

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1399.6.1.11.5](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1399.6.1.11.5)

تحلیل فرم بدنه یک سی‌گلايدر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش مدل

سید روح‌اله میرباقری^۱، حسین خانزادی^۲، کریم اکبری وکیل آبادی^{۳*}

mirbagheri7828@gmail.com

^۱ کارشناسی ارشد معماری کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

h.patriot6@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده فرماندهی و ناویری کشتی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

akbari.karim@gmail.com

^{۳*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۲۱

چکیده

امروزه از شناورهای خاص برای پایش شرایط محیطی زیر آب، بستر دریاها و اقیانوس‌ها استفاده می‌شود. این نوع شناورها به شکل‌های مختلف طراحی و استفاده می‌شود. یکی از انواع شناورها، شناور سی‌گلايدر است. فرم بدنه سی‌گلايدرها مبتنی بر الزامات عملیاتی و شرایط محیطی متفاوت است؛ طراحی آن‌ها طوری است که به دلیل نبود سیستم رانش پروانه‌ای مصرف انرژی بسیار کمی دارند؛ از این رو در مدت زمان طولانی می‌توانند مأموریت خود در زیر آب‌ها را انجام دهند. اغلب طراحی این گلايدرها طوری است که از یک سامانه شناوری، بالک‌های ثابت، اجرام متحرک داخلی، پمپ بالاست و یک سکان (بال هدایت) تشکیل شده است؛ بنابراین کنترل حرکتی رو به پایین و رو به بالا در این گلايدرها با تحرک اجرام داخلی اش به سمت جلو و عقب و حرکت عمودی اش (تغییر ارتفاع و عمق) از تغییر شناوری از منفی به مثبت و بالعکس صورت می‌گیرد. آنالیز عددی این گلايدرها به منظور درک بیشتر از کنترل حرکت و قابلیت مانور آن‌ها بسیار کاربردی و مهم است. در این مقاله به بررسی ضریب لیفت و درگ یک سی‌گلايدر، در زوایای حمله مختلف که بالک‌های ثابت در آن نقش اصلی را ایفا می‌کنند، پرداخته شده است. مطالعه این ضرایب و تغییرات آن‌ها که از اصلی‌ترین پارامترهای هیدرودینامیکی هستند، تأثیر بسزایی در نحوه بهبود عملکرد حرکتی و مانور گلايدرها دارند. گلايدر مورد مطالعه در این مقاله سی‌گلايدر است که شیوه عملکرد آن در زیر آب، با مدل هندسی در نرم‌افزار کتیا، مدل استاتیکی و آنالیز عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شد و در نهایت نتایج حاصل شده با آزمایش مدل در حوضچه کشش اعتبارسنجی شد. تحلیل‌ها در زوایای مختلف انجام شده است که در زاویه صفر درجه، حداکثر نقطه فشار یا نقطه سکون در نوک دماغه جلوی شناور ۳۰/۲ پاسکال است. کمترین فشار و حداکثر سرعت سیال در محل اتصال بالک‌ها به بدنه و انحنای آن اتفاق می‌افتد. میزان خطای نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی حدود ۳۰ درصد است که نسبت به مطالعات مشابه

منطقی است.

واژه‌های کلیدی: سی‌گلايدر، ضريب ليفت، ضريب درگ، حوضه کشش، سامانه شناوری.

۱. مقدمه

منابع عظیم و فراوان و باارزش موجود در دریاها انسان را به سوی اکتشاف هر چه بیشتر و منفعت بردن از آب‌های این کره خاکی سوق می‌دهد. اگرچه منابع آبی برای ما اهمیت خاصی دارند، اما برخی بلایای طبیعی مانند زلزله‌های بزرگ کف اقیانوس‌ها و سونامی‌ها نیز تأثیر بسزایی در زندگی ما دارند؛ بنابراین فعالیت‌های اقیانوسی باید پیوسته زیر نظر باشند تا از عواقب این گونه بلایا جلوگیری شود. بدین منظور یک وسیله زیر آبی^۱ مناسب باید ساخته و توسعه داده شود. از جمله این وسایل می‌توان به گلايدرهای زیر دریایی خودکار که تا به امروز ساخته شده‌اند؛ اشاره نمود. مانند اسلو کام^۲ سی گلايدر^۳، اسپری^۴ و دیپ گلايدر^۵ که با هدف کاربردهای اقیانوس‌شناسی ساخته شده‌اند. قانون ارشمیدس پایه و اساس تمام وسایل با نیروی شناوری بوده و بیان می‌کند که نیروی شناوری روی یک جسم مستغرق در یک سیال برابر با وزن سیال است که جسم جابه‌جا می‌کند [۱-۲].

در سال ۱۹۵۵، هنری استومل^۶ از مؤسسه اقیانوس‌شناسی وودز هول^۷ در بریتانیا ایده‌هایی برای شناورهای با شناوری خنثی داشت که قادر به رهایی آکوستیکی بودند. سوآلو^۸ اولین ابزار ساخته شده بدین شکل بود که دارای یک منبع آکوستیک ۱۰ کیلوهرتز بود که قابلیت رهایی از یک شناور سطحی را داشت. در دهه ۱۹۷۰، نسخه‌های مخابراتی با فرکانس‌های ۳-۴ کیلوهرتز، این قابلیت اکتشاف به شناورهای سطحی را تا برد ۵۰ کیلومتر می‌دادند. نسخه ۲۰۰ هرترزی نیاز به شناورهای سطحی را از میان برد.

در دهه ۱۹۹۰، راس دیویس^۹ و گروه همراه وی در مؤسسه اقیانوس‌شناسی اسکریپس^{۱۰} یک دستگاه شناوری متغیر را به یک شناور شناوری خنثی اضافه کرد. این شناورها (گشت‌زن‌های خودکار جریان لاگرانژی^{۱۱} نامیده شدند) قابلیت باد کردن یک بادشونده خارجی را داشتند، بنابراین

می‌توانستند حجم جابه‌جایی خود را بدون تغییر جرم تغییر دهند. تغییر نیروی شناوری ایجاد شده این امکان را به شناور می‌دهد تا موقعیت خود در ارتفاع‌های مختلف را تغییر دهد. در سطح آب، اطلاعات و موقعیت شناور با سیستم ماهواره آرگوس^{۱۲} تبادل می‌شود. تا سال ۲۰۰۰ میلادی، صدها مدل از این نوع شناور در دنیا به کار گرفته شد [۳-۴].

چند سال بعد یک مرکز تحقیقات دریایی که توسط تام کارتین هدایت می‌شد، سه گروه را تشکیل داد تا تحقیقات در مورد گلايدرهای خودکار زیر آبی را گسترش دهد. هر سه گروه با اهدافی مشترک به کار خود مشغول شدند:

۱. به اندازه کافی کوچک (به منظور هدایت دونفره)
۲. صرفه‌جویی در مخارج تا حد ممکن؛
۳. سرعت افقی حدود ۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه؛
۴. عملکرد متداوم تا یک سال؛
۵. موقعیت‌یابی GPS؛
۶. عملکرد بر اساس سنسورهای هدایت جریان، دما و چگالی.

سی‌گلايدر یادشده توسط دانشکده اقیانوس‌شناسی دانشگاه واشنگتن با همکاری آزمایشگاه فیزیک کاربردی طراحی شده و اکنون برای تولید انبوه به شرکت آی‌روبوت واگذار شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، نتایج آنالیزهای عددی به صورت خاص برای این سی‌گلايدر در دسترس نبود و نیاز شد که به کمک نرم‌افزار انسیس نسبت به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی آن اقدام نمود [۱]. در این مقاله، یک سی‌گلايدر مورد مطالعه قرار گرفته است که نحوه عملکرد آن در زیر آب، مدل هندسی در نرم‌افزار کتیا، مدل استاتیکی و آنالیز عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است و به صورت تجربی تأثیر ضریب لیفت و درگ بر بهبود عملکرد حرکتی و مانور گلايدر انجام شده است.

۲. ویژگی‌های سی‌گلايدر

۲-۱. عملکرد و تجهیزات داخلی

سی‌گلايدر شامل یک بدنه با پوشش فایبرگلاس است که بالک‌ها، سکان و آنتن به آن ملحق شده است (شکل ۱). برای دستیابی به بردهای مسافتی بالا نیاز به یک طراحی با بازدهی مناسب است. بدین منظور یک شناور با شکلی که نیروی درگی پایینی دارد مورد طراحی قرار گرفته، رانش آن با کنترل شناوری و تغییر جابه‌جایی^{۱۳} ایجاد شده است.



