بهبود عملکرد هیدرودینامیکی یک گلایدر دریایی با دینامیک سیالات محاسباتی

محمد سعید شمشیری^۱، سید مجتبی علوی جم^۲، محمد مونسان^۳*، یحیی عمو شاهی^٤،مهدی عجمی^۲، سجاد اردشیری^۵

> ^۱ کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی از دانشگاه صنعتی امیر کبیر؛ <u>m.s.sh1391@gmail.com seiedmojtaba_alavijam@yahoo.com</u> ۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک از دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ <u>m.moonesun@gmail.com</u> ۳ *عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود؛* <u>m.moonesun@gmail.com</u> ۴ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک از دانشگاه صنعتی اصفهان؛ <u>yahya.amoushahi@me.iut.ac.ir</u> ۵ فارغ التحصیل دکترای دانشگاه صنعتی مالک اشتر و پژوهشگر سازمان صنایع دریایی <u>sajjad_ardeshiri@yahoo.com</u>

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۱/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸	گلایدرها متحر کهای دریایی جدیدی با کاربردهای تحقیقاتی و نظامی هســـتند که با غوص و صــعود متوالی حرکت میکنند لذا بدنه و بالهای منا سب برای د ستیابی به بی شترین سرعت پی شروی مهم ه ستند. متغیرهای مربوط به طراحی هیدرودینامیکی شامل فرم بدنه ا صلی، بال (مقطع، ابعاد، شکل،
کلمات کلیدی: گلایدر دریایی، اســپری، هیدروفویل، CFD، مقاومت، لیفت.	موقعیت طولی و عمودی آنها) و هیدروا ستاتیک (زاویه تریم ا ستاتیکی، میزان نیروی افزوده) ه ستند. گلایدر دریایی اسپری به عنوان طرح اولیه انتخاب می شود و با تغییر دادن اجزاء، اثر هرکدام در عملکرد آن با شبیه سازی عددی بررسی و حالتهای مناسب تعیین می شود. شبیه سازی عددی به روش دینامیک سیالات محا سباتی در نرمافزار ا ستار سی سی ام پلاس انجام می شود و مطابق اعتبار سنجی، خطای آن کمتر از 10% ا ست. بدنه گلایدر ا سپری، کمترین مقاومت را دارد. برای بال، مقاطع متقارن عملکرد بهتری دارند و مقطع NACA 2012 انتخاب می شود. به لحاظ هیدرودینامیکی بال ها ابعاد کوچکتر رفتار هیدرودینامیکی بهتری نشان داده و با عقب بردن بال، مقدار سرعت پیشروی افزایش می یابد. 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 Shamshiri ¹, Seied Mojtaba Alavi jam ², Mohamad Moonesun ^{3*}, Yahya Amooshahi ³, Mehdi Ajami ², Sajjad Ardeshiri⁵

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

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

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.amoushahi@me.iut.ac.ir
- ⁵ Doctorate graduate of Malek Ashtar University of Technology; sajjad_ardeshiri@yahoo.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Received: 18 Mar 2023 Accepted: 27 Feb 2024 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

پایین تری 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 80 درصد از توان الکتریکی صرف سیستم تغییر شناوری⁴بهوسیله مخزن و پمپ، میشود. اگر گلایدرها بتوانند انرژی محرک خود را از محیط اقیانوس دریافت کنند، آنگاه توان باطری آنها تنها صرف هدایت، اجزای الکترونیکی و حسگرها میشود.

گلایدرهای دریایی، کوچک و قابل استفاده مجدد میباشند که برای عمقسنجی، اندازه گیری دما، شوری آب دریا و یافتن عمق میانگین امواج با حرکت زیگزاگی طراحی شدهاند. این وسیله به صورت بی سیم مقادیر اندازه گیری شده را به بیرون مخابره می کند و به سبب دارا بودن میزان کنترل خیلی خوب روی حرکات و عملکرد میدانی، اطلاعات دقیقی از اقیانوس ها و بستر آن ها به د ست می آورد. این نوع گلایدرها قابلیت آ شکار سازی بهتر ساختار هیدرو گرافی داخل اقیانوس را دارند.

ویژگیهای جذاب گلایدرهای دریایی شامل عملکرد خود کار، مداومت بالا و هزینه کم، سبب استفاده آنها برای اقیانوس شناسی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی شده است. همچنین به عنوان در گاههای ارتباطی یا کمک-ناوبری و برنامه های نظامی مانند اقیانوس شناسی 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 بی سروصدا دشوار است. در اغلب کشورهایی که مرزهای آبی دارند تجهیزات گلایدر و و سایل 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 و سیله زیر سطحی بدون سرنشین به نام اسمات فلوت³پیشنهاد و توسعه داده شده که ترکیبی از شناور گلایدر آرگو و شناور است. این و سیله چندحالته میتواند عملکرد خود را با سیستم کنترل ناوبری از حالت شناور به حالت گلایدر تغییر دهد.

