

(مقاله پژوهشی)

تحلیل هیدرودینامیکی بدنه متحرک زیرسطحی خورشیدی به روش عددی

احسان اسدی اسرمی^۱، محمد مونسان^۲

m.moonesun@gmail.com

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی از دانشگاه آزاد واحد تاکستان

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

متحرک‌های بی‌سرنشین زیرسطحی (AUVها) خورشیدی از صفحات خورشیدی برای تأمین انرژی خود استفاده می‌کنند. از آنجا که محدودیت انرژی و توان در AUV خورشیدی بسیار مهم و حیاتی است تخمین دقیق مقاومت هیدرودینامیکی و توان مهم است. در این مقاله، محاسبات هیدرودینامیکی به روش عددی برای یک متحرک با پنل خورشیدی ۵۰ وات ارائه شده است. برای تخمین توان و انرژی مورد نیاز باید مقاومت هیدرودینامیکی بدنه در سرعت‌های مختلف بررسی گردد که از نرم‌افزار ANSYS FLUENT ۱۸ و بر اساس حل معادلات RANS حول بدنه شناور و مدل آشفتگی K- ω SST استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی روش حل و نحوه مدل‌سازی، مدلی از شناور زیرسطحی نوع myring که نتایج تست آزمایشگاهی آن در دسترس بودند شبیه‌سازی شد. تطابق مطلوبی بین نتایج حل عددی و تست آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین این نتایج نشان داد که استفاده از روش مدل‌سازی آشفتگی K- ω SST یک روش ایده‌آل برای مدل‌سازی مسائل متحرک‌های زیرسطحی سرعت پایین است.

واژگان کلیدی: متحرک زیرسطحی، مقاومت هیدرودینامیکی، مدل‌سازی عددی، RANS, CFD

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۷/۰۶

صص ۶۱-۷۰

۱ - مقدمه

حل CFD و نتایج آزمایشگاهی ثابت کرده‌اند که یک شبکه ساختارنیافته دوبعدی، تابع دیواره استاندارد و شبکه اصلاحی تطبیقی می‌تواند بازدهی حل را افزایش دهد و دقت حل را تضمین کند. مونسان و همکاران [۷] به‌منظور کمینه‌سازی مقاومت در برابر حرکت به تحلیل CFD بدنه بدون ملحقات با شکل زیردریایی و اژدر پرداختند. آنها در این تحقیق بر بدنه‌هایی با شکل مقطع میانی موازی تمرکز داشته و به مطالعه شکلهای مختلفی از بدنه با تغییر در پارامترهای معادلات شکل سینه و پاشنه پرداختند. یکی از معضلات همیشگی آزمایشات مدل در حوضچه کشش در حالت زیرسطحی ارضای تشابه رینولدز بوده است. برای آزمایش زیرآبی زیردریایی‌ها در سال ۲۰۱۴ مونسان و همکاران [۸] یک روش عملی مقیاس‌سازی هیدرودینامیکی در زیر آب را بررسی کرده‌اند. آنها در این مقاله ثابت کرده‌اند که پس از یک عدد رینولدز خاص، ضریب مقاومت ثابت می‌ماند لذا در سرعت‌های بالا، نیازی به ارضای تشابه رینولدز نیست.



شکل (۱) متحرک زیرسطحی بی‌سرنشین خورشیدی (Solar AUVI)

۲- مشخصات متحرک زیرسطحی مطالعه شده

در این متحرک بی‌سرنشین، از دو پانل فتوولتائیک مونوکریستال هر یک با توان نامی ۵۰ وات با ابعاد $۳۰ \times ۶۶۴ \times ۲۵$ میلیمتری استفاده شده است. دو باله هرکدام بر مبنای پروفیل مقطع NACA۰۰۱۵ طراحی شده‌اند تا علاوه بر تأمین لیفت مناسب، محل قرارگیری پانلها باشند. همچنین از همین مقطع برای چهار بالک انتهایی شناور با زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر استفاده شده است. بدنه وسطی نیز از مدل SUBOFF با نسبت

متحرک‌های زیرسطحی بی‌سرنشین (AUVها) خورشیدی که یک نوع از آنها در شکل ۱ نشان داده شده‌است، متحرک‌های زیرسطحی‌ای هستند که مدیریت انرژی و تخمین دقیق مصرف انرژی در آنها بسیار اهمیت دارد. در صورت مدیریت مناسب انرژی، این زیردریایی‌ها می‌توانند برد نامحدودی داشته باشند ولی سرعت آنها معمولاً بسیار پایین و کمتر از ۱ متر بر ثانیه است و این مورد باعث می‌شود رفتار هیدرودینامیکی آنها و سهم مقاومت اصطکاکی و فشاری در آنها در مقایسه با سایر زیردریایی‌ها و AUVها متفاوت باشد. David Patch در سال ۲۰۰۰ گزارشی [۱] را با عنوان یک سیستم انرژی خورشیدی برای کاربرد طولانی مدت AUVها ارائه کرد. در این گزارش سرعت حداکثری شناور 0.8 m/s و بیشینه توان مصرفی برای رانش آن ۲۴ وات گزارش شده‌است. آنها از دو پانل فتوولتائیک هر کدام با توان ۳۰ وات و چهار باتری ۳۲ سلولی نیکل-کادمیوم با توان ۴۰۰ وات ساعت استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۰۴ نیز شرکت Falmouth [۲] نسل دوم این شناور را تست کرده است با حداکثر سرعت پیشروی برابر با $1/5$ متر بر ثانیه و نیز دو پانل فتوولتائیک هر کدام با توان ۸۵ وات با باتری لیتیوم-یونی با توان ۲ کیلووات ساعت از جمله مشخصات گزارش شده این شناور است. در مورد رفتار هیدرودینامیکی متحرک‌های هوشمند و غیرهوشمند زیرسطحی هم نسبتاً منابع کاملی وجود دارد. Yu-Can Pan و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۲ تحقیق کاملی از ضرایب هیدرودینامیکی زیردریایی را با استفاده از شبیه‌سازی CFD انجام داده‌اند. L.Cao و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۶ محاسبات جریان ویسکوز ضرایب مانوری هیدرودینامیکی و میدان جریان حول بدنه زیردریایی SUBOFF را انجام داده‌اند تا قابلیت حل‌گرهای CFD به کار رفته را در حل جریان ویسکوز حول بدنه نشان دهند. HaibinZheng و همکاران [۵]، با استفاده از کد تجاری Fluent به بررسی جزئیات ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV پرداختند. آنها از تست در حوضچه کشش برای اعتبارسنجی نتایج حل عددی و مدل ریاضی به کار رفته استفاده نموده‌اند. Ting Gao و همکاران [۶]، با استفاده از CFD، بهینه‌سازی شکل بدنه را برای متحرک‌های زیرسطحی بی‌سرنشین انجام داده‌اند. آنها از مقایسه نتایج

۳- معادلات اساسی حاکم

در این پژوهش شبیه‌سازی عددی جهت حل جریان بر پایه RANS انجام شده‌است که شامل معادلات پایستگی جرم و اندازه حرکت برای جریان پایا و سه بعدی تراکم‌ناپذیر می‌باشد.

