

بهبود عملکرد هیدرودینامیکی یک گلايدر دریایی با دینامیک سیالات محاسباتی

محمد سعید شمشیری^۱، سید مجتبی علوی جم^۲، محمد مونسان^{۳*}، یحیی عمو شاهی^۴، مهدی عجمی^۲، سجاد اردشیری^۵

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی از دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ m.s.sh1391@gmail.com

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک از دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ seiedmojtaba_alavijam@yahoo.com

^۳ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود؛ m.moonesun@gmail.com

^۴ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک از دانشگاه صنعتی اصفهان؛ yahya.amooshahi@me.iut.ac.ir

^۵ فارغ التحصیل دکترای دانشگاه صنعتی مالک اشتر و پژوهشگر سازمان صنایع دریایی sajjad_ardeshiri@yahoo.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:

گلايدر دریایی، اسپری، هیدروفویل، CFD، مقاومت، لیفت.

چکیده

گلايدرهای متحرک‌های دریایی جدیدی با کاربردهای تحقیقاتی و نظامی هستند که با غوص و صعود متوالی حرکت می‌کنند لذا بدنه و بال‌های مناسب برای دستیابی به بیشترین سرعت پیشروی مهم هستند. متغیرهای مربوط به طراحی هیدرودینامیکی شامل فرم بدنه اصلی، بال (مقطع، ابعاد، شکل، موقعیت طولی و عمودی آن‌ها) و هیدرواستاتیک (زاویه تریم استاتیکی، میزان نیروی افزوده) هستند. گلايدر دریایی اسپری به عنوان طرح اولیه انتخاب می‌شود و با تغییر دادن اجزاء، اثر هر کدام در عملکرد آن با شبیه‌سازی عددی بررسی و حالت‌های مناسب تعیین می‌شود. شبیه‌سازی عددی به روش دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام‌پلاس انجام می‌شود و مطابق اعتبار سنجی، خطای آن کمتر از ۱۰٪ است. بدنه گلايدر اسپری، کمترین مقاومت را دارد. برای بال، مقاطع متقارن عملکرد بهتری دارند و مقطع NACA 0012 انتخاب می‌شود. به لحاظ هیدرودینامیکی بال‌ها با ابعاد کوچکتر رفتار هیدرودینامیکی بهتری نشان داده و با عقب بردن بال، مقدار سرعت پیشروی افزایش می‌یابد. افزایش زاویه تریم استاتیکی و افزایش مقدار نیروی افزوده اثر مثبت بر سرعت پیشروی دارند.

Hydrodynamic Improvement of underwater glider by Computational Fluid Dynamics method

Mohamad Saeed Shamshiri¹, Seied Mojtaba Alavi jam², Mohamad Moonesun^{3*}, Yahya Amooshahi³, Mehdi Ajami², Sajjad Ardeshiri⁵

¹ Master of Science of Marine Engineering from Amirkabir University of Technology; m.s.shamshiri@aut.ac.ir

² Master of Science of Mechanical Engineering from Emam Hosein University; seiedmojtaba_alavijam@yahoo.com

³ Faculty of Civil Engineering of Shahrood University of Technology; m.moonesun@gmail.com

⁴ Master of Science of Mechanical Engineering from Isfahan University of Technology; yahya.amooshahi@me.iut.ac.ir

⁵ Doctorate graduate of Malek Ashtar University of Technology; sajjad_ardeshiri@yahoo.com

ARTICLE INFO

Received: 18 Mar 2023

Accepted: 27 Feb 2024

Keywords:

ABSTRACT

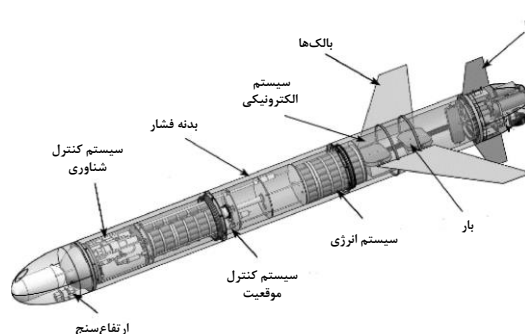
Gliders are new marine vehicles which have research and military uses and they move by sequent diving and climbing. Suitable design of its main body and wings are important for the most advance velocity. hydrodynamic design variables are main body form, wings (cross section, dimensions, shape, longitudinal and vertical position) and hydrostatic parameters (static trim angle, amount of added force). Spray marine glider is selected as the initial design and changing each of its component in

Underwater Glider, Spray, Hydrofoil, CFD, Resistance, Lift.

numerical simulation show its effects on the glider performance then the appropriate ones are chosen. The glider is simulated by computational fluid dynamics method in Star CCM+ that its error is less than 10% according to a validation. The main body of Spray has the least resistance force. Symmetry sections performance are better for the wings, and NACA 0012 foil is chosen. smaller wings are better. by moving the wings to back of the glider the advance velocity increases. Increasing the static trim angle and the added force causes increasing the advance velocity.

۱- مقدمه

گلایدرها متحرک‌های دریایی جدیدی هستند که کاربردهایی از جمله اقیانوس شناسی دارند. با طراحی بالک‌ها جهت ایجاد نیروی لیفت، گلایدرها قادر به حرکت در آب بوده و با استفاده از سیستم کنترل شناوری به همراه یک سیستم هیدرولیکی کنترل می‌شوند. گلایدرهای بدون سرنشین، در بسیاری از برنامه‌های کاربردی به دلیل هزینه‌های عملیاتی کم و توانایی تکمیل مأموریت‌های مهم و طولانی در محیط ناآرام اقیانوس‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. گلایدر دریایی در دسته متحرک‌های زیر سطحی بدون سرنشین^۱ قرار دارند که با ایجاد غوص و صعود به صورت حرکت زیگزاگ با تغییر شناوری و موقعیت مرکز ثقل (به کمک مخزن و پمپ)، به جلو حرکت می‌کنند [۱]. گلایدرها دارای بالک‌هایی هستند و با جابه‌جایی جرم متحرک داخلی و سطوح کنترلی (مانند سکان) جهت خود را کنترل می‌کنند. در گلایدرهای دریایی از رانشگرها استفاده نمی‌شود و نیاز به توان الکتریکی بسیار کمی دارند که علت آن استفاده از رانشگر شناوری^۲ است. بنابراین مداومت بالا و قابلیت استقرار طولانی مدت (معمولاً چند ماه) در زیر آب را دارند. به عنوان مثال گلایدر تجاری اسپری^۳ مداومت بالایی در حدود ۶ ماه و قابلیت پیمایش بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر را دارد [۱۹]. پیکربندی و اجزای یک نمونه گلایدر با نام آرگو^۴ در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: پیکربندی داخلی گلایدر دریایی آرگو [۲]

رفتار یک گلایدر برای حرکت در آب با انتقال یک جرم سنگین از قسمت جلویی به قسمت عقبی است که باعث تغییر در مرکز ثقل گلایدر می‌شود. اساس حرکت گلایدر در آب تفاوت چگالی گلایدر و آب اطراف آن است که باعث می‌شود وسیله به عمق‌های

پایین‌تری حرکت کند. این کار سبب ایجاد نیروی شناوری منفی برای حرکت رو به پایین و نیروی شناوری مثبت برای حرکت رو به بالا شود.

در گلایدرهای دریایی بیش از ۸۰ درصد از توان الکتریکی صرف سیستم تغییر شناوری^۵ به وسیله مخزن و پمپ، می‌شود. اگر گلایدرها بتوانند انرژی محرک خود را از محیط اقیانوس دریافت کنند، آنگاه توان باتری آن‌ها تنها صرف هدایت، اجزای الکترونیکی و حسگرها می‌شود.

گلایدرهای دریایی، کوچک و قابل استفاده مجدد می‌باشند که برای عمق‌سنجی، اندازه‌گیری دما، شوری آب دریا و یافتن عمق میانگین امواج با حرکت زیگزاگی طراحی شده‌اند. این وسیله به صورت بی‌سیم مقادیر اندازه‌گیری شده را به بیرون مخابره می‌کند و به سبب دارا بودن میزان کنترل خیلی خوب روی حرکات و عملکرد میدانی، اطلاعات دقیقی از اقیانوس‌ها و بستر آن‌ها به دست می‌آورد. این نوع گلایدرها قابلیت آشکار سازی بهتر ساختار هیدروگرافی داخل اقیانوس را دارند.

ویژگی‌های جذاب گلایدرهای دریایی شامل عملکرد خود کار، مداومت بالا و هزینه کم، سبب استفاده آن‌ها برای اقیانوس‌شناسی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی شده‌است. همچنین به عنوان درگاه‌های ارتباطی یا کمک-ناوبری و برنامه‌های نظامی مانند اقیانوس‌شناسی تاکتیکی و شناسایی دریایی کاربرد دارند. به دلیل اینکه این گلایدرها رانشگر ندارند و از محرک‌های داخلی برای حرکت استفاده می‌کنند، بسیار کم صدا هستند. این یک ویژگی جذاب برای کاربردهای نظامی است، زیرا تشخیص وسایل نقلیه بی‌سرو صدا دشوار است. در اغلب کشورهایی که مرزهای آبی دارند تجهیزات گلایدر و وسایل مورد استفاده در این تجهیزات در حال پیشرفت است. از کاربردهای دیگر گلایدر می‌توان به تعقیب و تخریب تجهیزات دشمن اشاره کرد [۲].

در مراجع [۳] و [۴] یک وسیله زیر سطحی بدون سرنشین به نام اسمت فلوت^۶ پیشنهاد و توسعه داده شده که ترکیبی از شناور گلایدر آرگو و شناور است. این وسیله چندحالتی می‌تواند عملکرد خود را با سیستم کنترل ناوبری از حالت شناور به حالت گلایدر تغییر دهد.

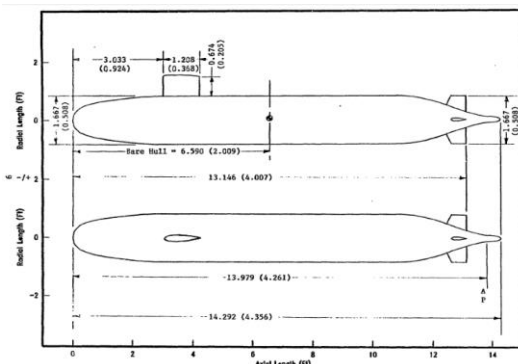
بال بر عملکرد هیدرودینامیکی گلايدر پرداخته می‌شود. و همچنین تأثیر شرایط هیدرواستاتیکی یعنی تغییرات تریم و تغییر نیروی افزوده بر عملکرد هیدرودینامیکی گلايدر نیز بررسی می‌شود.

۲- اعتبارسنجی، شبکه‌بندی و تنظیم شرایط حل

هر شبیه‌سازی عددی به سه مرحله اساسی پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش تقسیم می‌گردد. تنظیمات مربوط به پیش‌پردازنده شامل مدل هندسی، دامنه و شبکه محاسباتی و انتخاب حلگرهای مناسب مسئله است. برای بررسی صحت انتخاب‌ها و همچنین دقت شبیه‌سازی، به اعتبارسنجی حل نیاز است. اعتبارسنجی عبارتست از شبیه‌سازی یک مسئله مشابه که نتایج تجربی یا حل تحلیلی دقیق آن در دسترس بوده و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی یا تحلیل معتبر.

با توجه به این که تست معتبری برای یک گلايدر دریایی یافت نشد، از نتایج تست یک زیردریایی استفاده می‌شود. برای اعتبارسنجی، زیردریایی دارپا سابوف انتخاب شد. آزمایش‌های این زیردریایی در مؤسسه تحقیقاتی دیوید تیلور ایالات متحده برای آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی این کشور انجام شده است.

آزمایش انتخاب شده، مربوط به تست مقاومت مدل سابوف با ملحقات کامل (شامل بدنه اصلی، برجک، بالک‌های افقی و عمودی پاشنه) بوده که در حوضچه کشت در حالت عمیق و بدون زاویه دریافت و حمله انجام شده است. شکل ۲ هندسه مدل به همراه ابعاد اصلی آن را در دو نمای جانبی و بالا نشان می‌دهد. در این شکل، اندازه‌های بیرون پرنتر، یکای فوت دارند و اعداد داخل پرنتر، بیانگر همان اندازه‌ها به متر هستند [۱۴، ۱۵، ۱۶]. بدنه اصلی زیردریایی، تقارن محوری دارد و از دوران یک پروفیل حول محوری که همان محور طولی زیردریایی است، به دست می‌آید.