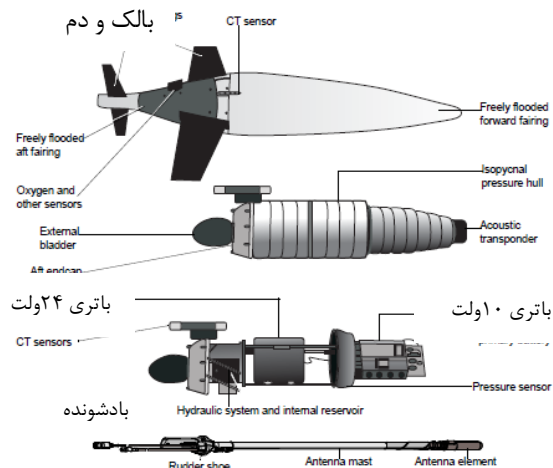
شکل ۱. سی‌گلايدر و اجزاء بیرونی آن شامل بالک‌ها، سکان و آنتن [۵].

برخلاف یک هواپیما، سی‌گلايدر هیچ گونه سطوح کنترل خارجی ندارد. شکل ۲ اجزاء داخلی شناور را نمایش می‌دهد. اغلب تجهیزات زیر درون بدنه گلايدر قرار گرفته‌اند:

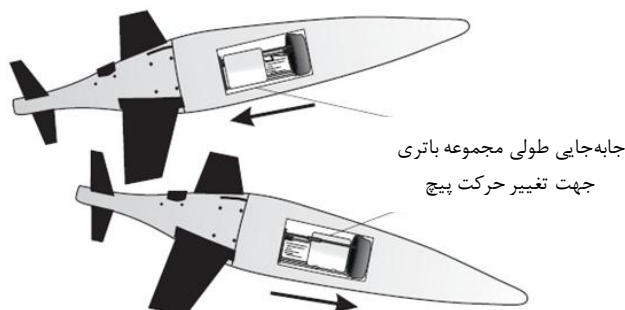
۱. انتقال‌دهند، جرم همراه با باتری اصلی لیتیوم 24 V-DC؛
۲. اجزاء داخلی مرتبط با سیستم هیدرولیک.
۳. مادربرد اصلی همراه با باتری لیتیوم 10 V-DC؛

باتری اصلی لیتیوم 24 VDC با انتقال‌دهنده جرم، مطابق شکل ۳ به سمت جلو و عقب حرکت می‌کند که باعث کنترل پیچ^{۱۴} شناور می‌شود. با توجه به تحرک سی‌گلايدر در عمق‌های زیاد بالک‌ها ثابت بوده و با حداکثر قطر یک متر بردار نیروی لیفت را ایجاد می‌کنند که متناسب با قرارگیری مرکز جرم^{۱۵} و مرکز شناوری^{۱۶} باعث حرکت رو به جلوی گلايدر می‌شوند. سکان‌ها پایداری یا^{۱۷} گلايدر را هم‌زمان که شناور به سمت جلو حرکت می‌کند فراهم می‌کنند. ابزار متغیر نیروی شناوری^{۱۸} (VBD)، یک سیستم هیدرولیک برای دستیابی به یک جابه‌جایی مشخص شناور با تغییر اندازه بادشونده^{۱۹} درون بدنه است (شکل ۴)، به گونه‌ای که بادشونده گفته شده به وسیله سیستم هیدرولیک با روغن پر و

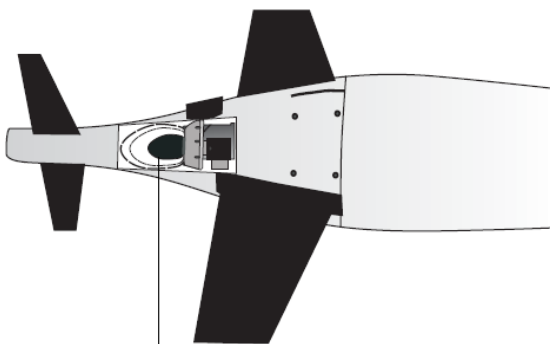
خالی می‌شود. با پمپ کردن روغن از مخزن ذخیره به درون بادشونده، شناوری گلايدر بیشتر شده و باعث حرکت افقی شناور به سمت بالا می‌شود. اما، با خالی کردن بادشونده از روغن نیروی عمودی وزن بر شناوری گلايدر غلبه کرده و باعث حرکت رو به پایین گلايدر می‌شود [۱]. هم‌چنین این باتری به منظور حرکت رول^{۲۰} شناور حول محور خودش نیز دوران می‌کند (شکل ۵).



شکل ۲. اجزاء داخلی و بیرونی سی‌گلايدر [۵].



شکل ۳. حرکت باتری اصلی به سمت عقب و جلو که به حرکت پیچ منجر می‌شود [۵].



بادشونده خارجی و سیستم هیدرولیک

شکل ۴. نمای کلی از سیستم متغیر شناوری [۶-۷].

۲-۲. طراحی هیدرودینامیک

سی گلايدر نیروی لیفت خود را از بدنه و بالک‌ها به دست می‌آورد، به گونه‌ای که نیروی عمودی حاصل از VBD را توسط بالک‌ها به حرکت روبه‌جلو تبدیل می‌کند. نیروی لیفت مضاعفی نیز اگرچه با مقدار کم هنگامی که گلايدر در حال چرخش است، به وسیلهٔ سکان‌ها ایجاد می‌شود.

فرم بدنهٔ طراحی شده با درگ پایین برای عملکرد سی گلايدر اساسی است. یک AUV موتور شناوری ۲۵ برای مقابله با نیروی هیدرودینامیکی درگ، حتی در سرعت‌های نسبتاً پایین انرژی مصرف می‌کند، هدف از طراحی گلايدر مورد مطالعه، یک بدنه با درگ پایین و اتصال بالک‌ها به آن است. بدنه متقارن و به اندازه کافی بلند بوده و به صورت آرام به شکل مخروطی و نوک تیز می‌شود.

سی گلايدرها برای جستجو در مسیرهای مختلف زیر آبی بایستی در سرعت برابر و یا بیشتر از میانگین سرعت جریان‌ات آبی ۲۶ حرکت کنند تا بتوانند موقعیت دلخواه خود را در آب حفظ کنند. این شناور به گونه‌ای طراحی شده که نیازها را در سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه برطرف می‌کند.

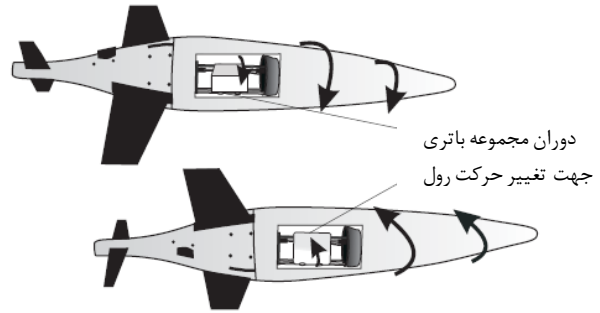
برد حرکت انتقالی گلايدر در زاویه حرکت با شیب θ نسبت به افق، برآیند نیروی لیفت و نیروی درگ با تجزیه‌برداری نیروی شناوری (مثبت به سمت بالا) متعادل می‌شوند [۴].

$$L = \rho l^2 \alpha a = -B \cos \theta \quad (1)$$

$$D = \rho l^2 \left(b q^{-\frac{1}{4}} + c \alpha^2 \right) = B \sin \theta$$

q فشار دینامیکی ۲۷ و برابر با $q = \rho/2(U^2 + W^2)$ که با چگالی آب ρ و سرعت‌های افقی و عمودی U و W و l طول بدنه تعریف می‌شود. نیروی لیفت متناسب با زاویهٔ حمله α است. زاویهٔ Pitch یا Φ با زاویه حرکت و زاویه حمله نسبت مستقیم دارند $\Phi = \alpha + \theta$. شیب حرکت ۲۸ از نسبت درگ به لیفت $\tan \theta = \frac{W}{U} = -\frac{D}{L}$ و نیروی شناوری برآیند لیفت و درگ است $B^2 = D^2 + L^2$ [۱].

ضرایب هیدرودینامیکی کمیت‌های بی‌بعدی به منظور محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی یک جسم درون سیال هستند. نیروهای هیدرودینامیکی شامل نیروهای لیفت و درگ هستند

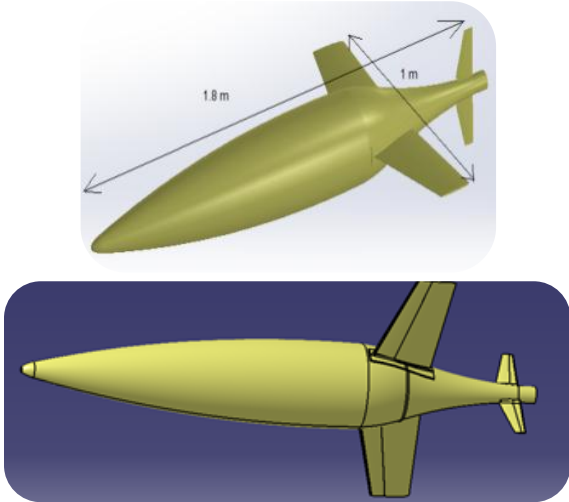


شکل ۵. دوران باتری اصلی حول محور مرکزی خودش که منجر به حرکت رول شناور می‌شود [۶-۷].