معادله پایستگی جرم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0$$

(۱)

که در رابطه (۱) U معرف سرعت می‌باشد.

و معادله اندازه حرکت سیال:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = 0$$

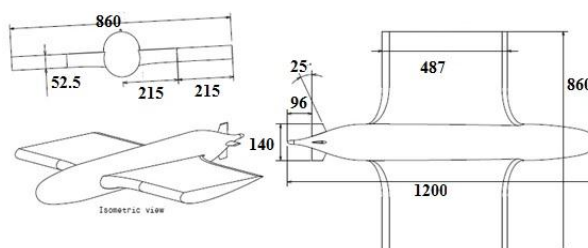
(۲)

در رابطه (۲) U, P, ν به ترتیب معرف لزجت سینماتیکی و فشار و سرعت می‌باشد.

۴- دامنه حل و شبکه بندی

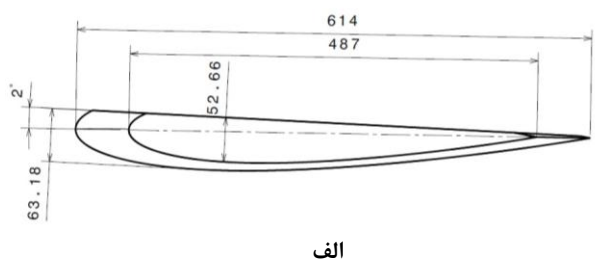
انتخاب دامنه محاسباتی متناسب با نوع مسئله، یکی از مهمترین بخش‌های شبیه‌سازی و تحلیل شناورها می‌باشد. در صورتی که ابعاد دامنه مناسب نباشد، سبب بروز خطا در نتایج شده و یا زمان حل و هزینه‌های محاسباتی را افزایش می‌دهد. مشخصات کلی دامنه محاسباتی در شکل ۴ ارائه شده‌است. دامنه انتخاب شده یک مکعب مستطیل است به ابعاد $4 \times 3 \times 1 \times 4 \times 6$ متر. شرط مرزی بر اساس نوع مسأله و هدف حل انتخاب می‌شود. انتخاب شرایط مرزی یکی از مهمترین بخشهای تحلیل به‌منظور رسیدن به جواب صحیح است و شامل یک وجه با شرط مرزی ورودی سرعت^۱ و یک وجه با شرط مرزی خروجی فشار^۲ و شرط تقارن^۳ در چهار وجه بالایی و پایینی و جانبی است. مدل به‌اندازه طول خود از وجه شرط ورودی سرعت در دامنه حل فاصله داشته و نیز در دو راستای دیگر در مرکز دامنه حل قرار دارد که در شکل ۴ به خوبی نشان داده شده‌است.

۱:۱/۶۵ برای شبیه‌سازی استفاده شده‌است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. حجم مدل 0.29 m^3 و مساحت آن 0.74 m^2 می‌باشد. در تحلیل CFD مدل از کد تجاری ANSYS FLUENT ۱۸ استفاده شده است. به‌منظور اعتبارسنجی روش حل، مدلی از شناور زیرسطحی نوع Myring که نتایج تست آزمایشگاهی آن در دسترس بود شبیه‌سازی شد. این نتایج توسط Ting Gao (۲۰۱۷) و همکاران [۹] به‌دست آمده‌اند. همچنین شکل شماره ۲ ابعاد شناور مدل را همراه با جزئیات به صورت نقشه سه بعدی نشان می‌دهد. شکل خاص بدنه (در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده) در باله‌های به‌کارگرفته شده همچنین به‌کارگیری مدل آشفتگی برای سرعت‌های کم، را می‌توان از ویژگی‌های خاص این پژوهش به‌حساب آورد.

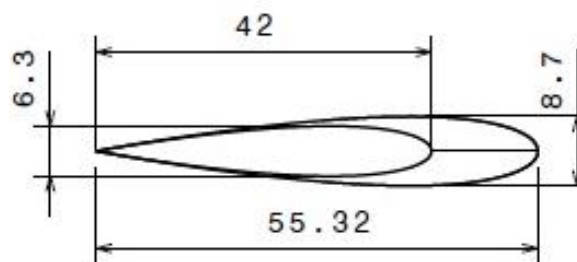


شکل (۲) نمای سه بعدی و مشخصات ابعادی متحرک زیرسطحی برحسب میلی‌متر

در شکل ۳ فایل هندسی باله‌های شناور که در نرم‌افزار Catia ترسیم شده‌است مشاهده می‌شود.



الف



ب

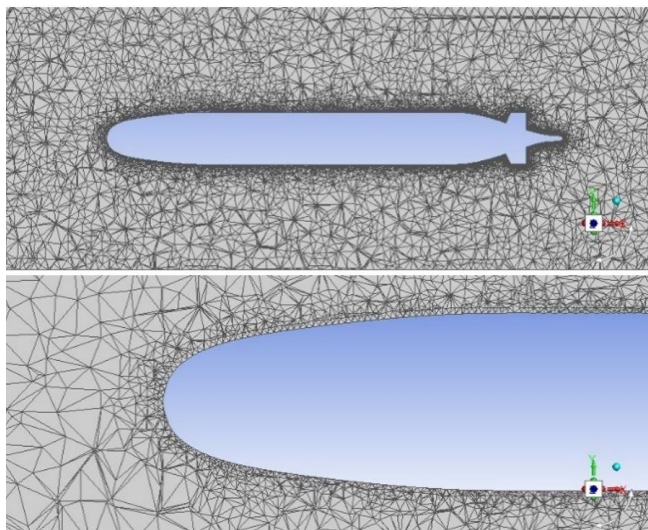
شکل (۳) ابعاد برحسب میلی‌متر باله‌های شناور زیر سطحی بی‌سرشتین با مقیاس ۱:۱/۶۵ - باله بزرگ، ب - باله کوچک

¹ velocity inlet

² pressure outlet

³ symmetry

در شکل ۶ نمای برش خورده شبکه بی‌سازمان نشان داده شده است.



