

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی آزمایشگاهی تاثیر تزریق نانو حباب بر نیروی درگ وارد بر شناورها

نگارنده: رضا رجب پور سرحمای

استاد راهنما

دکتر سید فضل ا... ساغروانی

تیرماه ۱۴۰۰

شماره: ۵۱۲
تاریخ: ۱۳۸۸/۴/۱۳
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

یا نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد رضا رجب پور سرجمانی با شماره دانشجویی ۹۷۰۷۵۶۴ رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه های هیدرولیکی تحت بررسی آزمایشگاهی تأثیر توزیع نانو حباب بر نیروی درگ وارد بر شناورها که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۴/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام میگردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	اعضاء
۱- اسناد راهنمای اول	دکتر سید فضل اله ساغری	دانشیار	
۲- اسناد راهنمای دوم			
۳- اسناد مشاور			
۴- اسناد داور اول	دکتر امیرعباس عابدینی	استادیار	
۵- اسناد داور دوم	دکتر مهدی عجمی	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن کرمانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی دانشجو: دکتر رضا نادری
تاریخ و مکان: شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود
مهر و امضاء:

تقدیم اثر

تقدیم به همسر عزیز و مهربانم که در این پایان نامه با تمام سختی هایی که وجود داشت
با حمایت و مساعدت خود مرا همراهی کرد

تشکر و قدردانی

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. از پدر و مادر عزیز و
مهربانم به خاطر زحماتی که در طول زندگی همواره برای پیروزی و شادکامی من به
جان خریدند، تشکر می‌کنم. از همسر عزیزم به خاطر همکاری‌ها و دلگرمی‌هایش که
بسیار موجب پیشرفت من گردید متشکرم.
از اساتید محترم جناب دکتر ساغروانی و مهندس علی اکبری که زحمت زیادی برای
تحقق این پایان نامه و پروژه تحقیقاتی داشتند متشکرم.

تعمدنامه

اینجانب رضا رجب پور سرحمای دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی تاثیر تزریق نانو حباب بر نیروی درگ وارد بر شناورها تحت راهنمایی دکتر سید فضل ا... ساغروانی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

نیروی درگ یا پسا، همواره یکی از عوامل مهم در طراحی و ساخت وسایل نقلیه دریایی بوده است. کاهش نیروی درگ سبب صرفه جویی در مصرف انرژی و به تبع آن کاهش آلودگی می شود. در طی دهه های اخیر روش های گوناگونی از جمله استفاده از رنگ های آبگریز، محلول های پلیمری، حفره هوا، فیلم هوا و پوشش های تطبیقی برای کاهش نیروی درگ بکار برده شده که همگی علاوه بر مزایا، معایبی نیز دارند. از جمله روش های نوین در کاهش درگ، تزریق میکرو-نانوحباب می باشد که نیاز به بررسی های بیشتر در خصوص اثرات آن بر حرکت شناورها است.

در این پژوهش ضمن بررسی فعالیت های انجام شده در زمینه کاهش پدیده ی نیروی درگ، به بررسی تزریق میکرو-نانو حباب و مکانیزم حاکم بر این پدیده و قیاس بین آب حاوی میکرو-نانو حباب و آب معمولی در کاهش درگ بر روی یک شناور پرداخته شده است. طبق نتایج بدست آمده، آب حاوی میکرو-نانو حباب باعث کاهش نیروی درگ می شود که مقدار آن در سرعت های مختلف بین حدود ۴٪ الی ۶۲٪ متغیر است. در ادامه به مدلسازی عددی محاسبه ضریب درگ شناور در سرعت های جریان ۰.۵ متر بر ثانیه و ۱ متر بر ثانیه و تطبیق آن با مدل آزمایشگاهی پرداخته شده است که به ترتیب با حدود ۷ و ۱۵ درصد خطا، مدلسازی مطلوبی رقم خورد.

کلمات کلیدی: نیروی درگ، میکرو نانو حباب، ضریب درگ، عدد رینولدز، سرعت، openFoam

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- بررسی آزمایشگاهی تاثیر تزریق نانو حباب بر نیروی درگ
(در دست اقدام در وضعیت ارسال به داوری - نشریه هیدرولیک ایران)

فهرست مطالب

ج	فهرست جداول
ه	فهرست اشکال
و	فهرست علائم
۱	فصل ۱:
۱	کلیات تحقیق
۲	مقدمه.....
۳	۱-۲ ضرورت انجام تحقیق.....
۳	۱-۳ اهداف پژوهش.....
۴	۱-۴ زمینه نوآوری.....
۴	۱-۵ معرفی ساختار پایان نامه.....
۵	فصل ۲
۵	مروری بر تحقیقات گذشته
۶	۲-۱- پیشینه تحقیق:.....
۱۳	۲-۲- میکرو نانو حباب های هوا.....
۱۹	فصل ۳
۱۹	مواد و روش انجام آزمایش
۲۰	۳-۱ مقدمه.....

۲-۳ بررسی آزمایشگاهی..... ۲۰

۳-۳ اندازه گیری ابعاد میکرو نانو حباب ۲۱

۴-۳ مواد و تجهیزات استفاده شده در آزمایش ۲۲

۵-۳ شرح انجام آزمایش..... ۲۳

۶-۳- آنالیز عددی..... ۲۷

۸-۳ مدل سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM..... ۲۹

۴۳ فصل چهارم

۴۳ تجزیه و تحلیل آزمایش

۴-۱- نتایج بدست آمده از آزمایش روی آب معمولی و آب حاوی میکرونانو حباب ۴۴

۴-۱-۱- آزمایش تزریق بر شناور جهت کاهش درگ ۴۴

۵۳ فصل پنجم

۵۳ نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۲- پیشنهادات برای مطالعات در آینده..... ۵۴

• منابع داخلی..... ۵۶

پیوست..... ۶۱

فهرست جداول

جدول ۱-۲ رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آنها- برگرفته از مظفری نائینی.....	۲
جدول ۱-۳ مشخصات رایانه مورد استفاده.....	۳۰
جدول ۲-۳ روش های گسسته سازی و حل معادلات در openfoam.....	۳۷
جدول ۳-۳ ضرایب مورد استفاده در معادله های مدل استاندارد K-ε.....	۴۰
جدول ۱-۴ مقادیر نیرو درگ در حالت آب معمولی در سرعت های مختلف شناور.....	۴۴
جدول ۲-۴ مقادیر نیرو درگ و ضریب درگ در حالت آب میناب در سرعت های مختلف شناور.....	۴۶
جدول ۳-۴ مقدار نیرو، ضریب درگ و عدد رینولدز.....	۴۹
جدول ۳-۴ میانگین ضریب درگ.....	۴۹
جدول ۵-۴ میانگین ضریب درگ.....	۵۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ مقایسه رفتار ماکرو حباب، میکرو حباب و نانو حباب ۱۳
- شکل ۲-۲ شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت ۱۶
- شکل ۱-۳ دستگاه PH متر ۲۰
- شکل ۲-۳ دستگاه کنداکتومتر ۲۱
- شکل ۳-۳ شناور مورد نظر ۲۲
- شکل ۴-۳ دستگاه تولید میکرو نانو حباب ۲۴
- شکل ۵-۳ نصب لوله تزریق ۲۵
- شکل ۶-۳ نصب تیر ۲۵
- شکل ۷-۳ سنسور اندازه گیری ۲۶
- شکل ۸-۳ مراحل نهایی نصب ۲۶
- شکل ۹-۳ اتاق کنترل ۲۶
- شکل ۱۰-۳ ۲۹
- شکل ۱۱-۳ مش سطحی جسم ۳۱
- شکل ۱۲-۳ شرایط مرزی ۳۲
- شکل ۱۳-۳ عملیات مش زنی ۳۳
- شکل ۱۴-۳ ۳۳
- شکل ۱-۴ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب معمولی ۴۵
- شکل ۲-۴ مقدار داده های ثبت شده مقادیر نیرو در سرعت های مختلف ۴۵
- شکل ۳-۴ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب نانو حباب ۴۶
- شکل ۴-۴ مقدار داده های ثبت شده مقادیر نیرو در سرعت های مختلف ۴۷
- شکل ۵-۴ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب نانو حباب ۴۸
- شکل ۶-۴ درصد کاهش درگ در سرعت های مختلف ۴۸
- شکل ۷-۴ مقدار ضریب درگ در سرعت ۱ متر بر ثانیه ۵۰
- شکل ۸-۴ مقدار ضریب درگ در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه ۵۰
- شکل ۹-۴ نحوه تزریق میکرو نانو حباب ۵۱

فهرست علائم

θ	زاویه بین راستای سرعت سیال و نیروی عمودی بر سطح
F_D	نیرو درگ
C_D	ضریب درگ
R_τ	رینولدز برشی
P	فشار
ρ	چگالی مایع
U	سرعت
X	راستای محور جریان
Y	محور موازی با ارتفاع حوضچه
Z	محور عمود بر سایر محورها
μ	لزجت
$\overline{\rho u_i u_j}$	تنش رینولدز
u_i	سرعت متوسط
ω	فرکانس آشفتگی
δ_τ	آشفتگی طولی
u_τ	آشفتگی سرعت
ε	نرخ اضمحلال انرژی
l	مقایس طول آشفتگی
k	انرژی جنبشی

فصل ۱: کلیات تحقیق

مقدمه

امروزه موضوع کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت و کاهش انرژی مصرفی و سوخت به خصوص انرژی حاصل از سوخت های فسیلی به عنوان موارد مهم در عصر جدید است. شناورها به عنوان وسیله نقلیه پرکاربرد در صنایع دریایی، دارای مصرف سوخت قابل توجهی هستند. اگر بتوان با استفاده از روش های دوستدار محیط زیست مصرف سوخت کاهش داد، هم در مصرف انرژی صرفه جویی شده و هم آلودگی کمتری ایجاد می شود. برای کاهش مصرف سوخت عوامل و راه های گوناگون وجود دارد که یکی از این راه ها استفاده از مکانیزم های کاهش نیروی مقاومت در برابر حرکت یا نیروی درگ¹ است.

در همین راستا دانشمندان و محققین اقدامات نظیر استفاده از پوشش های پلیمری، استفاده از ریبلت و غیره برای کاهش درگ به کار برده اند. یکی از روش های کاهش درگ استفاده از فنآوری نانو است. تحقیقات پیرامون فنآوری نانو، به عنوان یک رشته نوپا، از اواخر قرن بیستم آغاز شد و از همان ابتدا مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفت. این فنآوری در حال تکامل است و با گسترش در شئون مختلف نیازهای فنآوری و زندگی روزمره، در جهت رفع نیازهای جامعه بشری حرکت می کند. ساخت تجهیزات با ویژگی های جدید یا بهبود یافته از مهمترین مباحث فناوری نانو به شمار می رود که نتیجه استفاده از این دست مواد در محصولات صنعتی، بهبود ارزش افزوده و کارایی است که صنعت حمل و نقل دریایی نیز از این قاعده مستثنی نیست. در حال حاضر در کشورهای مختلف تلاش ها برای پیشرفت و رشد این فنآوری نو در حال انجام است. امروزه حوزه های تحقیقاتی مرتبط با نانو بسیار گسترش پیدا کرده است.

هدف از این پژوهش استفاده از میکرو نانو حباب هوا در آب برای بررسی کاهش نیروی درگ پیرامون شناورها است. با تزریق میکرو-نانو حباب از طریق لوله ای بر روی قسمت پیشانی شناور که در آب قرار دارد، سطح آن با حباب های کوچک هوا پوشیده می شود و نیروی درگ اصطکاکی کاهش می یابد. این پدیده کاهش درگ با میکرو حباب نام داشته و به خاطر کاربرد آن به عنوان یک وسیله ی صرفه جویی در انرژی مناسب برای کشتی ها، پژوهش بر روی آن در حال انجام است.

میکرو نانو حباب ها شامل حفره هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند که به روش های گوناگونی تولید می شوند. در این تحقیق از روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی استفاده شده است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی رخ می دهد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه در یک مایع به طور لحظه ای به فشار زیر بخار کاهش یابد.

با بررسی فرآیند کاهش نیروی درگ به کمک میکرو نانو حباب و مطالعه اقدامات انجام شده در این زمینه به این امر پی خواهیم برد که اغلب اطلاعات و نتایج بدست آمده اکثرا بر پایه کارهای آزمایشگاهی بوده و از

¹ Drag Force

لحاظ تئوری نیز فعالیت های زیادی از دهه گذشته وجود دارد که نسبت به کار های آزمایشگاهی کمتر است.

تا به امروز مطالعات زیادی در مورد استفاده از میکرو نانو حباب ها در کاهش نیروی درگ صورت گرفته است که غالبا تمرکز بر روی تشکیل حباب در روی سطح از طریق الکترولیز یا همان سطوح متخلخل بوده است. در این پایان نامه برای اولین بار با استفاده از محلول حاوی میکرو نانوحباب هوا که در آب تثبیت شده و با تزریق به اطراف جسم آن را پوشش می دهد، به بررسی کاهش درگ پرداخته شده است. از جمله تفاوت این پژوهش با پژوهش های گذشته، استفاده از تزریق مایع به جای گاز و انجام آزمایش و تعیین نیرو درگ با استفاده از سنسور های ثبت نیرو است. همچنین پس از انجام آزمایش اقدام به مدلسازی عددی پرداخته شده است. که این مدلسازی در نرم افزار این فوم^۱ که یک نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی است که قادر به مدل سازی هر نوع مسئله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال در هر سطح از پیچیدگی است. این نرم افزار به صورت منبع باز و آزاد موجود است. یعنی کد آن به صورت رایگان در اختیار همه کاربران قرار دارد و به راحتی از طریق اینترنت قابل دریافت است و اساس معادلات حاکم آن بر پایه RANS می باشد.

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

با پیشرفت صنایع دریایی در ساخت زیردریایی و کشتی های عظیم و پر هزینه، کاهش مصرف انرژی و سوخت و به طبع آن کاهش آلودگی و بازدهی بیشتر زیر دریایی و در عین حال کاهش هزینه بیش از گذشته از اهمیت برخوردار گشته است. استفاده از فناوری نانو بعنوان یکی از روش های مدرن در کاهش مصرف انرژی و نیروی درگ است که در سنوات اخیر بیشتر بکار گیری شده است. با این حال در کشورهای در حال توسعه و رشد بدلیل مشکلاتی نظیر کمبود تکنولوژی تولید مواد در اندازه نانو و بالا بودن هزینه تولید این ماده با مشکلاتی مواجه هستند. از این رو این پژوهش بدنبال روشی بهینه، مقرون بصرفه و ساده بدلیل بالابردن بازدهی وسایل حمل و نقلی در صنایع دریایی است. استفاده از فناوری میکرونانو حباب در وسایل هم چون شناور دریایی و کشتی های باربری سبب کاهش اصطکاک جسم و کاهش درگ می شود که این عامل صرفه اقتصادی را نیز به همراه خواهد داشت.

۱-۳ اهداف پژوهش

هدف کلی این پژوهش بررسی مقدار تاثیر میناب بر کاهش نیروی درگ شناور به دو روش آزمایشگاهی و همچنین مدلسازی عددی است. در این پژوهش تعیین ضریب درگ و به تبع آن نیرو درگ شناور در آب خام و هنگام تزریق نانوحباب انجام شد.

¹ OpenFOAM

۴-۱ زمینه نوآوری

میکرونانوحباب یا میناب یک نانوسیال نسبتاً جدید است که در قسمت های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی بکاررفته است. از طرفی محققان تلاش های بسیاری برای کاهش نیروی درگ به منظور تولید حباب های گازی در روی بدنه کشتی انجام داده اند. در اطراف کشتی به دلایلی نظیر، اختلاف شدید چگالی آب و هوا ایجاد یک پوشش همگن از حباب را نمی توان انتظار داشت. انتظار می رود میناب توانایی خوبی برای کاهش نیروی درگ از خود نشان بدهد. در این تحقیق از محلول حاوی میکرو نانو حباب برای پوشش سطح تماسی جسم جامد در مقابل جریان آب استفاده شده است.

هدف از این آزمایش این است که با استفاده از روش ارزان قیمت و در عین حال ساده و در دسترس جهت افزایش کارایی و بازدهی وسایل نقلیه در صنایع دریایی ارایه کند.

۵-۱ معرفی ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل ۵ فصل می باشد. در فصل اول آن به بیان مقدمه، شامل معرفی اجمالی موضوع، ضرورت انجام تحقیق و اهداف و زمینه نوآوری پرداخته می شود. فصل دوم شامل تحقیقات پیشین و مبانی تحقیق که کارهای تجربی و عددی انجام شده حول پژوهش است. در فصل سوم به شرح آزمایشات و تجهیزات و وسایل استفاده شده و روابط مورد استفاده و نرم افزار و جزئیات مدل عددی پرداخته شده است. در فصل چهار نتایج بدست آمده از آزمایشات و تحلیل آن ها ذکر شده است. و در نهایت فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات برای دیگر پژوهش ها ارائه شده است.

فصل ۲

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- پیشینه تحقیق:

در آغاز این فصل، به مرور تحقیقات گذشته در خصوص روش های کاهش نیروی درگ پرداخته شده است. سپس بصورت مفصل در مورد میکرونانو حباب و شاخص های آن بحث خواهد شد.

نیروی درگ یا پسار یا پسا، نامی ست که در دینامیک سیالات به نیروهایی که در جهت ممانعت از حرکت اجسام در درون سیالات بوجود می آیند، اطلاق می شود و رابطه آن بصورت زیر است:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (۲-۱)$$

ρ مقدار چگالی سیال، V سرعت جسم، C_D ضریب درگ و A مساحت قسمت آگیر جسم [currie,1974].

هنگام شروع حرکت جسم به درون سیال بین جسم و سیال برهم کنشی اتفاق می افتد. تنش برشی به دلیل ویسکوزیته و تنش های قائم ناشی از فشار بر جسم وارد میشوند. به برآیند این نیروها در جهت سرعت جریان بالاسری نیرو پسا و عمود بر جهت سرعت جریان بالا سری نیروی برآ^۱ گفته می شود. در حالت کلی نیروی پسا را میتوان به فرم زیرنوشت :

$$F_D = \int dF_x = \int P \cos \theta da + \int \tau \omega \sin \theta da \quad (۲-۲)$$

که θ زاویه بین راستای سرعت سیال و نیروی عمودی بر سطح است [Munson , 2002]. بدلیل دشوار بودن محاسبه توزیع تنش و فشار بر جسم، برای محاسبه نیروی درگ از روش های تجربی استفاده میشود. آزمایش هایی که در تونل آب، تونل باد، و یا دیگر روش های ابداعی بر روی دیگر مدل های کوچک انجام می شود می تواند توسط تحلیل ابعادی به مدل های بزرگتر و موجود در طبیعت مرتبط گردد. ضریب درگ بعنوان یکی از اعداد بدون بعد که در محاسبه نیروی درگ بکار می رود خود تابعی از دیگر اعداد بدون بعد از جمله رینولدز، فرود و زبری نسبی سطح است .

نیروی درگ اصطکاکی، به عنوان بخشی از نیروی درگ، علاوه بر اینکه تابع بزرگی تنش برشی است، به جهت گیری سطحی که بر آن وارد می شود نیز بستگی دارد. اگر سطح جسمی موازی جهت سرعت جریان باشد تمام تنش برشی در نیرو درگ نقش دارد ولی اگر سطح بر جهت سرعت جریان عمود باشد تنش برشی هیچ نقش و تاثیری در نیروی درگ ندارد.

¹ Lift Force

درگ فشاری بخشی از نیروی درگ است که ناشی از فشار بر روی سطح جسم است. که این نوع درگ وابستگی ویژه ای به شکل جسم دارد. درگ فشاری به بزرگی و همچنین جهت گیری سطحی که بر آن اعمال میشود بستگی دارد [Munson, 2002].