گلایدرها متحرکهای دریایی جدیدی هســـتند که کاربردهایی از جمله اقیانوس شنا سی دارند. با طراحی بالکها جهت ایجاد نیروی ليفت، گلايدرها قادر به حركت در آب بوده و با استفاده از سيستم کنترل شناوری به همراه یک سیستم هیدرولیکی کنترل می شوند. 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 د سته متحرکهای زیر سطحی بدون سرنشین ۱ قرار دارند که با ایجاد غوص و صعود به صورت حرکت زیگزاگ با تغییر شــناوری و موقعیت مرکز ثقل (به کمک مخزن و یمپ)، به جلو حركت مي كنند [1]. گلايدرها داراي بالكهايي هستند و با جابه جایی جرم متحرک داخلی و سطوح کنترلی (مانند سکان) جهت خود را کنترل می کنند. در گلایدرهای دریایی از رانشــگرها استفاده نمی شود و نیاز به توان الکتریکی بسیار کمی دارند که علت آن استفاده از رانشگر شناوری ۲ ست. بنابراین مداومت بالا و قابلیت استقرار طولانی مدت (معمولاً چند ماه) در زیر آب را دارند. به عنوان مثال گلایدر تجاری اسپری آمداومت بالایی در حدود 6

ماه و قابلیت پیمایش بیش از 3000 کیلومتر را دارد [۱۹]. پیکربندی و اجزای یک نمونه گلایدر با نام آرگو[†]در شــکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: پیکربندی داخلی گلایدر دریایی آرگو [۳]

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 می شود. اساس حرکت گلایدر در آب تفاوت چگالی گلایدر و آب اطراف آن است که باعث میشود وسیله به عمقهای

در پژوهشی دیگر مشخصههای تجربی درگ و لیفت یک گلایدر با دینایک سیالات محا سباتی اعتبار سنجی شدها ست. توزیع نیروی درگ و لیفت در زوایای حمله متفاوت در اعداد رینولدز مختلف بررسی شدهاست. همچنین اثر سرعت و زاویه حمله گلایدر بررسی شدهاست [۵].

در مرجع [۶] مدلهای ریاضــی غیرخطی با شـــش درجه آزادی دینامیکی برای کنترل حرکت و ناوبری استخراج شدهاست.

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

انواع گلایدرهای دریایی از لحاظ خصوصیات طراحی، مکانیزم حرکتی، برد و ظرفیت حمل بار برر سی و و مزایا و معایب هر کدام تعیین شدهاست. [۸]

از انرژی محیطی اقیانوس به منظور افزایش برد و مداومت گلایدر نیز میتوان استفاده نمود. در مرجع [۹] یک مدل دقیق با چهار مدل فرعی برای تو صیف فرایند ا ستفاده از انرژی حرارتی اقیانوس در گلایدر ایجاد شدها ست. عواملی نظیر ف شار سیستم و خواص فیزیکی، در نظر گرفته میشود.

در بعضی تحقیقات موجود، استراتژی کنترل و به حداقل ر ساندن انرژی در گلایدر های هیبریدی به روش تحلیلی و تجربی مورد بررسی قرار گرفتهاست. در مرجع [۱۰] یک استراتژی کنترل مختصات چندلایه در دم گلایدر هیبریدی توسعه یافته تا حرکت و شکل هندسی گلایدرها را با مصرف بهینه انرژی کنترل کند.

در مرجع [۱۱] نیز رابطه بین هندسه گلایدر و مشخصههای پا یداری و عملکردی گلایدر مورد بررسی قرار گرفتهاست. 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 شدهاست. برای این منظور تکنیکی را برای بهینه سازی طراحی گلایدرهای زیر آب در نظر گرفتهاند تا گلایدر با استفاده از ترکیب یک موتور شناوری و یک

بالها جزء مستقیم تولید نیروی محرکه برای گلایدر دریایی است. بهبود کارایی هیدروفویل بال بسیار مهم است. مطابق تحقیقات انجام شده در مرجع [۱۳] با استفاده از رویکرد پارامتری تغییر شکل آزاد⁹و الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر جانشینی^۸ شکل یک هیدروفویل، بهینه شدهاست.

در این مقاله با ا ستفاده از روش محا سبات عددی به برر سی تأثیر جریان بر روی بدنه اصلی، طراحی بال و تأثیر موقعیت قرارگیری

بال بر عملکرد هیدرودینامیکی گلایدر پرداخته میشود. و همچنین تأثیر شــرایط هیدرواســتاتیکی یعنی تغییرات تریم و تغییر نیروی افزوده بر عملکرد هیدرودینامیکی گلایدر نیز بررسی میشود.

۲- اعتبارسنجی، شبکهبندی و تنظیم شرایط حل

هر شبیه سازی عددی به سه مرحله اساسی پیش پردازش، پردازش و پس پردازش تقسیم می گردد. تنظیمات مربوط به پیش پردازنده شامل مدل هندسی، دامنه و شبکه محاسباتی و انتخاب حلگرهای مناسب مسئله است. برای بررسی صحت انتخابها و همچنین دقت شبیه سازی، به اعتبار سنجی حل نیاز است. اعتبار سنجی عبار تست از شبیه سازی یک مسئله مشابه که نتایج تجربی یا حل تحلیلی دقیق آن در دستر س بوده و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی یا تحلیل معتبر.

با توجه به این که تسبت معتبری برای یک گلایدر دریایی یافت نشد، از نتایج تسبت یک زیردریایی استفاده می شود. برای اعتبار سنجی، زیردریایی دارپا سابوف انتخاب شد. آزمایشهای این زیردریایی در مؤسسه تحقیقاتی دیوید تیلور ایالات متحده برای آژانس پروژه های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی این کشور انجام شدهاست.

آزمایش انتخاب شده، مربوط به تست مقاومت مدل سابوف با ملحقات کامل (شامل بدنه اصلی، برجک، بالکهای افقی و عمودی پا شنه) بوده که در حو ضچه کشش در حالت عمیق و بدون زاویه دریفت و حمله انجام شدهاست. شکل ۲ هندسه مدل به همراه ابعاد اصلی آن را در دو نمای جانبی و بالا نشان میدهد. در این شسکل، اندازه های بیرون پرانتز، یکای فوت دارند و اعداد داخل پرانتز، 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، بهدست میآید.



در مدل انتخاب شــده، علاوه بر بدنه اصـلی، برجک و بالکهای پاشــنه نیز وجود دارند. مکان هندسـی مقطع برجک و رویه خط جریانی آن در مرجع [۱۴] ذکر شـدهاسـت. هر چهار بالک پاشـنه،

مشابه یکدیگر بوده و پروفیل مقطع آنها NACA 0020 میباشد. در شکل ۳، سه نمای برجک و در شکل ۴ و شکل ۵ نمای جانبی بالکها و مقطع بیبعد آنها نشان داده شدهاست.



مشخصههای هندسی مهم برجک و بالکهای پاشنه به طور خلاصه در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی بالکهای پاشنه و برجک زیردریایی ۱ · · · [عد]

سابوف [١٢]			
بالکهای پاشنه (m)	برجک (m)	مشخصه	
0.134	0.222	طول دهانه	
0.215	0.368	طول وتر در ریشه	
0.152	0.368	طول وتر در نوک	
-	0.924	فاصله عمود سينه تا لبه حمله	
4.007	_	فاصله عمود سينه تا لبه فرار	

0.720	0.603	نسبت منظری '
NACA 0020	-	پروفيل مقطع

در شبیه سازی عددی و اعتبار سنجی، مشابه تست تجربی علاوه بر هند سه، توزیع جرمی آن نیز مورد نیاز است. جدول ۲ در بردارنده خلاصهای 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 کارتزین 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 آنها متفاوت است، استفاده می شود. برای تر سیم هند سه، مبدأ مختصات در انتهایی ترین نقطه پا شنه درنظر گرفته شدهاست. ممان اینرسی، نیروها و گشتاورها نسبت به دستگاه مختصات با مبدأ مرکز ثقل بیان می شوند.

جدول ۱: مسخصات هندسی و جرمی زیردریایی سابوف [۱۴]			
مقدار	نماد و یکا	مشخصه	
4.261	$L_{PP}[m]$	طول بین دو عمود	
4.356	$L_{OA}[m]$	طول کلی	
2.343	LCB [m]	فاصله طولی مرکز بویانسی از پاشنه	
0.002	VCB [m]	فاصله ارتفاع مرکز بویانسی از محور بدنه	
1.016	$L_{F}[m]$	طول ناحيه دماغه بدنه	
2.229	$L_{P}[m]$	طول ناحیه میانی بدنه	
1.111	$L_R[m]$	طول ناحيه پاشنه	
0.508	$D_{\mathrm{H}}\left[m ight]$	قطر	
8.575	FR	نسبت ظرافت''	
0.70764	$\nabla [m^3]$	حجم	
6.2850	WS [m ²]	مساحت سطح خيس	
6922.484	Δ[N]	نیروی بویانسی (جابهجایی)	
705.656	M [kg]	جرم	
997.20	$\rho\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$	چگالی	
759.168	$I_{zz} [kg.m^2]$	ممان اینرسی حول محور z در CG	
759.168	$I_{yy}[kg.m^2]$	ممان اینرسی حول محور y در CG	

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

(1)

$$LCG = LCB$$

[...] . .

در مراجع، در مورد ارتفاع مرکز ثقل صحبتی نشده است. برای ایجاد پایداری، مرکز ثقل پایین تر از مرکز بویانسی قرار داده می شود. در این پژوهش فرض می شود 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 كامل

برای اعتبار سنجی، هند سه زیردریایی سابوف با هند سه موجود در مراجع تر سیم می شود و در سرعت u=9.151 m/s شبیه سازی میگردد.

۲- ۱- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

هندسه زیردریایی سابوف با اطلاعات مراجع [۱۴]، [۱۵] و [۱۶] ترسیم شدهاست. 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 سیامپلاس^۱ ساخته شدها ست. ابعاد دامنه باید قدری بزرگ باشد که بر نتایج تأثیری نگذارد. در این پژوهش ابعاد دامنه به صورت مضربی از طول شناور قرار داده شدهاست 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 ^۳و برای مرز خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی^۹اعمال گردید. شرط مرزی زیردریایی نیز دیواره بدون لغزش خواهدبود. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حل نیز در شکل ۷ آورده شدهاست.



شکل ۲: شرایط مرزی و دامنه محاسباتی

۲- ۲- شبکهبندی

فرآیند گ سسته سازی میدان فیزیکی، عملیات پیچیدهای بوده که سسهم قابل توجهی در کیفیت حل میدان دارد. در این پژوهش، از شبکهبندی هیبرید استفاده شدها ست. شبکه در نرم افزار استار سیسیام پلاس به روش تریمر^{مر}ولید شدهاست. در این روش، تمام حجم هندسه با مشهای شش وجهی مکعبی به عنوان پس زمینه پو شانده شده و سپس مشها با سطوح جسم جامد بریده می سوند و در نهایت، مش حجمهایی که سیال در آنها وجود ندارد، حذف می گردند. شبکه اطراف بدنه و ناحیه هایی 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 شبکهبندی دامنه را نشان میدهد.



شکل ۸: 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 m 0.029 است و اولین ردیف المان های لایهمرزی در فاصلهی بسیار کمی از سطح (m 0.0005) قرار گرفتهاست. به گونهای که مقدار +y شبکه محاسباتی مقداری کمتر از 150 دارد (شکل ۱۰). این شبکهبندی با مطالعه شبکه بدست آمده است.



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 می گردد. شبکه محا سباتی تا جایی ریز می شود که نتایج تحلیل (در اینجا نیروی مقاومت)، از ابعاد سلولها مستقل گردد.

در این پژوهش در هر مرحله، اندازه پایهی مش $\frac{1}{\sqrt{2}}$ برابر اندازه قبلی شده است. در شبیه سازیهای مربوط به مطالعه شبکه، گام زمانی با شرط ثابت ماندن عدد کورانت به ست می آید. 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. از ضرب همان ضریب در گام زمانی مرحله قبل یا بعد به دست آید. از مرحله مرحله قبل یا بعد می تابتی از مرحله از ضرب همان ضریب در گام زمانی مرحله قبل یا بعد می تابتی از مرحله مرحله قبل یا بعد ماندن عدد کورانت نیز از گام زمانی باید از ضرب همان ضریب در گام زمانی مرحله قبل یا بعد به دست آید. از ضرب همان می مرابه شبکه در جدول ۴ و شکل ۱۱ آورده شده است.

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

مطالعه شبكه	جدول ۴: نتایج نهایی
-------------	---------------------

	•	0	C		
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 برحسب تعداد سلولهای شبکه

۲- ۳- 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 می شود:

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho u L_{OA}}{\mu} = 4.37 \times 10^8 \tag{(7)}$$

جدول ۵: خواص سیال و سایر شرایط محیط

997.20	$ \rho_{\rm w} \left[\frac{kg}{m^3} \right] $	چگالی آب
8.89×10^{-4}	μ[<i>Pa.s</i>]	ويسكوزيته ديناميكي

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

۲- ۴- فرایند حل عددی

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



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 بهد ست آمده از شبیه سازی عددی در جدول ۶ مشاهده می شود. برای مقایسه، نتیجه تست تجربی نیز در این جدول موجود است.

جدول ۶: اعتبارسنجی نیروی مقاومت

%Error	R _{Num}	R _{Exp}	u
	[N]	[N]	[<u>m</u>]
7.8	885.0	821.1	9.151

مطابق جدول ۶، خطای محا سبه مقاومت، کمتر از 10% است که قابل قبول می با شد. انتظار می رود با اعمال شبکه بندی و تنظیمات اعتبار سنجی 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 زیر دریایی و در شکل ۱۴ تا شکل ۱۷ کانتورهای اندازه سرعت، فشار استاتیکی و تنش برشی آورده شده است.



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





۳- طرح مشابه

در هیدرودینامیک، معمولا یک طرح مشابه مسئله اصلی مبنای کار قرار می گیرد. در این پژوهش، از گلایدر اسپری^۹ به عنوان طرح مشابه در طراحی هیدرودینامیکی استفاده می شود. اولین نمونه این گلایدر، در سال 2001 تو سط شرمن و همکاران [۱۷] معرفی شد. در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ اجزای گلایدر اسپری مشاهده می شود. در جدول ۷ و جدول ۸ تمامی اطلاعات موجود از این گلایدر ثبت شدهاست. مشخصات هندسی بالها و بالکهای پاشنه از تصاویر در دسترس از هندسه استخراج شدهاند.



شکل ۱۹: گلایدر دریایی اسپری [۱۸]

جدول ۷: مشخصات هندسی و جرمی گلایدر 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	LC <i>G</i>	طول مرکز ثقل	
0-900 cc	$\delta \nabla$	تغييرات حجم	
≅ 18 – 22 °	arphi	زاویه غوص یا صعود	

جدول ۸: مشخصات هندسی بالها و بالکهای پاشنه			
بالک پاشنه	بال	پارامتر	
0.460 m	0.500 m	طول دهانه	
0.070 m	0.102 m	طول وتر	
مستطيل	مستطيل	مقطع	
0.0032 m	0.004 m	ضخامت مقطع	

۴- طراحی بدنه اصلی

طراحی بدنه بهینه فرآیندی پیچیده بوده که فراتر از این پژوهش است. برای دستیابی به یک بدنه مناسب، هند سه گلایدر اسپری، زیردریایی سابوف و دو طرح هندسی ساده که معمولاً در زیر سطحیها استفاده می شوند شبیه سازی و مقایسه می شوند. این دو طرح شامل دماغه با فرمهای نیم کره و بیضی گون، 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 شدها ست. این قیدها عبارتند از یکسان بودن قطر، طول و حجم کل. مقادیر قیدها برابر گلایدر اسپری در نظر گرفته شدهاست که در جدول ۹ مشاهده می شود. چهار بدنه مورد نظر در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

جدول ۹: قیدهای لحاظ شده در طراحی بدنه اصلی

	-	_
طول کلی	$L_{OA}[m]$	2.000
قطر	$D_{H}[m]$	0.203
حجم	∇ [m ³]	0.05





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

بدنهها	مقاومت	۱: نتایج	جدول ۰
--------	--------	----------	--------

	R _T [N]	R _s [N]	R _P [N]	مدل	#
-	0.312	0.286	0.026	اسپرى	1
	0.313	0.286	0.027	بیضی گون و مخروط	2
-	0.334	0.277	0.057	نيمكره و مخروط	3
	0.315	0.277	0.038	سابوف	4

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ مقدار مقاومت بدنه شماره 1 (بدنه اسبری)، دارای کمترین مقدار مقاومت است به طوریکه نسبت به مدل شماره 2 (هند سه 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 0% 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 $(5m)_{S}$ است. همچنین مدل 3 به علت استفاده از نیم کره در دماغه مقاومت فشاری بیشتری دارد.



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 یکنواخت ر 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 می شود.

۵- طراحی بال ۵- ۱- تأثیر مقطع بال

بال به عنوان عامل تولید نیروی لیفت، المان مهمی در گلایدر است. برای تولید لیفت بیشتر، معمولاً مقطع بال به شکل فویل استفاده می شود. از آنجا که بالهای گلایدر، در معرض جریان، نیروی درگ دارند، هند سهای برای بال منا سب ا ست که کمترین نیروی درگ را داشته باشد؛ یعنی با کمترین نیروی درگ، نیروی لیفت مورد نیاز را تأمین کند. بنابراین، به نظر می سد هندسه بالی مطلوب ا ست که بی شترین نسبت لیفت به درگ را دا شته با شد. برای دستیابی به هندسه مطلوب، ابتدا هیدروفویلهایی دو بعدی که بی شترین نسبت لیفت به درگ را دارند، انتخاب کرده و سپس در حالت سه بعدی به همراه بدنه اصلی شبیه سازی می شوند.

۵- ۱- ۱- انتخاب مقاطع دوبعدی

ابتدا مجموعهای از هیدروفویلهایی که معمولاً برای جریانهای با رینولدز کم انتخاب می شوند، گردآوری شده و در شرایط یکسان، نسبت لیفت به درگشان مقایسه می شود و آنهایی که بالاترین نسبت لیفت به درگ را دارند، برای شبیه سازی سه بعدی انتخاب می گردند.

تحلیل هیدروفویل های جدول ۱۱ انجام می شود. طول تمامی فویل ها برابر 1m است. در شکل ۲۲ تا شکل ۲۴هندسه این مقاطع مشاهده می شود. جهت مقایسه بهتر، هیدروفویل ها در 3 دسته تقسیم شدهاند.

جدول ۱۱: هیدروفویلهای استفاده شده

$$C_l = \frac{L}{0.5\rho U^2 c^2} \tag{(7)}$$

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

997.561 kg/m3	ρ	چگالی
$8.8871 \times 10^{-4} Pa.s$	μ	ويسكوزيته ديناميكي
1 m/s	U	سرعت جريان بالادست
101325 Pa	Р	فشار استاتیکی محیط
1.12×10^{6}	Re	عدد رينولدز جريان بالادست

جدول ۱۲: خواص سیال آب و سایر شرایط محیط

الف: نتايج تحليل هيدروفويلهاى دسته NACA 00xx

این دسته شامل هیدروفویلهای NACA 0009، NACA 0012، NACA 0015 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.



شكل ۲۵: ضريب ليفت برحسب زاويه حمله براى 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

	دسته		
NACA 0009			
NACA 0012	NACADO		
NACA 0015	NACA UUXX		
NACA 0021			
NACA 4415			
NACA 6615	NACA xx15		
NACA 63-812			
NACA 63-818			
NACA 63-821	NACA 63-8xx		
NACA 63-824			
ی دسته NACA 00xx	محم ۸۵۵ میدرو فویلها شکل ۲۲: هیدرو فویلها		
ی دسته NACA 00xx	۸۵۵۵ ۵۵۵۰ شکل ۲۲: هیدرو فویلها ۸۵۵ م۸۸		
ی دسته NACA 00xx	۸۵۲۵ ۵۵۵ شکل ۲۲: هیدرو فویلها ۸۸۲۵ ۵۵۰ ۸۸۲۵ –		
ی دسته NACA 00xx	محمد معند معند معند معند معند معند معند مع		

شکل ۲۳: هیدرو فویلهای دسته NACA 63-8xx

NACA 6615

شکل ۲۴: هیدرو فویلهای دسته NACA xx15

۵- ۱- ۲- شبیهسازی مقاطع دوبعدی

NACA 4415

تحلیل هیدرودینامیکی هیدروفویل ها در شرایط کاملاً یکسان (سرعت $\frac{m}{s}$ و عدد رینولدز $10^6 \times 101$) و به صورت دوبعدی انجام شدها ست (جدول ۱۲). برای هیدروفویل های هر د سته، ابتدا نیرو های لیفت و درگ در زوایای حمله مختلف تا وا ما ندگی محاسبه شده و نسبت آن ها ترسیم می گردد. برای محاسبه ضرایب لیفت و درگ از روابط زیر استفاده می شود:

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



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

ب: نتايج تحليل هيدروفويلهاى دسته NACAxx15

در دسته NACA 2415 دو مقطع NACA 4415 وNACA وNACA 6615 وNACA وNACA 6615 قراردار ند. این دو ه یدروفو یل، نامت قارن هست ند و برخلاف هیدروفویل های متقارن، در زاویه حمله صفر و برخی از زوایای حمله منفی نیز لیفت رو به بالا تولید میکنند. شکل ۲۹ تا شکل ۲۹ نمودارهای ضریب لیفت، درگ و نسبت لیفت به درگ بر حسب زاویه حمله را نشان میدهند.



شكل ۲۷: ضريب ليفت برحسب زاويه حمله براى دسته NACA xx15



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



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 بیشــتر بوده و در زاویه حمله نزدیک 8 درجه رخ دادهاست. از این دسته هیدروفویل NACA 4415 برای ترسیم بال سه بعدی انتخاب می گردد.

ج: نتایج تحلیل هیدروفویلهای دسته NACA 63-8xx

در این دسته هیدروفویل های NACA 63-812، NACA 63- 812، NACA 63-812 NACA 63-818، 815 NACA 63-818 و NACA 63-814 قرار دارد. در شکل ۳۰ تا شکل ۳۲ نتایج حل عددی جریان اطراف این مقاطع مشاهده می شود.



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



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



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

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

د: هیدروفویلهای برگزیده

ه یدروفو یل هایی که در هر دست ته عملکرد ه یدرودی نامیکی مطلوب تری داشتند، مورد بررسی قرار می گیرند. در شکل ۳۳ تا شکل ۳۵ نمودارهای تغییرات ضرایب لیفت، درگ و نسبت لیفت به درگ این مقاطع مشاهده می شود.



شکل ۳۳: ضریب لیفت برحسب زاویه حمله برای هیدروفویلهای برگزیده



شکل ۳۴: ضریب درگ برحسب زاویه حمله برای هیدروفویلهای برگزیده



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 شبیه سازی شده، به منظور انتخاب بال بهینه و همچنین تأثیر بال بر عملکرد هیدرودینامیکی بدنه در غوص و صعود، سه هیدروفویل NACA 0012 و NACA 63-812 انتخاب شدهاست. علاوه بر این سه هیدروفویل، مقطع مستطیلی نیز که در گلایدر اسپری استفاده شده است، برر سی می شود. با این مقاطع، بالهای سهبعدی با طول دهانه و وتر یکسان مشابه گلایدر اسپری ایجاد شده و روی بدنه مورد نظر قرار داده شدها ست (شکل ۳۶). بنابراین چهار گلایدر با مقاطع بالهای متفاوت ایجاد شدهاست که در دو حالت غوص و صعود مورد تحلیل عددی قرار می گیرد تا بهینهترین مقطع بال برای ادامه کار مشخص و انتخاب شود. دو پیش بینی می شود در غوص و صعود رفتار کاملا متفاوتی داشته پیش بینی می شود در غوص و صعود رفتار کاملا متفاوتی داشته



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 می شوند. جانمایی اجزاء مطابق گلایدر ا سپری ا ست. م شخصات هند سی بال به همراه بدنه در شکل ۳۷ موجود ا ست. مطابق این شکل، طول دهانه بال mm 500 و طول وتر آن mm 100 است. این مقادیر برای هر سه نوع بال یکسان میباشد. دستگاه مختصاتی

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 mm 829 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 محا سباتی و شبکهبندی استفاده شده، کاملاً مشابه اعتبار سنجی است. نمایی از این شبکهبندی در شکل ۳۹ تا شکل ۴۱ نشان داده شدهاست.



شکل ۴۰: شبکهبندی اطراف گلایدر



شکل ۴۱: شبکهبندی روی بدنه گلایدر

شبیه سازی در این مرحله شامل شبیه سازی و سیله در دو حالت غوص و صعود خواهدبود. برای شبیه سازی غوص و صعود گلایدر، نیاز است نیروهای وزن (W)، بویانسی (B) و نیروی اضافی (\overline{W}) که باعث ایجاد اختلاف بین وزن و بویانسی می شود و امکان غوص و صعود را فراهم می آورد، شبیه سازی شوند. در شبیه سازی عددی، سه درجه آزادی در نظر گرفته شده که شامل حرکات سرج (x)، هیو(z) و پیچ (θ) است.

با قرار دادن یک نیروی اضافی (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 (۲) میشود. دیاگرام آزاد نیروهای هیدرواستاتیکی در شکل ۴۲ نشان داده شدهاست.



شکل ۴۲: دیاگرام آزاد نیروهای هیدرواستاتیکی در شروع غوص

با معلوم بودن \overline{w} و au، فاصله d با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$d = \frac{W}{\overline{w}} \times \overline{BG} \tan \tau \tag{(a)}$$

که \overline{BG} فا صله مرکز ثقل و بویانسی در حالت اولیه است که برابر 0.01 m فرض شده است. نیروی اضافی \overline{w} معادل نیروی بویانسی

ناشی از حجم 400 cc است. زاویه تریم استاتیکی °22 در نظر گرفته شدهاست. با این فر ضیات، فاصله $d = 0.507 \ m$ به ست میآید. در غوص و صعود فقط جهت نیروی ӣ قرینه یکدیگرند. شبیه سازی عددی غوص و صعود گلایدرها 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 د ستگاه متصل به بدنه، موازی د ستگاه متصل به زمین ا ست. مبدأ د ستگاه متصل به زمين در انتهايي ترين نقطه پا شنه و مبدأ دستكاه متصل به بدنه روى مركز ثقل قرار دارد. مؤلفه افقى سرعت در دستگاه مختصات متصل به زمین (u_e)، "سرعت پیشروی گلایدر" نامیده میشود و عملکرد گلایدر را نشان میدهد. برای مقایسه مدلها، مجموع سرعت پیشروی در غوص و صعود مقايسه مىشوند.

همانطور که نتایج ارائه شده در جدول ۱۳ نشان میدهد مجموع سرعت پیشروی و سیله با بال NACA 0012 از بالهای با مقطع نامتقارن بیشتر است. با دقت در این نتایج میتوان دریافت که در حالت غوص، فویلهای نامتقارن اندکی از فویل متقارن بهتر عمل کردهاند ولی در حالت صعود عملکرد فویل متقارن NACA 0012 بهتر از فویلهای نامتقارن بودهاست.

جدول ١٣: نتايج شبيه سازي گلايدر با مقاطع مختلف بال

$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\frac{u_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	γ [°]	حالت	مقطع بال
-0.244	0.507	23.91	غوص	Doctongular
0.248	0.507	-24.34	صعود	Rectaliguial
-0.250	0.550	22.72	غوص	NACA 0012
0.260	0.553	-23.52	صعود	NACA 0012
-0.415	0.566	38.38	غوص	
0.194	0.462	-16.84	صعود	NACA 4415
-0.474	0.531	45.02	غوص	NACA 62 912
0.184	0.395	-17.28	صعود	NACA 05-012

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

۵- ۲- تأثیر ابعاد بال

برای برر سی اثر ابعاد بال، علاوه بر بال اصلی با اندازه ذکر شده در بخش قبل، دو بال با نسبتهای مقیاس 0.8 و 1.2 از بال اصلی (با

مقیاس 1) ساخته و مقایسه می شوند. این هندسهها در شکل ۴۳ نشان داده شدهاند.



شکل ۴۳: هندسههای تولید شده با نسبتهای مقیاس متفاوت بالها

شرایط شبیهسازی عددی این بدنهها کاملاً مشابه بخش قبل میباشد. جزئیات هندسی بدنههای جدید در شکل ۴۴ موجود است.



خلاصــهای از نتایج عددی بهدســت آمده در جدول ۱۴ ارائه شدهاست. مطابق نتایج ارائه شده مشخص است که با کاهش ابعاد بالهای وسیله سرعت پیشروی وسیله افزایش یافتهاست. علت این امر نیز کاهش مقدار نیروی مقاومت با کاهش سـایز بال اسـت که این نتیجه قابل پیشبینی بود.