شکل (۶) نمای برش خورده شبکه بی‌سازمان در صفحه X-Y

در جدول ۱ استقلال نتایج از تعداد شبکه‌ها نشان داده شده است.

جدول (۱) مقادیر Cd در تعداد مش‌های مختلف

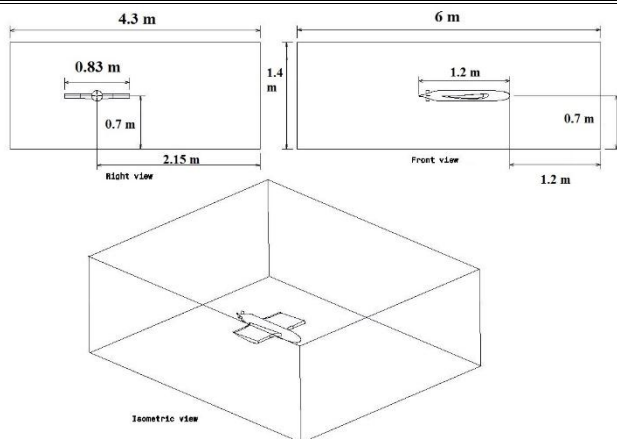
Cd Turbulent K-w, SST	تعداد شبکه
۰/۰۱۵۳۵۷	۱۹۳۸۹۷۰
۰/۰۱۵۲۴۲	۲۵۵۵۸۵۸
۰/۰۱۵۱۸۸	۳۲۳۰۴۰۰

۴-۲- تعیین مقدار Y^+

در کار حاضر از شبکه‌های بی‌سازمان برای کاهش زمان تولید شبکه استفاده شده است. ویژگی اصلی این نوع شبکه بندی این است که برای هندسه‌های پیچیده به راحتی قابل پیاده سازی است. مزیت دیگر شبکه‌های بی‌سازمان، قابلیت انجام سریع عمل تطبیق و بهینه سازی شبکه است. نکته مهمی که در شبکه بندی باید دقت شود تعیین ضخامت لایه مرزی است. ضخامت کل لایه مرزی را می توان از رابطه (۳) تعیین نمود [۱۰].

$$\delta = L * 0.382 / Re^{(-13/14)} \quad (3)$$

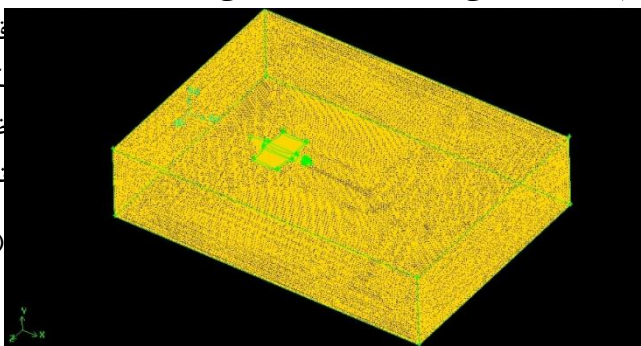
$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu} \quad (4)$$



شکل (۴) ابعاد دامنه حل و مدل

۴-۱- شبکه بندی

به منظور شبکه بندی دامنه حل از نرم افزار ۲,۳,۱۶ Gambit استفاده شده است. در شبکه بندی دامنه حل از شبکه بی‌سازمان (Unstructured) و از المانهای صفحه ای Tri از نوع pave و حجمی Tet/Hybrid از نوع Tgrid استفاده شده است. به منظور افزایش کیفیت شبکه بندی، صفحات تشکیل دهنده حجم مدل، با فواصل ریزتری نسبت به حجم کل دامنه حل شبکه بندی شده اند. این مورد، در شکل ۵ که نمای برش خورده دامنه حل را در صفحه X-Y نشان می دهد قابل مشاهده است. همچنین از جدول ۱ استقلال نتایج از شبکه در حل عددی حاضر قابل استنباط است. مشاهده می شود که با افزایش تعداد مش در سه مرحله مقدار ضریب پسا (Cd) تغییرات چندانی ندارد. این مقادیر مربوط به ضریب پسا، برای رینولدز $Re = 1791385$ به دست آمده اند. بیشترین دامنه تغییرات در حدود ۱/۱٪ است. اما به منظور به دست آوردن جوابهای دقیق تر، تعداد مش ها را برابر با ۳۲۳۰۴۰۰ انتخاب نموده ایم، با تفاوت اندکی در مقدار زمان محاسباتی صرف شده.



شکل (۵) شبکه بی‌سازمان مدل شناور با شبکه TetraHedral به تعداد ۳۲۳۰۴۰۰

جدول (۲) مقدار Δy برای $Y^+ = 30$ بر حسب رینولدز

Δy (m)	Reynolds
۰/۰۰۱۶۶۷	۴۹۲۶۳۱
۰/۰۰۰۸۷۵۸	۹۸۵۲۶۲
۰/۰۰۰۶۰۱	۱۴۷۷۸۹۳
۰/۰۰۰۴۶۰۱	۱۹۷۰۵۲۴
۰/۰۰۰۳۷۴	۲۴۶۳۱۵۵
۰/۰۰۰۳۱۵۸	۲۹۵۵۷۸۶

