به روش عددی و بوسیله نرم افزار تجاری Ansys Cfx استفاده شده است که بر پایه روش حجم محدود می‌باشد. زمانی که جسم با زاویه حمله یا انحراف نسبت به جریان حرکت کند، تغییرات ضریب درگ بر حسب این زوایا تابعی سهموی بوده و از این طریق می‌توان ضرایب میرایی غیرخطی را محاسبه نمود. همچنین با استفاده از نمودار نیرو و گشتاور میرایی وارد بر جسم در این حالات می‌توان ضرایب میرایی خطی را محاسبه کرد. با شبیه‌سازی حرکات دائم، ضرایب میرایی خطی و غیرخطی برای محاسبه ضرایب افزوده، ابتدا شبیه‌سازی روی یک کره انجام شده است تا بتوان از صحت شبیه‌سازی اطمینان حاصل نمود. حرکت شبیه‌سازی شده، مجموعه‌ای از حرکات شتابدار و سرعت ثابت می‌باشد تا تاثیر مقادیر مختلف شتاب و سرعت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با استفاده از روشهای تحلیلی، ضرایب جرم افزوده شناور مورد نظر محاسبه شده‌است. دو روش بیضیگون‌های معادل و تئوری نوار در این قسمت مورد استفاده قرار گرفته‌است. روش بیضیگون‌های معادل بر پایه تئوری جریان پتانسیل بوده و به این صورت می‌باشد که قسمت‌های مختلف زیردریایی با بیضیگون-هایی با ابعاد بهینه، جایگزین می‌شوند. ابعاد بهینه با برابر قرار دادن گشتاور اینرسی جرمی قسمت‌های مختلف شناور با بیضیگون معادل محاسبه شده است. سپس از طریق ثابت‌های لمب جرم افزوده هر بیضیگون محاسبه می‌شود. در آخر با جمع جبری ضرایب جرم افزوده مربوط به هر بیضیگون، ضریب جرم افزوده کل محاسبه می‌شود. در تئوری نوار جرم افزوده یک مقطع دوبعدی از جسم محاسبه می‌شود و سپس با انتگرال گیری در طول جسم، ضریب جرم افزوده کل بدست می‌آید. فرضیات ساده کننده روشهای تحلیلی نظیر چشم‌پوشی از اثرات لزجت و ماهیت وابسته به زمان جریان باعث کاهش دقت این روشها شده و به این دلیلی تنها در تقریب ضرایب هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج بدست آمده از روشهای عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی موسسه دیوید-تیلور مقایسه شده‌است. همخوانی نسبتا خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان دهنده دقت روش عددی استفاده شده در محاسبات هیدرودینامیکی می‌باشد.

کلید واژه: ضرایب هیدرودینامیکی، شبیه‌سازی عددی ، روشهای تحلیلی، زیردریایی

فصل اول

مقدمه

۱-۱- پیش گفتار

در طی دهه‌های اخیر استفاده از شناورهای زیرسطحی در زمینه‌های مختلف نظیرصنایع نظامی، اقیانوس شناسی، محیط زیست و غیره مورد توجه بسیار قرار گرفته‌است. بدلیل محدودیت در تامین توان مورد نیاز برای رانش و تجهیزات جانبی شناور زیرسطحی، محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی مورد نیاز، امری ضروری می‌باشد. بر این اساس تخمین ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی در مرحله طراحی بسیار مهم می‌باشد. طراحی بهینه شناورهای زیرسطحی ایده‌ایست که از مدتها قبل در مورد آن تحقیق شده‌است. برای نمونه می‌توان از بهینه‌سازی فرم بدنه شناور برای بهترین سرعت، دریامانی[1]،کاهش گردابه‌های ایجاد شده توسط شناور و بهینه سازی متعلقات[2] نام برد. طراحی بهینه شامل مانورپذیری، پایداری و کنترل می‌باشد که بشدت تحت تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور قرار دارند. نیروهای هیدرودینامیکی بصورت معادلات ریاضی در قالب ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. بدون شناخت دقیق ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی، انجام تحلیلهای هیدرودینامیکی و مطالعه دینامیک حرکت چند درجه آزادی این نوع بدنه ها میسر نمی‌باشد. اثرات متقابل حرکتی بدنه و محیط تابعی از پروفیل هندسی بدنه، سرعت حرکت بدنه، نوع مانور آن، همچنین جنس و نوع رژیم سیال بر روی بدنه است. از اینرو شناخت و تخمین دقیق این نیروها به منظور بهبود عملکرد و اعمال کنترل مناسب شناورهای زیرسطحی بسیار ضروری می‌باشد. به‌طور خلاصه، برای طراحی یک شناور زیرسطحی، باید پارامترهای طراحی آن توسط مدلهای ریاضی مورد

---

[1] Sea keeping
[2] Appandage

بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل نیروها و ممانهای هیدرودینامیکی می‌باشد که بصورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. فرایند بهینه سازی طراحی را می توان بصورت زیر بیان کرد:

۱) تعیین ابعاد و شکل بدنه

۲) هیدرودینامیک و کنترل سرعت

۳) انتخاب تجهیزات:در تعیین مرکز ثقل و حجم مورد نیاز اهمیت دارد.