بر خلاف یک AUV^{۲۱} که عملکرد آن‌ها محدود به ساعت‌ها و ده‌ها کیلومتر است، یک شناور دارای موتور شناوری می‌تواند ماه‌ها یا بیش از یک سال با سرعت پایین هزاران کیلومتر را طی کند. چون نیروی درگ با مربع سرعت نسبت مستقیم دارد، انجام مأموریت‌ها با سرعت پایین باعث کاهش چشمگیر نیروی درگ می‌شود. بر خلاف گلايدرهای آیرودینامیکی^{۲۲}، سی گلايدرها با تغییر حجم جابه‌جایی خود با اختلاف کمی نسبت به آب دریا بالا و پایین می‌روند. به منظور پایین نگه داشتن هزینه‌ها و به آب‌اندازی و بازگرداندن شناور از قایق‌های کوچک، اندازه شناور طوری انتخاب شده که بتوان اجزاء اصلی آن شامل سیستم کنترل شناوری، یک پمپ فشار بالای کوچک^{۲۳} و باتری‌ها را به آسانی حمل کرد. پوشش سی گلايدر دارای ۱/۸ متر طول، قطر بالک ۱ متر، طول آنتن ۱/۴ متر و وزن شناور ۵۲ کیلوگرم است، بنابراین به آسانی توسط دو نفر قابل حمل می‌باشد.

سی گلايدر به صورت تناوبی به یک عمق قابل کنترل غوص و صعود می‌کند. در سطح آب دریا، شناور با زاویه ۴۵ درجه پیچ به سمت پایین می‌کند (سر خود را در داخل آب فرو می‌برد، به گونه‌ای که قسمت عقب و آنتن آن از آب بیرون می‌زند) تا اطلاعات GPS را دریافت، اطلاعات اندازه‌گیری شده را منتقل و دستورات را دریافت کند. با توجه به فاصله گلايدر تا موقعیت هدف، شناور شیب گلايدر^{۲۴} (دایو و صعود) را برای دستیابی به هدف مشخص می‌کند [۱].

مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار کتیا در شکل ۶ نمایش داده شده است. این مدل هندسی به منظور مطالعه جریان اطرافش و به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی به برنامه انسیس وارد می‌شود.



شکل ۶. مدل‌های طراحی شده در محیط نرم‌افزاری کتیا

مدل حل مسئله استفاده‌شده در این تحقیق، مدل مغشوش کی-اَپسیلون^{۳۳} است. مدل کی-اَپسیلون یک نوع مدل مغشوش ناویر استوکس^{۳۴} انسیس ۲۰۱۱ است. مدل‌های ناویر استوکس بهترین راه حل را به منظور حل کردن پیچیده‌ترین جریان‌های مغشوش ارائه می‌دهند. معادله‌های میدان جریان و شرح ریاضی مدل استاندارد توربولانسی $k-\epsilon$ به صورت زیر است:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \left(U_j - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{R_k} \nabla^2 k - G + \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \left(U_j - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{R_\epsilon} \nabla^2 \epsilon + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (5)$$

که در آن U_j معرف مؤلفه سرعت متوسط، P فشار و G عبارت تولیدکننده اغتشاش بوده و آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$G = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (6)$$

که در آن v_t ویسکوزیته ادی معروف است و به صورت زیر بیان می‌شود:

که در این تحقیق در زوایای حمله مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضرایب هیدرودینامیکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C = \frac{2F}{\rho v^2 A} \quad (2)$$

در معادله بالا، C ضریب لیفت یا درگ، F نیروی هیدرودینامیکی (لیفت یا درگ)، ρ چگالی سیال، v سرعت سیال و A مساحت سطح عمود بر جریان است.

در این تحقیق ضرایب هیدرودینامیکی ثابت نبوده و به متغیرهای مختلفی از جمله سرعت، موقعیت گلايدر در زوایای حمله مختلف و کمیت بی‌بعدی به نام عدد رینولدز^{۲۹} وابسته‌اند، عدد رینولدز به منظور پیش‌بینی الگوی جریان (مانند لایه‌ای مغشوش بودن) مورد استفاده قرار می‌گیرد و به عنوان نسبتی از نیروی اینرسی بر نیروی ویسکوز تعریف می‌شود.

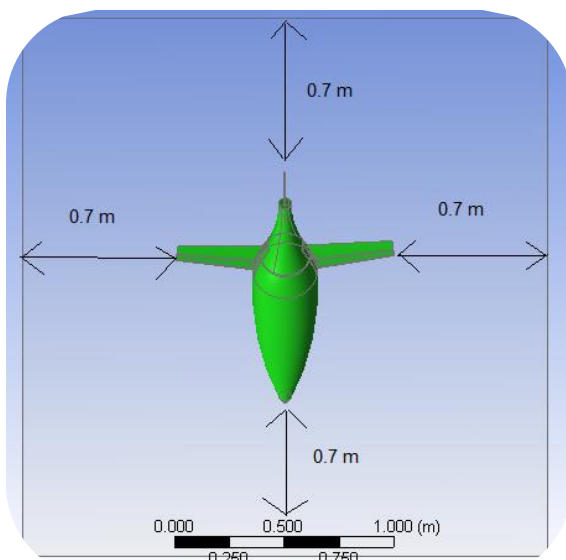
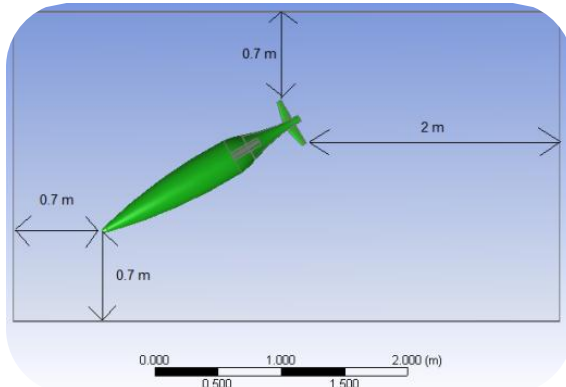
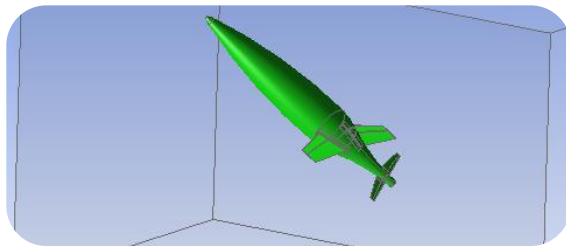
$$Re = \frac{\text{Inertial force}}{\text{Viscous force}} = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (3)$$

به طوری که v سرعت سیال، L طول طی شده با سیال، μ لزجت دینامیکی و ν لزجت سینماتیکی است.

جریان‌های مغشوش در عدد رینولدزهای بالا اتفاق می‌افتد، طوری که نیروهای اینرسی باعث ایجاد تشکیل گردابه‌ها و جدایش جریان می‌شوند. در این تحقیق با توجه به سرعت جریان ۰/۲۵ متر بر ثانیه و طول ۱/۸ متر و لزجت سینماتیکی آب که 10^{-6} است، عدد رینولدز برابر با 5×10^5 است.

بنابراین عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ است که بتوان جریان را از نوع مغشوش در نظر گرفت. معمولاً عدد رینولدزهای بیشتر از 10^5 را به صورت مغشوش^{۳۰} و کمتر از آن را لایه‌ای^{۳۱} در نظر می‌گیرند. ضرایب هیدرودینامیکی به نقطه جدایش جریان^{۳۲} وابسته است. نقطه جدایش جریان محلی است که شکل جریان از حالت لایه‌ای به حالت مغشوش تغییر شکل پیدا می‌کند که در این تحقیق پشت بالک‌ها در زوایای حمله بالا اتفاق می‌افتد. این امر ثابت شده که جدایش جریان به افزایش نیروی درگ و کاهش یا افزایش نیروی لیفت منجر می‌شود.

اتفاق می افتد.