۴-۳- روش حل و شبیه سازی

برای حل معادلات RANS در این مطالعه، از کد تجاری ANSYS FLUENT استفاده شده است که به روش حجم محدود، جریان حول شناور زیرسطحی بی سرنشین خورشیدی را از سرعت ۰/۴۱ تا ۲/۴۸ متر بر ثانیه شبیه سازی می کند. آنطور که پیشتر گفته شد، به منظور شبیه سازی جریان آشفته از مدل آشفته گسی K- ω SST استفاده شده است. این مدل می تواند در شبیه سازی جریانهای آشفته با رینولدز پایین بدون توابع میرا کننده اضافی (Extra Damping Functions) استفاده شود. این مدل در مقایسه با مدل دیگر دو معادله ای یعنی K- ϵ ، در جریانهایی که شامل کاهش سرعت و جدایش جریان ناشی از گرادیان فشار معکوس می باشند بهتر عمل می کند و برای حل معادلات جریان در نزدیکی دیواره که به طور موضعی جزو نواحی با عدد رینولدز پایین محسوب می شوند، مناسب می باشد. [۱۱] مدل K- ω SST که توسط Menter بیان شده، به منظور آمیختن فرمول بندی دقیق و قدرتمند مدل K- ω در نزدیکی دیواره و مدل K- ϵ ، مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره، ارائه شده است. یعنی این مدل به طور همزمان توانایی بالای مدل K- ω ، در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل K- ϵ ، در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته است. جریان پایا و سه بعدی است. سیال عامل، آب خالص در نظر گرفته شده است. کوپلینگ سرعت و فشار با الگوریتم SIMPLE گردانها با Green Gauss Cell Based، جمله فشار با روش Standard، و جملات مومنتم و تولید انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال ویژه، به روش Second Order Upwind گسسته سازی شده اند. معیارهای همگرایی برای حل تکراری ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. به دلیل وجود باله های بزرگ در هندسه مدل، تغییرات ضریب و نیروی برا

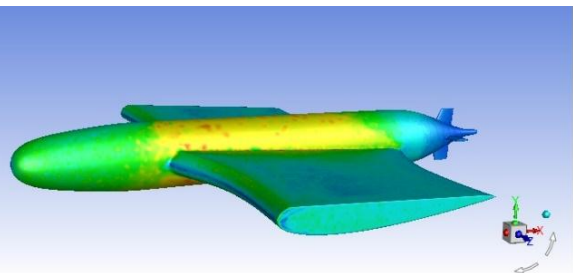
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{L \cdot g}}$$

(۵)

که در رابطه (۳) δ و L و Re به ترتیب معرف ضخامت لایه مرزی و طول و عدد رینولدز می باشند. در رابطه (۴) عدد رینولدز بر حسب طول شناور مشخص شده است. ρ و ν به ترتیب سرعت پیشروی شناور، چگالی و ویسکوزیته دینامیکی سیال می باشند. در رابطه (۵) عدد فرود بیان شده است و g شتاب ثقل می باشد. دقت نتایج محاسباتی به مقدار زیادی متأثر از چگالی شبکه است. بنابراین ضخامت اولین لایه لایه مرزی از دیواره دارای اثر مهمی در نتایج محاسبه شده است. به منظور یک تخمین اولیه از این ضخامت که آن را با Δy نشان می دهیم می توان رابطه (۶) را به کار برد [۱۰].

$$\Delta y = L Y^+ \sqrt{80 Re}^{-13/14} \quad (6)$$

گرچه رابطه فوق برای صفحات تخت پیشنهاد شده است اما با تقریب خوبی می توان آن را برای سطوح منحنی نیز به کار برد. همچنین برای مقدار Y^+ عدد ۳۰ را در نظر گرفته ایم که در کاربردهای دریایی معمول است. در واقع تعیین مقدار Y^+ وابسته به مدل توربولانسی انتخاب شده است مثلاً اگر با یک مسئله سرعت بالا (رینولدز بالا) مواجه بودیم باید از روش توربولانسی K- ϵ استفاده می شد و از Y^+ بالاتر از ۱۰۰ میتوانستیم استفاده کنیم. کم کردن مقدار Y^+ نیز توسط حافظه پردازنده (CPU) محدود می شود چراکه به ازای ریزتر کردن شبکه در نزدیکی دیواره، حجم اشغال شده حافظه پردازنده، بیشتر و بیشتر می شود و این خود عاملی اصلی برای محدود شدن مقدار Δy است. آنچنان که از توزیع مقدار Y^+ در شکل ۷ و جدول ۲ مشخص است، در نواحی که آشفته گسی جریان بیشتر است و رینولدز محلی مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده است، مقدار Y^+ نیز تغییر می کند تا اثرات ویسکوزیته در لایه مرزی جریان را مطابق با رژیم جریان اصلاح نماید.

شکل (۷) توزیع Y^+ بر روی بدنه

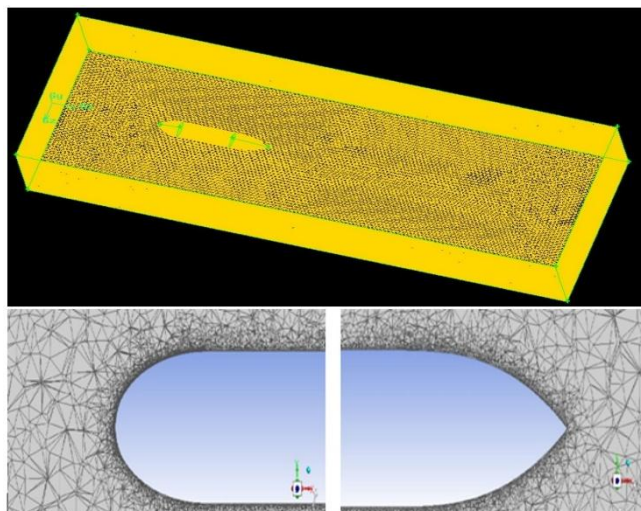
جدول (۴) مقایسه نتایج CFD و نتایج تجربی برای شناور

myring		
Fa - CFD	Fa - Exp	Ren
۱/۱۵	۱/۲	۷۵۶۸۶۰
۲/۱۱	۱/۹۵	۸۳۵۹۸۰
۴/۸۴	۴/۷	۱۳۱۳۶۸۲

را نیز در محاسبات لحاظ نموده‌ایم. از آنجایی که وجود پانل فتوولتائیک که روی باله بزرگ نصب می‌شود منجر به نامتقارن شدن مقطع هیدروفویل می‌شود و سطح رویی صاف و سطح زیرین منحنی NACA ۰۰۱۵ را نشان می‌دهد، ضرایب برای منفی به دست آمده‌اند. ضمناً به اندازه 1° به سمت بالا، برای باله بزرگ زاویه حمله ایجاد شده است.

۵- اعتبارسنجی روش و نتایج مدل‌سازی عددی

بهترین راه اعتبارسنجی نتایج، مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل با نتایج حاصله از حوضچه کشش است. به دلیل در دسترس نبودن نتایج آزمایشگاهی روی مدل مد نظر، برای صحت سنجی روش مدل‌سازی و تنظیمات عددی انتخاب شده و الگوی حل، از مدل‌سازی عددی یک زیردریایی دیگر که نتایج آزمایشات تجربی آن موجود است، استفاده شده است. تنظیمات عددی انتخاب شده برای این زیردریایی مشابه نمونه مد نظر است. مدل انتخاب شده، زیردریایی Myring می‌باشد که ابعاد و مشخصات اصلی این شناور در شکل ۸ و جدول ۳ ارائه شده‌است.



