



Fluid-Structure Interaction Investigation and Skew Angle Effect on Stress Created in the High Skew Propeller

Ehsan Yari^{1*}, Mohammad Hossein Karimi², Kamin Saberizad³

¹ Assistant professor, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; ehsanyari11@gmail.com

² Assistant professor, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; Mhkcom480@yahoo.com

³ PhD student, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; kamin.saberi@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 30 Dec 2024

Last modification: 29 Aug 2025

Accepted: 30 Aug 2025

Available online: 30 Aug 2025

Article type:

Research paper

Keywords:

Skew angle

Hydro-elasticity

Von Mises Stress Analysis

Computational fluid dynamics

High skew propeller

ABSTRACT

The aim of this article is to numerically analyze the hydrodynamic performance and hydro-elasticity of a fully submerged propeller at various skew angles while keeping other geometric parameters constant. For the validation of numerical hydrodynamic results, the DTMB4119 three-blade propeller, for which experimental cavitation tunnel data is available, has been utilized. The numerical solution employs the STAR-CCM+ software using the finite volume and finite element methods, with flow turbulence modeled using the SST k- ω turbulence model. Subsequently, to investigate the impact of blade skew angle distribution on the hydro-elastic performance of the propeller, the MAU propeller series has been used. Given that most submarine propulsion systems use seven-blade propellers, the study focuses on a seven-blade propeller designed for underwater applications, with skew angles ranging from 35 to 81 degrees. The results indicate that with an increase in the skew angle, the stress at the tip and root of the propeller rises, with an approximate 10% increase in stress from 35 degrees to 81 degrees. Moreover, this skew angles increase leads to a reduction in hydrodynamic efficiency.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



تحلیل اندرکنش سازه-سیال و تأثیر زاویه اسکيو بر تنش ایجادشده در پروانه اسکيو بالا

احسان یاری^{۱*}، محمدحسین کریمی^۲، کامین صابری زاد^۳

^۱استادیار/ مجتمه دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ehsanyari11@gmail.com

^۲استادیار/ مجتمه دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Mhkcom480@yahoo.com

^۳دانشجوی دکتری تبدیل انرژی/ مجتمه دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، kamin.saberi@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله تحلیل عددی عملکرد هیدرودینامیکی و آنالیز هیدروالاستیسیته پروانه کاملاً مغروق در زوایای اسکيو مختلف با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای هندسی می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی هیدرودینامیکی از پروانه ۳ پره‌ای DTMB4119 که نتایج تجربی تونل کاویتاسیون آن موجود است، استفاده شده است. برای حل عددی از نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام پلاس به روش حجم محدود استفاده شده و اغتشاشات جریان توسط مدل آشفتگی SST k-w مدل شده‌اند. در ادامه به‌منظور بررسی تأثیر توزیع زاویه اسکيو پره بر عملکرد هیدروالاستیسیته پروانه از سری پروانه‌های MAU استفاده شده است. با توجه به اینکه بیشتر سیستم‌های رانش پروانه‌ای زیردریایی‌ها ۷ پره می‌باشند لذا نمونه موردنظر مطالعه یک پروانه ۷ پره با کاربرد زیرسطحی در محدوده زاویه اسکيو ۳۵ تا ۸۱ درجه انتخاب شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش زاویه اسکيو، تنش ایجادشده در نوک و ریشه پروانه افزایش‌یافته و میزان افزایش تنش از ۳۵ درجه به ۸۱ درجه در حدود ۱۲۰ درصد می‌باشد. همچنین با این افزایش زاویه اسکيو میزان راندمان هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

زاویه اسکيو

هیدروالاستیسیته

تنش وون میزز

دینامیک سیالات محاسباتی

پروانه اسکيو بالا

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱ - مقدمه

مفهوم برهم‌کنش سیال و سازه^۱ به تعامل میان یک ساختار جامد تغییرپذیر و سیال پیرامون یا درون آن اشاره دارد. هنگامی که جریان سیال غیردائمی بر سازه جامد تأثیر می‌گذارد، تغییراتی در تنش یا فشار سیال ایجاد می‌شود که به‌طور مستقیم بر مرز مشترک میان جسم جامد و سیال اعمال می‌گردد. این تغییرات متقابل باعث تغییر در حرکت سازه جامد می‌شوند و به همین ترتیب، این تعامل به شکل یک حلقه بازخورد عمل می‌کند. برای انجام یک تحلیل دقیق در زمینه برهم‌کنش سیال و سازه، لازم است این حلقه بازخورد به‌طور کامل و دقیق مورد بررسی قرار گیرد. شناخت عمیق‌تر این فرآیندها می‌تواند به بهبود طراحی و عملکرد شناورها کمک کند **Error! Reference source not found.**

تحلیل عددی اندرکنش سازه و سیال یکی از موضوعات کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی پروانه‌های دریایی است. این پروانه‌ها نقش حیاتی در عملکرد کشتی‌ها و زیردریایی‌ها دارند و تأثیر مستقیمی بر راندمان، مصرف انرژی و عمر مفید سازه دارند. اندرکنش میان نیروی سیال و پاسخ دینامیکی پروانه باعث ایجاد پدیده‌های پیچیده‌ای مانند کاویتاسیون، ارتعاشات و نویز می‌شود که می‌تواند بر عملکرد کلی سیستم تأثیر منفی بگذارد. درک و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها، ابزاری قدرتمند برای بهبود طراحی و کاهش هزینه‌های عملیاتی فراهم می‌کند.

با توسعه روش‌های عددی پیشرفته مانند دینامیک سیالات محاسباتی^۲ و تحلیل اجزای محدود^۳، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار پروانه‌ها در شرایط مختلف عملیاتی فراهم شده است. این تحلیل‌ها به مهندسان کمک می‌کند تا علاوه بر شناسایی مشکلات بالقوه در مراحل اولیه طراحی، راه‌حل‌های بهینه‌تری برای افزایش راندمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه دهند. بررسی دقیق این تعامل نه تنها به بهبود عملکرد پروانه‌ها کمک می‌کند، بلکه نقش مهمی در ایمنی و پایداری سامانه‌های دریایی ایفا می‌کند.