به نقل از جهان‌میری و بحرینی روش‌ها و راهکارهایی مانند پوشاندن قسمت رویه به وسیله پلیمرهای حل شونده، پوشش‌های ضدخزه، ریبلت‌ها، هوا کاری، حفره هوا میکرو حباب‌ها، فیلم هوا، پلیمرهای محلولی، محلول‌های سورفکتانت و تغییر ویژگی‌های سطوح می‌توان برای کاهش نیروی درگ استفاده نمود که این اقدامات بعنوان نمونه‌هایی هستند که از گذشته مورد توجه محققان بوده است [جهان‌میری و بحرینی ۱۳۹۰].

در پژوهشی که توسط صادقی انجام شد، به بررسی تاثیر و کارایی روکش‌های پلیمری در کاهش ضریب درگ هندسه معین و با استفاده از روشهای تجربی پرداخته شده است. اندازه گیری نیروی درگ بر روی مدل کوچکی از UUV^1 (اجسامی همچون اژدر و زیردریایی) با مقیاس ۱:۱۰ صورت پذیرفت. در این پژوهش با توجه به مقدار عدد رینولدز جریان از نوع آشفته بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که استفاده از پوشش پلیمری می‌تواند ضریب درگ اجسام UUV بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش داد [صادقی ۱۳۸۵].

تزریق میکرو-نانو حباب به داخل لایه مرزی روی یک جسم جامد یکی از روش‌های نوین برای کاهش قابل توجه اصطکاک پوسته‌ای است که فاقد آلودگی بوده و به مواد خاصی نیاز ندارد. در این زمینه کارهای تجربی اندکی انجام گرفته است. در این زمینه بدلیل عدم شناخت کامل مکانیزم کاهش درگ از نظر تئوری تعداد محدودی تحقیق به شکل مدل عددی انجام شده است. البته در سال‌های اخیر در آزمایشگاه هیدرودینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران کارهای عددی جدیدی با ارائه نظریه مناسب در خصوص مکانیزم کاهش درگ انجام شده است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

افزایش و بهبود کارایی وسایل نقلیه دریایی با استفاده از تزریق هوا در زیر بدنه آنها به زمان جنگ جهانی اول و استفاده نیروی دریایی ارتش فرانسه برای کشتی‌های اژدر افکن‌ها و سرعت بالا برمی‌گردد. به نقل از نوری، کارهای پیتز در سال ۱۸۸۲، موتیرال در سال ۱۹۰۸، و فاوبر در سال ۱۹۱۰ و 1912 به عنوان نمونه ای از فعالیت‌های اولیه در خصوص سیستم‌های کاهش درگ توسط تزریق هوا می‌توان به آن اشاره کرد که به علت مسائل امنیتی این اطلاعات، اسناد آن تا مدت‌ها انتشار نیافت [به نقل از نوری و همکاران، ۱۳۸۶].

¹ Unmanned Underwater Vehicle

۲-۱-۱- کارهای تجربی

در سال ۱۹۷۳ مک کورمیک^۱ و باتاچاریا^۲ نتایج تجربی از پدیده کاهش درگ به وسیله میکرو حباب ها ارائه دادند. که نیروی درگ را بر روی بدنه شناور دوکی شکل غوطه ور که با استفاده الکترولیز سطح آن را از میکرو حبابهای هیدروژن کاملاً پوشانده بدست آوردند. جسم مورد آزمایش بطول ۰.۹۱۴ m بود که با سرعت 2.59 m/s در یک مخزن آب کشیده می شد. نتایج نشان داد افزایش تعداد میکرو-نانو حبابها، سبب کاهش نیروی درگ نسبت به شرایط بدون حضور میکرو نانو حبابها می شود. همچنین مشاهده شد که حبابهای هیدروژن در کاهش اصطکاک پوسته ای موثر بوده اند که این تاثیر در رینولدز های پایین محسوس تر است [Mc Cormick and Bhattacharyya, 1973]. مک کورمیک و باتاچاریا بعد از کشف این پدیده، که در کمترین سرعت در آزمایش خود درگ کلی کاهش یافته را تا ۶۵ درصد گزارش کردند. بگدویچ^۳ و اوسیو^۴ و مالیوگا^۵ در سال ۱۹۷۷ توانستند درگ را با استفاده از تزریق گاز از یک ماده متخلخل در کمترین سرعت جریان ۱۰.۷ متر بر ثانیه برای دو صفحه جدا تا ۸۰ درصد کاهش دهند. [به نقل از نوری و همکاران ۱۳۸۶].

فونتین^۶ و دویتش^۷ در سال ۱۹۹۲ به بررسی تاثیر نوع گاز بر روی مدلی به تزریق گاز های مختلفی از قبیل هلیوم، هوا، آرگون، کربن دی اکسید و سولفور هگزا فلورید که از نظر دانسیته اختلاف واضحی با هم ندارند این آزمایش در سرعت و فشار تونل مختلف انجام شد که نتایج حاکی از آن است سرعت تزریق گاز و محل تزریق حائز اهمیت بوده اما نوع گاز تاثیری در کاهش درگ ندارد [Fontaine and Deutsch, 1992]. در سال ۱۹۹۱ وار هولیک^۸ با اضافه کردن توزیع های مختلف پلیمر به جریان کانال در عدد رینولدز ۲۰۰۰ کاهش درگ بین ۱۰ تا ۶۹٪ را گزارش نمود. این در حالی است که مقدار کاهش درگ به کمک میکرو حبابها برای صفحه تخت بیش از ۸۰٪ و در جریان سیال در داخل کانال بیش از ۴۰٪ گزارش شده است [Warholic et al, 1999]. پال^۹ در سال ۱۹۸۸ برای بررسی اندازه حباب ها و موقعیت آن ها از ابزار نوری و عکس برداری استفاده کرد. چون ابر میکرو حباب در آزمایش های مربوط به کاهش درگ غیر شفاف بود؛ بنابراین اندازه حباب ها از روی لبه بالای ابر حاصل شده در شرایط بدون کاهش درگ برآورده شد. اندازه ی این حباب ها در محدوده بزرگتر از ضخامت زیر لایه، تا ابعادی کوچکتر از ضخامت لایه مرزی، یعنی در حدود ۱۵۰ تا ۱۱۰۰ میکرون برآورد شد. با افزایش جریان گاز تزریقی و افزایش فاصله از تزریق کننده ها، اندازه ی حباب ها افزایش یافته و افزایش سرعت جریان آب کاهش می یابد [Bull an Rickerby, 1988].

¹ Mc cormick

² Bhattacharyya

³ Bogdevich

⁴ Evseev

⁵ Mayyuga

⁶ Fontaine

⁷ Deutsch

⁸ Warholic

⁹ Bull

کاتو^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۹ با آزمایش تزریق حباب مورد تایید قرار گرفت که میکرو حباب ها در کاهش مقاومت در برابر اصطکاک موثر است و حداکثر نرخ کاهش ۶۰٪ است. همچنین با استفاده از روش های مختلف نشان دادند که اندازه حباب خروجی از لوله تزریق بر کاهش درگ بسیار موثر است. به طور معمول حباب هایی در ابعاد میکرو بیشترین کاهش درگ را داشته است. وی همچنین نشان داد که تأثیر میکرو حباب ها در طول جسم کاهش پیدا می کند و جهت تزریق حباب بر موثر بودن میکرو حبابها بسیار موثر است [Kato et al, 1999] .. اثر سرعت جریان آزاد و نیروی شناوری بر کاهش درگ میکرو حبابی توسط ماداوان^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۴ مورد مطالعه قرار گرفت. این آزمایش ها در قسمتی از یک تونل آب با مقطع روی صفحه تختی که روی دیواره بالایی و پایینی کانال نصب گردیده بود و در تحت کنترل دو عامل سرعت و فشار صورت پذیرفت. اندازه گیری اصطکاک پوسته ای به ۲ حالت اصطکاک پوسته ای سراسری و موضعی انجام پذیرفت که بررسی ها نشان دادند که کاهش درگ برای سرعت های بالا به ازای نرخ تزریق مشخص کمتر است. همچنین کاهش درگ در قسمت دیواره بالایی نسبت به دیواره پایین برای سرعت های پایین تر بیشتر می باشد و در تمامی سرعت ها اصطکاک پوسته ای کاهش می یابد [Madavan et al, 1984].

در سال ۱۹۹۶ گویین^۳ توانست پدیده کاهش درگ به کمک میکرو حباب ها را برای جریان کاملاً توسعه یافته در جریان کانال بررسی کند و مشاهده نماید که مقدار کسر حجمی هوای تزریق شده در کاهش درگ بسیار حائز اهمیت است و رابطه مستقیم دارد همچنین مشاهده نمود که در نزدیک دیوار نسبت به نقاط دورتر در داخل لایه مرزی تأثیر بیشتری در کاهش درگ دارد [Guin et al, 1996]. تاکاهاشی^۴ در سال ۱۹۹۹ کاهش اصطکاک پوسته ای بیشتر از ۵۰٪ را بر روی یک کشتی ۱۲ متری به دست آورد. همچنین وی در سال ۲۰۰۰ آزمایشی را بر روی یک کشتی بطول ۵۰ متر و با سرعت حداکثر ۷ متر بر ثانیه در یک مخزن بطول ۴۰۰ متر انجام داد که در این آزمایش حباب ها را از دو مکان تزریق نمود و در این آزمایش به کم اثر بودن ضخامت لایه مرزی و اهمیت فاصله از محل تزریق در کاهش درگ پی برد. او این کاهش را، برای یک کشتی ۵۰ متری حدود ۳۵٪ بدست آورد [Takahashi et al., 2000]. در سال ۲۰۰۱، کمیته تحقیقات SR239 انجمن تحقیقاتی کشتی سازی ژاپن یک آزمایش تمام مقیاس حباب هوا با استفاده از کشتی آموزشی "سئون-مارو" موسسه ملی آموزش دریا انجام داد. حباب های هوا از طریق سوراخ های حفاری شده در سه بخش افقی (که دوتای پایینی آن در یک ردیف قرار گرفته بودند تزریق می شد، که هوا از طریق لوله هایی که در بندهای عمودی پوشانده شده بودند وارد می شدند. در این آزمایش، اثر کاهش درگ از طریق اندازه گیری سرعت های کشتی با و بدون تزریق هوا اندازه گیری شد در صورتی که هوا از طریق تمام تزریق کننده ها تزریق می شد، پیشرانش پروانه کم می شد، چون هوا تزریق شده به درون آن کشیده می شد و سرعت کشتی کم می شد. اما، در حالتی که هوا تنها از طریق بخش های

¹ Kato

² Madavan

³ Guin

⁴ Takahashi

افقی بالایی تزریق می‌شد، سرعت کشتی افزایش می‌یافت و توان موتور کاهش می‌یافت، که 3% کاهش توان را در پی داشت؛ در صورتی که سرعت کشتی در 7.2 m/s ثابت نگه داشته می‌شد. که حیرت انگیز بود، چراکه بدنه، هیچ قسمت تحتانی تخت افقی نداشت. در این حالت، توان مورد نیاز برای تزریق هوا در برابر فشار هیدرواستاتیکی در 1 m زیر سطح آب 1% است و بنابراین بهره کلی توان (اما اسمی است؛ چون اتلاف مکانیکی لحاظ نشده است 2% بود. پس نشان داده شد که افت اصطکاک جداره توسط حباب‌های هوا را می‌توان بر روی یک کشتی تمام مقیاس به دست آورد [Kodama and Hinatsu, 2001]. سوگی یاما^۱ در سال ۲۰۰۳ با شبیه سازی جریان میکرو حباب و تاثیر عدد رینولدز بر کاهش درگ نشان دادند که در مقدار رینولدز پایین اصطکاک افزایش می یابد و در مقدار رینولدز بالا اصطکاک کاهش می‌یابد [Sugiyama et al, 2003]. کیوان صادقی در سال ۱۳۸۴ کارایی روکش‌های پلیمری در کاهش ضریب درگ جسم UUV با هندسه معین با استفاده از روش تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این روش دو پلیمر قابل حل در آب (PPA) و پلیمر غیر قابل حل در آب (PDS) و برای اندازه گیری کاهش درگ از دستگاه برج آب استفاده شده که نتایج حاکی از آن بود که این امر منجر به کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی خواهد شد [کیوان صادقی، ۱۳۸۴]. کوداما و همکاران با استفاده از حمل کننده سیمان در سال ۲۰۰۶، اثر کاهش درگ فقط 1% باقی ماند؛ زیرا تزریق کننده‌های حباب در کناره‌ها قرار داده شده بودند و حباب‌های تزریق شده به کف بدنه نمی‌رسیدند. [Kodama et al 2006]. ژاکوب^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۰ در آزمایشی به روش الکترولیز به ساخت میکرو حباب برای کاهش درگ توسط یک صفحه تخت به طول ۶ متر پرداختند این تغییرات را در لایه مرزی آشفته توسط میکرو حباب ها در یک کانال بطول ۲۵ متر و سطح مقطع ۰.۶*۰.۹ متر انجام دادند نتایج نشان داد که بر هم کنش بین حباب ها و آشفته گی جریان منجر به اصلاح قابل توجه میدان جریان می شود و در این حالت تنش برشی ۲۵٪ کاهش می یابد [Jacob et al 2010]. تسای^۳ و چان^۴ در سال ۲۰۱۱ به بررسی کاهش درگ میکرو حبابی بر روی یک صفحه در یک تونل آب و همچنین یک تانک پرداختند. در این اقدام میکرو حباب ها به وسیله مواد متخلخل روی صفحه ایجاد شدند. با استفاده از مدل اختلاط لایه مرزی پیش بینی کاهش درگ میکرو حبابی در هر حالت صورت پذیرفت. نتایج حکایت از آن دارند که در مدل مربوطه با تزریق میکرو حباب ها کاهش درگ خوبی روی صفحه تخت در تونل آب ایجاد شد. در حالی که این مدل کاهش درگ دور از واقعیت را برای میکرو حباب ها در تانک دارد [Tsai and Chen, 2011]. یانار^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به مطالعه تاثیر تزریق میکرو حباب ها بر روی یک مثل قایق تندرو پرداختند. همچنین در آزمایش به تاثیر موقعیت تزریق حباب ها و نقش میکرو حباب ها بر کاهش درگ پرداختند. در این آزمایش مدل توسط یک موتور الکتریکی که سرعت آن قابل تعیین بود مورد ارزیابی قرار دادند. برای بررسی تاثیر میکرو حباب های تزریقی بر روی یک قایق سریع نیرو

¹ Sugiyama

² Jacob

³ Tsai

⁴ Chen

⁵ Yanuar

دریایی در ۳ نقطه کف و دور آن تزریق را انجام دادند که نتایج نشان داد هرچه موقعیت تزریق به وسط نزدیک تر باشد کاهش درگ بیشتر خواهد بود که در این حالت کاهش درگ حدود ۹٪ بدست آمده است [Yanuar et al, 2012]. در سال ۲۰۱۳ صیادی و نعمت الهی بر روی یک مدل کشتی ۷۰ سانتی متری به تاثیر حباب های کوچک را مورد بررسی قرار دادند که در این بررسی پارامترهایی از قبیل طول، عرض و مساحت را مورد توجه قرار دادند و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تزریق بیش از حد هوا سبب کاهش درگ مطلوب خواهد شد در حالیکه اگر تزریق هوا به اندازه نرمال صورت گیرد کاهش درگ در حدود ۵ الی ۸ درصد صورت خواهد پذیرفت [Sayadi and Nematollahi, 2013]. در سال ۱۳۹۳ مریمی و همکارانش بطور تجربی به بررسی تاثیر حباب ها روی کاهش درگ اصطکاکی در یک سیستم تبلور کوئت عمودی پرداختند. در یک سیستم تیلور - کوئت با استوانه متحرک هنگامی که سرعت زاویه ای این استوانه از صفر تا یک سرعت زاویه ای مشخص افزایش یابد جریان برقرار شده در فضای حلقوی بین دو استوانه کاملاً آرام است این جریان برشی را اصطلاحاً کوئت می گویند. هنگامی که سرعت زاویه ای بیشتر از مقدار بحرانی شود نوسانات سرعت چرخشی که گردابه های تیلور نامیده می شود بیت دو استوانه ظاهر میشود در این حالت به جریان برقرار شده در سیستم جریان تیلور کوئت می گویند. در این آزمایش حباب های هوا را از قسمت پایینی سیستم به داخل جریان آب تزریق کردند و نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز دورانی تا یک مقدار مشخص منجر به افزایش تاثیر حباب ها روی کاهش درگ اصطکاکی می شود و برای رینولدزهای بزرگ، این تاثیر عکس می گردد. بیشترین کاهش درگ حبابی ثبت شده در این آزمایش ها حدود ۵ درصد است [مریمی و همکاران، ۱۳۹۳]. کوماگا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک سیستم ذخیره انرژی جدید برای کاهش درگ و صرفه جویی در مصرف انرژی را در یک فروند کشتی با استفاده از حباب های کوچک توسعه دادند. این دستگاه سبب صرفه جویی انرژی مورد نیاز برای تولید حباب را می شود. این وسیله شامل هیدرو فویل های زاویه ای با ورودی های هوا می باشد که از قسمت فشار پایین ایجاد شده در بالای هیدروفویل تشکیل شده است با توصیف دستگاه بدست آمده از تئوری دینامیک سیال ساده و از طریق آزمایشات در یک مخزن کوچک در نهایت نتایج نشان داد که می توان با عملکرد صحیح دستگاه در انرژی خالص کشتی بین ۵ الی ۱۵ درصد صرفه جویی ایجاد کرد [Kumagai et al 2015].

۲-۱-۲- کارهای عددی

کارهای ماری در سال ۱۹۸۷ اقداماتی در مدلسازی و تحقیقات عددی انجام داده است که میتوان به مدلی اشاره نمود که در آن ضخامت زیر لایه ویسکوز به علت داشتن میکرو حباب ها بیشتر می شود. [به نقل از نوری و همکاران، ۱۳۸۶]. یوشیدا^۲ در سال ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ طرح جدیدی را ارائه کرد که نیروهای وارد بر میکرو حبابها با دقت بیشتری محاسبه شده و در جهت حلاف نیروی وارده به دیواره بوده است

¹ Kumagai

² Yoshida

[Yoshida, 1998]. در سال ۲۰۰۱ کاوامورا^۱ و کوداما به بررسی پارامترهای مهمی مانند تاثیر اعداد وبر، فرود، اثر تراکم پذیری، اندازه حبابها و کسر حجمی حبابها در پدیده کاهش درگ پرداختند و نتیجه آن اینگونه شد که از اثر عدد وبر بر کاهش اصطکاک پوسته ای با وجود تغییر شکل حباب در مسیر جریان میتوان صرفنظر کرد [Kawamura and Kodama, 2002]. فرانت^۲ و القباشی^۳ در سال ۲۰۰۴ مکانیزم کاهش درگ در لایه مرزی را روی صفحه تخت با استفاده از روش DNS مورد بررسی قرار داده اند و نتیجه گرفتند وجود میکرو حباب در لایه مرزی سبب کاهش سرعت متوسط در جهت جریان و بتبع آن کاهش درگ میشود و ساختار چرخشی طولی شبه راستای جریانی، از دیوار فاصله گرفته و جابجا می شوند [Frante and Elgobasi, 2004]. سوگی یاما بر بررسی اثر میکرو حباب در جریان تیلور-کوئت پرداخت. با استفاده از یک روش اوپلری-لاگرانژی با استفاده از یک سیال گاز مدلسازی نمود. در این بررسی نشان داد اثر اصلی میکرو حباب ها ایجاد آشفتگی موضعی در جریان است که عمدتاً به سمت بالا و در جهت عمودی است که قادر به شکستن انسجام ساختارها است و در مقدار رینولدز بزرگ که نوسانات سرعت سیال معمولاً بیشتر است ساختار منسجم ناپایدار و ماندگارتر است و این سبب میشود مکانیزم کارایی خود را از دست بدهد و همینطور نیروی بالابر نیز حائز اهمیت است [Sugiyama, 2008].

