



## Journal of Marine Engineering

Journal homepage: [marine-eng.ir](http://marine-eng.ir)



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

Ehsan Yari<sup>1\*</sup>, Mohammad Hossein Karimi<sup>2</sup>, Kamin Saberizad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant professor, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; [ehsanyari11@gmail.com](mailto:ehsanyari11@gmail.com)

<sup>2</sup>Assistant professor, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; [Mhkcom480@yahoo.com](mailto:Mhkcom480@yahoo.com)

<sup>3</sup>PhD student, Faculty of mechanical engineering, Malek-Ashtar University of technology; [kamin.saberizad@gmail.com](mailto:kamin.saberizad@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- $\omega$  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 اسکیو بر تنش ایجادشده در پروانه اسکیو بالا

احسان یاری<sup>۱\*</sup>, محمدحسین کریمی<sup>۲</sup>, کامین صابری زاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار / مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، [ehsanyari11@gmail.com](mailto:ehsanyari11@gmail.com)

<sup>۲</sup> استادیار / مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، [Mhkcom480@yahoo.com](mailto:Mhkcom480@yahoo.com)

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری تبدیل انرژی / مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، [kamin.saberi@gmail.com](mailto:kamin.saberi@gmail.com)

## چکیده

هدف از این مقاله تحلیل عددی عملکرد هیدرودینامیکی و آنالیز هیدرولاستیسیته پروانه کاملاً مغروم 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 توئل کاویتاپیون آن موجود است، استفاده شده است. برای حل عددی از نرمافزار استار سی سی ام پلاس به روش حجم محدود استفاده شده و اختشاشات جریان توسط مدل آشفتگی SST k-w مدل شده‌اند. در ادامه به منظور بررسی تأثیر توزیع زاویه اسکیو پره بر عملکرد هیدرولاستیسیته 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 بدست آمده با افزایش زاویه اسکیو، تنش ایجادشده در نوک و ریشه پروانه افزایش یافته 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 می‌باید.

## 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

هیدرولاستیسیته

تنش وون میزز

دینامیک سیالات محاسباتی

پروانه اسکیو بالا

DOI:

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

ISSN: 2645-8136



**۱ - مقدمه**

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 دهنده **Error! Reference source not found.**

کاستلینی و سانتولینی<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> ارتعاشات مجموعه‌ای از پروانه‌ها را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بررسی کردند. از آنجاکه پارامترهای متعددی در ارتعاشات پروانه نقش دارند، الگوریتم ژنتیک به عنوان 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 **Error! Reference source not found.** به راندمان بهینه و کاهش سطح ارتعاشات دست یافت.

**Reference source not found.** هونگ<sup>۶</sup> و همکاران تحلیل ارتعاشی و میرایی یک پره کامپوزیتی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی طراحی مستهلك‌کننده، راندمان دینامیکی ساختار کامپوزیتی می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش یابد **Error! Reference source not found.**

وی<sup>۷</sup> و همکاران پیش‌بینی عددی پاسخ آکوستیکی پروانه تحریک شده 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 به صورت 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 به طور جدی احساس می‌شود.

**Error! Reference source not found.**

مفهوم برهمنش سیال و سازه<sup>۱</sup> 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 به طور 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 برهمنش سیال و سازه، لازم است این حلقه بازخورد به طور کامل و دقیق مورد بررسی قرار گیرد. شناخت عمیق‌تر این فرآیندها می‌تواند به بهبود طراحی و عملکرد **Error! Reference source not found.** کمک کند **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<sup>۲</sup> و تحلیل اجزای محدود<sup>۳</sup>، 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، راه حل‌های 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 اینچی 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

<sup>4</sup> Castellini and Santolini

<sup>5</sup> Chen and Shih

<sup>6</sup> Hong

<sup>7</sup> Wei

<sup>1</sup> FSI

<sup>2</sup> CFD

<sup>3</sup> FEM

با استفاده از نرمافزار انسیس<sup>۱۲</sup> می‌پردازد. برای تحلیل، روش کوپلینگ سیستمی به کار گرفته شده که داده‌ها را بین حلگرهای سازه‌ای و سیالی انتقال می‌دهد. مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ برای شبیه‌سازی جریان و مدل فاکس ویلیام<sup>۱۳</sup> برای ارزیابی فشار صوتی<sup>۱۴</sup> ناشی از پروانه استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی عملکرد هیدرودینامیکی با داده‌های تجربی، پاسخ هیدرولاستیک 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 به دقت 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 هیدرولاستیک، نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد

**Error! Reference source not found.**

هدف از مطالعه حاضر تحلیل عددی اندرکنش سازه و سیال پروانه سری استاندارد مائو<sup>۱۵</sup> با کاربرد در شناورهای زیرسطحی می‌باشد. بدین منظور چند هندسه پروانه با زوایای اسکیو مختلف تولید شده و تحت شرایط جریانی یکسان به منظور بررسی تأثیر گام هندسی بر روی پارامترهای هیدرولاستیک 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<sup>۱۶</sup>، میدان جریان با حل معادلات پیوستگی و مونتوم تعیین می‌شود. 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  $u_i$  مؤلفه‌های سرعت سیال،  $\rho$  چگالی،  $p$  فشار سیال،  $\tau$  تانسور تنش برشی،  $P$  تانسور تنش رینولدز است.