از گذشته تاکنون تحقیقات بسیاری بر روی ارتعاشات پروانه‌های دریایی انجام شده است. بروکس از نخستین محققانی بود که تأثیر ارتعاشات پره بر نیروهای غیردائمی ناشی از یک پروانه کشسان را بررسی کرد. او آزمایش‌هایی را در یک تونل آب ۲۴ اینچی روی دو مدل پروانه انجام داد که فرکانس‌های اصلی آن‌ها با جریان ورودی غیریکنواخت تحریک می‌شد. نتایج نشان داد که پروانه‌های دریایی در جریان‌های غیریکنواخت می‌توانند پاسخ‌های

نیرویی غیردائمی متفاوتی نسبت به فرکانس‌های نزدیک به فرکانس اصلی پره داشته باشند. همچنین، ارتعاشات پره علاوه بر افزایش نیروهای غیردائمی، در برخی شرایط می‌توانند نیروهای پروانه را در یک محدوده فرکانسی کاهش دهند **Error! Reference source not found.**

کاستلینی و سانتولینی^۴ با استفاده از یک ارتعاش‌سنج اسکن لیزری، ارتعاشات پره‌های پروانه را در طول یک دور کامل اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که مود خمشی اصلی، مود غالب ارتعاشات پروانه است که در جریان ورودی غیریکنواخت تونل آب فعالیت می‌کند. **Error! Reference source not found.**

چن و شیه^۵ ارتعاشات مجموعه‌ای از پروانه‌ها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند. از آنجاکه پارامترهای متعددی در ارتعاشات پروانه نقش دارند، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزاری کارآمد در این زمینه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با بهره‌گیری از این الگوریتم و بر اساس داده‌های سری پروانه، می‌توان به راندمان بهینه و کاهش سطح ارتعاشات دست یافت **Error! Reference source not found.**

هونگ^۶ و همکاران تحلیل ارتعاشی و میرایی یک پره کامپوزیتی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی طراحی مستهلک‌کننده، راندمان دینامیکی ساختار کامپوزیتی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد **Error! Reference source not found.**

وی^۷ و همکاران پیش‌بینی عددی پاسخ آکوستیکی پروانه تحریک‌شده توسط سازه زیردریایی را با استفاده از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی، المان محدود و المان مرزی انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که بیشتر تحقیقات پیشین به‌صورت جداگانه به تحلیل جریان سیال یا ارتعاشات سازه پرداخته‌اند و مطالعات ترکیبی بر ارتعاشات ناشی از تحریک پروانه بسیار محدود بوده است. در مطالعات ترکیبی نیز تنها به برخی جنبه‌ها مانند روش‌های کوپلینگ بین حجم محدود و المان محدود یا تأثیر جنس پروانه بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشاتی پرداخته شده و بسیاری از شرایط و پارامترها مورد بررسی جامع قرار نگرفته‌اند. همچنین، استفاده از نرم‌افزارهای انحصاری در برخی تحقیقات، دسترسی به نتایج و روش‌ها را محدود کرده است. بنابراین، نیاز به توسعه یک الگوریتم دقیق، مطالعه جامع موضوع، و شناسایی پارامترهای مؤثر در این حوزه به‌طور جدی احساس می‌شود. **Error! Reference source not found.**

⁴ Castellini and Santolini

⁵ Chen and Shih

⁶ Hong

⁷ Wei

¹ FSI

² CFD

³ FEM

علیزاده و همکاران میدان جریان اطراف بدنه زیردریایی و تأثیر متقابل پروانه و بدنه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه شامل بررسی اثر متقابل پروانه با بدنه زیردریایی، همراه با ملحقات و سطوح کنترل بود **Error! Reference source not found.**

ری شهری و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار فلوئنت، جریان یک پروانه دریایی را مدل سازی کردند. آن ها مشخصات عملکردی پروانه و جریان ویک را به صورت عددی به دست آوردند و نتایج شبیه سازی را با داده های آزمایشگاهی مقایسه کردند که همخوانی خوبی میان آن ها مشاهده شد **Error! Reference source not found.**

گل^۸ و همکاران ارتعاشات اجباری یک شناور کانتینر را در اثر تحریک دینامیکی ناشی از موتور و تحریک تراست پروانه (بر اثر بار فشاری روی پروانه) بررسی کردند. آن ها ابتدا فرکانس های طبیعی سازه را استخراج کرده و سپس بیشینه سرعت ارتعاشی ناشی از حالات بارگذاری مختلف را محاسبه نمودند. در نهایت، نتایج به دست آمده را با استاندارد ارتعاشات شناور ایزو ۶۹۵۴ مقایسه کردند **Error! Reference source not found.**

لی^۹ و همکاران با استفاده از روش تحلیل عددی و نرم افزارهای RANS، MPUF3A و Ship-pro، ارتعاشات بدنه شناور را در اثر تحریک پروانه بررسی کردند. آن ها ارتعاشات ناشی از ویک پروانه را برای بارهای هارمونیک هر یک از پره های پروانه استخراج کرده و مقادیر سرعت ارتعاش بدنه را در جهت های مختلف مختصات به دست آوردند **Error! Reference source not found.**

در سال ۲۰۲۵ کیم و شینگ^{۱۰} به مطالعه تحلیل برهم کنش سیال و سازه در پروانه های کامپوزیتی دریایی با استفاده از تجزیه مدهای دینامیکی پرداخته اند. این مطالعه یک روش سریع برای تحلیل برهم کنش سیال و سازه در پروانه های کامپوزیتی دریایی ارائه می دهد که تغییر شکل تیغه ها را در نظر می گیرد. برای بهینه سازی محاسبات، روش المان مرزی اصلاح شده، ترکیب مد سازه ای، و الگوریتم شبه-نیوتن به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که این روش، ضمن حفظ دقت، زمان محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش می دهد **Error! Reference source not found.**

کریشنا^{۱۱} در سال ۲۰۲۲ به تحلیل محاسباتی هیدروالاستیک پروانه دریایی با استفاده از برهم کنش دوطرفه سیال و سازه پرداخته است. این مطالعه به بررسی تحلیل دوطرفه ی برهم کنش سیال و سازه در پروانه ی دریایی DTMB-4119 با قطر ۰/۲ متر،

با استفاده از نرم افزار انسیس^{۱۲} می پردازد. برای تحلیل، روش کوپلینگ سیستمی به کار گرفته شده که داده ها را بین حلگرهای سازه ای و سیالی انتقال می دهد. مدل آشفتگی گردابه های بزرگ برای شبیه سازی جریان و مدل فاکس ویلیام^{۱۳} برای ارزیابی فشار صوتی^{۱۴} ناشی از پروانه استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی عملکرد هیدرودینامیکی با داده های تجربی، پاسخ هیدروالاستیک و آکوستیک بررسی شد. نتایج تحلیل دوطرفه برهم کنش سیال و سازه با تحلیل یک طرفه مطابقت دارد اما می تواند مقدار اوج تنش و تغییر شکل را در ابتدای حل گذرا به دقت در نظر بگیرد که برای طراحی پروانه مهم است. این پژوهش نشان می دهد که پروانه ی فلزی را می توان با پروانه ی کامپوزیتی جایگزین کرد و تحلیل آکوستیکی دوطرفه، به دلیل در نظر گرفتن اثرات هیدروالاستیک، نتایج واقعی تری ارائه می دهد **Error! Reference source not found.**

