J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 47, 2025. (14-24)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

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

**Ehsan Yari[1*], Mohammad Hossein Karimi[2], Kamin Saberizad[3]**

[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:** http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.2
**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/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۷، ۱۴۰۴، (۲۴-۱۴)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

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

**احسان یاری[۱*]، محمدحسین کریمی[۲]، کامین صابری زاد[۳]**

[۱]استادیار/ مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ehsanyari11@gmail.com

[۲]استادیار/ مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، Mhkcom480@yahoo.com

[۳]دانشجوی دکتری تبدیل انرژی/ مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، kamin.saberi@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه 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 اسکیو

هیدروالاستیسیته

تنش وون‌میزز

دینامیک سیالات محاسباتی

پروانه اسکیو بالا

**چکیده**

هدف از این مقاله تحلیل عددی عملکرد هیدرودینامیکی و آنالیز هیدروالاستیسیته پروانه کاملاً مغروق در زوایای اسکیو 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 اسکیو 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 اسکیو ۳۵ تا ۸۱ درجه انتخاب شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش زاویه اسکیو، 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 اسکیو میزان راندمان هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد.

ISSN: 2645-8136

**DOI:** http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.2

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

## ۱ - مقدمه

مفهوم برهم‌کنش سیال و سازه[1] به تعامل میان یک ساختار جامد تغییرپذیر و سیال پیرامون یا درون آن اشاره دارد. هنگامی‌که 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 [1].

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[2] و تحلیل اجزای محدود[3]، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار پروانه‌ها در شرایط مختلف عملیاتی فراهم‌شده 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 نه‌تنها 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[2].

کاستلینی و سانتولینی[4] 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 [3].

چن و شیه[5] ارتعاشات مجموعه‌ای از پروانه‌ها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند. ازآنجاکه 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 [4].

هونگ[6] 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[5].

وی[7] 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 به‌طورجدی احساس می‌شود[6].

علیزاده و همکاران میدان جریان اطراف بدنه زیردریایی و تأثیر متقابل پروانه و بدنه را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه شامل بررسی اثر متقابل پروانه با بدنه زیردریایی، همراه با ملحقات و سطوح کنترل بود[7].

---

[1] FSI
[2] CFD
[3] FEM
[4] Castellini and Santolini
[5] Chen and Shih
[6] Hong
[7] Wei

ری‌شهری و همکاران با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار فلوئنت، جریان یک پروانه دریایی را مدل‌سازی کردند. آن‌ها مشخصات عملکردی پروانه و جریان ویک را به‌صورت عددی به دست آوردند و نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند که همخوانی خوبی میان آن‌ها مشاهده شد[8].

گل[8] و همکاران ارتعاشات اجباری یک شناور کانتینربر را در اثر تحریک دینامیکی ناشی از موتور و تحریک تراست پروانه (بر اثر بار فشاری روی پروانه) بررسی کردند. آن‌ها ابتدا فرکانس‌های طبیعی سازه را استخراج کرده و سپس بیشینه سرعت ارتعاشی ناشی از حالات بارگذاری مختلف را محاسبه نمودند. درنهایت، نتایج به‌دست‌آمده را با استاندارد ارتعاشات شناور ایزو ۶۹۵۴ مقایسه کردند[9].

لی[9] و همکاران با استفاده از روش تحلیل عددی و نرم‌افزارهای MPUF3A، RANS و Ship-pro، ارتعاشات بدنه شناور را در اثر تحریک پروانه بررسی کردند. آن‌ها ارتعاشات ناشی از ویک پروانه را برای بارهای هارمونیک هر یک از پره‌های پروانه استخراج کرده و مقادیر سرعت ارتعاش بدنه را در جهت‌های مختلف مختصات به‌دست آوردند [10].

در سال ۲۰۲۵ کیم و شینگ[10] به مطالعه تحلیل برهم‌کنش سیال و سازه در پروانه‌ی کامپوزیتی دریایی با استفاده از تجزیه مدهای دینامیکی پرداخته‌اند. این مطالعه یک روش سریع برای تحلیل برهم‌کنش سیال و سازه در پروانه‌های کامپوزیتی دریایی ارائه می‌دهد که تغییر شکل تیغه‌ها را در نظر می‌گیرد. برای بهینه‌سازی محاسبات، روش المان مرزی اصلاح‌شده، ترکیب مد سازه‌ای، و الگوریتم شبه-نیوتن به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که این روش، ضمن حفظ دقت، زمان محاسباتی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد[11].