شکل ۷. مدل هندسی سی گلايدر، ابعاد محیط تعریف شده، با زاویه حمله ۳۰ درجه و محیط تعریف شده اطراف آن در نرم افزار انسیس ژئومتری

۳-۲. شبکه بندی ۳۷ محیط و شرایط مرزی

از جمله نکات حل مسائل CFD دقت حل مسئله در مدت زمان معقول است. به این منظور انتخاب مناسب و بهینه اندازه و نوع شبکه ها در دقت جواب و مدت زمان حل مسئله تأثیر مستقیم می گذارد. شبکه های با اندازه کوچک تر حل دقیق تر اما با مدت زمان بیشتری را ارائه می دهند، درعین حال شبکه های بزرگ تر در مدت زمان کوتاه تر جواب نادرست را نتیجه می دهند.

$$v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (۷)$$

ارتباط بین تنش رینولدز $\overline{u_i u_j}$ ؛ انرژی جنبشی اغتشاش k و اتلاف اغتشاش ε و ویسکوزیته ادی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$-\overline{u_i u_j} = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (۸)$$

مقادیر ضرایب ثابت C_μ ؛ C_μ ؛ C_μ ؛ σ_k و σ_k به ترتیب برابر با 0.09، 1.44، 1.92، 1.0 و 1.3 است. ویسکوزیته مؤثر R_k و R_ε از روابط زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{R_k} = \left(\frac{1}{Re} \right) + (v_t + \sigma_k) \quad (۹)$$

$$\frac{1}{R_\varepsilon} = \left(\frac{1}{Re} \right) + (v_t + \sigma_k) \quad (۱۰)$$

این نوع از مدل ها مسئله را با حل دو معادله انتقالی^{۳۵} ساده سازی می کنند و از لزجت توربولانسی برای محاسبه تنش های رینولدزی^{۳۶} استفاده می کنند. مدل استاندارد کی - اپسیلون در نرم افزار انسیس فلوئنت به یکی از ارکان اصلی حل مسائل پیچیده مهندسی تبدیل شده است.

۳. مدل سازی عددی

۳-۱. تعریف هندسه

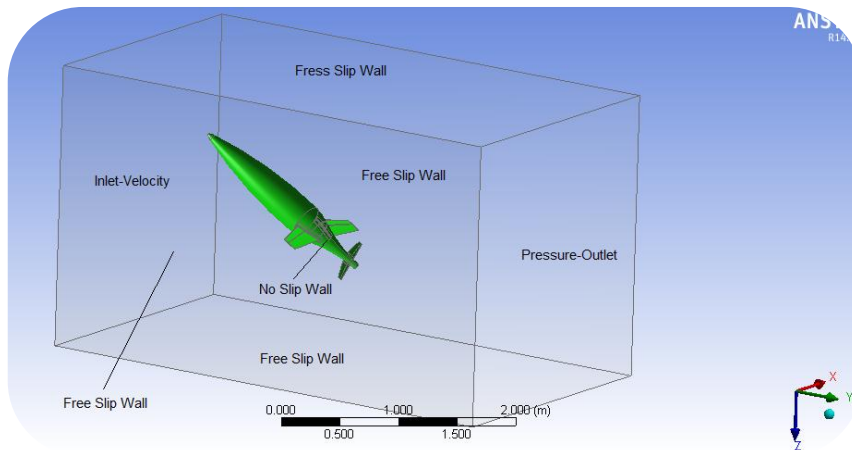
مدل سی گلايدر در محیط نرم افزاری کتیا با ابعاد موردنظر حداکثر طول ۱/۸ متر (بدون آنتن)، حداکثر قطر بدنه ۰/۳ متر و حداکثر فاصله ۱ متر بین دو سر بالک ها طراحی شده است. مدل طراحی شده به صورت فایل با پسوند .igs به محیط نرم افزاری هندسه انسیس وارد شده تا محدوده اطراف شناور و ابعاد آن تعریف شود. شکل ۷ نمونه ای از مدل سی گلايدر با زاویه حمله ۳۰ درجه و محیط اطراف آن را با ابعاد مورد نظر نمایش می دهند.

ابعاد محیط اطراف به گونه ای طراحی شده اند که از هر نقطه انتهایی شناور ۰/۷ متر تا دیواره محیط فاصله دارد، به غیر از نقطه انتهایی آن در راستای Y که تا دیواره عقب ۲ متر فاصله دارد. علت این افزایش فاصله، مطالعه دقیق تر و مفهومی تر جریان سیال در پشت شناور است، زیرا در ناحیه پشت شناور است که جدایش جریانات اصلی و اختلافات فشار و سرعت

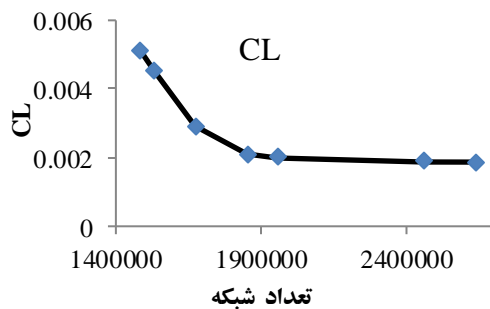
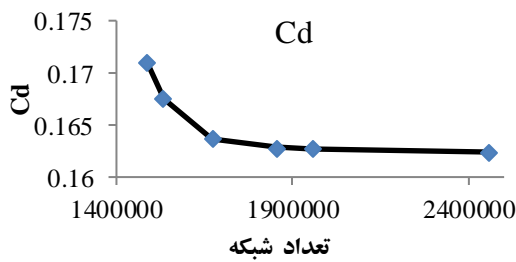
شرایط مرزی نیز؛ دیواره روبروی گلايدر و نزدیک‌تر به آن دارای سرعت ثابت ورودی در نظر گرفته شده است. دیواره پشت شناور با فاصله دورتر Pressure outlet است. دیواره‌های اطراف از نوع Free Slip هستند. بدنه شناور از نوع No Slip است.

جریان مغشوش در داخل لایه مرزی با توابع دیواره تخمین زده می‌شود. این توابع بر مبنای روابط تجربی به دست آمده‌اند. برای قابل قبول بودن استفاده از این توابع باید کمیت بی‌بعد Y^+ بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ باشد [۹]. مقدار متوسط Y^+ روی مدل تقریباً برابر ۵۰ است.

در تحلیل‌های انجام‌شده، جریان سیال در اطراف بدنه به صورت غیر قابل تراکم، ویسکوز، مغشوش و دائم در نظر گرفته شده است و برای شبیه‌سازی جریان متلاطم، از معادله‌های رنژ و مدل توربولانسی k-ε و برای ترم‌های روش حجم سیال استفاده شده است و برای تقریب ترم‌های معادله‌های ناویر استوکس از مرتبه دوم استفاده شده است. با در نظر گرفتن نقطه محاسباتی در مرکز هر سلول، همه متغیرهای میدان در این نقطه محاسبه می‌شود که این روش باعث مستقل شدن میدان سرعت و فشار از یکدیگر می‌شود که برای حل این مشکل از الگوریتم میانبایی ریوچاو استفاده می‌شود [۸]. از الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده شده است.



شکل ۸ سی‌گلايدر در زاویه حمله ۳۰ درجه و شرایط مرزی اطرافش



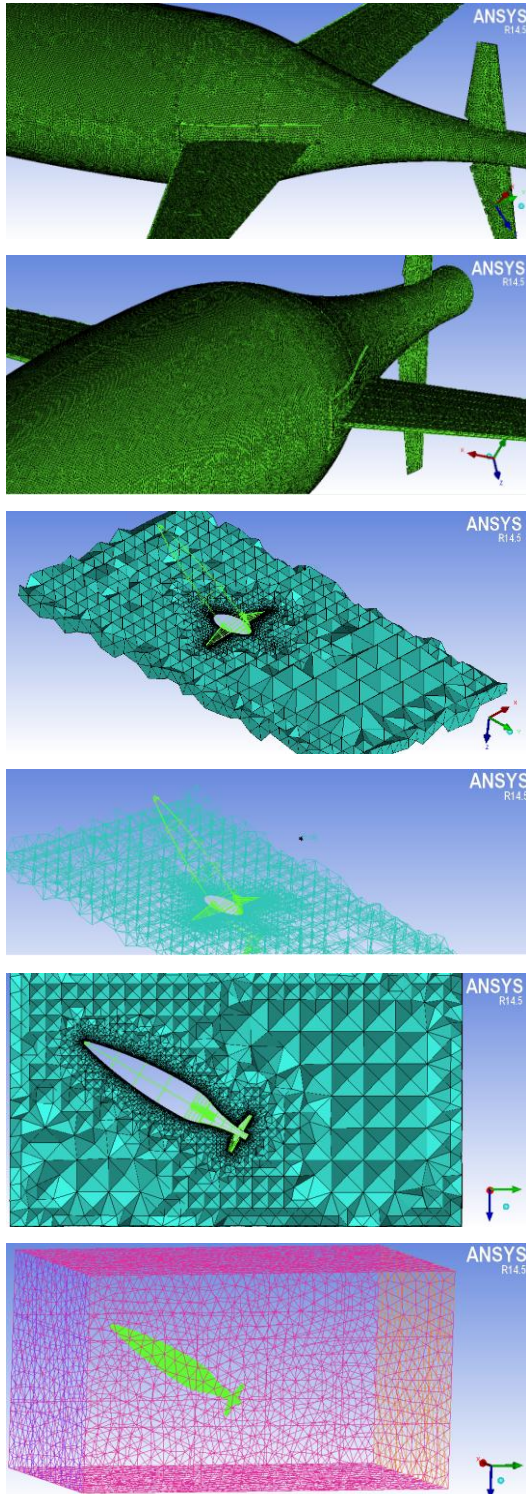
نمودار ۱. استقلال شبکه

برای این که بتوان نسبت به نتایج به دست آمده اطمینان خوبی داشت از شبکه‌بندی مناسب استفاده شد. در مقدار شبکه مورد استفاده تعداد المان‌ها برابر با ۱۸۵۳۵۶۸ عدد است که نمودار استقلال از مش آن در نمودار ۱ نشان داده شده است.