جدول ۱۴: نتایج شبیه سازی گلایدر با مقیاسهای مختلف بال

$\frac{W_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	$\frac{u_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	γ [°]	حالت	مقياس بال
-0.248	0.563	21.49	غوص	0.0
0.252	0.563	-21.86	صعود	0.8
-0.250	0.550	22.72	غوص	1.0
0.260	0.553	-23.52	صعود	1.0
-0.258	0.538	24.32	غوص	1.2
0.259	0.537	-24.40	صعود	1.2

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 نداشتهباشد. چون تحلیل سازهای وسیله در این پروژه مد نظر نیست، بال اولیه وسیله که ابعاد آن با گلایدر اسپری یکی است و دارای طول 500mm بود برای ادامه کار انتخاب میشود و در سایز بال هیچ تغییری ایجاد نمی گردد.

۵- ۳- تأثير موقعيت طولي بال

بال انتخاب شده تا این مرحله دارای مقطع NACA 0012 و طول دهانه mm 500 ا ست و از نظر هند سی دیگر تغییر نخواهد کرد. ولی نکته ب سیار مهم دیگر موقعیت قرار گیری بال روی بدنه ا ست. زیرا اگر بال در موقعیت مناسبی قرار نداشتهباشد علاوه بر تأثیر روی سرعت پیشروی و سیله با تغییر مرکز فشار هیدرودینامیکی می تواند سبب ناپایداری وسیله در جریان غوص و صعود شود.

می تواند سبب تاپیداری وسیند در جریای عوص و صعود سود. در این بخش به برر سی اثر موقعیت افقی بال روی و سیله پرداخته می شود. بدین منظور در سه نقطه مورد نظر نسبت به نقطه اصلی قرار گیری بال نسبت به بدنه (هر نقطه به اندازه mm 110) بال جابهجا می شود. با توجه به اینکه جابهجایی زیاد بال رو به جلو و قرار گرفتن مرکز فشار آن جلوتر از مرکز ثقل سبب ناپایداری وسیله می شود، جابهجایی بال رو به جلو فقط در یک حالت برسی می شود (mm 110 +) اما انتقال بال روبه عقب در دو حالت بررسی خواهدشد. (mm 110 - و mm 220-). خلاصه توضیحات در شکل ۴۵ و شکل ۴۶ نشان داده شدهاست.



نتایج شبیه سازیهای عددی در جدول ۱۵ ارائه شدها ست. مطابق نتایج ارائه شده در این جدول، مشخص است که با عقب رفتن بال

مقدار سرعت پیشروی نیز افزایش یافتهاست. علت این امر این است که با عقب تر رفتن بالها مرکز فشار عقب تر رفته و با افزایش فاصله بین مرکز فشار و مرکز ثقل، ممان پیچ بالها افزایش مییابد و در نتیجه زاویه حمله کم می شود.

جدول ۱۵: نتایج شبیه سازی گلایدر با موقعیتهای طولی متفاوت بال

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

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 بی شتر سبب پایداری بسیار زیاد وسیله می گردد و در نتیجه مانور پذیری وسیله به مقدار زیادی کاهش مییابد. بنابراین به نظر می سد مقدار mm مقدار معقولی برای عقب کشیدن بال باشد. بنابراین این مقدار به عنوان ادامه کار مورد استفاده قرار می گیرد.

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 شبیه سازی عددی انجام می شود. 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 میبا شد. خلا صهای از نتایج شبیه سازی در جدول ۱۶ ارائه شده است.

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

جدول ۱۶: نتایج شبیه سازی گلایدر با موقعیتهای عمودی متفاوت بال

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

۶- تأثير شرايط هيدرواستاتيكي

تا این مرحله از کار، عمده تغییرات روی مشخصات هندسی گلایدر بودهاست. در این مرحله از کار سعی شدهاست تأثیر شرایط هیدرواستاتیکی یعنی تغییرات تریم با فرض ثابت ماندن مقدار نیروی افزوده و تغییر نیروی افزوده با فرض ثابت ماندن تریم بر عملکرد گلایدر مشخص شود. تغییر دادن شرایط هیدروا ستاتیکی 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 گلایدر که نیروی وزن و بویانسیی 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:

$$\tau = \tan^{-1}\left(\frac{d}{\overline{BG}} \times \frac{\overline{W}}{W}\right) \tag{9}$$

باتوجه 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 °22 در نظر گرفته می شد. علاوه بر این مقدار، زوایای °10 و°34 نیز برر سی می شوند (شکل ۴۸). فاصله (d) برای هر شبیهسازی با نتایج این شبیهسازیها در جدول ۱۷ ذکر شدهاست.



شکل ۴۸: زاویای تریم استاتیکی متفاوت

جدول ۱۷: نتایج تغییر زاوبه تریم استاتیکی								
α [°]	$\frac{w_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	$\frac{u_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	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	10	221		
-1.30	-0.355	0.583	30.04	غوص	22	507		
1.23	0.362	0.586	-30.48	صعود	22	507		
-0.90	-0.511	0.591	39.94	غوص	24	047		
0.81	0.523	0.592	-40.66	صعود	34	847		

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۷، مشخص است که با افزایش زاویه تریم استاتیکی سرعت پیشروی وسیله افزایش پیدا کردهاست. با توجه به افزایش بازوی نیروی افزوده، ممان حاصل از آن زیاد می شود و درنتیجه گلایدر در زوایای تریم بزرگتری به تعادل استاتیکی می سد. در این حالت، برای تغییر تریم هیدروا ستاتیکی ممان های بزرگتری نیاز است یا به عبارتی ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی بیشتر می شود و ممان هیدرودینامیکی بال ها، زاویه تریم را به میزان کمتری تغییر می دهد در نتیجه زاویه حمله نیز کاهش می یابد که در ستون آخر جدول ۱۷، زاویه حمله نیز محاسبه شده است. زاویه حمله (α)، زاویه بردار برایند سرعت حرکت (\overline{V}) با محور بدنه (یا محور X دستگاه متصل به بدنه) است (شکل ۴۹):

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{w}{u} \tag{Y}$$



شکل ۴۹: زوایا در هیدرودینامیک گلایدر

کاهش زاویه حمله باعث گاهش درگ و درنتیجه افزایش سـرعت میشود.