کریشنا[11] در سال ۲۰۲۲ به تحلیل محاسباتی هیدروالاستیک پروانه دریایی با استفاده از برهم‌کنش دوطرفه سیال و سازه پرداخته است. این مطالعه به بررسی تحلیل دوطرفه‌ی برهم‌کنش سیال و سازه در پروانه‌ی دریایی DTMB-4119 با قطر ۰/۲ متر، با استفاده از نرم‌افزار انسیس[12] می‌پردازد. برای تحلیل، روش کوپلینگ سیستمی به‌کار گرفته شده که داده‌ها را بین حلگرهای سازه‌ای و سیالی انتقال می‌دهد. مدل آشفتگی گردابه های بزرگ برای شبیه‌سازی جریان و مدل فاکس ویلیام[13] برای ارزیابی فشار صوتی[14] ناشی از پروانه استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی عملکرد هیدرودینامیکی با داده‌های تجربی، پاسخ هیدروالاستیک و آکوستیک بررسی شد. نتایج تحلیل دوطرفه برهم‌کنش سیال و سازه با تحلیل یک‌طرفه مطابقت دارد اما می‌تواند مقدار اوج تنش و تغییر شکل را در ابتدای حل گذرا به‌دقت در نظر بگیرد که برای طراحی پروانه مهم است. این پژوهش نشان می‌دهد که پروانه‌ی فلزی را می‌توان با پروانه‌ی کامپوزیتی جایگزین کرد و تحلیل آکوستیکی دوطرفه، به دلیل در نظر گرفتن اثرات هیدروالاستیک، نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد[12].

هدف از مطالعه حاضر تحلیل عددی اندرکنش سازه و سیال پروانه سری استاندارد مائو[15] با کاربرد در شناورهای زیرسطحی می‌باشد. بدین منظور چند هندسه پروانه با زوایای اسکیو مختلف تولید شده و تحت شرایط جریانی یکسان به‌منظور 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 میانگین‌گیری رینولدز[16]، میدان جریان با حل معادلات پیوستگی و مومنتوم تعیین می‌شود. این معادلات به ترتیب در روابط (۱) و (۲) ارائه‌شده است[13].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_i) = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\delta}{\delta x_j}\left(\rho u_i u_j\right) = \frac{\delta}{\delta x_j}\left(\tau_{ij}\right) - \frac{\delta P}{\delta x_j} + \rho g_i - P\overline{u_i}\,\overline{u_j} \qquad (۲)$$

در اینجا $u_i$، مؤلفه‌های سرعت سیال، $\rho$ چگالی، p فشار سیال، $\tau$ تانسور تنش برشی، $P\overline{u_i}\,\overline{u_j}$ تانسور تنش رینولدز است.

در تحلیل هیدرودینامیکی پروانه نتایج منحنی‌های عملکردی پروانه که شامل ضریب تراست ($K_T$)، ضریب گشتاور ($K_Q$)، و راندمان ($\eta_0$) نسبت به ضریب پیشروی J است. مرسوم‌ترین و مهم‌ترین نتایج قابل‌ارائه برای سیستم رانش است. تعریف ضرایب فوق در رابطه ارائه می‌شود:

$$J = \frac{V}{nD}, \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta_0 = \frac{J}{2\pi}\frac{K_T}{K_Q} \qquad (۳)$$

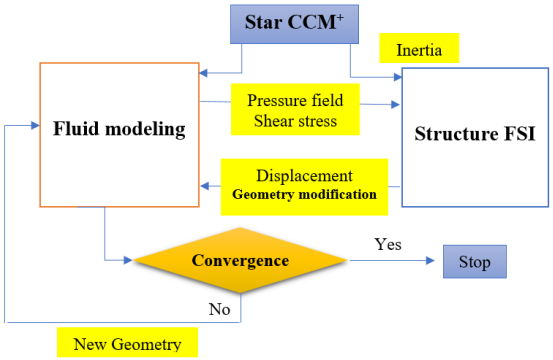
[8] Yasar GUL
[9] Lee
[10] Kim and Shin
[11] V.Rama Krishna
[12] ANSYS
[13] FWH
[14] SPL
[15] MAU
[16] RANS

## 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 .الگوریتم‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی برهم‌کنش‌ها و تغییر شکل‌های پیچیده پروانه تحت بارهای هیدرودینامیکی متفاوت استفاده می‌شوند.

k پلت فرم قدرتمند و همه کاره برای انجام تجزیه و تحلیل سازه، به ویژه در زمینه شبیه‌سازی برهمکنش سیال-سازه فراهم می‌کند و به مهندسان اجازه می‌دهد تا رفتار سازه‌ها را تحت شرایط بارگذاری مختلف و سناریوهای محیطی تحلیل کنند.