شبکه‌ها روی سطح شناور و در نزدیکی آن‌ها به مراتب کوچک‌تر از شبکه‌های اطراف شناور و دورتر از آن هستند. علت این نوع از شبکه‌بندی، مطالعه دقیق‌تر جریان‌ات آب حول بدنه برای به دست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی است. در جدول ۱ تعداد کیس‌های مش‌بندی و مقایسه بین ضرایب درگ و لیفت انجام شده است.

ضخامت لایه مرزی نکته مهمی است که در شبکه بندی نیاز است رعایت شود که به صورت تابعی از طول سی گلايدر، و عدد بی بعد رینولدز از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\delta = 0.035L(Re)^{-\frac{1}{7}} \quad (12)$$



شکل ۹. نمونه ای از شبکه بندی سطحی، حجمی و مرزهای اطراف گلايدر روی بدنه سی گلايدر

جدول ۱: تعداد کیس های مش بندی و ضرایب لیفت و درگ متناظر با آن

ضریب درگ	ضریب لیفت	تعداد مش
۰/۱۷۱۱۳۴	۰/۰۰۵۱۷۲	۱۴۸۵۶۸۴
۰/۱۶۷۵۴۶	۰/۰۰۴۴۰۲	۱۵۳۲۶۶۷
۰/۱۶۳۷۱۱	۰/۰۰۲۸۰۵	۱۶۴۷۵۳۴
۰/۱۶۲۷۲۲	۰/۰۰۲۰۴۱	۱۸۵۳۵۶۸
۰/۱۶۲۷۲۲	۰/۰۰۱۹۸۷	۱۹۸۵۶۴۳
۰/۱۶۲۳۵۱	۰/۰۰۱۸۹۲	۲۴۸۵۱۷۹

بنابراین با توجه به جدول ۱؛ تعداد مش استفاده شده (۱۸۵۳۵۶۸) برای اینکه هم دقت خوب و هم هزینه محاسباتی کمتری وجود داشته باشد؛ منطقی است. در این تحقیق از نرم افزار ANSYS ICEM برای شبکه بندی استفاده شده است که نوع شبکه بندی در شکل ۹ نشان داده شده است. تولید شبکه در ماژول ICEM که در داخل نرم افزار انسیس قرار دارد؛ صورت گرفته و قابلیت تولید شبکه های با سازمان بی سازمان، منشوری یا ترکیبی از آن ها را برای هندسه های سه بعدی دارد. هنگام انتخاب نوع شبکه ملاحظات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. سادگی تولید شبکه؛
۲. هزینه محاسباتی.

در این تحقیق از شبکه های بی سازمان برای کاهش زمان تولید و حل شبکه استفاده شده است. ویژگی اصلی این نوع شبکه بندی این است که برای هندسه های پیچیده به راحتی قابل پیاده سازی است. مزیت دیگر شبکه های بی سازمان، قابلیت انجام سریع عمل تطبیق و بهینه سازی شبکه است.

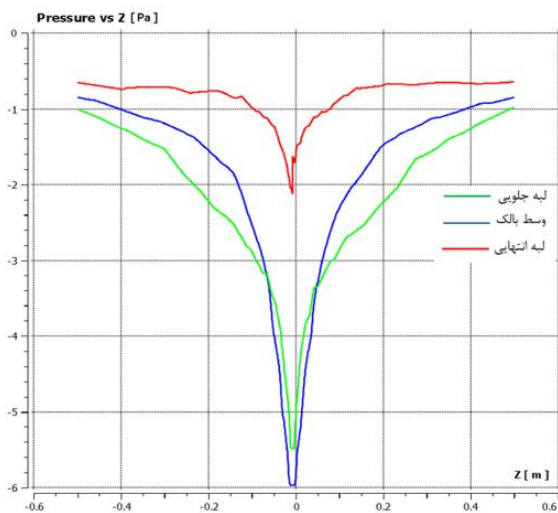
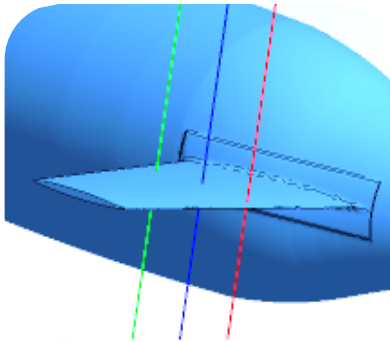
فاصله اولین گره تا سطح، Δy ، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\Delta y = Ly^+ \sqrt{74} (Re_L)^{-13/14} \quad (11)$$

هرچند این رابطه برای صفحات تخت کاربرد دارد ولی می تواند برای شبکه بندی سطوح دارای انحنا نیز استفاده شود.

۴-۱. زاویه حمله صفر درجه

به علت متقارن بودن شکل بدنه سی‌گلايدر، حداقل مقدار ضرایب لیفت و درگ به دست آمده در این زاویه است. با توجه به شکل ۱۰ و کانتور فشار، حداکثر نقطه فشار یا نقطه سکون^{۴۰} در نوک دماغه جلوی شناور به رنگ قرمز بوده و مقدار آن ۳۰/۲ پاسکال است. کمترین فشار و حداکثر سرعت سیال در محل اتصال بالک‌ها به بدنه و انحنای آن اتفاق می‌افتد. به منظور مطالعه و مقایسه فشار در اطراف بال در زوایای حمله مختلف، سه خط از میان بال با فاصله عرضی ثابت ۲۵ سانتی‌متر از محور طولی شناور ترسیم شده‌اند، سپس نمودار فشار در راستای این خطوط به منظور مطالعه فشار بالا و پایین بالک‌ها ترسیم شده است.

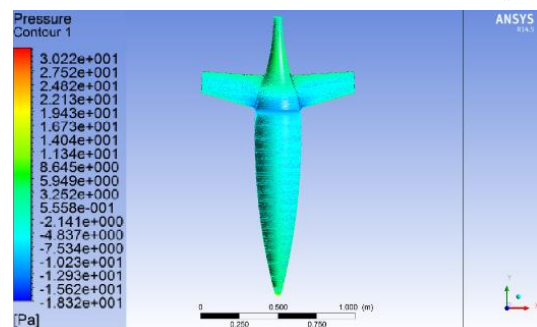
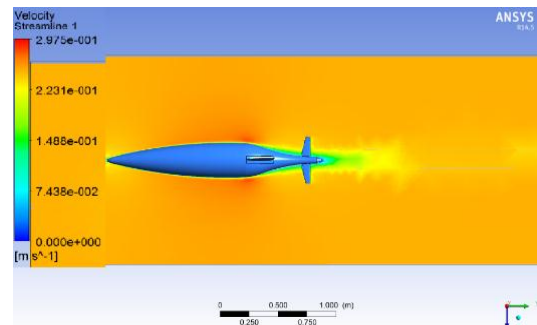
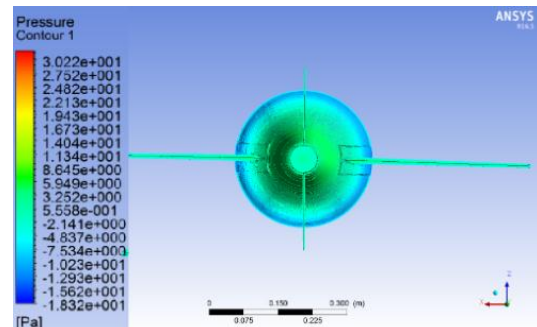
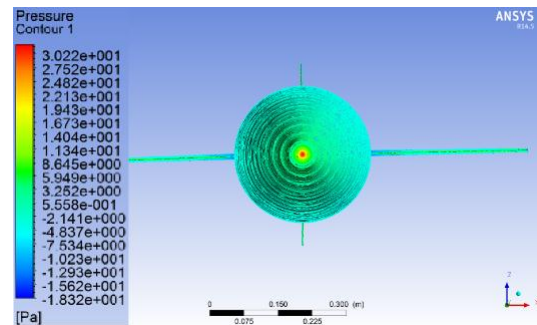


شکل ۱۱. خطوط ترسیم شده و نمودار فشار از میان بالک با فاصله ۲۵ سانتی‌متری از محور مرکزی شناور در زاویه حمله صفر درجه

با توجه به نمودار شکل ۱۱، زاویه حمله صفر درجه و متقارن بودن بدنه، اختلاف فشار ایجاد شده بین بالا و پایین بالک‌ها برابر بوده و نیروی لیفتی حاصل از آن تقریباً صفر است.