در داخل کشور پژوهش هایی در این زمینه انجام شده که در اینجا به برخی از اقدامات صورت گرفته در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت اشاره خواهیم کرد.

در سال های ۱۳۸۱ نوری و شادمان حبابها را با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آنها مدل کردند [شادمان و نوری، ۱۳۸۱]. در سال ۱۳۸۲ نوری و جعفرزاده حبابها را بر روی صفحه تخت ردگیری کرده و اثر فاصله نقطه تزریق را بررسی کردند [جعفرزاده و نوری، ۱۳۸۲]. نوری و ابراهیمی در سال ۱۳۸۲ اثر کاهش درگ را با حل جریان زمینه صفحه تخت با روش گردابه های تصادفی و در نظر گرفتن تعدادی محدودی حباب، را مشاهده کردند [نوری و ابراهیمی، ۱۳۸۲]. در سال ۱۳۸۴ نوری و ساقری چی ها به تکمیل کارهای قبلی پرداختند و اثر کاهش درگ را با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر حباب مورد بررسی قرار دادند. [ساقری چی ها و نوری، ۱۳۸۴]. در سال ۱۳۸۴ فرهانی و همکاران از روش گردابه های تصادفی برای حل جریان داخل کانال استفاده کرده کاهش درگ را در نواحی توسعه یافته با در نظر گرفتن حبابها بصورت غیر فعال و بدست آوردن اثر نیروهای وارد بر حباب ها به جریان توانستند مشاهده کنند [سقاوت و فرهانی، ۱۳۸۴]. موسائی در سال ۱۳۹۲ به شبیه سازی عددی پدیده کاهش درگ به کمک میکرو فیبرها در رینولدز برشی $R\tau = 950 \text{ N/m}^2$ با استفاده از معادله ناویر استوکس سه بعدی وابسته به زمان برای جریان تراکم ناپذیر یک سیال غیر نیوتنی پرداخت [موسائی، ۱۳۹۴]. نوری در سال ۱۳۹۲ به بررسی عددی کاهش درگ در جریان آشفته داخل کانال با تزریق میکرو حباب ها پرداخته است در این مدلسازی با استفاده از روش LES، روشی که با استفاده از آن بخش عمده از ورتکس ها و ادی های جریان حل می شوند.

¹ Kawamura

² Frante

³ Elgobasi

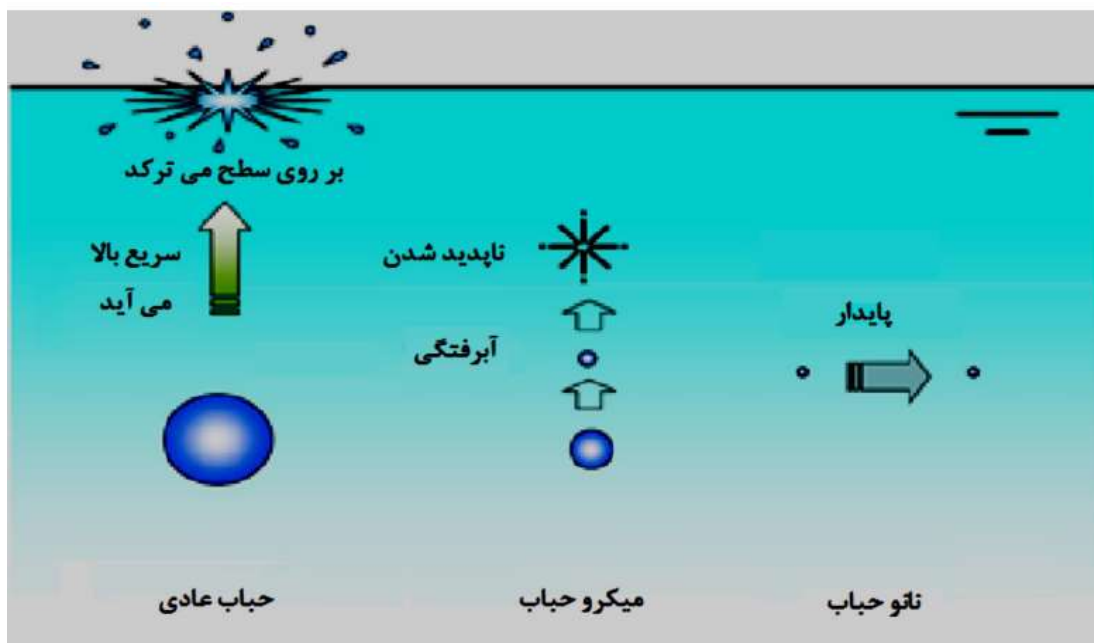
گردابه‌های بزرگتر مستقیم، وابسته به هندسه حل میشوند و گردابه‌های کوچک مستقل از هندسه مدل میشوند که این روش نسبت به روش DNS هزینه کمتری دارد [نوری، ۱۳۹۲].

با وجود آزمایشهای متعدد برای شناخت بهتر و بیشتر، کاهش اصطکاک پوسته‌ای هنوز بصورت جامع و کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از دلایل ساده برای این اثر آن است که افزایش لزجت موثر بوسیله میکرو حباب ها باعث کاهش اثر تنش رینولدز می‌شود و به تبع آن باعث تغییر پروفیل سرعت و کاهش گرادیان سرعت در دیواره می‌شود. یک نمونه دیگر چنین شرحی، تغییر اندازه و ابعاد لایه مرزی یا ایجاد شرایطی نزدیک به جریان آرام در جریان می‌باشد. با این حال فعالیت های گسترده آزمایشی برای شناخت بهتر این مسئله ادامه دارد.

۲-۲- میکرو نانو حباب های هوا

۲-۲-۱- کلیاتی در مورد میکرو نانو حباب ها

میکرو حباب ها و نانو حباب ها، حباب هاب بسیار کوچکی از هوا هستند که به ترتیب دارای اندازه ۱۰-۵۰ میکرو متر هستند و کمتر از ۲۰۰ نانو متر میباشند. میکرو حباب ها و نانو حباب ها هر یک دارای خصوصیات منحصر به فردی اند. یک حباب معمولی (ماکرو حباب) مسیری به سمت بالا را با سرعت زیاد می‌پیمایند و پس از سیدن به سطح آب از بین می‌روند. یک میکرو حباب نیز مسیری به سمت بالا را طی می‌کند با این تفاوت که معمولا در داخل آب از بین می‌روند. همچنین یک نانو حباب می‌تواند درون آب در جهت های مختلفی حرکت کند و برای مدت زمان طولانی (مثلا چند ماه) پایدار بماند و به تدریج حباب کوچک شود تا ناپدید گردد (شکل ۲-۱).



شکل ۱-۲ مقایسه رفتار ماکرو حباب، میکرو حباب و نانو حباب

به نقل از مظفری و نائینی، واقع میکرو-نانو حبابها حاوی حفره های حاوی گاز در محلول آبی اند. که فرآیند هسته زایی در مایع سبب جرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می شود که این امر موجب تشکیل میدان الکتروستاتیکی در اطراف هسته می شود و این میدان الکتروستاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را دادند که طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند که با تغییرات تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگتر یا کوچکتر شدن لایه دوگانه اتفاق می افتد تغییر ابعاد لایه ی دوگانه باعث تغییر نیروی کشش سطحی میشود به همین دلیل نانو حباب ها یا میکرو حباب ها به کمک انتشار ذرات و متناسب با مقدار پتانسیل اطراف محلول و مقدار پتانسیلی که باعث فوق اشباع و یا زیر اشباع شدن شود، شروع به رشد و یا کوچ شدن در طول زمان میکنند [مظفری نائینی، ۱۳۹۲].

۲-۲-۲- دستگاه تولید میکرو نانو حباب

اگر بخواهیم تعریفی از میناب داشته باشیم، اینگونه خواهیم گفت که میکرو-نانو حباب (Micro-Nano Bubble) که به میناب ترجمه شده است، به حباب های بسیار ریز یک گاز در مایع پایه اطلاق می شود. مینابها یا حبابهای ریز گاز خواص بسیار جالبی از خود نشان می دهند که این خواص استثنائی در حقیقت تشدید خواص آن گاز در حباب های بزرگ یا در حالت گاز در فشار اتمسفر است.

برای درک بهتر عملکرد یک مولد میناب به مثال عملی زیر توجه کنید:

یک حباب گاز به قطر ۱ میلیمتر در یک مولد میناب به ۱۰۰۰ میلیارد حباب ۱۰۰ نانومتری شکسته می شود! مجموعه حبابهای جدید دارای سطح ویژه ۱۰ هزار برابری نسبت به حباب اولیه است. برخی نتایج

آزمایشگاهی محصولات تولید شده توسط مولدهای ساخت شرکت نوفناوران میناب طوس با پایه آب و با گازهای مختلف را در زیر مشاهده فرمائید:

-میناب هوا:

مرسوم ترین نوع میناب است که کاربردهای گسترده ای از تحقیقات بر روی سلولهای سرطانی تا بهداشت فردی و شستشوی حیوانات و از ساخت بتن پر مقاومت تا تصفیه فاضلاب دارد. محدوده معمول اندازه حباب ها از حدود ۸۰ نانو متر تا حدود ۱ میکرون است و pH می تواند، به شرط قلیائی بودن آب، تا ۹ برسد. پتانسیل زتا در محدوده ۲۰- تا ۳۰- میلی ولت، بسته به دما و محتویات یونی آب متغیر است. پایداری در صورت نبود مصرف کننده بیش از ۴ هفته گزارش شده

-میناب اکسیژن

برای مقاصد خاص مثل بهداشت فردی و استخرهای ورزشی، پرورش ماهی به شیوه متراکم یا فوق متراکم، درمان سلول های سرطانی، ضد عفونی کردن آب یا تجهیزات، کاهش بار میکربی فاضلاب، و کنترل بار زنده در فاضلاب بیمارستانی کاربرد دارد. سامانه اقیانوس اکسیژن این شرکت با این میناب طراحی و اجرا می شود که برای استخرهای شنا بکار می رود و به دلیل حجم فوق بالای حبابهای اکسیژن، امکان تماس چند ده هزار میلیارد حباب اکسیژن را با تمامی بدن فراهم می کند

-میناب ازون یا ازون آب

این نوع میناب بسیار گرانبیست تر از بقیه است و به دلیل عمر بسیار پائین گاز ازون در حرارت معمولی و بالا، به سرعت تبدیل به میناب اکسیژن می شود ولی در همان مدت چند دقیقه حضور میناب ازون، امکان ضد عفونی شدن آب یا تجهیزات را فراهم میکند

شایان ذکر است که روش تولید میناب این شرکت مطلقاً هیدرودینامیکی بوده و هیچ نوع فرآیند شیمیائی و ماده ای غیر از آب و اکسیژن در این نوع تولید به کار نرفته است که هر دو ماده نیز برای سلامتی انسان مفید و توسط عموم پزشکان توصیه می شود.

محل استفاده: استخرهای عمومی و خانگی می توانند براحتی از این نوع محصول استفاده کنند و به دلیل اینکه این حجم اکسیژن میکروارگانیسم هایی چون باکتری ها را از کار می اندازند، برای بهداشت آب هم بسیار مفید است. گفته می شود با استفاده از ازون به جای اکسیژن می توان از این روش به طور گسترده ای به عنوان ازون تراپی هم سود جست.

دستگاه تولید میکرو نانو حباب مدل T2-25 که توسط شرکت نو فناوران میناب طوس ساخته شده است، در آزمایشگاه نانو سیالات در محیط های متخلخل دانشگاه صنعتی شاهرود بعنوان دستگاه مولد میناب برای این آزمایش در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۳- اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی

میکرو-نانو حباب های هوا ذراتی با بار سطحی منفی هستند که به روش های گوناگونی قابلیت ایجاد و تولید دارند که یکی از این روش ها کاویتاسیون هیدرو دینامیکی است. کاویتاسیون هیدرو دینامیکی هنگامی اتفاق می افتد که به علت سرعت بالای جریان، به طور آبی فشار در یک نقطه از مایع به زیر فشار بخار، تقلیل یابد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی به خوبی از طریق معادله ی برنولی توصیف شده است.

$$P + \frac{\rho U^2}{2} = C \text{ (const)} \quad (2-3)$$

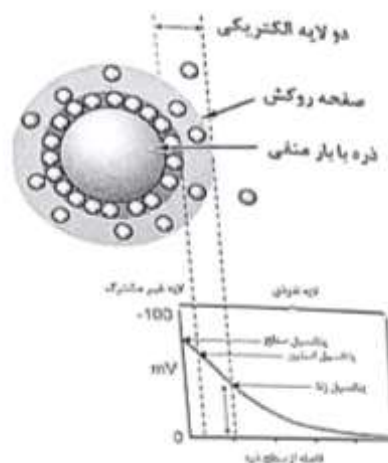
که C روی یک خط جریان مقدار ثابتی است. در این رابطه U سرعت جریان آب در یک نقطه ، P فشار و ρ چگالی مایع هستند. باز نویسی معادله به صورت زیر است:

$$\frac{2 * P}{\rho} + U^2 = \frac{2 * C}{\rho}$$

که این رابطه نشان میدهد هرگاه سرعت جریان مایع بیش از $\sqrt{\frac{2 * C}{\rho}}$ باشد . فشار منفی خواهد شد.

۲-۲-۴- تئوری پتانسیل سطحی نانو - میکرو حباب ها

پتانسیل زتا بعنوان یک خاصیت فیزیکی در ذرات خنثی است که در فصل مشترک با فاز جامد (جدایش فازی) با محلول الکترولیتی ظهور می کند . در شکل ۲-۲ یک ذره خنثی بطور شماتیک درون محلول نشان داده شده است . همانگونه که در شکل قابل ملاحظه است وجود این پدیده موجب ایجاد یک لایه دوگانه در اطراف ذره میگردد.



شکل ۲-۱ شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت

پتانسیل الکتریکی حاصل از لایه دوگانه را پتانسیل زتا با پتانسیل الکتروستاتیکی میگویند. این پتانسیل

تابع عواملی از جمله اندازه و نوع ذرات ، PH و ... می باشد. . عموماً افزایش PH موجب کاهش پتانسیل زتا خواهد شد . از نکات قابل توجه اینکه رفتار منحصر بفرد هر ذره در PH های مختلف می باشند. به این ترتیب با انتخاب درست PH می توان رفتار و عکس العمل ذره را در محیط های گوناگون تحت کنترل قرار داد . [مظفری نائینی ، ۱۳۹۲]. پتانسیل زتا بعنوان بار سطحی برای سطح جامد – مایع تعریف میشود که با سطح هیدرو دینامیکی نسبت دارد و. پتانسیل زتا با احتمال تشکیل دو لایه الکتریکی روی سطح ذره میشود و تمایل برای لخته شدن رابطه مستقیم دارد یعنی هرچه پتانسیل زتا افزایش یابد احتمال تشکیل دو لایه الکتریکی روی سطح ذره زیاد می شود و تجمع کم میشود که این امر سبب می شود ذرات در شکل منفرد باقی بمانند. بهمین چنین پتانسیل زتا مقدار دافعه بین ذرات مجاور را نشان میدهد. یعنی زمانی که زتا پایین باشد ، جاذبه بر دافعه غلبه میکند و لخته ایجاد می شود، و زمانی که ذرات با پتانسیل زتای بالا باشند ، از لحاظ الکتریکی پایدار هستند . طبق جدول ۱-۲ پتانسیل زتا ، یکی از عوامل پیش بینی پایداری ذرات در حلال است [Greenwood and Kendall , 1999]

جدول ۱-۲-رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آنها- برگرفته از مظفری نائینی

پتانسیل زتا (mv)	رفتار پایداری ذرات
از ۰ تا ± 50	سریع لخته می شود
از ۱۰ تا ± 30	نا پایدار
از ۳۰ تا ± 40	پایداری متوسط
از ۴۰ تا ± 60	پایداری خوب
بیشتر از ± 61	پایداری عالی

یکی از پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و سلول ها وجود دارد پتانسیل زتا است که مطالعات زیادی پیرامون این موضوع در اطراف غشاء انجام شده است .

فصل ۳

مواد و روش انجام آزمایش

۳-۱ مقدمه

این فصل به بیان آزمایش و نرم افزار و سخت افزار های استفاده شده در پژوهش حاضر پرداخته شده است.. همچنین مشخصات و چگونگی تزریق ماده نانو حباب، سرعت های حرکت شناور، روش های عددی مورد استفاده در الگوریتم، معرفی نرم افزار OpenFOAM توضیح داده شده است

۳-۲ بررسی آزمایشگاهی

۳-۲-۱- مشخصات اولیه

اندازه گیری خصوصیات اولیه آب میکرو نانو حباب و آب معمولی مورد استفاده در آزمایشات، از قبیل: PH اندازه گیری در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود و دما در مرکز تحقیقات ملی شهدای خلیج فارس ندسا تهران انجام شد.

که هدف از اندازه گیری این خواص اثبات بی خطر بودن این ماده برای محیط زیست می باشد.

۳-۲-۲ اندازه گیری PH:

دستگاه PH متر رومیزی مدل PH7710 ساخت کمپانی WTW آلمان است. این دستگاه دقت بالایی دارد و میتواند با دقت ± 0.005 میزان PH را اندازه گیری و ثبت نماید. یکی از خاصیت های مهم PH در میکرو نانو حباب جهت ممانعت از خوردگی در بدنه وسایل محرکه دریایی میباشد (شکل ۳-۱)



شکل ۳-۲ دستگاه PH متر

۳-۲-۱-۳ اندازه گیری دما

قبل از انجام آزمایش در دو ظرف ۲۰ لیتری جداگانه که در یکی از آن آب معمولی و در دیگری آب میکرونانو حباب قرار داشت را با یک دماسنج دیجیتالی میله ای اندازه گیری کردیم که دمای آب معمولی ۹ درجه سانتی گراد و دمای آب میکرو نانو حباب ۱۲ درجه سانتی گراد بود که دانستن دما در محاسبه ی دقیق تر لزجت و به تبع آن عدد رینولدز حائز اهمیت است.

۳-۲-۱-۴- اندازه گیری هدایت الکتریکی

کنداکتیویته یا هدایت سنجی پارامتری اساسی جهت تشخیص کیفیت آب می باشد. هدایت سنج الکتریکی ec متر مقدار مواد حل نشده داخل آب را قرائت می کند که این مواد قابلیت هدایت الکتریسیته داخل آب را دارند. پارامتری با وابستگی به دما می باشد و با افزایش و یا کاهش آن کاهش و افزایش پیدا می کند. واحدهای معمول کنداکتویمتری را معمولاً میلی زیمنس یا میکروزیمنس می نامند. برای اندازه گیری از دستگاه WTW 7110 استفاده شده است. دستگاه هدایت سنج دارای دو الکترود یکسان از جنس فلزی پلاتینه و الکترود ها در یک محفظه ی شیشه ی مقاوم، موازی هم قرار گرفته اند که به این مجموعه، probe می گویند. برای اندازه گیری هدایت یک محلول probe را در آن محلول قرار داده و دستگاه با ولتاژ مناسبی که بین الکترود ها می فرستد. هدایت محلول را نشان می دهد که واحد آن را بر حسب ms/cm یا $\mu s/cm$ (میکرو موس بر سانتی متر) نشان می دهد



شکل ۳-۲ دستگاه کنداکتومتر

۳-۳ اندازه گیری ابعاد میکرو نانو حباب

پراکندگی نور دینامیکی (DLS) روشی فیزیکی و غیر مخرب و سریعی است که می توان از آن برای تعیین توزیع ذرات موجود در محیط مایع و هم چنین برای تعیین اندازه ذرات در مقیاس چند نانومتر تا میکرومتر استفاده کرد. این روش به برهمکنش نور با ذره بستگی دارد. نور پراکنده شده بوسیله نانوذرات موجود در سوسپانسیون متناسب با زمان تغییر می کند که این امر می تواند به قطر ذره ارتباط داده شود. اصابت مولکول و ذرات ریز کوچک با مولکول های حلال، سبب حرکت تصادفی مولکول ها می شود. به

حرکت ذرات کوچک در یک سیال، حرکت براونی گویند. هر ذره در سوسپانسیون، دائماً در حال حرکت است و حرکت به ذرات دیگر ارتباط ندارد و مستقل از هم هستند. با مشاهده ذرات بزرگ تر و قیاس آن با ذرات کوچک تر پی خواهیم برد که در دمای ثابت، ذرات بزرگ تر بسیار آهسته تر حرکت می کنند. اگر به یک ذره کوچک، یعنی ذراتی که اندازه آن ها در مقایسه با طول موج نور کوچک باشد (کوچک تر از ۲۵۰ نانومتر) نور لیزر تابیده شود، ذره، نور را در تمام جهات پراکنده می سازد.