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

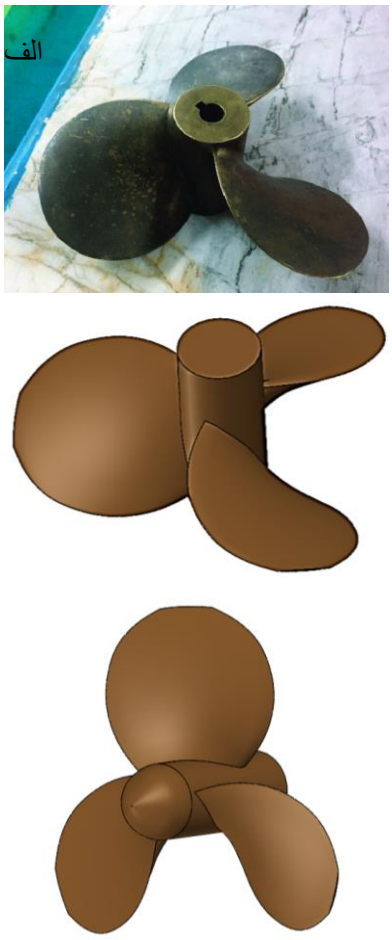



**شکل ۱ مراحل تحلیل سیال - سازه پروانه**

در ادامه ابتدا در مورد هندسه پروانه، دامنه حل، شبکه‌بندی دامنه و همچنین در مورد شرایط مرزی و سپس در مورد جزئیات شبیه‌سازی جریان توربولانس به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و اندرکنش سازه و سیال به منظور یافتن ضرایب هیدرودینامیکی و تنش‌های ایجاد شده در پروانه در شرایط کاری مختلف توضیح داده خواهد شد. پروانه موردنظر جهت اعتبارسنجی تحلیل عددی پروانه 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 پره‌ای بنچمارک می‌باشد که نتایج تحقیقات تجربی هیدرودینامیکی آن در ضرایب پیشروی مختلف موجود می‌باشد. هندسه پروانه در شکل ۱ نمایش داده شده است و مشخصات هندسی بیشتر در مرجع [14] قابل‌دسترس می‌باشد.

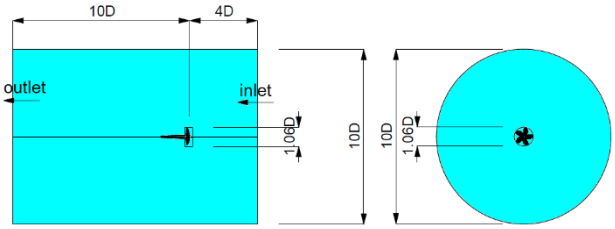



**شکل ۲ الف) نمای ساخته‌شده از پروانه DTMB4119 [3] ب)هندسه تولید شده سه‌بعدی پروانه DTMB4119**

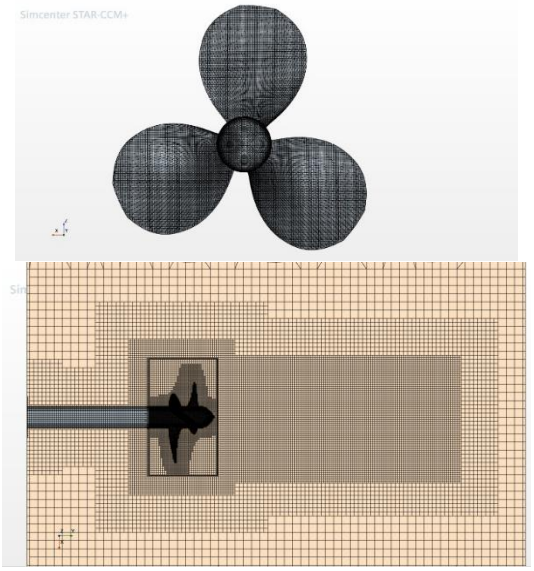
### ۴-۱-دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و تنظیمات حل

