

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

کاهش درگ به کمک نانو تکنولوژی

نگارنده: وحید حقی

استاد راهنما:

دکتر سید فضل الله ساغروانی

دی ۱۳۹۶

شماره: ۴۲۲۵
تاریخ: ۲۲/۱۱/۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

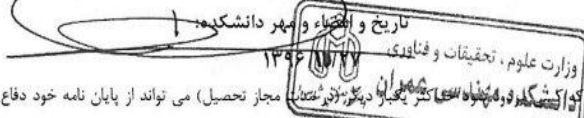
فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای وحید حقی با شماره دانشجویی ۹۴۰۶۲۱۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی تحت عنوان کاهش درک به کمک نانو تکنولوژی که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ با حضور هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:): مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید فضل الله ساغروانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم		استادیار	
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر عماد محجوبی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهدی عجمی	کلیه استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی سررشته داری	دانشیار استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی



تبصره: در صورتی که دانشجو در جلسه دفاع از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از یک ماه پس از آن صورت گیرد).

تقدیم به :

پدر و مادر

عزیز و بزرگوام که علیرغم تحمل سختی ها و دشواریهای فراوان مسیر پرپیچ و خم
کسب دانش و معرفت را برایم هموار نموده و از دعای خیرشان بی نصیب نبوده ام.

سپاسگزاری

به مصداق « من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق » بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی که با کرامتی چون خورشید ، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند ؛ تقدیر و تشکر نمایم.

از جناب آقای مهندس محمد علی مزینانیا ، مسئول آزمایشگاه هیدرویک دانشگاه صنعتی شاهرود ، که منت بر سر اینجانب نهاده و در انجام آزمایشات و ایجاد مکان مناسب آزمایشگاهی، قبول زحمت فرمودند و بنده را در انجام این تحقیق همواره یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب وحید حقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب و سازه هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کاهش درگ به کمک نانوتکنولوژی تحت راهنمائی دکتر سید فضل الله 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 بازدارنده حرکت، همواره یکی از موانع مهم طراحی و بهره برداری در وسایل نقلیه دریایی بوده است. روش‌های گوناگونی از جمله استفاده از محلول‌های پلیمری، رنگ‌های آبگریز و پوشش‌های تطبیقی برای کاهش نیروی درگ وجود دارد که همگی علاوه بر مزایا، معایبی نیز دارند. یکی از روش‌های نوین در کاهش نیروی درگ، تزریق میکرونانوحباب می‌باشد.

در این پژوهش با مقایسه بین آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب‌های هوا به بررسی اثر میکرونانوحباب بر پدیده کاهش درگ با آزمایش‌های انجام شده پرداخته شد. آزمایش‌های تزریق بر روی اجسام مختلف مانند استوانه، گوه و مکعب مستطیل و با چندین تکرار صورت گرفت تا بتوان به صورت قطع به نتایج استناد کرد. آزمایش‌ها در دبی‌های ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق‌های ۸، ۱۴، ۱۸، ۲۲ سانتی متر انجام شد.

طبق نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، آب حاوی میکرونانوحباب‌های هوا، تاثیر بسزایی روی خواص فیزیکی و هیدرودینامیکی سیال و نیروی درگ وارد بر جسم دارد. به طوری که باعث کاهش نیرو و ضریب درگ برای هر جسم با توجه به دبی و مقطع‌های مختلف می‌باشد. در جسم مکعب مستطیل میزان در صد کاهش درگ ۷/۶۸٪ الی ۱۶/۱۱٪ و در جسم استوانه حدود ۳/۵۹٪ الی ۲۴/۷۷٪ و در جسم گوه شکل ۱۴/۰۴٪ الی ۳۰/۹۷٪ بوده است.

واژه‌های کلیدی : نیروی درگ، میکرونانوحباب، استوانه، مکعب مستطیل، گوه، ضریب درگ

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- حقی و ، ساغروانی س ف،(۱۳۹۶)، " بررسی پدیده ی کاهش نیروی درگ با تزریق میکرونانونو حباب " ، هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، انجمن فیزیک ایران.

۲- حقی و ، ساغروانی س ف،(۱۳۹۶)، " بررسی پدیده ی کاهش نیروی درگ بر جسم مکعب مستطیل با تزریق میکرونانونو حباب "، شانزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، انجمن هیدرولیک ایران.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق	۳
۱-۳- اهداف پژوهش	۴
۱-۳-۱- هدف کلی	۴
۱-۳-۲- هدف جزئی	۴
۱-۴- زمینه نوآوری	۴
۱-۵- معرفی ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم	۷
۲-۱-۱- کارهای تجربی	۱۲
۲-۱-۲- کارهای عددی	۱۷
۲-۲- میکرو نانو حبابهای هوا	۱۹
۲-۲-۱- کلیاتی در مورد میکرو نانو حبابها	۱۹
۲-۲-۲- دستگاه تولید میکرونانوحباب	۲۰
۲-۲-۳- اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی	۲۱
۲-۲-۴- تئوری پتانسیل سطحی نانو - میکرو حبابها	۲۱
فصل سوم	۲۷
۳-۱- آزمایشات انجام شده بر آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحبابهای هوا	۲۸
۳-۱-۱- مشخصات اولیه	۲۸
۳-۱-۲- اندازه گیری ابعاد میکرونانوحباب	۳۲
۳-۱-۳- بررسی پایداری میکرونانو حبابها	۳۴

۳۴	۲-۲- مواد و تجهیزات استفاده شده در آزمایش نیروی درگ
۳۵	۳-۲-۱- محل انجام آزمایش
۳۵	۳-۲-۲- اجسام مورد آزمایش
۳۶	۳-۳- شرح انجام آزمایشات
۳۷	۳-۳-۱- آزمایش کاهش نیروی درگ برای جسم مکعب مستطیل
۴۱	۳-۳-۲- آزمایشات کاهش درگ برای جسم استوانه‌ای
۴۲	۳-۳-۳- آزمایش کاهش درگ برای جسم گوه شکل
۴۴	۳-۴- آنالیز ابعادی
۴۷	فصل چهارم
۴۸	۴-۱- نتایج آزمایش های صورت گرفته روی آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب
۴۸	۴-۱-۲- ابعاد میکرونانوحباب های هوا
۵۱	۴-۲- آزمایشات کاهش نیروی درگ
۵۱	۴-۲-۱- آزمایشات جسم مکعب مستطیل و تزریق بر طول آن
۶۰	۴-۲-۲- آزمایشات جسم مکعب مستطیل و تزریق بر عرض آن
۶۹	۴-۲-۳- آزمایشات جسم استوانه
۷۵	۴-۲-۴- آزمایشات جسم گوه شکل
۸۵	فصل پنجم
۸۶	۵-۱- نتیجه گیری
۸۶	۵-۲- پیشنهادات برای انجام مطالعات بعدی
۸۷	منابع و مراجع
۹۲	پیوست

فهرست جداول

- جدول ۲-۱- رفتار پایداری ذرات در بازه های پتانسیل زتای آنها-برگرفته از مظفری نائینی..... ۲۳
- جدول ۴-۱- مشخصات اولیه آب میکرونانونو حباب..... ۴۸
- جدول ۴-۲- مشخصات نمونه میکرو نانو حباب..... ۴۹
- جدول ۴-۳- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱..... ۵۲
- جدول ۴-۴- مقادیر ضریب درگ و رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱..... ۵۳
- جدول ۴-۵- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶..... ۵۴
- جدول ۴-۶- مقادیر ضریب درگ و رینولدز در دو حالت تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶..... ۵۵
- جدول ۴-۷- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲..... ۵۶
- جدول ۴-۸- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲..... ۵۷
- جدول ۴-۹- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷..... ۵۸

جدول ۴-۱۰- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل

در دبی $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ ۵۹

جدول ۴-۱۱- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در عرض مکعب مستطیل در

دبی $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۱

جدول ۴-۱۲- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر عرض مکعب مستطیل در

دبی $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۲

جدول ۴-۱۳- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در عرض مکعب مستطیل در

دبی $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۳

جدول ۴-۱۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۴

جدول ۴-۱۵- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در عرض جسم مکعب مستطیل در دبی

$0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۵

جدول ۴-۱۶- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۶

جدول ۴-۱۷- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در عرض جسم مکعب مستطیل در دبی

$0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۷

جدول ۴-۱۸- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۸

جدول ۴-۱۹- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ ۶۹

جدول ۴-۲۰- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ ۷۰

جدول ۴-۲۱- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ ۷۱

- جدول ۴-۲۲- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶ ۷۱
- جدول ۴-۲۳- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۷۲
- جدول ۴-۲۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۷۳
- جدول ۴-۲۵- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۷۴
- جدول ۴-۲۶- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۷۴
- جدول ۴-۲۷- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱ ۷۶
- جدول ۴-۲۸- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱ ۷۷
- جدول ۴-۲۹- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۷۸
- جدول ۴-۳۰- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶ ۷۹
- جدول ۴-۳۱- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۸۰
- جدول ۴-۳۲- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۸۱
- جدول ۴-۳۳- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۸۲
- جدول ۴-۳۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۸۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- رفتار متفاوت ماکرو حباب، میکرو حباب و نانوحباب ۲۰
- شکل ۲-۲ - شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت ۲۲
- شکل ۱-۳- دستگاه PH متر ۲۸
- شکل ۲-۳- دستگاه کندانکتومتر ۲۹
- شکل ۳-۳- دستگاه کدورت سنج ۳۰
- شکل ۴-۳- انواع سلها برای سیالات مختلف ۳۱
- شکل ۵-۳- دستگاه رئومتر ۳۱
- شکل ۶-۳- شکل شماتیک تزریق از تزریق لوله به جسم مورد نظر ۳۵
- شکل ۷-۳- سیستم نگهدارنده اجسام در وسط فلوم ۳۶
- شکل ۸-۳- سیستم بکار رفته برای تزریق آب معمولی و میناب ۳۷
- شکل ۹-۳- تزریق میناب بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی ۸۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۸ سانتیمتر ۳۹
- شکل ۱۰-۳- دستگاه میکرومولینه ۴۰
- شکل ۱۱-۳- تزریق بر جسم استوانه ای در دبی ۶۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۱۸ سانتی متر ۴۱
- شکل ۱۲-۳- جسم گوه شکل مورد آزمایش ۴۲
- شکل ۱۳-۳- تزریق بر جسم گوه در دبی ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۸ سانتی متر ۴۳
- شکل ۱-۴- منحنی توزیع ابعادی میکرو نانو حباب تولید شده در آب ۴۹
- شکل ۲-۴- نمودار تغییرات زتا پتانسیل ۵۰
- شکل ۳-۴ تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی $0.011 \frac{m^3}{s}$ ۵۳
- شکل ۴-۴ تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی $0.016 \frac{m^3}{s}$ ۵۵

- شکل ۴-۵- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۵۷
- شکل ۴-۶- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۵۹
- شکل ۴-۷- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱ ۶۲
- شکل ۴-۸- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶ ۶۴
- شکل ۴-۹- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۶۶
- شکل ۴-۱۰- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۶۸
- شکل ۴-۱۱- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱ ۷۰
- شکل ۴-۱۲- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶ ۷۲
- شکل ۴-۱۳- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۷۳
- شکل ۴-۱۴- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۷۵
- شکل ۴-۱۵- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱ ۷۷
- شکل ۴-۱۶- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶ ۷۹
- شکل ۴-۱۷- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲ ۸۱
- شکل ۴-۱۸- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷ ۸۳

فصل اول

كليات تحقيق

هرچند آزمایش‌ها و تحقیقات پیرامون نانو تکنولوژی از ابتدای دهه ۸۰ قرن بیستم به طور جدی پیگیری شد، اما اثرات تحول آفرین و باورنکردنی نانو فناوری در روند تحقیق و توسعه باعث گردید که توجه زیادی در سراسر جهان به این موضوع جلب گردد و فناوری نانو به عنوان یکی از مهم ترین اولویت های تحقیقاتی طی دهه اول قرن بیست و یکم محسوب شود. در حال حاضر برنامه‌ها و حمایت‌های بسیاری جهت رشد و پیشرفت این فناوری نو ظهور در حال انجام است، زیرا بسیاری از صاحب نظران و محققان، نانو فناوری را فن آوری آینده دانسته‌اند. به عبارت دیگر می‌توان گفت، اولویت کشور، هر صنعت و فناوری که باشد بدون تسلط بر ابعاد نانو، در دنیای جدید نمی‌توان در آن صنعت و فناوری حرفی در دنیا زد. امروزه حوزه های تحقیقاتی مرتبط با نانو بسیار گسترش پیدا کرده است. یکی از حوزه‌های جدید در دنیای جدید موضوع کاهش انرژی مصرفی بخصوص انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی است. یکی از صنایع مصرف کننده انرژی، صنعت حمل و نقل دریایی است. کاهش مصرف سوخت در این صنعت می‌تواند در کاهش هزینه و آلودگی دریایی بسیار موثر باشد. از راه‌های موثر کاهش سوخت کشتی‌ها و شناورها، کاهش اثر نیروی درگ بر آنهاست.

هدف از این پژوهش استفاده از میکرو- نانو حباب هوا (میناب) در آب برای بررسی کاهش نیروی درگ^۱ حول اشکال ساده هندسی از قبیل استوانه، مکعب مستطیل و گوه است.

میکرو- نانو حباب‌ها حفره‌هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند که به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند. یکی از این روش‌ها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است که در این تحقیق از آن استفاده شد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی روی می‌دهد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه در یک مایع به طور لحظه‌ای به زیر فشار بخار کاهش یابد.

بررسی فرآیند کاهش نیروی درگ به کمک میکرونانونحباب و مرور فعالیت های انجام شده در این زمینه بیانگر این است که اغلب اطلاعات و نتایج بدست آمده اکثرا بر پایه کارهای آزمایشگاهی بوده و

^۱ Drag Force

از لحاظ تئوری نیز فعالیت‌های زیادی از دهه گذشته مانند کارهای Dazhuan و Tryggvason و ...وجود دارد که نسبت به کارهای آزمایشگاهی کمتر است.

در مورد استفاده از میکرو-نانو حباب‌ها در کاهش نیروی درگ نیز تا به امروز مطالعات زیادی صورت گرفته است که عمدتاً معطوف به ایجاد حباب در روی سطح از طریق سطوح متخلخل یا الکترولیز بوده است. استفاده از تزریق حباب هوا و ایجاد حفره هوا در زیر بدنه اجسام شناور، فیلم هوا و همچنین شبیه سازی گردابه‌های بزرگ در جریان آشفته برای بررسی کاهش نیروی درگ در یک سامانه تیلور-کوئیت به کار رفته است و به تحلیل عوامل موثر پرداخته شده است. در این پایان نامه برای اولین بار با استفاده از محلول حاوی میکرو-نانو حباب هوا که در آب تثبیت شده‌اند و با تزریق به اطراف جسم آن را پوشش می‌دهند، پرداخته شده است. تفاوت عمده این پژوهش با پژوهش‌های قبلی آن است که در این تحقیق بجای گاز، مایع تزریق شده است. البته به دلیل کاهش شدید انرژی مصرفی مورد نیاز از یک سو و یکنواختی سامانه تزریق از خطاهای ناشی از ناپایداری وضعیت تزریق هوا در عمق آب نیز اجتناب شده است. امید است که به کمک میکرو-نانو حباب هوا بتوان راه حل ساده‌تر، در دسترس‌تر و در عین حال ارزان‌تری را جهت بهبود کاهش نیروی درگ ارائه کرد.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

با گسترش توسعه در صنایع دریایی و افزایش چشمگیر ساخت زیر دریایی‌ها و کشتی‌های عظیم و پرهزینه، نیاز به کاهش مصرف انرژی و سوخت و کاهش آلودگی و استفاده از زیردریایی با بیشترین بازدهی و در عین حال کمترین هزینه بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از روش‌های مدرن در کاهش مصرف انرژی و نیروی درگ استفاده از فن آوری نانو است که در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال کشورهای در حال توسعه برای استفاده از این فن آوری با مشکلاتی اعم از، عدم وجود تکنولوژی تولید مواد در سایز نانو و بالا بودن هزینه‌ی تهیه

این مواد روبرو هستند. لذا این پژوهش بر آن است که بتواند روشی ارزان قیمت و در عین حال ساده و در دسترس جهت افزایش بازدهی وسایل محرکه در صنایع دریایی ارایه کند.

۱-۳-اهداف پژوهش

۱-۳-۱-هدف کلی

هدف کلی بررسی اثر کاهنده میناب بر نیروی درگ حاصل از جریان حول اجسام با شکل هندسی ساده است.

۱-۳-۲-هدف جزئی

اهداف جزئی این پژوهش عبارتند از:

- بررسی اثرات کاهنده میناب بر روی نیروی درگ وارد بر جسم مکعب مستطیل شکل
- بررسی اثرات کاهنده میناب بر روی نیروی درگ وارد بر جسم استوانه‌ای شکل
- بررسی اثرات کاهنده میناب بر روی نیروی درگ وارد بر جسم گوه شکل

۱-۴-زمینه نوآوری

میناب یا میکرونانونوحباب یک نانو سیال نسبتاً جدید است که در بخش‌های مختلف صنعتی و آزمایشگاهی بکار رفته است. از سویی عمده تلاش‌های محققان، برای کاهش درگ به تولید حباب‌های گازی در روی بدنه کشتی معطوف بوده است که معمولاً این کار با کمک سامانه‌های پمپ هوا و حفره‌های روی بدنه کشتی صورت گرفته است. به دلایل متعدد، من جمله اختلاف شدید چگالی آب و هوا نمی‌توان انتظار داشت که چنین سامانه‌هایی بتوانند یک نوع پوشش همگن از حباب در اطراف کشتی ایجاد کنند. از آنجایی که چگالی آب و میناب به هم نزدیک است، انتظار می‌رود که میناب توانایی خوبی برای کاهش نیروی درگ از خود نشان بدهد. در این تحقیق برای اولین بار از محلول حاوی میکرو نانونوحباب برای پوشش سطح تماسی جسم جامد در مقابل جریان آب استفاده شده است.

۱-۵- معرفی ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش رو مشتمل بر ۵ فصل می‌باشد. فصل اول آن مقدمه، شامل معرفی اجمالی موضوع است. فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق است و در فصل سوم شرح آزمایشات و تجهیزات و وسایل استفاده شده در آنها بیان گردید. در فصل چهار نتایج بدست آمده از آزمایشات و تحلیل آنها ذکر شده است. و در نهایت فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای دیگر پژوهش‌ها ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات

گذشته

۱-۲- پیشینه تحقیق :

در ابتدای این فصل، مروری بر تحقیقات گذشته در خصوص روش‌های کاهش نیروی درگ ارائه شده است. سپس بصورت مفصل درباره‌ی میکرونانونو حباب و شاخص‌های آن بحث خواهد شد.

نیروی درگ یا پسا یا پس‌آر، نامی است که در فیزیک و دینامیک سیالات به نیروهایی که در جهت بازداشتن اجسام از حرکت در درون سیالات به وجود می‌آیند، اطلاق می‌شود. [Currie, 1974]

زمانی که جسمی درون سیال حرکت می‌کند برهم کنشی بین جسم و سیال رخ می‌دهد. تنش برشی به علت اثرات گرانشی و تنش‌های عمودی به علت فشار بر جسم وارد می‌شوند. به برآیند این نیروها در جهت سرعت جریان بالاسری نیروی پسا و عمود بر جهت سرعت جریان بالاسری نیروی برآ^۱ گفته می‌شود. در حالت کلی نیروی پسا را می‌توان به فرم زیر نوشت

$$F_D = \int dF_x = \int P \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (1-2)$$

که θ زاویه بین جهت سرعت سیال و نیروی عمودی بر سطح است. [Munson, 2002]

در حالت کلی محاسبه توزیع تنش و فشار بر جسم دشوار است لذا برای محاسبه نیروی درگ از روش‌های تجربی استفاده می‌شود. آزمایش‌هایی که در تونل باد، تونل آب و یا دیگر روش‌های ابداعی بر روی مدل کوچک انجام می‌شود می‌تواند توسط تحلیل ابعادی به مدل‌های بزرگتر و موجود در طبیعت مرتبط گردد. یکی از اعداد بدون بعد که در محاسبه نیروی درگ استفاده می‌شود ضریب درگ است که خود تابعی از دیگر اعداد بدون بعد رینولدز، ماخ، فرود و زبری نسبی سطح است.

نیروی درگ اصطکاکی بخشی از نیروی درگ است که به تنش برشی بر سطح جسم ارتباط دارد. این نیرو نه تنها تابع بزرگی تنش برشی است، بلکه به جهت‌گیری سطحی که بر آن عمل می‌کند نیز بستگی دارد. اگر جسم سطحی به موازات جهت سرعت جریان باشد تمام تنش برشی در نیروی درگ نقش دارد ولی اگر سطح عمود بر جهت سرعت جریان باشد تنش برشی هیچ نقشی در نیروی درگ

^۱Lift Force

ندارد. در حالت کلی برای اجسام با اشکال متفاوت تنش برشی موثر بر نیروی درگ چیزی بین این دو حالت حدی است. از آنجایی که گرانروی اکثر سیالاتی که استفاده می‌شود کم است لذا نیروی درگ اصطکاکی نقش کمی در نیروی درگ کلی دارد. اگر بر اساس اعداد بدون بعد این موضوع بیان شود یعنی در رینولدزهای بالا نقش تنش برشی در نیروی درگ کم خواهد بود. برای اجسام خط جریانی یا در رینولدزهای پایین بیشتر نیروی درگ ناشی از تنش برشی است.