۴. بحث و تفسیر نتایج

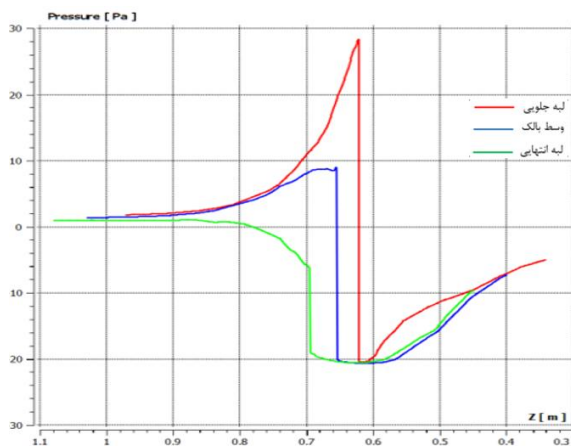
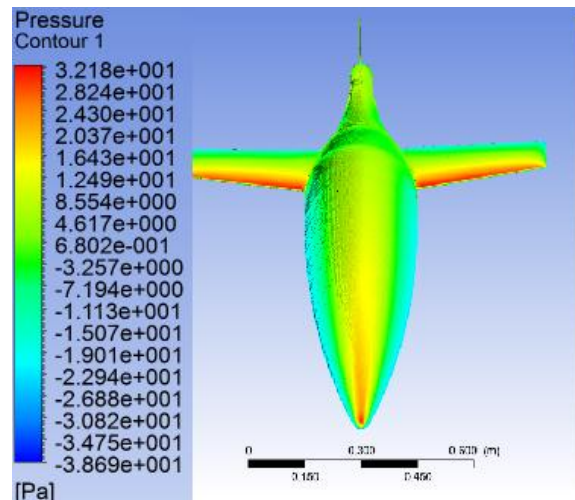
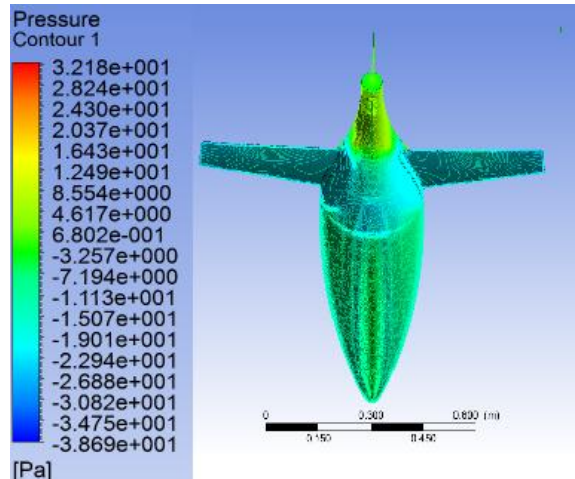
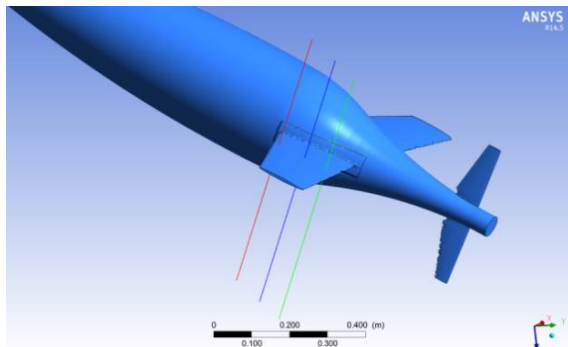
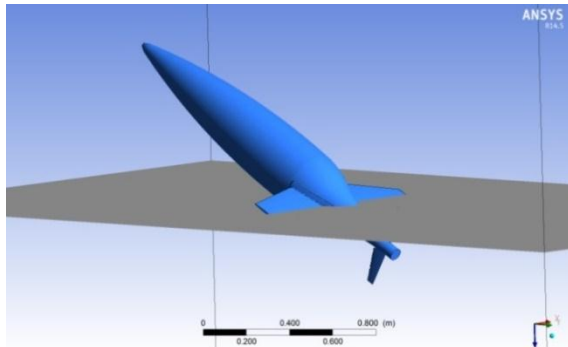
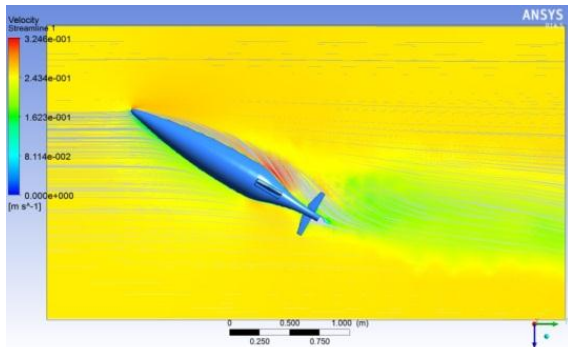
ضرایب هیدرودینامیکی لیفت و درگ، نمودارهای خطوط جریان^{۳۸} و کانتورهای فشار^{۳۹} مختلف و تحلیل آن‌ها در زوایای حمله مختلف در ادامه آمده است. زوایای حمله با توجه به شرایط از پیش تعیین شده و عملکرد سی‌گلايدر بین ۰ تا ۴۵ درجه است، که نتایج در بعضی از زوایا در ادامه آمده است.



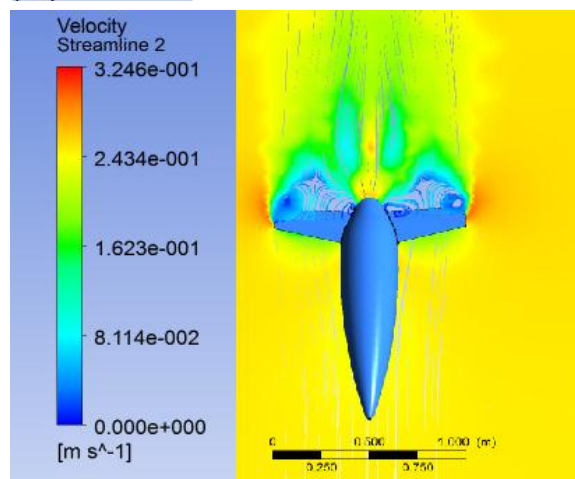
شکل ۱۰. خطوط جریان اطراف بدنه شناور و نمایی از کانتور فشار روی بدنه شناور از نمای روبه‌رو و انتها در زاویه صفر درجه

۴-۲. زاویه حمله ۳۰ درجه

در این زاویه و مطابق با کانتور فشار مناطق پرفشار در زیر بدنه و بالک ها افزایش یافته است. برای بررسی خطوط جریان روی بالک ها یک صفحه افقی مطابق شکل عبور می دهیم. همان گونه که در شکل مشاهده می شود؛ جدایش جریان در سطح رویی بال اتفاق افتاده که به کاهش نیروی لیفت نسبت به زاویه ۲۵ درجه منجر خواهد شد.



شکل ۱۲. خطوط جریان اطراف بدنه شناور، کانتور فشار، خطوط ترسیم شده از میان بالک و نمودار فشار در راستای خطوط ترسیم شده (۳۰ درجه و سرعت ۲۵ متر بر ثانیه)



۱.۵ اعتبارسنجی و آزمایش مدل

۱-۵. ساخت مدل

پس از طراحی فرم بدنه سی‌گلايدر در نرم‌افزار کتیا و استخراج نقشه‌های ساخت اقدام به ساخت مدل در مقیاس ۱/۳ به صورت زیر شد.

(الف) ساخت بدنه و بالک‌ها از جنس چوب به کمک دستگاه تراش؛

(ب) قالب‌گیری از فرم چوبی برای ساخت مدل فایبرگلاس؛

(ج) ساخت بدنه فایبرگلاس؛

(د) سیستم توزیع وزن و رسیدن به حالت برابری نیروهای وزن و شناوری.