شکل (۹) شبکه بندی و دامنه حل شناور زیرسطحی Myring

۶- نتایج شبیه‌سازی برای SAUV مورد مطالعه

جهت برآورد نیروهای اصلی وارده بر بدنه این شناور در شرایط زیرسطحی کاملاً مغروق، با شرایط جریان ورودی کاملاً یکنواخت به دامنه حل، شبیه‌سازی در حالت سه-بعدی پایا با زاویه حمله صفر درجه انجام شده‌است. شکل ۱۰ الگوی توزیع سرعت در راستای طول بدنه را بر روی بدنه شناور در صفحه X-Y، در سرعت $2/48$ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. الگوی دنباله جریان در پشت بدنه از این شکل قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود، جدایش و برگشت جریان را بر روی بدنه نداریم. این موضوع بصورت بردارهای سرعت در انتهای پاشنه در شکل ۱۱ نیز نشان داده شده است. در این شکل، گردابه‌هایی را که در پشت پاشنه به علت حضور سکانها شکل گرفته را می‌توان مشاهده کرد. این الگوی جریان از آن جهت مهم است که می‌توان با استفاده از آن، الگوی جریان ورودی به مجموعه پروانه را درک نمود. همین توزیع را به منظور فهم بهتر الگوی جریان، در صفحات $Z=2/3$ m و $Y=0$ نشان داده‌ایم. در الگوی توزیع سرعت در صفحه $Y=0$ ، شکل ۱۲، افزایش ناگهانی سرعت در لبه جلویی (Leading Edge)



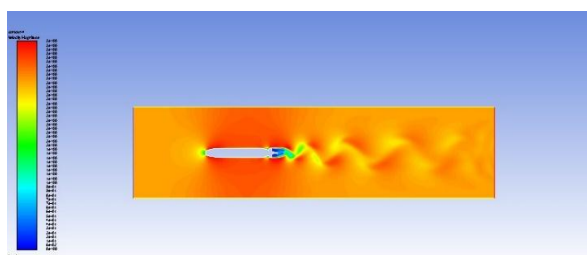
شکل (۸) هندسه شناور زیرسطحی Myring

جدول (۳) ابعاد شناور زیرسطحی Myring

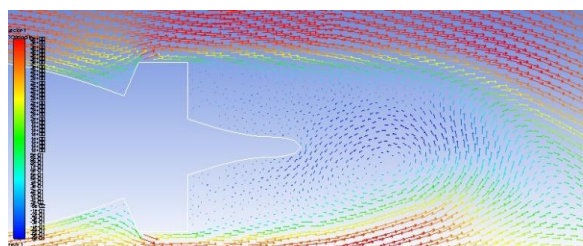
۱/۵۲۱ m	طول بدنه
۰/۲۸ m	طول دماغه
۰/۵۰۴ m	طول پاشنه
۰/۱۴ m	قطر بیشینه

ابعاد دامنه حل و شرایط مرزی همانند شرایط مدل مورد مطالعه SAUV است که در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی حاصل از آزمایش، در جدول ۴ مقایسه شده‌است. با توجه به خطای حداکثر ۸ درصدی نیروی مقاومت کل، نسبت به نتایج عددی به دست آمده، دقت و صحت شبیه‌سازی مورد تأیید می‌باشد.

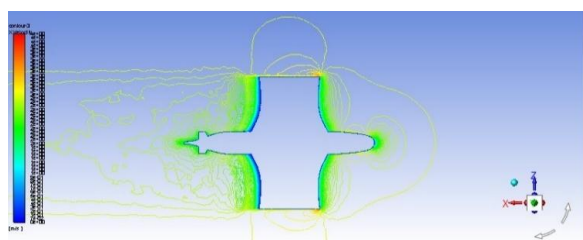
جدول ۵ و شکل‌های ۱۷ و ۱۸ و همچنین مقادیر نیروهای به‌دست آمده بر حسب سرعت نیز در جدول ۸ و شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده‌اند. مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی باله بزرگ در جدول ۶ و مقادیر نیروهای وارده بر دو باله بزرگ در جدول ۷ ارائه شده‌اند. آنطور که از این نتایج قابل درک است، سهم بسیار عمده‌ای از نیروهای پسا و همچنین برا، از آن باله‌های بزرگ است که به منظور نصب پانلهای فتوولتائیک بر بدنه اضافه شده‌اند.



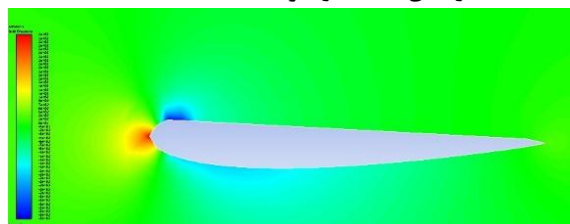
شکل (۱۰) الگوی توزیع سرعت در راستای X بر روی بدنه شناور در نمای X-Y، در سرعت $V = 2/48 \text{ m/s}$



شکل (۱۱) توزیع برداری سرعت در راستای X بر روی بدنه شناور در نمای X-Y، در سرعت $V = 2/48 \text{ m/s}$

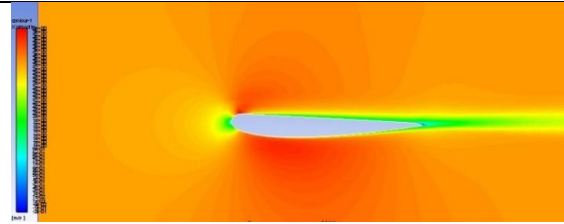
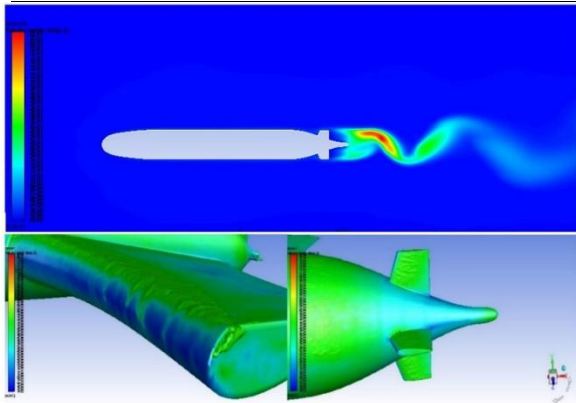