درگ فشاری بخشی از نیروی درگ است که ناشی از فشار بر روی سطح جسم است. به علت تاثیرپذیری زیاد از شکل جسم به درگ شکلی نیز معروف است. درگ فشاری به بزرگی و همچنین جهت گیری سطحی که بر آن اعمال می‌شود بستگی دارد. برای مثال در سطحی موازی جهت حرکت سیال نیروی فشاری عمود بر جهت سرعت سیال وارد می‌شود و لذا در نیروی درگ هیچ تاثیری ندارد در حالی که برای سطحی عمود بر جهت جریان همه نیروی درگ ناشی از درگ فشاری خواهد بود. همانند درگ اصطکاکی برای اجسام با اشکال مختلف نسبت نیروی درگ فشاری بین این دو حالت حدی خواهد بود. [Munson , 2002]

از روش‌ها و تکنیک‌های کاهش نیروی درگ میتوان به پوشاندن سطح به وسیله پلیمرهای حل شونده، استفاده از پوشش‌های حل‌شونده شامل پوشش‌های آنیونی، کاتیونی و غیر یونی، میکرو حباب، و روش‌های هیبرید (پیوند چند روش). روش‌های دیگری نیز نظیر ریبلت کردن^۱، نوسانی کردن و تغییر ویژگی سطوح به منظور تاثیرگذاری در لایه مرزی سرعت و در نتیجه کاهش درگ نیز نمونه‌های دیگری هستند، که از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. [جهانمیری و بحرینی، ۱۳۹۰]

همچنین جدیداً برای این کار، تزریق پلیمرهای قابل انعطاف مانند پلی اتیلن اکساید (که پلیمری قابل انحلال در آب با جرم مولکولی بسیار بالاست) از طریق شکافی مدور و باریک در نزدیکی دماغه جسم و در جهتی عمود بر جهت حرکت جسم به داخل لایه مرزی، تزریق انجام می‌گیرد. تعیین هندسه تزریق از پارامترهای مهم است که در واقع شکل هندسی مجرای است که محلول پلیمری از طریق آن به

^۱Riblet

خارج از اجسام تخلیه می‌گردد که در این رابطه معمولاً با دو انتخاب مواجه می‌شوند. الف) استفاده از سوراخ ، ب) استفاده از شکاف. اگرچه در نگاه اول به نظر می‌رسد که سوراخکاری در بدنه اجسام زیرآبی ساده‌تر از ایجاد شکاف در آن باشد با این وصف باید اذعان نمود که بهترین محل برای ایجاد سوراخ فی‌الواقع همان دماغه جسم است و این در حالی است که متأسفانه در مورد بعضی اجرام بعلت وجود تجهیزات و سنسورهای متعدد در دماغه، امکان تعبیه چنین سوراخی وجود ندارد. لذا معمولاً تزریق محلول پلیمری از طریق شکاف تعبیه شده در دماغه جسم صورت می‌گیرد. انتخابهای موجود عبارتند از: الف) استفاده از پمپ، ب) استفاده از فشار گاز نیتروژن، ج) استفاده از وزن ستونی از محلول پلیمری و د) استفاده از وزن یک پیستون. معمولاً در عمل برای کاهش هزینه‌ها و نیز سهولت نصب و راه‌اندازی از ترکیبی از وزن ستونی از محلول پلیمری به همراه وزن یک وزنه سنگین برای اعمال فشار لازم و دستیابی به دبی‌های مختلف استفاده می‌شود. [صادقی، ۱۳۸۵]

در سالهای اخیر تلاش‌های چشمگیری بر روی تولید سطوحی که موجب کاهش میزان درگ اصطکاکی، حاصل از سیال عبوری از روی سطح می‌شوند، مانند کارهای kim, Nguyen, Moin, Balasubramanian و .. انجام گرفته است. یکی از ویژگی‌های سطح که توجهات بسیاری را اخیراً به خود جلب کرده است طبیعت آب‌گریزی (هیدروفوبیک) و آب دوستی (هیدروفیلیک) سطوح تولید شده توسط فرایندهای میکرو- نانو تکنولوژی می‌باشد. سطوح هیدروفوبیک سطوحی هستند که به واسطه « لغزش »^۱ همراه با به دام انداختن یک لایه از هوا در فصل مشترک جامد- مایع، درگ اصطکاکی را کاهش می‌دهند. می‌توان پیش بینی کرد که این «لغزش» منجر به کاهش دادن درگ اصطکاکی در جریان‌های خارجی در اعداد رینولدز بالا در رژیم- های جریان آرام و ناآرام بشود. این سطوح درگ را هم بوسیله کاهش سطح در تماس با سیال و هم تغییر دادن گرادیان سرعت در دیواره کاهش می‌دهند. این سطوح درجه «مرطوب ناپذیری»^۲ بالایی

^۱ Slip
^۲ Non - Wetting

دارند و قطرات آب بر روی سطح هیدروفوبیک تقریباً به شکل کره قرار می‌گیرند و «زاویه تماس»^۱ نزدیک به ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهند. وقتی جریان آب روی سطوح هیدروفوبیک لغزش غیر صفر را نشان می‌دهد که باعث افزایش تحرک قطره و کاهش درگ در جریان آرام گذرنده از میکروکانال‌ها می‌شود. در اعداد رینولدز بالا ساختار لایه مرزی توربولانسی به واسطه حضور سطح هیدروفوبیک تغییر می‌کند و به تبع آن اصطکاک پوسته‌ای کاهش می‌یابد. حفره‌های پر شده با گاز فاکتور بسیار مهمی در کاهش درگ در طول سطح هستند. این نکته روشن است که سطح جریان در تماس با سطح جامد کاهش خواهد یافت. این پیکربندی واحد، پروفیل سرعت را نیز تغییر می‌دهد. ترکیب این دو شرایط می‌تواند نیروی درگ کل را روی سطح کاهش دهد. [مفیدی و نوری، ۱۳۸۹]

کاهش اصطکاک پوسته‌ای توسط تزریق میکرو نانو حباب (حبابهای ریز هوا) به داخل لایه مرزی روی یک جسم جامد یکی از روش‌های بسیار نوین است که علاوه بر کاهش قابل توجه اصطکاک پوسته‌ای در این روش، مسئله آلودگی آب یا نیاز به مواد خاص (نظیر انواع پلیمرها) را نیز به دنبال ندارد. در این زمینه کارهای تجربی خوبی انجام شده است. اما در زمینه کارهای عددی، به جز چند مورد، که در این تحقیق به آن‌ها اشاره خواهد شد کارهای خوبی انجام نگرفته است. که علت آن، عدم شناخت کامل مکانیزم کاهش درگ از نظر تئوری می‌باشد.

علاوه بر این مشکل یعنی عدم شناخت کامل فیزیک مسئله، از نظر مدلسازی‌های کامپیوتری و عددی مشکلات جدی و مهمی وجود دارد. عدم وجود مدلی که بتواند اصطکاک پوسته‌ای در نقاط مختلف روی دیواره را با دقت مناسبی محاسبه کند، یکی از این مشکلات است، زیرا برای محاسبه کاهش درگ ابتدا بایستی درگ اولیه روی دیواره در حالت بدون حباب را محاسبه و مقدار آن را با حالت با حباب در همان شرایط مقایسه کنیم. همچنین عدم وجود مدلی که بتواند اندرکنش بین حباب و جریان و حباب با سایر حباب‌ها را مدل کند یکی دیگر از این مشکلات می‌باشد. این دو مساله مواردی هستند که بر اساس کارهای علمی منتشر شده کار جدی در این زمینه‌ها انجام نگرفته است.

^۱ Contact Angle

البته در چند سال اخیر در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت ایران با ارائه نظریه مناسب در خصوص مکانیزم کاهش درگ، کارهای عددی جدیدی انجام شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

افزایش 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 سرعت بالا و اژدر افکن‌ها باز می‌گردد. به علت محرمانه بودن این اطلاعات، اسناد و مدارک آن تا مدت‌ها انتشار نیافت. به عنوان نمونه‌ای از فعالیت‌های اولیه در خصوص سیستم‌های کاهش درگ توسط تزریق هوا می‌توان به کارهای پیتر در سال ۱۸۸۲، موتیرال در سال ۱۹۰۸، و فاوبر در سال ۱۹۱۰ و ۱۹۱۲ اشاره کرد. [به نقل از نوری و همکاران، ۱۳۸۶]

۲-۱-۱- کارهای تجربی

در سال ۱۹۷۳ پدیده کاهش درگ به وسیله میکرو حباب‌ها، توسط مک کورمیک^۱ و باتاچاریا^۲ بیان شد، آنها توانستند نیروی درگ را برای یک جسم دوکی شکل غوطه ور که سطح آن به وسیله میکرو حباب‌های هیدروژن کاملاً پوشیده شده بود، بدست آورند. آنها در آزمایش‌هایشان میکرو حباب‌های هیدروژن به وسیله الکترولیز را ایجاد کردند. طول جسم مورد آزمایش حدود 0.91 m بود که با سرعت 2.59 m/s در یک مخزن کشیده می‌شد. آنها نتایج آزمایش را با افزایش اندازه جریان و در نتیجه تعداد حباب‌های بیشتر، به صورت مقایسه با درگ ناشی از جسم، در همان شرایط بدون حضور میکرو حباب‌ها بدست آوردند و مشاهده کردند که حباب‌های هیدروژن در کاهش اصطکاک پوسته ای موثر بوده‌اند که این تاثیر در رینولدزهای پایین محسوس تر است. [Mc cormick and Bhattacharyya, 1973]

^۱ McCormick
^۲ Bhattacharyya

بعد از کشف این پدیده توسط مک کورمیک و باتاچاریا، که در کمترین سرعت آزمایش خود درگ کلی کاهش یافته را تا ۶۵ درصد گزارش کردند، بگدویچ^۱، اوسیو^۲ و مالیوگا^۳ در سال ۱۹۷۷ توانستند کاهش درگ را تا میزان ۸۰ درصد توسط تزریق گاز از یک ماده متخلخل در کمترین سرعت جریان (۱۰/۷ متر بر ثانیه) برای دو صفحه جدا نشان دهند. [به نقل از نوری و همکاران، ۱۳۸۶]

فونتین^۴ و دویتش در سال ۱۹۹۲ از پنج نوع گاز متفاوت که اختلاف قابل ملاحظه ای در دانسیته و میزان قابلیت حل شوندگی داشتند، برای تزریق استفاده کردند، و نتیجه گرفتند نوع گاز تاثیری در کاهش درگ ندارد. [Fontaine and Deutsch, 1992]

در سال ۱۹۹۹ وار هولیک^۵ میزان کاهش درگ از ۱۰ تا ۶۹٪ را با اضافه کردن توزیع‌های مختلف پلیمر به جریان کانال با عدد رینولدز ۲۰۰۰ بدست آورد که در مقایسه با سطح‌های پیشرفته قابل توجه است. این در حالی است که کاهش درگ به کمک میکرو حبابها مقادیر بالای ۸۰٪ برای صفحه تخت و بالای ۴۰٪ در جریان کانال ایجاد می‌کند. [Warholic et al, 1999]

کارهایی نیز در زمینه بررسی اندازه حباب انجام شده است که در زیر به آن اشاره خواهد شد.

پال^۶ در سال ۱۹۸۸ برای بررسی اندازه حبابها و موقعیت آنها از ابزار نوری و عکس برداری استفاده کرد. چون ابر میکرو حباب در آزمایشهای مربوط به کاهش درگ غیر شفاف بود؛ بنابراین اندازه حبابها از روی لبه بالایی ابر حاصل شده در شرایط بدون کاهش درگ، برآورد می‌شد. اندازه این حبابها در محدوده بزرگتر از ضخامت زیر لایه، تا ابعادی کوچکتر از ضخامت لایه مرزی بود، یعنی در حدود ۱۵۰ تا ۱۱۰۰ میکرون. با افزایش جریان گاز تزریقی و افزایش فاصله از تزریق کننده‌ها، اندازه حبابها افزایش یافته و با افزایش سرعت جریان آب کاهش می‌یابد. [Bull and Rickerby, 1988]

^۳ Bogdevich

^۴ Evseev

^۵ Mayyuga

^۴ Fontaine

^۲ Warholic

^۳ Bull

کاتو^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۹ با آزمایش تزریق حباب به روش‌های مختلف نشان دادند که قطر حباب خروجی از لوله‌ی تزریق برای کاهش درگ بسیار موثر است و بطور معمول حباب‌هایی در ابعاد میکرو ساخته شده توسط مبدل عنصر شناور، بیشترین کاهش درگ را داشته است. وی همچنین نشان داد که جهت تزریق حباب بر موثر بودن میکرو حبابها تاثیر زیادی دارد و تاثیر میکرو حبابها در پایین دست جریان کاهش می‌یابد. [Kato et al , 1999]

مورای^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که حباب به اندازه‌ی ۲ تا ۹۰ میلیمتر در جریان کانال افقی باعث بوجود آمدن یک همبستگی منفی بین اصطکاک موضعی و فضای حبابها می‌شود که این امر باعث کاهش اصطکاک می‌شود و در نتیجه در قسمتی که حباب وجود دارد، سرعت افزایش پیدا خواهد کرد. [Murai et al , 2007]

اثر سرعت جریان آزاد و نیروی شناوری بر کاهش درگ میکرو حبابی توسط ماداوان^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۴ مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در قسمتی از یک تونل آب با مقطع مستطیلی روی صفحه تختی که روی دیواره بالایی و پایینی کانال نصب گردیده بود، صورت پذیرفت. اندازه گیری اصطکاک پوسته به دو صورت اصطکاک پوسته در سراسر یک ناحیه و همچنین اصطکاک پوسته موضعی انجام گرفته است. نتایج نشان داد که به ازای یک نرخ تزریق معین کاهش درگ برای سرعت‌های بالاتر کمتر است. همچنین، برای سرعت‌های پایین‌تر کاهش درگ در دیواره بالایی به میزان قابل توجهی از دیواره پایینی بیشتر می‌باشد. [Madavan et al , 1984]

دویتش^۴ و کاستانو^۵ در سال ۱۹۸۶ با آزمایش بر روی نمونه استوانه ای متقارن و صفحه‌ی تخت که دارای طول ۶۳۲ mm و قطر ۸۹mm است، نشان دادند که با افزایش سرعت جریان آزاد، از میزان کاهش درگ اصطکاکی کاسته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد حداکثر کاهش درگ برای صفحه‌ی تخت

^۴ Kato

^۱ Murai

^۲ Madavan

^۳ Deutsch

^۴ Castano

در سرعت ۵ متر بر ثانیه و برای شکل استوانه ای در سرعت ۱۷ متر بر ثانیه رخ داده است. [1986,

[Deutsch and Castano

در سال ۱۹۹۶ گوین^۱، توانست پدیده کاهش درگ به کمک میکروحبابها را برای جریان کاملا توسعه یافته در جریان کانال مشاهده کند و نتیجه گرفت که کسر حجمی هوای تزریق شده در نزدیک دیوار نسبت به نقاط دورتر در داخل لایه مرزی تاثیر بیشتری در کاهش اصطکاک دارد.

[Guin et al ,1996]

تاکاهاشی^۲ در سال ۱۹۹۹ کاهش اصطکاک پوسته‌ای بالاتر از ۵۰٪ را بر روی یک کشتی به طول ۱۲ متر بدست آورد. همچنین وی در سال ۲۰۰۰ این کاهش را، این بار برای یک کشتی به طول ۵۰ متر، بیش از ۳۲٪ بدست آورد. [Takahashi et al ,2000]

سوگی یاما^۳ در سال ۲۰۰۳ با شبیه سازی جریانهای 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 می یابد. [Sugiyama et al , 2003]

کاهش درگ میکروحبابی در لایه مرزی آشفته توسط ژاکب^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از تکنیکهای اپتیکی میدان سرعت فاز مایع و همچنین مشخصات حبابها در سیستم تعیین شد. نتایج نشان دادند که بر هم کنش بین حبابها و آشفستگی جریان منجر به اصلاح قابل توجه میدان جریان می شود. در این حالت کاهش تنش برشی ۲۵٪ مشاهده شد.

[Jacob et al ,2010]

^۵ Guin

^۱ Takahashi

^۲ Sugiyama

^۳ Jacob

تسای^۱ و چان^۲ در سال ۲۰۱۱ تکنیک کاهش درگ میکروحبابی را روی یک صفحه تخت در یک تونل آب و همچنین یک تانک مورد بررسی قرار دارند. میکروحبابها به وسیله مواد متخلخل روی صفحه تولید شدند. با استفاده از مدل اختلاط لایه مرزی پیش بینی کاهش درگ میکروحبابی در هر حالت صورت پذیرفت. نتایج نشان دادند که مدل مربوطه کاهش درگ خوبی را برای تزریق میکروحبابها روی صفحه تخت در تونل آب پیش بینی می کند. در حالی که این مدل کاهش درگ دور از واقعیت را برای میکروحبابها در تانک دارد. [Tsai and Chen ,2011]

بهبود تاثیر تزریق میکروحبابها روی یک مدل قایق تندرو توسط یانار^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ مطالعه شد. علاوه بر این، تاثیر موقعیت تزریق حبابها و همچنین سرعت آنها در جریان مجاور سطح قایق بررسی شد. مدل توسط یک موتور الکتریکی، که سرعت آن قابل تغییر بود، به حرکت در آورده شد. نتایج نشان داد که تزریق میکروحبابها در وسط قایق بیشترین تاثیر را در کاهش درگ اصطکاکی دارد. در این حالت مقدار کاهش درگ به دست آمده در حدود ۶٪-۹٪ بوده است. [2012, Yanuar et al]

صیادی و نعمت الهی در سال ۲۰۱۳ بر روی یک مدل کشتی ۷۰ سانتی متری تاثیر حبابهای کوچک را بررسی کردند که در آزمایشات، آنان پارامترهای اصلی کشتی مانند: طول، عرض و مساحت را در نظر گرفتند و نتایج آزمایشات نشان داد که تزریق بیش از حد هوا سبب کاهش درگ می شود در حالی که تزریق مناسب باعث کاهش درگ در حدود ۵٪-۸٪ می شود [Sayadi and ,2013]

nematollahi

اثر حبابها روی کاهش درگ اصطکاکی در یک سیستم تیلور کوئت عمودی در سال ۱۳۹۳ توسط مریمی و همکارانش بطور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. آنان حبابهای هوا را از قسمت پایینی سیستم به داخل جریان آب تزریق کردند و نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز دورانی تا یک مقدار

^۴ Tsai
^۵ Chen
^۶ Yanuar

مشخص منجر به افزایش تاثیر حباب‌ها روی کاهش درگ اصطکاکی می‌شود و برای رینولدزهای بزرگ، این تاثیر عکس می‌گردد. بیشترین کاهش درگ حبابی ثبت شده در این آزمایش‌ها حدود ۵٪ است. [مریمی و همکاران، ۱۳۹۳]

کیومیگا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک دستگاه جدید صرفه جویی در مصرف انرژی را برای کاهش درگ یک فروند کشتی با استفاده از حباب‌های کوچک توسعه دادند. دستگاه انرژی لازم برای تولید حباب را کاهش می‌دهد. این وسیله که شامل هیدروفویل زاویه‌ای با ورودی‌های هوا است، از منطقه فشار پایین ایجاد شده در بالای هیدروفویل استفاده می‌کند، همانطور که کشتی رو به جلو حرکت می‌کند تا هوا را در آب جاری کند. آنان با توصیف اصول دستگاه بدست آمده از تئوری دینامیک سیال ساده و از طریق آزمایشات انجام شده در یک مخزن کوچک نشان دادند افزودنی حباب‌های هوا فرآیندهای اساسی برای رفتار جریان در اطراف یک هیدروفویل در زیر یک سطح آزاد است. در نهایت نتایج حاصل از یک سری آزمایشات نشان داد که با عملکرد صحیح، دستگاه می‌تواند صرفه جویی در انرژی خالص ۵-۱۵٪ بر کشتی‌ها داشته باشد. [Kumagai et al, 2015]

۲-۱-۲- کارهای عددی

از جمله فعالیت‌های انجام شده در مدلسازی و تحقیقات عددی میتوان به کارهای ماری در سال ۱۹۸۷ اشاره کرد که توانست مدلی را پیشنهاد بدهد که در آن ضخامت زیر لایه ویسکوز به علت داشتن میکرو حبابها بیشتر می‌شود. [به نقل از نوری و همکاران، ۱۳۸۶] یوشیدا^۲ در سال ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ مدل جدیدی را ارائه کرد که نیروهای وارد بر میکرو حبابها بصورت دقیق محاسبه شده و در جهت خلاف نیروی وارده به دیواره بود. [Yoshida, 1998]

^۱ Kumagai
^۲ Yoshida

در سال ۲۰۰۱ کاوامورا^۱ و کوداما به بررسی پارامترهای مهمی مانند اثر تراکم پذیری حباب، تاثیر اعداد وبر، فرود، اندازه حبابها و کسر حجمی حبابها در کاهش درگ پرداختند و نتیجه گرفتند 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 آشفته را روی صفحه تخت به کمک روش DNS مورد بررسی قرار داده اند و نتیجه گرفتند حضور میکرو حباب در لایه مرزی باعث کاهش سرعت متوسط در جهت جریان می شود و ساختارهای چرخشی طولی شبه راستای جریانی، از دیوار فاصله گرفته و جابجا می شوند. [Ferrante and Elgobasi, 2004]

در داخل کشور نیز کارهایی در این زمینه انجام شده که می توان به مجموعه کارهای صورت گرفته در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت اشاره کرد.

در سال ۱۳۸۱ نوری و شادمان حبابها را با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر آنها مدل کردند. [شادمان، 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، نوری، ۱۳۸۲]

نوری و ابراهیمی در سال ۱۳۸۳ با حل جریان زمینه صفحه تخت با روش گردابه های تصادفی و در نظر گرفتن تعدادی محدودی حباب، اثر کاهش درگ را مشاهده کردند. و در سال ۱۳۸۴ نوری و ساقری چی ها کارهای قبلی را تکمیل نمودند و با در نظر گرفتن نیروهای وارد بر حباب اثر کاهش درگ را بطور گسترده تری مورد بررسی قرار دادند. [ساقری چی ها، نوری، ۱۳۸۴]. همچنین فرهانیه و همکاران در سال ۱۳۸۴ برای حل جریان داخل کانال از روش گردابه های تصادفی استفاده کرده و

^۱ Kawamura

^۲ Ferrante

^۳ Elgobasi

با در نظر گرفتن حبابها بصورت غیر فعال و بدست آوردن اثر نیروهای وارد بر حبابها به جریان توانستند کاهش درگ را در نواحی توسعه یافته مشاهده کنند. [سخاوت، فرهانیه، ۱۳۸۴]

مکانیزم کاهش اصطکاک پوسته‌ای هنوز به صورت کامل و جامعی مورد بررسی قرار نگرفته است و آزمایشهای بسیاری برای شناخت بهتر و بیشتر این پدیده انجام می‌شود. یک توضیح ساده برای این اثر آن است که افزایش لزجت مؤثر به وسیله میکرو حبابها باعث کاهش اثر تنش رینولدز می‌شود و در نتیجه باعث تغییر پروفیل سرعت و کاهش گرادیان سرعت در دیواره می‌شود. نمونه دیگر چنین شرحی، تغییر اندازه لایه مرزی یا ایجاد شرایطی نزدیک به جریان آرام در جریان و به عبارت دیگر بهبود شرایط و مشخصه‌های دیگر جریان آشفته می‌باشد، با اینحال هنوز ایده و نظری قطعی و نهایی برای توضیح این پدیده از سوی محققین اعلام نشده و به همین دلیل فعالیت های گسترده آزمایشی برای شناخت این مساله ادامه دارد.

۲-۲- میکرو نانو حبابهای هوا

۲-۲-۱- کلیاتی در مورد میکرو نانو حبابها

میکرو حبابها و نانو حبابها، حبابهای بسیار کوچکی از هوا هستند که به ترتیب دارای ابعاد ۱۰-۵۰ میکرومتر و کمتر از ۲۰۰ نانومتر می‌باشند. میکرو حبابها و نانو حبابها هر یک رفتار منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند. یک حباب معمولی (ماکرو حباب) مسیری به سمت بالا را با سرعت زیاد طی می‌کند و پس از رسیدن به سطح آب متلاشی می‌شود. یک میکرو حباب نیز مسیری به سمت بالا را طی می‌کند با این تفاوت که معمولا در داخل آب متلاشی می‌شود. همچنین یک نانو حباب می‌تواند درون آب در جهت‌های مختلفی حرکت کند و برای مدت زمان طولانی (مثلا چند ماه) پایدار بماند و به تدریج حباب کوچک شود تا محو گردد (شکل ۲-۱)



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

در واقع میکرو- نانو حبابها حفره‌های حاوی گاز در محلول آبی هستند. فرآیند هسته زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته میشود که باعث ایجاد میدان الکترواستاتیکی به دور هسته میگردد و این میدان الکترواستاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده‌اند به طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند. این افزایش یا کاهش تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، باعث رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگتر یا کوچکتر شدن لایه‌ی دوگانه میگردد. بزرگ یا کوچک شدن لایه‌ی دوگانه باعث بزرگ یا کوچک شدن نیروی کشش سطحی میشود. به همین دلیل نانو حبابها یا میکرو حبابها 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 کوچک شدن در طول زمان میکنند. [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

۲-۲-۲- دستگاه تولید میکرونانو حباب

در این پژوهش از دستگاه تولید میکرونانو حباب مدل T2-2500 ساخت شرکت نو فناوران میناب طوس در آزمایشگاه نانو سیالات در محیط‌های متخلخل دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است.