هدف از مطالعه حاضر تحلیل عددی اندرکنش سازه و سیال پروانه سری استاندارد مائو^{۱۵} با کاربرد در شناورهای زیرسطحی می باشد. بدین منظور چند هندسه پروانه با زوایای اسکيو مختلف تولید شده و تحت شرایط جریانی یکسان به منظور بررسی تأثیر گام هندسی بر روی پارامترهای هیدروالاستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم بر سیال

در آنالیز هیدرودینامیکی جریان با استفاده از حلگر ناویر-استوکس به روش میانگین گیری رینولدز^{۱۶}، میدان جریان با حل معادلات پیوستگی و مومنتوم تعیین می شود. این معادلات به ترتیب در روابط (۱) و (۲) ارائه شده است **Error! Reference source not found.**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_i u_j) \\ = \frac{\delta}{\delta x_j}(\tau_{ij}) - \frac{\delta P}{\delta x_j} + \rho g_i \\ - P \bar{u}_i \bar{u}_j \end{aligned} \quad (2)$$

در اینجا، u_i مؤلفه های سرعت سیال، ρ چگالی، p فشار سیال، τ تانسور تنش برشی، $P \bar{u}_i \bar{u}_j$ تانسور تنش رینولدز است.

¹² ANSYS

¹³ FWH

¹⁴ SPL

¹⁵ MAU

¹⁶ RANS

⁸ Yasar GUL

⁹ Lee

¹⁰ Kim and Shin

¹¹ V.Rama Krishna

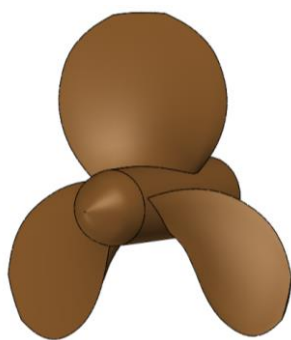
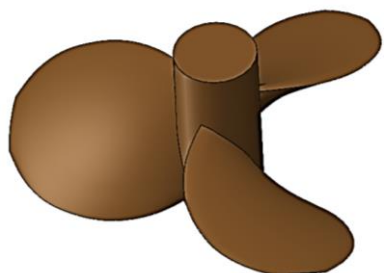
دریایی DTMB4119 است. بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و سپس صحت سنجی نتایج هیدرودینامیکی پروانه با داده های تجربی انجام شده است.

۴- اعتبارسنجی نتایج عددی

پروانه DTMB4119 یک نمونه پروانه سه پره ای بنچمارک می باشد که نتایج تحقیقات تجربی هیدرودینامیکی آن در ضرایب پیشروی مختلف موجود می باشد. هندسه پروانه در شکل ۱ نمایش داده شده است و مشخصات هندسی بیشتر در مرجع **Error! Reference source not found.** قابل دسترس می باشد.



ب



شکل ۲ الف) نمای ساخته شده از پروانه DTMB4119 **Error! Reference source not found.** ب) هندسه تولید شده سه بعدی

پروانه DTMB4119

۴-۱- دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و تنظیمات حل

دامنه محاسباتی به صورت دو هندسه استوانه ای چرخان و ثابت در نظر گرفته شده است (شکل ۲). ابعاد استوانه ثابت که در واقع دامنه محاسباتی اصلی می باشد به گونه ای در نظر گرفته شده که اثرات دیواره های میدان حل بر روی میدان جریان حول پروانه

در تحلیل هیدرودینامیکی پروانه نتایج منحنی های عملکردی پروانه که شامل ضریب تراست (K_T)، ضریب گشتاور (K_Q)، و راندمان (η_0) نسبت به ضریب پیشروی J است. مرسوم ترین و مهم ترین نتایج قابل ارائه برای سیستم رانش است. تعریف ضرایب فوق در رابطه ارائه می شود:

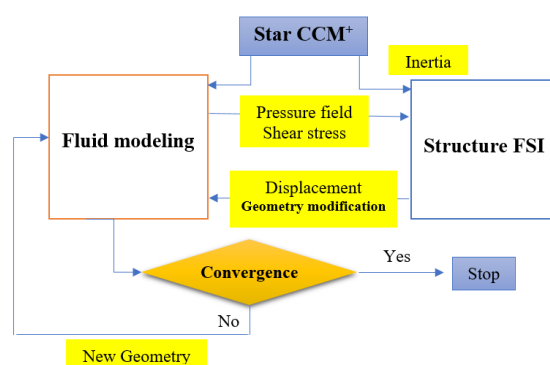
$$J = \frac{V}{nD}, \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta_0 = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (3)$$

۳- متدولوژی حل مسئله

تجزیه و تحلیل اندرکنش سیال-سازه (FSI) پروانه ها شامل درک چگونگی تأثیر جریان سیال در اطراف تیغه پروانه بر ساختار آن و بالعکس و نحوه مدل سازی این برهمکنش است. الگوریتم های متفاوتی برای شبیه سازی برهمکنش ها و تغییر شکل های پیچیده پروانه تحت بارهای هیدرودینامیکی متفاوت استفاده می شوند.

k پلت فرم قدرتمند و همه کاره برای انجام تجزیه و تحلیل سازه، به ویژه در زمینه شبیه سازی برهمکنش سیال-سازه فراهم می کند و به مهندسان اجازه می دهد تا رفتار سازه ها را تحت شرایط بارگذاری مختلف و سناریوهای محیطی تحلیل کنند.

استخراج نتایج در تحلیل عددی نیازمند مدل سازی صحیح، مش بندی مناسب، استفاده از روش مناسب با شرایط مسئله و ترتیب صحیح مراحل کار می باشد. الگوریتم کلی تحلیل عددی سیال-سازه برای پروانه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ مراحل تحلیل سیال - سازه پروانه

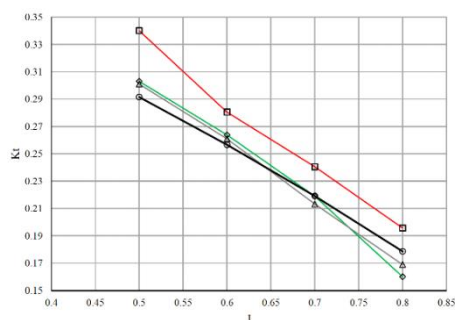
در ادامه ابتدا در مورد هندسه پروانه، دامنه حل، شبکه بندی دامنه و همچنین در مورد شرایط مرزی و سپس در مورد جزئیات شبیه سازی جریان توربولانس به منظور شبیه سازی هیدرودینامیکی و اندرکنش سازه و سیال به منظور یافتن ضرایب هیدرودینامیکی و تنش های ایجاد شده در پروانه در شرایط کاری مختلف توضیح داده خواهد شد. پروانه مورد نظر جهت اعتبارسنجی تحلیل عددی پروانه

دقت بالایی استخراج شود.