دامنه محاسباتی به‌صورت دو هندسه استوانه‌ای چرخان و ثابت در نظر گرفته شده است(شکل۲). ابعاد استوانه ثابت که درواقع دامنه محاسباتی اصلی می‌باشد به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده که اثرات دیواره‌های میدان حل بر روی میدان جریان حول پروانه 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 ۱/۰۶D و ۰/۶D 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 شکل۳ ترکیبی از دو شبکه سازمان‌یافته و بی‌سازمان است. در شبکه لایه‌مرزی از ۱۰ لایه

باضخامت 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**

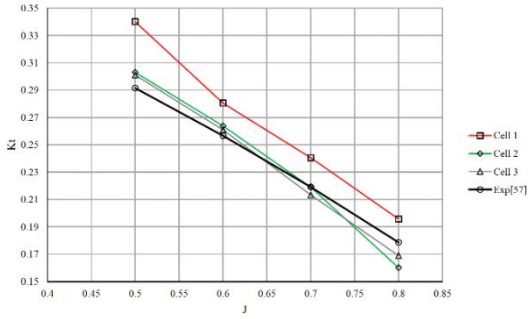
با توجه به خصوصیات آب و تعریف عدد رینولدز، عدد رینولدز از مرتبه ۱۰ میلیون است. سیال آب به‌صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است زیرا عدد ماخ کوچک‌تر از مقدار ۰/۳ است.

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 دقت بالایی استخراج شود.

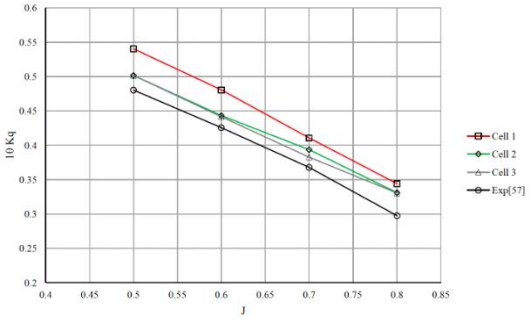
## ۴-۲-استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و صحت سنجی نتایج عددی پروانه DTMB4119

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

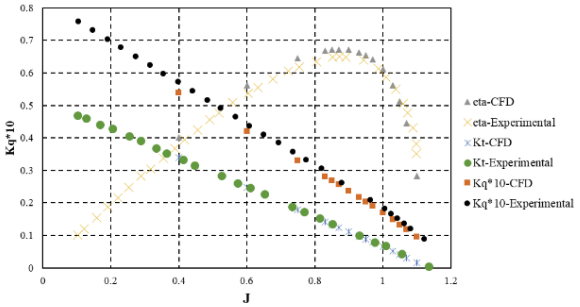
به‌منظور بررسی استقلال نتایج هیدرودینامیکی از تعداد سلول‌ها، سه نوع شبکه در نظر گرفته‌شده و ضرایب تراست و گشتاور برای هرکدام از این شبکه‌ها به‌دست‌آمده است. در نمونه اول تعداد ۱/۸ میلیون سلول، در نمونه دوم تعداد ۳/۳ میلیون سلول و در نمونه سوم تعداد ۴/۱۱ میلیون سلول در نظر گرفته‌شده است. نتایج مقایسه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

همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده‌شده 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.

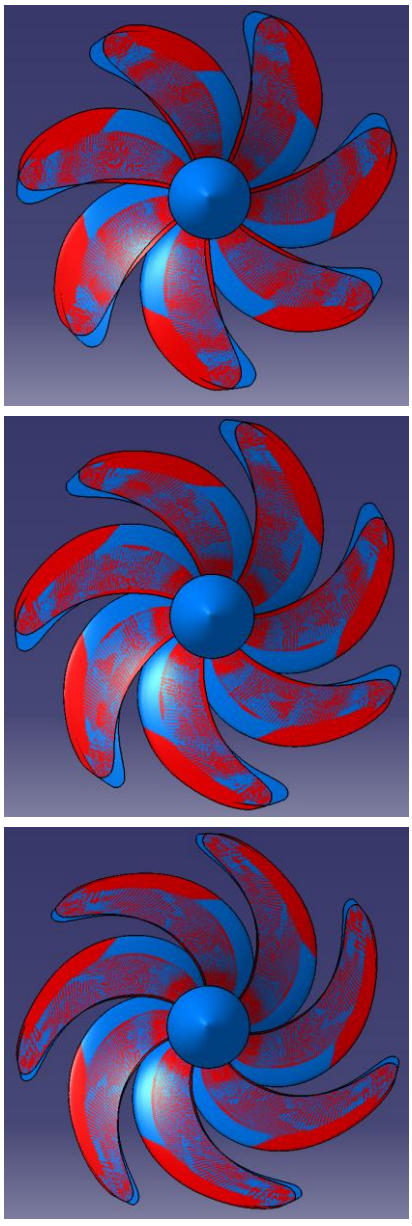
## ۵-تحلیل هیدروالاستیک پروانه‌های اسکیو بالا در زوایای مختلف اسکیو

در این بخش هندسه پروانه‌های اسکیو بالا در زوایای مختلف اسکیو 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 اسکیو بالا ارائه شده است.

**جدول ۱- مشخصات هندسی پروانه اسکیو بالا**

| نوع پروانه | اسکیو 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 اسکیو 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.




**شکل ۸ هندسه پروانه‌های اسکیو بالا با زوایای مختلف اسکیو**

دامنه حل در این حالت برای پروانه‌های اسکیو 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 لایه‌مرزی از ۱۰ لایه استفاده شده است و ضخامت اولین لایه ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. حل به‌صورت گذرا با بازه زمانی ابتدا ۰/۰۰۰۵ 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. سایز شبکه تولیدی بر روی سطح پروانه جهت تحلیل هیدرودینامیکی از ۰/۵ تا ۱ میلی متر برای تحلیل سازه ای ۲ میلی متر می باشد.

مبنای حل در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام به روش حجم محدود برای حل سیالاتی و المان محدود برای حل‌های سازه‌ای است. گسسته سازی معادلات در روش حجم محدود از مرتبه دوم و با به‌کارگیری الگوریتم آپ ویند[17] مرتبه دوم صورت گرفته است. جهت کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل سی استفاده می‌شود. روش خطی سازی روش ضمنی[18] مرتبه دوم است و برای میان‌یابی فشار نیز از مرتبه دوم استفاده‌شده است.

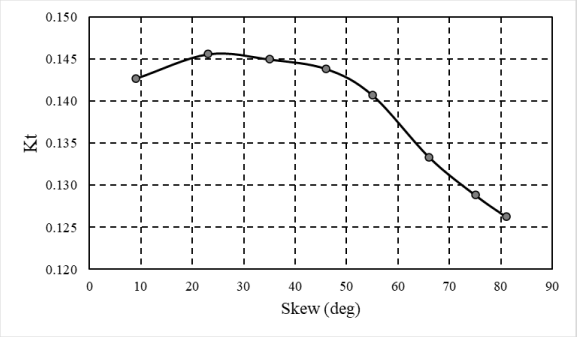
برای حل معادلات هیدرودینامیکی از تعداد ۴ میلیون سلول محاسباتی و حل سازه‌ای از تعداد نزدیک ۱ میلیون مش استفاده شده است.

عدد کورانت[19] معیاری در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی[20] است که نشان می‌دهد یک گام زمانی چه حد با توجه به سرعت جریان و اندازه المان شبکه مناسب است. در روش‌های ضمنی[21]، محدودیت سختی روی $\Delta t$ وجود ندارد، اما افزایش بیش از حد آن می‌تواند دقت را کاهش دهد.

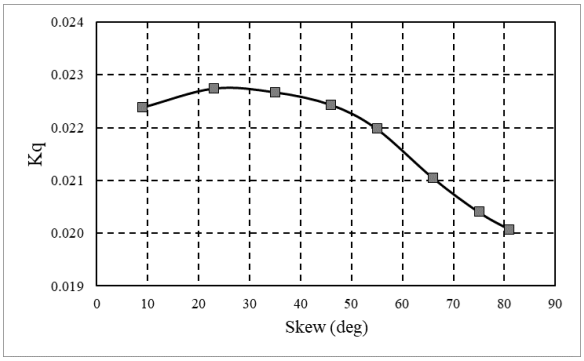
### ۵-۱- ضرایب هیدرودینامیکی و نتایج عددی پروانه اسکیو بالا

ضرایب پیشروی، ممنتوم و بازدهی پروانه در زوایای مختلف اسکیو مطابق شکل ۹ تا شکل ۱۱ می‌باشد.

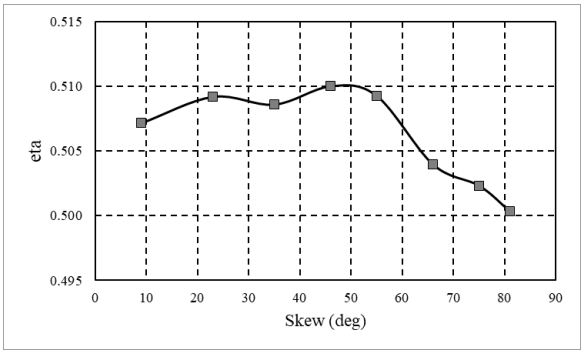
[17] Upwind
[18] Implicit
[19] Courant Number
[20] PDE
[21] Implicit




**شکل ۹ نمودار ضریب تراست برحسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی ۰/۵**




**شکل ۱۰ نمودار ضریب گشتاور برحسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی ۰/۵**




**شکل ۱۱ نمودار راندمان هیدرودینامیکی برحسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی ۰/۵**

بر اساس شکل ۹، فرمول رگرسیونی برای ضریب تراست، گشتاور و بازده برحسب زاویه اسکیو و ضریب پیشروی برای روانه موردنظر به روش DOE ارائه‌شده است.

$$Kt = -(6E-11)(Skew^5) + (1E-08)(Skew^4) - (1E-06)(Skew^3) + (5E-05)(Skew^2) - 0.0007(Skew) + 0.0436 \quad (۵)$$

$$Kq = (3E-12)(Skew^5) - (6E-10)(Skew^4) + (3E-08)(Skew^3) - (7E-07)(Skew^2) + (1E-05)(Skew) + 0.0117 \quad (۶)$$

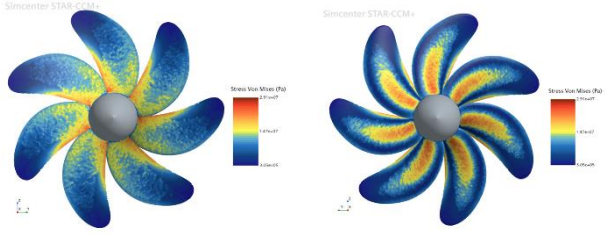
$$\eta = (2E-09)(Skew^4) - (2E-07)(Skew^3) - (1E-05)(Skew^2) + 0.0011(Skew) + 0.3742 \quad (۷)$$

با توجه به شکل ۹، می‌توان گفت مقدار ضریب تراست از زاویه اسکیو ۹ درجه تا ۳۵ درجه افزایش می‌یابد ولی از زاویه ۳۵ به بعد افت خواهد کرد که این امر یعنی یک مقدار بهینه‌ای ازنظر تراست با تغییر دادن زاویه اسکیو به وجود می‌آید که برای همه پروانه‌ها باید این موضوع بررسی شود. با توجه به شکل ۹، با افزایش زاویه اسکیو، مقدار ضریب گشتاور نیز همین رفتار مشاهده می‌شود. پروانه‌های اسکیودار باعث می‌شوند که جریان ورودی به پروانه، به‌صورت تدریجی وارد شود و ازاین‌رو نیروهای ناپایای تولیدشده در ویک متغیر تا حدودی پایدار و یکنواخت شود که باعث کاهش بازدهی می‌گردد و همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است مقدار بازدهی پروانه‌ها در ضریب پیشروی ۰/۵ بیشینه است و با افزایش زاویه اسکیو مقدار بازدهی پروانه در این ضریب پیشروی رو به کاهش است. پروانه‌های اسکیودار باعث می‌شوند که جریان ورودی به پروانه، به‌صورت تدریجی وارد شود که باعث کاهش بازدهی می‌گردد و همان‌طور که در بالا نشان داده‌شده است مقدار بازدهی پروانه‌ها در ضریب پیشروی ۰/۵، با افزایش زاویه اسکیو تا ۴۶ درجه مقدار بازدهی پروانه افزایش‌یافته و بعدازاین زاویه اسکیو به بعد، بازده پروانه در این ضریب پیشروی رو به کاهش است.