۳-۲-۲- اصول کاویتاسیون هیدرودینامیکی

میکرو - نانو حبابهای هوا ذراتی با بار سطحی منفی هستند که به روشهای مختلفی تولید میشوند که یکی از این روشها کاویتاسیون هیدرودینامیکی است. کاویتاسیون هیدرودینامیکی زمانی روی میدهد که به علت سرعت بالای جریان، فشار در یک نقطه از مایع، به طور لحظه‌ای، به زیر فشار بخار، کاهش یابد. کاویتاسیون هیدرودینامیکی به خوبی از طریق معادله ی برنولی توصیف شده است.

$$P + \frac{\rho U^2}{2} = C \text{ (const)} \quad (1-2)$$

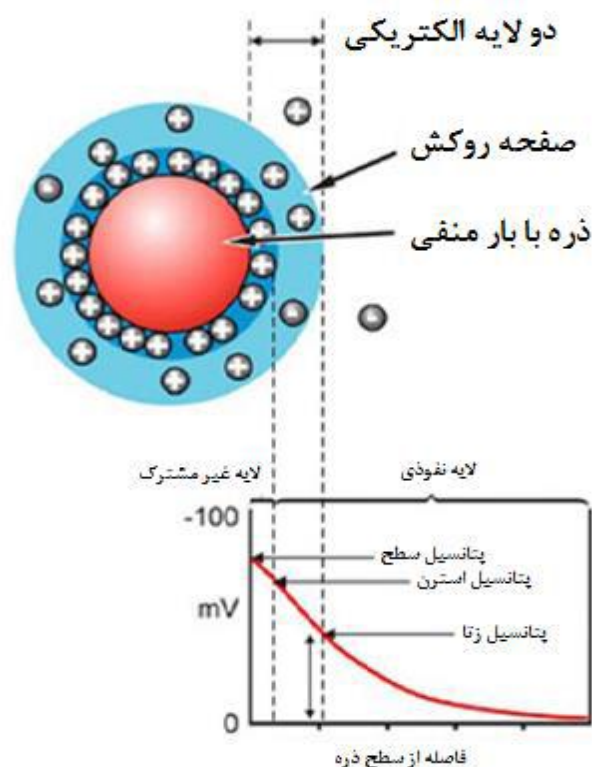
که C روی یک خط جریان مقدار ثابتی است. در این رابطه U سرعت جریان آب در یک نقطه، P فشار و ρ چگالی مایع هستند. بازنویسی معادله به صورت زیر است:

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

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

۴-۲-۲- تئوری پتانسیل سطحی نانو - میکرو حبابها

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



شکل ۲-۲ - شماتیک حضور یک ذره خنثی در الکترولیت

پتانسیل الکتریکی حاصل از لایه دوگانه را پتانسیل الکتروستاتیکی یا پتانسیل زتا می گویند. این پتانسیل تابع عواملی از قبیل اندازه و نوع ذرات، PH و سایر عوامل مؤثر بر دو لایه الکتریکی خواهد بود. عموماً افزایش pH موجب کاهش پتانسیل زتا خواهد شد. نکته قابل تأمل اینکه هر ذره در pH های گوناگون رفتار منحصر به فردی از خود نشان می دهد. به طوری که نه تنها مقدار پتانسیل آن تغییر خواهد کرد، بلکه مثبت و منفی بودن آن نیز به راحتی قابل تغییر خواهد بود، به این ترتیب میتوان با انتخاب درست pH رفتار و عکس العمل ذره را در محیط های گوناگون تحت کنترل قرار داد. برگرفته از: [مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

پتانسیل زتا به سطح هیدرودینامیکی نسبت داده میشود و بار سطحی برای سطح جامد - مایع تعریف میشود. هر چه پتانسیل زتا بیشتر باشد، احتمال تشکیل دو لایه الکتریکی روی سطح ذره بیشتر میشود و تمایل برای لخته شدن و تجمع کم میشود و ذرات در شکل منفرد باقی می مانند و تجمع

نمی‌کنند. پتانسیل زتا، مقدار دافعه بین ذره مجاور را نشان می‌دهد. موقعی که زتا پایین می‌آید، جاذبه بر دافعه غلبه کرده و لخته تشکیل میشود، در حالیکه ذرات با پتانسیل زتای بالا، 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

رفتار پایداری ذرات	پتانسیل زتا (mV)
سریع لخته میشوند	از ۰ تا ۵۰ ±
ناپایدار	از ۱۰ تا ۳۰ ±
پایداری متوسط	از ۳۰ تا ۴۰ ±
پایداری خوب	از ۴۰ تا ۶۰ ±
پایداری عالی	بیشتر از ۶۱ ±

پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و همچنین سلولها وجود دارد که تحقیقات زیادی در مورد این پتانسیل الکتریکی اطراف غشاء انجام شده است. سلولها در محلول به علت وجود خاصیت های یونی، همچنین ترکیبات سازنده غشاء(مانند پروتئینها، چربیها و قندها) و پخش بار در سطح غشاء آنها دارای یک بار الکتریکی در سطح غشاء می باشند. گسترش بار در اطراف غشاء باعث تأثیر بر روی یونهای مجاور شده که نتیجه آن افزایش غلظت تعداد یونها(یونهای با بار الکتریکی مخالف) در فاصله نزدیک غشاء می شود. بنابراین غشاء در محلول توسط یک لایه از یونهای با بار مخالف محصور شده که آن را لایه ثابت می گویند. در قسمت بیرونی لایه ثابت، تعداد زیادی از یونها با بارهای مختلف وجود دارد که باعث تشکیل یک لایه ابری شکل می شود. بنابراین دولایه الکتریکی در ناحیه ای که سطح غشاء در مجاورت محیط مایع اطراف آن وجود دارد، تشکیل می شود. این لایه دوگانه توسط دو قسمت شرح داده می شود.

۱- قسمت درونی: شامل یونهای است که به صورت قوی با سطح خارجی غشاء اتصال پیدا کرده است.

۲- قسمت بیرونی یا ناحیه پراکنده که یونها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به سر میبرند. پتانسیل موجود در این قسمت با افزایش فاصله از غشاء کاهش پیدا کرده، تا جایی که به صفر برسد. هنگامی که بر محیط مایع اطراف سلول میزان معینی ولتاژ اعمال شود سلولها از طریق بار موجود در غشاء به سمت الکتروود با قطب مخالف بار غشاء حرکت میکنند. حرکت سلولها به دلیل اثر ولتاژ خارجی بر روی لایه ثابت و همچنین به روی قسمتی از ناحیه پراکنده و قسمت بینابینی این دو ناحیه در سطح غشاء می باشد. این دو قسمت و قسمت بینابینی آن به shear plane معروف می باشد و بار الکتریکی موجود در این قسمت پتانسیل زتا نام دارد. پتانسیل زتا به عنوان قسمت کاربردی بار الکتریکی سطح غشاء عمل میکنند. ماهیت محیطی که سلول در آن قرار دارد، میزان یونها و pH محیط بر روی میزان پتانسیل زتا تاثیر میگذارد. بسیاری از مواد هنگام قرار گرفتن در مایعات و یا آب از خود درجات متفاوتی از پتانسیل زتا را نشان می دهند. همچنین مولکولهای آبی که در مجاورت غشای سلولی وجود دارند تقریباً بی حرکت هستند و وجود آنها همراه با گروههای باردار در سطح غشاء باعث تاثیر در انتشار یونهای متحرک می شود. سطح غشای سلولهای ایزوله شده معمولاً دارای بار منفی است. بار موجود در دولایه الکتریکی آن با بار یونهای مخالف محیط به تعادل می رسد. این پتانسیل ایجاد شده در چنین محیط استاتیکی به صورت تصاعدی با ایجاد فاصله از سطح غشاء کاهش مییابد. در صورتی که این سطح در طول محیط حرکت کند یک لایه نازکی از محیط همراه با مقداری از یونها با این غشا حرکت میکنند. در نتیجه پتانسیلی در سطح غشاء به نام پتانسیل زتا ایجاد میشود که به وسیله روشهای سینتیکی مثل الکتروفورز اندازه گیری می شود که مقدار آن چند میلی ولت کمتر از پتانسیل واقعی غشاء می باشد. در اغلب سلولها این پتانسیل اندازه گیری شده بین ۱۰- تا ۲۰- میلی ولت است. در غشاهای سلولی، محیط های مایع خاص مجاور غشاء ممکن است بر روی فعالیت غشاء

اثر بگذارند . در نتیجه غلظت یون های نزدیک در سطح غشاء ممکن است از کل یون های محیط

متفاوت شوند. [Kirby ,2010]

فصل سوم

مواد و روش ها

۱-۳- آزمایشات انجام شده بر آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب های هوا

۱-۱-۳- مشخصات اولیه

اندازه گیری خصوصیات اولیه آب میکرونانوحباب و آب معمولی مورد استفاده در آزمایشات، از قبیل: دما، قابلیت هدایت الکتریکی، کدورت و pH در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود و اندازه گیری لزجت^۱ نیز در دانشگاه فردوسی مشهد انجام گردید. البته این خواص در نیروی درگ کاربرد ندارد و فقط صرفاً هدف از اندازه گیری این خواص این بوده است که نشان داده شود این ماده نه تنها برای محیط زیست مضر نیست بلکه مفید هم می باشد. دستگاه های مورد استفاده در ادامه آورده شده است.

۱-۱-۱-۳- اندازه گیری PH:

دستگاه pH متر رومیزی مدل ۷۱۱۰ pH ساخت کمپانی WTW آلمان است. این دستگاه دقت بالایی دارد و میتواند با دقت $\pm 0,005$ میزان pH را اندازه گیری کند. یکی از خاصیت های مهم pH در میکرونانوحباب جلوگیری از خوردگی در بدنه وسایل محرکه دریایی می باشد. (شکل ۱-۳)



شکل ۱-۳- دستگاه pH متر

^۱ Viscosity

۳-۱-۱-۲-اندازه‌گیری هدایت الکتریکی:

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی محلول‌ها از دستگاه WTW 7110 استفاده شده است. دستگاه هدایت سنج دارای دو الکترود یکسان فلزی پلاتینه شده می‌باشد. الکترودها در یک محفظه شیشه‌ی مقاوم، موازی هم قرار گرفته‌اند که به این مجموعه، Probe می‌گویند. برای اندازه‌گیری هدایت یک محلول، probe را در آن محلول قرار داده و دستگاه با ولتاژ مناسبی که بین الکترودها می‌فرستد، هدایت محلول را نشان می‌دهد که واحد آن را بر حسب mS/cm یا $\mu\text{S/cm}$ (میکروموس بر سانتی متر) نشان می‌دهند. کالیبراسیون دستگاه بصورت هفته‌ای و با محلول استاندارد 0.01 m کلرید پتاسیم (KCL) انجام می‌گیرد. (شکل ۳-۲)



شکل ۳-۲- دستگاه کندانکتومتر

۳-۱-۱-۳- کدورت سنج TB210IR

برای اندازه‌گیری میزان کدورت آب، از روش نفلومتری (N.T.U)^۱ استفاده شده است که این روش بر اساس مقایسه شدن پراکندگی نور در یک نمونه در شرایط مشخص با شدت پراکندگی نور در یک محلول استاندارد در همان شرایط می‌باشد. کدورت سنج نفلومتر شامل یک منبع نور یک عدسی و روزنه جهت متمرکز کردن نور و سل نمونه و یک دکتور فتومتریک (آشکارسازی نوری) برای مشخص کردن شدت نور پخش شده در زوایای ۹۰ درجه یک مسیر نوری است و تفرق نور کار می‌کند و روش سنجش بر اساس اصل پراکندگی پرتوهای نور توسط ذرات داخل آب می‌باشد. دستگاه استفاده شده ساخت شرکت Lovibond آلمان و بازه‌ی عملکردی ۰ تا ۱۱۰۰ NTU و دقت ۰.۰۱ می‌باشد. (شکل ۳-۳)



شکل ۳-۳- دستگاه کدورت سنج

^۱ NEPHELOMETRIC TURBIDIMETER UNIT

۳-۱-۱-۴-دستگاه رئومتر:

برای تعیین ویسکوزیته دینامیکی از دستگاه رئومتر استفاده شده است. ساز و کار عملکرد این وسیله به این صورت است که در آن با توجه به نوع سیال، سل مورد نظر را انتخاب نموده (شکل ۳-۴) و از طریق بررسی توان مورد نیاز برای چرخش یک همزن در داخل نمونه، پارامترهایی مانند ویسکوزیته دینامیکی اندازه گیری می‌شود. (شکل ۳-۵)



شکل ۳-۴-انواع سل‌ها برای سیالات مختلف



شکل ۳-۵-دستگاه رئومتر

۳-۱-۲- اندازه گیری ابعاد میکرونانوحباب

روش تفرق دینامیک نور^۱ (DLS) که گاهی طیف سنجی ارتباط فوتونی^۲ (PCS) نیز نامیده می -

شود برای اندازه گیری اندازه ذرات در محیط مایع مورد استفاده قرار می گیرد. این روش برای تعیین اندازه ذرات در محدوده چند نانومتر تا میکرون به کار می رود، در فناوری های اخیر، ذراتی با قطر کمتر از یک نانومتر نیز با این روش قابل اندازه گیری هستند.

در یک محلول، برخورد ذرات و مولکول های کوچک با مولکول های حلال، منجر به حرکت تصادفی مولکول ها می شود. برای اولین بار یک میکروبیولوژیست به نام براون (BROWN)، با مشاهده یک موجود زنده در زیر میکروسکوپ نوری، این اثر را کشف کرد. حرکت ذرات کوچک در یک سیال، حرکت براونی نامیده می شود. هر ذره در سوسپانسیون، دائماً در حال حرکت است و حرکتش به ذرات دیگر مرتبط نیست. مشاهده ذرات بزرگتر در مقایسه با ذرات کوچکتر نشان می دهد که در یک دما، ذرات بزرگتر بسیار آهسته تر حرکت می کنند. اگر به یک ذره کوچک یعنی ذراتی که اندازه آنها در مقایسه با طول موج نور کوچک باشند (کوچکتر از ۲۵۰ نانومتر) نور لیزر تابانده شود، ذره نور را در تمامی جهات پراکنده می سازد. [صادق حسینی و سمیعی، ۱۳۸۷]

برای استفاده از تئوری مای، نیاز به داشتن ضریب شکست ذره و محیط یا همان ضریب شکست نسبی داریم. این تئوری برای ذرات شفاف در محدوده اندازه ۱ تا ۵۰ میکرومتر نیز قابل استفاده است. استفاده از تئوری مای شرایطی دارد که در زیر آورده شده است:

- هم پراکندگی و هم جذب باید در نظر گرفته شوند.
- ذره باید کرووی باشد، چون شکل ذره بر الگوی پراکندگی اثر گذار است.
- ضریب شکست محیط و ذره باید شناخته شده باشد.

^۱ Dynamic Light Scattering

^۲ Photon Correlation Spectroscopy

- ذرات باید ایزوتروپ و همسان باشند، اگر ذرات غیر ایزوتروپ یا غیر همسان باشند، خصوصیات نوری آنها در جهات مختلف متفاوت خواهد بود.
- نور استفاده شده در تعیین اندازه ذرات، باید دارای یک طول موج و فرکانس یکنواخت باشد.
- نور برخورد شده باید به صورت امواج صفحه‌ای باشد یا توزیع سه بعدی نداشته باشد.
- در پایان مجموعه باید همگن باشد، زیرا ناهمگنی روی الگوی پراکندگی اثر دارد.

روش تفرق نور دینامیکی مطابق با استاندارد ISO ۲۲۴۱۲ سال ۲۰۰۸ جهت تعیین ابعاد ذرات در محدوده ابعادی بین ۰.۶ تا ۸ میکرو قابل استفاده می‌باشد. [International Standard , 2008]

ISO22412

برای اندازه‌گیری ابعاد حباب‌ها از روش‌های کومولانت^۱ و پادلاپلاس^۲ استفاده می‌شود که بر اساس اطلاعات سازنده، روش کومولانت در این خصوص جواب‌های بهتر و دقیق‌تری به دست می‌دهد. در روش کومولانت می‌توان میانگین قطر هیدرودینامیکی^۳ را اندازه‌گیری کرد که نشان دهنده‌ی نحوه‌ی نفوذ ذرات در سیال است. [به نقل از مظفری نائینی، ۱۳۹۲]

انجام آزمایشات برای تعیین ابعاد میکرونانونوحباب‌ها با استفاده از دستگاه Nano Particle Analazer Size (پردازش اندازه ذرات نانو) بر روی نمونه‌های ۱ روزه انجام شده است. اساس روش دستگاه Nano Particle Size Analazer پراش نور دینامیکی می‌باشد که می‌تواند ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون را اندازه‌گیری کند. این آزمایشات بر اساس ۳ پارامتر تعداد، حجم و شدت نمونه-ها انجام شد که در این آزمایش فرض شده است که ضریب شکست نور برای نانومیکرو حباب‌ها ۱.۵۶ و برای آب ۱.۳۳ است. توزیع ذرات در مقیاس نانو به کمک نور لیزر با طول موج 657nm و توان ۵۰٪ تعیین شد. کوچکترین اندازه حباب‌ها در این آزمایش تقریباً ۸۵ nm می‌باشد.

¹ Cumulants
^۲ Pade-Laplace
^۳ Zaverage

با توجه به بازه وسیع اندازه میناب، فرضیات عملکردی دستگاه صحیح است زیرا یک بخشی کمتر از ۱۰۰ نانومتر است که میگوییم نانو دارد و یک بخشی بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر است که به آن طبق استاندارد میکرو میگوییم و چون قابل تفکیک نیست، میکرونانوحباب گوییم.

برای کاهش خطاها، هر اندازه‌گیری ۲ بار با فاصله زمانی کوتاه انجام شد و میانگین دو اندازه‌گیری ملاک قرار گرفت. نمودار توزیع آماری قطر نانو حباب‌ها بیانگر اندازه‌گیری‌ها است و ملاک، مقدار متوسط ابعاد نانو میکرو حباب‌ها^۱ است. میانگین قطر هیدرودینامیکی با Db_{50} که معرف اندازه‌ای است که ۵۰٪ حجمی نانو میکرو حباب‌ها دارای ابعادی کوچکتر از این مقدار و ۵۰٪ حجمی دارای ابعادی بزرگتر از آن می‌باشد، تفاوت دارد. (به پیوست بخش مراجعه شود).

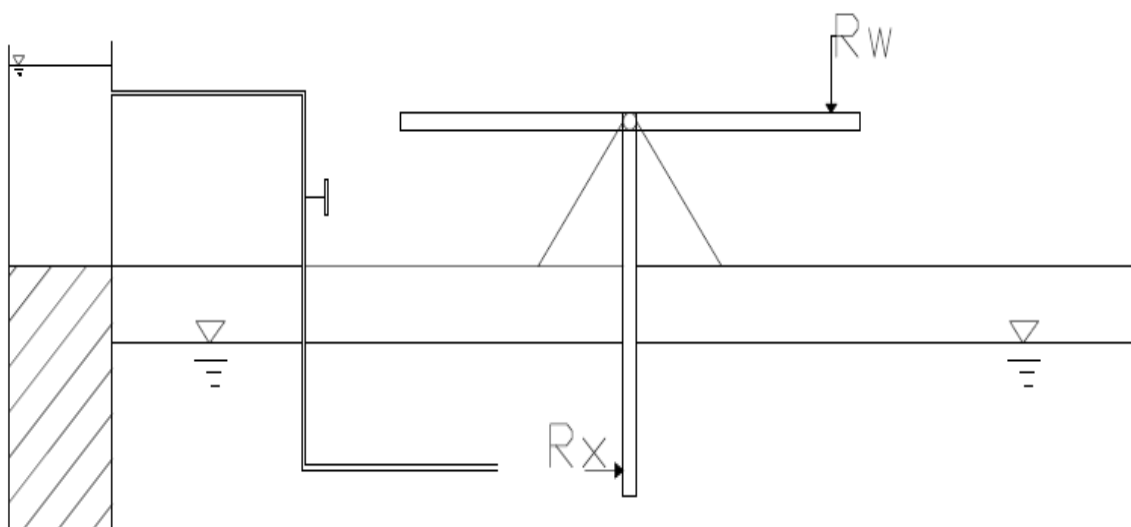
۳-۱-۳- بررسی پایداری میکرونانو حباب‌ها

پایداری میکرونانو حباب‌ها و حفظ خواص میکرونانو حباب‌های هوا در آب بسیار مهم و حائز اهمیت است. مقادیر پتانسیل زتای سطحی میکرونانو حباب‌ها با استفاده از یک زتا پتانسیل متر Zeta compact CAD Instrument اندازه‌گیری شدند.

۳-۲- مواد و تجهیزات استفاده شده در آزمایش نیروی درگ

در انجام آزمایشات، به علت مقایسه‌ای بودن نتایج، یک بار از آب شهری شاهرود و بار دیگر همان آزمایشات با آب حاوی میکرونانو حباب انجام شد. آزمایشات مورد نظر بر روی فلوم آزمایشگاهی انجام شد و لوله تزریقی در فاصله معین از اجسام آزمایش تعبیه شد تا تزریق بر مرکز اجسام نمونه انجام گیرد. در زیر شکل شماتیک از سیستم آزمایشگاهی را مشاهده می‌نماییم. (شکل ۳-۶)

^۱ Dmean number



شکل ۳-۶- شماتیک تزریق از تزریق لوله به جسم مورد نظر

۳-۲-۱- محل انجام آزمایش

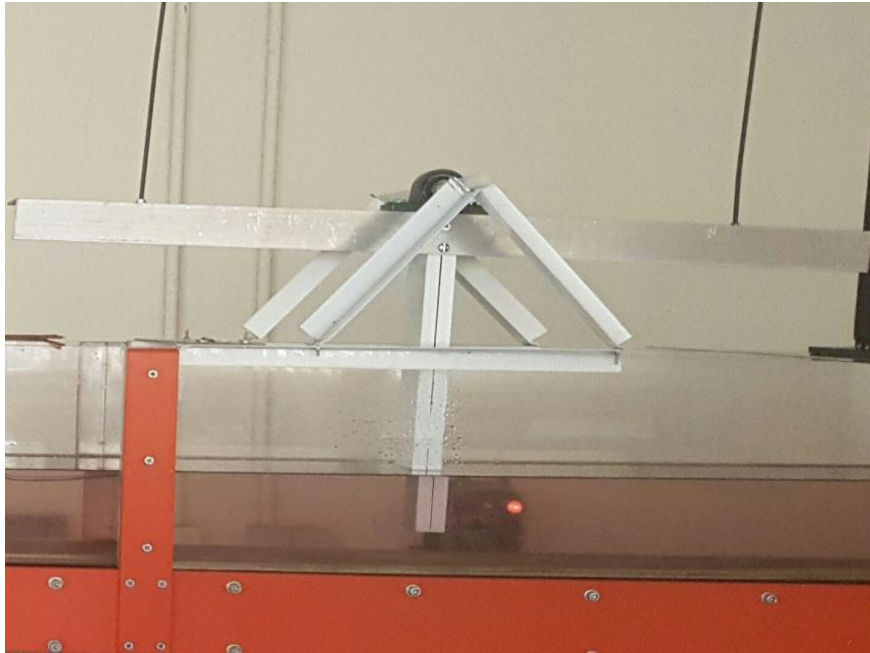
برای انجام آزمایشات از فلوم موجود در آزمایشگاه هیدرویک دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد که این فلوم دارای ارتفاع ۳۰ cm و عرض ۲۰ cm و طول ۲۵۰ cm می باشد. همچنین ساخت اجسامی که تزریق بر آنها انجام می شد و مراحل آماده سازی سیستم این اجسام در آزمایشگاه محیطهای متخلخل نانو سیالات دانشگاه صنعتی شاهرود صورت پذیرفت.