زیاد شدن زاویه تریم زاویه حرکت را افزایش داده و با اینکه سرعت پیشروی مستقیم وسیله را افزایش میدهد، به نظر میرسد بر مانور پذیری اثر منفی دارد. در زوایای حرکت زیاد، احتمالاً مانور چرخش گلایدر و ضعیت مطلوبی نخواهددا شت که نیاز به برر سی بیشتر دارد که فراتر از این پژوهش است.

۶- ۲- تأثیر نیروی افزوده

در این بخش به بررسیی اثر تغییر مقدار نیروی افزوده (\overline{w}) بر عملکرد وسیله با فرض ثابت ماندن تریم استاتیکی پرداخته شدهاست. در شبیه سازی های این بخش، مقدار نیروی افزوده تغییر کرده ولی همزمان مقدار d طوری تنظیم می سود که تریم ا ستاتیکی آن ها با هم برابر و مساوی °22 شود. به منظور برر سی اثر مقدار این نیرو بر عملکرد هیدرودینامیکی وسیله علاوه بر مقدار بویانسی ا ضافی ا صلی و سیله یعنی 400 cc دو مقدار cc 250 cc بویانسی ا ضافی ا صلی و سیله یعنی 500 cc دو مقدار cc

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱۸ م شخص ا ست که با افزایش مقدار بویانسی اضافی مقدار سرعت پیشروی به طرز قابل توجهی افزایش یافتهاست.

جدول ۱۸: نتایج تغییر بویانسی افزوده

α [°]	$\frac{w_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	$\frac{u_e}{\left[\frac{m}{s}\right]}$	γ [°]	حالت	d [mm]	δ⊽ [cc]
-1.42	-0.249	0.447	27.67	غوص	011	250
1.35	0.252	0.447	-28.04	صعود	011	230
-1.30	-0.355	0.583	30.04	غوص	F07	400
1.23	0.362	0.586	-30.48	صعود	507	400
-1.15	-0.466	0.706	32.30	غوص	260	550
1.04	0.485	0.711	-33.29	صعود	369	330

مشابه حالت قبل، با افزایش مقدار بویانسی و با ثابت بودن زاویه تریم اس تاتیکی، به دل یل قوی شدن م مان بازگردان نده هیدوراستاتیکی، زاویه حمله مدل کاهش پیدا کردهاست که این امر به معنای کاهش مقدار مقاومت وسیله میباشد در نتیجه سرعت پیشروی و سیله افزایش پیدا کردها ست. از طرف دیگر، با افزایش نیروی افزوده مؤلفهای از نیروی افزوده در راستای محور بدنه اصلی که مشابه تراست عمل میکند، بیشتر میشود در نتیجه مقدار سرعت پیشروی بالا میرود.

مشابه حالت قبل، زاویه حرکت زیاد شده و سرعت افزایش یافتها ست. افزایش زاویه تریم ممکن ا ست مانورپذیری را کم کند.

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

۷- جمع بندی

در این مقاله، گلایدر دریایی از منظر هیدرومکانیکی طراحی شد. گلایدر اسپری به عنوان طرح مشابه انتخاب گردید. ابتدا اعتبارسنجی شبیهسازی عددی و مراحل آن بررسی گردید و خطای حل عددی محا سبه شد. پس از معرفی طرح مشابه یعنی گلایدر 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 شدهاست:

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

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

۳- کوچکتر شدن بال، اثر مثبت کمی روی سرعت پیشروی دارد. با توجه به کم بودن اثرات، به دلیل استحکام سازهای کافی برای بال، ابعاد بال گلایدر اسپری انتخاب می شود.

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

۵- با جابهجایی عمودی موقعیت بال، مجموع سرعت پیشروی در غوص و صعود کاهش مییابد، بنابراین مشابه گلایدر 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 گلایدر افزایش مییابد. ممکن است در زاویه تریم زیاد یا نیروی افزوده زیاد، مانورپذیری خوبی حاصل نشود. برای تعیین تریم استاتیکی و نیروی افزوده منا سب، نیاز است: الف) با توجه به مأموریت گلایدر، کارفرما یا کاربر، مانورپذیری مورد نیاز را مشخص کند ب) با توجه به جانمایی و تجهیزات گلایدر، محدودیت تریم استاتیکی تعیین گردد. Research in Ocean Engineering , vol. 3, no. 1, p. 25–31.

[v] 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.

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

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

[1.] 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.

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

[17] 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.

[1٣] 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.

[1[§]] 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.

[16] 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. ² Buoyancy propulsion systems ^r Spray ^{*}Argo ^a Ballast System ⁹ Smart float ^vFree-Form Deformation (FFD) ^ASurrogate-Based Optimization (SBO) ^Span **Aspect** Ratio 'Fineness Ratio STAR-CCM+ 12.02.010-R8 **Velocity** Inlet Pressure outlet 'Trimmer 'The Autonomous Underwater Glider "Spray" 'Surge

¹ Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)

'Heave 'Pitch

Glide Angle

۹- مراجع

[1] 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،.

[٣] 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.

[*] 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.

[Δ] 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 [19] Liu, H. L., & Huang, T. T. (1998). Summary of DARPA SUBOFF experimental program data. Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda Md Hydrodynamics Directorate.

[1Y] 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.

[\A] The Central and Northern California Ocean Observing System (CeNCOOS)- https://www.cencoos.org/observations/sensorplatforms/gliders/

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

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