۴) طراحی سازه‌ای

۵) تخمین وزن و مرکز ثقل

۶) کنترل پایداری: در این مرحله دو مشخصه مورد نیاز می‌باشد:۱) مشخصات هندسی بدنه ۲) مرکز ثقل شناور

۷)کنترل و مانورپذیری

۸) کنترل هزینه

۱-۲- معرفی شناورهای زیرسطحی

شناورهای زیرسطحی، وسایل شناوری می‌باشند که می‌توانند در زیر سطح آب حرکت کنند و به اعماقی برسندکه غواصان به آن دسترسی ندارند. شناورهای زیرسطحی شامل زیردریایی‌ها[1]، شناورهای زیرسطحی هوشمند[2] و غیرهوشمند[3]... می‌باشند که در زیر اجمالا به آنها اشاره شده‌است.

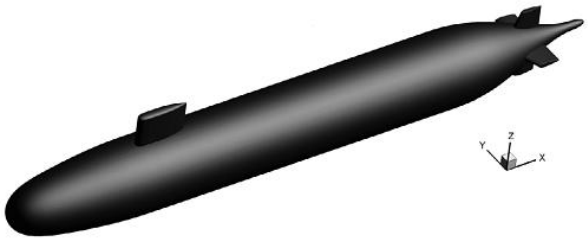
۱-۲-۱- زیردریایی

زیردریایی یک وسیله زیرسطحی است که می‌تواند در زیر سطح آب حرکت کند و در اعماق زیاد ماموریتهای مختلف را انجام دهد. زیردریایی ممکن است از نوع غیرنظامی (علمی یا گردشگری) یا از نوع نظامی باشد. در زیردریایی های اولیه از نیروی دست برای حرکت دادن زیر دریایی در اعماق کمک گرفته می‌شد. در سال ۱۶۲۰ شخص بنام ون دربل اولین زیردریایی را ساخت که می‌توانست در عمق ۴/۵ متری حرکت کند. حدود ۳۰ سال بعد روبرت فولتون، زیردریایی دیگری ساخت که برای اولین بار، بالهایی برای تنظیم عمق در زیردریایی تعبیه شد. فولتون سپس تلاش کرد تا زیردریایی دیگری با موتور بخار بسازد. مشکل طراحی این موتورها در آن بود که در زیر آب اکسیژن نبود. بنابراین موتوری طراحی شد که ابتدا آب در سطح آب داخل مخزنی با موتور دیزل (با سوخت گازوئیل) داغ و تبدیل به بخار می‌شد، سپس موتور خاموش می‌شد و زیردریایی به داخل آب شیرجه می‌زد و تا وقتی که بخار داخل مخزن سرد نشده بود، زیردریایی می‌توانست با موتور بخار در عمق دریا حرکت کند. در سال ۱۸۶۰ زیردریایی دیگری طراحی شد که بطور کامل زیر آب نمی‌رفت و از طریق لوله‌ای که به سطح آب راه داشت، اکسیژن را برای سوخت موتور به داخل زیردریایی مکش می‌کرد. در سال ۱۹۰۴ اولین زیردریایی که با موتور الکتریکی-دیزل کار می‌کرد، در فرانسه ساخته شد. موتورهای دیزل در سطح آب، باطری‌های الکتریکی را شارژ

---

[1] Submarine
[2] Autonomous Underwater vehicle
[3] Remotely operated vehicle

کرده و سپس زیردریایی در آب فرو می‌رود. در این هنگام موتور دیزل خاموش شده و موتور الکتریکی به کمک باطریهای شارژ شده، زیردریایی را حرکت می‌دهد. شکل۱-۱شماتیک یک زیردریایی را نشان می‌دهد:

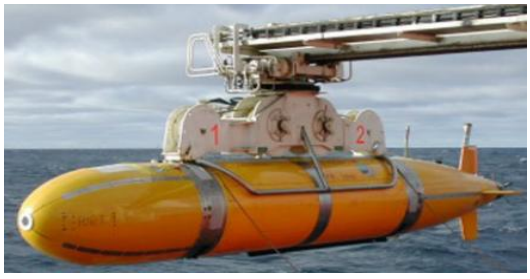


شکل۱-۱- شماتیک کلی یک زیردریایی

بدنه زیردریایی‌ها دارای یک حفره طولی است که می‌تواند با هوا یا آب پر شود. برای فرورفتن در آب مخازنی را در بدنه با آب پر می‌کنند و برای بازگشت به سطح آب هوای فشرده‌ای که در مخازن تحت فشار قرار دارد رها شده و مخازن را پر از هوا می‌کند.