۳-۲-۲- اجسام مورد آزمایش

در این آزمایش، اجسامی که مورد آزمایش قرار گرفتند، شامل جسم مکعب مستطیل و استوانه و گوه بود. برای ساختن اجسام مکعب مستطیل مورد آزمایش، از قوطی آلومینیومی به ابعاد ۵/۵ cm \times ۳/۵ و برای جسم استوانه‌ای از پلیمر پلی آمید که نام تجاری آن ارتانول می باشد و دارای قطر ۲ cm است، و برای جسم گوه از ورق‌های آلومینیومی استفاده شده است.

در این آزمایشات نیاز بود که اجسام ساخته شده مورد آزمایش تزریق، بتوانند در وسط فلوم در حالی که از کف فلوم، ۴ سانتی متر فاصله داشتند در حالت تعادل و قائم باشند و برای نگه داشتن این اجسام

از نبشی آلومینیومی ۶cm با طول ۷۰ سانتی متر استفاد شده است که اجسام در وسط نبشی نصب می‌شوند بدین گونه که ابتدا خرپاهایی از جنس آلومینیوم به عنوان پایه نگهدارنده بر روی دو طرف لبه فلوم تعبیه گردید، سپس از یاتاقان مدل vcp204 بر روی نبشی برای عبور دادن لوله از آن بعنوان اتصال این دو خرپا استفاده شد. (شکل ۳-۷)

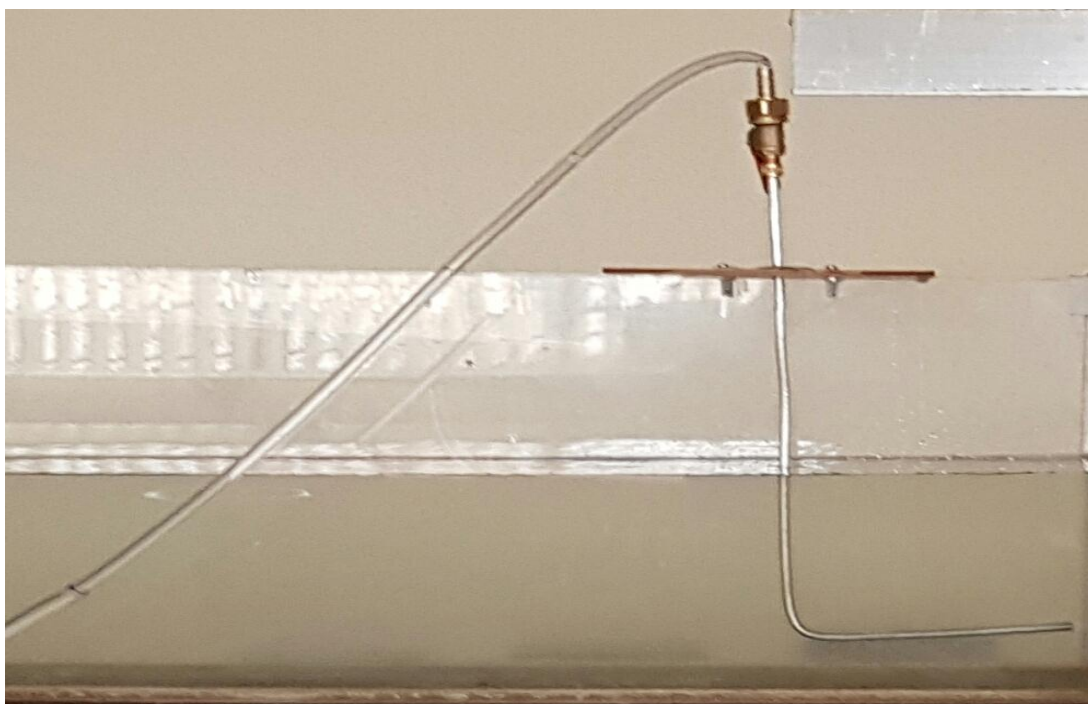


شکل ۳-۷- سیستم نگهدارنده اجسام در وسط فلوم

۳-۳- شرح انجام آزمایشات

برای انجام تزریق نیز از لوله آلومینیومی ۳ mm استفاده شد. لوله آلومینیوم نیز باید مثل سیستم بکار گرفته شده در اجسام آزمایش، در حالت تعادل و در وسط فلوم قرار گیرد. برای این کار تخته چوبی به بعد عرض فلوم تعبیه شد و بر روی فلوم قرار گرفت و لوله تزریق نیز از وسط این تخته عبور داده شد. از سطل هایی به حجم ۸ لیتر بعنوان مخزنی که در آن آب شهری و بار دیگر میناب قرار دارد استفاده شد که برای پمپاژ آب، پمپی با ولتاژ ۲۲۰v و فرکانس ۵۰ Hz و شدت جریان ۰/۴A را بکار گرفتیم. و از یک شلنگ تراز بعنوان اتصال بین پمپ و لوله تزریق استفاده کردیم که یک سر شلنگ تراز به دهانه

خروجی پمپ متصل و سر دیگر شلنگ تراز با کمک مهره و شیر کولر بعنوان مبدل به لوله تزریق نصب گردید. (شکل ۳-۸)



شکل ۳-۸- سیستم بکار رفته برای تزریق آب معمولی و میناب

۳-۳-۱- آزمایش کاهش نیروی درگ برای جسم مکعب مستطیل

برای انجام آزمایش، دبی‌های مختلف m^3/s ۰,۰۰۱۱، ۰,۰۰۱۶، ۰,۰۰۲۲ و ۰,۰۰۲۷ و در هر دبی، عمق‌های m ۰,۰۸، ۰,۱۸، ۰,۱۴ و ۰,۲۲ در داخل فلوم ایجاد شد.

همانطور که قبلاً ذکر شد ابعاد جسم مکعب مستطیل m ۰,۰۵۵ و ۰,۰۳۵ و ارتفاع ۰,۴۴ می‌باشد.

ابتدا جسم مورد نظر را به وسیله سیستم تعبیه شده در وسط فلوم قرار گردید و جریان آب برقرار شد. سپس با باز و بسته کردن دریچه‌ی موجود در فلوم عمق‌های cm ۸، ۱۴، ۱۸، ۲۲ ایجاد شد و با توجه به

هر عمق، لوله تزریق در فاصله ۲۷ cm از جسم قرار گرفت و تزریق بصورت افقی در راستای مرکز سطح شناور عمود بر جریان انجام شد.

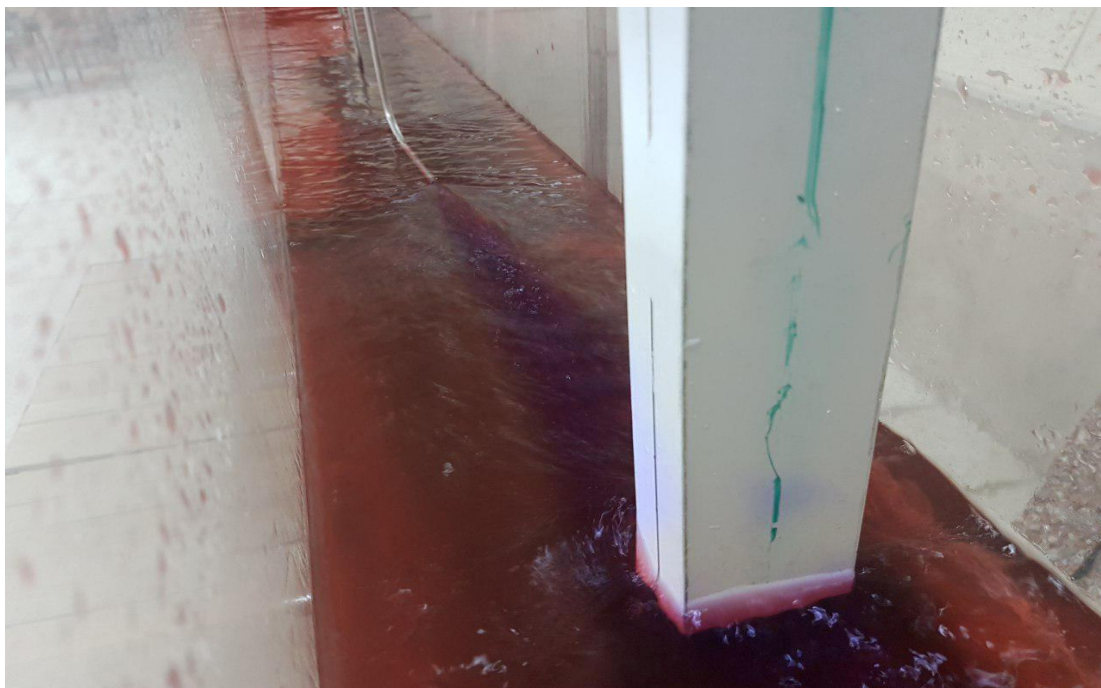
در کلیه آزمایشات پس از اطمینان از تعادل جسم و عمود بودن آن به کمک دوربین نقشه برداری، جریان آب برقرار و عمق به اندازه لازم تنظیم شد. در این حالت به دلیل وجود نیروی درگ، جسم از حالت تعادل خارج و نسبت به کف فلوم از قائم خارج می‌شد. با کمک نیروی اعمالی از بازوی افقی، جسم مجدداً افقی می‌گردید. حال با تزریق آب و میناب از موازات جریان و به فاصله ۲۷ سانتی‌متری به روی مرکز جسم، اختلاف نیروی بین حالت تزریق آب و میناب اندازه‌گیری گردید. رابطه (۱-۳) بر تعادل جسم حاکم است.

$$R_x \times [h - ((y - 0.04) / 2)] = 0.35 \times 9.81 \times 10^{-3} \times R_w \quad (1-3)$$

در این رابطه R_x نیروی درگ و R_w وزن وزنه‌ها و h ارتفاع کل جسم و y عمق آب می‌باشد.

آزمایشات برای دبی‌های ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت تکرار و نتایج ثبت شد. در

شکل ۳-۹ نمونه‌ای از تزریق در عمق و دبی خاصی را بر طول مکعب مستطیل نشان داده شده است.



شکل ۳-۹- تزریق میناب بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی ۸۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۸ سانتی متر

بعد از بدست آوردن نیروی درگ، با توجه به رابطه نیروی درگ، به راحتی ضریب درگ قابل محاسبه می باشد.

$$F_{Df} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_{Df} A \quad (۲-۳)$$

که در آن C_{Df} ضریب درگ که تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی سطح است. V سرعت حرکت جسم در سیال است. A سطح مقطع جسم است و برای اجسام با سطح مقطع متغیر، مساحتی معادل است که باید در تعیین ضریب نیروی درگ مشخص گردد. ρ هم چگالی سیال است.

دیگر پارامتر بدون بعد بسیار مهم عدد رینولدز می باشد که برای بدست آوردن مقادیر آن، ابتدا ویسکوزیته مطلق آب و میناب در دمای ۲۵C و با دستگاه رئومتر بدست آمد که مقدار آن برای آب

معمولی ۰/۹۰۷۸ mpa.s و برای میناب ۰/۸۹۱ میباشد. همانطور که مشاهده می‌شود ویسکوزیته میناب کمتر از آب معمولی میباشد. و مقدار رینولدز در دو حالت از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (3-3)$$

که در این رابطه L طول مشخصه برای جسم مکعب مستطیلی، جذر مساحت بعد درگیر با تزریق در ارتفاع جسم درگیر آب میباشد.

با داشتن اعداد بدون بعد رینولدز و ضریب درگ، به راحتی می‌توان در یک نمودار دو حالت تزریق یعنی آب معمولی و میناب را با هم مقایسه نمود.

در این آزمایشات از جسم مکعب مستطیلی به عرض‌های ۳/۵ و ۵/۵ سانتی‌متر استفاده شد تا محدوده بیشتری از حالات مختلف جسم و جریان قابل بررسی باشد. شایان ذکر است که برای محاسبه مشخصه طولی در رینولدز، از اثر همزمان طول و عرض مقابل جریان به صورت ریشه حاصلضرب این دو استفاده شده است.

در این آزمایشات به وسیله دستگاه میکرومولینه توانستیم مقادیر سرعت در هر نقطه تزریق را بدست بیاوریم که در شکل ۳-۱۰ دستگاه مورد نظر مشاهده می‌شود.



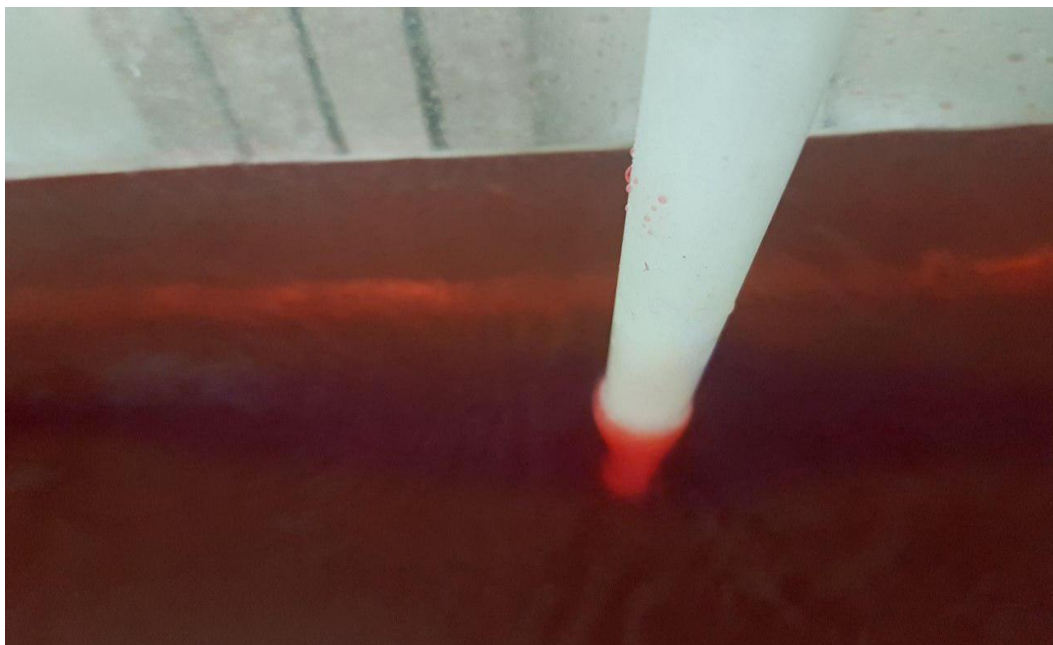
شکل ۳-۱۰- دستگاه میکرومولینه

۳-۳-۲- آزمایشات کاهش درگ برای جسم استوانه‌ای

جسم استوانه‌ای نیز مانند جسم مکعب مستطیل به ارتفاع ۴۴ cm انتخاب شد. قطر جسم ۲ cm بود که مانند اجسام قبلی در وسط فلوم و بصورت قائم قرار گرفت و فاصله جسم از کف ۴ cm انتخاب شد. دبی‌ها و عمق‌هایی که برای جسم مکعب مستطیل بکار گرفته شد، برای جسم استوانه‌ای نیز اعمال گردید. عملیات تزریق با آب معمولی و با میناب و تعیین مقادیر وزنه‌های تعادل نیز به گونه مشابهی انجام شد.

بعد از بدست آوردن مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق، نتایج را بصورت نمودار رینولدز - ضریب درگ نشان داده و دو حالت تزریق با هم مقایسه شد.

در شکل ۳-۱۱ تزریق میناب در دبی ۶۰۰۰ لیتربرساعت و عمق ۱۸ سانتی متر قابل مشاهده است.

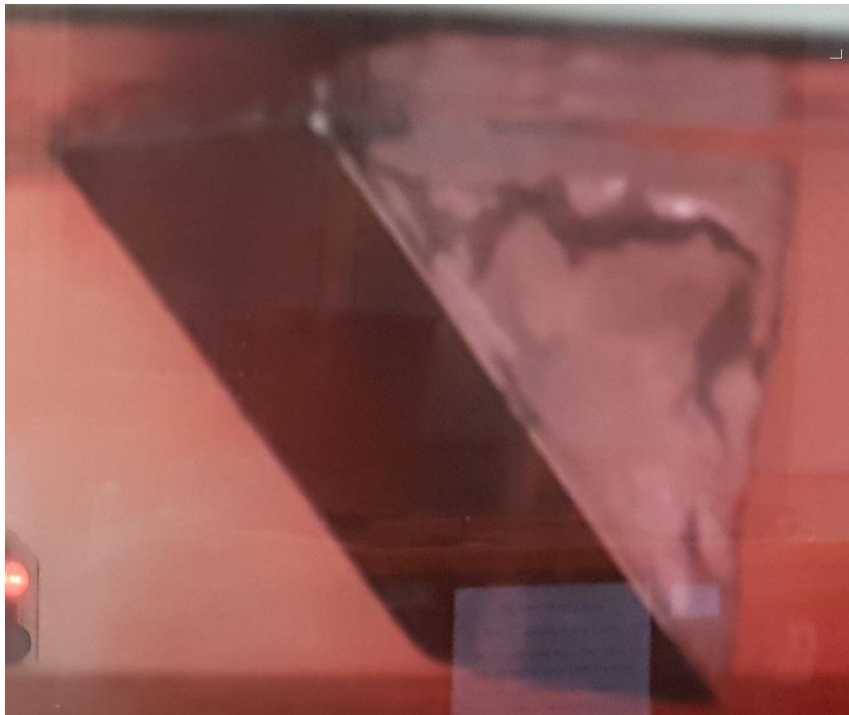


شکل ۳-۱۱- تزریق بر جسم استوانه ای در دبی ۶۰۰۰ لیتربرساعت و عمق ۱۸ سانتی متر

۳-۳-۳- آزمایش کاهش درگ برای جسم گوه شکل

آخرین جسمی که بعنوان آزمایش مورد بررسی قرار گرفت یک جسم گوه شکل می‌باشد که از ورق-های آلومینیوم با ضخامت ۱ mm ساخته شد که سطح شیبدار جسم دارای طول ۸.۵ cm و سطح‌های جانبی مثلثی به ضلع ۶ cm است. در این جسم، تزریق بر وسط سطح شیبدار انجام شد. بر خلاف اجسام قبلی، این جسم کمی پیچیده تر است و یکی از تفاوت‌های موجود با اجسام قبل این است که فاصله کف فلوم تا پایین ترین گوشه جسم ۱ cm می‌باشد.

در سطح بالایی گوه، سوراخی ایجاد کرده و لوله‌ای نازک و با ضخامت اندک را از آن عبور داده تا این لوله را بتوان در وسط نبشی که نگهدارنده اجسام در وسط فلوم بود، متصل کرده تا جسم گوه بتواند مانند اجسام قبلی در وسط فلوم قرار گیرد. (شکل ۳-۱۲)



شکل ۳-۱۲- جسم گوه شکل مورد آزمایش

سپس دبی ۴۰۰۰ لیتر بر ساعت را ایجاد نموده و در ابتدا به ازای این دبی، عمق ۸ cm را که از بقیه عمق‌ها کمتر است را ایجاد میکنیم. با توجه به اینکه طول سطح قائم گوه ۶ cm و فاصله از کف کانال

۱ cm می باشد. جسم گوه در تمامی عمق های مورد آزمایش مستغرق بوده است. سپس تزریق را مانند شرایط اجسام قبلی در دبی های دیگر و عمق های متفاوت انجام داده شده است.

طول مشخصه در این شکل، برای محاسبات ضریب درگ، عبارتست از عرض ورق شیب دار که ۶ cm است ضریب طول وتر (۸/۵cm) ضریب سینوس ۴۵ درجه، و چون در هر عمقی، جسم کاملاً در آب قرار دارد پس عمق ها بطور مستقیم تاثیری در محاسبات ضریب درگ و اعداد رینولدز ندارند.

چون لوله متصل به گوه، بسیار نازک می باشد در نتیجه وزن آن تاثیر زیادی در محاسبات ندارد و می توان لوله و گوه را یک جسم یکپارچه در نظر گرفت. برای محاسبات نیروی درگ، معادله ۳-۴ بکار رفت که در آن ارتفاع لوله ۴۱ cm بود و با نصف ارتفاع گوه جمع شد.

$$R_x \times \left[0.41 + \left(\frac{0.06}{2} \right) \right] = 0.35 \times 9.81 \times 10^{-3} \times R_w \quad (4-3)$$

در این رابطه R_x نیروی درگ و R_w وزن وزنه ها می باشد.

در شکل ۳-۱۲۳ نمونه ای از آزمایش تزریق با میناب در دبی ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۸ سانتی متر نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲۳- تزریق بر جسم گوه در دبی ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت و عمق ۸ سانتی متر

۳-۴- آنالیز ابعادی

همانطور که قبلاً گفته شد، برای نشان دادن مقایسه در دو حالت تزریق و همچنین چون محاسبه توزیع تنش و فشار بر اجسام دشوار است، از روش‌های تجربی استفاده شده است و مدل‌های کوچک را می‌توان توسط تحلیل ابعادی به مدل‌های بزرگتر و موجود در طبیعت مرتبط کرد. با توجه به پارامترهای موجود در آزمایشات ما می‌توان اعداد بدون بعد که در محاسبات نیرو درگ تاثیر دارد و به تفسیر و تحلیل نتایج کمک می‌کنند را بدست آورد.

متغیرهای موجود عبارتند از چگالی، سرعت، ارتفاع، عرض و ویسکوزیته (ρ, V, H, μ) که در بین آن‌ها می‌توان ρ, V, H و B را بعنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفت. سپس داریم:

$$\pi = f(\rho, V, B, H, \mu)$$

$$M^1 L^1 T^1 = (ML^{-2})^{X_1} (LT^{-1})^{X_2} (L)^{X_3} (ML^{-1}T^{-1})$$

برای توان M داریم:

$$0 = X_1 + 1 \longrightarrow X_1 = -1$$

برای توان T داریم:

$$0 = -X_2 - 1 \longrightarrow X_2 = -1$$

برای توان L داریم:

$$0 = -3X_1 + X_2 + X_3 - 1 \longrightarrow X_3 = -1$$

در نتیجه داریم:

$$\pi_1 = \frac{\mu}{\rho V B} \quad \text{و} \quad \pi_2 = \frac{\mu}{\rho V H}$$

برای یکتا شدن جواب، بجای دو پارامتر B و H از $D = \sqrt{BH}$ استفاده شد.

$$\pi = \rho^{-1} V^{-1} D^{-1} \mu \quad \longrightarrow \quad \pi = \frac{\mu}{\rho V D}$$

که این رابطه بیانگر عدد رینولدز می باشد.

حال برای بررسی ابعاد بزرگی عدد وبر و بحث راجع به اهمیت کشش سطحی داریم:

متغیرهای موجود عبارتند از چگالی، سرعت، ارتفاع، عرض و ویسکوزیته (ρ, V, L, σ) که در بین آنها می توان ρ, V, L را بعنوان متغیرهای تکراری در نظر گرفت. سپس داریم:

$$\pi = f(\rho, V, L, \sigma)$$

$$M^1 L^1 T^1 = (ML^{-2})^{X_1} (LT^{-1})^{X_2} (L)^{X_3} (MT^{-2})^{X_4}$$

برای توان M داریم:

$$0 = X_1 + 1 \quad \longrightarrow \quad X_1 = -1$$

برای توان T داریم:

$$0 = -X_2 - 2 \quad \longrightarrow \quad X_2 = -2$$

برای توان L داریم:

$$0 = -3 X_1 + X_2 + X_3 \quad \longrightarrow \quad X_3 = -1$$

در نتیجه داریم:

$$\pi_1 = \frac{\sigma}{\rho V^2 L}$$

که این رابطه بیانگر عدد وبر می‌باشد که نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است و در آزمایش‌های ما، بدلیل طول اجسام و شرایط آزمایش، می‌توان از کشش سطحی صرف نظر کرد.

فصل چهارم

تجزیه و تحلیل نتایج

آزمایش‌ها

۱-۴- نتایج آزمایش های صورت گرفته روی آب معمولی و آب حاوی میکرونانوحباب

۱-۱-۴- خواص سیال :

مشخصات اولیه آب معمولی و آب حاوی میکرونانو حباب از قبیل کدورت ، هدایت الکتریکی، ویسکوزیته، pH و دما در آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود اندازه گیری شده است که جدول ۱-۴، مقادیر را نشان می دهد. البته این خواص در نیروی درگ کاربرد ندارد و فقط صرفاً هدف از اندازه گیری این خواص این بوده است که نشان داده شود این ماده نه تنها برای محیط زیست مضر نیست بلکه مفید هم می باشد.

جدول ۱-۴- مشخصات اولیه آب میکرونانوحباب

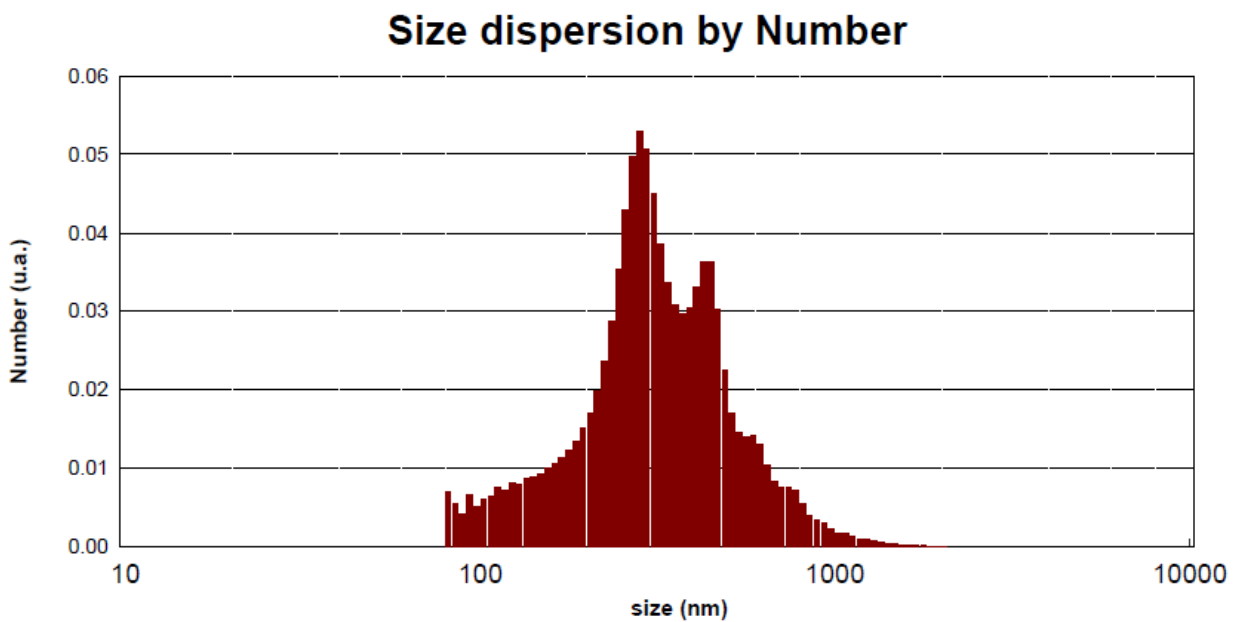
موارد اندازه گیری	مقادیر	
	آب معمولی	آب میکرونانوحباب
کدورت (ntu)	۱.۱۹	۹,۴
هدایت الکتریکی ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	۵۳۶	۷۹۰
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۴.۹	۲۵,۱
Ph	۸.۱۶	۸,۲۹
ویسکوزیته (mpa.s)	۰.۹۱	۰,۸۹

۱-۴-۲- ابعاد میکرونانوحباب های هوا

شکل ۱-۴، منحنی تعداد با ابعاد میکرو نانو حباب ها در بازه ی زمانی ۱ روزه پس از تولید را که توسط دستگاه Nano Particle Size Analyzer به دست آمده است، نشان می دهد. جدول ۲-۴ مشخصات بیشتر نتایج را نشان می دهد.

جدول ۴-۲- مشخصات نمونه میکرو نانوحباب

پارامتر	مقادیر
Dmean Number ^۱	۳۴۶,۰۴ nm
Dv50 ^۲	۶۴۵,۸۳ nm
Zaverage ^۳	۵۸۰,۱۳ nm



شکل ۴-۱ - منحنی توزیع ابعادی میکرو نانوحباب تولید شده در آب

همان طور که از منحنی قابل مشاهده است اندازه کوچکترین حباب ها تقریباً برابر ۸۵ nm و بزرگ ترین آن ها تقریباً برابر ۱۲۰۰ nm می باشند. (شیت کامل آزمایش همراه با نمودارهای مربوطه در پیوست موجود است)

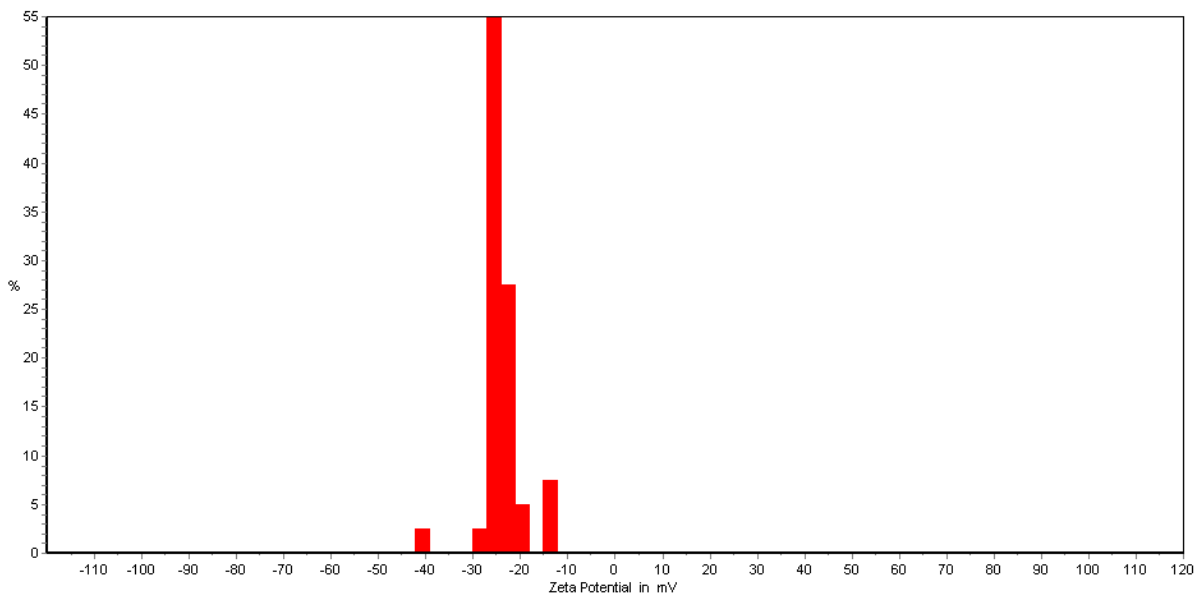
^۱ قطر متوسط میکرو نانوحباب ها

^۲ قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن ریزتر است.

^۳ میانگین قطر هیدرودینامیکی

۳-۱-۴ پایداری میکرو نانوحباب ها:

شکل ۴-۲ تغییرات زتا پتانسیل نمونه ۱ روزه آب میکرو نانو حباب دار، که آزمایش آن با دستگاه Zeta compact cad Instrument انجام شده است را نشان می دهد. (شیت کامل در پیوست موجود است)



شکل ۴-۲- نمودار تغییرات زتا پتانسیل

طبق نمودار بازه زتا تقریباً بین ۱۸ تا ۳۰ میلی ولت است هر چند میانگین زتا پتانسیل برابر mv $-23,78$ اندازه گیری شده است ولی ذراتی با بار تا 40 mv نیز گزارش شده است که نشان می دهد بخش هایی از حبابها می توانند بسیار پایدار باشد. شایان ذکر است بخش کم پایدارتر ذرات، میکرو حباب و پایدارترها از نانوحباب تشکیل یافته اند که طبق جدول ۲-۲ اگرچه این مقدار در بازه ناپایدار قرار دارد ولی طبق ذرات بزرگتر از 30 - در نمودار، می توان گفت که میکرونانو حباب های موجود در آب مادام العمر نیستند و پایداری چند روزه را تجربه می کنند.

۴-۲- آزمایشات کاهش نیروی درگ

این آزمایشات بر اجسام مختلف و به علت مقایسه ای بودن پژوهش بین تاثیر آب معمولی و آب حاوی میکرو نانو حباب (که در ادامه از نام اختصاری آن یعنی "میناب" استفاده خواهیم کرد) با ۳ الی ۴ بار تکرار برای هر نمونه تست، انجام شد.

همانطور که در فصل سوم شرح داده شد، اجسام مورد آزمایش شامل اجسام استوانه ای، مکعب مستطیل و جسم شیب دار می باشند که در ادامه نتایج و مقادیر اندازه گیری شده هر جسم قابل مشاهده است.

۴-۲-۱- آزمایشات جسم مکعب مستطیل و تزریق بر طول آن

آزمایش تزریق آب معمولی و میناب در دبی و عمق های مختلف صورت گرفته است. دبی های مورد نظر شامل دبی ۰/۰۰۱۱، ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۰۲۲ و ۰/۰۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه یا به ترتیب ۴۰۰۰، ۶۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت است.

۴-۲-۱-۱- آزمایشات تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۱

جدول ۳-۴ نتایج وزن وزنه های لازم برای رساندن جسم به حالت اولیه و قائم و مقادیر نیروی درگ را با استفاده از رابطه ۱-۳، در عمق های مختلف و در دو حالت تزریق با آب معمولی و میناب نشان می دهد.

جدول ۴-۳- وزن مورد نیاز برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ در طول جسم مکعب مستطیل در دبی $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال از کف (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$6/742 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۵	$5/771 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۷۱	۰/۰۷۱
۰,۱۴	$6/185 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴۴	$5/255 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۶۲	۰/۰۴۲
۰,۱۸	$5/785 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۳۶	$4/945 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۵۸	۰/۰۳۴
۰,۲۲	$4/961 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸۶	$4/254 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۱۷	۰/۰۲۹

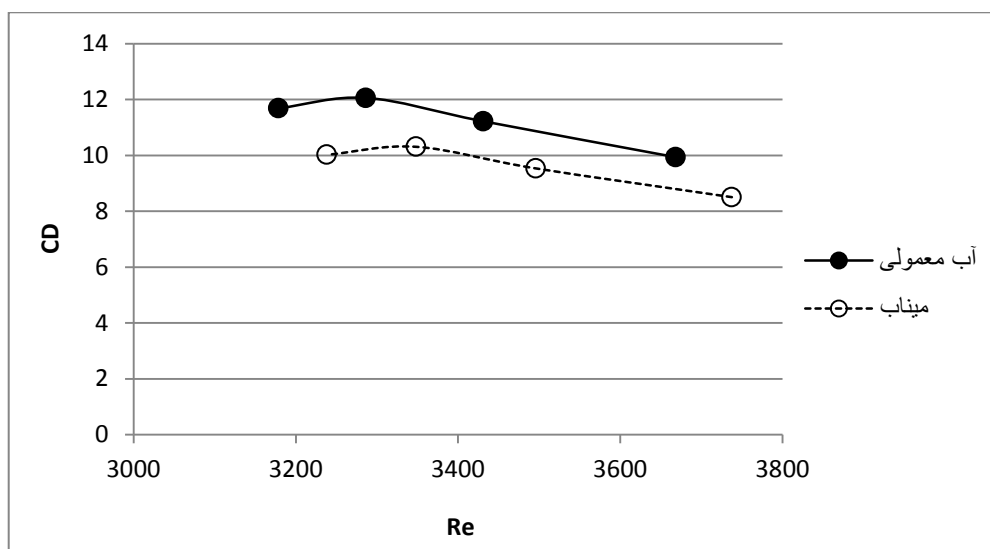
حال با داشتن نیروی درگ و با توجه به رابطه ۲-۳ مقادیر ضریب درگ و همچنین مقادیر عدد رینولدز را با توجه به رابطه ۳-۳ و متفاوت بودن ویسکوزیته برای دو حالت آب معمولی و میناب، را در جدول ۴-۴ می‌توان نشان داد. همچنین میزان در صد کاهش نیروی درگ نیز در این جدول قابل مشاهده است.

جدول ۴-۴- مقادیر ضریب درگ و رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی $0.0011 \frac{m^3}{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۹/۹۳	$3/67 \times 10^3$	۸/۴۹	$3/74 \times 10^3$	۱۴/۴۰٪
۰,۱۴	۱۱/۲۱	$3/43 \times 10^3$	۹/۵۲	$3/50 \times 10^3$	۱۵/۰۴٪
۰,۱۸	۱۲/۰۵	$3/29 \times 10^3$	۱۰/۲۹	$3/35 \times 10^3$	۱۴/۵۳٪
۰,۲۲	۱۱/۶۸	$3/18 \times 10^3$	۱۰/۰۱	$3/24 \times 10^3$	۱۴/۲۵٪

با توجه به داشتن مقادیر عدد رینولدز و ضریب درگ می توان منحنی مربوط به این مقادیر را در

شکل ۴-۳ مشاهده نمود.



شکل ۴-۳ تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی $0.0011 \frac{m^3}{s}$

۰/۰۰۱۱

با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که هر چقدر عدد رینولدز افزایش یابد، ضریب درگ نیز کاهش پیدا می‌کند و ضریب درگ میناب کمتر از ضریب درگ آب معمولی در یک عمق مشخص می‌باشد.

۴-۲-۱-۲- آزمایشات تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۶

همانند مرحله قبل از رابطه ۳-۱ برای نشان دادن نتایج وزن وزنه های لازم برای رسیدن به تعادل و مقادیر نیروی درگ، در جدول ۴-۵ در دو حالت تزریق در عمق های مختلف استفاده شده است.

جدول ۴-۵- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۶

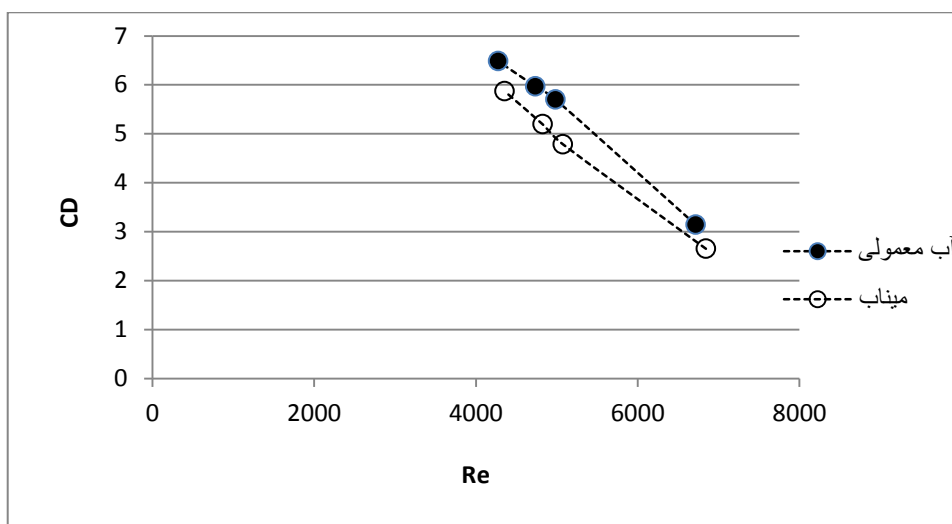
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$7/151 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۸۴	$6/032 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۹۲	۰/۱۳
۰,۱۴	$6/630 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۸۳	$5/562 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸۹	۰/۰۶۱
۰,۱۸	$5/946 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۵۱	$5/175 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸	۰/۰۴۹
۰,۲۲	$4/978 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸۸	$4/505 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۴۱	۰/۰۳۹

با توجه به رابطه ۳-۲ و ۳-۳ و به مانند مرحله قبل، مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز و همچنین میزان در صد کاهش نیروی درگ در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- مقادیر ضریب درگ و رینولدز در دو حالت تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۶

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۳/۱۴	$۶/۷۲ \times ۱۰^۳$	۲/۶۴	$۶/۸۴ \times ۱۰^۳$	۱۵/۶۵٪
۰,۱۴	۵/۶۹	$۴/۹۸ \times ۱۰^۳$	۴/۷۷	$۵/۰۸ \times ۱۰^۳$	۱۶/۱۱٪
۰,۱۸	۵/۹۶	$۴/۷۴ \times ۱۰^۳$	۵/۱۹	$۴/۸۳ \times ۱۰^۳$	۱۲/۹۷٪
۰,۲۲	۶/۴۸	$۴/۲۷ \times ۱۰^۳$	۵/۸۵	$۴/۳۶ \times ۱۰^۳$	۹/۵۰٪

با توجه به مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز منحنی مربوطه در دو حالت تزریق در شکل ۴-۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۴ تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۶

مشاهده می شود که وقتی دبی زیاد شود، در عمق های مشخص ضریب درگ کاهش می یابد.

۳-۱-۲-۴- آزمایشات تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۲

به مانند دبی های قبلی و با استفاده از رابطه ۳-۱ نتایج وزن وزنه های لازم برای رسیدن به تعادل و مقادیر نیروی درگ در جدول ۴-۷ در دو حالت تزریق نشان داده شده است.

جدول ۴-۷- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۲

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$7/530 \times 10^{-3}$	۰/۰۶۱۵	$6/404 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۲۳	۰/۱۵
۰,۱۴	$6/973 \times 10^{-3}$	۰/۰۶۱۳	$5/861 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۱۵	۰/۰۸
۰,۱۸	$6/197 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۷۴	$5/450 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۰۵	۰/۰۶۴
۰,۲۲	$5/596 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴۸	$4/976 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸۷	۰/۰۵۳

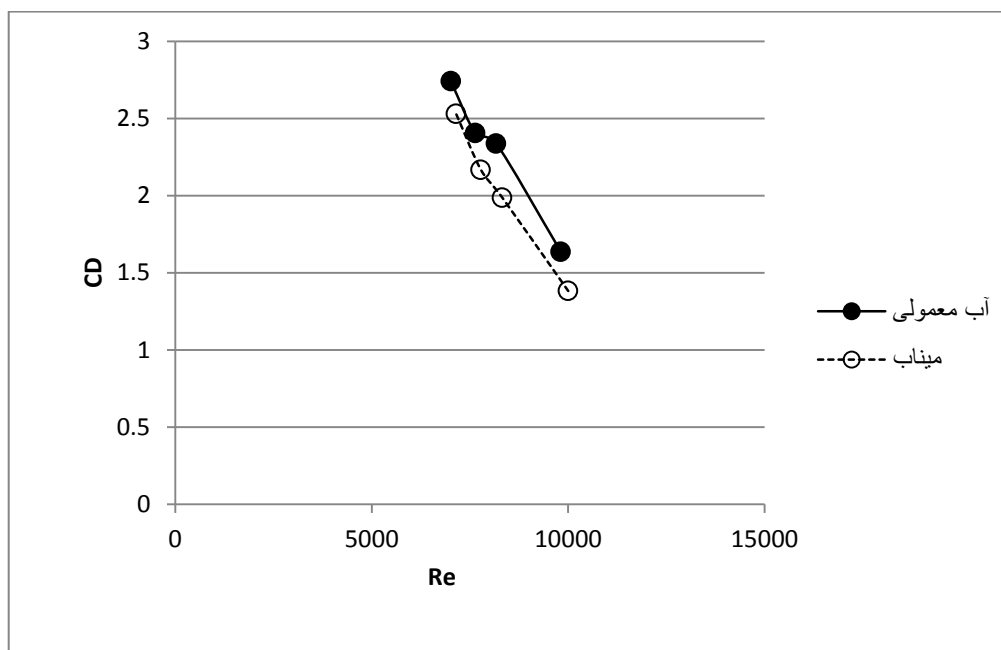
از رابطه ۳-۲ و ۳-۳ نتایج ضریب درگ و اعداد رینولدز و میزان در صد کاهش درگ در جدول ۴-۸ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۲

عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۲/۴۸	$۷/۷۵ \times ۱۰^۳$	۲/۱۱	$۷/۹۰ \times ۱۰^۳$	۱۴/۹۵٪
۰,۱۴	۳/۴۸	$۶/۵۴ \times ۱۰^۳$	۲/۹۲	$۶/۶۶ \times ۱۰^۳$	۱۵/۹۵٪
۰,۱۸	۳/۶۳	$۶/۱۹ \times ۱۰^۳$	۳/۲	$۶/۳۰ \times ۱۰^۳$	۱۲/۰۵٪
۰,۲۲	۳/۹۴	$۵/۸۱ \times ۱۰^۳$	۳/۵	$۵/۹۲ \times ۱۰^۳$	۱۱/۰۸٪

نمودار تغییرات مربوط به مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی $۰/۰۰۲۲ m^3/s$

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عمق و کاهش سرعت، ضریب درگ نیز افزایش یافته و نیروی درگ کاهش می‌یابد.

۴-۲-۱-۴- آزمایشات تزریق بر طول جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۷

در جدول ۴-۹ نتایج وزن وزنه های لازم و نیروی درگ برای آخرین دبی تست شده در شکل مورد نظر با استفاده از رابطه ۳-۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۹- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ بر جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۷

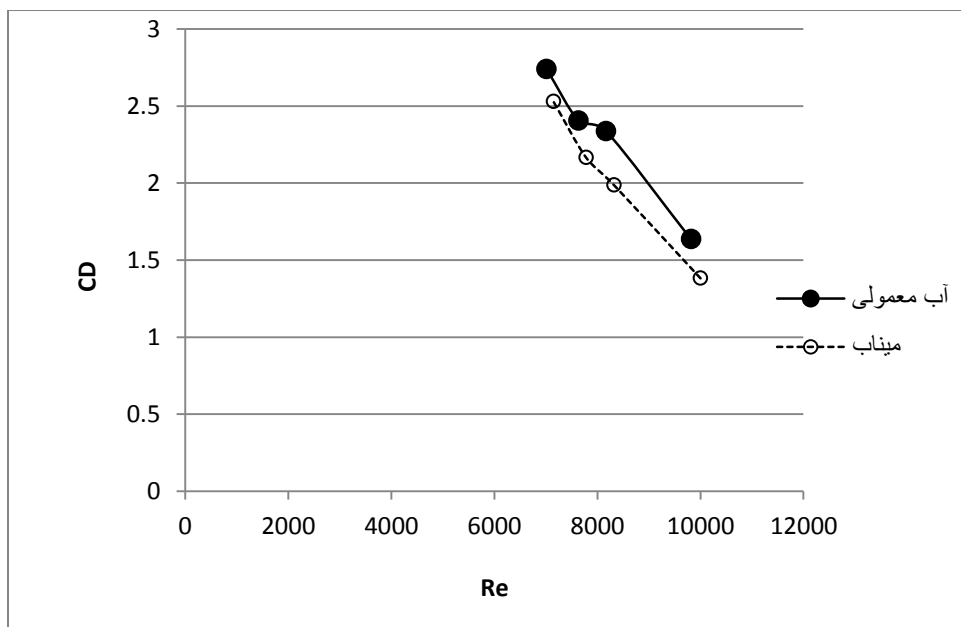
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$7/948 \times 10^{-3}$	۰/۰۶۴۹	$6/715 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴۸	۰/۱۹
۰,۱۴	$7/302 \times 10^{-3}$	۰/۰۶۴۲	$6/208 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴۶	۰/۱۰
۰,۱۸	$6/228 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۷۷	$5/611 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۲۰	۰/۰۷۹
۰,۲۲	$5/665 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۵۵	$5/230 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۱۲	۰/۰۶۴

در جدول ۴-۱۰ نتایج ضریب درگ و اعداد رینولدز و میزان در صد کاهش درگ با استفاده از رابطه ۳-۲ و ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۱۰- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۱/۶۳	$9/82 \times 10^3$	۱/۳۸	$10/00 \times 10^3$	۱۵/۵۱٪
۰,۱۴	۲/۳۳	$8/17 \times 10^3$	۱/۹۸	$8/32 \times 10^3$	۱۴/۹۸٪
۰,۱۸	۲/۴	$7/64 \times 10^3$	۲/۱۶	$7/78 \times 10^3$	۹/۹۱٪
۰,۲۲	۲/۷۳	$7/01 \times 10^3$	۲/۵۲	$7/15 \times 10^3$	۷/۶۹٪

نمودار تغییرات ضریب درگ و عدد رینولدز برای دو حالت آب معمولی و میناب در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر طول مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۷

و در آخر نتیجه می‌شود که هر چقدر دبی سیال افزایش یابد، نیروی درگ نیز افزایش می‌یابد و از طرفی دیگر، ضریب درگ نیز با افزایش دبی در عمق‌های مشابه کاهش می‌یابد.

همانطور که مشاهده شد بیشترین مقدار ضریب درگ در دبی پایین تر و سرعت‌های بالا بدست می‌یابد و در این شکل و تزریق به بعد طول مکعب مستطیل میزان تغییرات کاهش درگ بین ۷/۶۸٪ الی ۱۵/۹۵٪ می‌باشد.

۲-۲-۴- آزمایشات جسم مکعب مستطیل و تزریق بر عرض آن

شکل مورد آزمایش همان شکل قبلی است با این تفاوت که ایندفعه تزریق بر بُعد کوچک و عرض آن وارد می‌شود. آزمایش تزریق آب معمولی و میناب در دبی و عمق‌های مختلف صورت گرفته است. دبی‌های مورد نظر شامل دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱, ۰/۰۰۱۶, ۰/۰۰۲۲ و ۰/۰۰۲۷ می‌باشد.

۲-۲-۴-۱- آزمایشات تزریق بر عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۱

جدول ۴-۱۱ نتایج وزن وزنه‌های لازم برای رساندن جسم به حالت اولیه و قائم و مقادیر نیروی درگ را با استفاده از رابطه ۳-۱، در عمق‌های مختلف و در دو حالت تزریق با آب معمولی و میناب نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۱- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۱

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$4/694 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸۳	$3/918 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۲۰	۰/۰۶۹
۰,۱۴	$4/349 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸۲	$3/555 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۱۲	۰/۰۴۰
۰,۱۸	$4/079 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۷۸	$3/010 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۷۹	۰/۰۳۳
۰,۲۲	$3/682 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۶۱	$2/906 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۸۴	۰/۰۲۸

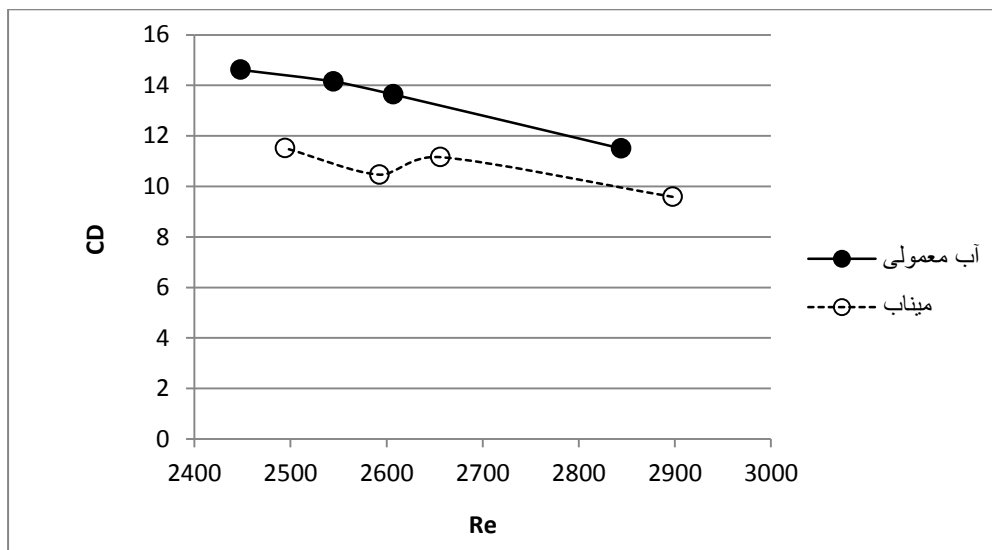
حال با داشتن نیروی درگ و با توجه به رابطه ۳-۲ مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز نیز با استفاده از رابطه ۳-۳ در دو حالت آب معمولی و میناب در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است. همچنین میزان در صد کاهش نیروی درگ نیز در این جدول قابل مشاهده است.

جدول ۴-۱۲- مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق بر عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۱

عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۱۱/۴۹	$۲/۸۴ \times ۱۰^۳$	۹/۵۸	$۲/۹۰ \times ۱۰^۳$	۱۶/۶۳٪
۰,۱۴	۱۳/۶۴	$۲/۶۱ \times ۱۰^۳$	۱۱/۱۴	$۲/۶۶ \times ۱۰^۳$	۱۸/۲۰٪
۰,۱۸	۱۴/۱۶	$۲/۵۴ \times ۱۰^۳$	۱۰/۴۵	$۲/۵۹ \times ۱۰^۳$	۲۶/۰۴٪
۰,۲۲	۱۴/۶۱	$۲/۴۵ \times ۱۰^۳$	۱۱/۵۱	$۲/۴۹ \times ۱۰^۳$	۲۱/۲۰٪

با توجه به مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز نمودار مربوط به این مقادیر در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در دو حالت تزریق بر عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۱

با توجه به اینک بعد جسم تغییر کرده است با مقایسه نتایج همین دبی در جسم قبلی مشاهده می-شود که وقتی بعد جسم تزریق وارده کوچکتر شود، نیروی درگ نیز کمتر می‌شود.

۴-۲-۲-۲- آزمایشات تزریق بر عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۶

از رابطه ۳-۱ برای نشان دادن نتایج وزن و زنه های لازم و نیروی درگ در جدول ۴-۱۳ استفاده شده است.

جدول ۴-۱۳- وزن مورد نیاز برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در عرض مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۱۶

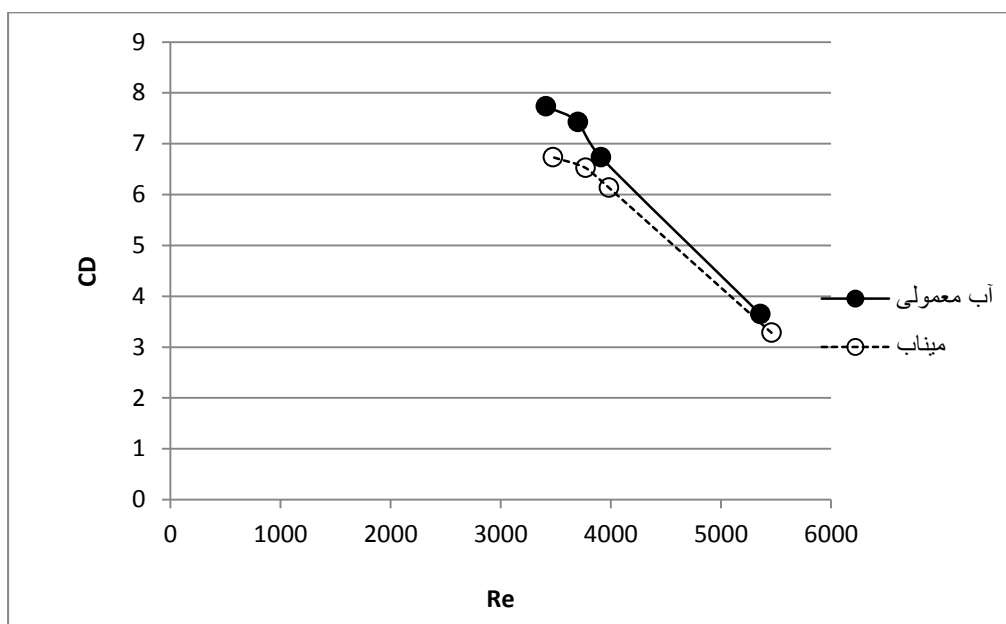
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$5/285 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۳۱	$4/755 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸۸	۰/۱۳
۰,۱۴	$4/826 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۲۴	$4/398 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸۷	۰/۰۶
۰,۱۸	$4/528 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۲	$3/978 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۶۹	۰/۰۴۸
۰,۲۲	$3/782 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۷	$3/292 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۲۲	۰/۰۳۹

نتایج مقادیر عدد رینولدز و ضریب درگ و میزان در صد کاهش درگ با کمک روابط ۳-۲ و ۳-۳ در جدول ۴-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.0016 \frac{m^3}{s}$

عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۳/۶۴	$5/36 \times 10^3$	۳/۲۷	$5/46 \times 10^3$	۱۰/۱۶٪
۰,۱۴	۶/۷۳	$3/91 \times 10^3$	۶/۱۴	$3/98 \times 10^3$	۸/۷۶٪
۰,۱۸	۷/۴۴	$3/70 \times 10^3$	۶/۵۳	$3/77 \times 10^3$	۱۲/۲۲٪
۰,۲۲	۷/۷۲	$3/41 \times 10^3$	۶/۷۲	$3/47 \times 10^3$	۱۲/۹۵٪

با توجه به مقادیر جدول ۴-۱۴ می توان نمودار مربوطه را در شکل ۴-۸ مشاهده کرد.



شکل ۴-۸- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.0016 \frac{m^3}{s}$

همانند جسم قبلی داریم که هر چقدر رینولدز افزایش یابد، ضریب درگ در هر دو حالت تزریق کاهش می یابد.

۴-۲-۳- آزمایشات تزریق بر عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۲

جدول ۴-۱۵ نتایج وزن وزنه های لازم و نیروی درگ را در دو حالت تزریق نشان می دهد.

جدول ۴-۱۵- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۲

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$6/149 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۰۲	$5/300 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۳۳	۰/۱۶
۰,۱۴	$5/606 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۹۳	$4/852 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۲۷	۰/۰۹
۰,۱۸	$5/205 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۸۲	$4/510 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۱۸	۰/۰۷۵
۰,۲۲	$4/795 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۷	$4/133 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۰۵	۰/۰۶

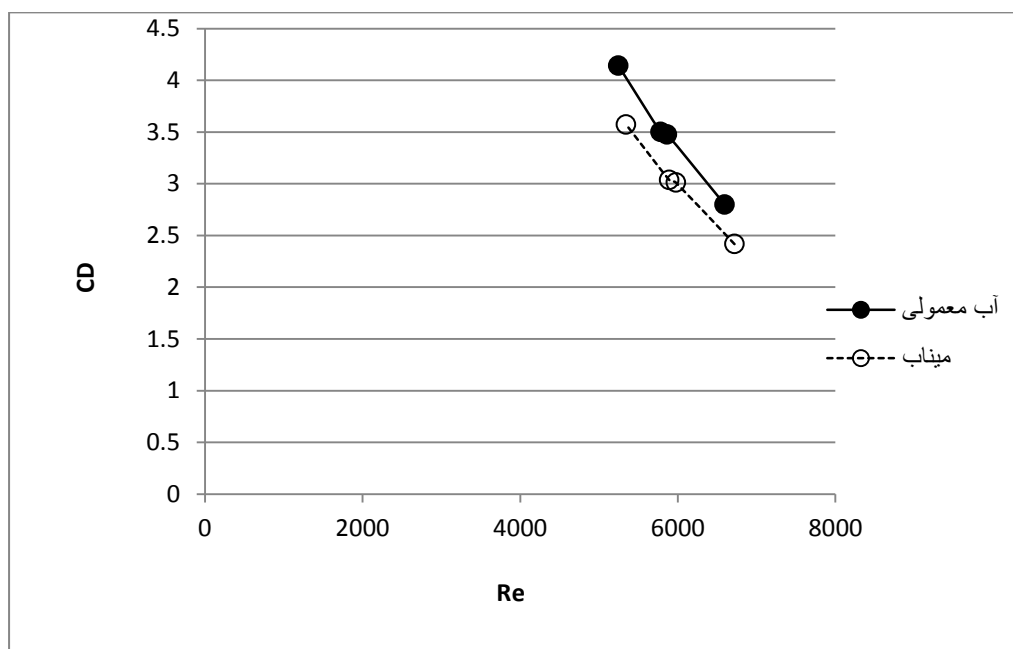
با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳ نتایج مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز و میزان در صد کاهش درگ

در جدول ۴-۱۶ آورده شده است.

جدول ۴-۱۶- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.0022 \frac{m^3}{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۲/۸۰	$6/59 \times 10^3$	۲/۴۱	$6/72 \times 10^3$	۱۳/۹۲٪
۰,۱۴	۳/۴۷	$5/87 \times 10^3$	۳/۰۱	$5/98 \times 10^3$	۱۳/۲۵٪
۰,۱۸	۳/۴۹	$5/78 \times 10^3$	۳/۰۳۳	$5/89 \times 10^3$	۱۳/۲۸٪
۰,۲۲	۴/۱۴	$5/25 \times 10^3$	۳/۵۷	$5/34 \times 10^3$	۱۳/۷۶٪

منحنی مربوطه به مقادیر عدد رینولدز و ضریب درگ در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۹- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.0022 \frac{m^3}{s}$

مشاهده می‌شود با کاهش سرعت، نیروی درگ کاهش و ضریب درگ افزایش می‌یابند.

۴-۲-۲-۴- آزمایشات تزریق بر عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s

۰/۰۰۲۷

با استفاده از رابطه ۱-۳ می توان مقادیر وزن وزنه ها و نیروی درگ را در جدول ۴-۱۷ نشان داد.

جدول ۴-۱۷- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در عرض جسم مکعب مستطیل در دبی m^3/s ۰/۰۰۲۷

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$6/711 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴۸	$5/444 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۴۴	۰/۱۸۵
۰,۱۴	$6/146 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۴	$4/944 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۱۸	۰/۱۱
۰,۱۸	$5/615 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۲	$4/447 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۱۲	۰/۰۸۸
۰,۲۲	$4/478 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۶۵	$3/959 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸۸	۰/۰۷

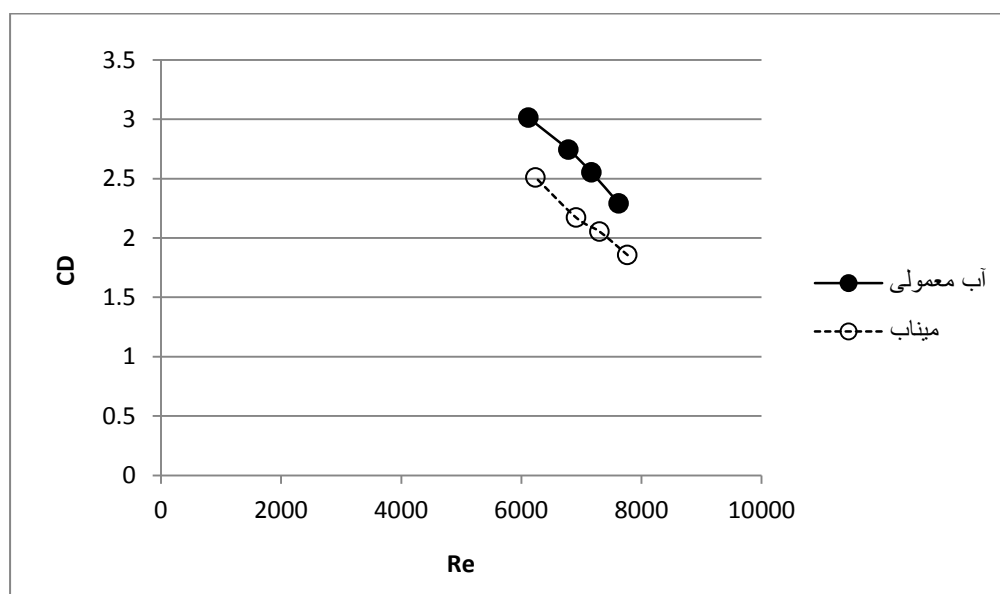
جدول ۴-۱۸ نتایج مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز را با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳ نشان می-

دهد.

جدول ۴-۱۸- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$.

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۲/۲۸	$7/63 \times 10^3$	۱/۸۵	$7/77 \times 10^3$	۱۸/۹۳٪
۰,۱۴	۲/۵۵	$7/17 \times 10^3$	۲/۰۵	$7/30 \times 10^3$	۱۹/۴۴٪
۰,۱۸	۲/۷۴	$6/79 \times 10^3$	۲/۱۷	$6/91 \times 10^3$	۲۰/۷۷٪
۰,۲۲	۳/۰۱	$6/12 \times 10^3$	۲/۵۱	$6/24 \times 10^3$	۱۶/۵۵٪

نمودار مربوط به مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز در نمودار ۴-۱۰ نمایش داده شد است.



شکل ۴-۱۰- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در عرض مکعب مستطیل در دبی $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$.

با نتایج موجود می‌توان بیان کرد که با افزایش دبی، نیروی درگ و ضریب درگ افزایش می‌یابد و هر چه سطح مقطع جسم کوچکتر شود نیروی درگ در همان عمق نسبت به سطح قبلی بزرگتر، کاهش می‌یابد.

میزان در صد کاهش درگ در این آزمایش ۸/۹۲٪ تا ۲۶/۰۴٪ می باشد. در این نوع جسم چون سطح مقطعی که تزریق بر آن وارد می شود نسبت به شکل قبلی کمتر شده است در نتیجه ضریب درگ این جسم نسبت به جسم قبل در همان دبی و عمق های مشخص تا حدودی بیشتر می شود.

۴-۲-۳- آزمایشات جسم استوانه

ایندفعه شکل مورد آزمایش، جسم استوانه ای شکل و از جنس پلیمر پلی آمید^۱ با نام تجاری ارتالون می باشد که دارای قطر ۲ cm است. همانند جسم مکعب مستطیل، آزمایشات این شکل نیز در عمق ها و دبی های تعیین شده صورت گرفته است که در ادامه به مشاهده و تفسیر نتایج در هر دبی می پردازیم.

۴-۲-۳-۱- آزمایشات تزریق جسم استوانه در دبی $0.0011 \text{ m}^3/\text{s}$

جدول ۴-۱۹ نتایج وزن مورد نیاز برای رسیدن جسم استوانه به حالت تعادل و مقادیر نیروی درگ را با استفاده از رابطه ۳-۱ نشان می دهد.

جدول ۴-۱۹- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.0011 \text{ m}^3/\text{s}$

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$2/92 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۳۸	$2/26 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۸۴	۰/۰۷
۰,۱۴	$2/52 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۲۱	$2/01 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۷۶	۰/۰۴۱
۰,۱۸	$2/41 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۲۳	$1/83 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۶۹	۰/۰۳۴
۰,۲۲	$1/73 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۶۹	$1/64 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۶	۰/۰۲۹

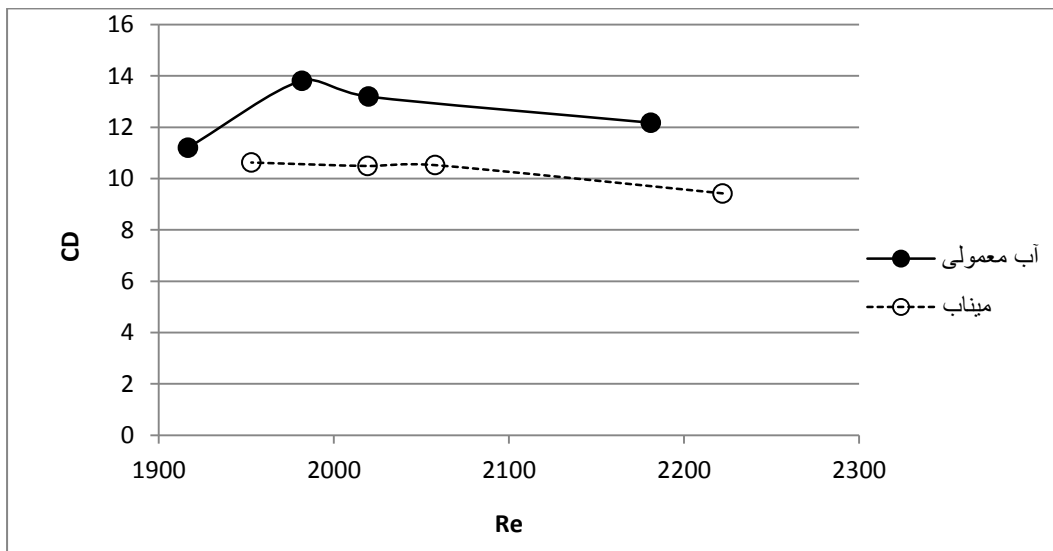
^۱ Polyamide polymer

جدول ۴-۲۰ مقادیر اعداد بی بعد را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲۰- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱

عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۱۲/۱۷	$۲/۱۸ \times ۱۰^۳$	۹/۴۲	$۲/۲۲ \times ۱۰^۳$	۲۲/۶۰٪
۰,۱۴	۱۳/۱۹	$۲/۰۱ \times ۱۰^۳$	۱۰/۵۲	$۲/۰۵ \times ۱۰^۳$	۲۰/۲۴٪
۰,۱۸	۱۳/۸۱	$۱/۹۸ \times ۱۰^۳$	۱۰/۴۸	$۲/۰۱ \times ۱۰^۳$	۲۴/۰۷٪
۰,۲۲	۱۱/۲۰	$۱/۹۱ \times ۱۰^۳$	۱۰/۶۲	$۱/۹۵ \times ۱۰^۳$	۵/۲۰٪

نمودار ۴-۱۱ مقایسه دو حالت تزریق را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی m^3/s ۰/۰۰۱۱

۴-۲-۳-۲- آزمایشات تزریق جسم استوانه در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

در جدول ۴-۲۱ نتایج وزن تعادل و نیروی درگ ثبت شده است.