شکل ۲: مدل سابوف استفاده شده با ابعاد کلی [۱۴]

در مدل انتخاب شده، علاوه بر بدنه اصلی، برجک و بالک‌های پاشنه نیز وجود دارند. مکان هندسی مقطع برجک و رویه خط جریان آن در مرجع [۱۴] ذکر شده است. هر چهار بالک پاشنه،

در پژوهشی دیگر مشخصه‌های تجربی درگ و لیفت یک گلايدر با دینامیک سیالات محاسباتی اعتبارسنجی شده است. توزیع نیروی درگ و لیفت در زوایای حمله متفاوت در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. همچنین اثر سرعت و زاویه حمله گلايدر بررسی شده است [۵].

در مرجع [۶] مدل‌های ریاضی غیرخطی با شش درجه آزادی دینامیکی برای کنترل حرکت و ناوبری استخراج شده است.

در مرجع [۷] نیز تحلیل تئوری به منظور کنترل شناوری و عمق گلايدر صورت گرفته است. الزامات اصلی، شرایط مرزی و پارامترهای ریاضی تعیین کننده به منظور طراحی سیستم شناوری مورد بررسی قرار گرفته است.

انواع گلايدرهایی دریایی از لحاظ خصوصیات طراحی، مکانیزم حرکتی، برد و ظرفیت حمل بار بررسی و مزایا و معایب هر کدام تعیین شده است. [۸]

از انرژی محیطی اقیانوس به منظور افزایش برد و مداومت گلايدر نیز می‌توان استفاده نمود. در مرجع [۹] یک مدل دقیق با چهار مدل فرعی برای توصیف فرایند استفاده از انرژی حرارتی اقیانوس در گلايدر ایجاد شده است. عواملی نظیر فشار سیستم و خواص فیزیکی، در نظر گرفته می‌شود.

در بعضی تحقیقات موجود، استراتژی کنترل و به حداقل رساندن انرژی در گلايدرهایی هیبریدی به روش تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۰] یک استراتژی کنترل مختصات چندلایه در دم گلايدر هیبریدی توسعه یافته تا حرکت و شکل هندسی گلايدرها را با مصرف بهینه انرژی کنترل کند.

در مرجع [۱۱] نیز رابطه بین هندسه گلايدر و مشخصه‌های پایداری و عملکردی گلايدر مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای هندسی بررسی شده شامل ضریب لاغری بدنه، موقعیت و شکل بال و موقعیت و شکل پایدار کننده عمودی است.

در مرجع [۱۲] تغییرات حجم ایجاد شده در سیستم کنترل شناوری به روش تحلیلی و عددی بهینه شده است. برای این منظور تکنیکی را برای بهینه‌سازی طراحی گلايدرهایی زیر آب در نظر گرفته‌اند تا گلايدر با استفاده از ترکیب یک موتور شناوری و یک پیشرانده محرکه کار کند.

بال‌ها جزء مستقیم تولید نیروی محرکه برای گلايدر دریایی است. بهبود کارایی هیدروپویل بال بسیار مهم است. مطابق تحقیقات انجام شده در مرجع [۱۳] با استفاده از رویکرد پارامتری تغییر شکل آزاد^۷ و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جانشینی^۸ شکل یک هیدروپویل، بهینه شده است.

در این مقاله با استفاده از روش محاسبات عددی به بررسی تأثیر جریان بر روی بدنه اصلی، طراحی بال و تأثیر موقعیت قرارگیری

نسبت منظری ^{۱۰}	0.603	0.720
پروفیل مقطع	-	NACA 0020

در شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی، مشابه تست تجربی علاوه بر هندسه، توزیع جرمی آن نیز مورد نیاز است. جدول ۲ در بردارنده خلاصه ای از ابعاد مهم و سایر مشخصات وابسته به هندسه و توزیع جرمی مدل است. تعیین برخی از پارامترها باید در یک دستگاه مختصات صورت گیرد. دستگاه مختصات انتخاب شده، یک دستگاه کارترین است که محور X آن روی محور بدنه در جهت رو به جلو و محور Z دستگاه رو به بالا در جهت کاهش عمق انتخاب می گردد. محور Y نیز با قاعده دست راست قابل تعیین است. دو دستگاه مختصات که فقط مبدأ آن ها متفاوت است، استفاده می شود. برای ترسیم هندسه، مبدأ مختصات در انتهایی ترین نقطه پاشنه در نظر گرفته شده است. ممان اینرسی، نیروها و گشتاورها نسبت به دستگاه مختصات با مبدأ مرکز ثقل بیان می شوند.

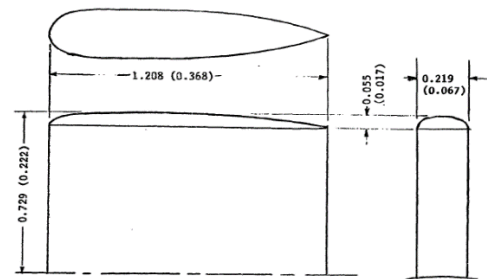
جدول ۲: مشخصات هندسی و جرمی زیردریایی سابوف [۱۴]

مشخصه	نماد و یکا	مقدار
طول بین دو عمود	$L_{PP} [m]$	4.261
طول کلی	$L_{OA} [m]$	4.356
فاصله طولی مرکز بویانسی از پاشنه	$LCB [m]$	2.343
فاصله ارتفاع مرکز بویانسی از محور بدنه	$VCB [m]$	0.002
طول ناحیه دماغه بدنه	$L_F [m]$	1.016
طول ناحیه میانی بدنه	$L_P [m]$	2.229
طول ناحیه پاشنه	$L_R [m]$	1.111
قطر	$D_H [m]$	0.508
نسبت ظرافت ^{۱۱}	FR	8.575
حجم	$\nabla [m^3]$	0.70764
مساحت سطح خیس	$WS [m^2]$	6.2850
نیروی بویانسی (جابه جایی)	$\Delta [N]$	6922.484
جرم	$M [kg]$	705.656
چگالی	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	997.20
ممان اینرسی حول محور Z در CG	$I_{zz} [kg.m^2]$	759.168
ممان اینرسی حول محور Y در CG	$I_{yy} [kg.m^2]$	759.168

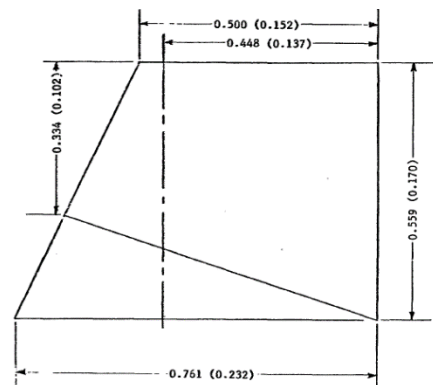
با توجه به اینکه برای غوطه وری زیردریایی در آب، چگالی آن باید با آب برابر باشد، چگالی آب نیز $997.203 \frac{kg}{m^3}$ است؛ پس در آزمایش، سیال عامل آب شیرین در دمای اتاق می باشد که ویسکوزیته دینامیکی آن $8.89 \times 10^{-4} Pas.s$ در نظر گرفته می شود. برای صفر بودن تریب هیدرواستاتیکی مدل، باید موقعیت طولی مرکز ثقل با مرکز بویانسی برابر باشد:

$$LCG = LCB \quad (۱)$$

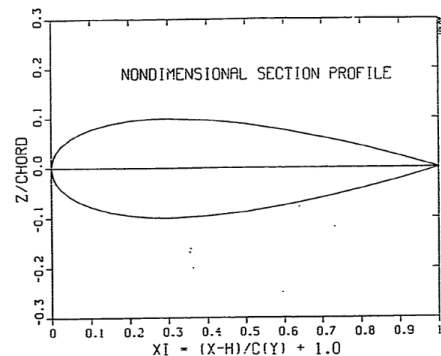
مشابه یکدیگر بوده و پروفیل مقطع آن ها NACA 0020 می باشد. در شکل ۳، سه نمای برجک و در شکل ۴ و شکل ۵ نمای جانبی بالک ها و مقطع بی بعد آن ها نشان داده شده است.



شکل ۳: سه نمای برجک [۱۴]



شکل ۴: نمای جانبی بالک های پاشنه [۱۴]

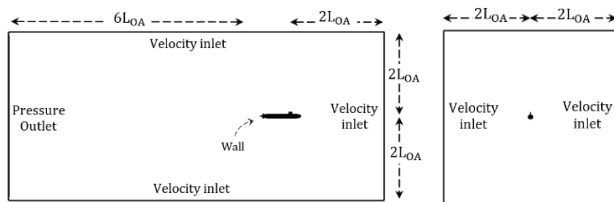


شکل ۵: مقطع بالک های پاشنه بدون بعد [۱۴]

مشخصه های هندسی مهم برجک و بالک های پاشنه به طور خلاصه در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی بالک های پاشنه و برجک زیردریایی سابوف [۱۴]

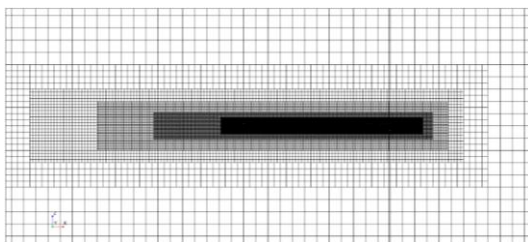
مشخصه	برجک (m)	بالک های پاشنه (m)
طول دهانه ^۹	0.222	0.134
طول وتر در ریشه	0.368	0.215
طول وتر در نوک	0.368	0.152
فاصله عمود سینه تا لبه حمله	0.924	-
فاصله عمود سینه تا لبه فرار	-	4.007



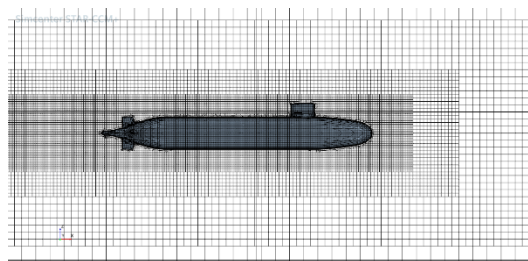
شکل ۷: شرایط مرزی و دامنه محاسباتی

۲-۲- شبکه بندی

فرآیند گسسته سازی میدان فیزیکی، عملیات پیچیده‌ای بوده که سهم قابل توجهی در کیفیت حل میدان دارد. در این پژوهش، از شبکه بندی هیبرید استفاده شده است. شبکه در نرم افزار استار سی سی ام پلاس به روش تریمر تولید شده است. در این روش، تمام حجم هندسه با مش‌های شش وجهی مکعبی به عنوان پس زمینه پوشانده شده و سپس مش‌ها با سطوح جسم جامد بریده می‌شوند و در نهایت، مش حجم‌هایی که سیال در آن‌ها وجود ندارد، حذف می‌گردند. شبکه اطراف بدنه و ناحیه‌هایی که پارامترهای جریان (به خصوص سرعت و فشار) تغییرات زیادی دارند ریزتر شده تا حدی که تغییرات به خوبی دیده شوند. شکل ۸ و شکل ۹ شبکه بندی دامنه را نشان می‌دهد.



شکل ۸: شبکه بندی دامنه



شکل ۹: شبکه بندی دامنه

در مراجع، در مورد ارتفاع مرکز ثقل صحبتی نشده است. برای ایجاد پایداری، مرکز ثقل پایین‌تر از مرکز بویانسی قرار داده می‌شود. در این پژوهش فرض می‌شود مرکز ثقل روی محور تقارن بدنه اصلی قرار دارد. جدول ۳ نتایج تست مقاومت مدل در سرعت‌های مختلف را در بر دارد.

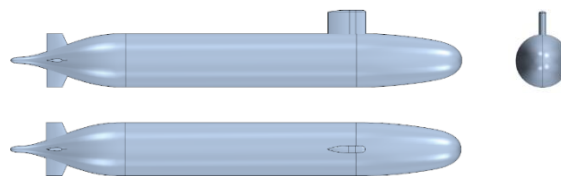
جدول ۳: نتایج تست سابوف در حوضچه کشش عمیق [۱۶]

R_T [N]	u [m/s]	پیکربندی مدل
821.1	9.151	ملحقات کامل

برای اعتبار سنجی، هندسه زیردریایی سابوف با هندسه موجود در مراجع ترسیم می‌شود و در سرعت $u=9.151 \text{ m/s}$ شبیه سازی می‌گردد.