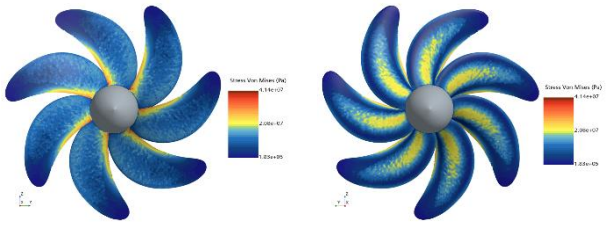
### ۵-۲- تحلیل‌های هیدروالاستیک و نتایج عددی پروانه اسکیو بالا

با توجه به اینکه پروانه‌ها از زاویه ۳۵ درجه به بعد ازنظر 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 اسکیو مختلف مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اسکیو، تنش وون‌میزز 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.

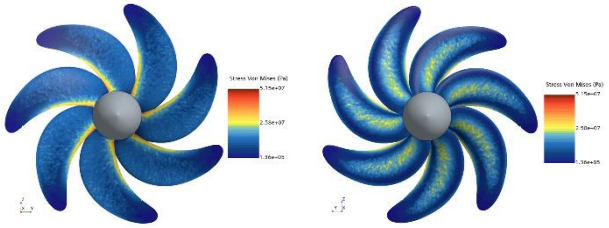
سطح پشتی پره　　سطح جلویی پره



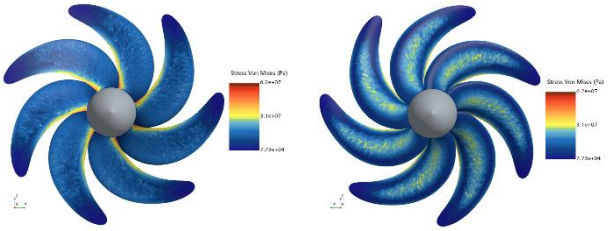
زاویه اسکیو ۳۵ درجه



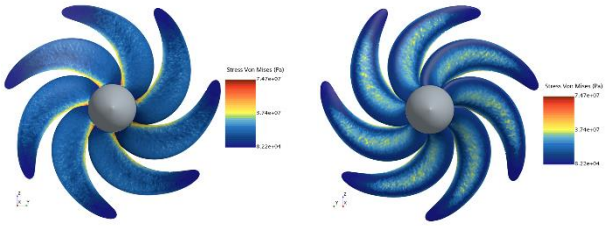
زاویه اسکیو ۴۶ درجه



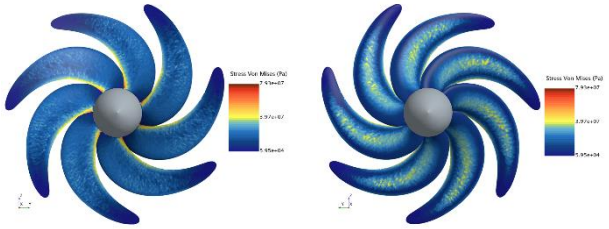
زاویه اسکیو ۵۵ درجه



زاویه اسکیو ۶۶ درجه



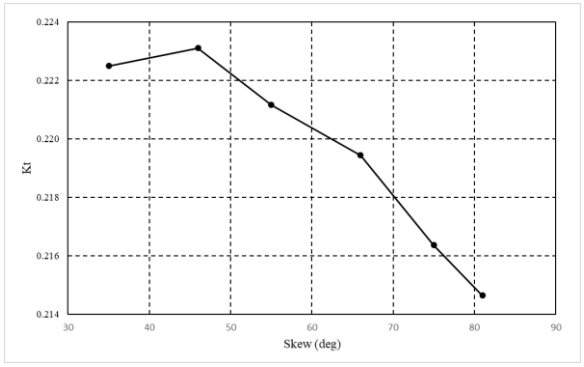
زاویه اسکیو ۷۵ درجه



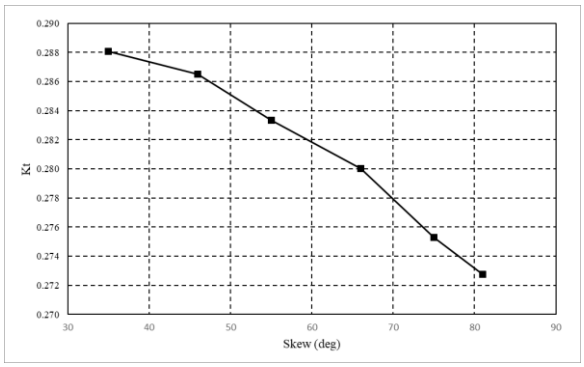
زاویه اسکیو ۸۱ درجه

**شکل ۱۲ کانتور تنش بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه**

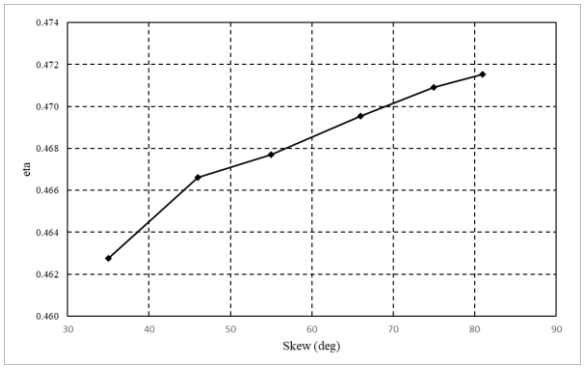
در ادامه نتایج حاصل تحلیل اندرکنش سازه و سیال را در ضریب پیشروی ۰/۴ برای تمام پروانه‌ها با اسکیوهای مختلف ارائه شده است.



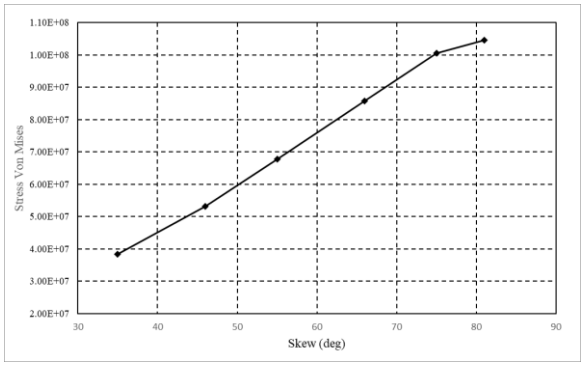

**شکل ۱۳ نمودار ضریب پیشروی در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکیو متفاوت**




**شکل ۱۴ نمودار ضریب گشتاور در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی ۰/۴ برای پروانه با اسکیو متفاوت**




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




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

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس نتایج هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل‌های عددی، پروانه با زاویه اسکیو ۴۶ درجه