۱-۲-۲- شناور زیرسطحی هوشمند

برای اولین بار AUV در آزمایشگاه فیزیک دانشگاه واشنگتن در سال ۱۹۵۷ توسط مورفی فرانکویل مورد بحث قرار گرفته است. AUV ها رباتهای زیرآبی پیشرفته‌ای می‌باشند که بدون استفاده از کابل، امکان هدایت آنها در اعماق دریا وجود دارد. این گونه از ربات‌های زیرآبی، جهت جستجو در اعماق اقیانوس و انجام مطالعات اقیانوس‌شناسی و نیز مصارف نظامی، کاربردهای فراوانی دارند.



شکل۱-۲- یک AUV در حال به آب انداختن

این نوع از شناورهای زیرسطحی در اب های کم عمق تا آبهایی به عمق هزاران متر کاربرد دارند،که در این صورت می‌توان از اثرات سطح و موج بر حرکت آنها صرفنظر کرد. در عین حال که اغلب تکنولوژی طراحی و ساخت ربات‌های زیرآبی با قابلیت‌ها و توانایی‌های متنوع، بسیار گران قیمت و پرهزینه است اما در سال‌های اخیر تلاش‌هایی نیز برای ساخت ربات‌های زیرآبی با صرف هزینه پایین صورت پذیرفته است.

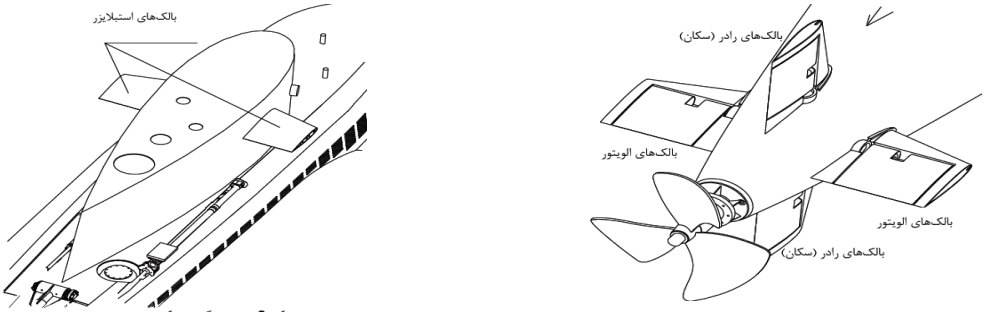
۱-۳- اجزای شناورهای زیرسطحی

۱)بدنه ۲)بالک های کنترل کننده

۳)دماغه ۴)پروانه

۵)دم مخروطی ۶)سیستم تعادل

۷)برجک(مخصوص زیردریایی‌ها)



شکل۱-۳- اجزای کلی یک شناور زیرسطحی

۱-٤- نیروها و گشتاورهای وارد بر یک شناور زیرسطحی

نیروهای وارد بر یک شناور زیرسطحی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- وزن وسیله

۲- نیروی شناوری

۳- نیروها و گشتاورهای اعمالی توسط سطوح کنترل شامل بالکهای عمودی و افقی: بالکهای افقی برای کنترل حرکات عمودی و بالکهای عمودی برای کنترل حرکات سمتی

۴- نیروی جلو برنده پروانه[1]: این نیرو یک نیروی واکنشی به خروج آب توسط پروانه می‌باشد. این نیرو مستقیم و در جهت محور پروانه می‌باشد.

۵- نیروی هیدرودینامیکی وارد بر بدنه و قسمتهای اضافه شده و گشتاوری آنها: در نتیجه مقاومت بدنه و قسمتهای دیگر در برخورد با آب بوجود می‌آید.

۶- نیروی اینرسی وگشتاورهای آن

[1] Thrust

۱-۵- روشهای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی

حال به بررسی روشهای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مورد استفاده در پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. روشهای متفاوتی برای مشخص کردن ضرایب هیدرودینامیکی وجود دارد، که می توان از روشهای آزمایشگاهی، تحلیلی، نیمه تجربی و عددی نام برد.کاربرد این روشها بستگی به عوامل مختلفی از قبیل هزینه و زمان محاسبات، امکانات سخت افزاری و نرم افزاری و غیره دارد.