شکل (۱۲) الگوی توزیع سرعت در راستای X بر روی بدنه شناور در نمای X-Z، در سرعت $V = 2/48 \text{ m/s}$



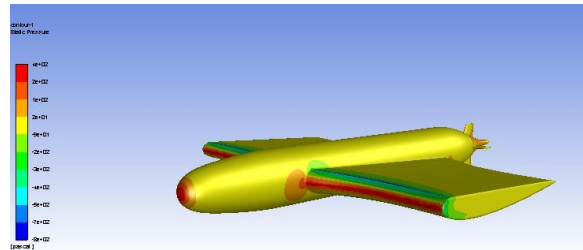
شکل (۱۳) الگوی فشار استاتیک جریان در صفحه $Z = 0/4 \text{ m}$ در سرعت $V = 2/48 \text{ m/s}$

باله بزرگ مشاهده می‌شود. این می‌تواند ناشی از کاهش فشار ناگهانی جریان به‌علت انقطاع ناگهانی هندسه در راستای Z باشد که پروفیل سطح مقطع باله بزرگ را شکل می‌دهد. در شکل ۱۳ توزیع فشار استاتیکی بر روی باله بزرگ در صفحه $Z = 0/4 \text{ m}$ نشان داده شده‌است. به دلیل برشی که در سطح رویی باله بزرگ برای قرارگیری پانل فتوولتائیک ایجاد شده‌است، جریان در لبه جلویی رویه بالایی باله بزرگ، پس از گذر از ناحیه سکون، با کاهش ناگهانی فشار مواجه می‌شود اما مشاهده می‌شود که به محض رسیدن به محل برش، فشار جریان مجدداً افزایش می‌یابد و این در حالیست که در رویه پایینی باله بزرگ فشار تا فاصله‌ای دورتر پیوسته در حال کاسته شدن است. این موضوع سبب می‌شود که نیروی عمودی در جهت منفی به باله بزرگ اعمال شود. همین استدلال را از شکل ۱۴ که توزیع سرعت در راستای X را برای باله بزرگ نشان می‌دهد می‌توان بکار برد. کاهش شدید سرعت در رویه بالایی باله بزرگ که ناشی از برش آن است و نیز به‌گرددابه کوچکی که در انتهای باله شکل گرفته قابل مشاهده است. زاویه حمله 1° باله بزرگ جهت کاهش همین اثر ایجاد شده است. نمی‌توان زاویه حمله باله بزرگ را آنچنان زیاد کرد، زیرا طول کورد باله بزرگ در مقایسه با قطر بدنه وسطی زیاد است. این اثر را ضمناً می‌توان با ایجاد زاویه حمله مثبت در بالکهای افقی عقبی بیشتر کاهش داد. ضمناً می‌توان دید که دنباله جریان بر روی باله بزرگ تقریباً تا انتهای دامنه حل کشیده می‌شود. در شکل ۱۵ توزیع فشار استاتیکی جریان بر روی بدنه و رویه بالایی باله بزرگ در سرعت $0/825$ متر بر ثانیه ارائه شده‌است. نواحی که دارای بیشینه فشار هستند را در نوک دماغه و لبه جلویی باله بزرگ و بالکهای عقبی می‌توان مشاهده کرد. همچنین کاهش شدید فشار را در نیمه بالایی باله بزرگ در ناحیه لبه جلویی، می‌توان دید. اختلاف فشار بین نواحی ابتدایی و انتهایی علت اصلی وجود نیروی مقاومت شکلی (Form Drag) است. در شکل ۱۶ توزیع انرژی جنبشی آشفته (TKE) نشان داده شده است. افزایش مقدار انرژی جنبشی آشفته پس از عبور جریان از لبه ابتدایی باله بزرگ و بالکهای عقبی در این شکل قابل مشاهده است. این به دلیل افزایش سرعت در این ناحیه پس از ناحیه سکون است. ضرایب هیدرودینامیکی بر حسب عدد رینولدز در



شکل (۱۴) توزیع سرعت در راستای X در صفحه $Z = 0.4$ m در سرعت $V = 2.48$ m/s

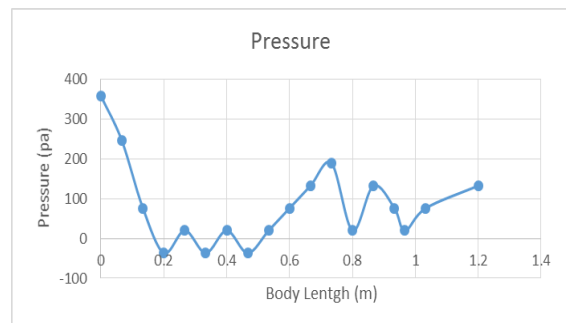
شکل (۱۶) توزیع TKE (انرژی جنبشی آشفته) برای سرعت $V = 2.48$ m/s



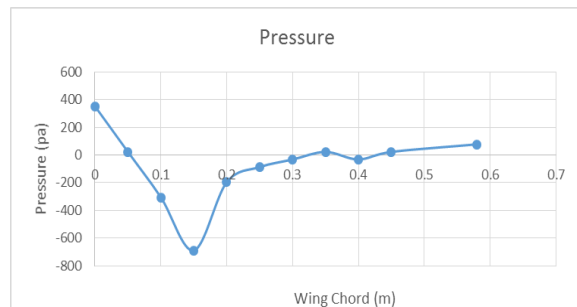
جدول (۵) نتایج ضرایب هیدرودینامیکی حل CFD با مقیاس مدل روش آشفتگی K- ω SST

C_{vx}	C_{px}	$-C_l$	C_d	Re_n
۰/۰۱۰۸۱۱۸۵۲	۰/۰۰۶۷۴۰۷۶	۰/۰۱۴۵۴۷	۰/۰۱۷۶۲۳	۴۹۲۶۳۱
۰/۰۰۸۹۱۶۳۷۶	۰/۰۰۶۲۱۸۹۰۳۳	۰/۰۱۴۰۴۶	۰/۰۱۵۱۳۵	۹۸۵۲۶۲
۰/۰۰۸۰۱۱۱۹۱	۰/۰۰۶۰۰۱۶۶	۰/۰۱۳۹۴۶	۰/۰۱۴۰۱۳	۱۴۷۷۸۹۳
۰/۰۰۷۴۳۹۶۴۴	۰/۰۰۵۸۷۵۱۴	۰/۰۱۳۹۲۵	۰/۰۱۳۳۱۵	۱۹۷۰۵۲۴
۰/۰۰۷۰۳۶۶۹۴	۰/۰۰۵۷۸۲۸۳	۰/۰۱۳۹۳۸	۰/۰۱۲۸۲۰	۲۴۶۳۱۵۵
۰/۰۰۶۶۱۲۷۵۶۱	۰/۰۰۵۸۶۱۳۱	۰/۰۱۳۹۷۲	۰/۰۱۲۴۷۴	۲۹۵۵۷۸۶