جدول ۴-۲۱- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

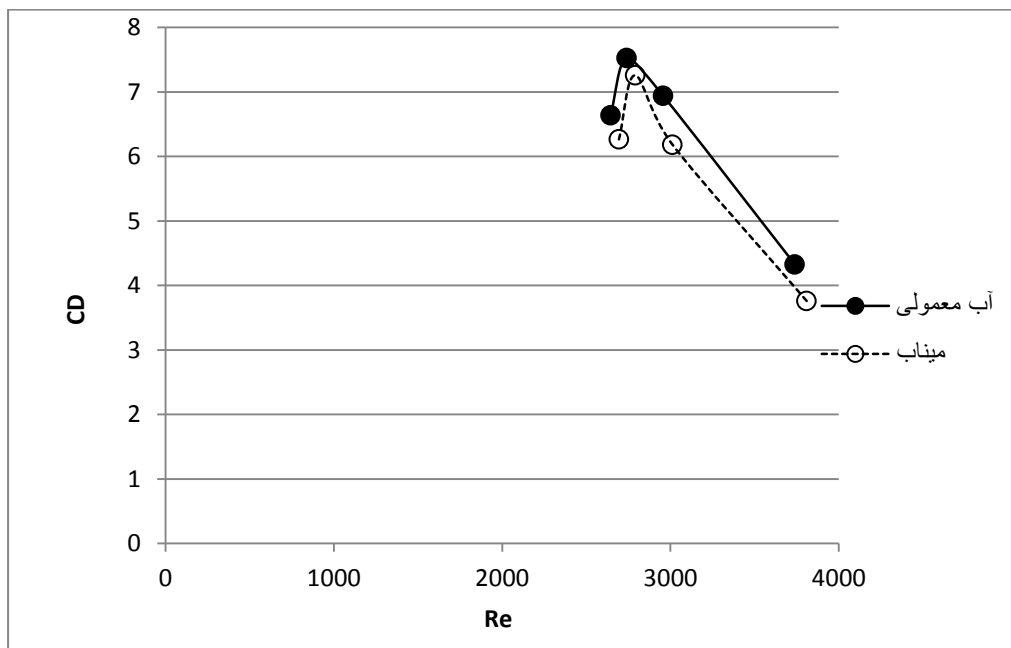
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$3/05 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۴۹۲۵	$2/65 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۱۶	۰/۱۲
۰,۱۴	$2/84 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۴۹۹۴	$2/53 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۲۲	۰/۰۶
۰,۱۸	$2/51 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۳	$2/42 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۲۴	۰/۰۴۷
۰,۲۲	$1/95 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۹	$1/84 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۸	۰/۰۴

مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳ در جدول ۴-۲۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۲- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m)					
۰,۰۸	۴/۳۲	$3/73 \times 10^3$	۳/۷۵	$3/80 \times 10^3$	۱۳/۱۱٪
۰,۱۴	۶/۹۴	$2/95 \times 10^3$	۶/۱۸	$3/01 \times 10^3$	۱۰/۹۲٪
۰,۱۸	۷/۵۲	$2/73 \times 10^3$	۷/۲۵	$2/79 \times 10^3$	۳/۵۹٪
۰,۲۲	۶/۶۳	$2/64 \times 10^3$	۶/۲۶	$2/69 \times 10^3$	۵/۶۴٪

بصورت منحنی ۴-۱۲ می توان ضرایب درگ را مقایسه کرد.



شکل ۴-۱۲- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

۴-۲-۳- آزمایشات تزریق جسم استوانه در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

مقادیر نیروی درگ در دو حالت تزریق در جدول ۴-۲۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۳- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

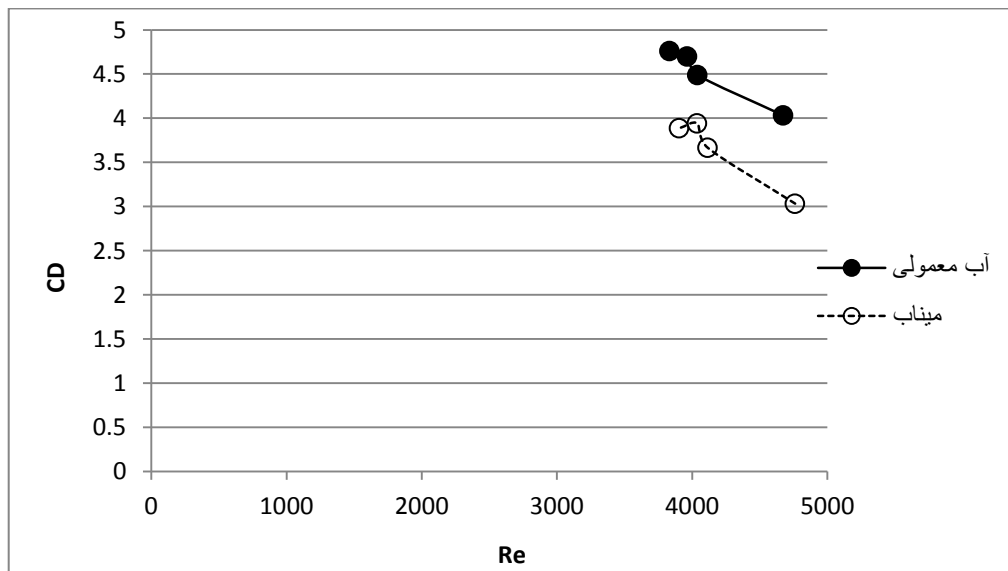
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$4/44 \times 10^{-3}$	۰,۰۳۶	$3/34 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۷	۰,۱۵
۰,۱۴	$3/43 \times 10^{-3}$	۰,۰۳۰۱۸۷	$2/8.0 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۴	۰,۰۸۲
۰,۱۸	$3/28 \times 10^{-3}$	۰,۰۳۰۴۲۷	$2/75 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۵	۰,۰۶۸
۰,۲۲	$2/94 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۸	$2/4.0 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۳	۰,۰۵۸

نتایج مقادیر بدون بعد نیز در جدول ۴-۲۴ آمده است.

جدول ۴-۲۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$.

عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۴/۰۳	$4/67 \times 10^3$	۳/۰۳	$4/76 \times 10^3$	۲۴/۷۷٪
۰,۱۴	۴/۴۸	$4/03 \times 10^3$	۳/۶۶	$4/11 \times 10^3$	۱۸/۳۷٪
۰,۱۸	۴/۷۰	$3/96 \times 10^3$	۳/۹۴	$4/03 \times 10^3$	۱۶/۱۶٪
۰,۲۲	۴/۷۶	$3/83 \times 10^3$	۳/۸۸	$3/90 \times 10^3$	۱۸/۳۷٪

نمودار ضریب درگ و عدد رینولدز در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.022 \text{ m}^3/\text{s}$.

۴-۲-۳-۴- آزمایشات تزریق جسم استوانه در دبی $0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$

نتایج وزنه‌ها برای تعادل و نیروی درگ در جدول ۴-۲۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲۵- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم استوانه در دبی $0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$

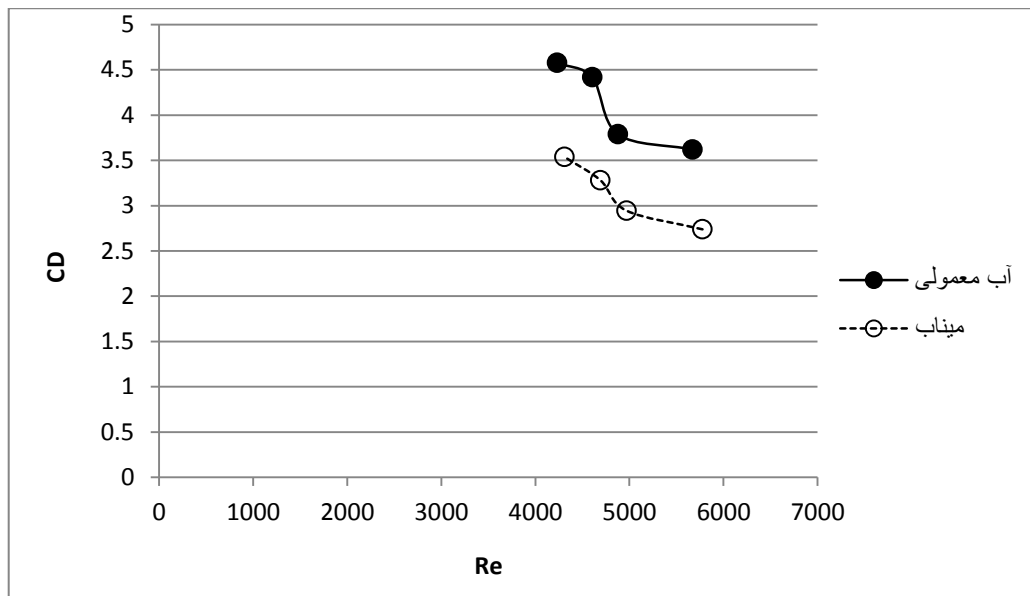
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$5/87 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۷	$4/44 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۶۲	۰/۱۸۲
۰,۱۴	$4/22 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۷	$3/28 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۸۸	۰/۰۹۹
۰,۱۸	$4/16 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸	$3/09 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۸۶	۰/۰۷۹
۰,۲۲	$3/44 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۳	$2/66 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۶	۰/۰۶۴

سپس مقادیر ضرایب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق در جدول ۴-۲۶ ثبت شده است.

جدول ۴-۲۶- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۳/۶۲	$5/67 \times 10^3$	۲/۷۳	$5/77 \times 10^3$	۲۴/۳۶٪
۰,۱۴	۳/۷۸	$4/87 \times 10^3$	۲/۹۴	$4/96 \times 10^3$	۲۲/۲۷٪
۰,۱۸	۴/۴۱	$4/60 \times 10^3$	۳/۲۸	$4/69 \times 10^3$	۲۵/۷۲٪
۰,۲۲	۴/۵۷	$4/23 \times 10^3$	۳/۵۳	$4/30 \times 10^3$	۲۲/۶۷٪

نمودار ۴-۱۴ مقایسه بین دو حالت تزریق را برای ضرایب درگ و اعداد رینولدز نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۴- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم استوانه در دبی $0.027 \text{ m}^3/\text{s}$.

در آزمایشات جسم استوانه نیروی درگ نسبت به دو شکل قبلی کمتر شده است چون سطح مقطع جسم استوانه نسبت به دو شکل قبلی کمتر است و رینولدز جسم استوانه نیز نسبت به دو شکل قبلی کمتر است.

۴-۲-۴- آزمایشات جسم گوه شکل

آخرین جسمی که مورد آزمایش قرار گرفت، جسم گوه شکل بود که از ورق‌های آلومینیوم با سطح شیبدار به طول ۸.۵ cm و سطح جانبی مثلثی به ضلع ۶ cm ساخته شد و تزریق بر سطح شیبدار انجام شد. به مانند اجسام قبلی، آزمایش در همان دبی و عمق‌های مورد نظر انجام شد و مهمترین تفاوت این جسم با اجسام قبلی، فاصله کف فلوم تا پایین‌ترین گوشه جسم می‌باشد که در این آزمایش برابر ۱ cm است.

۱-۴-۲-۴- آزمایشات تزریق جسم گوه شکل در دبی $0.0011 \text{ m}^3/\text{s}$

جدول ۴-۲۷ نتایج وزن مورد نیاز برای رسیدن جسم گوه شکل به حالت تعادل و مقادیر نیروی

درگ را با استفاده از رابطه ۳-۴ نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲۷- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی $0.0011 \text{ m}^3/\text{s}$

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m)					
۰,۰۸	$4/14 \times 10^{-3}$	۰,۰۳۲	$3/29 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۵	۰,۰۶۷
۰,۱۴	$3/78 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۹	$2/91 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۲	۰,۰۳۷
۰,۱۸	$3/52 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۷	$2/43 \times 10^{-3}$	۰,۰۱۸	۰,۰۲۹
۰,۲۲	$3/46 \times 10^{-3}$	۰,۰۲۶	$2/12 \times 10^{-3}$	۰,۰۱۶	۰,۰۲۴

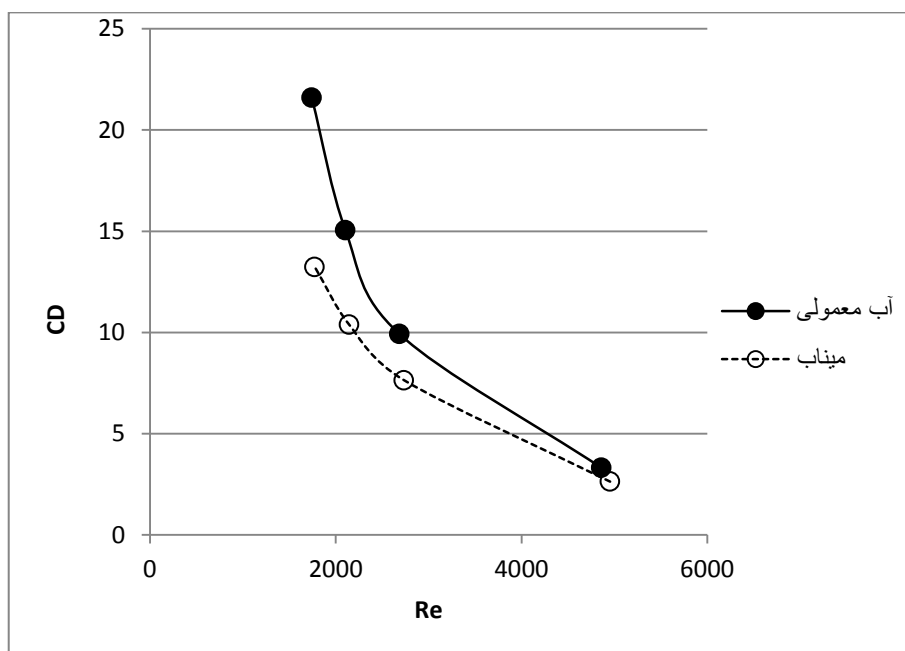
همانطور که از نتایج پیداست، هر چقدر سرعت افزایش یابد، نیروی درگ نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به رابطه ۳-۲ و ۳-۳ مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جدول ۴-۲۸ قابل مشاهده است.

جدول ۴-۲۸- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0011 \frac{m^3}{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۳/۳۱	$4/86 \times 10^3$	۲/۶۳	$4/95 \times 10^3$	۲۰/۵۳٪
۰,۱۴	۹/۹۲	$2/68 \times 10^3$	۷/۶۴	$2/73 \times 10^3$	۲۳/۰۲٪
۰,۱۸	۱۵/۰۴	$2/10 \times 10^3$	۱۰/۳۸	$2/14 \times 10^3$	۳۰/۹۷٪
۰,۲۲	۲۱/۵۹	$1/74 \times 10^3$	۱۳/۲۳	$1/77 \times 10^3$	۳۸/۷۳٪

در شکل ۴-۱۵ مقایسه دو حالت تزریق بر حسب اعداد بدون بعد نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0011 \frac{m^3}{s}$

مشاهده می‌شود که میزان کاهش درگ با افزایش سرعت جریان آزاد کاهش می‌یابد.

۲-۴-۲-۴- آزمایشات تزریق جسم گوه شکل در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

ایندفعه آزمایشات با دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$ انجام پذیرفت که نتایج نیروی درگ در جدول ۴-۲۹ آورده شده است.

جدول ۴-۲۹- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی $0.0016 \text{ m}^3/\text{s}$

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$5/01 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۹	$3/85 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۰	۰/۰۹۸
۰,۱۴	$3/99 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۱	$3/43 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۶	۰/۰۵۴
۰,۱۸	$3/87 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۰	$3/12 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۴	۰/۰۴۱
۰,۲۲	$3/48 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۷	$2/55 \times 10^{-3}$	۰/۰۱۹	۰/۰۳۵

مشاهده می‌شود که اگر دبی افزایش یابد، در همان عمق و سطح مقطع مشخص، نیروی درگ نسبت

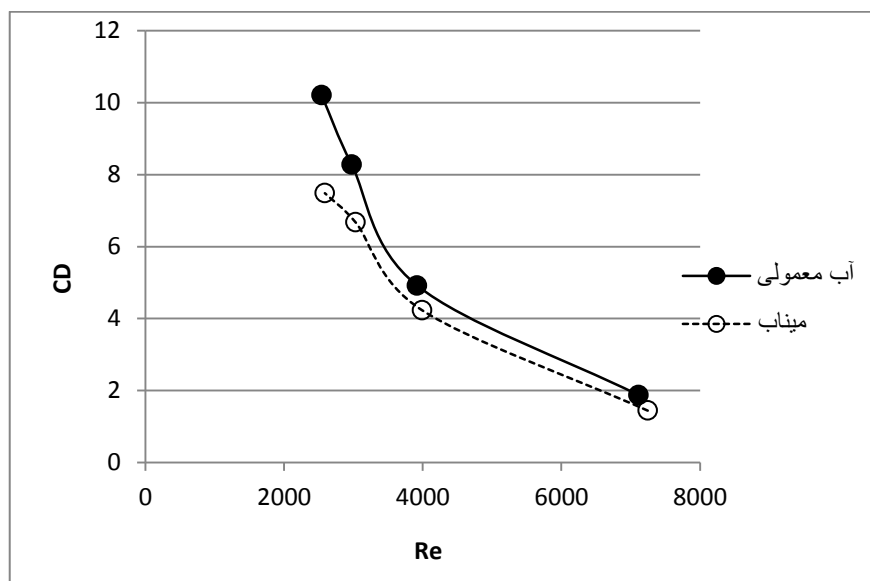
به نیروی درگ در دبی قبل، افزایش می‌یابد.

سپس در جدول ۴-۳۰ با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳ نتایج ضریب درگ و اعداد رینولدز نشان داده شده است.

جدول ۴-۳۰- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0016 \frac{m^3}{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان درصد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۱/۸۷	$7/11 \times 10^3$	۱/۴۴	$7/24 \times 10^3$	۲۳/۱۵٪
۰,۱۴	۴/۹۱	$3/91 \times 10^3$	۴/۲۲	$3/99 \times 10^3$	۱۴/۰۴٪
۰,۱۸	۸/۲۷	$2/97 \times 10^3$	۶/۶۷	$3/03 \times 10^3$	۱۹/۳۸٪
۰,۲۲	۱۰/۲۱	$2/53 \times 10^3$	۷/۴۸	$2/58 \times 10^3$	۲۶/۷۲٪

نتایج مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در نمودار ۴-۱۶ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴-۱۶- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0016 \frac{m^3}{s}$

مشاهده می شود که ضرایب درگ نسبت به دبی قبلی، در همان سطح مقطع های مشخص، کاهش

یافته است.

۴-۲-۳- آزمایشات تزریق جسم گوه شکل در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

با استفاده از رابطه ۳-۴ به مانند مراحل قبل، نتایج وزن وزنه‌ها برای رسیدن به حالت تعادل و نیروی درگ در جدول ۴-۳۱ آورده شده است.

جدول ۴-۳۱- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

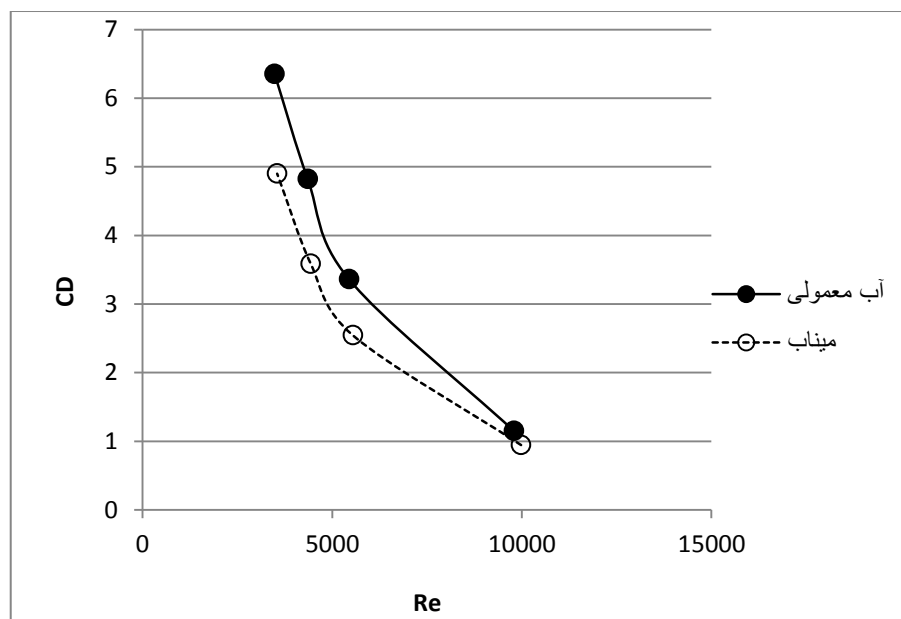
وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	$5/82 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۵	$4/79 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۷	۰/۱۳۵
۰,۱۴	$5/26 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۱	$3/98 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۱	۰/۰۷۵
۰,۱۸	$4/83 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۷	$3/59 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۸	۰/۰۶
۰,۲۲	$4/07 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۱	$3/14 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۴	۰/۰۴۸

با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳ نتایج ضریب درگ و اعداد رینولدز در جدول ۴-۳۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۳۲- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
عمق سیال (m) ۰,۰۸	۱/۱۴	$9/79 \times 10^3$	۰/۹۴	$9/98 \times 10^3$	۱۷/۷۰٪
۰,۱۴	۳/۳۶	$5/44 \times 10^3$	۲/۵۴	$5/54 \times 10^3$	۲۴/۳۳٪
۰,۱۸	۴/۸۲	$4/35 \times 10^3$	۳/۵۸	$4/43 \times 10^3$	۲۵/۶۷٪
۰,۲۲	۶/۳۵	$3/48 \times 10^3$	۴/۸۹	$3/54 \times 10^3$	۲۲/۸۵٪

نمودار ۴-۱۷ نشان دهنده ضرایب درگ و اعداد رینولدز در دو حالت تزریق است.



شکل ۴-۱۷- تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$

۴-۴-۲-۴- آزمایشات تزریق جسم گوه شکل در دبی $0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$

در جدول ۴-۳۳ نتایج وزن وزنه‌ها برای رسیدن به تعادل و مقادیر نیروی درگ نشان داده شده است.