مناسب‌ترین پروانه می‌باشد. با توجه به تنش‌های حاصله از شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال بیشینه تنش در ریشه پروانه و به میزان ۵۳ 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 قابل‌قبول، باید در مناطقی که گرادیان سرعت زیاد است مانند 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 به‌کارگیری الگوریتم آپ 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 میانیابی فشار نیز از مرتبه دوم استفاده‌شده 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 اسکیو، می‌توان گفت مقدار ضریب تراست از زاویه اسکیو ۹ درجه تا ۳۵ درجه افزایش می‌یابد ولی از زاویه ۳۵ درجه به بعد افت خواهد کرد که این امر یعنی یک مقدار بهینه‌ای ازنظر تراست با تغییر دادن زاویه اسکیو به وجود می‌آید که برای همه پروانه‌ها باید این موضوع بررسی شود. با افزایش زاویه اسکیو، مقدار ضریب گشتاور نیز همین روند را می‌توان مشاهده نمود. پروانه‌های اسکیودار باعث می‌شوند که جریان ورودی به پروانه، به‌صورت تدریجی وارد شود که باعث کاهش بازدهی می‌گردد، بنابراین زاویه ۳۵ درجه بیشترین بازده را تولید می‌نماید. همچنین برای اطمینان از مطالب ارائه‌شده در بخش هیدرودینامیکی، فرمول‌های رگرسیونی ارائه‌شده است که این فرمول‌ها مطالب مربوط به بخش هیدرودینامیکی را مورد تأیید قرار می‌دهند.

بر اساس نتایج هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل‌های عددی پروانه با اسکیو ۴۶ درجه مناسب‌ترین پروانه می‌باشد. با توجه به تنش‌های حاصله از شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال بیشینه تنش در ریشه پروانه و به میزان ۵۳ مگاپاسکال است. این میزان از تنش فاصله بسیار زیادی با تنش تسلیم ماده 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[rps] |
| P | فشار استاتیکی[Pa] |
| $P/D$ | نسبت گام به قطر پروانه[-] |
| Q | گشتاور[N.m] |
| R | شعاع پروانه[m] |
| SPL | سطح فشار صوت[db] |
| T | تراست[N] |
| $V$ | سرعت[m/s] |
| η | راندمان هیدرودینامیکی[-] |
| $\rho$ | چگالی[$kg/m^3$] |
| $\mu$ | 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, 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- 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