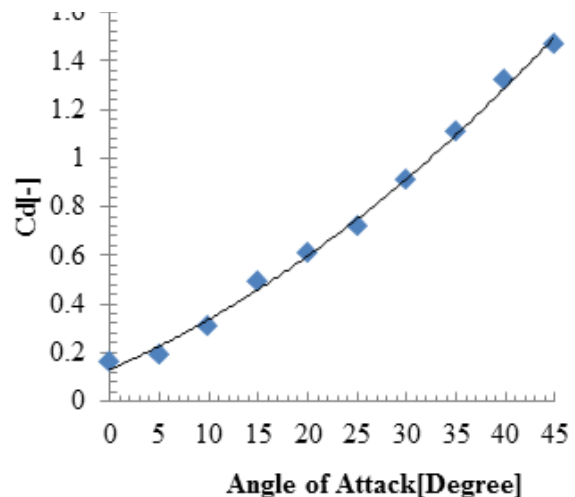
برای از بین بردن نیروی وزن و به حداقل رسانیدن تأثیرات آن بر دینامومتر ارابه حوضچه کشش، یک استند سراسری در مرکز مدل به کار گرفته شد که بتوان با جابه‌جایی وزنه‌های تعادلی به وزن و شناوری مطلوب رسید. وزن آب جابه‌جایی برابر ۲/۵۴ کیلوگرم به دست آمد که با استفاده از وزنه‌ها و تست‌های مختلف در آب به حالت شناوری خثی (بی‌وزنی در آب) و غوطه‌ور درآمد. مراحل انجام کار در شکل ۱۳ دیده می‌شود.



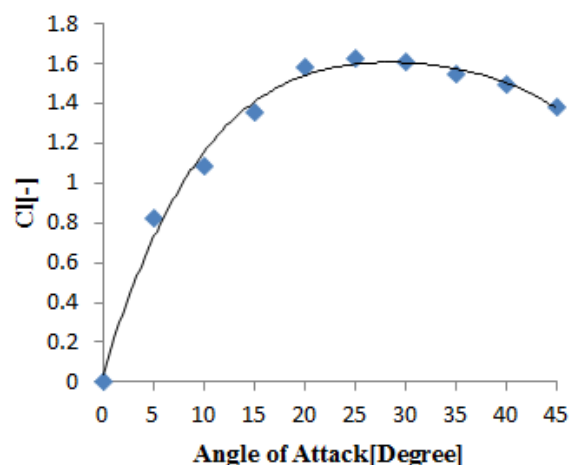
شکل ۱۳. مکانیزم توزیع وزن، وزنه‌های سربی متعادل‌کننده و جابه‌جایی وزنه‌ها تا رسیدن به حالت بی‌وزنی در آب

۳-۴. نتایج به دست آمده از ضرایب لیفت و درگ در زوایای حمله مختلف

به منظور بررسی تغییرات ضرایب لیفت و درگ در زوایای حمله مختلف اقدام به استخراج نمودارهای آن می‌کنیم. مطابق نمودار ۲ با افزایش زاویه حمله و زیاد شدن سطح مقطع مقابل جریان به تدریج ضریب پسا افزایش یافته و در زاویه حمله ۴۵ درجه به حداکثر مقدار خود (۱/۵) می‌رسد. در نمودار ۳ با افزایش زاویه حمله ضریب برآ افزایش یافته و در زاویه ۲۵ درجه به حداکثر مقدار خود یعنی (۱/۶) رسیده و پس از آن با افزایش زاویه ضریب برآ حمله کاهش می‌یابد، که این زاویه همان زاویه استال یا واماندگی است.



نمودار ۲. تغییرات ضریب درگ در زوایای حمله مختلف



نمودار ۳. تغییرات ضریب لیفت در زوایای حمله مختلف

(ب) زاویه حمله ۱۰ درجه

در این زاویه نیروی درگ افزایش می‌یابد. در ابتدای حرکت نیروی درگ زیاد بوده و در بازه زمانی ۶۵ تا ۱۱۵ ثانیه این نیرو تقریباً ثابت شده که با میانگین گرفتن در این دامنه مقدار نیرو برابر ۸۵ گرم (۰/۸۳۳ نیوتن) می‌شود.



شکل ۱۴. حوضچه کشش دانشگاه دریایی امام خمینی نوشهر و نصب مدل روی ارابه

◀ آزمایش مدل در حوضچه کشش دانشگاه دریایی

امام خمینی (ره) نوشهر

مشخصات حوضچه:

طول: ۳۸ متر

عرض: ۳ متر

عمق: ۱/۲ متر

حداکثر سرعت مدل: ۵ متر بر ثانیه

آزمایش مدل در حوضچه کشش:

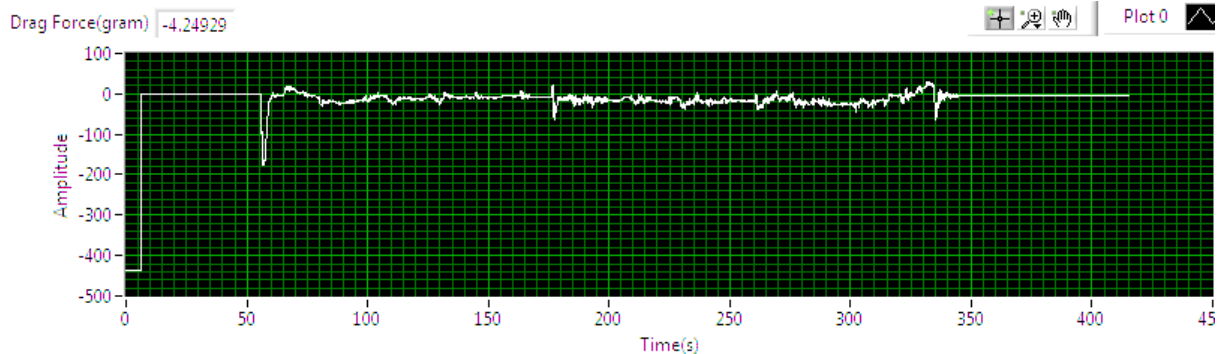
پس از آماده سازی مدل و ساخت میله رابط برای اتصال به ارابه برابر شکل ۱۴ اقدام به نصب آن روی دینامومتر شد.

در این آزمایش به علت سرعت پایین سی گلايدر و مقیاس ۱/۳ مدل می‌توان از تشابه رینولدز استفاده کرد. با توجه به سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه سی گلايدر با سه برابر کردن سرعت مدل تشابه رینولدز برقرار خواهد شد. بنابراین سرعت ارابه را بر روی ۰/۷۵ متر بر ثانیه تنظیم می‌کنیم.

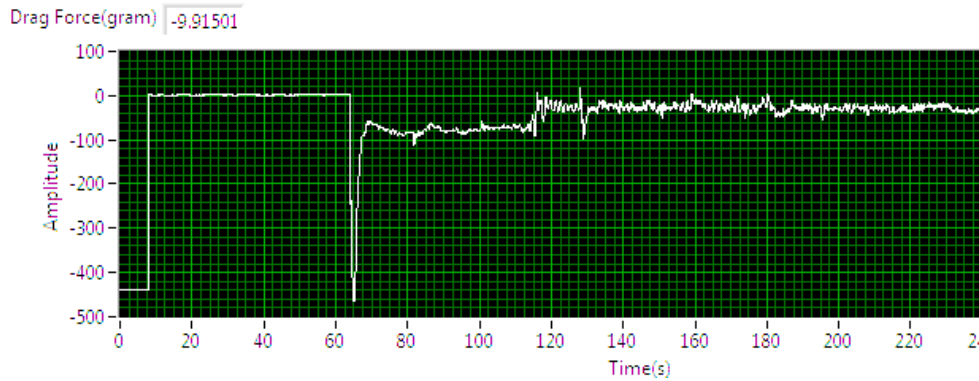
◀ استخراج ضریب درگ در زوایای حمله مختلف:

(الف) زاویه حمله صفر درجه:

در این زاویه انتظار کمترین میزان نیروی درگ را خواهیم داشت. مطابق گراف شکل ۱۵ در ابتدای حرکت نیروی درگ زیاد بوده و پس از ثابت شدن سرعت، نیروی درگ تقریباً ثابت می‌شود. با میانگین گرفتن نیروها این مقدار برابر ۳۰ گرم (۰/۲۹۴ نیوتن) می‌شود.