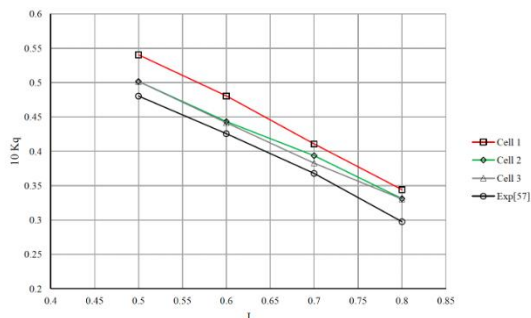
۴-۲- استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و صحت سنجی نتایج عددی پروانه DTMB4119

جواب‌های حل عددی باید مستقل از سائز، تراکم شبکه باشند. بدین منظور مقدار نیروی تراست، گشتاور و بازده برای پروانه در چندین سائز شبکه مختلف به‌دست‌آمده تا شبکه انتخاب شوند که اندازه آن روی مقدار نیروی تراست و گشتاور و حل تأثیری نداشته باشد.

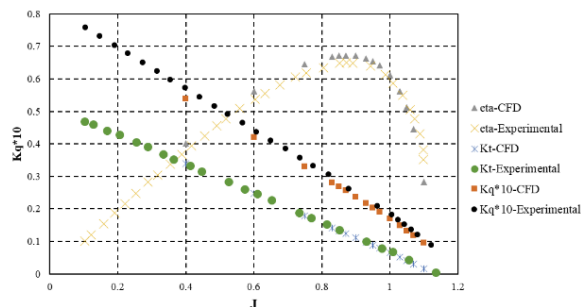
به‌منظور بررسی استقلال نتایج هیدرودینامیکی از تعداد سلول‌ها، سه نوع شبکه در نظر گرفته‌شده و ضرایب تراست و گشتاور برای هرکدام از این شبکه‌ها به‌دست‌آمده است. در نمونه اول تعداد ۱/۸ میلیون سلول، در نمونه دوم تعداد ۳/۳ میلیون سلول و در نمونه سوم تعداد ۴/۱۱ میلیون سلول در نظر گرفته‌شده است. نتایج مقایسه ضرایب تراست و گشتاور و نمودار کلی هیدرودینامیکی برای پروانه DTMB4119 به ترتیب در شکل-های ۵، ۶ و ۷ قابل مشاهده هستند.



شکل ۵ نمودار ضریب تراست در برابر تعداد شبکه محاسباتی

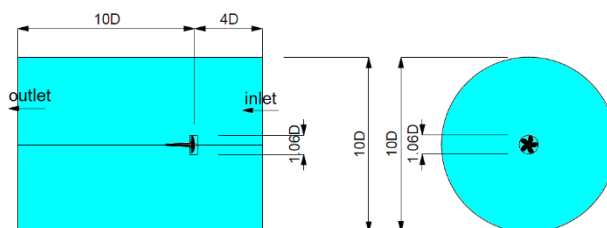


شکل ۶ نمودار ضریب گشتاور در برابر تعداد شبکه محاسباتی

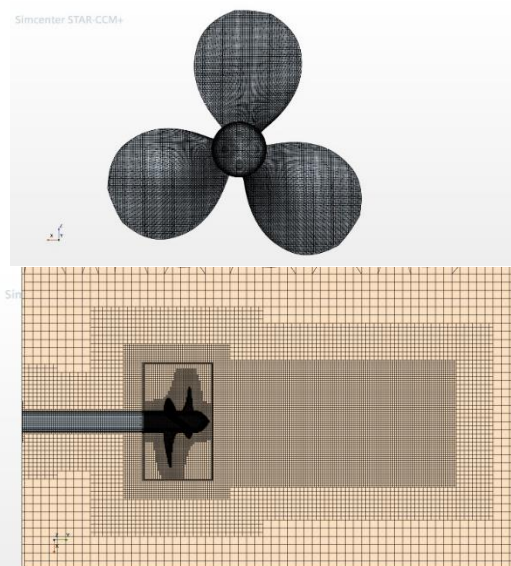


شکل ۷ مقایسه منحنی‌های عملکرد هیدرودینامیکی مدل ۴۱۱۹ DTMB با ۴ میلیون شبکه محاسباتی

حذف شود. میدان حل شامل استوانه‌ای بزرگ به شعاع پنج قطر پروانه و طول پانزده قطر پروانه می‌باشد و قطر و طول استوانه کوچک دربرگیرنده پروانه نیز به ترتیب $1/6D$ و $0/6D$ است که به‌عنوان حجم دوار در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی شامل شرط مرزی ورودی از نوع سرعت و شرط مرز خروجی از نوع فشار با فشار نسبی صفر است. مرزهای جانبی استوانه بزرگ از نوع متقارن است که دارای تنش برشی صفر است. از شرط مرزی سطح مشترک برای تمامی سطوح استوانه دوار کوچک حول پروانه استفاده شده و همچنین برای تمامی سطوح پروانه از شرط مرزی دیواره چرخان در شرایط بدون لغزش بهره گرفته شده است. دامنه محاسباتی مطابق شکل ۳ ترکیبی از دو شبکه سازمان‌یافته و بی‌سازمان است. در شبکه لایه‌مرزی از ۱۰ لایه با ضخامت لایه اول ۰/۱ میلی‌متر و با نرخ رشد ۱/۱ استفاده شده است.



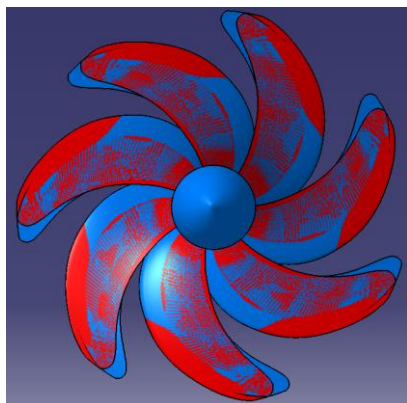
شکل ۳ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حول پروانه



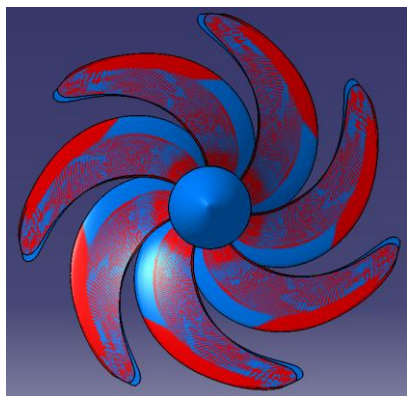
شکل ۴ لایه‌مرزی و شبکه بی‌سازمان حول پروانه

با توجه به خصوصیات آب و تعریف عدد رینولدز، عدد رینولدز از مرتبه ۱۰ میلیون است. سیال آب به‌صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است زیرا عدد ماخ کوچک‌تر از مقدار ۰/۳ است. در این شبیه‌سازی از معادلات اغتشاشی $K\omega - SST$ استفاده شده است. انتظار می‌رود با توجه به توانایی بالا این معادله در تخمین تنش‌های برشی، دقت نتایج به‌ویژه نتایج ضریب گشتاور با

Skew= 55 &
66 deg



Skew= 75 &
81 deg



شکل ۸ هندسه پروانه‌های اسکيو بالا با زوایای مختلف اسکيو

دامنه حل در این حالت برای پروانه‌های اسکيو بالا نیز مانند بخش قبل متشکل از دو استوانه، یکی چرخان و دیگری ثابت است. برای ابعاد دامنه محاسباتی نیز قطر استوانه خارجی ۱۰ برابر قطر پروانه و طول آن ۲۰ برابر قطر پروانه می‌باشد به‌گونه‌ای که دیواره‌های جانبی بر میدان حل حول پروانه بی‌تأثیر می‌باشند. برای محاسبه دقیق تنش برشی در لایه مرزی از ۱۰ لایه استفاده شده است و ضخامت اولین لایه ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. حل به‌صورت گذرا با بازه زمانی ابتدا ۰/۰۰۵ و در ادامه ۰/۰۰۱ ثانیه انجام شده که در هر بازه زمانی ۱۵ مرتبه حل تکرار می‌شود. مدل اغتشاشی جهت شبیه‌سازی جریان مدل $K - \omega SST$ می‌باشد. نتایج پس از ۲۰ دور چرخش پروانه استخراج شده است. سائز شبکه تولیدی بر روی سطح پروانه جهت تحلیل هیدرودینامیکی از ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر برای تحلیل سازه ای ۲ میلی‌متر می‌باشد.

مبنای حل در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام به روش حجم محدود برای حل سیالاتی و المان محدود برای حل‌های سازه‌ای است. گسسته‌سازی معادلات در روش حجم محدود از مرتبه دوم و با به‌کارگیری الگوریتم آپ ویند^{۱۷} مرتبه دوم صورت گرفته است. جهت کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل سی استفاده

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است تحقیقات صورت گرفته در پژوهش حاضر با نتایج تجربی از تطابق خوبی برخوردار است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، معادلات $K\omega - SST$ برای شبیه‌سازی پروانه‌های مغروق بسیار مناسب بوده و ضرایب هیدرودینامیکی پروانه را با دقت زیر ۲ درصد شبیه‌سازی می‌کند.

۵- تحلیل هیدروالاستیک پروانه‌های اسکيو بالا در زوایای مختلف اسکيو

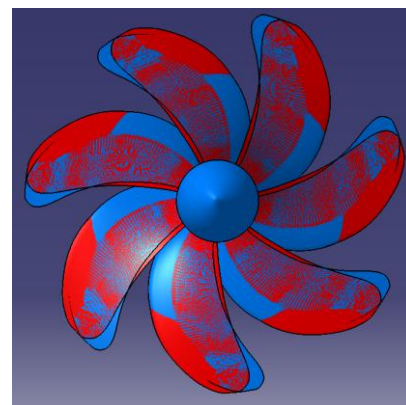
در این بخش هندسه پروانه‌های اسکيو بالا در زوایای مختلف اسکيو تولید شده است و نتایج ضرایب هیدرودینامیکی و تنش و کرنش هیدروالاستیسیته تحت شرایط جریانی مختلف استخراج شده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی پروانه اسکيو بالا ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی پروانه اسکيو بالا

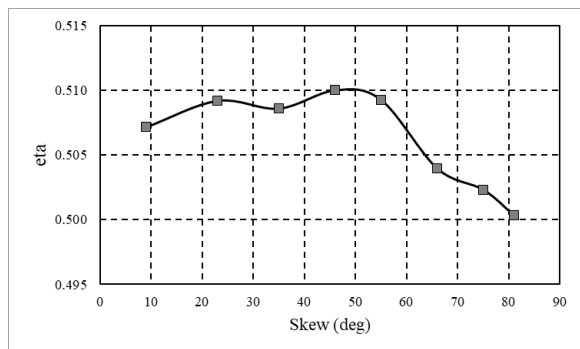
نوع پروانه	اسکيو بالا
قطر پروانه (متر)	۰/۱۷
نسبت گام به قطر	۱
تعداد پره‌ها	۷ پره

با توجه به پروانه‌های زیردریایی موردبررسی و پروانه‌های مشابه بهینه، زاویه اسکيو بین ۹ تا ۸۱ درجه محدوده مناسب عملکرد هیدرودینامیکی و هیدروالاستیسیته را شامل می‌شود. بر این اساس محدوده تغییرات نسبت گام به‌صورت زیر خواهد بود.

Skew= 35 &
46 deg



¹⁷ Upwind



شکل ۱۱ نمودار راندمان هیدرودینامیکی برحسب زاویه اسکيو در ضريب پيشروي ۰/۵

بر اساس شکل ۹، فرمول رگرسيونی برای ضريب تراست، گشتاور و بازده برحسب زاویه اسکيو و ضريب پيشروي برای روانه موردنظر به روش DOE ارائه شده است.

$$Kt = -(6E - 11)(Skew^5) + (1E - 08)(Skew^4) - (1E - 06)(Skew^3) + (5E - 05)(Skew^2) - 0.0007(Skew) + 0.0436 \quad (5)$$

$$Kq = (3E - 12)(Skew^5) - (6E - 10)(Skew^4) + (3E - 08)(Skew^3) - (7E - 07)(Skew^2) + (1E - 05)(Skew) + 0.0117 \quad (6)$$

$$\eta = (2E - 09)(Skew^4) - (2E - 07)(Skew^3) - (1E - 05)(Skew^2) + 0.0011(Skew) + 0.3742 \quad (7)$$

با توجه به شکل ۹، می توان گفت مقدار ضريب تراست از زاویه اسکيو ۹ درجه تا ۳۵ درجه افزایش می يابد ولی از زاویه ۳۵ به بعد افت خواهد کرد که این امر یعنی یک مقدار بهينه ای از نظر تراست با تغيير دادن زاویه اسکيو به وجود می آید که برای همه پروانه ها باید این موضوع بررسی شود. با توجه به شکل ۹، با افزایش زاویه اسکيو، مقدار ضريب گشتاور نیز همین رفتار مشاهده می شود. پروانه های اسکيودار باعث می شوند که جریان ورودی به پروانه، به صورت تدریجی وارد شود و از این رو نیروهای ناپایای تولید شده در ویک متغیر تا حدودی پایدار و یکنواخت شود که باعث کاهش بازدهی می گردد و همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است مقدار بازدهی پروانه ها در ضريب پيشروي ۰/۵ بیشینه است و با افزایش زاویه اسکيو مقدار بازدهی پروانه در این ضريب پيشروي رو به کاهش است. پروانه های اسکيودار باعث می شوند که جریان ورودی به پروانه، به صورت تدریجی وارد شود که باعث کاهش بازدهی می گردد و همان طور که در بالا نشان داده شده است مقدار

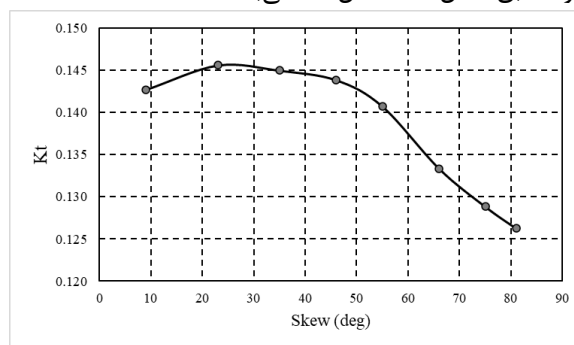
می شود. روش خطی سازی روش ضمنی^{۱۸} مرتبه دوم است و برای میان یابی فشار نیز از مرتبه دوم استفاده شده است.

برای حل معادلات هیدرودینامیکی از تعداد ۴ میلیون سلول محاسباتی و حل سازه ای از تعداد نزدیک ۱ میلیون مش استفاده شده است.

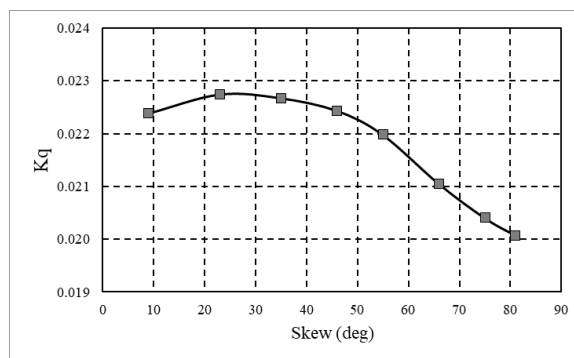
عدد کورانت^{۱۹} معیاری در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی^{۲۰} است که نشان می دهد یک گام زمانی چه حد با توجه به سرعت جریان و اندازه المان شبکه مناسب است. در روش های ضمنی^{۲۱}، محدودیت سختی روی Δt وجود ندارد، اما افزایش بیش از حد آن می تواند دقت را کاهش دهد.

۵-۱- ضرایب هیدرودینامیکی و نتایج عددی پروانه اسکيو بالا

ضرایب پيشروي، ممنتوم و بازدهی پروانه در زوایای مختلف اسکيو مطابق شکل ۹ تا شکل ۱۱ می باشد.



شکل ۹ نمودار ضريب تراست برحسب زاویه اسکيو در ضريب پيشروي ۰/۵



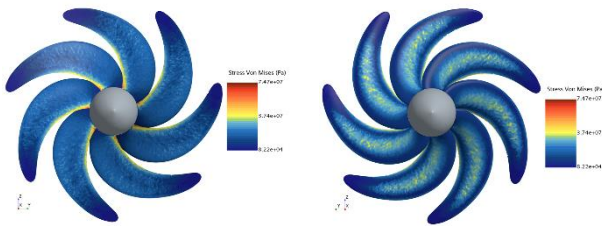
شکل ۱۰ نمودار ضريب گشتاور برحسب زاویه اسکيو در ضريب پيشروي ۰/۵

¹⁸ Implicit

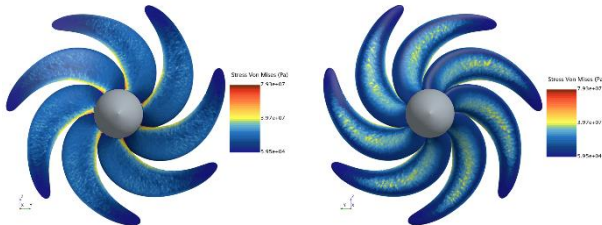
¹⁹ Courant Number

²⁰ PDE

²¹ Implicit



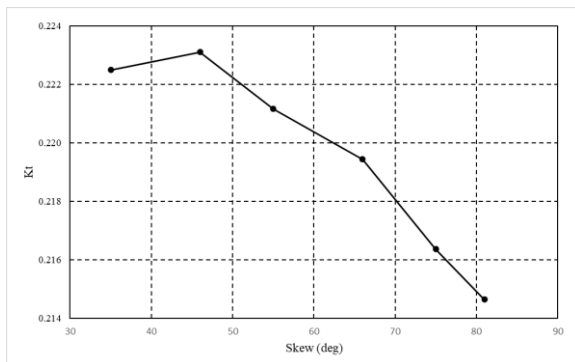
زاویه اسکيو ۷۵ درجه



زاویه اسکيو ۸۱ درجه

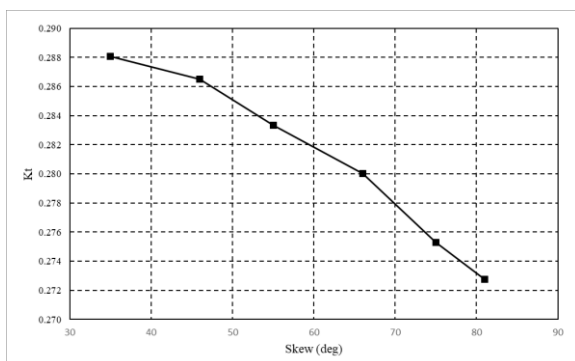
شكل ۱۲ کانتور تنش بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه

در ادامه نتایج حاصل تحلیل اندرکنش سازه و سیال را در ضریب پیشروی ۰/۴ برای تمام پروانه‌ها با اسکيوهای مختلف ارائه شده است.



شكل ۱۳ نمودار ضریب پیشروی در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و

ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکيو متفاوت

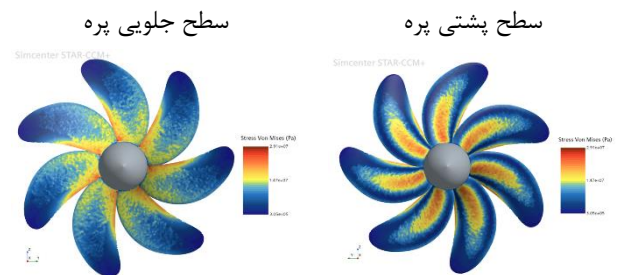


شكل ۱۴ نمودار ضریب گشتاور در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و

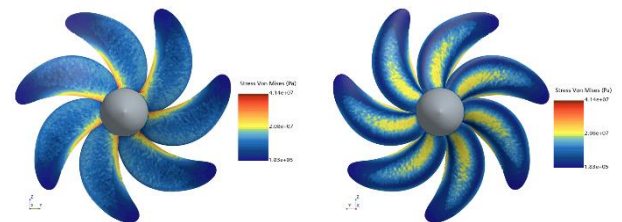
ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکيو متفاوت

بازدهی پروانه‌ها در ضریب پیشروی ۰/۵، با افزایش زاویه اسکيو تا ۴۶ درجه مقدار بازدهی پروانه افزایش یافته و بعد از این زاویه اسکيو به بعد، بازده پروانه در این ضریب پیشروی رو به کاهش است.

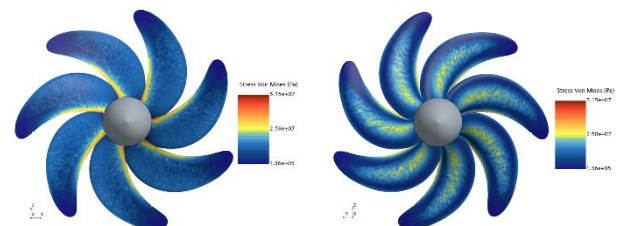
۲-۵- تحلیل‌های هیدروالاستیک و نتایج عددی پروانه اسکيو بالا
با توجه به اینکه پروانه‌ها از زاویه ۳۵ درجه به بعد از نظر هیدرودینامیکی بسیار مناسب است، برای تحلیل‌های هیدروالاستیسیته، از زوایای ۳۵ درجه تا ۸۱ درجه در ضریب پیشروی ۰/۴ پرداخته می‌شود. با بررسی کانتور تنش بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه‌های با زوایای اسکيو مختلف مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اسکيو، تنش وون میزز هم افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ توزیع تنش بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه ۶ پره را نشان می‌دهد. این افزایش تنش به‌ویژه در سطح جلویی پره تأثیرگذار بوده و کاملاً مشهود می‌باشد.



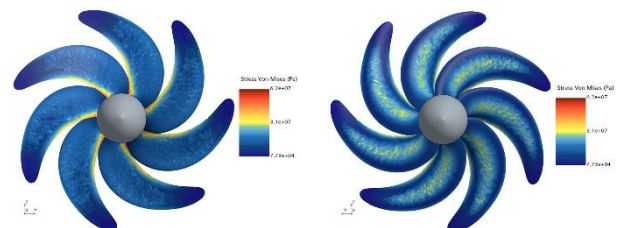
زاویه اسکيو ۳۵ درجه



زاویه اسکيو ۴۶ درجه



زاویه اسکيو ۵۵ درجه



زاویه اسکيو ۶۶ درجه

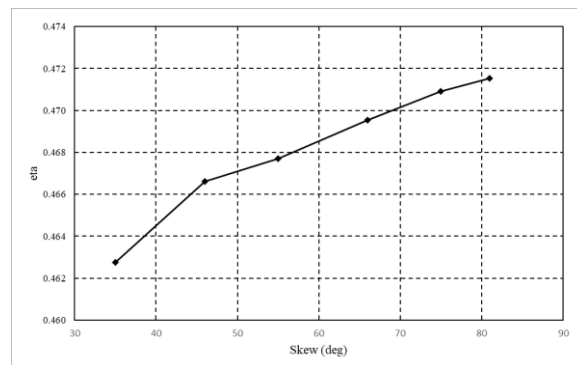
نواحی نزدیک به سطوح پروانه و در ناحیه ویک ناشی از پره‌ها، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده نمود. مبنای حل در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام به روش حجم محدود است. گسسته سازی معادلات در روش حجم محدود از مرتبه دوم و با به کارگیری الگوریتم آب ویند مرتبه دوم صورت گرفته است. جهت کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل سی استفاده می‌شود. روش خطی سازی روش ضمنی مرتبه دوم است و برای میانمایی فشار نیز از مرتبه دوم استفاده شده است. همچنین اغتشاشات جریان با استفاده از مدل آشفتگی $K\omega - SST$ مدل شده‌اند. کلیه مقایسات برای نمودارهای سطح فشار صوت برای هیدروفون موجود در فاصله $5R$ در روبروی هاب و صفحه چرخش می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی عددی در قسمت تأثیرات پارامترهای هندسی بر منحنی عملکرد هیدرودینامیکی بدین گونه است با توجه به تغییرات زاویه اسکيو، می‌توان گفت مقدار ضریب تراست از زاویه اسکيو ۹ درجه تا ۳۵ درجه افزایش می‌یابد ولی از زاویه ۳۵ درجه به بعد افت خواهد کرد که این امر یعنی یک مقدار بهینه‌ای از نظر تراست با تغییر دادن زاویه اسکيو به وجود می‌آید که برای همه پروانه‌ها باید این موضوع بررسی شود. با افزایش زاویه اسکيو، مقدار ضریب گشتاور نیز همین روند را می‌توان مشاهده نمود. پروانه‌های اسکيودار باعث می‌شوند که جریان ورودی به پروانه، به صورت تدریجی وارد شود که باعث کاهش بازدهی می‌گردد، بنابراین زاویه ۳۵ درجه بیشترین بازده را تولید می‌نماید. همچنین برای اطمینان از مطالب ارائه شده در بخش هیدرودینامیکی، فرمول‌های رگرسیونی ارائه شده است که این فرمول‌ها مطالب مربوط به بخش هیدرودینامیکی را مورد تأیید قرار می‌دهند.

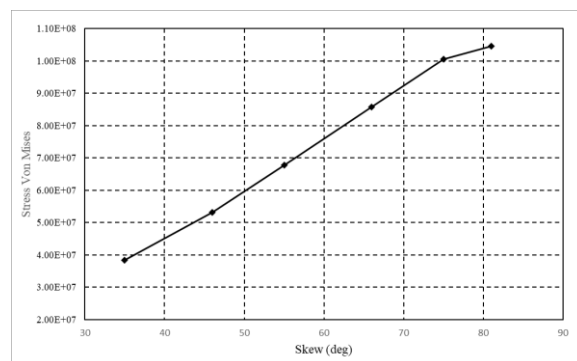
بر اساس نتایج هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل‌های عددی پروانه با اسکيو ۴۶ درجه مناسب‌ترین پروانه می‌باشد. با توجه به تنش‌های حاصل از شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال بیشینه تنش در ریشه پروانه و به میزان 53 مگاپاسکال است. این میزان از تنش فاصله بسیار زیادی با تنش تسلیم مواد فلزی مانند فولاد زنگ نزن، فسفر برنز و همچنین رزین اپوکسی داشته و این بدین معنی است که برای تست تجربی این پروانه در تونل کاویتاسیون و ساخت این پروانه با استفاده از رزین هیچ‌گونه مشکلی ندارد.

فهرست علائم

D	قطر پروانه [m]
d	فاصله هیدروفون تا پروانه [m]
f	نیروهای حجمی [N]
J	ضریب پیشروی [-]
K_Q	ضریب گشتاور [-]
K_T	ضریب تراست [-]
n	سرعت دورانی [rpm]
P	فشار استاتیکی [Pa]
P/D	نسبت گام به قطر پروانه [-]



شکل ۱۵ نمودار بازده در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکيو متفاوت



شکل ۱۶ نمودار تنش بیشینه در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکيو متفاوت

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس نتایج هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل‌های عددی، پروانه با زاویه اسکيو ۴۶ درجه مناسب‌ترین پروانه می‌باشد. با توجه به تنش‌های حاصل از شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال بیشینه تنش در ریشه پروانه و به میزان 53 مگاپاسکال است. این میزان از تنش فاصله بسیار زیادی با تنش تسلیم مواد فلزی مانند فولاد زنگ نزن، فسفر برنز و همچنین رزین اپوکسی داشته و این بدین معنی است که برای تست تجربی این پروانه در تونل کاویتاسیون و ساخت این پروانه با استفاده از رزین هیچ‌گونه مشکلی ندارد.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحلیل عددی اندرکنش سازه و سیال یکی از موضوعات کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی پروانه‌های دریایی است. این پروانه‌ها نقش حیاتی در عملکرد کشتی‌ها و زیردریایی‌ها دارند و تأثیر مستقیمی بر راندمان، مصرف انرژی و عمر مفید سازه دارند. اندرکنش میان نیروی سیال و پاسخ دینامیکی پروانه باعث ایجاد پدیده‌های پیچیده‌ای مانند کاویتاسیون، ارتعاشات و نویز می‌شود که می‌تواند بر عملکرد کلی سیستم تأثیر منفی بگذارد. درک و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها، ابزاری قدرتمند برای بهبود طراحی و کاهش هزینه‌های عملیاتی فراهم می‌کند.

در شبیه‌سازی عددی، به‌منظور رسیدن به جوابی با دقت قابل قبول، باید در مناطقی که گرادیان سرعت زیاد است مانند

- Iranian Marine Engineering Society, November 2007. (In Persian)
- 9- Yasar GUL, Levent Kaydihan, "Global Vibration Analysis of A Capacity Container Ship", 1900 Teu
- 10- Sing-Kwan Lee, Min Liao, and Suqiu Wang, "Propeller Induced Hull Vibration – Analytical Methods", American Bureau. of Shipping, 2006
- 11- Sunghoon Kim, Sangjoon Shin "Improved unsteady fluid–structure interaction analysis using the dynamic mode decomposition on a composite marine propeller ", Ocean Engineering, Volume 319, 1 March 2025, 120255
- 12- V. Rama Krishna, Srinivas Prasad Sanaka, N. Pardhasaradhi, B. Raghava Rao, "Hydro-elastic computational analysis of a marine propeller using two-way fluid structure interaction" , Journal of Ocean Engineering and Science, Volume 7, Issue 3, June 2022, Pages 280-291
- 13- M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically. I. General theory," in Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1952, vol. 211, no. 1107, pp. 564-587: The Royal Society.
- 14- R. D. Cook, Finite Element Modeling for Stress Analysis: Wiley, 1994.
- 15- M. Gorji, H. Ghassemi, and J. Mohamadi, "Effect of Rake and Skew on the Hydrodynamic Characteristics and Noise Level of the Marine Propeller," Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, pp. 1-11, 2017
- 16- Ehsan Yari, Hassan Ghassemi, (2013), Numerical analysis of sheet cavitation on marine propellers, considering the effect of cross flow, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 5: 546-558

Q	گشتاور [N.m]
R	شعاع پروانه [m]
SPL	سطح فشار صوت [db]
T	تراست [N]
V	سرعت [m/s]
η	راندمان هیدرودینامیکی [-]
ρ	چگالی [kg/m ³]
μ	ویسکوزیته دینامیکی [Pa.sec]
θ	زاویه با راستای جریان سیال [deg]

۸- مراجع

- 1- M. S. Bopp, "A Time Accurate Fluid-Structure Interaction Framework Using a Cartesian Grid CFD Solver," Ph. D. thesis, Georgia Institute of Technology, 2017.
- 2- J. E. Brooks, "Vibrations of a Marine Propeller Operating in a Nonuniform Inflow," David W Taylor Naval Ship Research and Development Center Bethesda Md, 1980.
- 3- P. Castellini and C. Santolini, "Vibration Measurements on Blades of Naval Propeller Rotating in Water," in Proceedings-Spie the International Society for Optical Engineering, pp.186-195, 1996.
- 4- J.H. Chen and Y.S. Shih, "Basic Design of a Series Propeller with Vibration Consideration by Genetic Algorithm," Journal of Marine Science and Technology, Vol.12, pp.119-129, 2007.
- 5- Y. Hong, X. He, and R. Wang, "Vibration and Damping Analysis of a Composite Blade," Materials & Design, Vol.34, pp.98-105, 2012.
- 6- Y.S. Wei, Y.S. Wang, S.P. Chang, and F. Jian, "Numerical Prediction of Propeller Excited Acoustic Response of Submarine Structure based on CFD, FEM and BEM," Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Vol.24, pp.207-216, 2012.
- 7- Valioallah Alizadeh and Ali Zinati, "Hydrodynamic Analysis of Submerged Hull, Propeller and Hull-Propeller Interaction", 9th Marine Industries Conference, Iranian Marine Engineering Society, November 2007.(In Persian)
- 8- Mehdi Rayshahri, Mohammad Saeed Seif, "Investigation of Propeller Performance in a Floating Wake Field Using Computational Fluid Dynamics", 9th Marine Industries Conference,