۱-۵-۱- روش عددی یا دینامیک سیالات محاسباتی[1]

روشهای عددی، یکی از مهمترین روشهای تحلیل نیروهای هیدرودینامیکی می‌باشند که با توسعه کامپیوترهای امروزی بعنوان یک ابزار قوی در صنعت دریا مورد استفاده قرارگرفته‌اند. روشهای عددی در قالب کدهای تخصصی و تجاری موجود می‌باشند. قابل ذکر می‌باشد که روشهای عددی در مواقعی که هندسه جسم پیچیده باشد نیز کاربرد دارند. از ویژگی های روش عددی می توان موارد زیر را نام برد:

- کاهش اساسی در زمان و هزینه طراحی های جدید
- توانایی مطالعه سیستم هایی که انجام آزمایشات روی آنها مشکل و یا غیرممکن می باشد.
- توانایی مطالعه سیستمها تحت شرایط تصادفی و بالاتر از حدود معمول آنها
- سطح جزییات نتایج بسیار زیاد است.

روشهای عددی شامل روشهای حجم‌محدود، روش پانل‌بندی[2] و المان‌مرزی[3] می‌باشند. دیدگاه حجم محدود، بقا محلی هر خاصیت از سیال را برای هر حجم کنترل تضمین می‌کند.این رابطه روشن بین الگوریتم عددی و قاعده کلی بقا اصل فیزیکی، از مهمترین ویژگیهای اصلی روش حجم‌محدود می‌باشد. برای مثال یک مولفه مانند Φ، در داخل یک حجم کنترل را می توان بصورت یک تساوی بین فرایندهای متفاوت که منجر به افزایش یا کاهش آن می شود نشان داد. رابطه۱-۱ این موضوع را نشان می‌دهد.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho\phi dV}_{\text{غیردائم}} + \underbrace{\int_A \rho\phi V.dA}_{\text{جابجایی}} = \underbrace{\int_A \Gamma\nabla\phi.dA}_{\text{پخش}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{تولید}} \qquad (۱-۱)$$

در روش پانل‌بندی ناحیه‌حل به تعدادی شبکه تقسیم‌بندی می‌شود و در هر شبکه جوابهای مقدماتی شامل چشمه، چاه و دوقطبی با قدرت ثابت σ_i قرار می‌گیرد. در هر شبکه، پتانسیل سرعت که تابعی از قدرت چشمه، چاه یا دوقطبی است با استفاده از شرط $\frac{\partial\varphi}{\partial n}=0$ بدست می‌آید و با حل دستگاه معادلات برای شبکه و استفاده از شرط مرزی، معادلات حل می‌شود. در ضمن قابل ذکر است که این روش برای تعیین ضریب درگ بدلیل استفاده از تابع پتانسیل کاربرد ندارد.

---

[1] Computational Fluid Dynamics
[2] Panel Method
[3] Boundary Element Method

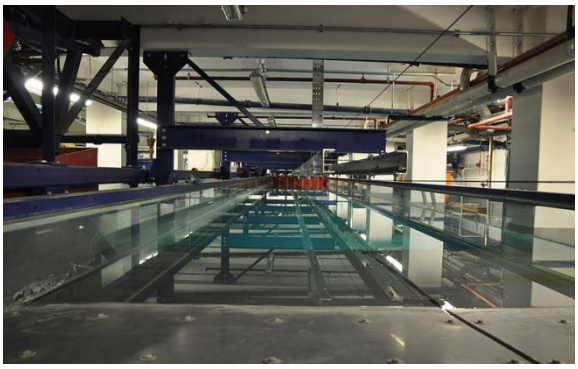
در روش المان‌مرزی برخلاف روشهای دیگر محاسباتی نظیر اجزا محدود و حجم محدود، شبکه‌بندی بر روی مرزهای مدل صورت می‌پذیرد و در هر نقطه می‌توان پتانسیل سرعت را بر اساس تئوری گرین به صورت معادله انتگرالی در کل مرز بیان کرد و سپس برای هر نقطه، میدان پتانسیل را تعیین نمود. در نتیجه در این روش اصلاح و یا تغییر شبکه کار راحت‌تری است. این کار سبب آسان شدن مدلسازی عددی و کاهش زمان و هزینه محاسباتی می‌گردد. مراحل اصلی این روش عبارتست از ایجاد شبکه، محاسبه قدرت چشمه و دوقطبی در هر المان، حل معادلات همزمان برای قدرتهای مجهول جوابهای مقدماتی(چشمه، چاه و دوقطبی) و تعیین سرعت‌های محلی، فشارها، نیروها و گشتاورهای کل می‌باشد.