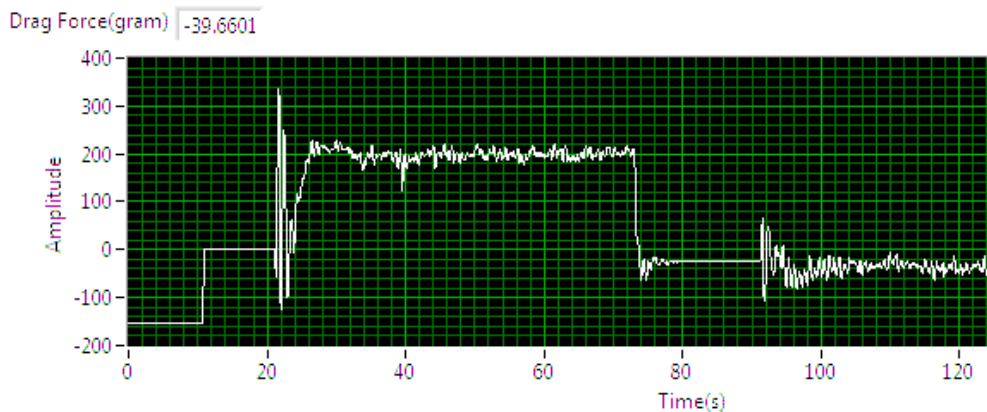
شکل ۱۵. گراف نیروی درگ در زاویه صفر درجه



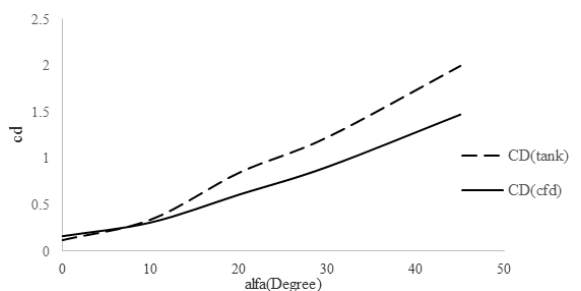
شکل ۱۶. گراف نیروی درگ در زاویه ۱۰ درجه

مقدار آن ثابت شده که با میانگین گیری برابر ۲۱۰ گرم (۲/۰۵۸ نیوتن می‌شود)

(ج) زاویه حمله ۲۰ درجه
در این زاویه با افزایش سطح مقطع عرضی مقابل جریان نیروی درگ خیلی بیشتر شده و در بازه زمانی ۳۰ تا ۷۵ ثانیه



شکل ۱۷. گراف نیروی درگ در زاویه ۲۰ درجه



نمودار ۴. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

جدول ۲. درصد خطای نتایج عددی در مقایسه با نتایج تجربی

درصد خطا	زاویه حمله
۳	۰
۸	۱۰
۱۵	۲۰
۲۰	۳۰
۲۳	۴۰
۲۵	۴۵

۵. مقایسه نتایج عددی و حوضچه کشش

برای مقایسه نتایج عددی به دست آمده و نتایج آزمایش مدل در حوضچه کشش ضرایب درگ به دست آمده را مقایسه می‌کنیم. مطابق نمودار ۴ در زوایای حمله کوچک و تا زاویه حمله ۱۰ درجه نتایج مشابه است، ولی با افزایش زاویه حمله مقادیر به دست آمده در حوضچه بیشتر از مقادیر عددی است. پدیده‌هایی مانند اثر دیواره‌ها و کف و اثر مقیاس Re رفتارها و اثرات موضعی هیدرودینامیکی نیز بر دقت نتایج آزمایش تأثیرگذار هستند. همچنین میله رابط مدل و دینامومتر بر افزایش نیروی مقاومت تأثیرگذار خواهد بود.

میزان خطای بین نتایج تجربی و عددی در جدول ۲ آورده شده است.

۱۰ تا ۲۵ درجه بوده که در این بازه مایشتترین نیروی لیفت و کمترین نیروی درگ را خواهیم داشت.

۴. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نتیجه می‌گیریم که در مراحل اولیه طراحی، استفاده از نتایج عددی می‌تواند جایگزین آزمایش‌های پرهزینه آزمایشگاهی شود.

۵. در خصوص منحنی موج تولیدی در سطح تطابق خوبی بین نتایج تحلیل و آزمایش مشاهده و مشخص شده که بازو در ناحیه نزدیک مدل، اثری در تغییرات شکل سطح آزاد ندارد. در فواصل دورتر از بدنه به علت وجود اثر بازو و بازتاب امواج از دیواره حوضچه شکل سطح آزاد کاملاً تغییر یافته و در این ناحیه بین نتایج آزمایش و تحلیل اختلاف کمی مشاهده می‌شود.

مراجع

- [1] Eriksen CC, Osse TJ, Light RD, Wen T, Lehman TW, Sabin PL, et al. Seaglider: A long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *IEEE Journal of oceanic Engineering*. 2001;26(4):424-36.
- [2] Sherman J, Davis RE, Owens W, Valdes J. The autonomous underwater glider "Spray". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2001;26(4):437-46.
- [3] Davis RE. Preliminary results from directly measuring middepth circulation in the tropical and South Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1998;103(C11):24619-39.
- [4] Davis RE, Eriksen CC, Jones CP. Autonomous buoyancy-driven underwater gliders. The technology and applications of autonomous underwater vehicles. 2002:37-58.
- [5] Bracken L, Dinicola D, Kastler J, Beresford S. Technological Advances in Ocean Sciences Resulting from the Deepwater Horizon Oil Spill. Research Resulting from the 2010 Deepwater Horizon Oil Spill. 2019:33.
- [6] Techy L, Tomokiyo R, Quenzer J, Beauchamp T, Morgansen K. Full-scale wind tunnel study of the seaglider underwater glider. Technical report: University of Washington, Aeronautics & Astronautics; 2010.
- [7] Tyagi A, Sen D. Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. *Ocean Engineering*. 2006;33(5-6):798-809.

با افزایش زاویه حمله؛ سطح مقطع عرضی مقابل جریان بیشتر می‌شود و گردابه‌های تشکیل شده زیاد می‌شود. بنابراین مدل جریان در نرم‌افزار پیچیده‌تر می‌شود و با تقریب‌هایی که برای حل معادله‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ باعث افزایش خطا می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

طراحی این گلایدرها به صورتی است که از یک سامانه شناوری، بالک‌های ثابت، اجرام متحرک داخلی، پمپ بالاست و یک سکان (بال هدایت) تشکیل شده است. بنابراین کنترل حرکتی رو به پایین و رو به بالای این گلایدرها با تحرک اجرام داخلی اش به سمت جلو و عقب و حرکت عمودی آن (تغییر ارتفاع و عمق) از تغییر شناوری از منفی به مثبت و بالعکس صورت می‌گیرد. در این مقاله به بررسی تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی یعنی ضریب پسا (مقاومت آب) و ضریب برآ (بالارونده) در زوایای حمله مختلف که بالک‌های ثابت در آن نقش اصلی را ایفا می‌کنند، پرداخته شده است و نتیجه تحلیل‌ها به صورت زیر است:

۱. در مسیر طراحی شناورهای زیرسطحی لازم است که مقادیر نیروها و گشتاورهای وارد شده از سوی سیال بر شناور مشخص باشد و یکی از فاکتورهای مهم طراحی این نوع شناورها رسیدن به بازدهی بالا در راستای مانورپذیری بهتر و کمترین مصرف انرژی است. بنابراین با توجه به این شرایط، معمول و متعارف آن است که ضرایب پسا و برآ را محاسبه و نسبت به زاویه حمله مقایسه می‌کنند. این موضوع در طراحی سیستم رانش، کنترل و تنظیم پارامترهای پایداری مطلوب خواهد بود.
۲. حداکثر نقطه فشار یا سکون در نوک دماغه جلوی شناور بوده و مقدار آن $30/2$ پاسکال است. کمترین فشار و حداکثر سرعت سیال در محل اتصال بالک‌ها به بدنه و انحنای آن اتفاق می‌افتد.

۳. با توجه به نمودارهای تغییر ضرایب لیفت و درگ بهترین عملکرد و زاویه حرکت گلایدر در زاویه حمله

32. Separation Point
33. $k - \varepsilon$ Turbulent Model
34. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)
35. Transport Equations
36. Reynolds Stresses
37. Mesh
38. Streamline
39. Pressure Contour
40. Stagnation Point
41. Scale effect

- [8] Rhie C, Chow WL. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. AIAA journal. 1983;21(11):1525-32.
- [9] Wilson-Haffenden S, Renilson M, Ranmuthugala D, Dawson E, editors. An investigation into the wave making resistance of a submarine travelling below the free surface. International Maritime Conference 2010: Maritime Industry-Challenges, Opportunities and Imperatives, 27-29 January 2010, Sydney, Australia; 2010: Engineers Australia.

پی‌نوشت‌ها

1. Underwater Vehicle
2. slucum
3. Sea Glider
4. Spray
5. Deep Glider
6. Henry Stommel
7. Woods Hole Oceanographic Institution
8. Swallow
9. Russ Davis
10. Scripps Institution of Oceanography
11. Autonomous Lagrangian Current Explorers
12. ARGOS satellite
13. Displacement
14. Pitch
15. Center of Gravity
16. Center of Buoyancy
17. Yaw
18. Variable Buoyancy Device
19. Bladder
20. Roll
21. Autonomous Underwater Vehicle
22. Aerodynamic (Sailplanes)
23. High-Pressure Pump
24. Glide Slope
25. buoyancy-powered
26. Current
27. Dynamic Pressure
28. Glide Slope
29. Reynolds Number
30. Turbulent
31. Laminar