۲-۱- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

هندسه زیردریایی سابوف با اطلاعات مراجع [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] ترسیم شده است. سه نمای این هندسه، در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



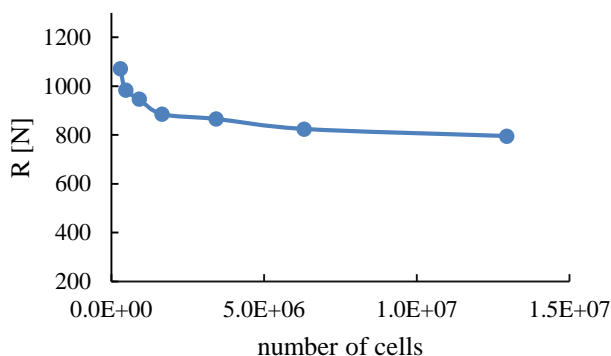
شکل ۶: سه نمای هندسه ترسیم شده از زیردریایی سابوف

دامنه محاسباتی و شبکه اطراف زیردریایی در نرم افزار استار سی سی ام پلاس^{۱۲} ساخته شده است. ابعاد دامنه باید قدری بزرگ باشد که بر نتایج تأثیری نگذارد. در این پژوهش ابعاد دامنه به صورت مضربی از طول شناور قرار داده شده است و از مقادیر پیشنهادی برای شناور در مرجع [۲۰] بزرگتر اخذ شده است. در کلیه حالت‌ها برای ورودی و کلیه مرزهای جانبی دامنه، شرط مرزی سرعت ورودی^{۱۳} و برای مرز خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی^{۱۴} اعمال گردید. شرط مرزی زیردریایی نیز دیواره بدون لغزش خواهد بود. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل نیز در شکل ۷ آورده شده است.

با تعداد سلول حدود یک میلیون و ششصد هزار) اندازه‌ی بهینه می‌باشد و به عنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب می‌گردد. ابعاد شبکه‌بندی قسمت‌های مختلف دامنه محاسباتی به صورت درصدی از اندازه پایه تعیین می‌گردد.

جدول ۴: نتایج نهایی مطالعه شبکه

R [N]	First Layer [m]	Time step [s]	Number of cell	Base size [m]	#
1071.7	0.00101	0.0252	290,951	0.4536	1
984.2	0.00080	0.0200	468,500	0.3600	2
946.3	0.00064	0.0159	914,712	0.2858	3
885.0	0.00051	0.0126	1,656,317	0.2268	4
865.1	0.00040	0.0100	3,428,198	0.1800	5
824.0	0.00032	0.0079	6,308,918	0.1429	6
795	0.00025	0.0063	12,941,081	0.1134	7



شکل ۱۱: نمودار ضریب مقاومت بر حسب تعداد سلول‌های شبکه

۳-۲- شرایط و تنظیمات شبیه‌سازی

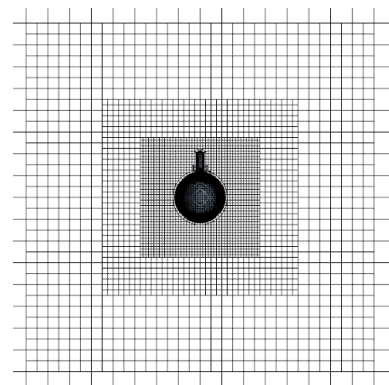
تحلیل جریان به صورت گذرا با چگالی ثابت تنظیم گردیده‌است. برای تخمین عدد رینولدز جریان اطراف زیردریایی، از رابطه عدد رینولدز جریان برای صفحه تخت استفاده می‌شود:

$$Re = \frac{\rho U_{LOA}}{\mu} = 4.37 \times 10^8 \quad (2)$$

در حل مسائل مهندسی دریایی معمولاً رینولدز بحرانی، 5×10^5 در نظر گرفته می‌شود مگر اینکه شرایط معلوم محلی ایجاب کند که از عدد رینولدز بحرانی دیگری استفاده شود. با توجه به اینکه عدد رینولدز جریان، از عدد رینولدز بحرانی خیلی بیشتر است، جریان، مغشوش می‌باشد. برای شبیه‌سازی، مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ Realizable انتخاب شده‌است. خواص سیال و جریان به طور خلاصه در جدول ۵ ذکر می‌شود.

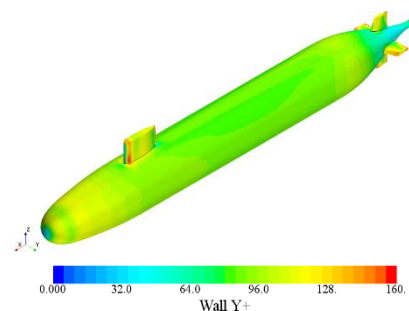
جدول ۵: خواص سیال و سایر شرایط محیط

چگالی آب	$\rho_w \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	997.20
ویسکوزیته دینامیکی	$\mu [Pa.s]$	8.89×10^{-4}



شکل ۱۱: شبکه بندی دامنه

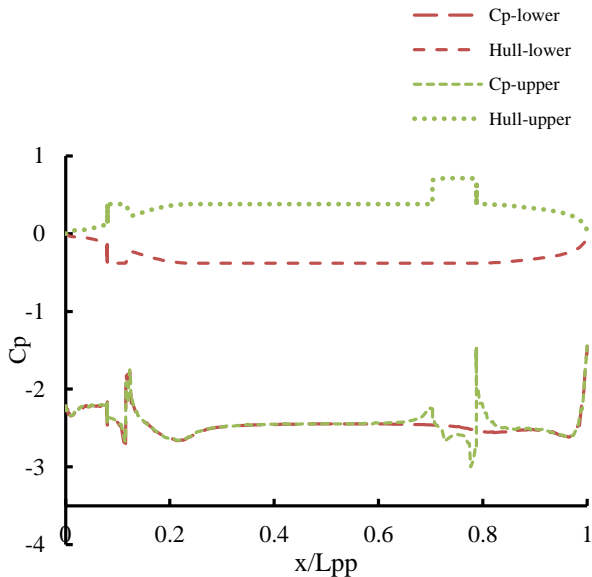
در این پژوهش تعداد المان‌های محاسباتی حدود 1.65 میلیون می‌باشد. همچنین کل شبکه لایه‌مرزی 5 ردیف دارد که دارای ضخامتی برابر با 0.029 m است و اولین ردیف المان‌های لایه‌مرزی در فاصله‌ی بسیار کمی از سطح (0.0005 m) قرار گرفته‌است. به گونه‌ای که مقدار y^+ شبکه محاسباتی مقداری کمتر از 150 دارد (شکل ۱۰). این شبکه‌بندی با مطالعه شبکه بدست آمده است.



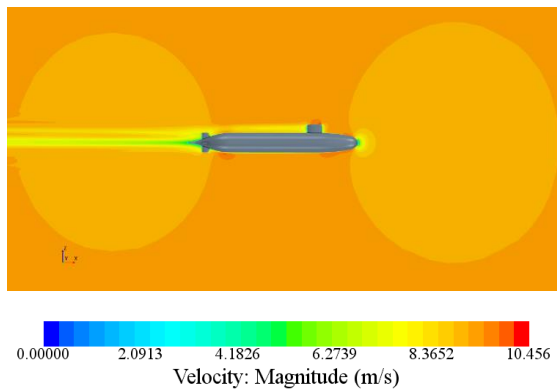
شکل ۱۰: کانتور y^+ روی بدنه

هرچقدر سلول‌های شبکه ریزتر شوند، دقت محاسبات و همچنین هزینه محاسبات افزایش می‌یابد؛ بنابراین یافتن شبکه‌ای که از نظر هزینه محاسباتی و دقت در یک نقطه بهینه قرار داشته باشد، حائز اهمیت است. برای این کار، چندین شبیه‌سازی با شبکه‌بندی متفاوت انجام می‌گردد. شبکه محاسباتی تا جایی ریز می‌شود که نتایج تحلیل (در اینجا نیروی مقاومت)، از ابعاد سلول‌ها مستقل گردد.

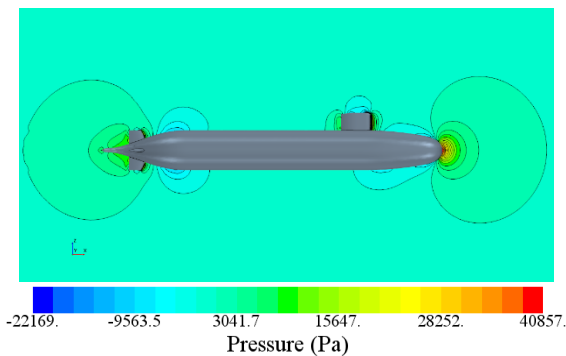
در این پژوهش در هر مرحله، اندازه پایه‌ی $\frac{1}{\sqrt{2}}$ برابر اندازه قبلی شده‌است. در شبیه‌سازی‌های مربوط به مطالعه شبکه، گام زمانی با شرط ثابت ماندن عدد کورانت به دست می‌آید. از آنجا که در مطالعه شبکه، ابعاد سلول‌ها در هر مرحله ضریب ثابتی از مرحله قبل یا بعد است، برای ثابت ماندن عدد کورانت نیز گام زمانی باید از ضرب همان ضریب در گام زمانی مرحله قبل یا بعد به دست آید. نتایج نهایی مطالعه شبکه در جدول ۴ و شکل ۱۱ آورده شده‌است. طبق این جدول، شبکه‌بندی شماره 4 با اندازه پایه‌ی 0.2268 m



شکل ۱۳: نمودار ضریب فشار روی روی خط تقارن زیردریایی



شکل ۱۴: کانتور اندازه سرعت در صفحه تقارن دامنه محاسباتی

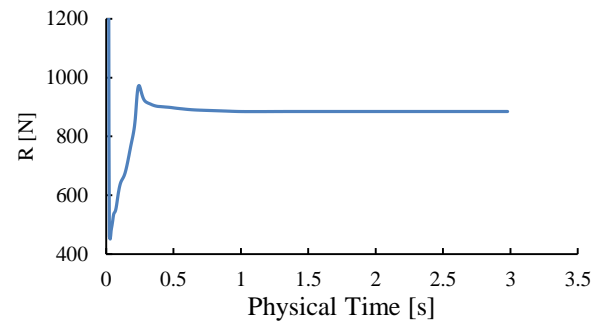


شکل ۱۵: کانتور فشار استاتیکی در صفحه تقارن دامنه محاسباتی

9.151	$u \left[\frac{m}{s} \right]$	سرعت جریان بالادست
101325	$P_{\infty} [Pa]$	فشار استاتیکی محیط

۲-۴- فرایند حل عددی

پروسه حل عددی تقریباً پس از حدود 2400 تکرار همگرا شده است. در نمودار شکل ۱۲ تغییرات نیروی مقاومت نشان داده شده تا حل تمام گردد. این معیارهای همگرایی برای تمامی حالت‌های تحلیل رعایت شده است.



شکل ۱۲: نمودار نیروی مقاومت بر حسب زمان

۲-۵- نتایج حل عددی و اعتبارسنجی

در صورتی که خطای حل عددی در محدوده قابل قبولی باشد، حل صحیح است و می‌توان به نتایج آن اعتماد نمود. نیروی مقاومت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در جدول ۶ مشاهده می‌شود. برای مقایسه، نتیجه تست تجربی نیز در این جدول موجود است.

جدول ۶: اعتبارسنجی نیروی مقاومت

%Error	R_{Num} [N]	R_{Exp} [N]	u $\left[\frac{m}{s} \right]$
7.8	885.0	821.1	9.151

مطابق جدول ۶، خطای محاسبه مقاومت، کمتر از 10% است که قابل قبول می‌باشد. انتظار می‌رود با اعمال شبکه‌بندی و تنظیمات اعتبارسنجی در حل مسئله اصلی، نیروها و گشتاورها با خطای کمتر از 10% به دست آیند. در شکل ۱۳ نمودار ضریب فشار روی خط تقارن بدنه زیردریایی و در شکل ۱۴ تا شکل ۱۷ کانتورهای اندازه سرعت، فشار استاتیکی و تنش برشی آورده شده است.