۱-۵-۲- روش تحلیلی

در این روشها معادلات حرکت جسم حل و با استفاده از شرایط مرزی، پتانسیل سرعت جسم بدست می‌آید و با جایگذاری در معادله برنولی، توزیع فشار حول جسم و از این طریق نیروی وارد بر جسم بدست می‌آید. روشهای تحلیلی عموما برای هندسه های پیچیده به سختی حل می‌شوند و به این دلیل کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. روشهای جریان پتانسیل و تئوری نوار[1] در این دسته قرار می‌گیرند که ساده‌سازی‌هایی در معادلات انجام می‌شود. بطور مثال در تئوری جریان پتانسیل، برای حل معادلات ناویر-استوکس، اثرات لزجت در نظر گرفته نمی‌شود و در تئوری نوار، ضرایب بر پایه هندسه جسم بدست می‌آیند.

۱-۵-۳- روش آزمایشگاهی

در روش آزمایشگاهی معمولا از حوضچه‌کشش[2] برای انجام آزمایشهای هیدرودینامیکی جهت طراحی یک شناور یا بهبود عملکرد آن استفاده می‌شود. حوضچه کشش کانالی به عرض چند متر و طول چندصد متر می‌باشد که دارای دو ریل می‌باشد و ارابه کششی مدل شناور را با سرعتهای مختلف در امتداد ریل ها می‌کشد.



شکل۱-۵- حوضچه کشش

[1] Strip theory
[2] Towing Tank

آزمونهایی که در حوضچه کشش انجام می‌شود شامل آزمایشهای حرکت مسیرمستقیم[1]، مکانیزم حرکات صفحه‌ای[2] و حرکت مخروطی[3] می‌باشد.

- آزمایش مسیر مستقیم: در این آزمایش ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به حرکات خطی محاسبه می‌شود. سرعت مدل در زوایای انحراف و حمله مختلف ثابت می‌باشد. همچنین حرکات خطی با شتاب ثابت نیز در این آزمایش قابل انجام می‌باشد. نیروسنجی که به مرکز ثقل جسم نصب شده‌است، نیرو و ممان وارد شده را در هر زاویه انحراف و حمله‌ای اندازه می‌گیرد.
- آزمایش بازوی‌چرخان: در این آزمایش که در تانک آب بزرگی[4] صورت می‌گیرد، ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به حرکت چرخشی بدست می‌آیند. جسم به یک بازوی دوار که دارای سرعت زاویه‌ای می‌باشد، متصل شده‌است و حول محور عمود بر تانک با سرعت خطی ثابت در یک شعاع مشخص می‌چرخد.
- آزمایش حرکات صفحه‌ای: این نوع آزمایش شامل یک وسیله الکترومکانیکی است که برای حرکت دادن مدل بصورت یک سری از حرکات نوسانی پیش برنامه ریزی شده در حوضچه‌کشش، مورد استفاده می‌گیرد. PMM شامل دو محرک الکترومکانیکی است که بصورت عمودی و افقی بر روی دستگاه آزمایش نصب می‌شود.
- آزمایش حرکت مخروطی: حرکت مخروطی بعنوان حرکت چرخشی پیوسته‌ی محور طولی یک وسیله تعریف می‌شود. برای تولید چنین حرکتی در تونل آب، مدل به یک تکیه گاه متصل است که می‌تواند در یک سرعت چرخشی ثابت حول محور موازی حرکت دوران کند. دستگاه حرکت مخروطی می‌تواند حرکت شش درجه آزادی از قبیل حرکت رول خالص را اعمال کند.

۱-٦- مروری بر کارهای عددی و تحلیلی انجام شده

در این بخش به کارهای عددی و تحلیلی انجام شده در مورد تعیین ضرایب هیدرودینامیکی شناورهای زیرسطحی اشاره می‌شود. در کارهای انجام شده، ضرایب هیدرودینامیکی، مرتبط با نوع حرکت شبیه‌سازی شده بدست آورده شده‌اند. یعنی ضرایب جرم افزوده با شبیه سازی حرکات شتابدار و ضرایب میرایی با شبیه سازی حرکات دائم استخراج شده‌اند. در ضمن صحت کارهای انجام گرفته از طریق نتایج بدست آمده از روش آزمایشگاهی مقایسه شده‌است.

ژانگ و همکاران[۱]، در سال ۲۰۱۰ حرکات صفحه‌ای را با کمک نرم افزار فلوئنت شبیه سازی کرده و ضرایب افزوده مربوط به این حرکات را بدست آوردند. آنها با حرکت دادن جسم در سیال، شبیه سازی را انجام داده و این کار را با استفاده از شبکه‌بندی متحرک انجام داده‌اند. مدل مورد بررسی در این کار، شناور زیرسطحی با نسبت طول به قطر زیاد می‌باشد. آنها همچنین حرکت دائم خطی و مایل را بررسی کرده و ضرایب هیدرودینامیکی این نوع حرکت را بدست آوردند و در آخر نیز نتایج حاصله را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌اند.

---

[1] Straight Line Test
[2] Planar Mechanism Motion
[3] Coning Motion Test
[4] Basin

ژینکسین[۲]، نیز حرکت یک شناور زیرسطحی هوشمند را در دو حالت ساده و به همراه یدک به کمک روش عددی شبیه‌سازی کرده‌است. وی حرکات موجود در آزمایشهای حرکات صفحه‌ای و تاثیر یدک را بر این مانورها را بررسی کرده‌است.

او هندسه خود را در Gambit تولید کرده و با کمک نرم افزار فلوئنت نتایج مورد نظر خود را استخراج کرده است. او جسم را در داخل دامنه‌حل حرکت داده‌است. از شبکه‌بندی بی‌سازمان در نزدیکی جسم و شبکه‌بندی ساختاریافته در نواحی دور از جسم استفاده شده‌است. این کار نیز توسط تکنیک شبکه‌بندی متحرک انجام شده‌است. وی همچنین حرکت چرخشی را نیز شبیه سازی کرده و تاثیر یدک را بر شعاع چرخش بررسی کرده‌است. او نشان داد که در حالت یدک‌دار شعاع چرخش افزایش پیدا می‌کند.

فیلیپس و همکارانش[۳]، در مقاله خود با نام آزمایشهای مجازی مکانیزم حرکت صفحه‌ای، بصورت عددی حرکات تجربی PMM را شبیه‌سازی کردند. آنها در این روش از دامنه حل داخلی منطبق بر جسم استفاده کردند تا جریان غیردائم جسم را شبیه‌سازی کنند. شبکه داخلی نسبت به یک دامنه خارجی ثابت با استفاده از شبکه‌های کششی و تراکمی اشتراک دارد. نتایج بدست آمده با روش آزمایشگاهی در حوضچه کشش مقایسه شده‌است. نتایج برای حرکت زیگزاگی دقت خوبی را نشان داده و هزینه محاسباتی نسبتاً پایینی را شامل شده‌است.

وی در کار دیگری حرکات بازوی چرخان و آزمون کشش ثابت همراه با زاویه انحراف را شبیه سازی کرده‌است[۴].

سئونگ لی و همکاران[۵]، نیز در سال ۲۰۱۱ شبیه سازی عددی را روی یک UUV[1] به شکل بیضیگون، انجام داده‌اند و ضرایب جرم افزوده این مدل را بدست آورده‌اند. حرکت شبیه‌سازی شده، مکانیزم حرکات صفحه‌ای عمودی می‌باشد و شبکه‌بندی در این کار بصورت غیرساختار یافته تولید شده‌است. وی همچنین اثر فرکانس نوسانات را روی ضرایب جرم افزوده بررسی کرده‌است و نتایج خود را با روشهای آزمایشگاهی و تئوری مقایسه کرده و نشان داد که در فرکانسهای بالا ضریب جرم افزوده تطابق بهتری با روش آزمایشگاهی دارد.

ژیانگ هو[۶]، در سال ۲۰۰۸ نیز حرکت بازوی چرخان را شبیه سازی کرد و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود.

بیکر[۷]، در سال ۲۰۰۴ با کمک روشهای عددی به تخمین نیروی درگ وارد بر بدنه زیردریایی پرداخت. او مراحل شبیه سازی را به صورت کامل در نرم افزار CFX شرح داده‌است. او در کارش مراحل ساخت هندسه، تولید شبکه، تعریف شرایط مرزی، تنظیمات حلگر، تنظیمات شرایط اولیه و پردازش نتایج را شرح داده است. در انتها نتایج حاصل را با نتایج تونل باد مقایسه کرده است.

کویی[۸] در دانشگاه ویرجینیا، حرکات صفحه‌ای برای یک UUV بیضیگون را به روش عددی با استفاده از نرم افزار STAR-CCM شبیه‌سازی کرده‌است. او از شبکه بندی بی‌سازمان استفاده کرده‌است. او با استفاده از بسط فوریه، نیروی کل را به دو نیروی جرم‌افزوده و میرایی تجزیه کرده و نتایج مربوط به جرم‌افزوده خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده‌است. او تاثیر عدد کورانت و کمیتهای موثر در آزمایش حرکات صفحه‌ای از قبیل دامنه نوسان، فرکانس نوسان و عدد رینولدز را روی نتایج خود مورد بررسی قرار داده‌است.

[1] Unmanned Underwater Vehicle

ایوب و همکاران[۹]، در سال۲۰۰۵ در مرکز تحقیقات بین المللی اسلام آباد به کمک نرم افزار فلوئنت جریان اطراف یک زیردریایی را تحلیل کردند. آنها با درنظر گرفتن سه طول متفاوت برای این شناور در حرکت دائم، اثر افزایش یا کاهش طول شناور را بر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آن را بررسی کردند.