جدول ۴-۳۳- وزن مورد نیاز برای تعادل و نیروی درگ در جسم گوه شکل در دبی $0.027 \frac{m^3}{s}$

وزن مورد نظر برای رسیدن به تعادل و نیروی درگ عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		سرعت در نقطه تزریق (m/s)
	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	وزن مورد نیاز (kg)	نیروی درگ (N)	
۰,۰۸	$6/42 \times 10^{-3}$	۰/۰۵۰	$4/93 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۸	۰/۱۶
۰,۱۴	$5/46 \times 10^{-3}$	۰/۰۴۲	$4/04 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۱	۰/۰۹
۰,۱۸	$5/10 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۹	$3/91 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۰	۰/۰۷
۰,۲۲	$4/32 \times 10^{-3}$	۰/۰۳۳	$3/25 \times 10^{-3}$	۰/۰۲۵	۰/۰۵۸

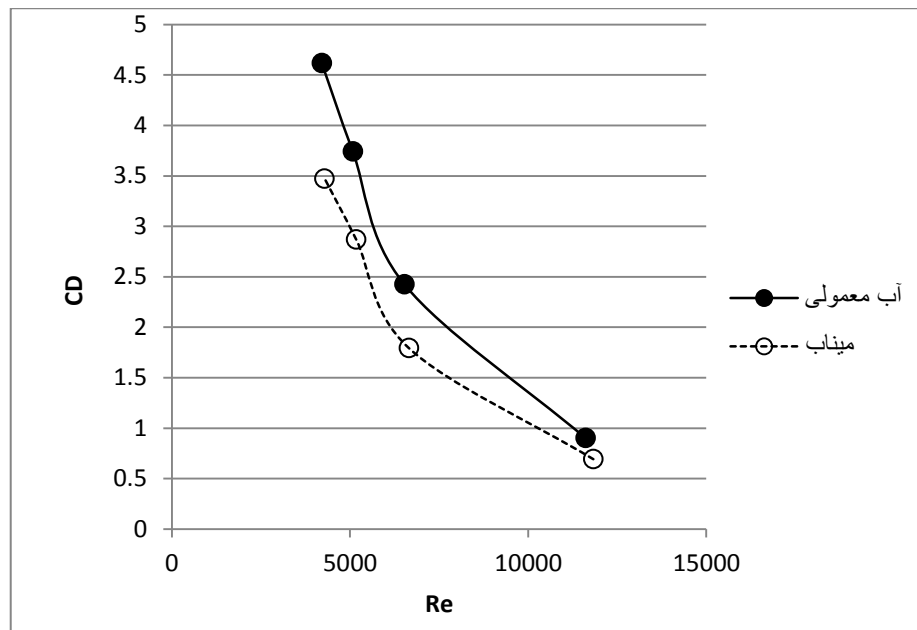
مشاهده می‌شود که در جسم گوه شکل بیشترین مقدار نیرو مربوط به حالتی است که بیشترین دبی را دارد و سطح مقطع فلوم پر از آب، کم می‌باشد.

جدول ۴-۳۴ نیز با استفاده از روابط ۲-۳ و ۳-۳، نشان دهنده‌ی مقادیر ضریب درگ و اعداد رینولدز می‌باشد.

جدول ۴-۳۴- مقادیر ضریب درگ و عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.027 \frac{m^3}{s}$

ضریب درگ و عدد رینولدز در دو حالت تزریق عمق سیال (m)	آب معمولی		میناب		میزان در صد کاهش ضریب درگ
	ضریب درگ	عدد رینولدز	ضریب درگ	عدد رینولدز	
۰,۰۸	۰/۹۰	$11/61 \times 10^3$	۰/۶۹	$11/82 \times 10^3$	۲۳/۲۱٪
۰,۱۴	۲/۴۲	$6/53 \times 10^3$	۱/۷۹	$6/65 \times 10^3$	۲۶/۰۱٪
۰,۱۸	۳/۷۴	$5/07 \times 10^3$	۲/۸۶	$5/17 \times 10^3$	۳۵/۳۳٪
۰,۲۲	۴/۶۱	$4/20 \times 10^3$	۳/۴۷	$4/28 \times 10^3$	۲۴/۷۷٪

نمودار ۱۸-۴ نشان دهنده‌ی تفاوت دو حالت تزریق بر حسب اعداد بدون بعد می‌باشد.



شکل ۱۸-۴ - تغییرات ضریب درگ بر حسب عدد رینولدز در جسم گوه شکل در دبی $0.0027 \text{ m}^3/\text{s}$

مشاهده می‌شود که کمترین ضریب درگ برای رینولدز بالا و حدود ۱۱۸۲۹ می‌باشد و هر چه مقدار رینولدز کاهش یابد، ضریب درگ نیز افزایش می‌یابد. در این شکل میزان کاهش درگ از حدود $0.14/0.4$ تا $38/73$ می‌باشد.

در مقایسه بین این اشکال بطور قطع نمی‌توان در مورد ضریب درگ اظهار نظر کرد ولی تقریباً می‌توان بیان کرد که ضریب درگ در شکل گوه جسم از بقیه جسم‌ها کمتر می‌باشد و دلیل آن تاثیر سطح مقطع جسم و سرعت می‌باشد. و همچنین تا حدودی ضریب درگ در جسم مکعب مستطیل وقتی که تزریق بر بعد طول وارد می‌شود از جسم استوانه‌ای و حالت تزریق بر عرض جسم مکعب مستطیل کمتر است.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

- ✓ تزریق میکرونانوحباب باعث تغییر لزجت و دانسیته می شود.
- ✓ در جسم استوانه‌ای در دبی‌های ۰/۰۰۱۱ و ۰/۰۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه که به ترتیب کمترین و بیشترین سرعت ۰/۰۲۹ تا ۰/۱۸ متر بر ثانیه می باشد هر چه سرعت در این بازه بیشتر شود ضریب درگ از ۱۱/۲۰ تا ۳/۶۲ تغییر می کند و کاهش می یابد.
- ✓ در جسم مکعب مستطیل در دبی‌های ۰/۰۰۱۱ و ۰/۰۰۲۷ متر مکعب بر ثانیه که به ترتیب کمترین بازه سرعت ۰/۰۲۹ تا ۰/۱۹ متر بر ثانیه می باشد، هر چه سرعت افزایش پیدا کند نیروی درگ نیز از ۰/۰۴۸ نیوتن تا ۰/۰۶۴ نیوتن تغییر می کند و نیروی درگ نیز افزایش می یابد.

۵-۲- پیشنهادات برای انجام مطالعات بعدی

- ۱- بررسی آزمایش در شرایط سرعت ثابت (تونل آب)
- ۲- بررسی نوسانات سرعت تحت تاثیر تزریق میکرونانوحباب
- ۳- بررسی تغییرات میدان ورتیکال سیال تحت تاثیر تزریق میکرونانوحباب
- ۴- بررسی تاثیر زبری اجسام مورد آزمایش
- ۵- بررسی جسم استوانه‌ای با قطرهای مختلف و مقایسه با یکدیگر
- ۶- تعیین نیروی درگ و انجام آزمایشات بر مدل کروی شکل
- ۷- تاثیر دادن پارامتر زاویه و خارج کردن اجسام از حالت تعادل و بررسی آن

منابع و مراجع

● منابع داخلی

- جعفرزاده س، نوری ن م، (۱۳۸۲)، پایان نامه ارشد: "تحلیل پدیده کاهش درگ به کمک تزریق میکرو حباب‌ها حول اجسام دو بعدی با استفاده از روش گردابه‌های تصادفی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- جهانمیری م، بحرینی ع، (۱۳۹۰)، "روش‌های نوین کاهش نیروی درگ اجسام غوطه ور در سیال" مجلسه مهندسی مکانیک، شماره ۸۱، سال بیستم.
- ساقری‌چی‌ها م، نوری ن م، (۱۳۸۴)، پایان نامه ارشد: "تحلیل اثر تزریق میکرو حباب بر ویژگی‌های جریان آرام و درهم و بررسی اثرات آن بر کاهش اجسام دو بعدی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- سخاوت س، فرهانیه ب، (۱۳۸۴)، پایان نامه ارشد: "تحلیل دو بعدی تلفات اصطکاکی جریان همراه با میکرو حباب در کانال‌های مستطیلی به روش گردابه‌های 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 گردابه‌های تصادفی"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- صادق حسنی ص، سمیعی ل، (۱۳۸۷) "روش دینامیک تفرق نوری برای مطالعه اندازه نانو ذرات"، ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۳۰، سال هفتم.

- صادقی ک، (۱۳۸۵) " کاهش ضریب پسای اجرام متحرک در زیر آب با استفاده از روش تزریق محلولهای رقیق پلیمری"، دهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه یزد.
- مریمی ر، جوادیپور م، فراهت س، شفیعی میام م ح، (۱۳۹۳) " کاهش درگ اصطکاکی به وسیله حباب‌های هوا در یک سیستم تیلور-کوئت عمودی و در جریان آشفته" مجله مهندسی مکانیک مدرس، شماره ۱، دوره ۱۴، صص ۱۱۳-۱۲۲
- مظفری نائینی ر، (۱۳۹۲)، پایان نامه ارشد: " بررسی الگوهای 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 توربولانس با استفاده از سطوح هیدروفوبیک"، دوازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران، زیباکنار.
- نوری ن م، سررشته‌داری ع، سخاوت س، (۱۳۸۶)، " مروری بر تحقیقات و دستاوردها در پدیده کاهش درگ به وسیله تزریق میکرو حباب"، نهمین همایش صنایع دریایی، نور-استان مازندران.

• International 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), " Fundamental mechanics of fluids", University of Toronto.
- Deutsch S, Castano J.,(1986)." Microbubble skin friction reduction on an axisymmetric body",The Physics of fluids,29,11, pp3590-3597.

- Ferrante A, Elghobashi S,(2005),” Reynolds number effect on drag reduction in a microbubble-laden spatially developing turbulent boundary layer”, *Journal of Fluid Mechanics*, 543, pp.93-106.
- Fontaine 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, 2,pp.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 M.M., Kato H, Yamaguchi H., Maeda M. , 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., Miozzi M., Campana E.F, Piva R., (2010) , " Drag reduction by microbubbles in a turbulent boundary layer" *Physics of Fluids*, 22,11, p.115104.
- 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
- Kirby B.J, (2010), "Micro-and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices" ,Cambridge University Press.

- Kumagai I., Takahashi Y , Murai 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, pp.356-363
- McCORMICK 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.
- Sayyaadi 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 , Matsumoto Y., (2004) , "The Reynolds number effect on the microbubble drag reduction" ,In Proceedings 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
- Tsai J.F, Chen C.C., (2011) , "Boundary layer mixture model for a microbubble drag reduction technique" , ISRN Mechanical Engineering.
- Warholic M.D., Massah H. , Hanratty T.J,(1999) , "Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing" , Experiments in fluids, 27,5, pp.461-472.

- Yanuar, Gunawan, Sunaryo, Jamaluddin A., (2012), "Micro-bubble drag reduction on a high speed vessel model" , Journal of Marine Science and Application, 11,3, pp.301-304.
- Yoshida 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.

پیوست

پیوست الف: جدول مربوط به اندازه گیری ابعادحبابهای موجود در آب بر طبق نمونه‌ی 1 روزه ضمیمه شده است.



NanoQ Report

Sample

Name : MNB-A
Measured on : 1/7/2017 10:38:20
by : admin

Mode: Acquisition
Profit: Admin

Comments from user:

SOP

Name Mr.Mozaffarel **Operating mode** Continuous

Dispersant / solvent properties

Refractive Index (nd) : 1.33
Viscosity : 0.891

Particles refractive index

Real Part : 1.560
Imaginary Part : 0.01

Device settings

Time Interval : 10.000µs
Number of channels : 400

SOP comment:
Default Procedure

Analysis mode Cumulants

Results Intensity
 Volume
 Number

Measure conditions

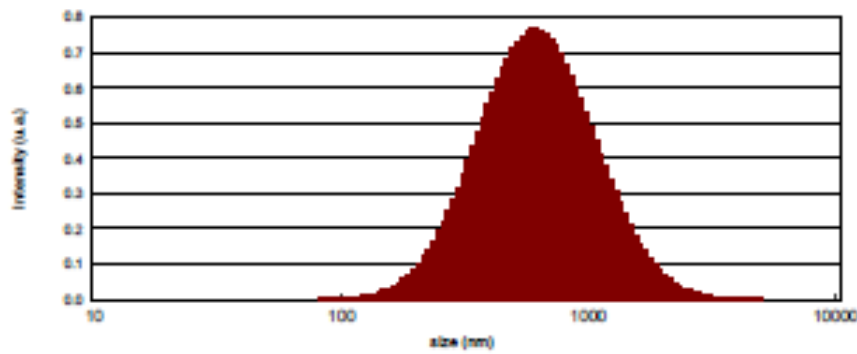
Temperature : 25.0°C
Acquisitions : 0
Average count rate : 204.15 kcps

Duration : 0h 1min 37s
Laser power : 50%
DTC position : UP
Wavelength : 657.00

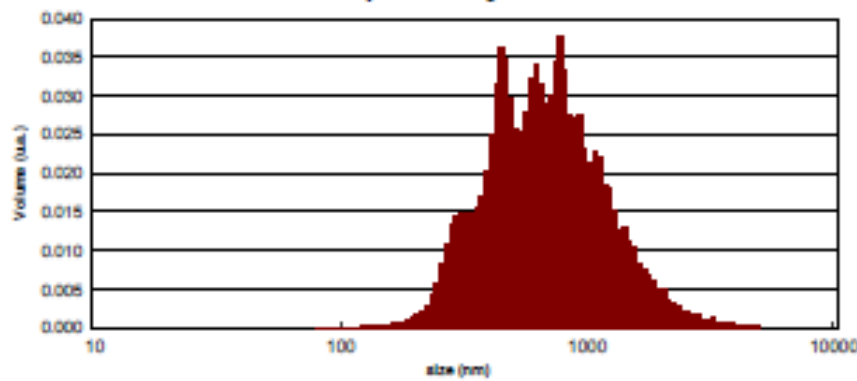
Cumulants method

				Zaverage (nm):	580.13		
Dv10:	338.93	Dv50:	645.83	Dv90:	1 349.32	PDI:	0.3160
Dmean Intensity:	712.31	Dmean volume:	787.09	Dmean number:	345.04		

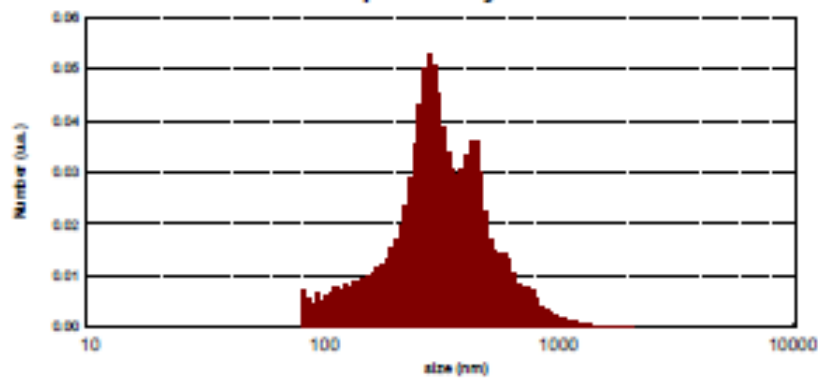
Size dispersion by Intensity



Size dispersion by Volume



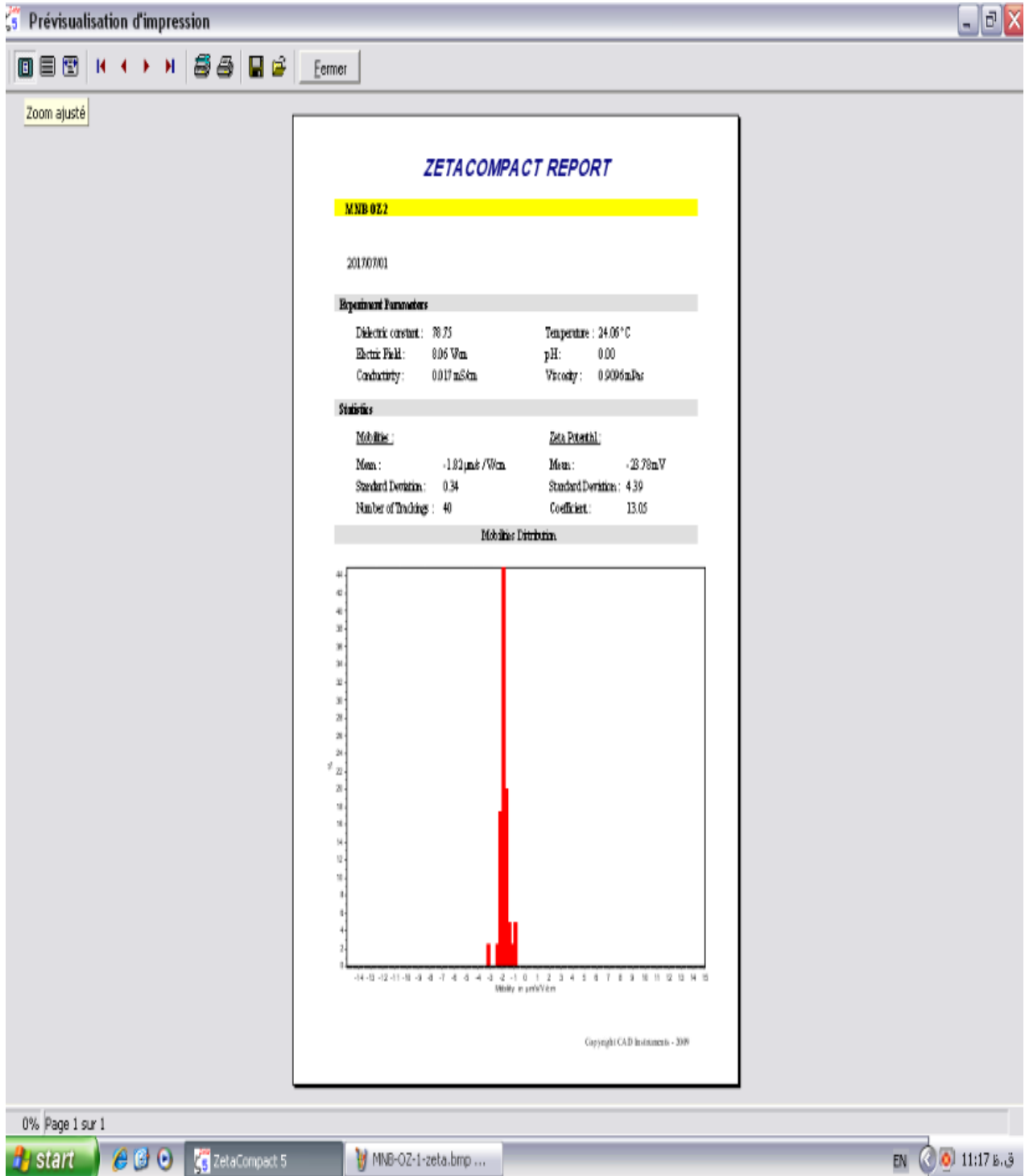
Size dispersion by Number



Size (nm)	Intensity	Number	Volume
81.30	0.00	0.01	0.00
85.14	0.00	0.01	0.00
89.15	0.00	0.00	0.00
93.35	0.00	0.01	0.00
97.75	0.00	0.01	0.00
102.36	0.00	0.01	0.00
107.18	0.00	0.01	0.00
112.23	0.01	0.01	0.00
117.52	0.01	0.01	0.00
123.06	0.01	0.01	0.00
128.86	0.01	0.01	0.00
134.93	0.02	0.01	0.00
141.29	0.02	0.01	0.00
147.95	0.03	0.01	0.00
154.92	0.03	0.01	0.00
162.22	0.04	0.01	0.00
169.87	0.05	0.01	0.00
177.88	0.06	0.01	0.00
186.26	0.07	0.01	0.00
195.04	0.09	0.02	0.00
204.23	0.10	0.02	0.00
213.85	0.12	0.02	0.00
223.93	0.14	0.02	0.00
234.49	0.17	0.03	0.00
245.54	0.19	0.04	0.01
257.11	0.22	0.04	0.01
269.22	0.25	0.05	0.01
281.91	0.28	0.05	0.01
295.20	0.32	0.05	0.01
309.11	0.36	0.04	0.01
323.68	0.39	0.04	0.01
338.93	0.43	0.03	0.01
354.91	0.47	0.03	0.02
371.63	0.51	0.03	0.02
389.15	0.55	0.03	0.02
407.49	0.59	0.03	0.03
426.69	0.62	0.04	0.03
446.80	0.66	0.04	0.04
467.86	0.69	0.03	0.03
489.91	0.71	0.02	0.03
513.00	0.73	0.02	0.03
537.17	0.75	0.01	0.03
562.49	0.76	0.01	0.03
589.00	0.77	0.01	0.03
616.76	0.77	0.01	0.03
645.83	0.76	0.01	0.03
676.26	0.75	0.01	0.03
708.13	0.74	0.01	0.03
741.51	0.72	0.01	0.03
776.45	0.70	0.01	0.04
813.05	0.67	0.01	0.03
851.36	0.64	0.00	0.03
891.49	0.60	0.00	0.03
933.50	0.57	0.00	0.03
977.50	0.53	0.00	0.02
1,023.56	0.49	0.00	0.02
1,071.80	0.45	0.00	0.02
1,122.32	0.42	0.00	0.02
1,175.21	0.38	0.00	0.02
1,230.59	0.34	0.00	0.02
1,288.59	0.31	0.00	0.02

1,349.32	0.27	0.00	0.01
1,412.91	0.24	0.00	0.01
1,479.50	0.21	0.00	0.01
1,549.23	0.18	0.00	0.01
1,622.24	0.16	0.00	0.01
1,698.69	0.14	0.00	0.01
1,778.75	0.12	0.00	0.01
1,862.58	0.10	0.00	0.01
1,950.36	0.08	0.00	0.00
2,042.28	0.07	0.00	0.00
2,138.53	0.06	0.00	0.00
2,239.31	0.05	0.00	0.00
2,344.85	0.04	0.00	0.00
2,455.36	0.03	0.00	0.00
2,571.08	0.03	0.00	0.00
2,692.25	0.02	0.00	0.00
2,819.13	0.02	0.00	0.00
2,951.99	0.01	0.00	0.00
3,091.11	0.01	0.00	0.00
3,236.79	0.01	0.00	0.00
3,389.34	0.01	0.00	0.00
3,549.07	0.01	0.00	0.00
3,716.34	0.00	0.00	0.00
3,891.48	0.00	0.00	0.00
4,074.88	0.00	0.00	0.00
4,266.93	0.00	0.00	0.00
4,468.02	0.00	0.00	0.00
4,678.59	0.00	0.00	0.00
4,899.09	0.00	0.00	0.00

پیوست ب :شیت آزمایش زتا پتانسیل :



Abstract

Drag force or movement inhibitor (force), has always been one of the most substantial obstacles of designing and operation of marine vehicles. There are various methods to reduce the drag force such as; using polymer solutions, hydrophobic colors and comparative coverages which all of them have disadvantages, despite advantages. One of the newest methods for drag force reduction is injection micro nano bubbles.

In this research the effect of micro nano bubble on the drag force reduction phenomenon by comparing between normal water and air micro nano bubbles included water. The injection tests are done on different things and shapes such as cylinder, wedge and rectangle cube and each with 3 to 4 repetitions so that the results are totally reliable. The tests were used in volumetric flow rate in 4000, 6000, 8000, 10000 liters per hour and a depth of 8, 14, 18, 22 cm.

According to the test results, the water including air micro nano bubbles has a significant influence on physical and hydrodynamical properties of fluid and the reduction of drag force applied to the shape, which causes the reduction of drag force and coefficient of drag for each shape according to the various volumetric flow rate and section area. In the rectangular cube, the percentage of reduction in the drag was 7/68% to 16/11% and in the cylindrical body was about 3/59% to 24/77% and in the wedge-shaped body was 14/04% to 30/97%.

Keywords: drag force, micro nano bubble, cylinder, rectangle cube, wedge, drag coefficient.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.S.c Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Drag reduction using nanotechnology

By: Vahid Haghi

Supervisor:

Dr. S. F. Saghravani

January 2018