جدول ۷: مشخصات هندسی و جرمی گلايدر اسپری [۱۷] [۱۸]

2.000 m	L_{OA}	طول کلی
0.203 m	D_H	قطر
52000 cc	∇	حجم
50.2 kg	m	جرم
1.040 m	LCG	طول مرکز ثقل
0-900 cc	$\delta \nabla$	تغییرات حجم
$\cong 18 - 22^\circ$	φ	زاویه غوص یا صعود

جدول ۸: مشخصات هندسی بال‌ها و بالک‌های پاشنه

پارامتر	بال	بالک پاشنه
طول دهانه	0.500 m	0.460 m
طول وتر	0.102 m	0.070 m
مقطع	مستطیل	مستطیل
ضخامت مقطع	0.004 m	0.0032 m

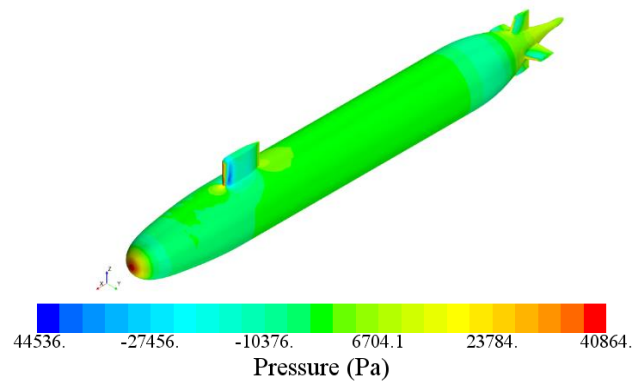
۴- طراحی بدنه اصلی

طراحی بدنه بهینه فرآیندی پیچیده بوده که فراتر از این پژوهش است. برای دستیابی به یک بدنه مناسب، هندسه گلايدر اسپری، زیردریایی سابوف و دو طرح هندسی ساده که معمولاً در زیرسطحی‌ها استفاده می‌شوند شبیه‌سازی و مقایسه می‌شوند. این دو طرح شامل دماغه با فرم‌های نیم‌کره و بیضی‌گون، استوانه و مخروط ناقص در پاشنه هستند. در دو طرح سابوف و اسپری، فرم هندسی دماغه و پاشنه پیچیده بوده و بخش میانی بدنه استوانه‌ای است.

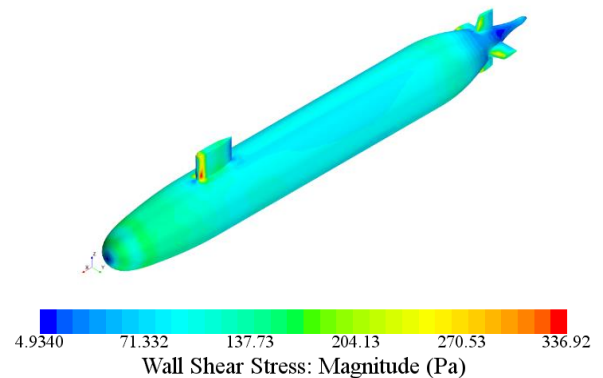
در طراحی چهار بدنه مورد نظر، قیدهایی در نظر گرفته شده است. این قیدها عبارتند از یکسان بودن قطر، طول و حجم کل. مقادیر قیدها برابر گلايدر اسپری در نظر گرفته شده است که در جدول ۹ مشاهده می‌شود. چهار بدنه مورد نظر در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۹: قیدهای لحاظ شده در طراحی بدنه اصلی

2.000	$L_{OA} [m]$	طول کلی
0.203	$D_H [m]$	قطر
0.05	$\nabla [m^3]$	حجم



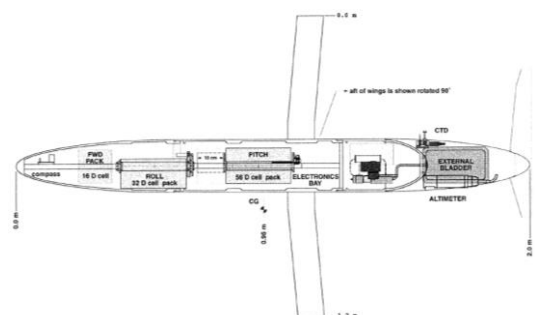
شکل ۱۶: کانتور توزیع فشار استاتیکی روی بدنه زیردریایی



شکل ۱۷: کانتور توزیع اندازه تنش برشی روی بدنه زیردریایی

۳- طرح مشابه

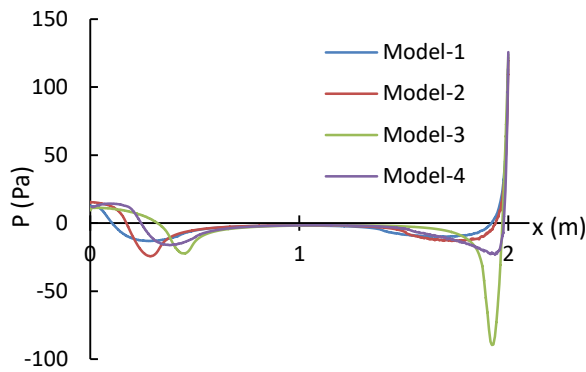
در هیدرودینامیک، معمولاً یک طرح مشابه مسئله اصلی مبنای کار قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از گلايدر اسپری^۶ به عنوان طرح مشابه در طراحی هیدرودینامیکی استفاده می‌شود. اولین نمونه این گلايدر، در سال 2001 توسط شرمن و همکاران [۱۷] معرفی شد. در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ اجزای گلايدر اسپری مشاهده می‌شود. در جدول ۷ و جدول ۸ تمامی اطلاعات موجود از این گلايدر ثبت شده‌است. مشخصات هندسی بال‌ها و بالک‌های پاشنه از تصاویر در دسترس از هندسه استخراج شده‌اند.



شکل ۱۸: جانمایی اجزای گلايدر اسپيري [۱۸]



شکل ۱۹: گل‌انداز در باغ اسب‌ری، [۱۸]



شکل ۲۱: توزیع فشار روی صفحه تقارن بدنه‌ها

با مقایسه پروفیل فشار روی چهار بدنه می‌توان دید که پروفیل فشار در بدنه‌های 1 و 2 نسبت به بدنه‌های دیگر یکنواخت‌تر بوده و همین امر موجب کاهش مقدار مقاومت فشاری این دو بدنه نسبت به سایر بدنه‌ها شده‌است. با توجه به نتایج، بدنه 1 (بدنه اسپری) انتخاب شده است و به عنوان مبنا برای ادامه کار استفاده می‌شود.

۵- طراحی بال

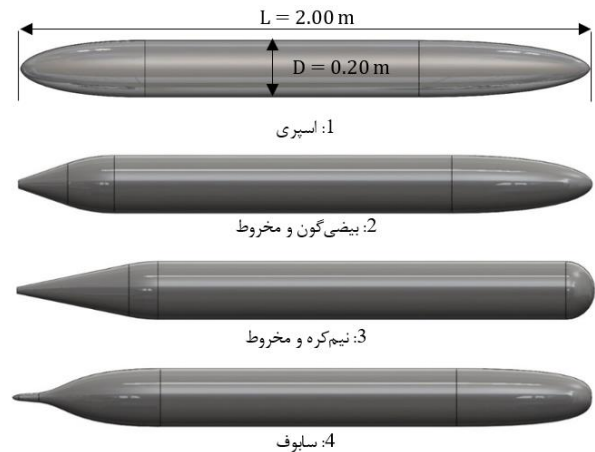
۵-۱- تأثیر مقطع بال

بال به عنوان عامل تولید نیروی لیفت، المان مهمی در گلايدر است. برای تولید لیفت بیشتر، معمولاً مقطع بال به شکل فویل استفاده می‌شود. از آنجا که بال‌های گلايدر، در معرض جریان، نیروی درگ دارند، هندسه‌ای برای بال مناسب است که کمترین نیروی درگ را داشته باشد؛ یعنی با کمترین نیروی درگ، نیروی لیفت مورد نیاز را تأمین کند. بنابراین، به نظر می‌رسد هندسه بالی مطلوب است که بیشترین نسبت لیفت به درگ را داشته باشد. برای دستیابی به هندسه مطلوب، ابتدا هیدروفویل‌هایی دو بعدی که بیشترین نسبت لیفت به درگ را دارند، انتخاب کرده و سپس در حالت سه بعدی به همراه بدنه اصلی شبیه‌سازی می‌شوند.

۵-۱-۱- انتخاب مقاطع دوبعدی

ابتدا مجموعه‌ای از هیدروفویل‌هایی که معمولاً برای جریان‌های با رینولدز کم انتخاب می‌شوند، گردآوری شده و در شرایط یکسان، نسبت لیفت به درگشان مقایسه می‌شود و آن‌هایی که بالاترین نسبت لیفت به درگ را دارند، برای شبیه‌سازی سه بعدی انتخاب می‌گردند.

تحلیل هیدروفویل‌های جدول ۱۱ انجام می‌شود. طول تمامی فویل‌ها برابر 1m است. در شکل ۲۲ تا شکل ۲۴ هندسه این مقاطع مشاهده می‌شود. جهت مقایسه بهتر، هیدروفویل‌ها در 3 دسته تقسیم شده‌اند.



شکل ۲۰: چهار بدنه اصلی برای گلايدر

برای مقایسه این چهار بدنه، شبیه‌سازی عددی مطابق شرایط و تنظیمات اعتبارسنجی انجام می‌شود. در شبیه‌سازی بدنه‌ها سرعت پیشروی برابر 0.5 m/s در نظر گرفته شده و نتایج این شبیه‌سازی‌ها شامل مقدار مقاومت و توزیع فشار روی صفحه تقارن بدنه به ترتیب در جدول ۱۰ و شکل ۲۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱۰: نتایج مقاومت بدنه‌ها

#	مدل	R_p [N]	R_s [N]	R_T [N]
1	اسپری	0.026	0.286	0.312
2	بیضی گون و مخروط	0.027	0.286	0.313
3	نیم کره و مخروط	0.057	0.277	0.334
4	سابوف	0.038	0.277	0.315

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ مقدار مقاومت بدنه شماره 1 (بدنه اسپری)، دارای کمترین مقدار مقاومت است به طوریکه نسبت به مدل شماره 2 (هندسه بیضی گون و مخروط) که بعد از مدل 1 دارای کمترین مقدار مقاومت است، حدود 0.5% و نسبت به مدل 3 (نیم کره و مخروط) حدود 7% کمتر است. همچنین با دقت در جدول ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که سهم عمده مقاومت، مقاومت اصطکاکی بوده است و علت این امر نیز سرعت پایین تست (0.5 m/s) است. همچنین مدل 3 به علت استفاده از نیم کره در دماغه مقاومت فشاری بیشتری دارد.

جدول ۱۱: هیدروفویل‌های استفاده شده

$$C_l = \frac{L}{0.5\rho U^2 c^2} \quad (۳)$$

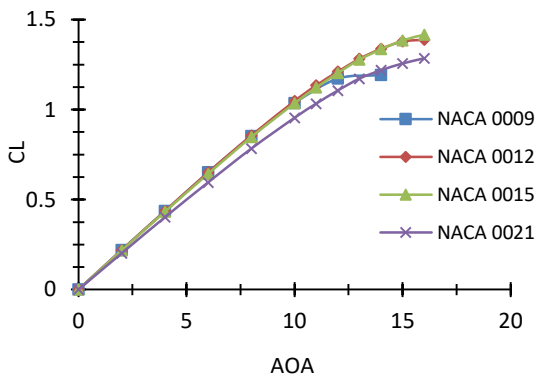
$$C_d = \frac{D}{0.5\rho U^2 c^2} \quad (۴)$$

جدول ۱۲: خواص سیال آب و سایر شرایط محیط

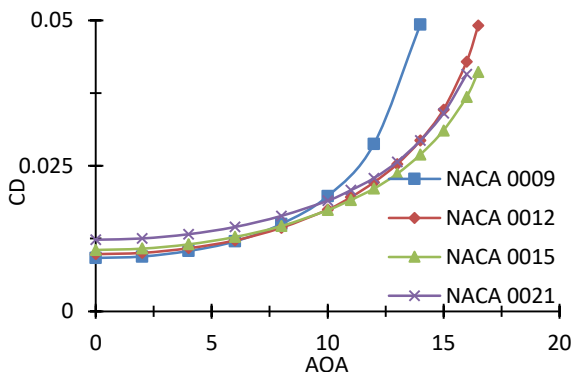
997.561 kg/m ³	ρ	چگالی
$8.8871 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$	μ	ویسکوزیته دینامیکی
1 m/s	U	سرعت جریان بالادست
101325 Pa	P	فشار استاتیکی محیط
1.12×10^6	Re	عدد رینولدز جریان بالادست

الف: نتایج تحلیل هیدروفویل‌های دسته NACA 00xx

این دسته شامل هیدروفویل‌های NACA 0009، NACA 0012، NACA 0015 و NACA 0021 بوده که همگی متقارن‌اند. ضریب لیفت و ضریب درگ برای این فویل در زوایای مختلف حمله به‌دست آمد. در شکل ۲۵ و شکل ۲۶ به ترتیب نمودار ضرایب نیروی لیفت و درگ آورده شده‌است.