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 **Error! Reference source not found.**

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 به صورت عددی به دست آوردند و نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند که همخوانی خوبی میان آن‌ها مشاهده شد

**Error! Reference source not found.**

گل<sup>۸</sup> 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 به دست آمده را با استاندارد ارتعاشات شناور ایزو ۶۹۵۴ مقایسه کردند

**Error! Reference source not found.**

لی<sup>۹</sup> و همکاران با استفاده از روش تحلیل عددی و نرمافزارهای Ship-pro و RANS MPUF3A 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 به دست آوردند

**Error! Reference source not found.**

در سال ۲۰۲۵ کیم و شینگ<sup>۱۰</sup> 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 اصلاح شده، ترکیب مد سازه‌ای، 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 می‌دهد

**Error! Reference source not found.**

کریشننا<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۲۲ به تحلیل محاسباتی هیدرولاستیک 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،

<sup>12</sup> ANSYS

<sup>13</sup> FWH

<sup>14</sup> SPL

<sup>15</sup> MAU

<sup>16</sup> RANS

<sup>8</sup> Yasar GUL

<sup>9</sup> Lee

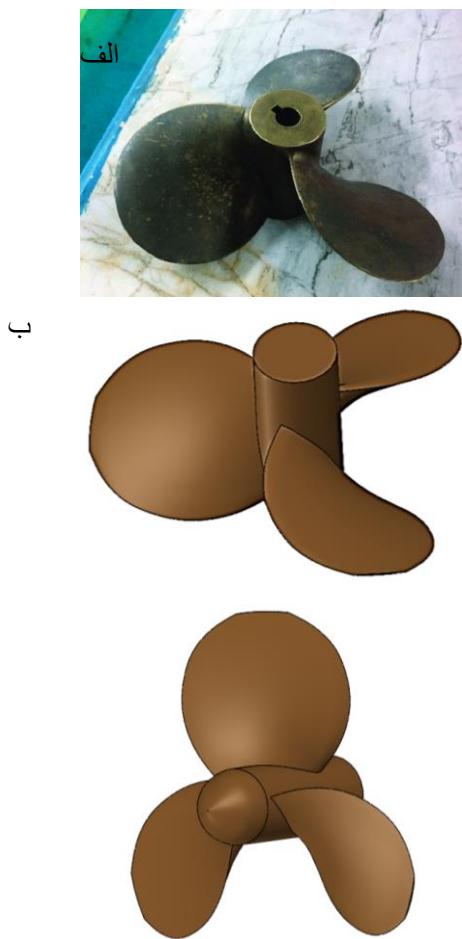
<sup>10</sup> Kim and Shin

<sup>11</sup> V.Rama Krishna

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

#### ۴-اعتبارسنگی نتایج عددی

پروانه DTMB4119 یک نمونه پروانه سه پرهای 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.



شکل ۲ (الف) نمای ساخته شده از پروانه DTMB4119

**Error! Reference source not found.**

پروانه DTMB4119

۱-۴-دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و تنظیمات حل دامنه محاسباتی به صورت دو هندسه استوانه‌ای چرخان و ثابت در نظر گرفته شده است (شکل ۲). ابعاد استوانه ثابت که در واقع دامنه محاسباتی اصلی می باشد به گونه‌ای در نظر گرفته شده که اثرات دیواره‌های میدان حل بر روی میدان جریان حول پروانه

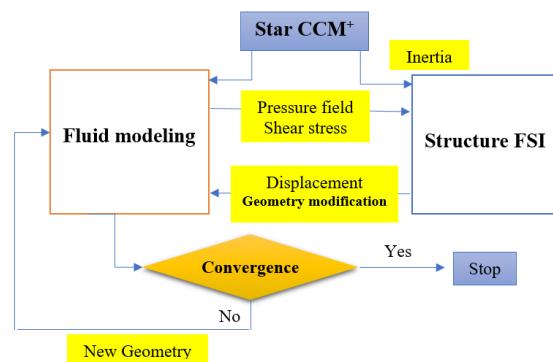
در تحلیل هیدرودینامیکی پروانه نتایج منحنی‌های عملکردی پروانه که شامل ضریب تراست ( $K_T$ ), ضریب گشتاور ( $K_Q$ ) و راندمان ( $\eta_0$ ) نسبت به ضریب پیشروی  $J$  است. مرسوم‌ترین و مهم‌ترین نتایج قابل ارائه برای سیستم رانش است. تعریف ضرایب فوق در رابطه ارائه می شود:

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

#### ۳-متداول‌ترین حل مسئله

تجزیه و تحلیل اندرکنش سیال-سازه (FSI) پروانه‌ها 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 سنترویوهای 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 می‌باشد. الگوریتم کلی تحلیل عددی سیال-سازه برای پروانه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ مراحل تحلیل سیال - سازه پروانه