تانگ[۱۰]، در سال ۲۰۰۹ به طریق عددی ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی هوشمند با شکل پیچیده را محاسبه نمود. ابتدا درستی نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه‌کرد و سپس با استفاده از نتایج شبیه‌سازی رابطه بین نیروهای هیدرودینامیکی و حرکت با شش‌درجه‌آزادی را تحلیل کرده است.

فرناندز[۱۱]، در سال۲۰۰۷ نیز به طریق آزمایشگاهی ضرایب جرم‌افزوده خطی یک جسم با هندسه پیچیده را بدست آورده‌است. وی جسم را با سرعت ثابت در حوضچه‌کشش حرکت داده و سپس در انتهای این حرکت، جسم با شتاب ثابت حرکت داده و با محاسبه اختلاف نیروهای بدست آمده از دو مرحله، نیروی جرم‌افزوده را محاسبه کرده - است.

نظیر و همکاران[۱۲]، در سال ۲۰۱۰ به مطالعه حالت غیر دائم ضرایب هیدرودینامیکی برای پره در حالت سه بعدی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آنها به مطالعه حرکت سطوح کنترل و پره های زیر دریایی پرداختند. در این مقاله به تحلیل عددی جریان لزج پرداخته شده و ضرایب هیدرودینامیکی (لیفت، درگ و ممان) برای دو فرکانس نوسانی مختلف محاسبه شده و نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه گردیده‌است.

چاز[۱۳] در سال۲۰۱۲ در پایان‌نامه خود در دانشگاه آیوا، به بررسی عددی و آزمایشگاهی حرکات یکنواخت یک زیردریایی در دو حالت همراه با پروانه و بدون پروانه پرداخته و نتایج حاصل از معادلات اغتشاشی متفاوت در روش عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه کرده‌است.

یوکان[۱۴]، نیز در سال ۲۰۱۲ حرکات صفحه‌ای را به روش عددی شبیه‌سازی کرده و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه کرده‌است. او در کار خود به بررسی تعداد المانها و شبکه‌بندی لایه مرزی بر صحت نتایج خود پرداخته‌است. وی همچنین حرکات یکنواخت را به منظور استخراج ضرایب میرایی شبیه‌سازی کرده‌است.

از کارهای تحلیلی انجام شده به منظور استخراج ضرایب هیدرودینامیکی می‌توان به کار پرالت و همکارانش[۱۵]، در سال ۲۰۰۲ اشاره کرد که به بررسی حساسیت ضرایب جرم افزوده یک AUV با تغییر هندسه‌ی پوسته و صفحات کنترل پرداختند. معادلاتی مبنی بر اثر تغییر هندسه استخراج شد. ضرایب جرم‌افزوده برای چندین هندسه با استفاده از برنامه کامپیوتری ESAM محاسبه شد.

وات[۱۶]، در سال ۱۹۸۸ به کمک روش تحلیلی، ضرایب جرم افزوده یک زیر دریایی در عمق زیاد را تخمین زد. هر قسمت با یک بیضیگون با سه محور اصلی مستقل تخمین زده شده‌است. هندسه، موقعیت و وضعیت بیضیگون به نحوی انتخاب می‌شود که جرم افزوده و ممان افزوده بهینه‌ای بدست‌آید. همچنین تاثیرات ملحقات نسبت به هم ناچیز در نظر گرفته می‌شود. در این روش از تئوری جریان پتانسیل تراکم ناپذیر استفاده شده‌است.

مهدی‌پور[۱۷] نیز با استفاده از روش جریان پتانسیل ضریب جرم افزوده جانبی یک شناور زیرسطحی متقارن با در نظر گرفتن اثر برجک را بررسی کرده است. او با بدست آوردن تابع پتانسیل، توزیع فشار را روی جسم بدست آورد و از

این طریق نیرو را محاسبه کرد. او نتایج تحلیلی خود را با روش عددی مقایسه کرد و ضریب جرم افزوده جانبی شناور مورد نظر را بدست آورد.

روش تحلیلی دیگری برای تعیین نیروها و ممان های هیدرودینامیکی برای بدنه بدون ملحقات در مرجع [۱۸] ارائه شده است. این محاسبات تحلیلی برای چهار بدنه متفاوت انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه شده‌است.

جورنی[۱۹]، الگوریتمی بر مبنای تئوری نوار برای پیش بینی ضرایب هیدرودینامیکی یک کشتی تعریف کرد. بلوینز[۲۰]، با استفاده از این تئوری، فرضیه‌ای برای محاسبه جرم افزوده جریان محوری بدنه‌های متقارن ارائه داده است.