الف



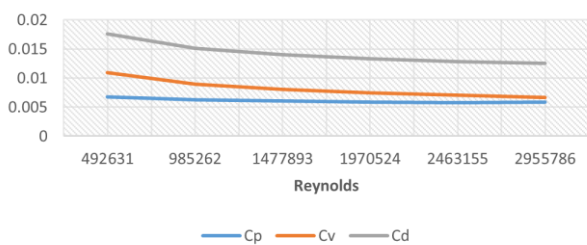
ب



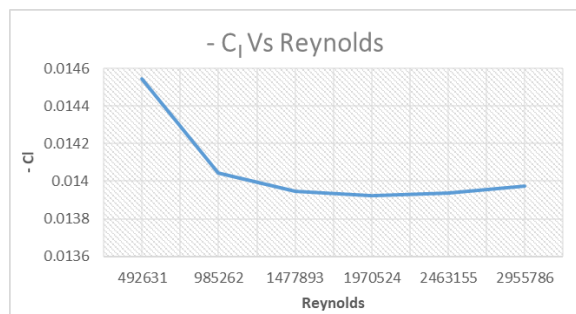
ج

شکل (۱۵) توزیع فشار استاتیکی جریان بر حسب پاسکال الف - کنتور بر روی بدنه، ب - نمودار بر روی بدنه، ج - نمودار بر روی رویه بالایی باله بزرگ در سرعت $v = 0.825$ m/s

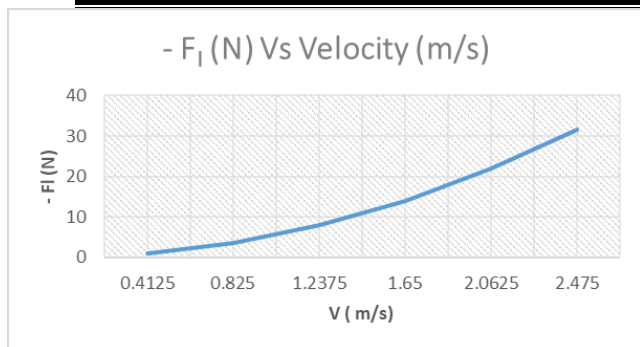
Hydrodynamic Coefficients Vs Reynolds



شکل (۱۷) تغییرات ضرایب مقاومت فشاری، مقاومت ویسکوز و مقاومت کل برای کل بدنه بر حسب عدد رینولدز



شکل (۱۸) تغییرات ضریب برا بر حسب عدد رینولدز



شکل (۲۰) تغییرات نیروی برا برای کل بدنه بر حسب سرعت

۷- تحلیل و نتیجه گیری

ضرایب هیدرودینامیکی شامل ضرایب پسا، برا و همچنین ویسکوز، و فشار، در جدول ۵ بر حسب عدد رینولدز ارائه شده است. روند کاهشی ضرایب پسا و ویسکوز و همچنین ثبات نسبی و تقریبی ضرایب برا و فشار در قبال افزایش عدد رینولدز قابل مشاهده است. کاهش ناگهانی ضریب مقاومت کل در رینولدز نزدیک به یک میلیون و سپس ثبات تقریبی آن از رینولدز دو میلیون به بعد از شکل ۱۷ نیز قابل مشاهده است. بیشینه نیروی مقاومت به دست آمده در سرعت بیشینه ۲/۴۸ متر بر ثانیه برابر با ۲۸/۱۸ نیوتن است. توان مورد نیاز برای حرکت مستقیم الخط شناور (زاویه حمله ۰°) برابر با ۶۹/۷۵ وات است یعنی توان خالص مصرفی بیشینه برای رانش شناور مدل در حالت زیرسطحی حدود ۷۰ وات است و انتخاب سیستم رانش و تأمین انرژی پس از لحاظ کردن راندمان‌های الکتریکی و مکانیکی و هیدرودینامیکی بر روی توان خالص انجام می‌شود که در حدود ۹۷ وات خواهد شد. این نشان می‌دهد که دو پانل خورشیدی ۵۰ واتی انتخاب شده، یک انتخاب درست می‌باشد ضمن اینکه زيردریایی همیشه در حداکثر سرعت حرکت نمی‌کند. مقدار نیروی برا با علامت منفی (رو به پایین) بوده و مقدار آن با افزایش سرعت تقریباً برابر مقدار نیروی مقاومت می‌شود. این مقدار نیروی برا برای زیر آب نگه داشتن زيردریایی در سرعت‌های مختلف کفایت می‌کند چراکه زيردریایی بویانسی مثبت بوده و مقدار مثبت بودن بویانسی بر اساس مقدار نیروی برای منفی موجود طراحی می‌گردد.

جدول (۶) ضرایب هیدرودینامیکی باله بزرگ

C _l	C _d	Re
-۰/۰۰۹۷۲۱۵	۰/۰۱۳۸۷۱	۴۹۲۶۳۱
-۰/۰۰۹۷۹۱۳	۰/۰۱۲۰۸۷	۹۸۵۲۶۲
-۰/۰۰۹۸۶۶۰	۰/۰۱۱۲۸۲	۱۴۷۷۸۹۳
-۰/۰۰۹۹۳۹۶	۰/۰۱۰۷۷۸	۱۹۷۰۵۲۴
-۰/۰۱۰۰۰۰۲	۰/۰۱۰۴۲۱	۲۴۶۳۱۵۵
-۰/۰۱۰۰۰۶۵	۰/۰۱۰۱۴۷	۲۹۵۵۷۸۶