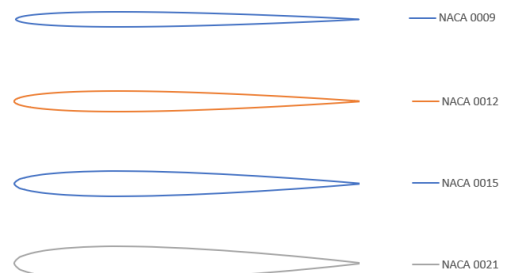
شکل ۲۵: ضریب لیفت برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 00xx



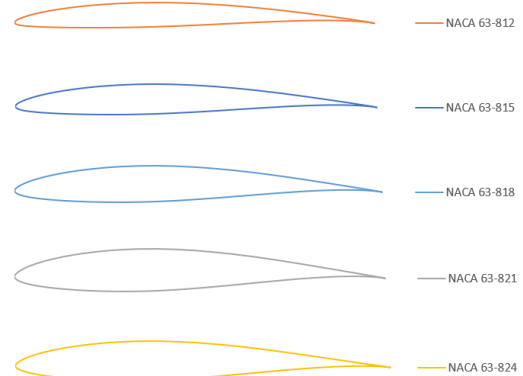
شکل ۲۶: ضریب درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 00xx

پارمتر مهم دیگر، نسبت لیفت به درگ است که نمودار تغییرات آن برای هیدروفویل‌های دسته NACA 00xx بر حسب زاویه حمله در شکل ۲۶ آورده شده‌است. مقطع NACA 0021 با

نام مقطع	دسته
NACA 0009	NACA 00xx
NACA 0012	
NACA 0015	
NACA 0021	
NACA 4415	NACA xx15
NACA 6615	
NACA 63-812	NACA 63-8xx
NACA 63-818	
NACA 63-821	
NACA 63-824	



شکل ۲۲: هیدروفویل‌های دسته NACA 00xx



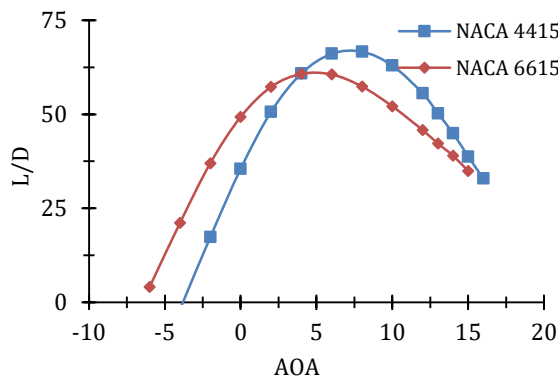
شکل ۲۳: هیدروفویل‌های دسته NACA 63-8xx



شکل ۲۴: هیدروفویل‌های دسته NACA xx15

۵-۱-۲- شبیه‌سازی مقاطع دوبعدی

تحلیل هیدرودینامیکی هیدروفویل‌ها در شرایط کاملاً یکسان (سرعت $1 \frac{m}{s}$ و عدد رینولدز 1.12×10^6) و به صورت دوبعدی انجام شده‌است (جدول ۱۲). برای هیدروفویل‌های هر دسته، ابتدا نیروهای لیفت و درگ در زوایای حمله مختلف تا ۱۸ درجه محاسبه شده و نسبت آن‌ها ترسیم می‌گردد. برای محاسبه ضرایب لیفت و درگ از روابط زیر استفاده می‌شود:

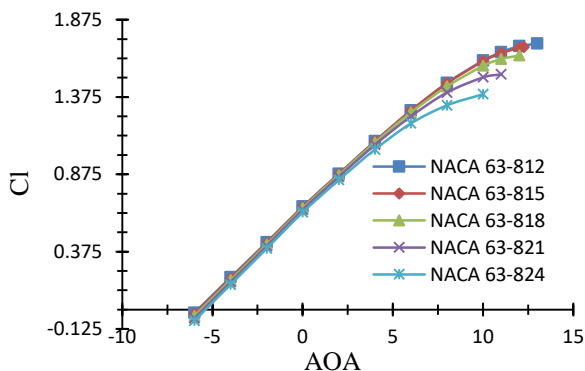


شکل ۲۹: لیفت به درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA xx15

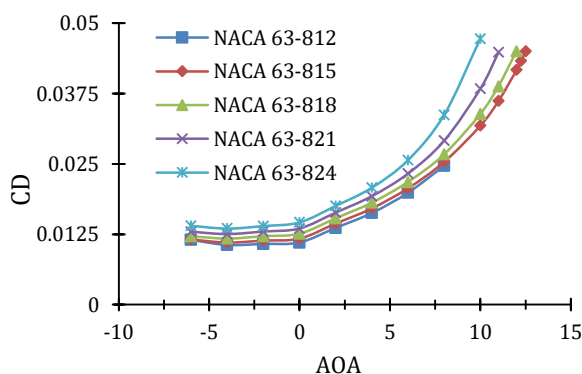
مطابق این نمودارها، در تمام زوایای حمله، مقطع NACA 6615 ضریب لیفت و درگ بیشتری دارد اما بیشینه نسبت لیفت به درگ NACA 4415 بیشتر بوده و در زاویه حمله نزدیک 8 درجه رخ داده است. از این دسته هیدروفویل NACA 4415 برای ترسیم بال سه بعدی انتخاب می‌گردد.

ج: نتایج تحلیل هیدروفویل‌های دسته NACA 63-8xx

در این دسته هیدروفویل‌های NACA 63-812، NACA 63-815، NACA 63-818، NACA 63-821 و NACA 63-824 قرار دارد. در شکل ۳۰ تا ۳۲ نتایج حل عددی جریان اطراف این مقاطع مشاهده می‌شود.

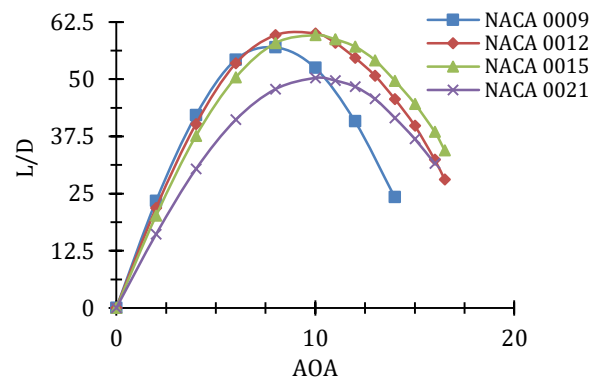


شکل ۳۰: ضریب لیفت برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 63-8xx



شکل ۳۱: ضریب درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 63-8xx

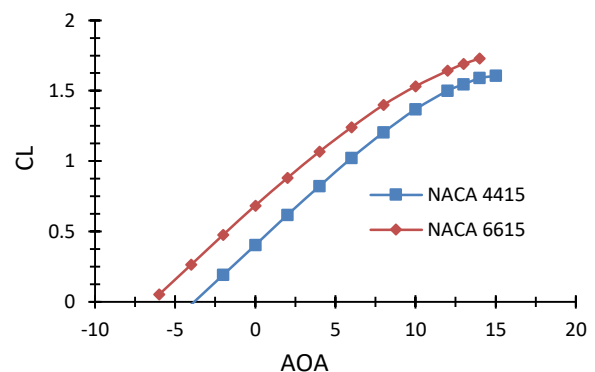
اختلافی قابل توجه کوچکترین بیشینه نسبت لیفت به درگ را دارد. بیشینه نسبت لیفت به درگ NACA 0012 از سایر هیدروفویل‌های دسته بیشتر است و به عنوان بهترین هیدروفویل این دسته انتخاب می‌شود.



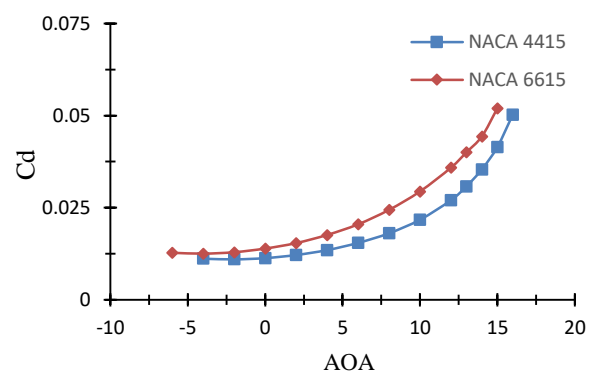
شکل ۲۶: لیفت به درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 00xx

ب: نتایج تحلیل هیدروفویل‌های دسته NACAxx15

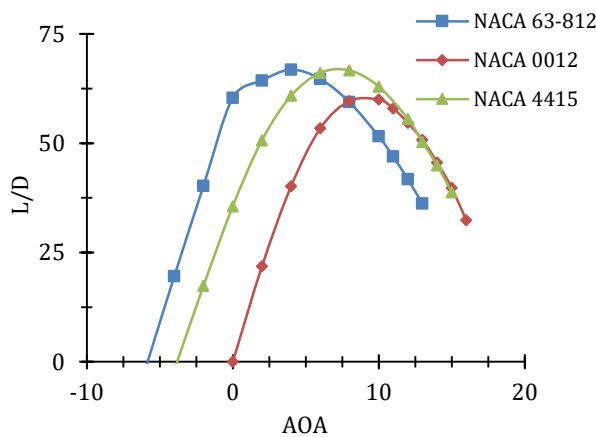
در دسته NACAxx15 دو مقطع NACA 4415 و NACA 6615 قرار دارند. این دو هیدروفویل، نامتقارن هستند و برخلاف هیدروفویل‌های متقارن، در زاویه حمله صفر و برخی از زوایای حمله منفی نیز لیفت رو به بالا تولید می‌کنند. شکل ۲۷ تا شکل ۲۹ نمودارهای ضریب لیفت، درگ و نسبت لیفت به درگ بر حسب زاویه حمله را نشان می‌دهند.



شکل ۲۷: ضریب لیفت برحسب زاویه حمله برای دسته NACA xx15



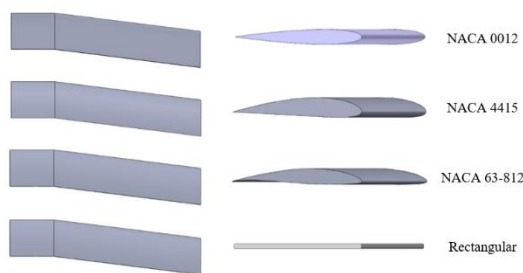
شکل ۲۸: ضریب درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA xx15



شکل ۳۵: لیفت به درگ برحسب زاویه حمله برای هیدروفویل‌های برگزیده

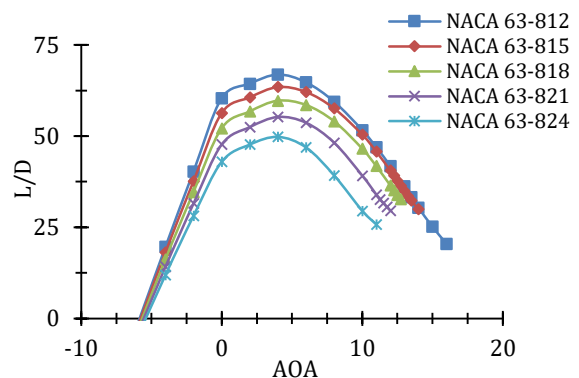
۵-۱-۳- شبیه‌سازی سه‌بعدی گلایدر

با در نظر گرفتن بدنه انتخابی و با توجه به نتایج هیدروفویل‌های شبیه‌سازی شده، به منظور انتخاب بال بهینه و همچنین تأثیر بال بر عملکرد هیدرودینامیکی بدنه در غوص و صعود، سه هیدروفویل NACA 63-812 و NACA 4415، NACA 0012، علاوه بر این سه هیدروفویل، مقطع مستطیلی نیز که در گلایدر اسپری استفاده شده است، بررسی می‌شود. با این مقاطع، بال‌های سه‌بعدی با طول دهانه و وتر یکسان مشابه گلایدر اسپری ایجاد شده و روی بدنه مورد نظر قرار داده شده است (شکل ۳۶). بنابراین چهار گلایدر با مقاطع بال‌های متفاوت ایجاد شده است که در دو حالت غوص و صعود مورد تحلیل عددی قرار می‌گیرد تا بهینه‌ترین مقطع بال برای ادامه کار مشخص و انتخاب شود. دو هیدروفویل NACA 63-812 و NACA 4415 نامتقارن هستند و پیش‌بینی می‌شود در غوص و صعود رفتار کاملاً متفاوتی داشته باشند که مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۳۶: هندسه‌های بال تولید شده

برای ساخت هندسه سه بعدی گلایدر، اجزای گلایدر شامل بال‌ها، بالک‌های عمودی پاشنه و تجهیزات ناوبری، به بدنه اصلی اضافه می‌شوند. جانمایی اجزاء مطابق گلایدر اسپری است. مشخصات هندسی بال به همراه بدنه در شکل ۳۷ موجود است. مطابق این شکل، طول دهانه بال 500 mm و طول وتر آن 100 mm است. این مقادیر برای هر سه نوع بال یکسان می‌باشد. دستگاه مختصاتی

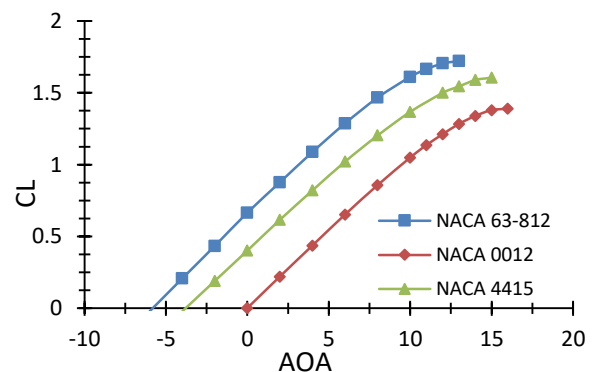


شکل ۳۲: لیفت به درگ برحسب زاویه حمله برای دسته NACA 63-8xx

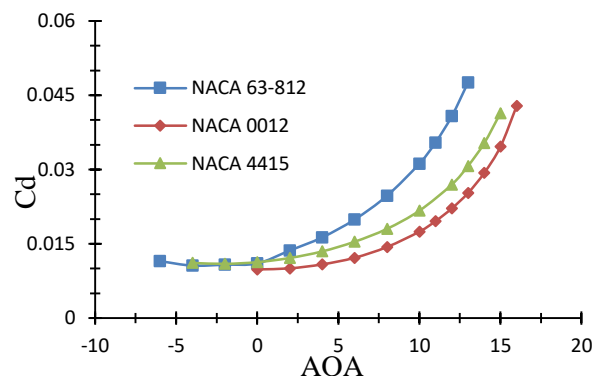
می‌توان گفت NACA 63-812 بیشترین زاویه حمله واماندگی و ضریب لیفت بیشینه را دارد. بیشینه نسبت لیفت به درگ همه هیدروفویل‌ها در زاویه حمله نزدیک 4 درجه رخ می‌دهد و برای NACA 63-812 از سایر هیدروفویل‌ها بیشتر است و به عنوان بهترین مقطع این دسته انتخاب می‌شود.

د: هیدروفویل‌های برگزیده

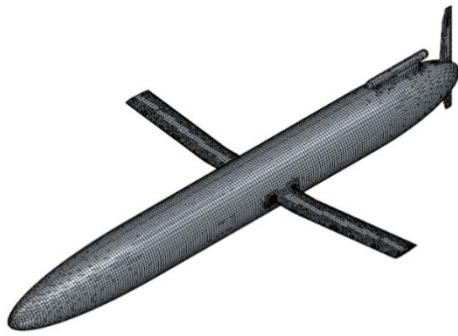
هیدروفویل‌هایی که در هر دسته عملکرد هیدرودینامیکی مطلوب‌تری داشتند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شکل ۳۳ تا شکل ۳۵ نمودارهای تغییرات ضرایب لیفت، درگ و نسبت لیفت به درگ این مقاطع مشاهده می‌شود.



شکل ۳۳: ضریب لیفت برحسب زاویه حمله برای هیدروفویل‌های برگزیده



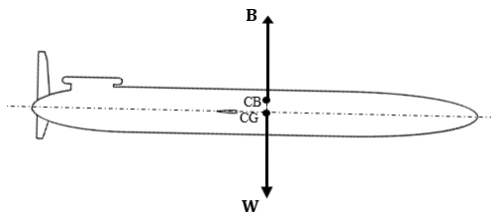
شکل ۳۴: ضریب درگ برحسب زاویه حمله برای هیدروفویل‌های برگزیده



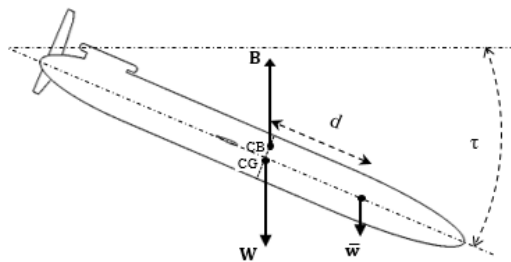
شکل ۴۱: شبکه‌بندی روی بدنه گلايدر

شبیه‌سازی در این مرحله شامل شبیه‌سازی و سیله در دو حالت غوص و صعود خواهد بود. برای شبیه‌سازی غوص و صعود گلايدر، نیاز است نیروهای وزن (W)، بویانسی (B) و نیروی اضافی (\bar{W}) که باعث ایجاد اختلاف بین وزن و بویانسی می‌شود و امکان غوص و صعود را فراهم می‌آورد، شبیه‌سازی شوند. در شبیه‌سازی عددی، سه درجه آزادی در نظر گرفته شده که شامل حرکات سرچ (X)، هیو (Z) و پیچ (θ) است.

با قرار دادن یک نیروی اضافی (\bar{W}) در فاصله d از مرکز ثقل، دو اتفاق می‌افتد: ۱- تعادل نیرویی از بین می‌رود و غوص / صعود انجام می‌شود. ۲- تعادل ممان هیدرواستاتیکی طولی از بین می‌رود و وسیله دچار تریم استاتیکی (τ) می‌شود. دیاگرام آزاد نیروهای هیدرواستاتیکی در شکل ۴۲ نشان داده شده است.



$trim = 0$



$trim = \tau$

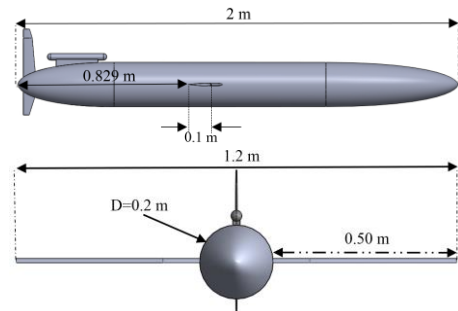
شکل ۴۲: دیاگرام آزاد نیروهای هیدرواستاتیکی در شروع غوص

با معلوم بودن \bar{W} و τ ، فاصله d با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

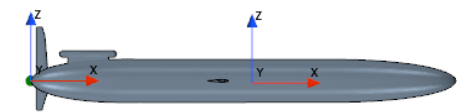
$$d = \frac{W}{\bar{W}} \times \overline{BG} \tan \tau \quad (5)$$

که \overline{BG} فاصله مرکز ثقل و بویانسی در حالت اولیه است که برابر 0.01 m فرض شده است. نیروی اضافی \bar{W} معادل نیروی بویانسی

که هندسه در آن ترسیم شده است، در شکل ۳۸ موجود است. با در نظر گرفتن مبدا مختصات در نقطه انتهایی بدنه اصلی، محل نصب بال در فاصله افقی برابر 829 mm از آن قرار دارد.

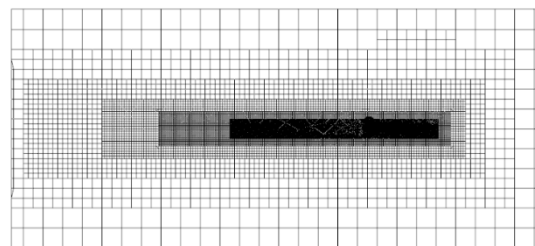


شکل ۳۷: نصب بال‌های تولید شده روی بدنه

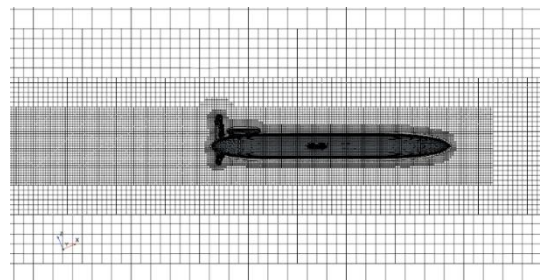


شکل ۳۸: دستگاه مختصات متصل به زمین و بدنه در لحظه صفر

نسبت ابعادی دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی استفاده شده، کاملاً مشابه اعتبارسنجی است. نمایی از این شبکه‌بندی در شکل ۳۹ تا شکل ۴۱ نشان داده شده است.

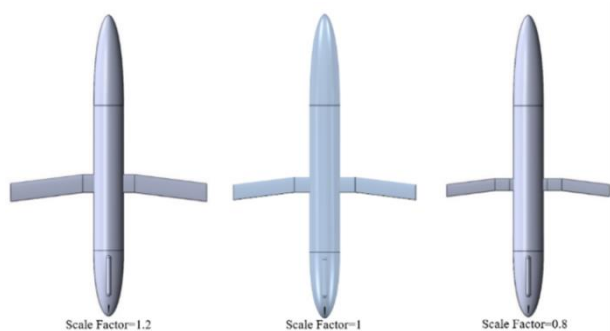


شکل ۳۹: شبکه‌بندی دامنه محاسباتی در شبیه‌سازی سه‌بعدی گلايدر



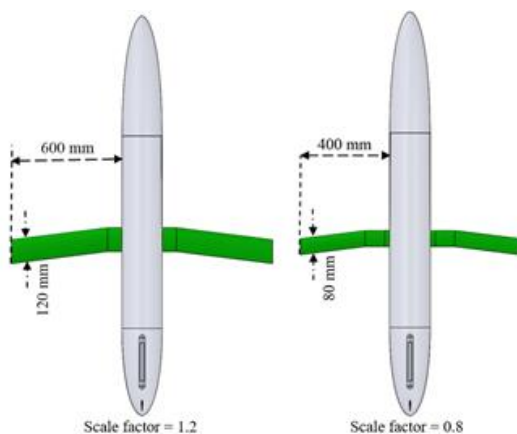
شکل ۴۰: شبکه‌بندی اطراف گلايدر

مقیاس ۱) ساخته و مقایسه می شوند. این هندسه ها در شکل ۴۳ نشان داده شده اند.



شکل ۴۳: هندسه های تولید شده با نسبت های مقیاس متفاوت بال ها

شرایط شبیه سازی عددی این بدنه ها کاملاً مشابه بخش قبل می باشد. جزئیات هندسی بدنه های جدید در شکل ۴۴ موجود است.



شکل ۴۴: مشخصات هندسی بال های مقیاس شده

خلاصه ای از نتایج عددی به دست آمده در جدول ۱۴ ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده مشخص است که با کاهش ابعاد بال های وسیله سرعت پیشروی وسیله افزایش یافته است. علت این امر نیز کاهش مقدار نیروی مقاومت با کاهش ساین بال است که این نتیجه قابل پیش بینی بود.

جدول ۱۴: نتایج شبیه سازی گلايدر با مقیاس های مختلف بال

مقیاس بال	حالت	γ [°]	u_e [$\frac{m}{s}$]	w_e [$\frac{m}{s}$]
0.8	غوص	21.49	0.563	-0.248
	صعود	-21.86	0.563	0.252
1.0	غوص	22.72	0.550	-0.250
	صعود	-23.52	0.553	0.260
1.2	غوص	24.32	0.538	-0.258
	صعود	-24.40	0.537	0.259

ناشی از حجم 400 cc است. زاویه تریم استاتیکی 22° در نظر گرفته شده است. با این فرضیات، فاصله $d = 0.507 m$ به دست می آید. در غوص و صعود فقط جهت نیروی \bar{w} قرینه یکدیگرند. شبیه سازی عددی غوص و صعود گلايدر ها با چهار بال موجود انجام شد و نتایج آن در جدول ۱۳ ذکر شده است. نتایج شامل زاویه حرکت (γ) ، مؤلفه افقی سرعت در دستگاه متصل به بدنه (u) ، مؤلفه عمودی سرعت در دستگاه متصل به بدنه (w) ، مؤلفه افقی سرعت در دستگاه متصل به زمین (u_e) ، مؤلفه عمودی سرعت در دستگاه متصل به زمین (w_e) هستند. در لحظه صفر، محورهای دستگاه متصل به بدنه، موازی دستگاه متصل به زمین است. مبدأ دستگاه متصل به زمین در انتهای ترین نقطه پاشنه و مبدأ دستگاه متصل به بدنه روی مرکز ثقل قرار دارد. مؤلفه افقی سرعت در دستگاه مختصات متصل به زمین (u_e) ، "سرعت پیشروی گلايدر" نامیده می شود و عملکرد گلايدر را نشان می دهد. برای مقایسه مدل ها، مجموع سرعت پیشروی در غوص و صعود مقایسه می شوند.

همانطور که نتایج ارائه شده در جدول ۱۳ نشان می دهد مجموع سرعت پیشروی و سیله با بال NACA 0012 از بال های با مقطع نامتقارن بیشتر است. با دقت در این نتایج می توان دریافت که در حالت غوص، فویل های نامتقارن اندکی از فویل متقارن بهتر عمل کرده اند ولی در حالت صعود عملکرد فویل متقارن NACA 0012 بهتر از فویل های نامتقارن بوده است.

جدول ۱۳: نتایج شبیه سازی گلايدر با مقاطع مختلف بال

مقطع بال	حالت	γ [°]	u_e [$\frac{m}{s}$]	w_e [$\frac{m}{s}$]
Rectangular	غوص	23.91	0.507	-0.244
	صعود	-24.34	0.507	0.248
NACA 0012	غوص	22.72	0.550	-0.250
	صعود	-23.52	0.553	0.260
NACA 4415	غوص	38.38	0.566	-0.415
	صعود	-16.84	0.462	0.194
NACA 63-812	غوص	45.02	0.531	-0.474
	صعود	-17.28	0.395	0.184

با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش، از این مرحله به بعد بال با مقطع NACA0012 مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۵-۲- تأثیر ابعاد بال

برای بررسی اثر ابعاد بال، علاوه بر بال اصلی با اندازه ذکر شده در بخش قبل، دو بال با نسبت های مقیاس 0.8 و 1.2 از بال اصلی (با

مقدار سرعت پیشروی نیز افزایش یافته است. علت این امر این است که با عقب‌تر رفتن بال‌ها مرکز فشار عقب‌تر رفته و با افزایش فاصله بین مرکز فشار و مرکز ثقل، ممان پیچ بال‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه زاویه حمله کم می‌شود.

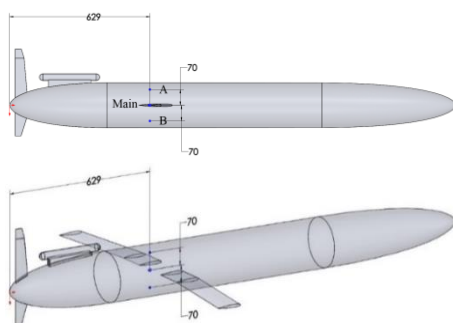
جدول ۱۵: نتایج شبیه‌سازی گلايدر با موقعیت‌های طولی متفاوت بال

جابه‌جایی افقی بال [mm]	حالت	γ [°]	$\frac{u_e}{[m/s]}$	$\frac{w_e}{[m/s]}$
-220	غوص	30.04	0.583	-0.355
	صعود	-30.48	0.586	0.362
-110	غوص	26.48	0.568	-0.302
	صعود	-26.90	0.571	0.308
0	غوص	23.20	0.549	-0.255
	صعود	-23.52	0.553	0.260
110	غوص	19.37	0.523	-0.204
	صعود	-19.92	0.525	0.210

توجه به این نکته ضروری است که درست است که با عقب‌تر رفتن مرکز فشار (به علت عقب رفتن بال)، سرعت پیشروی وسیله افزایش یافته است ولی عقب‌تر رفتن بیشتر سبب پایداری بسیار زیاد وسیله می‌گردد و در نتیجه مانور پذیری وسیله به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد مقدار -220 mm مقدار معقولی برای عقب کشیدن بال باشد. بنابراین این مقدار به عنوان ادامه کار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۴- تأثیر موقعیت عمودی بال

به منظور بررسی موقعیت عمودی بال روی هیدرودینامیک وسیله، بال را در دو فاصله ± 70 mm نسبت به مدل اصلی قرار داده و شبیه‌سازی عددی انجام می‌شود. در مدل اصلی، بال‌ها بر محور تقارن بدنه اصلی قرار دارند. این جزئیات شکل ۴۷ گزارش شده است.



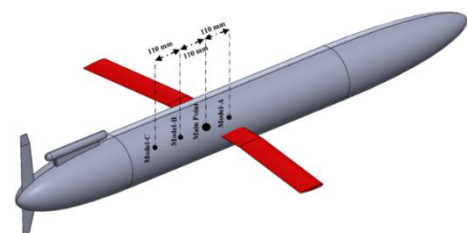
شکل ۴۷: موقعیت‌های عمودی متفاوت بال

کلیه شرایط شبیه‌سازی در این بخش مشابه حالت‌های قبل می‌باشد. خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱۶ ارائه شده است.

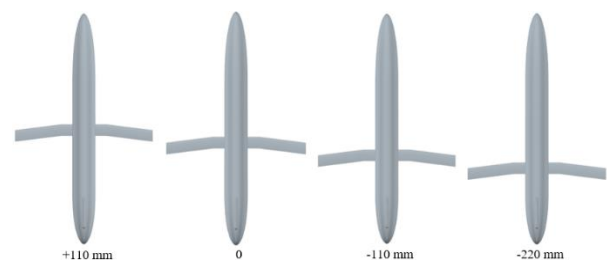
به لحاظ هیدرودینامیکی بالی با ابعاد کوچکتر رفتار هیدرودینامیکی بهتر (سرعت پیشروی بالاتر) دارد ولی از لحاظ سازه‌ای بال کوچک، ضخامت کمتر داشته و در غوص و صعود وسیله استحکام کافی نداشته باشد. چون تحلیل سازه‌ای وسیله در این پروژه مد نظر نیست، بال اولیه وسیله که ابعاد آن با گلايدر اسپری یکی است و دارای طول 500 mm بود برای ادامه کار انتخاب می‌شود و در سائز بال هیچ تغییری ایجاد نمی‌گردد.

۵-۳- تأثیر موقعیت طولی بال

بال انتخاب شده تا این مرحله دارای مقطع NACA 0012 و طول دهانه 500 mm است و از نظر هندسی دیگر تغییر نخواهد کرد. ولی نکته بسیار مهم دیگر موقعیت قرارگیری بال روی بدنه است. زیرا اگر بال در موقعیت مناسبی قرار نداشته باشد علاوه بر تأثیر روی سرعت پیشروی وسیله با تغییر مرکز فشار هیدرودینامیکی می‌تواند سبب ناپایداری وسیله در جریان غوص و صعود شود. در این بخش به بررسی اثر موقعیت افقی بال روی وسیله پرداخته می‌شود. بدین منظور در سه نقطه مورد نظر نسبت به نقطه اصلی قرارگیری بال نسبت به بدنه (هر نقطه به اندازه 110 mm) بال جابه‌جا می‌شود. با توجه به اینکه جابه‌جایی زیاد بال رو به جلو و قرار گرفتن مرکز فشار آن جلوتر از مرکز ثقل سبب ناپایداری وسیله می‌شود، جابه‌جایی بال رو به جلو فقط در یک حالت بررسی می‌شود (+110 mm) اما انتقال بال رو به عقب در دو حالت بررسی خواهد شد. (-110 mm و -220 mm). خلاصه توضیحات در شکل ۴۵ و شکل ۴۶ نشان داده شده است.

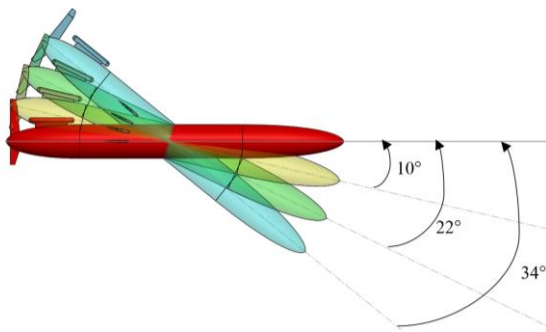


شکل ۴۵: موقعیت‌های طولی متفاوت بال



شکل ۴۶: گلايدر با موقعیت‌های متفاوت بال‌ها

نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در جدول ۱۵ ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول، مشخص است که با عقب رفتن بال



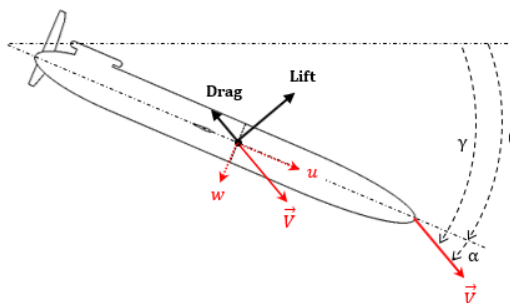
شکل ۴۸: زاویای تریم استاتیکی متفاوت

جدول ۱۷: نتایج تغییر زاویه تریم استاتیکی

α [°]	w_e [$\frac{m}{s}$]	u_e [$\frac{m}{s}$]	γ [°]	حالت	τ [°]	d [mm]
-1.95	-0.215	0.529	20.15	غوص	10	221
1.86	0.220	0.531	-20.70	صعود		
-1.30	-0.355	0.583	30.04	غوص	22	507
1.23	0.362	0.586	-30.48	صعود		
-0.90	-0.511	0.591	39.94	غوص	34	847
0.81	0.523	0.592	-40.66	صعود		

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۷، مشخص است که با افزایش زاویه تریم استاتیکی سرعت پیشروی وسیله افزایش پیدا کرده است. با توجه به افزایش بازوی نیروی افزوده، ممان حاصل از آن زیاد می‌شود و در نتیجه گلايدر در زوایای تریم بزرگتری به تعادل استاتیکی می‌رسد. در این حالت، برای تغییر تریم هیدرواستاتیکی ممان‌های بزرگتری نیاز است یا به عبارتی ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی بیشتر می‌شود و ممان هیدرودینامیکی بال‌ها، زاویه تریم را به میزان کمتری تغییر می‌دهد در نتیجه زاویه حمله نیز کاهش می‌یابد که در ستون آخر جدول ۱۷، زاویه حمله نیز محاسبه شده است. زاویه حمله (α)، زاویه بردار برآیند سرعت حرکت (\vec{V}) با محور بدنه (یا محور X دستگاه متصل به بدنه) است (شکل ۴۹):

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{w}{u} \quad (۷)$$



شکل ۴۹: زوایا در هیدرودینامیک گلايدر

نتایج جابه‌جایی عمودی بال در جدول ۱۶ موجود است. به نظر می‌رسد جابه‌جایی عمودی بال نتیجه عکس دارد و مقدار سرعت پیشروی نسبت به حالت اصلی کاهش پیدا کرده است و جابه‌جایی عمودی بال از محور تقارن، مزیت هیدرودینامیکی ندارد.

جدول ۱۶: نتایج شبیه‌سازی گلايدر با موقعیت‌های عمودی متفاوت بال

جابه‌جایی عمودی بال [mm]	حالت	γ [°]	u_e [$\frac{m}{s}$]	w_e [$\frac{m}{s}$]
-70	غوص	29.80	0.572	-0.348
	صعود	-30.11	0.581	0.355
0	غوص	30.04	0.583	-0.355
	صعود	-30.48	0.586	0.362
70	غوص	29.80	0.572	-0.359
	صعود	-30.11	0.581	0.351

۶- تأثیر شرایط هیدرواستاتیکی

تا این مرحله از کار، عمده تغییرات روی مشخصات هندسی گلايدر بوده است. در این مرحله از کار سعی شده است تأثیر شرایط هیدرواستاتیکی یعنی تغییرات تریم با فرض ثابت ماندن مقدار نیروی افزوده و تغییر نیروی افزوده با فرض ثابت ماندن تریم بر عملکرد گلايدر مشخص شود. تغییر دادن شرایط هیدرواستاتیکی به جانمایی و محدودیت‌های مرتبط با چینش اقلام وزن و بویانسی وابسته است و در تغییر این شرایط باید به این محدودیت‌ها توجه شود.

۶-۱- تأثیر زاویه تریم استاتیکی

در یک گلايدر که نیروی وزن و بویانسی و نقطه اثر آن‌ها ثابت هستند، با توجه به رابطه زیر، تریم استاتیکی به مقدار نیروی افزوده و فاصله نقطه اثر آن تا مرکز ثقل وابسته است:

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{d}{BG} \times \frac{\bar{w}}{W} \right) \quad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶) برای تغییر دادن تریم و ثابت ماندن سایر پارامترها، می‌توان فقط مقدار d را تغییر داد. در شبیه‌سازی‌های قبلی، مقدار تریم استاتیکی برابر ۲۲° در نظر گرفته می‌شد. علاوه بر این مقدار، زوایای ۱۰° و ۳۴° نیز بررسی می‌شوند (شکل ۴۸). فاصله (d) برای هر شبیه‌سازی با نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۱۷ ذکر شده است.

نیاز است کارفرما ابتدا اولویت مانورپذیری نسبت به عملکرد در مسیر مستقیم را مشخص کند و پس از مشخص شدن نیاز به مانورپذیری، محدودیت های جانمایی و زیرسیستم ها، میزان بویانسی افزوده تعیین گردد.

۷- جمع بندی

در این مقاله، گلايدر دریایی از منظر هیدرومکانیکی طراحی شد. گلايدر اسپری به عنوان طرح مشابه انتخاب گردید. ابتدا اعتبارسنجی شبیه سازی عددی و مراحل آن بررسی گردید و خطای حل عددی محاسبه شد. پس از معرفی طرح مشابه یعنی گلايدر اسپری، چند هندسه برای بدنه اصلی مطالعه شد. سپس به طراحی بال پرداخته و هندسه و موقعیت آن بررسی شد و تأثیر شرایط عملکردی و اثر آن بر سرعت پیشروی بررسی شد. در نهایت، نتایج زیر حاصل شده است:

۱- بدنه گلايدر اسپری، از نظر هیدرودینامیکی عملکرد بهتری نسبت به سایر بدنه های در دسترس دارد و به عنوان بدنه نهایی انتخاب می شود.

۲- بال با مقطع NACA 0012 عملکرد بهتری نسبت به بال اصلی گلايدر اسپری و هیدروفویل های نامتقارن دارد. در صورت استفاده از هیدروفویل های نامتقارن، سرعت پیشروی و زاویه حرکت آن در غوص و صعود متفاوت است و مجموع سرعت پیشروی در غوص و صعود از مقطع NACA 0012 کمتر است، بنابراین مقطع NACA 0012 برای بال گلايدر انتخاب می شود.

۳- کوچک تر شدن بال، اثر مثبت کمی روی سرعت پیشروی دارد. با توجه به کم بودن اثرات، به دلیل استحکام سازه ای کافی برای بال، ابعاد بال گلايدر اسپری انتخاب می شود.

۴- با جابه جایی طولی بال به سمت عقب، سرعت پیشروی گلايدر زیاد می شود. در این مرحله از طراحی، موقعیت طولی 220 mm عقب تر از گلايدر اسپری انتخاب می گردد.

۵- با جابه جایی عمودی موقعیت بال، مجموع سرعت پیشروی در غوص و صعود کاهش می یابد، بنابراین مشابه گلايدر اسپری، محل محور تقارن بدنه اصلی به عنوان موقعیت عمودی بال انتخاب می شود.

۶- با افزایش تریم استاتیکی در نیروی افزوده ثابت یا با افزایش نیروی افزوده در تریم استاتیکی ثابت، سرعت پیشروی گلايدر افزایش می یابد. ممکن است در زاویه تریم زیاد یا نیروی افزوده زیاد، مانورپذیری خوبی حاصل نشود. برای تعیین تریم استاتیکی و نیروی افزوده مناسب، نیاز است (الف) با توجه به مأموریت گلايدر، کارفرما یا کاربر، مانورپذیری مورد نیاز را مشخص کند (ب) با توجه به جانمایی و تجهیزات گلايدر، محدودیت تریم استاتیکی تعیین گردد.

کاهش زاویه حمله باعث کاهش درگ و در نتیجه افزایش سرعت می شود.

زیاد شدن زاویه تریم زاویه حرکت را افزایش داده و با اینکه سرعت پیشروی مستقیم وسیله را افزایش می دهد، به نظر می رسد بر مانورپذیری اثر منفی دارد. در زوایای حرکت زیاد، احتمالاً مانور چرخش گلايدر و وضعیت مطلوبی نخواهد داشت که نیاز به بررسی بیشتر دارد که فراتر از این پژوهش است.

۶-۲- تأثیر نیروی افزوده

در این بخش به بررسی اثر تغییر مقدار نیروی افزوده (\bar{W}) بر عملکرد وسیله با فرض ثابت ماندن تریم استاتیکی پرداخته شده است. در شبیه سازی های این بخش، مقدار نیروی افزوده تغییر کرده ولی همزمان مقدار d طوری تنظیم می شود که تریم استاتیکی آن ها با هم برابر و مساوی 22° شود. به منظور بررسی اثر مقدار این نیرو بر عملکرد هیدرودینامیکی وسیله علاوه بر مقدار بویانسی اضافی اصلی و سیله یعنی 400 cc دو مقدار 250 cc و 550 cc نیز بررسی شده است.

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۸ مشخص است که با افزایش مقدار بویانسی اضافی مقدار سرعت پیشروی به طرز قابل توجهی افزایش یافته است.

جدول ۱۸: نتایج تغییر بویانسی افزوده

α [°]	w_e [$\frac{m}{s}$]	u_e [$\frac{m}{s}$]	γ [°]	حالت	d [mm]	ΔV [cc]
-1.42	-0.249	0.447	27.67	غوص	811	250
1.35	0.252	0.447	-28.04	صعود		
-1.30	-0.355	0.583	30.04	غوص	507	400
1.23	0.362	0.586	-30.48	صعود		
-1.15	-0.466	0.706	32.30	غوص	369	550
1.04	0.485	0.711	-33.29	صعود		

مشابه حالت قبل، با افزایش مقدار بویانسی و با ثابت بودن زاویه تریم استاتیکی، به دلیل قوی شدن ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی، زاویه حمله مدل کاهش پیدا کرده است که این امر به معنای کاهش مقدار مقاومت وسیله می باشد در نتیجه سرعت پیشروی و سیله افزایش پیدا کرده است. از طرف دیگر، با افزایش نیروی افزوده مؤلفه ای از نیروی افزوده در راستای محور بدنه اصلی که مشابه تراست عمل می کند، بیشتر می شود در نتیجه مقدار سرعت پیشروی بالا می رود.

مشابه حالت قبل، زاویه حرکت زیاد شده و سرعت افزایش یافته است. افزایش زاویه تریم ممکن است مانورپذیری را کم کند.

۸- کلید واژگان

Research in Ocean Engineering , vol. 3, no. 1, p. 25–31.

[۷] Petritoli,E. Leccese,F. and Cagnetti,M. (2019), High Accuracy Buoyancy for Underwater Gliders: The Uncertainty in the Depth Control, Sensors, vol. 19, p. 1831.

[۸] Javaid,M. Ovinis,M. Nagarajan,T. and Hashim,F,(2014), Underwater Gliders: A Review, MATEC Web of Conferences, vol. 13, p. 02020.

[۹] Zhang,H. Liu,C. Yang,Y. and Wang,S. (2020), Ocean thermal energy utilization process in underwater vehicles: Modelling, temperature boundary analysis, and sea trial, International Journal of Energy Research, vol. 44, p. 2966-298.

[۱۰] Xue,D.-Y. Wu,Z.-L. Wang,Y.-H. and Wang, S.-X. (2018), Coordinate Control, Motion Optimization and Sea Experiment of a Fleet of Petrel-II Gliders, Chinese Journal of Mechanical Engineering, vol. 31, p. 17.

[۱۱] Fan S. and Woolsey,C. (2013), Elements of Underwater Glider Performance and Stability, Marine Technology Society Journal, vol. 47, p. 81-98.

[۱۲] Hong, S.-M. Lee,S. Hyeon,J.-W. Lee,J.-H. Lee,S. Lee, C. et al.,(2019), Optimal design of combined propulsion Underwater Glider for operation of the East Sea of South Korea, Advances in Mechanical Engineering, vol. 11, p. 1687814019856482.

[۱۳] Wang,X. Song,B. Wang,P. and Sun,C.,(2018), Hydrofoil optimization of underwater glider using Free-Form Deformation and surrogate-based optimization, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, vol. 10, p. 730-740.

[۱۴] Roddy, R. F. (1990). Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments (No. DTRC/SHD-1298-08). David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept.

[۱۵] Groves, N. C., Huang, T. T., & Chang, M. S. (1989). Geometric characteristics of DARPA suboff models:(DTRC Model Nos. 5470 and 5471). David Taylor Research Center.

¹ Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)

² Buoyancy propulsion systems

^۳ Spray

^۴ Argo

^۵ Ballast System

^۶ Smart float

^۷Free-Form Deformation (FFD)

^۸Surrogate-Based Optimization (SBO)

^۹Span

^{۱۰}Aspect Ratio

^{۱۱}Fineness Ratio

^{۱۲}STAR-CCM+ 12.02.010-R8

^{۱۳}Velocity Inlet

^{۱۴}Pressure outlet

^{۱۵}Trimmer

^{۱۶}The Autonomous Underwater Glider “Spray”

^{۱۷}Surge

^{۱۸}Heave

^{۱۹}Pitch

^{۲۰}Glide Angle

۹- مراجع

[۱] Graver, J. and Leonard, N, (2001), Underwater glider dynamics and control.

[۲] سوادی منفرد، م، (۱۳۹۳)، کنترل تطبیقی غیر مستقیم شناورهای گلایدر خودگردان، دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[۳] Cao, J. Li,D. Zeng,Z. Yao,B. and Lian,L. (2018), Drifting and Gliding: Design of a Multimodal Underwater Vehicle, in 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), p. 1-7.

[۴] Cao,J. Lu,D. Li,D. Zeng,Z. Yao,B. and Lian, L. (2019), Smartfloat: A Multimodal Underwater Vehicle Combining Float and Glider Capabilities, *IEEE Access*, vol. 7, p. 77825-77838.

[۵] Singh,Y. Bhattacharyya,S. K. and Idichandy,V. G. (2017) CFD approach to modelling, hydrodynamic analysis and motion characteristics of a laboratory underwater glider with experimental results, *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 2, p. 90-119.

[۶] Kim,K.-S. D. Choi,H.-S. Lee,S. and Kim, J.-Y.(2017) Dynamics Modeling and Behavior Analysis of Underwater Glider System, *Journal of Advanced*

[۱۶] Liu, H. L., & Huang, T. T. (1998). Summary of DARPA SUBOFF experimental program data. Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda Md Hydrodynamics Directorate.

[۱۷] Sherman, J., Davis, R. E., Owens, W. B., & Valdes, J. (2001). The autonomous underwater glider "Spray". IEEE Journal of Oceanic Engineering, 26(4), 437-446.

[۱۸] The Central and Northern California Ocean Observing System (CeNCOOS)-

<https://www.cencoos.org/observations/sensor-platforms/gliders/>

[۱۹] Rudnick, D. L., Davis, R. E., & Sherman, J. T. (2016). Spray underwater glider operations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 33(6), 1113-1122.

[۲۰] Simcenter STAR-CCM+ Documentation, Version 2022.1.