هنگام برخورد پرتو لیزر با فرکانس معین به ذرات متحرک نور با فرکانس متفاوت پخش شده و نوسانی در فاز نور پخش شده ایجاد می شود. میزان تغییر در فرکانس نور پخش شده با اندازه ذرات ارتباط دارد و برای تعیین اندازه ذرات مورد استفاده قرار می گیرد. هم چنین سرعت حرکت ذرات نقش موثری بین تابع ارتباط و اندازه ذرات دارند که اگر ذرات بزرگ اندازه گیری شوند، شدت نور پخش شده بعلت حرکت آهسته، به آهستگی نوسان می کند و اگر بصورت بالعکس یعنی به صورت ذرات کوچکتر اندازه گیری شوند، شدت نور پخش شده به علت حرکت سریع تر با سرعت بیشتری نوسان می کند. [صادق حسنی و سمیعی، ۱۳۸۷]

۳-۴- مواد و تجهیزات استفاده شده در آزمایش

از آنجاییکه هدف از انجام این آزمایش بررسی نمودن اثر میکرو نانو حباب بر روی درگ می باشد ، لذا ما این آزمایش را در دو مرحله انجام دادیم تا با مقایسه نتایج به تاثیر میکرو نانو حباب پی ببریم.

مرحله اول انجام آزمایش با آب معمولی شهری

مرحله دوم انجام آزمایش با میکرو نانو حباب

که این آزمایش بر روی نمونه یک قایق سطحی با تزریق از جلو که در ادامه به تفصیل به تزریق آن می پردازیم انجام شد.

این قایق مدلسازی شده از جنس فایبرگلس به طول ۲/۵ متر ، عرض ۵۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۴ سانتی متر و به جرم ۳۶/۳۷ کیلوگرم می باشد.





شکل ۳-۳ شناور مورد نظر

۳-۴-۱- وسایل مورد نیاز در آزمایش

۱	آب میکرو نانو حباب	۸	شیر آب
۲	سنسور (لودسل)	۹	چسب آب بند
۳	صفحه سنسور	۱۰	نوار تفلون
۴	تیر	۱۱	چسب دو طرفه
۵	استوانه	۱۲	ماژیک جهت مدرج سازی
۶	تریم گاید(مفصل)	۱۳	
۷	گالن	۱۴	

۳-۴-۲- محل انجام آزمایش

برای انجام آزمایش از استخر آب مرکز تحقیقات ملی شهدای خلیج فارس ندسا تهران استفاده شده که این استخر دارای ارتفاع ۴متر و عرض ۶ متر و طول ۴۰۰ متر می باشد. همچنین ساخت و آماده سازی جسم شناور نیز در این مکان انجام شد.

۳-۵- شرح انجام آزمایش

۳-۵-۱- تولید آب میکرو نانو حباب

تولید آب میکرو نانو حباب در آزمایشگاه نانو سیالات دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گردید که این دستگاه اختراع شرکت میناب میباشد.

این دستگاه شامل یک مخزن ۳ لیتری است که برای تولید آب میکرو نانو حباب ، آب معمولی را وارد

مخزن می کنیم. این آب بوسیله ی لوله ای که از زیر مخزن وارد پمپ تولید آب میکرونانو حباب شده است ، وارد پمپ می شود و آب میکرو نانو حباب تولید شده به وسیله یک لوله از بالای مخزن، وارد آن می شود. این چرخه (ورود آب میکرو نانو حباب از بالای مخزن و خروج آب معمولی از زیر مخزن برای ۳ لیتر آب، نیازمند ۳ دقیقه زمان می باشد.

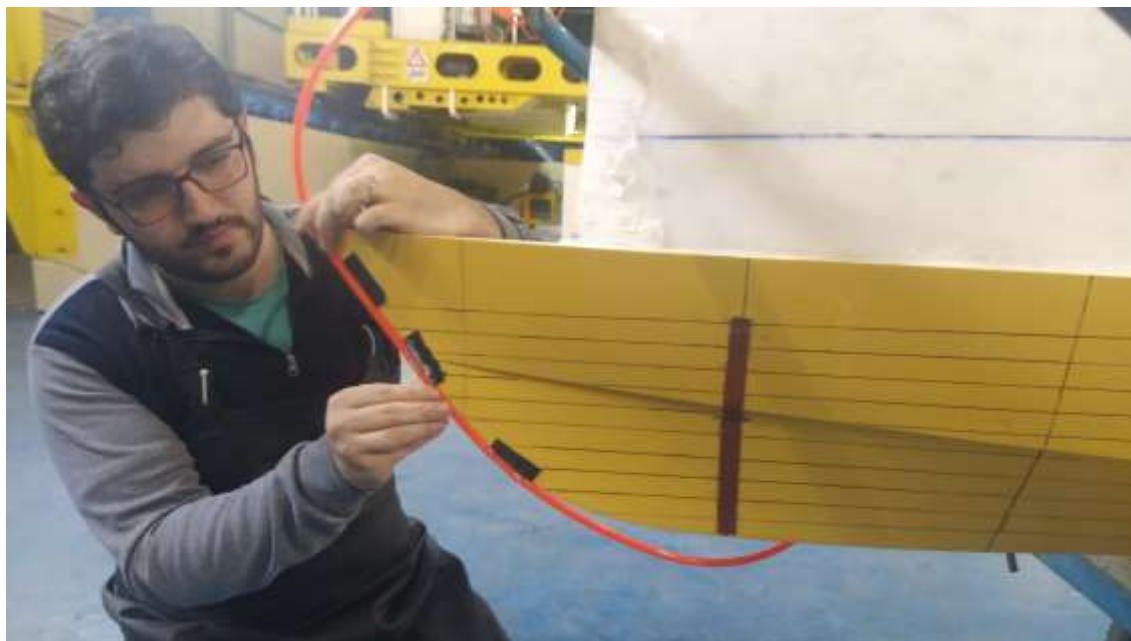


شکل ۳-۴ دستگاه تولید میکرو نانو حباب

۳-۵-۲- آماده سازی شناور و نصب لوله تزریق

لوله تزریق بطول ۸۳ سانتی متر بوده که از ۶۳ سانتی متر انتهایی به فاصله هر ۵ سانتی متر سوراخ ریز

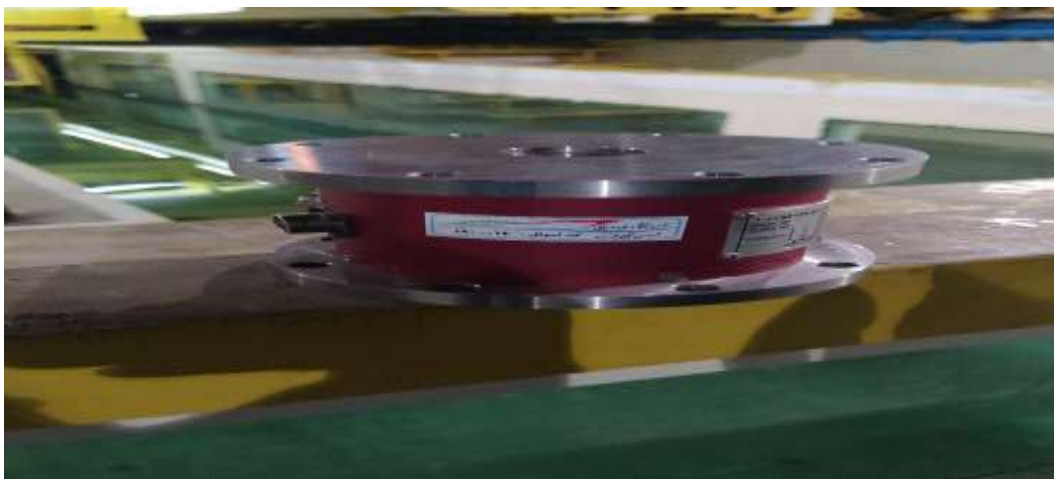
دو طرفه ایجاد کردیم و سپس لوله را با استفاده از چسب دو طرفه و چسب قطره ای به قسمت دماغه شناور که تا بخشی از کف را نیز در بر گرفته نصب کردیم و سپس تمامی قطعات از قبیل سنسور ، صفحه سنسور، مفصل و استوانه و... را در جای خود نصب کرده و شناور در محل خود در استخر آب قرار دادیم. و پس از آن از طریق اتاق کنترل به هدایت قایق می پردازیم. در این آزمایش ظرف مخزن آب در ارتفاع ۱.۷ متری قرار دارد که تزریق بصورت ثقلی صورت می گیرد.



شکل ۳-۵ نصب لوله تزریق



شکل ۳-۶ نصب تیر



شکل ۷-۳ سنسور اندازه گیری نیرو



شکل ۸-۳ مراحل نهایی نصب



شکل ۹-۳ اتاق کنترل

۳-۶- آنالیز عددی

برای نمایش مقایسه بدلیل دشوار بودن توزیع تنش و فشار بر اجسام در دو حالت تزریق آب معمولی و آب میکرونانونحباب، از روش های تجربی استفاده شده است که با بکارگیری از تحلیل ابعادی می توان مدل های کوچک را به مدل های بزرگتر مرتبط ساخت. با توجه به پارامتر های موجود در آزمایش می توان اعداد بدون بعد که در محاسبه نیرو درگ تاثیر دارد و به تحلیل و تفسیر کمک می کنند را بدست آورد. متغیرهای موجود عبارتند از چگالی، ویسکوزیته، سرعت، طول (V, L, ρ, μ) که در بین آن ها می توان از ρ, V, L بعنوان متغیرهای تکراری نام برد. بدین ترتیب داریم:

$$\pi = f(\rho \cdot V \cdot L \cdot \mu)$$

$$M^* L^* T^* = (ML^{-3})^{X1} (LT^{-3})^{X2} (L)^{X3} (MLT^{-3})$$

برای توان M داریم:

$$0 = X1 + 1 \rightarrow X1 = -1$$

برای توان T داریم:

$$0 = -X2 - 1 \rightarrow X2 = -1$$

برای توان L داریم:

$$0 = -3X1 + X2 + X3 - 1 \rightarrow X3 = -1$$

در نتیجه داریم:

$$\pi_1 = \frac{\mu}{\rho V L}$$

۳-۷ مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM

۳-۷-۱ نرم افزار OpenFOAM

نرم افزار OpenFoam^۱ یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی CFD^۲ است توانایی مدل سازی هر نوع مسئله شامل معادلات دیفرانسیل جزئی، از جمله حل عددی جریان سیال دز هز سطح سختی است. مسئله های مربوط به جریان های آرام و آشفته، اعم از تک فاز و چند فاز، واکنش شیمیایی، الکترومغناطیس و مکانیک جامدات و همچنین به مسئله های مربوط به معادلات اقتصادی نظیر قیمت گذاری و مالی نمونه موارد قابل مدل سازی توسط این نرم افزار است. این نرم افزار توسط "OpenCFD Ltd" تحت مجوز عمومی

^۱ OpenField Operation and manipulation

^۲ Computational Fluid Dynamics

گنو^۱ ایجادشده و به صورت منبع باز^۲ و آزاد موجود است. یعنی کد آن به صورت رایگان در اختیار همه کاربران قرار دارد و به راحتی از طریق اینترنت قابل دریافت است. همچنین بدلیل آزاد یا باز بودن منبع کد مذکور دسترسی به تمامی جنبه های کد نویسی از جمله تغییر و توسعه آن برای کاربران فراهم می باشد (The open source CFD toolbox).

هسته انعطاف پذیر و کارآمد OpenFOAM، از مجموعه ای از کدهای نوشته شده به زبان C++ ایجادشده است. این مجموعه ها در ایجاد حل گره هایی^۳ برای مدل سازی مسائل مطرح در مهندسی مکانیک و یا ایجاد ابزارهایی برای اعمال پیش پردازش و پس پردازش، همچنین به وجود آوردن کتابخانه هایی به منظور ایجاد جعبه ابزارهایی که در حل گره ها/کاربردها قابل دسترسی باشند، یا برای پیاده سازی مدل های فیزیکی، مورد استفاده قرار گرفته اند (سر رشته داری ۱۳۹۳).

این نرم افزار با تعدادی حل گر از پیش ساخته، مثال های کاربردی و کتابخانه ارائه گردیده است که می تواند به عنوان یک بسته مدل سازی معمولی مورد استفاده قرار گیرد. در حالی که علاوه بر باز و آزاد بودن کد منبع آن، قابلیت توسعه در ساختار و سلسله مراتب حل گره ها، مثال های کاربردی و کتابخانه ها نیز وجود دارد. نرم افزار OpenFOAM از روش عددی حجم محدود^۴ (FVM) برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی استفاده می کند که در آن به هر شبکه بندی غیر ساختاریافته سه بعدی، سلول های چندوجهی نسبت داده می شود (سر رشته داری ۱۳۹۳).

در این نرم افزار، برای حل جریان سیال از الگوهای تکرار، سرعت - فشار ضمنی استفاده می شود. موازی سازی در حل و بخش بندی دامنه حل از مبانی به کاررفته در OpenFOAM است.

¹ GNU

² OpenSource

³ solvers

⁴ Finite Volume Method

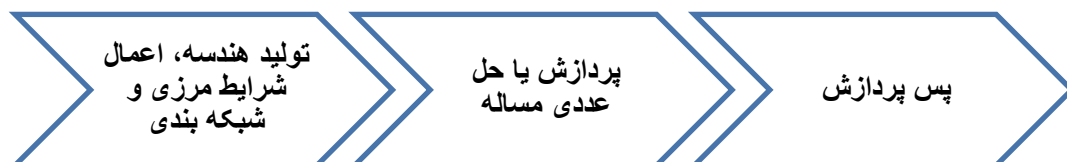
بنابراین به طور کلی حل گرها بدون نیاز به کد نویسی خاصی برای حل موازی قابل توسعه می باشند. از آن رو که این نرم افزار یک کد منبع باز یا آزاد است که به طور پیش فرض بر روی سیستم عامل منبع باز مبتنی بر لینوکس نصب می شود.

۳-۷-۲ نرم افزارهای منبع باز یا آزاد

با وجود اینکه تعاریف مختلفی از نرم افزار منبع باز یا آزاد ارائه شده است اما به طور مختصر می توان گفت نرم افزار آزاد را نرم افزاری است که آزادی هایی را در اجرا، تکثیر، نسخه برداری، بررسی، تغییر و بهبود دادن نرم افزار در اختیار کاربران خود قرار می دهد. لازم بذکر است آزاد بودن یک نرم افزار الزاماً به منزله رایگان بودن آن نیست و تنها وجود شرایط بالا است که یک نرم افزار را به عنوان منبع باز یا آزاد اعلام میدارند.

شناخت ساختار کلی و عملکرد برنامه برای کار با نرم افزاری که امکانات مدل سازی را برای مسائل مختلف فیزیکی فراهم می سازد، مسئله ای اساسی است. فرایند حل مسئله به کمک سه مرحله پیش پردازش (pre processing)، اجرا (run) و پس پردازش (post-processing) صورت می گیرد (سر رشته داری ۱۳۹۳).

طرحواره کلی گام های تحلیل یک مسئله در شکل (۹-۳) آورده شده است.



۳-۸ مدل سازی هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار OpenFOAM

۳-۸-۱ سیستم محاسباتی مورد استفاده در این پژوهش

جهت مدل سازی تزریق میکرونانون حباب و مقدار ضریب درگ در این پژوهش از نرم افزار SALOME نسخه ۹.۳.۰ جهت رسم هندسه و نرم افزار OpenFOAM نسخه ۶ جهت پردازش و از نرم افزار ParaView نسخه ۵.۴.۱ برای پس پردازش در این برنامه استفاده شده است. همچنین جهت اجرای این نرم افزارها، سیستم عامل UBUNTU نسخه ۱۸.۰۴ و روی رایانه ای با مشخصات جدول ۳-۱ به کار گرفته شده است

جدول ۳-۱ مشخصات رایانه مورد استفاده

مشخصات	قطعه‌ی سخت‌افزاری
۱۶ هسته	پردازشگر
80 GB	حافظه
Gallium 0.4 on llvmpipe	کارت گرافیک
32 GB	حافظه رم

۳-۸-۲ SnappyHexmesh

یک نرم افزار مش زنی اتوماتیک و قوی است که قادر به مش زنی هر هندسه پیچیده ای است.



شکل ۳-۱۰

در این پژوهش برای تعیین ضریب درگ شناور و تطبیق با مدل آزمایشگاهی از نرم‌افزار این فوم استفاده شده است. روش حجم محدود بعنوان مبنای این نرم افزار می باشد. در این روش، دامنه‌ی حل توسط شبکه‌ی محاسباتی به سلول‌هایی که هر یک از آن‌ها بعنوان یک حجم کنترل است، تقسیم و جداسازی می‌شود. تغییرهای وابسته در مرکز حجم‌ها (سلول‌ها) یا در گوشه‌ی آن‌ها محاسبه می‌شوند. زمان نیز در حالت جریان‌های گذرا به تعدادی گام زمانی تقسیم می‌گردد و کل مدت‌زمان از ابتدا تا انتهای زمان حل را پوشش می‌دهد. فرآیند حل یک مسئله بر اساس خصوصیات در نرم‌افزار OpenFoam سه‌گام ضروری و لازم در مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد که شامل پیش‌پردازش^۱، پردازش^۲ و پس پردازش^۳ می باشد، به‌طوری‌که این سه‌گام در پژوهش حاضر به ترتیب به ترتیب در نرم‌افزارهای SALOME، OpenFoam و Paraview اجرا شده است

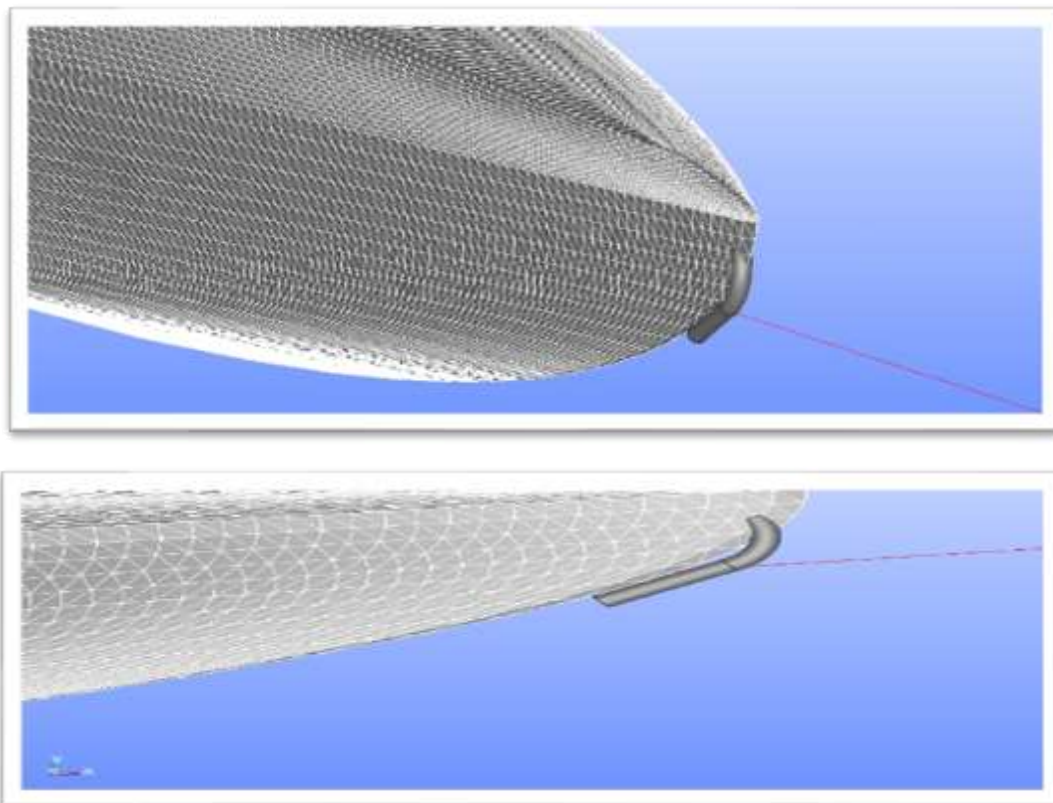
¹ Pre processing

² Run

³ Post processing

۳-۸-۳ پیش‌پردازش

BlockMesh در نرم‌افزار این فوم برای ساخت هندسه و تولید فضای حل (مش)^۱، در نظر گرفته شده است. اما OpenFoam این امکان را به کاربر می‌دهد تا هندسه خود را در نرم‌افزارهای گرافیکی همچون Salome شبیه‌سازی کند و سپس به وسیله دستوراتی به نرم‌افزار OpenFoam وارد کند. از همین رو به دلیل هندسه پیچیده این پژوهش، در این پژوهش بدلیل هندسه پیچیده، ابتدا اقدام به تهیه هندسه با نزدیکترین فرم هندسی و ابعاد کرده که ابعاد به عرض ۳۵ سانتی متر ارتفاع کل ۲۴ سانتی متر، ارتفاع خیس ۱۰.۶ سانتی متر و طول ۲.۵ متر آنگاه لوله ای بعنوان ورودی تزریق میکرونانو حباب در قسمت جلو در کف شناور ایجاد شد هندسه مسئله در نرم‌افزار Salome شبیه‌سازی و مش بندی شده است در مرحله بعد و یک فایل با پسوند STL استخراج شده است که به وسیله دستور IdeasUnvToFoam به وارد می‌شود و تبدیل به اطلاعات به شکل مناسب برای حل کننده شده است.



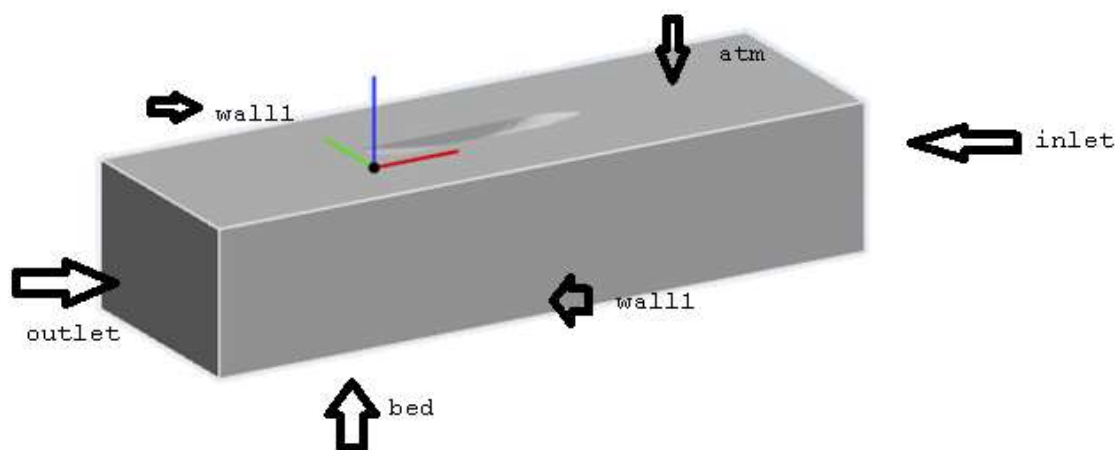
شکل ۳-۱۱ مش سطحی جسم

¹ Mesh

عملیاتی که در مرحله پیش پردازش انجام شده است به شرح زیر است:

- تعریف هندسه‌ی مسئله موردنظر: محدوده محاسبات^۱

در این قسمت، حدود محاسباتی در فایل Geometry به صورت مختصات رأس در قسمت Vertices تعریف می‌شود که هریک از رأس‌ها دارای مقادیری در راستای محورهای مختصات x ، y و z اند که توسط این نقاط هندسه سه بعدی را با تعریف دیواره‌ها، محل ورودی، خروجی و هوا تعریف می‌کنیم. شرایط مرزی شامل ورودی، خروجی، دیواره و سطح آزاد را مشخص کردیم. لازم بذکر است در این مدل سازی سطح آزاد را صلب و بدون اصطکاک و بدنه کشتی را صلب و با اصطکاک فرض کردیم و بجای قایق آب را حرکت می دهیم



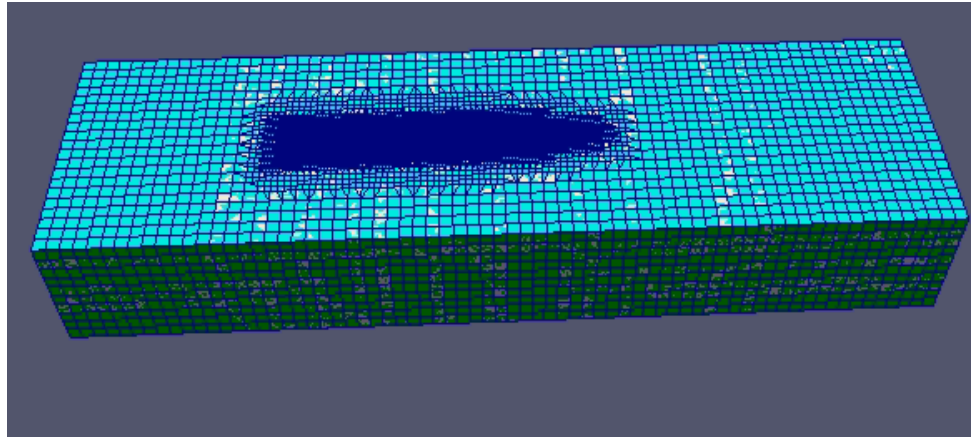
شکل ۳-۱۲ شرایط مرزی

- تعریف مش بندی هندسه رسم شده

مش بندی هندسه رسم شده در نرم افزار Salome توسط ابزاری با دستور Mesh و از نوع NETGEN 3D انجام شده است که تعداد کل سلول ها 2915308 است . در نهایت پس از ورود به نرم افزار OpenFoam

¹ Computational domin

از طریق SnappyHexmesh اقدام به مش زنی با کیفیت بهتر بطوریکه در نزدیکی جداره مش ها بصورت ریزتر و با دقت بهتر رسم شده است.



شکل ۳-۱۳ عملیات مش زنی

نقطه قابل توجه در این عملیات ها یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار در مقدار y^+ مقادیر اولیه داده های زیر می باشد:

- nSurfaceLayers
- expansionRatio
- finalLayerThickness
- minThickness

که مقادیر آن بر اساس مطالعات و حدس و خطا های متعدد حاصل شده است. که این مقادیر در فایل snappyHexMeshDict قرار دارد.

```
File Edit Search View Encoding Language Settings Tools Macro Run Plugins Window ?
snappyHexMeshDict
253 // Settings for the layer addition.
254 addLayersControls
255 {
256     // Are the thickness parameters below relative to the undistorted
257     // size of the refined cell outside layer (true) or absolute sizes (false).
258     relativeSizes true;
259
260     // Per final patch (so not geometry!!) the layer information
261     layers
262     {
263         ship
264         {
265             nSurfaceLayers 3; // 6;
266         }
267     }
268
269     // Expansion factor for layer mesh
270     expansionRatio 2;
271
272     // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
273     // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
274     // Relative to undistorted size of cell outside layer.
275     // See relativeSizes parameter.
276     finalLayerThickness 0.5;
277
278     // Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
279     // cannot be above minThickness do not add layer.
280     // Relative to undistorted size of cell outside layer.
281     minThickness 0.01;
282
283     // If points get not extruded do nGrow layers of connected faces that are
284     // also not grown. This helps convergence of the layer addition process
285     // close to features.
286     // Note: changed(corrected) w.r.t 17x! (didn't do anything in 17x)
287     nGrow 0;
288
289     // Advanced settings
290
```

شکل ۳-۱۴

نکته قابل توجه در مورد مقدار expansion ratio که برابر عدد ۲ قرار داده شده این است که این عدد نسبی است و مطلق نیست حتی اگر عدد ۲۰۰ هم وارد شود اینطور نیست که عدد ۲۰۰ در نظر گرفته شود. این عدد در نرم افزار های سالومه و گمبیت عدد ثابت می باشد. و معمولا در چنین نرم افزار های معمولا عدد ۱.۲ در نظر میگیریم. اما در این برنامه عدد ۲ نسبی است و گزینه relative مربوط به آن فعال است.

در این پژوهش توصیف جریان در سیستم مختصات دکارتی (x, y, z) صورت گرفته است، که محور x خلاف جهت جریان، محور y موازی با ارتفاع حوضچه و محور z عمود بر سایر محورها است. بالاترین سطح مخزن در معرض سرعت ثابت جریان آزاد واقع شده است.

یکی از فرضیات موجود نیوتنی بودن رفتار سیال درون مخزن است. شرایط آن هم‌دما، سیال غیرقابل تراکم و جریان حاکم در مخزن در حالت پایا با رژیم جریان آشفته است. که به صورت سه بعدی مدل سازی شد.

۳-۸-۴ پردازش

این بخش شامل تمامی تنظیمات قبل از حل مسئله است. جریان حاکم در حوضچه پایا و آشفته است، بنابراین از معادله های RANS^۱ (معادله های متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال) استفاده شده است. معدل گیری از معادله ناویر استوکس به روش رینولدز ایده ای اصلی تشکیل دهنده ای این معادله ها است که به وسیله ای آن یک مقدار لحظه ای، به مقادیر متوسط زمانی ونوسانی خود تجزیه شده است. (Zhang and Martinez 2013)، (Zhang and Martinez 2014) و (Zhang 2014). م چنین به منظور مدل سازی جریان آشفته می توان از مدل های مختلف آشفته گی که در کتابخانه ی نرم افزار OpenFOAM موجود است، استفاده کرد. برای حل معادله های متوسط گیری رینولدزی شده ناویه استوک RANS از مدل توربولنسی $k-\omega$ sst در این پژوهش استفاده شده است (Wilcox 1998).

¹ Reynolds Average Navier Stokes Equations

سیال مورد استفاده، آب میکرو نانو حباب ۲۵ درجه سلسیوس با فرض تراکم ناپذیری و خصوصیات فیزیکی ثابت (با چگالی ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی $10^{-6} \times 0.91$ متر مربع بر ثانیه) و آب ۲۵ درجه سلسیوس با فرض تراکم ناپذیری و خصوصیات فیزیکی ثابت (با چگالی ۹۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سینماتیکی $10^{-6} \times 0.89$ متر مربع بر ثانیه) در نظر گرفته شد (وحید حقی، ۱۳۹۶).

در این مدل سازی جهت تطبیق نتایج مدل سازی عددی با مقادیر ضریب درگ در نمونه آزمایشگاهی دو سرعت ۰.۵ و ۱ متر بر ثانیه را مورد بررسی قرار دادیم. برای حل این مسئله از بین حل گره های موجود در کتابخانه موجود در نرم افزار OpenFoam حل گر SimpleFoam مورد استفاده قرار گرفته است. تنظیمات مسئله در فایل controlDict قبل از حل شدن انجام می شود که شامل زمان آغاز پردازش از لحظه ی صفر تا زمان آنها برابر با زمان کارکرد دستگاه در حوض است. پس از تنظیم سایر پارامترها در این قسمت، مسئله داده شده در قسمت قبلی حل می شود و با حل شدن مسئله اقدام به گرفتن اطلاعات لازم از نرم افزار می گردد. داده های تهیه شده توسط نرم افزار OpenFoam بدلیل اینکه صورت خام بوده و گرافیکی نیستند برای اطلاعات گیری گرافیکی به راحتی می توان از قسمت پس پردازش استفاده کرد.

۳-۸-۵ جزئیات حل گر انتخابی

در این تحقیق فایل اصلی انتخاب شده از حل گر simpleFoam شامل سه زیرمجموعه 0، constant، و system است.

فایل. بیان کننده شرایط اولیه و شرایط مرزی مسئله است. در پوشه constant، آرام و آشفته بودن رژیم جریان و مدل آشفتگی به همراه خواص فیزیکی سیال مورد نظر تعریف می شود. فایل system شامل چهار زیرمجموعه به صورت فایل های setFieldsDict، fvScheme، fvSolution، controlDict است که به ترتیب هر کدام برای تنظیمات زیر تعریف شده اند:

- فایل setFieldsDict

در این فایل، مرز بین آب و هوا مشخص و تنظیمات مربوط به جریان دوفازی انجام شده است.

- فایل controlDict

در این قسمت برای خروجی به همراه روش ذخیره اطلاعات حل تنظیمات مربوط به کنترل حل مانند زمان آغاز و زمان پایان حل، اندازه گام تکرار و گام زمانی تنظیم و تعیین می گردد.

- فایل FVSolution

در این قسمت برای هر یک از میدان‌های متغیر شامل سرعت و فشار تنظیمات مرتبط به حل گر، تعداد تکرارها، مقادیر باقیمانده، میزان خطا و مقداری خطای نسبی و همچنین نحوه حل دستگاه معادلات خطی تعیین می گردد.

- فایل FVScheme

در این فایل نحوه‌ی گسسته سازی هر یک از عملگرهای دیفرانسیلی از جمله گرادیان، دیورژانس، لاپلاسین و کرل تعیین شده است.

تبدیل یک یا چند معادله‌ی دیفرانسیلی به یک دستگاه مشابه از معادلات جبری را گسسته سازی گویند. روش گسسته سازی در openFoam روش حجم محدود است که این روش شامل سه گام اصلی است که تبدیل فضا، زمان و معادلات انتقال به فرم گسسته شده است.

مزیت و نکته مثبت روش حجم محدود این است که معادله‌های حاکم، بقای جرم، مومنتوم و انرژی به علت حل شکل انتگرالی به طور خودکار حفظ می شوند.

در پژوهش حاضر جهت حل جریان و گسسته سازی معادلات تنظیمات مورد نیاز انجام شده است در جدول ۳-۴ بطور مختصر قرار داده ایم .

جدول ۳-۲- روش‌های گسسته سازی و حل معادلات در openfoam

Gauss linear	گرادیان
Gauss upwind	عبارت جابه‌جایی
Gauss linear corrected	عبارت دیفیوژن
Linear solver GAMG	حل گر خطی
Gauss Seidel	حل گر تکراری

۳-۸-۶ مروری اجمالی بر روش‌های RANS

معادله‌های RANS، معادله‌های متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال است. تجزیه‌ی رینولدز ایده‌ی اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این معادله‌ها هستند که توسط آن یک مقدار لحظه‌ای، به مقادیر متوسط زمانی ونوسانی خود تجزیه شده است. یکی کاربرد های معادله‌های RANS برای توصیف جریان‌های آشفته است که بکار گرفته می شود. این معادله‌های ارائه شده در رابطه (3-1) بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی مناسب از جواب‌های متوسط زمانی معادله‌های ناویه استوکس را ارائه می‌دهند.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (3-1)$$

که در آن ρ چگالی، μ لزجت، $\rho \overline{u_i u_j}$ تنش‌های رینولدز، $\bar{u}_i$ سرعت متوسط است.

عبارت تنش رینولدز غیرخطی، برای نزدیکی به معادله‌ی RANS برای حل شدن نیازمند مدل‌سازی اضافی می باشد. از میان مدل‌های ارائه شده در روش مدل‌سازی آشفتگی RANS، مدل‌های دو معادله‌ای برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

بر این اساس در این پژوهش در نهایت جهت مدل کردن آشفتگی از مدل $k-\omega$ sst استفاده شده است.

۳-۸-۷ مدل انتقال تنش برشی $k-\omega$

حالت عمومی مدل‌های $K-\omega$ از فرکانس آشفتگی ω بجای نرخ اضمحلال لزج ε برای مشخص کردن آشفتگی استفاده می‌کند. چنین مدل‌هایی بطور واضحی به انواع مدل $K-\varepsilon$ نزدیک و مرتبط می‌باشند. ما در اینجا به بررسی نوع Wilcox مدل $K-\omega$ می‌پردازیم.

در مدل Wilcox $K-\omega$ ارتباط بین مقیاس آشفتگی طولی و سرعتی یعنی δ_t و u_t با k و فرکانس آشفتگی ω توسط روابط زیر داده شده‌اند

$$\delta_t \propto \frac{\sqrt{k}}{\omega} \quad (2-3)$$

$$u_t \propto \sqrt{k} \quad (3-3)$$

فرکانس آشفتگی ω را با استفاده از رابطه $\varepsilon = \omega k$ به مقادیر k و ω مرتبط ساخت و ویسکوزیته آشفتگی μ_t نیز توسط رابطه زیر بدست آورد:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega} \quad (4-3)$$

معادلات انتقال برای k و ω در مدل Wilcox عبارتند از:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_j \right) j + G + B + \rho \omega k \quad (5-3)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \omega_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \omega_j \right) j + C_1 \frac{\omega}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\omega}{k} B + C_2 \rho \omega^2 \quad (6-3)$$

ضرایب مدل WILCOX نیز به کمک جدول زیر تعیین می‌شوند.

σ_K	σ_ε	C_μ	C_1	C_2
2	2	0/09	0/555	0/8333

۳-۸-۸ ویژگی‌های مدل ویلکوس $K-\omega$:

مدل ویلکوس $K-\omega$ نسبت به مدل استاندارد $K-\varepsilon$ عملکرد بهتری در جریان‌هایی که شامل کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس می‌باشند دارند. مدل‌های $K-\varepsilon$ از آنجا که از دسته بندی در طبقه مدل‌های رینولدز بالا می‌باشند (یعنی در نواحی عدد رینولدز بالا باشد نتایج بهتری را ارائه می‌کنند)، برای حل معادلات در نواحی نزدیک دیواره (که بطور موضعی جزو نواحی با عدد رینولدز پایین محسوب می‌شوند)، با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌شوند. اما مدل ویلکوس $K-\omega$ را برای پیش‌بینی تغییرات متغیرهای آشفتگی تا لب دیواره‌های جامد (و البته با استفاده از المانهای متراکم نزدیک دیواره) بکارگیری کرد

مدل ویلکوکس برای مقادیری که نرخ پراکندگی جریانات آزاد برشی پیش بینی می نماید، دارای تطابق نزدیکی با مقادیر اندازه گیری شده برای گردابه های دور، لایه های اختلاطی، جت های صفحه ای، گرد و شاعی می باشد و لذا برای جریانات محصور به دیواره و هم البته تا حدودی برای جریانات آزاد برشی نیز می توان از این مدل استفاده کرد.

منتر به منظور آمیختن فرمولبندی دقیق و قدرتمند مدل $K-\omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $K-\epsilon$ مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره مدل $SST K-\omega$ ارائه کرده است. این مدل بطور همزمان، توانایی بالایی مدل $K-\omega$ در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالایی مدل $K-\epsilon$ در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار دارد. برای این ترکیب دو مدل، نیازمند آن هستیم که فرمول بندی مدل $K-\epsilon$ را بشکل مدل $K-\omega$ در بیاوریم

مدل $SST K-\omega$ بسیار شبیه به مدل استاندارد مدل $K-\omega$ است ولیکن شامل بهینه سازی های زیر نیز می باشد:

(الف) مدل استاندارد مدل $K-\omega$ و شکل تبدیل یافته مدل $K-\epsilon$ هر دو ابتدا ضرب در یک تابع آمیختگی شده و سپس این دو مدل با یکدیگر جمع می شوند.

طراحی تابع آمیختگی به گونه ای است که در نواحی نزدیک دیوار دارای مقدار یک که سبب فعال شدن مدل $K-\omega$ در آن نواحی می شود و در نواحی دور از دیوار دارای مقدار صفر که باعث فعال شدن شکل تبدیل یافته $K-\epsilon$ می شود.

(ب) مدل SST دارای $damped cross diffusion derivative term$ در معادله ω است.

(ج) تعریف ویسکوزیته آشفتگی μ_t به منظور به منظور کردن اثرات انتقال تنش های برشی اصلی جریان آشفته مورد ویرایش قرار گرفته است.

(د) تغییر ضرایب ثابت مدل نسبت به مدل استاندارد $K-\omega$

تغییر ضرایب ثابت باعث شده است که مدل $SST K-\omega$ برای دسته وسیعی از جریانات همانند ایرفولها، جریانات شامل گرادیان فشار معکوس و موج شوک گذرا، نسبت به مدل استاندارد $K-\omega$ بسیار دقیقتر و مطمئن تر باشد.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \frac{\rho \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_i} \partial u_j - \rho \epsilon \quad (7-3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - c_1 \rho \frac{\epsilon}{k} (\rho \overline{u_i' u_j'}) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8-3)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9-3)$$

در روابط مذکور v_t لزجت سینماتیکی آشفتگی، k انرژی جنبشی، ε نرخ اضمحلال آشفتگی، ρ چگالی، u سرعت جریان، μ لزجت دینامیکی جریان آرام، μ_T لزجت دینامیکی آشفتگی، $(\sigma_\varepsilon, C_\mu, \sigma_k, c_1, c_2)$ از ثابت‌های معادله‌ی مدل (جدول ۳-۵) است.

۳-۸-۹ تعیین ضرایب موجود در مدل استاندارد K- ε

با قیاس پیش‌بینی‌های انجام گرفته توسط مدل استاندارد $K - \varepsilon$ ، مقادیر تقریبی ثابت موجود در مدل استاندارد نتایجی که از آزمایش‌های تجربی، حاصل شده به صورت جدول ۳-۵ محاسبه خواهند شد.

جدول ۳-۳ ضرایب مورد استفاده در معادله‌های مدل استاندارد K- ε

σ_ε	C_μ	σ_k	c_1	c_2
۱/۳۰	۰/۰۹	۱	۱/۴۴	۱/۹۲

این مقادیر برای حالت‌های گوناگونی از جریان‌های مهندسی قابل بکارگیری است. (Wilcox, D.C. 1998).

پس از بیان این ضرایب در مدل، روابط ارائه شده برای محاسبه‌ی انرژی جنبشی اضمحلال انرژی، به عنوان شرایط مرزی در حل مسئله به کار گرفته می‌شود. بر این اساس رابطه‌ی (۳-۵) نشان‌دهنده‌ی انرژی جنبشی آشفتگی است.

$$K = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2 \quad (10-3)$$

در رابطه بالا آن k مقدار انرژی جنبشی آشفتگی، U مقدار سرعت متوسط و T_i مقدار شدت آشفتگی است. در حالت کلی شدت آشفتگی با نسبت برآیند نوسانات سرعت به میانگین سرعت در یک جریان آشفته برابر است که می‌توان بر اساس شرایط جریان دسته بندی زیر را متصور شد.

- شدت آشفتگی زیاد: جریان‌هایی همانند توربین که حرکت جریان دارای سرعت زیاد و در یک مسیری با هندسه پیچیده می‌باشد گویند که شدت آشفتگی در این جریانات بین ۵ تا ۲۰ درصد متغیر است.

- شدت آشفته‌گی متوسط: برخی از جریان‌ها در مسیرهای غیر پیچیده مانند لوله‌های بزرگ جریان‌هایی سرعت کم در حرکت هستند، این دست از جریان‌ها دارای شدت آشفته‌گی بین ۱ تا ۵ درصد هستند.
 - شدت آشفته‌گی کم: برخی از جریان‌ها که از یک سیال ثابت ایجاد می‌شود دارای شدت آشفته‌گی کم هستند. این جریان‌ها معمولاً در اطراف زیردریایی‌ها، ماشین‌ها، هواپیماها و مواردی از این دست اتفاق می‌افتد که شدت آشفته‌گی در این جریان‌ها کمتر از ۱ درصد است. .
- در این مدل می‌توان نرخ اضمحلال انرژی را بر اساس ضرایب ارائه‌شده در رابطه‌ی (3-6) را برای بدست آورد.

$$\varepsilon = C_{\mu}^{0.75} \frac{K^{1.5}}{l} \quad (11-3)$$

در این قسمت k مقدار انرژی جنبشی آشفته‌گی به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (3-5)، l مقیاس طولی آشفته‌گی و C_{μ} یکی از ضرایب ثابت معادله‌ی مدل (جدول ۵-۳) است. برای محاسبه طول آشفته‌گی در مدل‌سازی عددی راهکارهای مختلفی بیان شده است. که یکی از بهترین روش محاسبه طول آشفته‌گی استفاده از کوچک‌ترین بعد المان تولیدشده در شبکه‌ی حل است. (Wilcox, D.C. 1998).

فصل چہارم

تجزیہ و تحلیل آزمائش

۴-۱- نتایج بدست آمده از آزمایش روی آب معمولی و آب حاوی میکرونانو حباب

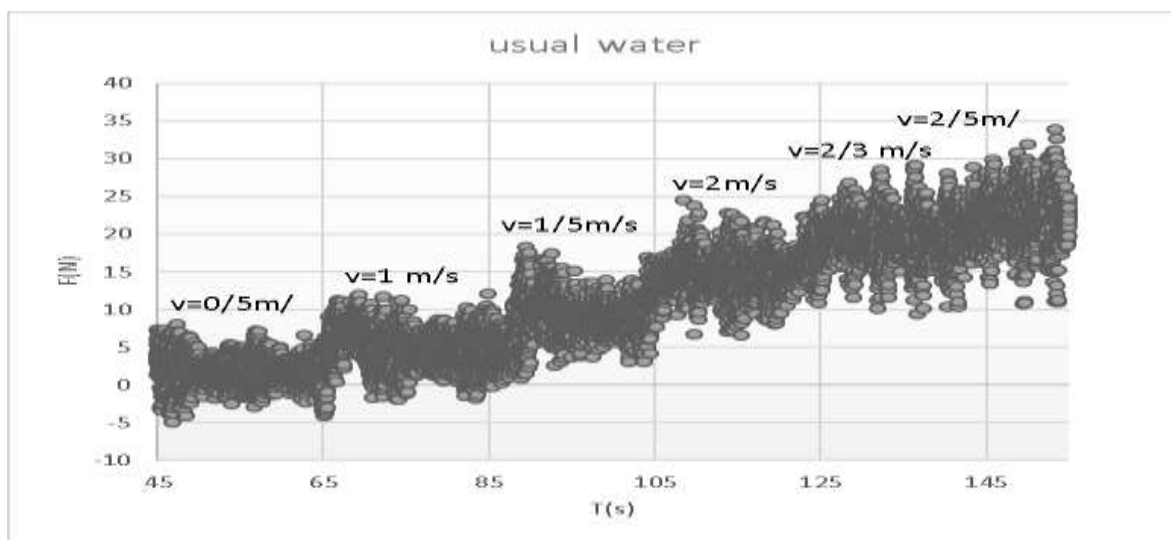
۴-۱-۱- آزمایش تزریق بر شناور جهت کاهش درگ

این آزمایش بر روی یک شناور به منظور مقایسه آب معمولی بر آب میکرونانو حباب به جهت تاثیرگذاری میکرونانو حباب که به اصطلاح میناب می نامیم انجام شده است که در ادامه نتایج و اندازه گیری ها قابل مشاهده است.

در این آزمایش که گالن آب که در ارتفاع ۱.۷۰ متری قرار دارد تزریق بصورت ثقلی انجام می پذیرد. در اینجا آب معمولی در دمای ۹ درجه سانتی گراد و آب میناب ۱۲ درجه سانتی گراد بوده همچنین سطح آبگیر قایق که توسط نرم افزار solid works استخراج شده که مقدار آن ۱.۴۱ m² و قطر لوله تزریق ۰.۰۰۸ m با توجه به زمان استخراج اب و ارتفاع خروجی آب دبی تزریق آب نیز بدست آمده که برای آب معمولی ۰.۰۳۷ لیتر بر ثانیه و برای آب میناب ۰.۰۳۹ لیتر بر ثانیه بوده است. نیروی وارده توسط نیرو سنج ها در هر لحظه ثبت شده که پس از آن میانگین نیرو و ضریب درگ در سرعت های مختلف در جدول زیر آورده شده است و نمودار نیرو در هر لحظه در شکل زیر آورده شده است

جدول ۴-۱- مقادیر نیرو درگ در حالت آب معمولی در سرعت های مختلف شناور

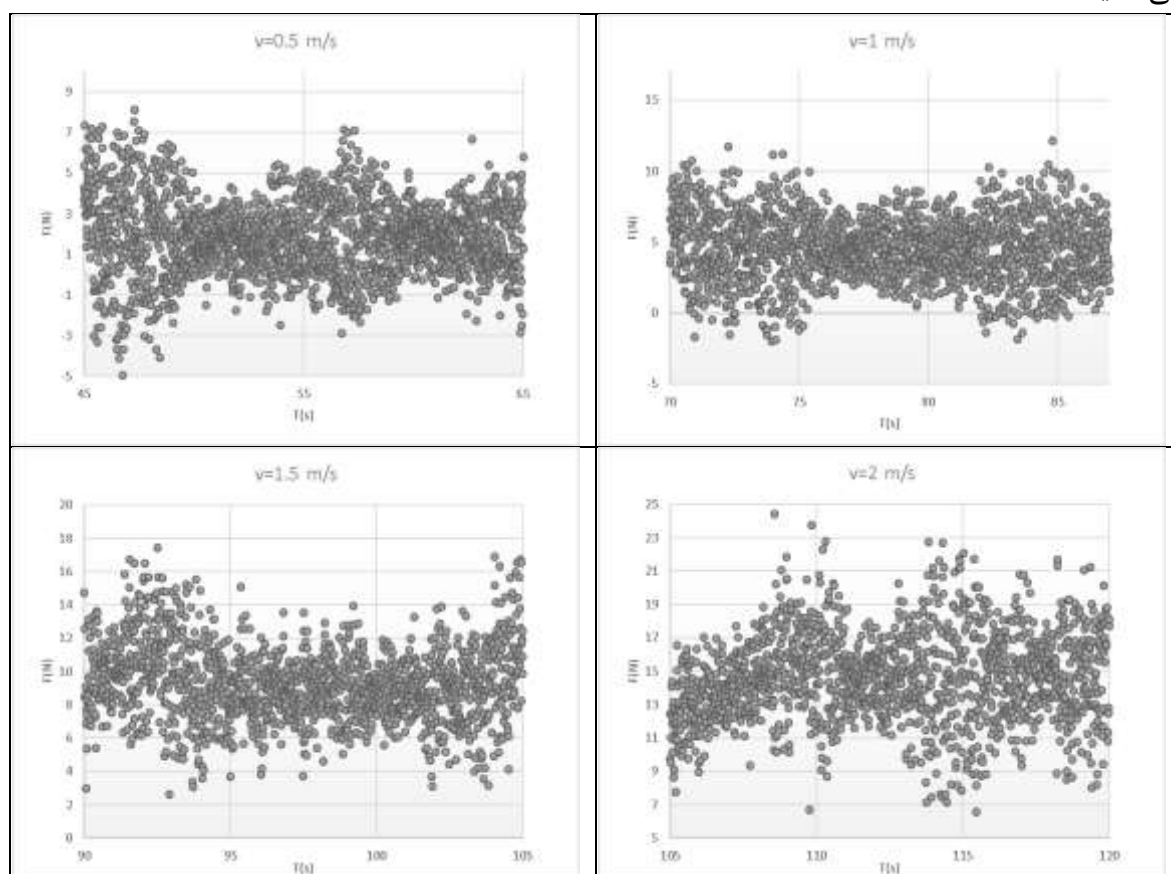
V (m/s)	F(N)	D
0.5	1.8336	0.0168
1	4.9663	0.0114
1.5	9.2968	0.0094
2	14.6307	0.0084
2.3	19.5915	0.0085
2.5	22.4530	0.0082

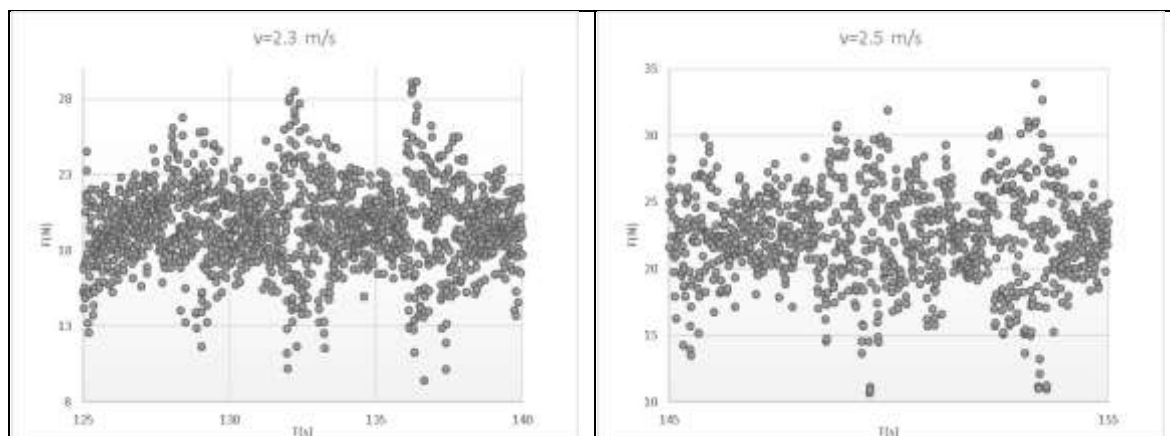


شکل ۴-۱ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب معمولی

توضیح مربوط به شکل ۴-۱ :

هر پله در این نمودار بیانگر سرعت مختلف است بعنوان مثال در بازه حدود ۴۵ الی ۶۵ ثانیه شناور در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه در حال حرکت بوده و میانگین داده ها استخراج شد که در جدول ۴-۱ ملاحظه می کنید

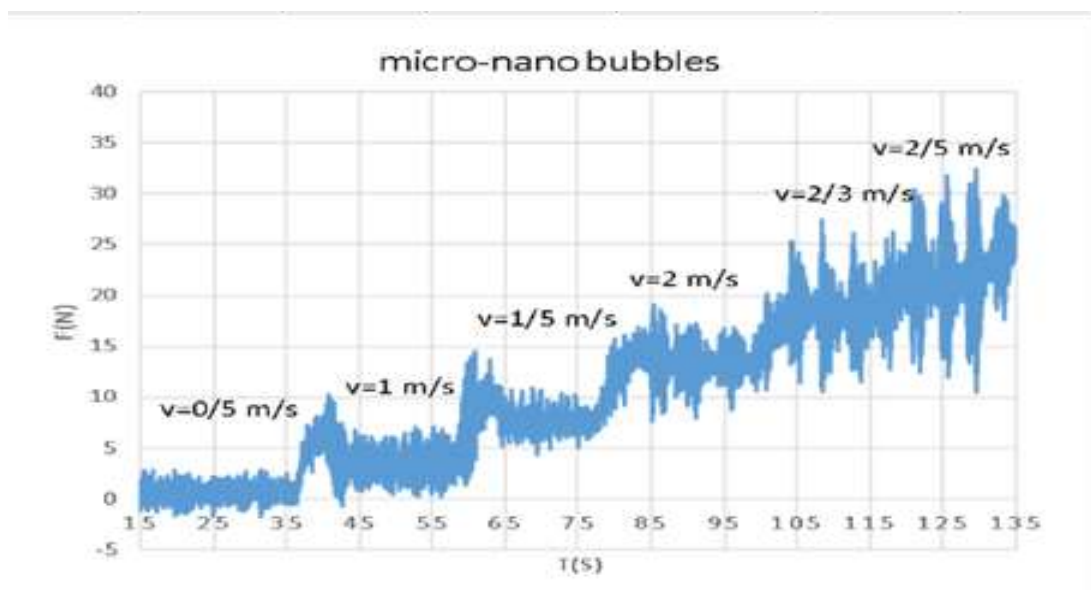




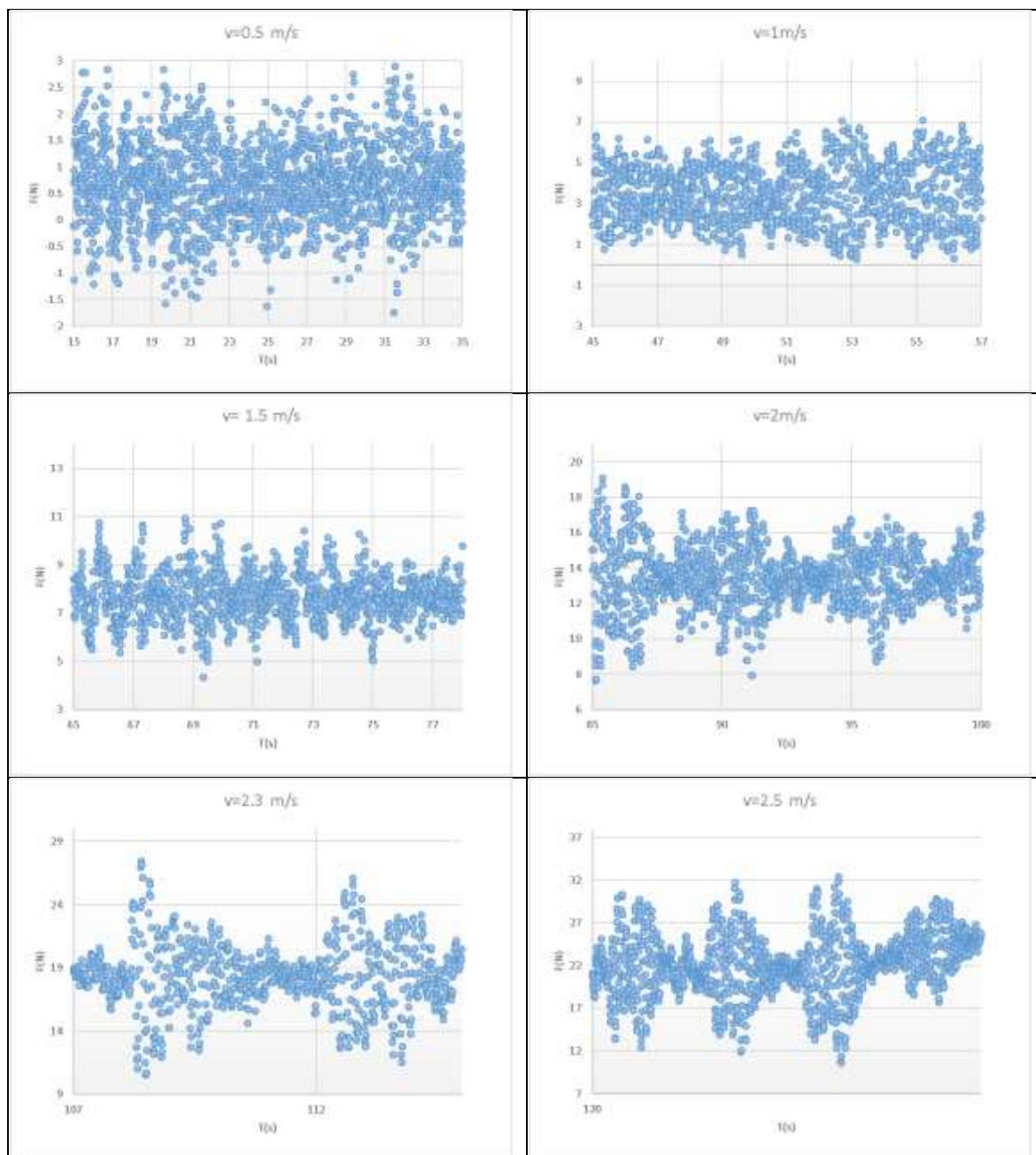
شکل ۲-۴ مقدار داده های ثبت شده مقادیر نیرو در سرعت های مختلف

جدول ۲-۴- مقادیر نیرو درگ و ضریب درگ در حالت آب میناب در سرعت های مختلف شناور

V (m/s)	F(N)	D
0.5	0.6878	0.0039
1	3.4865	0.0049
1.5	7.7143	0.0048
2	13.4677	0.0047
2.3	18.3412	0.0049
2.5	21.4667	0.0048

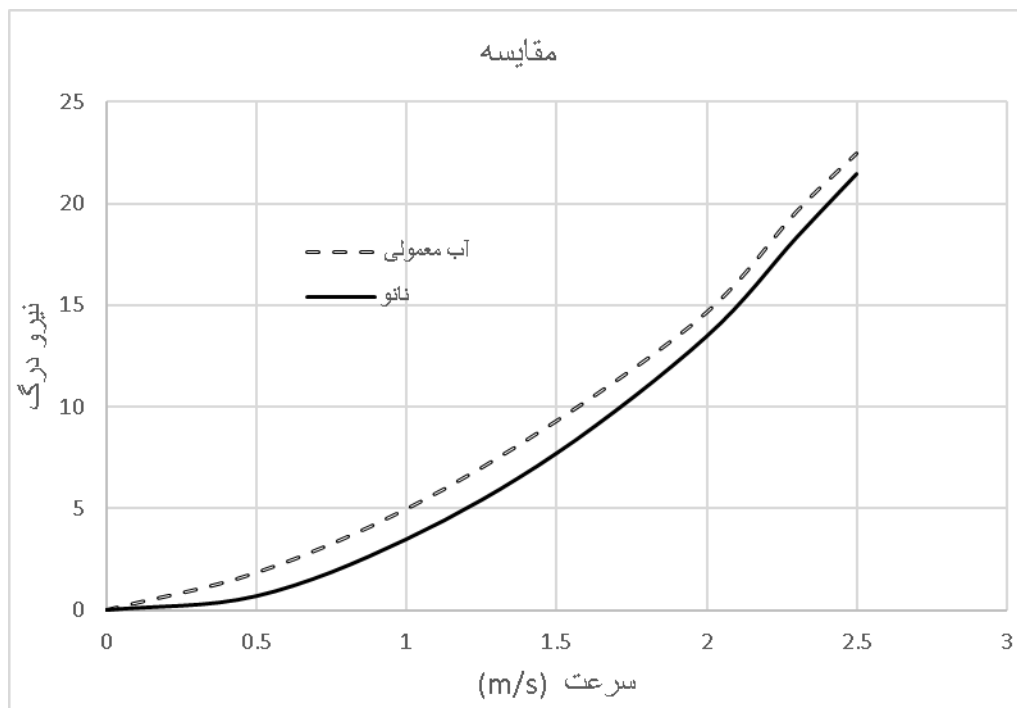


شکل ۳-۴ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب نانو حباب

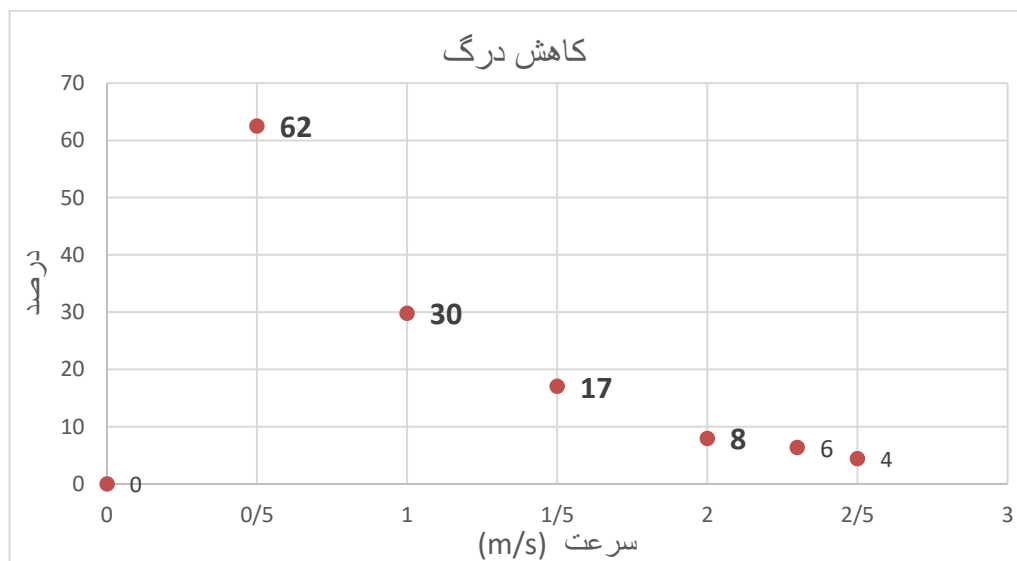


شکل ۴-۴ مقدار داده های ثبت شده مقادیر نیرو در سرعت های مختلف

حال با داشتن نیروی درگ در دو حالت با و بدون آب نانو حباب می توان نمودار کاهش درگ بر حسب سرعت را در شکل ۴-۴ ملاحظه نمود



شکل ۴-۵ تغییرات نیروی درگ در حالت تزریق آب نانو حباب



شکل ۴-۶ درصد کاهش درگ در سرعت های مختلف

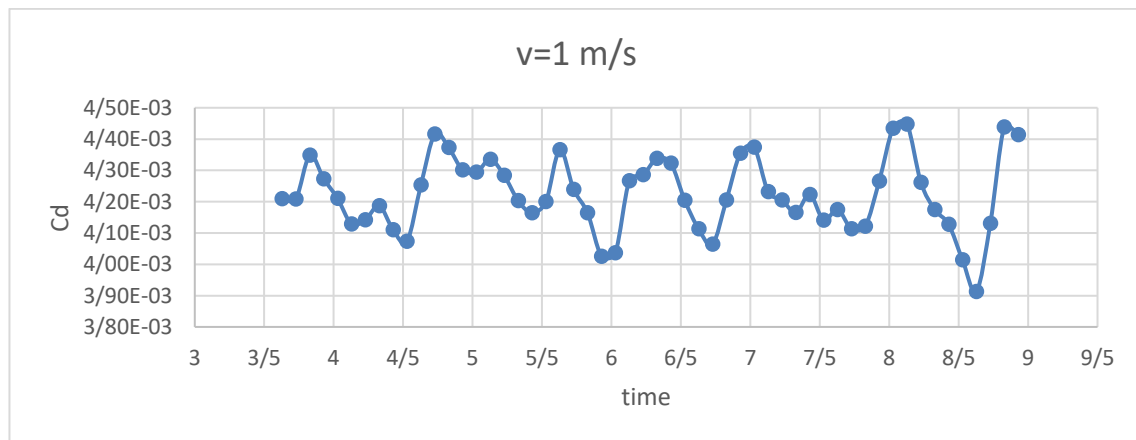
همانطور که از نتایج حاصل از مقایسه ی نمودار تغییرات نیروی درگ در آب معمولی و آب نانو حباب مشخص است، نیروی درگ با تزریق آب نانو حباب کاهش داشته که با توجه به شکل ۴-۴ بیشترین کاهش نیروی درگ در سرعت $V=0.5$ و برابر با ۶۲٪ کاهش نیروی درگ است.

با توجه به رابطه عدد رینولدز: $Re = \frac{\rho ul}{\mu}$ ؛ در سرعت های مختلف در جدول زیر مقدار نیروی درگ، ضریب درگ و مقدار عدد رینولدز آورده شده است:

جدول ۳-۴ مقدار نیرو ، ضریب درگ و عدد رینولدز

رینولدز	کاهش ضریب درگ	کاهش نیرو	ضریب درگ	ناانو	ضریب درگ	آب	
Re			D	F(N)	D	F(N)	V (m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1,373,626	62	62	0.0039	0.6878	0.0104	1.833556	0.5
2,747,253	30	30	0.0050	3.4865	0.0071	4.966259	1
4,120,879	17	17	0.0049	7.7143	0.0059	9.296792	1.5
5,494,505	8	8	0.0048	13.4677	0.0052	14.6307	2
6,318,681	6	6	0.0049	18.3412	0.0053	19.59151	2.3
6,868,132	4	4	0.0049	21.4667	0.0051	22.45296	2.5

نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی برای تعیین ضریب درگ در سرعت ۱ متر بر ثانیه ضریب درگ بصورت زیر است:



شکل ۴-۷ مقدار ضریب درگ در سرعت ۱ متر بر ثانیه

جدول ۳-۴ میانگین ضریب درگ

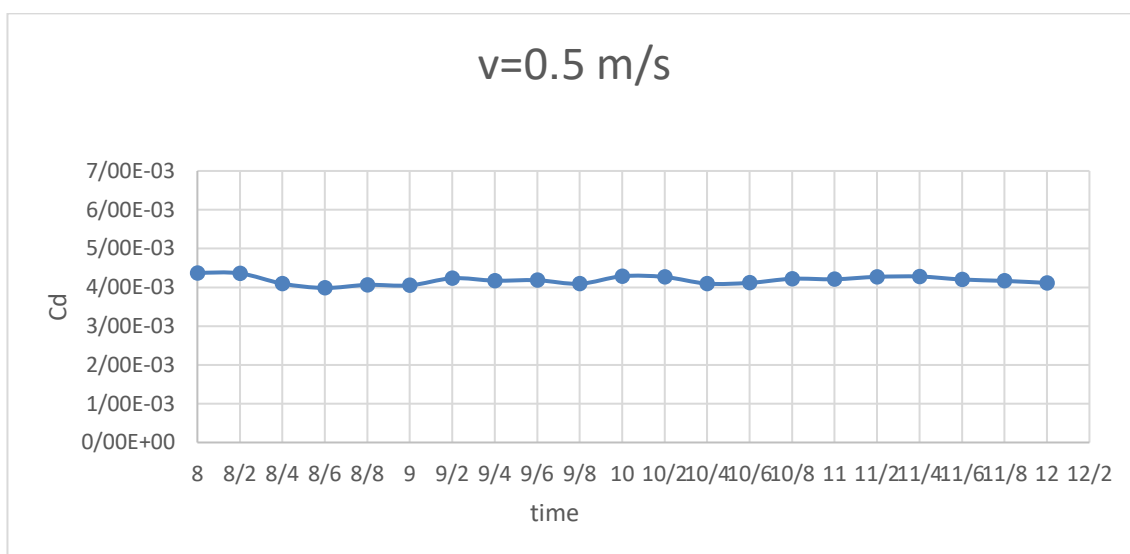
time(s)	Cd
4 - 5	4.22E-03
5-6	4.23E-03
6-7	4.22E-03
7-8	4.20E-03
8-9	4.24E-03

که متوسط ضریب درگ بصورت زیر محاسبه میشود

$$\text{میانگین ضریب درگ} = \frac{(4.22+4.23+4.22+4.2+4.24)*E^{-3}}{5} = 4.22*E^{-3}$$

با توجه به میانگین بدست آمده درصد خطا تطابق با مدل آزمایشگاهی ۱۶٪ درصد خواهد بود

در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه ضریب درگ بصورت زیر است:



شکل ۴-۸ مقدار ضریب درگ در سرعت ۰.۵ متر بر ثانیه

جدول ۴-۵ میانگین ضریب درگ

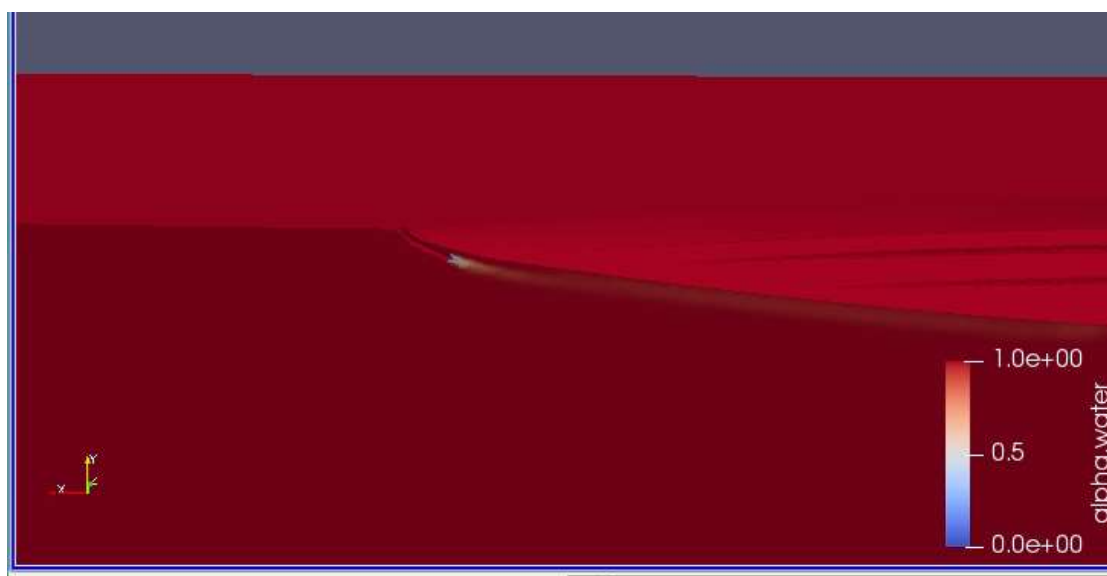
time(s)	Cd
8.2-9.2	4.13E-03
9.4-10.2	4.18E-03
10.4-11.2	4.18E-03
9.2-10.3	4.19E-03

که متوسط ضریب درگ بصورت زیر محاسبه میشود

$$\text{میانگین ضریب درگ} = \frac{(4.13+4.18+4.18+4.19)*E^{-3}}{5} = 4.17*E^{-3}$$

با توجه به میانگین بدست آمده درصد خطا تطابق با مدل آزمایشگاهی 7٪ درصد خواهد بود

در تصویر زیر مدل تزریق و طریقه نشر آن مشخص است



شکل ۴-۹ نحوه تزریق میکرونانونوجباب

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہادات

این پایان نامه شامل دو بخش می باشد: در بخش اول به اثر کاهشی تزریق میکرونانونحباب بر نیروی درگ شناور پرداخته شد و در بخش دوم به ایجاد یک مدل مناسب برای تعیین ضریب درگ در زمان تزریق میکرو نانونحباب پرداخته شد. باید عرض کرد که در قسمت مدلسازی عددی قبل از استفاده از روش $k-\omega$ SST از روش $k-\epsilon$ برای مدلسازی استفاده شد و بدلیل اختلاف زیاد داده ها با مقادیر آزمایشگاهی در ادامه روش $k-\omega$ SST را بکار گرفتیم.

۵-۱- نتیجه گیری: . با توجه به مطالبی که در طول چهار فصل فوق بیان شده نتایج حاصل از این

پژوهش به شرح زیر می باشد:

در این آزمایش به بررسی تاثیر تزریق میکرو نانو حباب بر درگ شناور پرداخته شده است که نتایج بصورت زیر بیان گردیده است.

- در این سازه بیشترین اثر بخشی در سرعت های زیر ۲ متر بر ثانیه دیده میشود که هر چه سرعت افزایش پیدا کند نیرو درگ افزایش پیدا می کند. دلیل این امر را می توان اهمیت لزجت در میزان نیروی درگ دانست که در سرعت های پائین اثر لزجت محسوس است.
- هر چه عدد رینولدز کوچکتر باشد کاهش نیروی درگ به مراتب بیشتر خواهد بود.
- تزریق مواد میکرو نانو حباب سبب کاهش درگ شناور خواهد شد که قابل استنتاج است.
- مواد نانو حباب بعنوان یک ماده بدون خطر برای محیط زیست قابل استفاده برای کاهش درگ خواهد بود.
- کاهش درگ شناور سبب کاهش سوخت مصرفی و به تبع آن کاهش استفاده از سوخت فسیلی خواهد بود.
- مدل $k-\omega$ SST برای این نوع مدلسازی ها تطابق مطلوبی ایجاد می کند

۵-۲- پیشنهادات برای مطالعات در آینده

- بررسی آزمایش در شرایط تغییر دبی تزریق
- بررسی شناور با حرکت زیگزاگ
- بررسی شناور با حرکت ارتفاعی
- تاثیر زاویه تزریق بر کاهش درگ شناور
- بررسی همزمان تزریق از ابتدا و انتها شناور
- پیاده سازی روش مذکور در ابعاد کشتی های باری
- مدلسازی عددی شناور برای ابعاد مختلف

منابع و مراجع

• منابع داخلی

- جعفرزاده س، نوری ن م، (۱۳۸۲) پایان نامه ارشد: "تحلیل پدیده کاهش درگ به کمک تزریق میکرو حباب ها حول اجسام دو بعدی با استفاده از روش گردابه تصادفی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
- ساقری چی ها م، نوری ن م، (۱۳۸۴)، پایان نامه ارشد: "تحلیل اثر تزریق میکرو حباب بر ویژگی های جریان آرام و درهم و بررسی اثرات آن بر کاهش اجسام دو بعدی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
- جهانمیری م، بحرینی ع، (۱۳۹۰). "روش های نوین کاهش نیروی درگ اجسام غوطه ور در سیال"، مجله مهندسی مکانیک، شماره ۸۱، سال بیستم
- سخاوت س، فرهانیه ب، (۱۳۸۴) پایان نامه ارشد: "تحلیل دو بعدی تلفات اصطکاکی جریان همراه با میکرو حباب در کانال مستطیلی به روش گردابه های تصادفی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف ایران.
- شادمان م، نوری ن م، (۱۳۸۱)، پایان نامه ارشد: "تحلیل پدیده کاهش درگ به کمک تزریق میکرو حباب حول استوانه با استفاده از روش گردابه های تصادفی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت
- صادقی ک، غلامزاده ن، (۱۳۸۴) "کاهش ضریب درگ اجرام UV با استفاده از پوششهای پلیمری" نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۹، شماره ۶، ف از ص ۷۳۳ - ۷۴۴
- موسائی ا، (۱۳۹۲) "شبیه سازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته در یک کانال افقی توسط میکروفیبر ها در رینولدز بالا با یک مدل بستگی جبری" مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۳، ص ۱۱۷-۱۲۷
- مریمی ر، جوادپور م، فراهت س، شفیعی میام م ح، (۱۳۹۳) "کاهش درگ اصطکاکی به وسیله حبابی هوا در یک سیستم تیلور - کوئت عمودی و در جریان آشفته" ماهنامه علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴، شماره ۱، ص ۱۱۳-۱۲۲