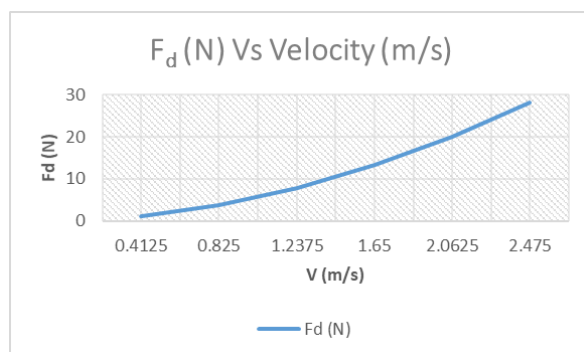
جدول (۷) مقادیر نیروهای هیدرودینامیکی دو عدد باله بزرگ

-F _l (N)	F _d (N)	V (m/s)
۰/۵۹۱۳۸۹۶۴	۰/۸۴۳۸۳۱۲۶	۰/۴۱۲۵
۲/۳۸۲۵۵۰۸	۲/۹۴۱۱۴۷	۰/۸۲۵۰
۵/۴۰۱۶۲۳۸	۶/۱۷۷۱۱	۱/۲۳۷۵
۹/۶۷۴۵۶۴۴	۱۰/۴۹۱۰۷۳۲	۱/۶۵
۱۵/۲۱۱۴۳۷۴	۱۵/۸۴۹۲۲۹۸	۲/۰۶۲۵
۲۲/۰۴۳۳۹۶	۲۲/۲۲۱۱۵۲	۲/۴۷۵

جدول ۸- نتایج نیروهای هیدرودینامیکی با CFD با مقیاس مدل

آشفتنگی K-ω SST

-F _l (N)	F _d (N)	V (m/s)
۰/۹۱۳۱۱۰۵۳	۱/۱۰۶۱۸۶۷	۰/۴۱۲۵
۳/۵۲۶۶۴۷۳	۳/۸۰۰۲۱۸	۰/۸۲۵۰
۷/۸۷۸۳۸۷۶	۷/۹۱۶۳۹۱۵	۱/۲۳۷۵
۱۳/۹۸۵۴۸۹	۱۳/۳۷۲۴۹۱	۱/۶۵
۲۱/۸۷۲۰۹۷	۱۹/۴۳۳۶۱	۲/۰۶۲۵
۳۱/۵۷۲۹۱۹	۲۸/۱۸۸۳۰۳	۲/۴۷۵



شکل (۱۹) تغییرات نیروی مقاومت کل برای کل بدنه بر حسب سرعت

۸- جمع بندی

در این تحقیق به منظور پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه شناور زیرسطحی که برای تأمین انرژی خود از دو عدد پانل فتوولتائیک استفاده می‌کند از شبیه‌سازی عددی با کد تجاری ANSYS FLUENT استفاده شده و نتایج در حالت کاملاً مغروق بدست آمده است. برای اعتبارسنجی نتایج و به‌علت در دسترس نبودن نتایج تجربی، با همان دامنه حل و با همان روش آشفتگی از نتایج آزمایشگاهی تست زیرسطحی مدل شناور نوع Myring استفاده شد. خطای کمتر از ۸ درصد در نتایج بدست آمده در حل عددی و نتایج تجربی، صحت روش حل و مدل‌سازی مسئله را تأیید می‌نماید. همچنین این نتایج نشان داد که استفاده از روش مدل‌سازی آشفتگی K- ω SST یک روش ایده‌آل برای مدل‌سازی مسائل متحرک‌های زیرسطحی سرعت پایین است. حداکثر توان رانش مورد نیاز در حالت زیرسطحی در سرعت بیشینه و حداکثر توان تولیدی دو عدد پانل فتوولتائیک نشان دهنده قابلیت استفاده از این پانلها برای چنین هندسه‌ای از شناور در حالت زیرسطحی می‌باشد. گرچه پانلهای فتوولتائیک اغلب توانی کمتر از توان نامی خود را تولید می‌کنند اما ماندن در زمان بیشتر بر روی سطح آب به‌منظور دریافت انرژی خورشیدی بیشتر راه‌حل مطلوبی بنظر می‌آید. استفاده از انرژی نامحدود و سهل‌الوصول خورشیدی برای افزایش برد و پایداری مأموریتی شناورهای زیرسطحی بی‌سرنشین خورشیدی راه حل مناسبی است که بتوان بر محدودیتهای ناشی از تأمین انرژی و افزایش برد این نوع شناورها فائق آمد.

۹- مراجع

- simulation" Journal of Hydrodynamics 24(6):840-847 · December 2012.
- [4] L. Cao, J. Zhu and G. Zeng." Viscous-flow Calculations of Submarine Maneuvering Hydrodynamic Coefficients and Flow Field based on Same Grid Topology" Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9, No. 2, pp. 817-826, 2016.
- [5] HaibinZheng , Xin Wang , ZebinXu." Study on hydrodynamic performance and CFD simulation of AUV".IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA).2017
- [6] Ting Gao, Yaxing Wang,Yongjie Pang,Jian Cao."Hull shape optimization for autonomous underwater vehicles using CFD"Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 10(1):601-609 · January 2016
- [7] Moonesun M, Yuri Korol, Dalayeli H."CFD Analysis on the Bare Hull Form of Submarines for Minimizing the Resistance"International Journalof Maritime Technology.2015
- [8] Moonesun M, Korol Yuri, Tahvildarzade D, Javadi M."Practical scaling method for underwater hydrodynamic model test of submarine". Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 10 pp. 1217~1224, 2014.
- [9] Ting Gaoa,Yaxing Wang, Yongjie Pang, Jian Cao." Hull Shape Optimization for Autonomous UnderWaer Vehicles Using CFD". Engineering Application of Computational Fluid Mechanics.2016
- [10] Aymen Mohamed, Hedi Kchaou,Med Salah Abid, Zied Driss." Impact of Stern Design on Hydrodynamic Drag of AUV's Hull" Indian journal of Geo Marine sciences.Vol.47(01), January 2018, pp.89-95.

[۱۱] صنیعی نژاد مهدی " مقدمه ای بر مفاهیم جریانهای آشفتته و مدل‌سازی آنها " ویرایش سوم. ص ۱۲۲ و ۱۲۳. خرداد ۱۳۸۳.

- [1] Patch A. David. " A Solar Energy System for Long-Term Deployment of AUV's" International Unmanned Undersea Vehicle Symposium.2000
- [2] Jalbert J, Baker J, Duchesney J. " Solar-Powered Autonomous UnderWater Vehicle Development" Falmouth Scientific, Inc. 2004
- [3] Yu-cun Pan , Huai-xin ZHANG , Qi-dou ZHOU." Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD