

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.12.6

درصد همانندی: ۳٪

ارزیابی تأثیر فرم هندسی دماغه و دم بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور زیر سطحی (AUV)

کامران عرش تبار^۱، محمدحسین کریمی^{۲*}، مجتبی دهقان منشادی^۳، روزه شفقت^۴

^۱ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. kamranarshtabar@yahoo.com
^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. mhkarimi@mut-es.ac.ir
^۳ استاد، مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران. mdmanshadi@mut-es.ac.ir
^۴ استاد، گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. rshafaghat@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵

چکیده

طراحی فرم بدنه شناورهای زیرسطحی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد هیدرودینامیکی آن‌ها دارد. سه بخش اصلی دماغه، بدنه میانی و دم می‌توانند در طراحی بهینه بدنه‌ی وسایل نقلیه زیر آبی خودران (AUV) از منظر هیدرودینامیکی نقش موثری داشته باشند. بر این اساس، تأثیر هم‌زمان شکل هندسی بخش‌های دماغه و دم بر عملکرد هیدرودینامیکی و ویژگی‌های جریان اطراف بدنه‌ی یک AUV با فرض طول ثابت در این پژوهش بررسی شده است. معادلات مایرینگ برای طراحی پروفیل بدنه استفاده و پارامترهای کنترلی در معادلات مربوطه جهت ایجاد تغییرات فرم بدنه در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل جریان با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی STAR CCM و با استفاده از معادلات RANS انجام شده است. بهینه‌سازی نیز با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل در نرم افزار Design Export در سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه انجام و در نهایت، فرم بدنه با قیده‌های کمینه شدن نیروی مقاومت و فرض تغییر حجم به میزان ۲ درصد نسبت به حجم اولیه در طول ثابت به‌عنوان فرم بهینه در نظر گرفته شد. برای این منظور، ۵ آزمایش از ۱۵ آزمایش انجام شده به‌صورت منتخب از نرم افزار طراحی آزمایش با درصد مطلوبیت، پیشنهاد شد و بهترین گزینه با توجه به هدف گذاری و قید در نظر گرفته شده مشخص گردید. کاهش مقاومت در مدل بهینه معادل ۱/۱۲ درصد نسبت به مدل اولیه به‌دست آمد. البته از بین آزمایش‌های طراحی شده، آزمایش شماره ۷ کمترین مقاومت را با کاهش ۳/۲ درصد نسبت به مدل پایه دارا بوده است. تحلیل‌ها در محدوده‌ی سرعت‌های جریان ۰/۳ تا ۱/۴ متر بر ثانیه انجام و اثر عدد رینولدز ارزیابی شد و نیروی مقاومت آزمایشات منتخب به همراه ضرایب مقاومت و ضرایب مقاومت وابسته به حجم در سرعت‌های گوناگون استخراج گردید. مقایسه‌ی نمودارهای ضرایب اصطکاکی فرم‌های بدنه نشان می‌دهد، تغییرات فرم دماغه و دم مدل حائز اهمیت بوده و تأثیر زیادی بر نیروی مقاومت وسایل نقلیه زیر آبی دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عددی، معادلات مایرینگ، نیروی مقاومت، AUV، فرم بدنه

۱. مقدمه

وسایل نقلیه زیرسطحی معمولاً برای انجام انواع عملیات دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله اکتشاف [۱]، مأموریت‌های نجات [۲]، بازرسی [۳] و عملیات تعمیر و نگهداری [۴]، همچنین شناسایی و یا انهدام مین‌های زیرآبی [۵].

ویژگی‌های هیدرودینامیکی وسایل نقلیه زیرسطحی نقش مهمی در تعیین دامنه عملکرد آنها ایفا می‌کنند. برای بهینه‌سازی عملکرد این وسایل، ضروری است که نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر آنها به‌طور دقیق و جامع درک شوند.

در حال حاضر، ویژگی‌های هیدرودینامیکی انواع وسایل نقلیه زیرسطحی همچنان در حال مطالعه بوده و اهمیت زیادی دارند. به‌طور کلی، سه رویکرد اصلی برای بررسی دینامیک این وسایل مورد استفاده قرار می‌گیرد: روش‌های نظری، آزمایشگاهی و عددی. ویلیامز و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۶ تأثیر طول بدنه بر نیروهای هیدرودینامیکی یک وسیله زیرآبی را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج آزمایش‌های مقاومت، یاو استاتیک و حرکت جانبی را برای پنج طول مختلف ارائه کردند.

فیلیپس و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۷ به‌صورت عددی مقاومت بدنه سه مدل AUV^۱ با اشکال و اندازه‌های مختلف را تعیین کردند. همچنین، در سال ۲۰۰۹ جاگادیش و همکاران [۸] با استفاده از مطالعه تجربی، ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر بدنه AUV را اندازه‌گیری نمودند. آزمایش‌ها در زاویه دم ۰° تا ۱۵° و در بازه سرعت‌های جریان ۰/۴ تا ۱/۴ متر بر ثانیه انجام شد و نتایج آنها به ادبیات علمی اضافه گردید. علاوه بر این، آویلا و آداموسکی [۹] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش شناسایی سیستم (SI) ضرایب هیدرودینامیکی یک ROV مقیاس کامل را از طریق آزمایش‌های تجربی محاسبه کردند.

ویکتور نونس دو سوسا و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ یک سری تحلیل‌های عددی با استفاده از CFD انجام دادند تا

طراحی آزمایشی ایجاد کنند که کمترین مقاومت را تولید کند و طراحی را با ضریب درگ ۰/۱۲۳۰ بهبود بخشید. در سال ۲۰۱۵ ژو و همکاران [۱۱] نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی مؤثر بر یک مدل جدید ROV را به‌صورت تجربی آزمایش کردند. آنها همچنین فرمول‌های برازش شده برای نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به مدل را ارائه دادند. مادان و ایساک [۱۲] در سال ۲۰۱۷ قابلیت به کارگیری معادلات نیمه تجربی برای بدنه‌های هواپیمای شناور را در مدل‌های AUV با بدنه خالی در زوایای مختلف حمله بررسی کردند. این معادلات نیمه تجربی برای زوایای حمله کم با مقداری خطا تأیید شد. در سال ۲۰۲۱ هونگ و همکاران [۱۳] با یک سری تحلیل‌های عددی، عملکرد هیدرودینامیکی یک AUV قابل حمل طراحی شده جدید را ارزیابی کردند. آنها اندازه‌گیری‌هایی انجام دادند تا هم راه‌اندازی تجربی و هم مدل عددی را تأیید کنند.

بهینه‌سازی‌های شکلی که کارایی هیدرودینامیکی را افزایش دهند، کنترل حرکت، کاهش مصرف انرژی و همچنین بهبود دامنه عملکرد AUV‌ها از اهمیت زیادی برخوردارند و همچنان در حال تحقیق و توسعه هستند. در سال ۲۰۱۶ گائو و همکاران [۱۴] با انجام یک فرایند بهینه‌سازی، بهترین طراحی وسیله زیرآبی را با کمترین نیروی مقاومت در محدوده‌های تعریف شده پارامتری به دست آوردند. تحلیل‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفت و زمان حل با استفاده از ساختار مش دوبعدی کاهش یافت. سال ۲۰۱۹، آپال و همکاران [۱۵] یک مطالعه عددی در مورد طراحی بدنه AUV با بخش‌های مختلف دماغه و دم انجام دادند تا بهترین طراحی بهینه را میان هفت پیکربندی به دست آورند. دماغه مایرینگ با پارامتر نمایی $\pi = 3$ و زاویه دم نیمه گرد ۱۵ به‌عنوان کمترین پروفیل مقاومت شناسایی شد. ساقفی و لایمی [۱۶] سال ۲۰۲۰ با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی و بررسی هندسه‌های مختلف دماغه و دم در مدل بدنه یک AUV، پیکربندی‌ای را شناسایی کردند که کمترین میزان مقاومت را ایجاد می‌کند.

تأثیرات اشکال مختلف دماغه و دم بر اجزای مقاومت بدنه و ویژگی‌های جریان با استفاده از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بدنه یک AUV بررسی می‌شود.

معادلات مایرینگ [۱۹] در ایجاد پروفیل دماغه و دم بدنه زیر سطحی استفاده می‌شوند. در این پژوهش تأثیر توأمان دماغه و دم مبتنی بر پروفیل مایرینگ با لحاظ دو پارامتر اصلی، ضریب نمایی n و زاویه دم، در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی مبتنی بر DOE بررسی شده است. برخلاف مطالعات پیشین که این اجزا را جداگانه تحلیل کرده‌اند، در این کار هندسه به صورت یکپارچه و با قید تغییر حجم حداکثر ۲ درصد در طول ثابت، بهینه‌سازی شده است. این ساختار جدید با ترکیب CFD و DOE روشی عملی‌تر، هدفمندتر و کم‌هزینه‌تر برای کاهش مقاومت در AUV ارائه می‌دهد که رویکردی نوآورانه و متمایز نسبت به مطالعات پیشین به‌شمار می‌آید.

پژوهش در بازه سرعت جریان ۰/۳ متر بر ثانیه تا ۱/۴ متر بر ثانیه انجام می‌شود تا تأثیر عدد رینولدز در نظر گرفته شود. در یک دامنه عددی سه‌بعدی برای جریان غیرقابل تراکم، از معادله RANS برای تعیین ویژگی‌های هیدرودینامیکی AUVها استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های RANS با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی سیالات STAR CCM انجام می‌شود. برای صحت‌سنجی و اجرای مؤثر روش RANS، مقایسه‌هایی با مطالعات تجربی و عددی موجود در مقالات پژوهشی معتبر انجام شده است.

فرایند ایجاد مش برای به حداقل رساندن عدم قطعیت، فراهم آوردن استقلال شبکه و کاهش زمان حل انجام می‌شود. مدل آشفتگی استاندارد $k-\epsilon$ با عملکرد دیواره بهبود یافته به دلیل پایداری عددی، هزینه محاسباتی مناسب و توانایی قابل قبول در پیش‌بینی کمیت‌های جریان در جریان‌های با رینولدز بالا، به‌عنوان یک مدل کارآمد در مسائل هیدرودینامیکی و مهندسی دریا شناخته می‌شود. نتایج تحلیل‌های اعتبارسنجی نشان داده‌اند که نیروهای مقاومت محاسبه‌شده با داده‌های تجربی و عددی گزارش شده در مطالعات پیشین تطابق خوبی دارند. از این رو، این مدل در پژوهش‌های متعددی از جمله

سنر و اکسو [۱۷] در سال ۲۰۲۲ اثر شکل دماغه را بر عملکرد هیدرودینامیکی و ویژگی‌های جریان پیرامون بدنه یک AUV مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش برای ایجاد پروفیل بدنه از معادله مایرینگ استفاده شده و به‌منظور ایجاد تنوع در هندسه دماغه، پارامتر نمایی n به‌عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شده است.

در سال ۲۰۲۳ شیائودونگ چن و همکارانش [۱۸] بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای شکل یک وسیله زیرسطحی خودران در دو حالت یدک‌شونده و خودران با هدف دستیابی به طراحی‌ای با کمترین مقاومت هیدرودینامیکی و پایداری حرکتی مطلوب انجام گرفته است. عملکرد رضایت‌بخشی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II حاصل شد.

با عبور یک جسم در داخل سیال، سیالی که از روی آن عبور می‌کند بدلیل مقاومت جسم در برابر جریان نیرویی بر جسم وارد می‌کند. مقاومت فشاری^۲ و مقاومت اصطکاکی^۳ دو اصطلاحی هستند که می‌توانند ویژگی‌های این مقاومت را توصیف کنند. مقاومت اصطکاکی می‌تواند با انتگرال‌گیری از تنش‌های برشی دیواره در سطح جسم تعیین شود. از طرف دیگر، مقاومت فشاری یک جسم می‌تواند با انتگرال‌گیری از تنش‌های عمودی در سطح آن جسم محاسبه گردد.

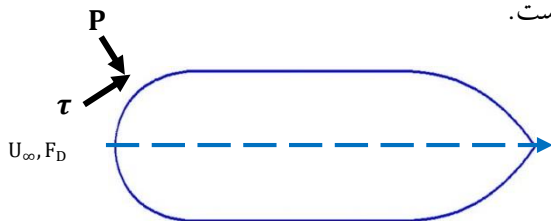
سیالی که بر سطح بدنه برخورد می‌کند، نیرویی ایجاد می‌کند که در جهت مخالف حرکت زیر سطحی قرار دارد. مولفه نیروی حاصل که بر بدنه در جهت موازی با جریان عمل می‌کند، به‌عنوان نیروی مقاوم (F_D) تعریف می‌شود. علاوه بر این، مقاومت‌های فشاری و اصطکاکی که بر بدنه در جهت موازی با جریان عمل می‌کنند، به ترتیب می‌توانند به‌عنوان ($F_{D,pressure}$) و ($F_{D,friction}$) نام‌گذاری شوند.

سرعت، دوام، قابلیت مانور و مصرف انرژی شناور زیر سطحی تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه آن قرار دارند. معمولاً برای انعطاف‌پذیری طراحی، بدنه زیر سطحی مورد نظر به سه قسمت تقسیم می‌شود که به ترتیب به عنوان دماغه، بدنه میانی و دم شناخته می‌شوند. در این مطالعه،

می‌شوند. شکل ۱ نمای کلی نیروی مقاومت وارد بر بدنه‌ی AUV را نشان می‌دهد.

$$F_D = F_{D,pressure} + F_{D,friction} \quad (1)$$

در حرکت با سرعت مشخص، یک وسیله‌ی زیرسطحی باید نیرویی در جهت حرکت خود ایجاد کند که از نیروی مقاومت وارد بر سطح بدنه‌ی آن بزرگ‌تر باشد. نیروی پیشرانی که توسط سیستم رانش تولید می‌شود، نیروی لازم برای به حرکت درآوردن AUV در جهت موردنظر را فراهم می‌کند. بنابراین، محاسبه دقیق نیروهای مقاومت وارد بر بدنه، که ناشی از حرکت آن می‌باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است.



شکل ۱. نیروی مقاومت کل وارد بر بدنه‌ی یک زیر سطحی

به کارگیری ضرایب بی‌بعد امکان مقایسه‌ی آسان‌تر عملکرد AUV در مقیاس‌های مختلف را فراهم می‌کند. استفاده از ضریب بی‌بعد نیروی مقاومت هنگام تلاش برای کاهش این نیرو و بهینه‌سازی طراحی AUV یک رویکرد مؤثر محسوب می‌شود. ضریب مقاومت (C_D) بر اساس مساحت تصویر روبروی بدنه، که عمود بر جهت جریان آزاد است، به‌عنوان مساحت مرجع (A) محاسبه می‌گردد.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A} \quad (2)$$

با این حال، به دلیل محدودیت حجم بدنه، نیاز است که ضریب نیروی مقاومت را بر اساس حجم نیز تعریف کنیم. ضریب مقاومت حجمی ($C_{D,V}$) با در نظر گرفتن حجم کل بدنه‌ی (V) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{D,V} = \frac{2 F_D}{\rho U_{\infty}^2 V^3} \quad (3)$$

تنش برشی دیواره (τ_w) با تقسیم بر فشار دینامیکی جریان آزاد، به یک کمیت بی‌بعد برای بیان اصطکاک سطحی

مراجع [۱۴]، [۱۷] و [۱۸] با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. دو کمیت بدون بعد برای ایجاد روابط مقاومت استفاده می‌شود (C_D) و ($C_{D,V}$) که به ترتیب با مساحت عمود شده قسمت جلویی و حجم بدنه تعریف می‌شوند. توزیع فشار و اصطکاک سطحی، همچنین ارزیابی مقایسه‌ای و تفسیر نتایج شبیه‌سازی عددی برای ارزیابی تأثیرات شکل دماغه و دم بر ویژگی‌های جریان و مقاومت انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

دینامیک سیالات محاسباتی [۲۰]، یک روش مبتنی بر رایانه است که برای انجام محاسبات دقیق در زمینه‌های مختلف، اعم از تعامل جامد-مایع، جریان‌های چندفازی، تجزیه و تحلیل جریان‌های نیوتنی و غیرنیوتنی، و بررسی جنبه‌های فیزیکی مختلف بر اساس قوانین بقای حاکم بر حرکت سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از معادلات RANS در نرم‌افزار شبیه‌سازی سیال STAR CCM انجام می‌شود. این نرم افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی که بیانگر بقای جرم، انرژی و تکانه هستند، استفاده می‌کند. روش حجم محدود [۲۱]، یکی از روش‌های عددی پرکاربرد در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد حل معادلات دیفرانسیل جزئی از طریق معادلات جبری است.

۲-۱. تعریف مسئله

سیالی که بر سطح وسیله‌ی زیرسطحی اعمال می‌شود، نیرویی ایجاد می‌کند که این نیرو بر بدنه‌ی AUV به‌صورت توزیعی از فشار و نیروهای برشی اثر می‌گذارد.

مقاومت اصطکاکی را می‌توان از طریق جمع نیروهای برشی مماسی (τ) در سراسر سطح بدنه تعیین کرد. از سوی دیگر، مقاومت فشاری با جمع نیروهای فشاری (P) در سطح بدنه محاسبه می‌شود. بنابراین، مؤلفه‌های فشار و اصطکاک نیروی مقاومت که در راستای موازی با جریان بر AUV اثر می‌گذارند، به ترتیب با ($F_{D,pressure}$) و ($F_{D,friction}$) نشان داده

قطر D و طول L_b است. شکل دم با یک رابطه‌ی مکعبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$r(x) = \frac{1}{2}D - \left(\frac{3D}{2L_c^2} - \frac{\tan\theta}{L_c}\right)(x - L_a - L_b)^2 + \left(\frac{D}{L_c^3} - \frac{\tan\theta}{L_c^2}\right)(x - L_a - L_b)^3 \quad (6)$$

که در آن L_c و L_b به ترتیب طول‌های بخش میانی و دم هستند و θ نیم‌زاویه‌ی دم می‌باشد. فرم پروفیل بدنه‌ی AUV در شکل ۱ قابل مشاهده است. طول بخش دماغه L_a برابر با ۲۸۰ میلی‌متر، طول بخش میانی بدنه L_b برابر با ۷۳۷ میلی‌متر، طول بخش دم L_c برابر با ۵۰۴ میلی‌متر، نیم‌زاویه‌ی دم θ برابر با ۳۸ درجه، و قطر بخش میانی بدنه D برابر با ۲۸۰ میلی‌متر است. پارامتر نمایی n در معادله ۵ برای متنوع‌سازی شکل‌های دماغه مد نظر قرار گرفته است. بنابراین پس از اعتبار فرم مدل جدید تحلیل بر اساس طراحی نمونه‌های تولیدی صورت می‌گیرد. ایجاد یک دامنه‌ی محاسباتی با المان‌های شبکه‌بندی یک مرحله‌ی حیاتی در تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی است.

استراتژی شبکه‌بندی به دنبال کاهش عدم قطعیت، فراهم کردن استقلال شبکه، و کاهش زمان‌های حل است. تحلیل‌های عددی این پژوهش با جریان غیرقابل تراکم در یک دامنه‌ی سه‌بعدی انجام شده است. در ایجاد ساختار شبکه برای این مسئله به دلیل ماهیت سه‌بعدی دامنه‌ی عددی از المان‌های شبکه‌ای مربعی و شش وجهی استفاده شده است. برای ایجاد شبکه‌ی لایه مرزی، شبکه‌های مربعی در اطراف بدنه‌ی AUV و سایر نواحی دیواره‌ای ایجاد می‌شوند، با در نظر گرفتن شرایط Y^+ برابر ۴۰ ارتفاع اولین لایه با حل معادلات زیر به ترتیب محاسبه می‌شود [۲۷].

عدد رینولدز محلی که به طول جسم L و سرعت جریان آزاد U_∞ وابسته است، به صورت زیر تعریف شود:

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (7)$$

ضریب اصطکاک سطحی (C_f) با استفاده از رابطه شیلیختینگ که به صورت زیر تخمین زده می‌شود محاسبه می‌گردد [۲۸].

تبدیل می‌شود. ضریب اصطکاک سطحی (C_f) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (4)$$

که در آن U_∞ سرعت جریان آزاد، V حجم بدنه و ρ چگالی سیال است.

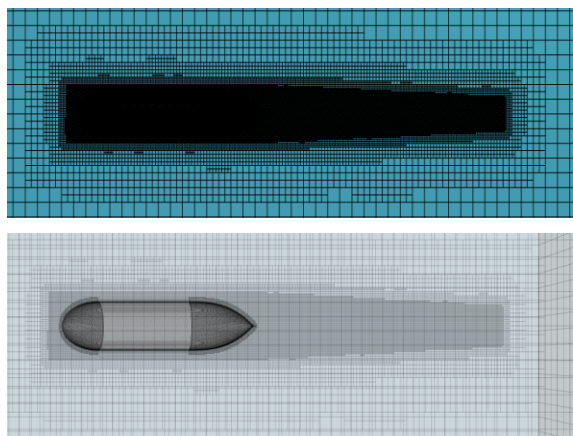
۲-۲. هندسه و ساختار شبکه بندی

پروفیل بدنه وسایل زیرسطحی‌هایی مانند AUV معمولاً با معادلات منحنی در صفحه طولی تقارن بدنه تعریف می‌شود. در طراحی این وسایل، معمولاً بدنه به سه بخش دماغه، بدنه میانی و دم تقسیم می‌شود بطوری که پروفیل هر یک از این بخش‌ها را می‌توان با ترکیبی از معادلات ریاضی مستقل توصیف کرد. انواع مختلفی از AUV ها وجود دارند [۲۶]، [۲۵]، [۲۴]، [۲۳]، [۲۲] که هر یک دارای ویژگی‌ها و طراحی‌های منحصر به فردی هستند. این تنوع طراحی، تأثیر مستقیمی بر عملکرد هیدرودینامیکی، کنترل‌پذیری، و بازدهی سیستم پیش‌ران دارد. در تحلیل و بهینه‌سازی این وسایل، روش‌های محاسباتی دینامیک سیالات نقش اساسی در ارزیابی توزیع فشار، کاهش نیروی مقاومت، و بهبود عملکرد آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی دارند.

معادلات مایرینگ، [۱۹] که در طراحی پروفیل بدنه زیر سطحی‌های AUV مورد استفاده قرار می‌گیرند، شکل دماغه و دم را به صورت مجزا و با دو معادله مستقل توصیف می‌کنند. در حالی که بخش میانی دارای یک شکل هندسی استوانه‌ای است که موجب پایداری هیدرودینامیکی و افزایش فضای داخلی می‌شود. فرم دماغه‌ی AUV بر اساس توزیع شعاعی نیمه‌بیضوی اصلاح شده تعریف می‌شود و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$r(x) = \frac{1}{2}D \left[1 - \left(\frac{x - L_a}{L_a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

که در آن D قطر بخش میانی، L_a طول بخش دماغه، و n پارامتر نمایی است. بخش میانی بدنه دارای شکل استوانه‌ای با



شکل ۲. تولید شبکه در اطراف فرم بدنه

۲-۳. طراحی آزمایش

طراحی آزمایش یکی از قوی‌ترین تکنیک‌ها برای بهبود کیفیت و بهره‌وری است [۲۹]. برای کاهش صرف زمان و هزینه در اجرای آزمایشات، در این تحقیق از روش فاکتوریل کامل به منظور طراحی حالت‌های آزمایش و نیز تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار Design Expert صورت گرفته است. در این پژوهش برای در نظر گرفتن دو عامل کنترلی با سطوح مختلف در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، این طرح قادر به بررسی اثرات متقابل بین عوامل است. در این روش با توجه به تعداد پارامترهای اصلی و نیز سطوح مختلف مساله، حالت‌های مورد نیاز جهت انجام آزمایش طراحی می‌گردد. جدول ۱ پارامترهای اصلی کنترلی و سطوح هر کدام را در این تحقیق نشان می‌دهد.

با توجه به پارامترهای مندرج در جدول ۱ تعداد کلیه حالت‌های ارائه شده ۱۵ می‌باشد. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب عوامل کنترلی و سطوح آزمایش و همچنین طرح آزمایش ارائه شده است که فرآیند بهینه‌سازی مطابق با این طرح آزمایش انجام می‌شود.

$$C_f = [2 \log_{10}(Re_x) - 0.65]^{-2.3} \text{ for } Re_x < 10^9 \quad (8)$$

تنش برشی دیواره (τ_w) و سرعت اصطکاکی (u^*) به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \quad (9)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (10)$$

برای محاسبه ارتفاع اولین لایه می‌توان از رابطه ارتفاع بی‌بعد دیواره (y^+) استفاده نمود:

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho u^*} \quad (11)$$

که در آن (μ) لزجت دینامیکی و (ρ) چگالی سیال است.

در نواحی نزدیک به دیواره‌ها، اندازه المان‌ها به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. این فرایند از اولین لایه شبکه در مجاورت دیواره آغاز شده و با یک ضریب رشد مشخص گسترش می‌یابد. در این پژوهش، ۸ لایه با ضریب رشد ۱/۲ مد نظر قرار گرفته است. ساختار مش تولیدشده برای میدان جریان در شکل ۲ نشان داده شده است. تعیین اندازه المان‌های مش از طریق تقسیم دامنه عددی به سه ناحیه اصلی انجام می‌شود:

۱. ناحیه با چگالی بالای شبکه در اطراف مدل
۲. بدنه AUV
۳. بیشینه اندازه المان‌های شبکه در دامنه

در اطراف بدنه AUV، یک ناحیه با چگالی بالای شبکه و ساختار مکعبی ایجاد شده است که در آن المان‌های شبکه دارای دقت بیشتری نسبت به بیشینه اندازه شبکه در دامنه هستند. این رویکرد به بهبود دقت محاسبات در نواحی بحرانی جریان و کاهش خطای عددی در تحلیل CFD کمک می‌کند.

جدول ۱. عوامل کنترلی مفروض و سطح هریک از آنها در روش فاکتوریل

عوامل کنترلی	θ	n
تعداد حالت‌ها	۳۶	۱
		۲
		۳
		۴
		۵
	۳۸	۱
		۲
		۳
		۴
		۵
	۴۰	۱
		۲
		۳
		۴
		۵

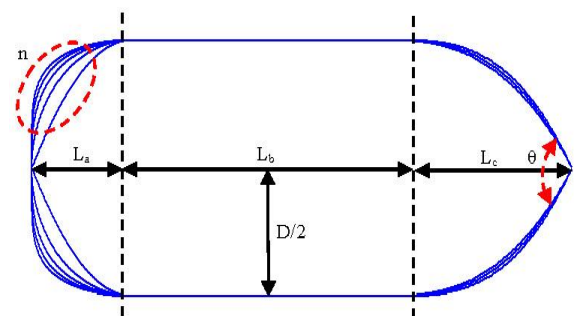
این اثر موجب اختلال در خطوط جریان و تشکیل نواحی با سرعت بالاتر می‌شود.

اثر انسداد با نسبت انسداد^۳ (BR) تعیین می‌شود که برابر نسبت بیشینه سطح مقطع عمود بر جهت جریان مدل به سطح مقطع دامنه عددی است. مطالعات وست و اپلت [۳۰] در سال ۱۹۸۲ نشان داد که برای جریان پیرامون یک استوانه، زمانی که نسبت انسداد کمتر از ۶٪ باشد، تأثیر آن بر توزیع فشار و ضریب مقاومت قابل چشم‌پوشی است.

نتایج به‌منظور ارزیابی کفایت مدل عددی با داده‌های تجربی و عددی گائو [۱۴] مقایسه شده‌اند. مدل آزمایشگاهی گائو [۱۴] دارای طول ۱۵۲۱ میلی‌متر و قطر ۲۸۰ میلی‌متر در قسمت میانی بدنه بود که در یک تونل آب با ابعاد ۷ متر طول، ۱/۷ متر عرض و ۱/۵ متر عمق مورد آزمایش قرار گرفت.

برای اطمینان از اینکه اثر انسداد قابل توجه نباشد، لازم است دامنه عددی با ابعاد کافی انتخاب شده و موقعیت مدل در داخل دامنه به‌طور مناسب تعیین شود. شکل ۴ شرایط مرزی اعمال شده به دامنه عددی و همچنین اندازه‌ها را نشان می‌دهد. نسبت انسداد برای دامنه عددی $BR \cong 2/35\%$ است. شرایط مرزی ورودی سرعت برای تعریف سرعت جریان و تمامی خواص مرتبط با جریان در ورودی استفاده شده است. در این مسأله جریان خارجی، مقادیر شدت و نسبت لزجت آشفتگی در ورودی به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۱۰ تنظیم شده‌اند. شرایط مرزی دیواره برای تعیین نواحی جامد و شرایط مرزی فشار در خروجی برای تعریف مرزهای جریان خروجی استفاده می‌شوند. همچنین، شرایط مرزی تقارن برای محور طولی تقارن استفاده شده است.

اندازه‌گیری‌ها در سرعت‌های جریان ۰/۳ متر بر ثانیه، ۰/۷ متر بر ثانیه، ۱/۱ متر بر ثانیه و ۱/۴ متر بر ثانیه انجام شده‌اند تا تأثیر تغییر عدد رینولدز ناشی از سرعت جریان بر نیروی مقاومتی بررسی شود. عدد رینولدز که به طول مدل (L) و سرعت جریان آزاد (U_{∞}) وابسته است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل ۳. نمایی از طرح‌های مختلف دماغه و دم تعریف شده در پژوهش (جدول ۲)

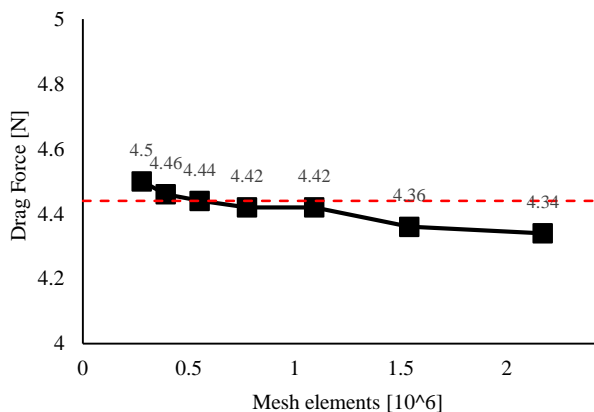
۲-۴. شرایط مرزی و حل عددی

مدل‌سازی یک پدیده فیزیکی، بازآفرینی یک رخداد مشابه در مقیاسی متفاوت است. هنگام مدل‌سازی یک پدیده فیزیکی در شرایط آزمایشگاهی یا عددی، محدودیت‌هایی وجود دارد. در تحلیل جریان خارجی با روش‌های تجربی یا عددی، حضور یک جسم که مرزهای دیواره را محدود کرده و جریان را مسدود می‌کند، باعث ایجاد اثر انسداد می‌شود.

در این معادلات، متغیرهای u_i و u_j سرعت‌های میانگین جریان هستند، متغیرهای u_i' و u_j' سرعت‌های نوسانی هستند. متغیر μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی سیال، و δ_{ij} تابع دلتا کرونگر است. همچنین، متغیر $(-\rho \overline{u_i' u_j'})$ در این معادله به عنوان تانسور تنش رینولدز شناخته می‌شود و اثر آشفتگی را نشان می‌دهد. این تانسور تنش رینولدز باید به‌طور مناسب مدل‌سازی شود.

۲-۵. استقلال شبکه

محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی به شدت تحت تأثیر روش‌های شبکه‌بندی از نظر کارایی و دقت قرار دارند. به منظور دستیابی به نتایجی که تحت تأثیر شبکه محاسباتی نباشند، یک بررسی اولیه انجام شد. هدف از این فرآیند، دستیابی به دقیق‌ترین نتایج با حداقل تعداد المان‌های شبکه و کاهش زمان محاسبات است. شکل زیر نیروی مقاومت وارد بر بدنه‌ی AUV را بر حسب تعداد المان‌های شبکه، در سرعت جریان $1/1 \text{ m/s}$ نمایش می‌دهد. دامنه‌ی عددی با تقریباً 1.09×10^6 المان، تطابق بهتری با نتایج تجربی گائو [۱۴] دارد و مشاهده شده است که با افزایش تعداد المان‌ها، تغییرات نتایج ناچیز می‌شود. بنابراین، شبکه‌هایی با اندازه‌های مشابه ایجاد شده‌اند، زیرا افزایش تعداد المان‌های شبکه منجر به افزایش زمان محاسباتی می‌شود. شایان ذکر است تحلیلی که آقای گائو و همکاران در دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند تعداد شبکه دامنه محاسباتی در بازه $0/6$ تا $0/8$ میلیون بوده است.

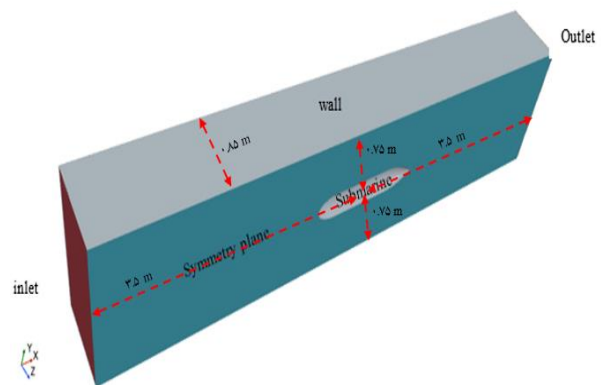


شکل ۵. تغییرات نیروی مقاومتی بر حسب تعداد کل المان‌ها

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (12)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی و ρ چگالی سیال است. خواص سیالی که در تحلیل‌ها استفاده شده‌اند، در جدول ۲ آورده شده است. معادلات RANS که برای حل جریان لزج استفاده می‌شوند، با نوشتن مقادیر آنی جریان به صورت ترکیب میانگین و مقادیر آشفته به دست می‌آیند. در سیستم مختصات کارتزین، معادلات جرم و حرکت به صورت زیر برای جریان غیرقابل تراکم تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (13)$$



شکل ۴. ابعاد دامنه و شرایط مرزی مطابق تونل آب

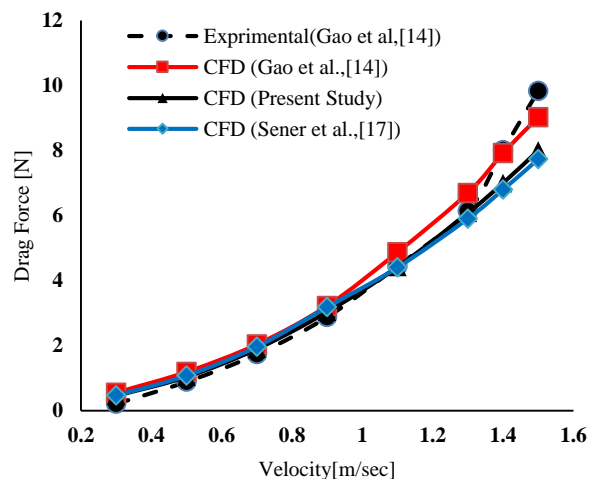
جدول ۲. ویژگی‌های سیال

مقدار	پارامتر	ردیف
مایع	آب	۱
۲۸۸/۱۶	دما (K)	۲
۹۹۸/۲	چگالی ($kg \cdot m^{-3}$)	۳
۰/۰۰۱۰۰۳	لزجت ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)	۴

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) &= \frac{\partial p}{\partial x_j} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned} \quad (14)$$

۲-۶. اعتبارسنجی حل عددی

تحلیل‌های جریان پایا به منظور بررسی صحت حل عددی به دست آمده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده‌اند. این تحلیل‌ها در محدوده‌ی سرعت جریان ۰/۳ تا ۱/۴ m/s صورت گرفته و نیروی مقاومت بدنه‌ی AUV در این بازه‌ی سرعتی اعتبارسنجی شده است تا دقت مدل ارزیابی شود. اعتبارسنجی نیروهای مقاومت برای بدنه‌ی AUV با استفاده از داده‌های تجربی و عددی ارائه شده توسط گائو و همکاران [۱۴] و داده‌های عددی آقای سنر [۱۷] انجام شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج عددی به خوبی با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی مطابقت دارد.



شکل ۶. اعتبارسنجی نیروی‌های مقاومت

در تحلیل‌های عددی از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. برای مدل‌سازی نواحی نزدیک دیواره، روش Prism Layer به کار گرفته شده است، زیرا این روش منجر به همگرایی سریع‌تر حل عددی می‌شود. معیار همگرایی نیز مقدار باقیمانده‌های کمتر از 10^{-6} در نظر گرفته شده است که برای دقت حل عددی کافی تلقی می‌شود.

روش Prism Layer برای شبیه‌سازی جریان‌های نزدیک دیواره، به ویژه در نواحی مرزی که نیاز به دقت بالایی دارند، بسیار مؤثر است و می‌تواند همگرایی سریع‌تری نسبت به روش‌های دیگر ارائه دهد. مقاومت اصطکاکی ناشی از برهم‌کنش بین سیال و سطح جسم بوده و تأثیر آن بر رشد

لایه‌ی مرزی با افزایش عدد رینولدز بیشتر می‌شود. در مقابل، مقاومت فشاری که به تشکیل ناحیه‌ی ویک مرتبط است، معمولاً حساسیت کمتری نسبت به عدد رینولدز در مقایسه با مقاومت اصطکاکی دارد. همچنین، اصطکاک سطحی وابستگی زیادی به میزان آشفتگی اولیه‌ی جریان دارد [۳۱].

مطالب بیان شده در این قسمت به اهمیت اثرات اصطکاک و فشاری در نیروی کشش بدنه‌های هیدرودینامیکی اشاره دارد و تأکید می‌کند که کشش اصطکاکی بیشتر تحت تأثیر تغییرات شرایط توربولانسی قرار می‌گیرد، در حالی که کشش فشاری کمتر از آن تأثیر می‌پذیرد.

باین حال، عوامل دیگری نیز در جریان وجود دارند که به همان اندازه در تعیین میزان نیروی مقاومت وارد بر یک جسم تأثیرگذار هستند. نیروی درگ ممکن است تحت تأثیر عوامل متعددی مانند شدت و مقیاس طولی آشفتگی جریان، زبری سطح جسم، ارتفاع سطح آزاد و غیره قرار گیرد [۳۲]. تغییرات آشفتگی در مدار تونل‌های آبی نیز می‌تواند با تأثیر بر نیروهای هیدرودینامیکی، منجر به افزایش مقاومت شود. در چنین شرایطی، زمانی که سرعت جریان از $1/5$ m/s فراتر می‌رود، مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به پیش‌بینی‌های حاصل از تحلیل CFD بزرگ‌تر هستند که این اختلاف ناشی از آشفتگی ایجاد شده در مدار تونل آب است.

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش، تأثیر شکل دماغه و دم بر عملکرد مقاومت و ویژگی‌های جریان با استفاده از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بدنه یک AUV بررسی شده است. برای ایجاد نمایه‌ی بدنه‌ی این وسیله، از معادله مایرینگ در چارچوب این پژوهش، ۵ طرح مختلف برای دماغه و ۳ طرح برای دم در نظر گرفته شده‌اند. تحلیل‌ها در چهار سرعت مختلف جریان (۰/۳ متر بر ثانیه، ۰/۷ متر بر ثانیه، ۱/۱ متر بر ثانیه، و ۱/۴ متر بر ثانیه) انجام شده‌اند تا تأثیر عدد رینولدز بر نیروهای هیدرودینامیکی و ویژگی‌های جریان مورد بررسی قرار گیرد. در یک دامنه‌ی عددی سه‌بعدی برای جریان تراکم‌ناپذیر، روش RANS به کار گرفته شده است تا

جدول ۴. تحلیل نتایج در آزمون‌های مختلف

شماره آزمون	n	θ	نیروی مقاومت (N)	حجم (m ³)
DOE1	۴	۳۸	۴/۵۶	۰/۰۷۸
DOE2	۵	۳۶	۴/۵۶	۰/۰۷۸
DOE3	۲	۳۸	۴/۴۲	۰/۰۷۶
DOE4	۴	۳۶	۴/۵۰	۰/۰۷۷
DOE5	۴	۴۰	۴/۶۲	۰/۰۷۸
DOE6	۱	۳۸	۴/۳۴	۰/۰۷۳
DOE7	۱	۳۶	۴/۲۸	۰/۰۷۳
DOE8	۵	۳۸	۴/۶۰	۰/۰۷۸
DOE9	۵	۴۰	۴/۶۶	۰/۰۷۹
DOE10	۳	۳۶	۴/۴۴	۰/۰۷۷
DOE11	۱	۴۰	۴/۴۰	۰/۰۷۴
DOE12	۲	۳۶	۴/۳۸	۰/۰۷۵
DOE13	۳	۴۰	۴/۵۶	۰/۰۷۸
DOE14	۳	۳۸	۴/۵۰	۰/۰۷۷
DOE15	۲	۴۰	۴/۴۸	۰/۰۷۷

جدول ۷. درصد مطلوبیت به منظور حداقل کردن مقاومت در محدود

حجم ۲ درصد نسبت به حجم اولیه

شماره آزمون	n	θ	مقاومت (نیوتن)	حجم (M ³)	درصد مطلوبیت	منتخب
DOE12	۲	۳۶	۴/۳۸	۰/۰۷۵	۰/۷۵۸	
DOE11	۱	۴۰	۴/۴۰	۰/۰۷۴	۰/۶۹۱	
DOE3	۲	۳۸	۴/۴۲	۰/۰۷۶	۰/۶۲۱	
DOE10	۳	۳۶	۴/۴۴	۰/۰۷۷	۰/۵۶۵	
DOE15	۲	۴۰	۴/۴۸	۰/۰۷۷	۰/۴۶۳	

ویژگی‌های هیدرودینامیکی این وسایل زیردریایی تعیین شود.

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان شد طراحی آزمایش بکار رفته در این پژوهش، بر اساس الگوی فاکتوریل کامل می‌باشد که با در نظر گرفتن دو پارامتر، دماغه با پنج و دم با سه حالت تحلیل صورت گرفت. اطلاعات تحلیل در نرم افزار طراحی آزمایش مطابق جدول ۵ تا ۷ می‌باشد.

جدول ۲. اطلاعات تحلیل در نرم افزار طراحی آزمایش

File Version	13.0.5.0		
Study Type	Factorial	Subtype	Randomized
Design Type	Full Factorial	Runs	24.00
Design Model	2FI	Blocks	No Blocks

جدول ۳. پارامترهای موثر در تحلیل

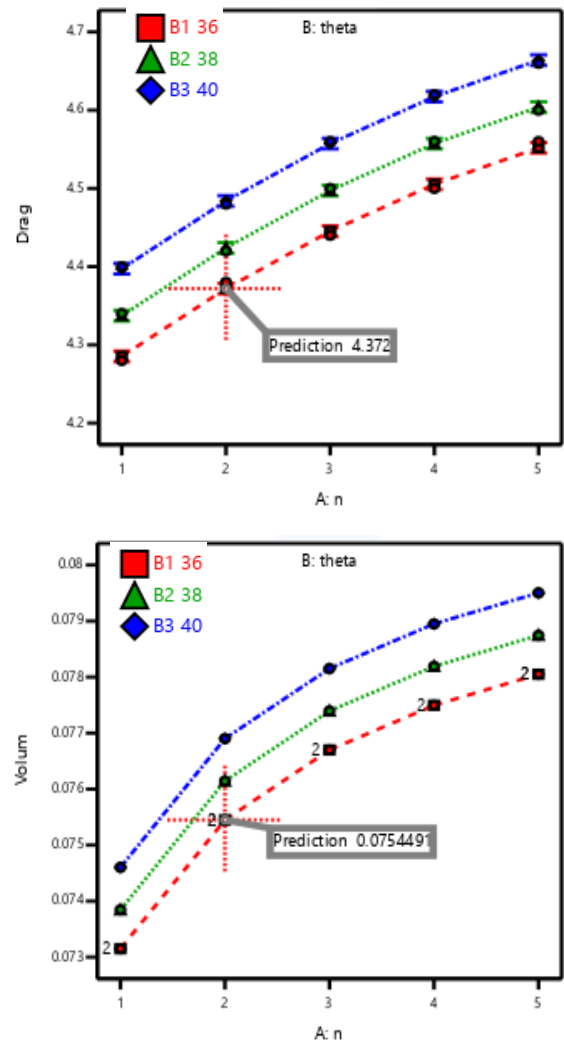
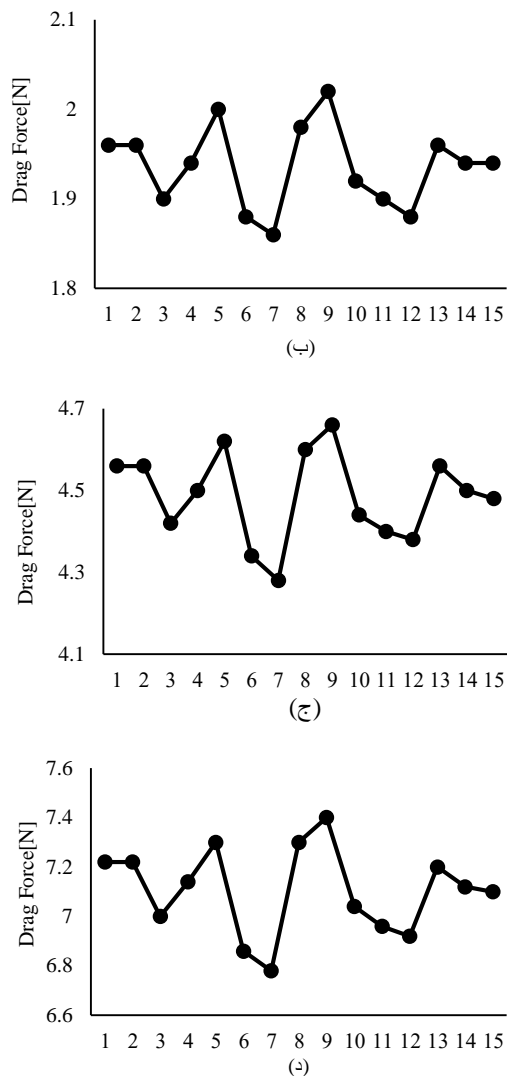
Factor	Units	Levels	min	max
nose	-	۵	۱	۵
tail	degree	۳	۳۶	۴۰

جدول ۵. پاسخ‌های مورد تحلیل در نرم افزار طراحی آزمایش

Response	Units	min	max	Mean
Drag	N	۴/۲۸	۴/۶۶	۴/۴۹
Volume	M ³	۰/۰۷۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶

مدل زیر سطحی طبق طراحی آزمایش صورت گرفته در نرم افزار تحلیل دینامیک سیالاتی طراحی و سپس مورد تحلیل هیدرودینامیکی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

در این مطالعه با هدف حداقل کردن مقاومت شناور در بازه ۲ ± درصد حجم اولیه شناور (۰/۰۷۴-۰/۰۷۷) مورد تحلیل قرار گرفت و ۵ حل نسبت به ۱۵ آزمایش با درصد مطلوبیت طبق جدول ۷ ارائه گردید. طرح آزمایش اول (DOE12) به عنوان بهترین طرح با شرایط اعمال شده با ۱/۱۲ درصد کاهش مقاومت پیشنهاد شد.

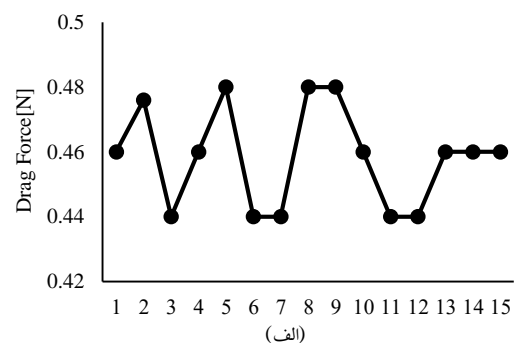


شکل ۷. شمایی از تحلیل نتایج در آزمون‌های مختلف و معرفی نقطه بهینه

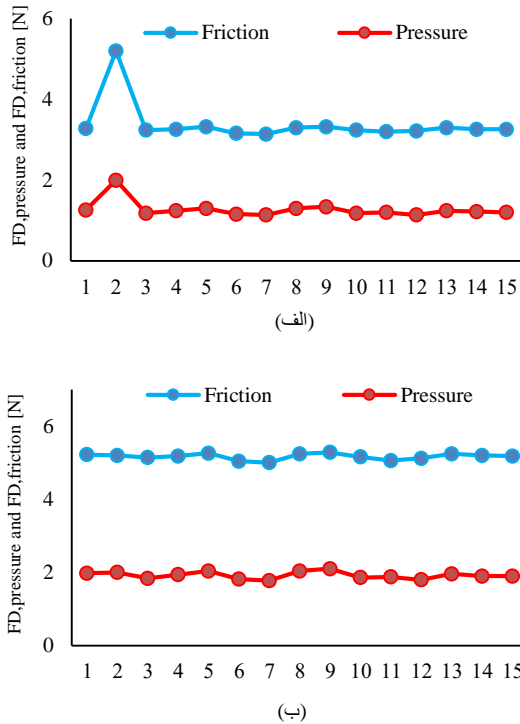
شکل ۸. مقدار مقاومت کل برای آزمایش‌های منتخب در سرعت‌های مختلف. (الف): 0.3 m/s ، (ب): 0.7 m/s ، (ج): 1.1 m/s ، (د): 1.4 m/s .

این مطالعه به بررسی تغییرات مؤلفه‌های نیروی مقاومت و نیروی مقاومت کل بر اساس طرح دماغه و دم پرداخته است که در شکل ۸ برای سرعت جریان‌های مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود، آزمایش ۷ بدون در نظر گرفتن قیدها، کمترین مقاومت را نسبت به سایر فرم‌های بدنه دارد. فرم ارائه شده در این آزمایش نسبت به فرم بدنه پایه $3/2$ درصد مقاومت کمتر را دارا می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود روند مشابهی در مؤلفه‌های نیروی مقاومت کل وجود دارد، اما در نیروی مقاومت کل، نیروی مقاومت اصطکاکی ($F_{D,friction}$) تأثیر بیشتری نسبت به نیروی مقاومت فشاری ($F_{D,pressure}$) دارد.

شکل ۷ نتایج تحلیل صورت گرفته را در نرم افزار طراحی آزمایش با هدف حداقل کردن مقاومت در قید حجم تعیین شده را به همراه نقطه بهینه نشان می‌دهد.



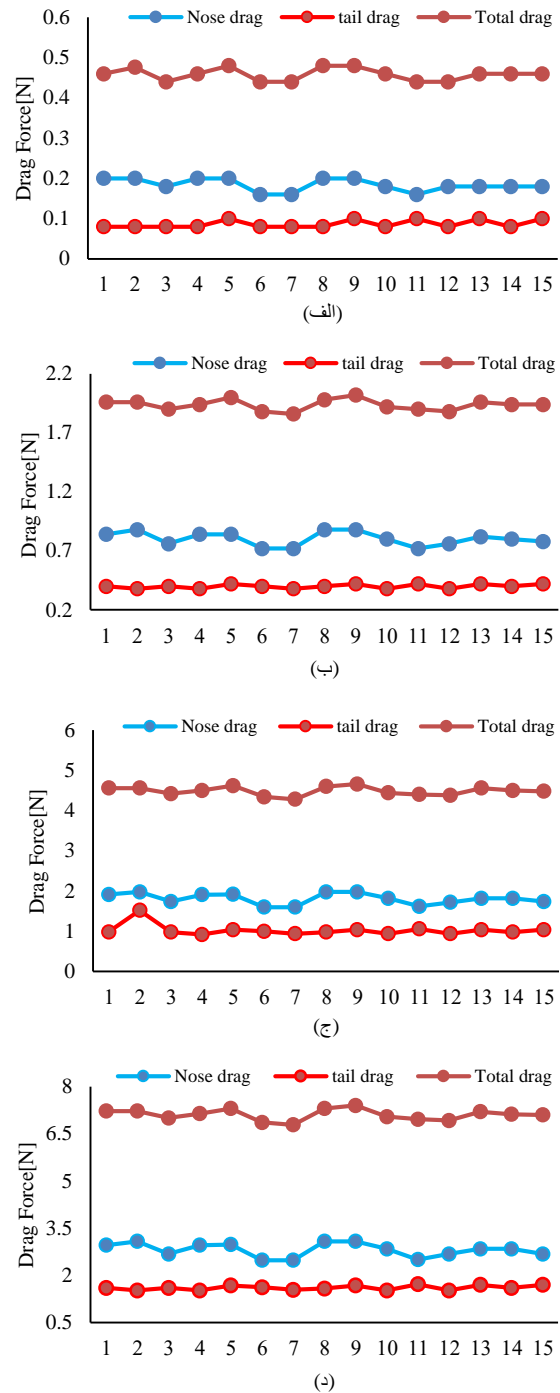
بررسی جداگانه‌ی این دو مؤلفه، ارزیابی نیروی مقاومت کل دقیق‌تر خواهد بود.



شکل ۱۰. مؤلفه‌های مقاومت اصطکاکی و فشاری کل برای آزمایش‌های مختلف. (الف): $1/1 \text{ m/s}$ ، (ب): $1/4 \text{ m/s}$.

عدد رینولدز یک کمیت بدون بعد است که نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای گرانشی را در هر جریان سیال بیان می‌کند. ویژگی‌های جریان ممکن است به دلیل تغییرات در عدد رینولدز متفاوت باشند. با افزایش عدد رینولدز، تأثیر نیروهای لزجی در مقایسه با نیروهای لختی کاهش می‌یابد. مقدار نیروی مقاومتی که بر یک جسم متحرک اعمال می‌شود، در هر رژیم جریان متفاوت خواهد بود.

در مطالعه‌ی حاضر، عدد رینولدز در محدوده‌ی بالای بین $4/541 \times 10^6$ و $2/119 \times 10^6$ متغیر است. ضرایب مقاومت حجمی وابسته به حجم بدنه در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. اگر حجم یک پارامتر مهم در طراحی AUV باشد، ارزیابی رابطه‌ی بین حجم و مقاومت با در نظر گرفتن ضریب مقاومت حجمی نسبت به ضریب مقاومت معمولی مناسب‌تر خواهد بود. مطابق با شکل زیر و همچنین مطالب ارائه شده مشخص است که آزمون ۷ دارای کمترین ضریب مقاومت حجمی بوده که طبق تحلیل قابل پذیرش نیز می‌باشد.

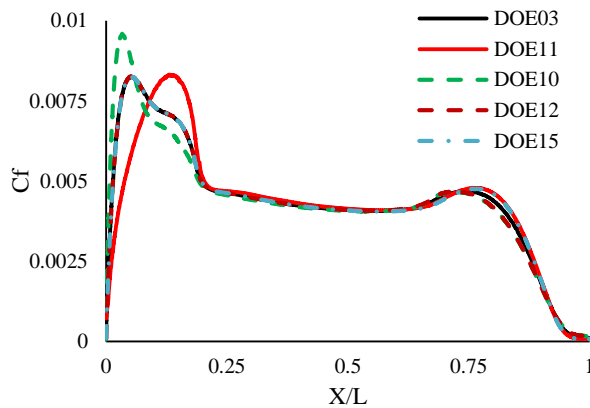


شکل ۹. مقدار مقاومت دماغه و دم AUV، برای آزمایش‌های مختلف. (الف): $1/3 \text{ m/s}$ ، (ب): $1/7 \text{ m/s}$ ، (ج): $1/1 \text{ m/s}$ ، (د): $1/4 \text{ m/s}$.

نیروهای فشاری و اصطکاکی مؤلفه‌های نیروی مقاوم هستند که به دلیل جریان سیال بر جسم اعمال می‌شوند. افزایش مقاومت فشاری کل ناشی از ایجاد ویژگی‌های بدنه‌ی پهن است که باعث افزایش اختلاف فشار بین قسمت جلویی و دم بدنه می‌شود. از سوی دیگر، مقاومت اصطکاکی کل تحت تأثیر گرادیان‌های سرعت و مساحت سطح قرار دارد. به جای

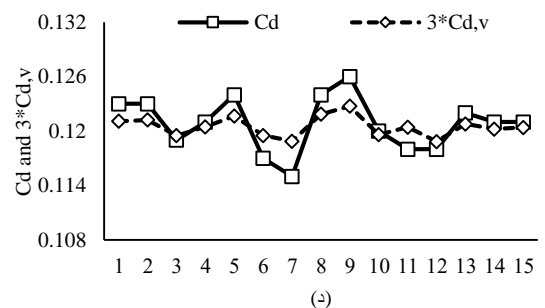
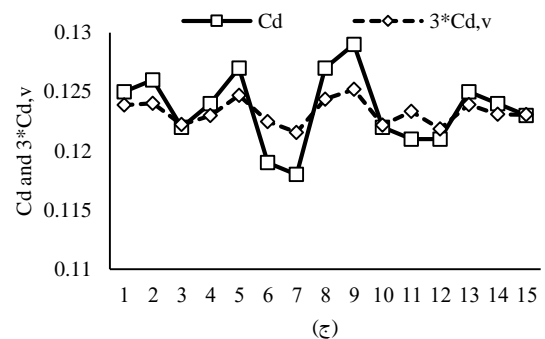
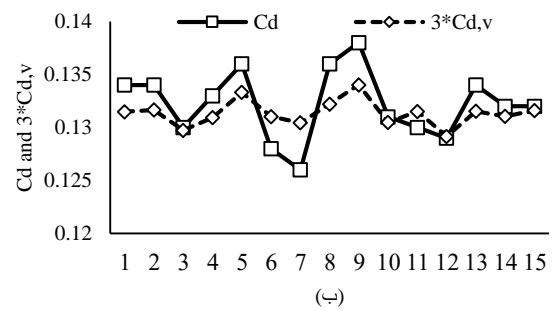
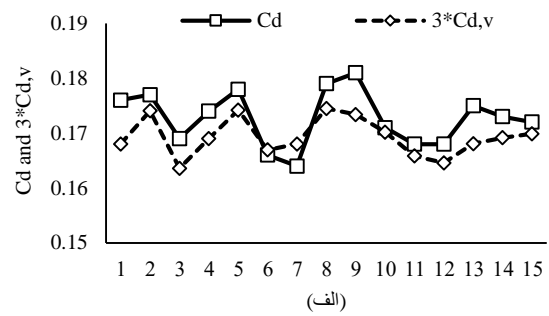
از سطح جدا می‌شود. جدایش جریان بر نیروی مقاوم و ضریب اصطکاک سطحی تأثیر دارد.

گرادیان فشار معکوس می‌تواند موجب جداشدگی لایه مرزی از سطح جامد شود، این گرادیان فشار معکوس به دلیل افزایش فشار استاتیک در جهت جریان رخ می‌دهد. برای تعیین نقطه جدایش، ضریب اصطکاک سطحی در جهت جریان آزاد رسم شده است. شکل ۱۲ توزیع ضریب اصطکاک سطحی را در امتداد خط تقارن بدنه برای آزمایش‌های پیشنهادی نرم افزار طراحی آزمایش را نشان می‌دهد. نوع فرم بدنه و ویژگی‌های جریان اطراف آن بر تنش برشی تأثیر گذار هستند. در سیالات نیوتنی، تنش برشی به طور مستقیم متناسب با گرادیان‌های سرعتی است که در جریان ایجاد می‌شوند.



شکل ۱۲. مقایسه ضریب اصطکاک‌های آزمایش‌های منتخب در سرعت m/s ۱/۱

یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای کاهش مقاومت، اصلاح ویژگی‌های جریان اطراف بدنه‌ی یک زیر سطحی است. رژیم‌های جریان در اطراف بدنه بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی مانند مقاومت فشاری و حداقل نیروی مقاومت روی بدنه تأثیر می‌گذارند. ناحیه‌های کم فشار به دلیل شتاب گرفتن جریان در نواحی که شکل بدنه تغییر جهت می‌دهد، ایجاد می‌شوند. سرعت سیال به صورت معکوس با تغییر مقدار فشار آن مرتبط است. بهبود رژیم‌های جریان در اطراف بدنه نه تنها به کاهش مقاومت کمک می‌کند، بلکه باعث کاهش نویز تولید شده در اثر حرکت AUV نیز می‌شود.



شکل ۱۱. ضریب مقاومت و مقاومت حجمی برای آزمایش‌های مختلف. (الف): $0.3 m/s$ ، (ب): $0.7 m/s$ ، (ج): $1.1 m/s$ ، (د): $1.4 m/s$.

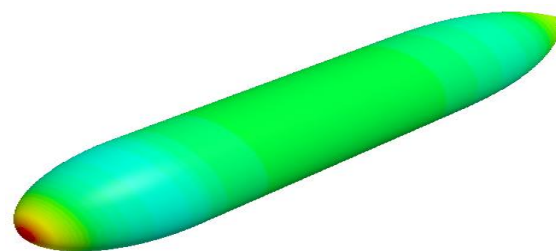
تنش برشی دیواره را می‌توان به عنوان نیروی موازی اعمال شده توسط یک سیال بر واحد سطح توصیف کرد. در نقطه‌ای که تنش برشی دیواره به صفر می‌رسد، لایه‌ی مرزی

کاهش نیروهای مقاومت این پتانسیل را بوجود می‌آورد که قابلیت مانورپذیری بهبود بخشیده و هم‌زمان حداکثر سرعت را افزایش دهد. توزیع فشار در طراحی‌های AUV بر اساس فرم بدنه‌های پیشنهادی در شکل ۱۳ در سرعت ۱/۱ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در این شکل، نواحی با فشار بالا در قسمت‌های جلویی و عقبی بدنه ایجاد می‌شوند، در حالی که نواحی با فشار کم در نقاطی که شکل بدنه تغییر جهت می‌دهد، ظاهر می‌شوند. سرعت سیال به صورت معکوس با افزایش و کاهش مقدار فشار آن متناسب است.

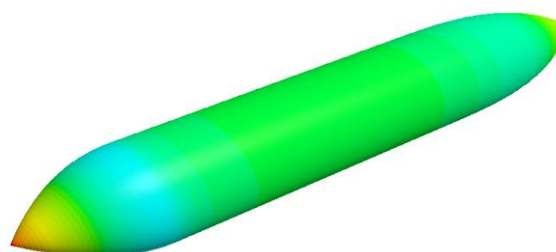
۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هندسه‌ی دماغه و دم بر عملکرد هیدرودینامیکی وسیله‌ی زیرسطحی با استفاده از طراحی آزمایشات انجام گرفت. نوآوری اصلی این تحقیق، به کارگیری معادله‌ی مایرینگ در تولید گزینه‌های متنوع طراحی برای دماغه و دم بود که امکان تحلیل جامع تر رفتار آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی بدنه را فراهم آورد. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه‌ی معادلات RANS در یک دامنه‌ی سه‌بعدی و برای جریان غیرقابل تراکم اجرا شد. بررسی‌ها در سرعت‌های مختلف جریان (۰/۳، ۰/۷، ۱/۱ و ۱/۴ متر بر ثانیه) انجام گرفت تا وابستگی نیروهای هیدرودینامیکی و ساختار جریان به عدد رینولدز مشخص گردد.

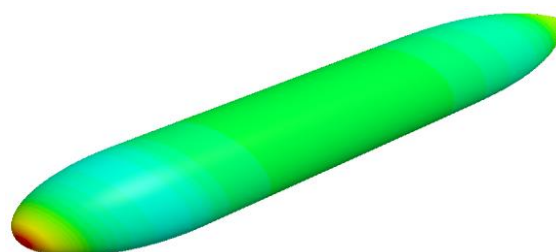
نتایج نشان دادند که هندسه‌ی دماغه و دم تأثیری تعیین‌کننده بر هر دو مؤلفه‌ی مقاومت فشاری و اصطکاکی دارد. دماغه با طراحی بهینه، توسعه لایه مرزی را تا نزدیکی دم بدنه تسهیل می‌کند و با به تعویق انداختن جدایش جریان، موجب غلبه مقاومت اصطکاکی بر مقاومت کل می‌شود. در مقابل، شکل دم بر تغییرات مقاومت فشاری اثرگذار است و می‌تواند الگوهای جریان دنباله را به طور معناداری دگرگون کند. تحلیل داده‌ها در بازه‌ی عدد رینولدز $10^5 \times 4/54$ تا $10^6 \times 2/119$ بیانگر آن است که هرچند روند کلی منحنی‌ها تغییر چندانی ندارد، اما مقیاس نیروها و ضرایب مقاومت تغییرات قابل توجهی را تجربه می‌کنند.



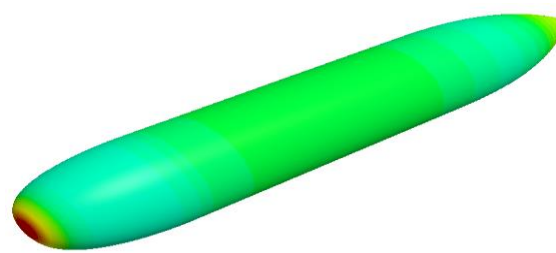
DOE12



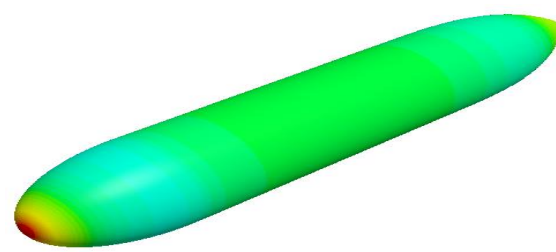
DOE11



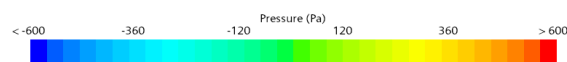
DOE03



DOE10



DOE15



شکل ۱۳. توزیع فشار بر روی بدنه مطابق با آزمایش‌های منتخب در

سرعت ۱/۱ m/s

- temporal planning. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2014 May 31–Jun 7; Hong Kong, China. IEEE; 2014. p. 6535-41. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907823.
- [5] Williams DP. On optimal AUV track-spacing for underwater mine detection. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 2010 May 3-7; Anchorage, AK, USA. IEEE; 2010. p. 4755-62. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509435.
- [6] Williams CD, Curtis TL, Doucet JM, Issac MT, Azarsina F. Effects of hull length on the hydrodynamic loads on a slender underwater vehicle during manoeuvres. In: Proceedings of the OCEANS 2006; 2006 Sep 18-21; Boston, MA, USA. IEEE; 2006. doi: 10.1109/OCEANS.2006.306884.
- [7] Phillips A, Furlong M, Turnock SR. The use of computational fluid dynamics to assess the hull resistance of concept autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of the OCEANS 2007 – Europe; 2007 Jun 18-21; Aberdeen, Scotland. IEEE; 2007. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302349.
- [8] Jagadeesh P, Murali K, Idichandy VG. Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form. *Ocean Eng.* 2009;36(1):113-8. doi: 10.1016/j.oceaneng.2008.11.008.
- [9] Avila JPI, Adamowski JC. Experimental evaluation of the hydrodynamic coefficients of a ROV through Morison's equation. *Ocean Eng.* 2011;38(17-18):2162-70. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.09.032.
- [10] de Sousa VN, de Macedo RL, Ferreira de Amorim Junior W, de Lima GB. Numerical analysis of turbulent fluid flow and drag coefficient for optimizing the AUV hull design. *Open J Fluid Dyn.* 2014;4(3):263-77. doi: 10.4236/ojfd.2014.43020.
- [11] Xu SJ, Han DF, Ma QW. Hydrodynamic forces and moments acting on a remotely operated vehicle with an asymmetric shape moving in a vertical plane. *Eur J Mech B Fluid.* 2015;54:1-9. doi: 10.1016/j.euromechflu.2015.05.007.
- [12] Madan AD, Issac MT. Hydrodynamic analysis of AUV hulls using semi-empirical and CFD approach. *Univ J Mech Eng.* 2017;5(5):137-43. doi: 10.13189/ujme.2017.050501.
- [13] Hong L, Fang R, Cai X, Wang X. Numerical investigation on hydrodynamic performance of a portable AUV. *J Mar Sci Eng.* 2021;9(8):812. doi: 10.3390/jmse9080812.
- [14] Gao T, Wang Y, Pang Y, Cao J. Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD. *Eng Appl Comput Fluid*

بهنه‌سازی هندسی دماغه و دم بر اساس معیارهایی چون ضریب مقاومت و ضریب مقاومت حجمی (متناسب با حجم مفید) می‌تواند راهگشای دستیابی به سرعت‌های بالاتر و مصرف انرژی کمتر باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که اصلاح هندسه‌ی دماغه توانست مقاومت کل را تا حدود ۱/۱۲٪ کاهش دهد و موقعیت جدایش جریان را بهبود بخشد. همچنین، در میان طرح‌های بررسی شده، مدل آزمایش شماره ۷ با کاهش ۳/۲٪ نسبت به فرم پایه، کمترین مقاومت هیدرودینامیکی را ارائه کرد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان چارچوبی راهنما در طراحی AUV ها به‌منظور حداقل‌سازی مقاومت و ارتقای کارایی مورد استفاده قرار گیرد. چشم‌انداز تحقیقات آینده، گسترش دامنه‌ی بررسی به سایر اجزای بدنه و ملحقات عملکردی خواهد بود تا تصویری جامع‌تر از رفتار هیدرودینامیکی وسایل نقلیه‌ی زیرسطحی ارائه شود.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از نتایج یک پایان‌نامه دکتری می‌باشد و در اینجا از همه اساتید بزرگوار دانشگاه صنعتی مالک اشتر و دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به خاطر حمایت‌هایشان از این پژوهش سپاسگزاری می‌کنم.

مراجع

- [1] Jaffe JS, Franks PJS, Roberts PLD, Mirza D, Schurgers C, Kastner R, et al. A swarm of autonomous miniature underwater robot drifters for exploring submesoscale ocean dynamics. *Nat Commun.* 2017;8:14189. doi: 10.1038/ncomms14189.
- [2] Anderson B, Crowell J. Workhorse AUV - a cost-sensible new autonomous underwater vehicle for surveys/soundings, search & rescue, and research. In: Proceedings of the MTS/IEEE Oceans 2005; 2005; Washington, DC, USA. MTS/IEEE; 2005. p. 1-6. doi: 10.1109/OCEANS.2005.1639923.
- [3] Fernandes VH, Neto AA. Pipeline inspection with AUV. In: Proceedings of the RIO Acoustics 2015; 2015 Jul 29-31; Rio de Janeiro, Brazil. IEEE; 2015. p. 6-10. doi: 10.1109/RIOAcoustics.2015.7473598.
- [4] Cashmore M, Fox M, Larkworthy T, Long D, Magazzeni D. AUV mission control via

- issues. *J Acoust Soc Am.* 2004;115(5 Pt 2):2615. doi: 10.1121/1.4784796.
- [26] Marthiniussen R, Vestgard K, Klepaker RA, Storkersen N. HUGIN-AUV concept and operational experiences to date. In: *Proceedings of the Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04*; 2004 Nov 9-12; Kobe, Japan. IEEE; 2004. p. 846-50. doi: 10.1109/OCEANS.2004.1405571.
- [27] White FM. *Fluid mechanics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2003.
- [28] Schlichting H. *Boundary-layer theory*. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 1979.
- [29] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments*. 5th ed. New York: Wiley; 2001.
- [30] West GS, Apelt CJ. The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between 10^4 and 10^5 . *J Fluid Mech.* 1982;114:361-77. doi: 10.1017/S0022112082000202.
- [31] Lyon MH. The drag of streamline bodies. *Aircraft Eng Aero Technol.* 1934;6(9):233-9. doi: 10.1108/eb029841.
- [32] Bell WH. The influence of turbulence on drag. *Ocean Eng.* 1979;6(3):329-40. doi: 10.1016/0029-8018(79)90021-0.
- Mech. 2016;10(1):599-607. doi: 10.1080/19942060.2016.1224735.
- [15] Uppal H, Isaac MT, Shameem BM. Numerical investigation on the drag characteristics of AUV hulls. *Int J Mech Prod Eng Res Dev.* 2019;9(3):645-54. doi: 10.24247/ijmperdjun201971.
- [16] Saghafi M, Lavimi R. Optimal design of nose and tail of an autonomous underwater vehicle hull to reduce drag force using numerical simulation. *Proc Inst Mech Eng Part M J Eng Marit Environ.* 2020;234(1):76-88. doi: 10.1177/1475090219863191.
- [17] Sener MZ, Aksu E. The effects of head form on resistance performance and flow characteristics for a streamlined AUV hull design. *Ocean Eng.* 2022;257:111630. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111630.
- [18] Chen X, Yu L, Liu LY, Yang L, Xu SH, Wu J. Multi-objective shape optimization of autonomous underwater vehicle by coupling CFD simulation with genetic algorithm. *Ocean Eng.* 2023;286:115722. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115722.
- [19] Myring DF. A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *Aeronaut Q.* 1976;27(3):186-94. doi: 10.1017/S000192590000768X.
- [20] Hu HH. Chapter 10 - computational fluid dynamics. In: Kundu PK, Cohen IM, Dowling DR, editors. *Fluid mechanics*. 5th ed. Boston: Academic Press; 2012. p. 421-72. doi: 10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1.
- [21] Eymard R, Gallouët T, Herbin R. Finite volume methods. In: Ciarlet PG, Lions JL, editors. *Handbook of numerical analysis*. Vol. 7. Amsterdam: North-Holland; 2000. p. 731-1018. doi: 10.1016/S1570-8659(00)07007-8.
- [22] Collar PG, McPhail SD. Autosub: an autonomous unmanned submersible for ocean data collection. *Electron Commun Eng J.* 1995;7(3):105-14. doi: 10.1049/ecej:19950305.
- [23] Allen B, Stokey R, Austin T, Forrester N, Goldsborough R, Purcell M, et al. REMUS: a small, low cost AUV; system description, field trials and performance results. In: *Proceedings of the Oceans '97 MTS/IEEE Conference*; 1997 Oct 6-9; Halifax, NS, Canada. IEEE; 1997. p. 994-1000. doi: 10.1109/OCEANS.1997.624126.
- [24] Pascoal A, Oliveira P, Silvestre C, Bjerrum A, Ishoy A, Pignon JP, et al. MARIUS: an autonomous underwater vehicle for coastal oceanography. *IEEE Robot Autom Mag.* 1997;4(4):46-58. doi: 10.1109/100.637805.
- [25] Bondaryk J. Bluefin autonomous underwater vehicles: programs, systems, and acoustic

پی نوشت‌ها

1. Autonomous underwater vehicles (AUV)
2. F_{pressure}
3. F_{friction}
4. Blockage ratio