۱-۷- اهداف پژوهش حاضر

بدلیل تاثیرگذاری نیروهای هیدرودینامیکی در مانورپذیری، کنترل، مصرف سوخت و سایر پارامترهای تاثیرگذار بر حرکت یک شناور زیرسطحی، محاسبه این نیروها یکی از مراحل مهم در طراحی شناورهای زیرسطحی می‌باشد. با صرف نظر کردن از اثرات سطح‌آزاد، گردابه و موج و همچنین نیروی ناشی از سطوح کنترلی، نیروی کل وارد بر یک شناور زیرسطحی شامل نیروهایی وابسته به شتاب و سرعت بوده که به ترتیب نیروهای افزوده و میرایی نامیده می‌شوند. این ضرایب وابسته به هندسه، نوع و جهت حرکت جسم هستند. در پژوهش حاضر ضرایب جرم‌افزوده و میرایی یک زیردریایی مدل به کمک نرم‌افزار Ansys Cfx بر پایه روش حجم محدود محاسبه خواهد شد. همچنین با استفاده از روشهای تحلیلی، ضرایب جرم‌افزوده زیردریایی مذکور مشخص و با نتایج عددی مقایسه خواهد شد.

پژوهش حاضر شامل چهار فصل می‌باشد که در فصل اول به معرفی شناورهای زیرسطحی و کاربردهای آنها، روشهای محاسبه نیروهای هیدوردینامیکی و مرور کارهای گذشته که در این زمینه انجام شده‌است، پرداخته شد. در فصل دوم به معرفی روابط، معادلات حاکم و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک شناور زیرسطحی در حرکت شش درجه آزادی پرداخته خواهد شد. در فصل سوم به معرفی آزمونهای شبیه‌سازی شده و همچنین نحوه استخراج ضرایب مربوط به این آزمونها به روش عددی پرداخته می‌شود. آزمونهای شبیه‌سازی شده شامل حرکات شتابدار، حرکات یکنواخت شامل حرکت در مسیرمستقیم، حرکات همراه با زاویه انحراف و حمله می‌باشد. بدین ترتیب ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی مدل به روش عددی تعیین و با گزارشهای آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌شود تا از صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. همچنین در این فصل اثر کمیتهای عددی و هیدورودینامیکی موثر بر صحت و دقت نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. در فصل چهارم ضرایب جرم‌افزوده شناور مورد بحث به کمک روشهای تحلیلی استخراج شده‌است. روش مورد نظر در این فصل تنها برای ضرایب جرم و ممان افزوده کاربرد دارد و بر پایه تئوری جریان پتانسیل می‌باشد. همچنین با استفاده از تئوری نوار بعنوان ابزاری دیگر از روشهای تحلیلی، ضرایب جرم و ممان افزوده محاسبه شده است. نتایج حاصل از این روشها نیز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. بدین ترتیب در پژوهش حاضر برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی از دو روش عددی و تحلیلی استفاده خواهد شد و با مقایسه نتایج این دو روش با نتایج آزمایشگاهی موسسه دیوید-تیلور می‌توان نسبت به کارامدی این روشها نظر داد.

فصل دوم

معادلات و روابط حاکم بر مسئله

۲-۱- پیش گفتار

معادلات حاکم بر مکانیک سیالات، یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته را شامل می‌شود که باید در دامنه‌ای دلخواه با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند. معادلات حرکت سیال همگن بدون وجود واکنش شیمیایی و انتشار جرم بر اساس سه قانون بقای فیزیکی استوار هستند. از آنجا که در بیشتر کاربردهای مهندسی، مقدار متوسط کمیت قابل اندازه گیری در جریان سیال مورد نظر است، از فرض پیوستگی توزیع مواد استفاده می‌کنیم. این فرض، محیط‌های پیوسته نامیده می‌شود و تا زمانیکه کوچکترین بعد فیزیکی، بسیار بزرگتر از فاصله آزاد مولکول‌ها باشد، درست است. معادله‌های پایداری حرکت سیال در شکل دیفرانسیلی آن از قوانین زیر استخراج می‌شوند:

۱-بقای جرم (پیوستگی)

۲-بقای ممنتوم خطی (قانون دوم نیوتن)

۳-بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)

دستگاه معادلات بدست‌آمده بغیر از معادله انرژی را معادلات ناویر-استوکس می‌نامند. در کاربردهایی که در آنها جرم مخصوص در سرتاسر جریان یکنواخت باشد، فرض جریان تراکم‌ناپذیر را بکار می‌بریم. در حالتیکه عدد ماخ به سمت صفر میل کند، معادلات ناویر-استوکس غیرقابل تراکم از معادلات ناویر استوکس تراکم‌پذیر، قابل استخراج می‌باشد. در بیشتر روشهای عددی گام زمانی با عدد کورانت[1] محدود می‌شود. محدودیتی که در بیشتر روشهای صریح برای معادلات ناویر-استوکس و یا اویلر در فضای محاسباتی بکار می‌رود. برای جریانهای تراکم‌ناپذیر گام

[1] Courant Number