- صادقی ک، (۱۳۸۵) " کاهش ضریب پسای اجرام متحرک در زیر آب با استفاده از روش تزریق محلولهای رقیق پلیمری"، دهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، دانشگاه یزد
- حسینی ص، سمیعی ل، (۱۳۸۷) " روش دینامیک تفرق نوری برای مطالعه لندازه نانوذرات"، ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۳۰، سال هفتم.
- نوری ن، یکانی ص، ولدی م، (۱۳۹۲) " کاهش درگ در جریان آشفته داخل کلنال با تزریق میکرو حباب"، نشریه مباحث برگزیده در انرژی، سال اول، شماره دوم ص ۲۵-۲۹
- مریمی ر، جوادپور م، فراهت س، شفیعی میام م ح، (۱۳۹۳) "کاهش درگ اصطکاکی به وسیله حباب های هوا در یک سیستم تیلور-کوئت عمودی و در جریان آشفته" مجله مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۱، دوره ۱۴، ص ۱۱۳-۱۲۲
- مظفری نائینی ر، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: " بررسی الگو های هیدرودینامیکی استاندارد جریان به کمک نانو میکرو حباب هوا"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
- مفیدی ع، نوری ن م، (۱۳۸۹) " کاهش درگ اصطکاکی در جریان توربولنس با استفاده از سطوح هیدروفوبیک"، دوازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، زیباکنار
- نوری ن م، سررشته داری ع، سخفاوت س، (۱۳۸۶)، " مروری بر تحقیقات و دستاورد ها در پدیده کاهش درگ به وسیله میکرو حباب"، نهمین همایش صنایع دریایی، نور استان مازندران
- حقی ر، ساغروانی ف، (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد: کاهش درگ به کمک نانو تکنولوژی"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود

• Intrenational Sources

- Bull s.j Rickerby D.s Matthews A,Leyland A , pace A.R,valli j .(1988). "The use of scratch adhesion testing for the determination of interfacial adhesion : the importance of frictional drag "، surface and coatings technology,36,1-2,pp503-517
- Currie ,I,G,(1974), " Fandamental mechanics of fluids ". Friction reduction onan axisymmetric body "، the phisics offluids,29.11.pp3590-3597.
- Ferrante A, Elghobashi s,(2005), " Reynolds numbr effect on dragreuctions in a

microbubble-laden spatially developing turbulent boundary layer “,journal of fluid mechanics.543.pp.93-106

- Fontanic A.A, deutsch s . (1992), “ the influence of the type of gas on the reduction of skin friction drag by microbubble injection “, Experiments in fluids 13,2pp,128-136
- Greenwood R , kendall K “ (1999) ‘Selection of suitable dispersants for aqueous suspensions of zirconia and titania powders using acoustophoresis “ , Journal of the European Ceramic Society ,19, 4 ,pp. 479-488
- Guin mm ., Kato H , Yamaguchi H , MaedaM, Miyanaga M.,(1996) , “reduction of skin friction by microbubbles and its relation with near –wall bubble concentration in a channel “ , Journal of marine science and technology 1.5.pp.241-254
- International standard ISO22412(2008)particle size Analysis-dynamic light scattering , international Organisation for standardization(ISO).
- Jacob B , Olivieria., Mizzi M., Campana E.F, piva R ., (2010) , “ Effect of microbubbles in a turbulent boundary layer “ physics of Fluids ,22.11pp.115104
- Takahashi T,Kakugawa A ,Nagaya , Sh, Yanagihara T , Kodama Y ,”Mechanisms and Scale Effects of Skin Friction by Microbubbles”ship Research Institute
- Kato H., Iwashina T, Miyanaga M. , Yamaguchi H, (1999), “Effect of microbubbles on the structure of turbulence in a turbulent boundary layer” , journal of Marine Science and Technology,4,4,pp.155-162.
- Kawamura T,Kodama Y, (2002), “Numerical simulation method to resolve interactions between bubbles and turbulence”, International Journal of Heat and Fluid flow “,23,5,pp.627-638
- SUGIYAMA K, CALZAVARINI E and LOHSE D, (2008) “Microbubbly drag reduction in Taylor-Couette flow in the wavy vortex Regime”,physic.flu-dyn
- Kirby B.J, (2010), “micro and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices”, Cambridge University press.
- Kumaegim I,Takahashi Y , (2015) , “Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships”, ocean Engineering ,95,pp,183-194
- Madavan N,K. Deutsch S, Merkle C,L.(1984),” Reduction of turbulent skin friction by microbubbles”, The Physics of Fluids,27,2,pp356-363
- McCormic M,E. Bhattacharyya R.. (1973) ,”Drag reduction of a submersible hull by electrolysis”, Naval Engineers Journal ,85,2,pp,11-16

- Munson B.R., Young D.F., Okiishi T.H., (2002) , Fundamentals of fluid mechanics. 4-th edition – John Willey & Sons
- Murai Y., Fukuda H., Oishi Y., Kodama Y., Yamamoto F. (2007). "Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow". International journal of multiphase flow , 33, 2, pp. 147-163
- Sayyadi H., Nematollahi M., (2013) " Determination of optimum injection flow rate to achieve maximum micro bubble drag reduction in ships , an experimental approach " , Scientia Iranica , 20, 3, pp. 535-541
- Sugiyama K. , Kawamura T., Takagi S., Matsomoto Y. , (2004) . " Reynolds number effect on the microbubble drag reduction , In Proceeding of the 5th symposium on smart control of turbulence the university of Tokyo , Tokyo , Japan , pp. 31-43
- Takahashi T , (1999) " Experimental skin friction flat bottom " 31st turbulence symposium , proc of the Japan society of fluid dynamics meeting , pp. 237-238
- Tsaji F., Chen C., (2011), " Boundary layer mixture model for a microbubble drag reduction technique " , ISRN Mechanical Engineering
- Warholic M.D., Massah H., Hanaratty T.J., (1999) . " Influence of drag-reducing polymers on turbulence : effects of Reynolds number , concentration and mixing " , Experiment in fluids, 27, 5, pp. 461-472
- Yanuar. Gunawan , Sunaryo Jamaluddin A., (2012), " Micro-bubble drag reduction on a light speed vessel model " , Journal of Marine Science & Application . 11. 3, pp. 301-304
- Yoshiada Y., Takahashi Y., Kato H. , Masuko A Watanabe O , (1997) , Simple Lagrangian formulation of bubbly flow in a turbulent boundary layer (bubbly boundary layer flow) , journal of Marine Science and Technology, 2, 1, pp. 1-11
- Wilcox, David C. Turbulence modeling for CFD. Vol. 2. La Canada, CA: DCW industries, 1998.
- Wood, M. G., et al. "Computational fluid dynamic modelling of wastewater ponds to improve design." Water Science and Technology 31.12 (1995): 111.
- Zhang, J., A. E. Tejada-Martínez, and Q. Zhang. "Hydraulic efficiency in RANS of the flow in multichambered contactors." Journal of Hydraulic Engineering 139.11 . 1150-1157 : (2013)
- Zhang, Jie, Andrés E. Tejada-Martínez, and Qiong Zhang. "Evaluation of large eddy simulation and RANS for determining hydraulic performance of disinfection

systems for water treatment." Journal of Fluids Engineering 136.12 (2014).

- Zhang, Jie, et al. "Evaluating hydraulic and disinfection efficiencies of a full-scale ozone contactor using a RANS-based modeling framework." Water research 52 (2014): 155-167.
- The open source CFD toolbox, O.o.; Available from: <http://www.openfoam.com>.

چوست

پیوست الف: مربوط به کد نویسی های مدل سازی عددی

```
#!/bin/sh
cd ${0%/*} || exit 1    # Run from this directory

# Source tutorial run functions
. $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions

# Set application name
application=$(getApplication)

rm -rf ./0
cp -r ./0.orig ./0
runApplication surfaceFeatures
runApplication blockMesh
runApplication decomposePar -copyZero
runParallel snappyHexMesh -overwrite
runApplication reconstructParMesh -constant
rm -rf ./processor*
rm -rf ./log.decomposePar
runApplication checkMesh
rm -rf ./0
cp -r ./0.orig ./0
runApplication renumberMesh -overwrite
runApplication decomposePar
runParallel $(getApplication)

#-----
-----
```

```

/*-----*-
C++ -*------*\
===== |
\\      /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox
\\      /  O peration   | Website:  https://openfoam.org
\\      /  A nd         | Version:   6
\\//     M anipulation  |
\*-----*-
-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       surfaceFeaturesDict;
}
// * * * * *
* * * * * //

surfaces ("original.stl" "pipe.stl" "spray.stl");

// Identify a feature when angle between faces < includedAngle
includedAngle    150;

subsetFeatures
{
    // Keep nonManifold edges (edges with >2 connected faces)
    nonManifoldEdges    yes;

    // Keep open edges (edges with 1 connected face)
    openEdges           yes;
}

//

```

```

-----7
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      blockMeshDict;
}

// *****
*****//

convertToMeters 1;

vertices
(
    (-3   -1   -1)
    (4     -1   -1)
    (4     0    -1)
    (-3    0    -1)
    (-3   -1    1)
    (4     -1    1)
    (4     0     1)
    (-3    0     1)
);

blocks
(
    {
        hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (70 10 20) simpleGrading (1 1 1)
    }
);

edges
(
);

boundary
(
    wall2
    {
        type patch;
        faces
        (
            (0 1 2 3)
        );
    }
);

```

```

}
wall1
{
    type patch;
    faces
    (
        (4 5 6 7)
    );
}
inlet
{
    type patch;
    faces
    (
        (1 2 6 5)
    );
}
outlet
{
    type patch;
    faces
    (
        (0 3 7 4)
    );
}
bed
{
    type patch;
    faces
    (
        (0 1 5 4)
    );
}
atm
{
    type patch;
    faces
    (
        (3 2 6 7)
    );
}
}
//

```

```

        format      ascii;
        class       dictionary;
        location     "system";
        object       decomposeParDict;
    }
    // * * * * *
    * * * * * //

    numberOfSubdomains 12;

    method            simple;

    simpleCoeffs
    {
        n              (3 2 2);
        delta          0.001;
    }

    hierarchicalCoeffs
    {
        n              (3 2 2);
        delta          0.001;
        order          xyz;
    }

    manualCoeffs
    {
        dataFile       "";
    }

    distributed       no;

    roots             ( );

```

```

FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    object      snappyHexMeshDict;
}
// *****
***** //

// Which of the steps to run
castellatedMesh true;
snap           true;
addLayers      true;

// Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of
class
// searchableSurface.
// Surfaces are used
// - to specify refinement for any mesh cell intersecting it
// - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near
// - to 'snap' the mesh boundary to the surface
geometry
{
    ship
    {
        type triSurfaceMesh;
        file "original.stl";
    }
    pipe
    {
        type triSurfaceMesh;
        file "pipe.stl";
    }
}

```

```

}
spray
{
    type triSurfaceMesh;
    file "spray.stl";
}
refinementBox
{
    type searchableBox;
    min (-1.5 -0.2 -0.3);
    max (1.5 0.2 0.3);
}
);

// Settings for the castellatedMesh generation.
castellatedMeshControls
{
    // Refinement parameters
    // *****

    // If local number of cells is >= maxLocalCells on any
processor
    // switches from from refinement followed by balancing
    // (current method) to (weighted) balancing before
refinement.
    maxLocalCells 100000;

    // Overall cell limit (approximately). Refinement will stop
immediately
    // upon reaching this number so a refinement level might not
complete.
    // Note that this is the number of cells before removing the

```

```

// is not 'visible' from the keepPoint. The final number of
cells might
// actually be a lot less.
maxGlobalCells 2000000;

// The surface refinement loop might spend lots of iterations
refining just a
// few cells. This setting will cause refinement to stop if
<= minimumRefine
// are selected for refinement. Note: it will at least do one
iteration
// (unless the number of cells to refine is 0)
minRefinementCells 10;

// Allow a certain level of imbalance during refining
// (since balancing is quite expensive)
// Expressed as fraction of perfect balance (= overall number
of cells /
// nProcs). 0=balance always.
maxLoadUnbalance 0.10;

// Number of buffer layers between different levels.
// 1 means normal 2:1 refinement restriction, larger means
slower
// refinement.
nCellsBetweenLevels 3;

// Explicit feature edge refinement
// =====

// Specifies a level for any cell intersected by its edges.
// This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface

```

```

// Specifies a level for any cell intersected by its edges.
// This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface
for now.
features
(
(
file "original.eMesh";
level 5;
)
(
file "pipe.eMesh";
level 5;
)
(
file "spray.eMesh";
level 5;
)
);

// Surface based refinement
// =====

// Specifies two levels for every surface. The first is the
minimum level,
// every cell intersecting a surface gets refined up to the
minimum level.
// The second level is the maximum level. Cells that 'see'
multiple
// intersections where the intersections make an
// angle > resolveFeatureAngle get refined up to the maximum
level.

```

```

refinementSurfaces
(
    ship
    (
        // Surface-wise min and max refinement level
        level {0 6};

        // Optional specification of patch type (default is
wall). No
        // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are
allowed.
        patchInfo
        (
            type wall;
            inGroup (wall);
        )
    )
    pipe
    (
        // Surface-wise min and max refinement level
        level {0 6};

        // Optional specification of patch type (default is
wall). No
        // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are
allowed.
        patchInfo
        (
            type wall;
            inGroup (wall);
        )
    )
    spray
    (

```

```

        spray
        (
            // Surface-wise min and max refinement level
            level {0 6};

            // Optional specification of patch type (default is
wall). No
            // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are
allowed.
            patchInfo
            {
                type patch;
                //inGroup (patch);
            }
        )

        // Resolve sharp angles
        resolveFeatureAngle 150;

        // Region-wise refinement
        // =====

        // Specifies refinement level for cells in relation to a
surface. One of
        // three modes
        // - distance. 'levels' specifies per distance to the surface
the
        // wanted refinement level. The distances need to be
specified in
        // descending order.
        // - inside. 'levels' is only one entry and only the level is
used. All

```

```

used. All
    // cells inside the surface get refined up to the level.
The surface
    // needs to be closed for this to be possible.
    // - outside. Same but cells outside.

refinementRegions
{
    refinementBox
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 3));
    }
}

// Mesh selection
// =====

// After refinement patches get added for all
refinementSurfaces and
// all cells intersecting the surfaces get put into these
patches. The
// section reachable from the locationInMesh is kept.
// NOTE: This point should never be on a face, always inside
a cell, even
// after refinement.
locationInMesh (0 -0.5 0);

// Whether any faceZones (as specified in the
refinementSurfaces)
// are only on the boundary of corresponding cellZones or
also allow
// free-standing zone faces. Not used if there are no

// Settings for the snapping.
snapControls
{
    //- Number of patch smoothing iterations before finding
correspondence
    // to surface
    nSmoothPatch 3;

    //- Relative distance for points to be attracted by surface
feature point
    // or edge. True distance is this factor times local
    // maximum edge length.
    tolerance 2.0;

    //- Number of mesh displacement relaxation iterations.
    nSolveIter 30;

    //- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should
stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 5;

    // Feature snapping

    //- Number of feature edge snapping iterations.
    // Leave out altogether to disable.
    nFeatureSnapIter 10;

    //- Detect (geometric only) features by sampling the
surface
    // (default=false).
    implicitFeatureSnap false;

    //- Use castellatedMeshControls::features (default =

```

```

        implicitFeatureSnap false;

        //- Use castellatedMeshControls::features (default =
true)
        explicitFeatureSnap true;

        //- Detect points on multiple surfaces (only for
explicitFeatureSnap)
        multiRegionFeatureSnap false;
    }

// Settings for the layer addition.
addLayersControls
(
    // Are the thickness parameters below relative to the
undistorted
    // size of the refined cell outside layer (true) or absolute
sizes (false).
    relativeSizes true;

    // Per final patch (so not geometry!) the layer information
layers
    {
        ship
        {
            nSurfLayers 3;//6;
        }
    }

    // Expansion factor for layer mesh
    expansionRatio 2;

    // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple
        // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple
layers
        // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
        // Relative to undistorted size of cell outside layer.
        // See relativeSizes parameter.
        finalLayerThickness 0.5s;

        // Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
        // cannot be above minThickness do not add layer.
        // Relative to undistorted size of cell outside layer.
        minThickness 0.01;

        // If points get not extruded do nGrow layers of connected
faces that are
        // also not grown. This helps convergence of the layer
addition process
        // close to features.
        // Note: changed(corrected) w.r.t 17x! (didn't do anything in
17x)
        nGrow 0;

        // Advanced settings

        // When not to extrude surface. 0 is flat surface, 90 is when
two faces
        // are perpendicular
        featureAngle 110;

        // At non-patched sides allow mesh to slip if extrusion
direction makes
        // angle larger than slipFeatureAngle.
        slipFeatureAngle 150;

        // Maximum number of snapping relaxation iterations. Should
stop

```

```

stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 25;

    // Number of smoothing iterations of surface normals
    nSmoothSurfaceNormals 10;

    // Number of smoothing iterations of interior mesh movement
    direction
        nSmoothNormals 15;

        // Smooth layer thickness over surface patches
        nSmoothThickness 10;

        // Stop layer growth on highly warped cells
        maxFaceThicknessRatio 0.5;

        // Reduce layer growth where ratio thickness to medial
        // distance is large
        maxThicknessToMedialRatio 0.3;

        // Angle used to pick up medial axis points
        // Note: changed(corrected) w.r.t 17x! 90 degrees corresponds
        // to 130 in 17x.
        minMedianAxisAngle 90;

        // Create buffer region for new layer terminations
        nBufferCellsNoExtrude 0;

        // Overall max number of layer addition iterations. The
        // mesher will exit
        // if it reaches this number of iterations; possibly with an
        // illegal

        // if it reaches this number of iterations; possibly with an
        // illegal
        // mesh.
        nLayerIter 50;//10;//50;
    }

    // Generic mesh quality settings. At any undoable phase these
    // determine
    // where to undo.
    meshQualityControls
    {
        #include "meshQualityDict"
    }

    // Advanced

    // Write flags
    writeFlags
    {
        scalarLevels
        layerSets
        layerFields // write volScalarField for layer coverage
    };

    // Merge tolerance. Is fraction of overall bounding box of
    // initial mesh.
    // Note: the write tolerance needs to be higher than this.
    mergeTolerance 1e-6;

    //

```

Abstract

Drag force has always been one of the most important factors in the design and construction of marine vessels. Reducing drag force saves energy, and consequently, reduces pollution. In recent decades, various methods, including the use of hydrophobic paints, solutions Polymer, air cavities, air film, and adaptive coatings are used to reduce drag, all of which have advantages as well as disadvantages. Nowadays, one of the new methods in reducing drag is the injection of micro bubbles.

In this study, some physical and numerical tests were carried out in order to study thw reducing of the drag force on a sample vessel with the help of micro-nano- bubble injection and the mechanism governing this phenomenon, The relationbetween water containing air micro-nano bubbles (AMNBs) and water in reducing drag on the floating body of the boat were investigated. According to the results, water containing AMNBs reduces the drag force, the amount of which has been about ٢%to ٦٢%at different speeds. In addition, numerical modeling calculates the coefficient of floating drag at flow rates of ٠.٥m / s and ١m / s. And its adaptation to the laboratory model has been done, which with a percentage of error of about ٧and ١٥%of the desired modeling, respectively.

Keywords: drag force, micro nano bubble, drag coefficient, Reynolds number, velocity, openFoam



Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering
M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Investigation on the Effects of Nano Bubble Injection on the Drag Force over the Vessels

By: Reza Rajabpour

Supervisor:
Dr. Dr Seyed Fazlolah Saghravani

July, 2021