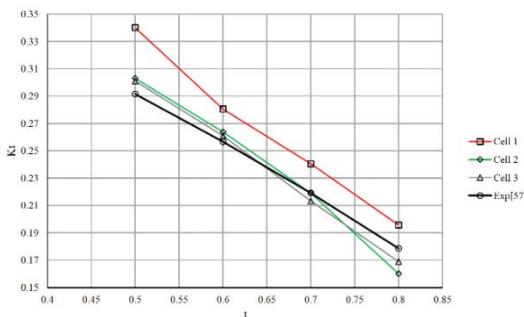
در ادامه ابتدا در مورد هندسه پروانه، دامنه حل، شبکه‌بندی دامنه و همچنین در مورد شرایط مرزی و سپس در مورد جزئیات شبیه‌سازی جریان توربولنس به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و اندرکنش سازه و سیال به منظور یافتن ضرایب هیدرودینامیکی و تنش‌های ایجاد شده در پروانه در شرایط کاری مختلف توضیح داده خواهد شد. پروانه مورد نظر جهت اعتبارسنگی تحلیل عددی پروانه

دقت بالایی استخراج شود.

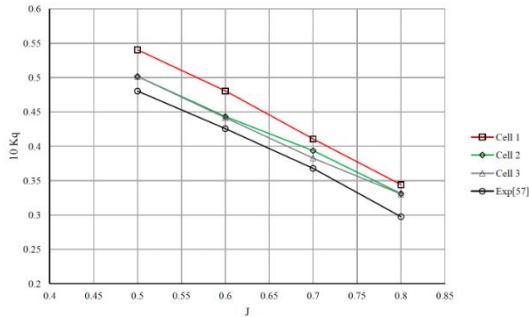
#### ۴-۲-استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی و صحت سنجی نتایج عددی پروانه DTMB4119

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

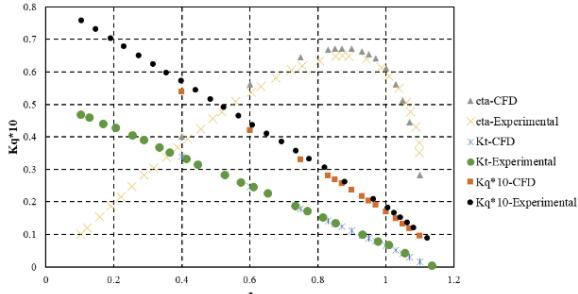
به منظور بررسی استقلال نتایج هیدرودینامیکی از تعداد سلول‌ها، سه نوع شبکه در نظر گرفته شده و ضرایب تراست و گشتاور برای هر کدام از این شبکه‌ها به دست آمده است. در نمونه اول تعداد  $1/8$  میلیون سلول، در نمونه دوم تعداد  $3/2$  میلیون سلول و در نمونه سوم تعداد  $4/11$  میلیون سلول در نظر گرفته شده است. نتایج مقایسه ضرایب تراست و گشتاور و نمودار کلی هیدرودینامیکی برای پروانه DTMB4119 به ترتیب در شکل-۵، ۶ و ۷ قابل مشاهده هستند.



شکل ۵ نمودار ضریب تراست در برابر تعداد شبکه محاسباتی

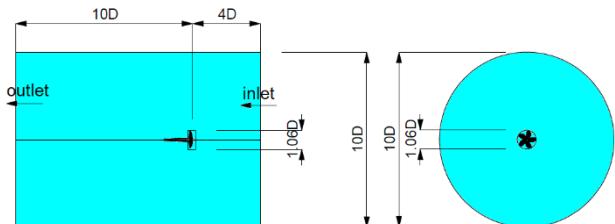


شکل ۶ نمودار ضریب گشتاور در برابر تعداد شبکه محاسباتی

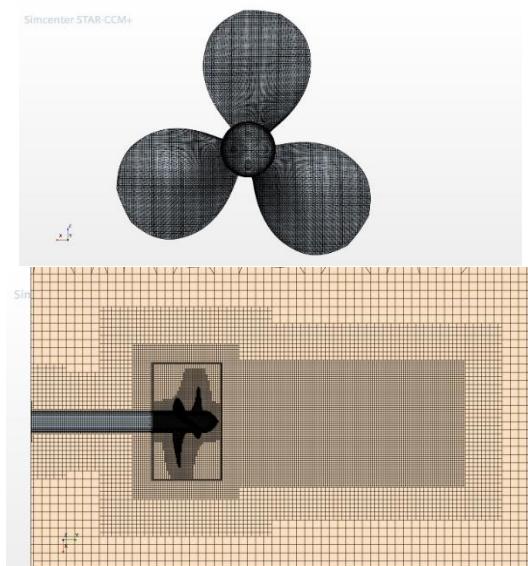


شکل ۷ مقایسه منحنی‌های عملکرد هیدرودینامیکی مدل ۴۱۱۹ با ۴ میلیون شبکه محاسباتی DTMB

حدف 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  $1/0.6D$  و  $0.6D$  است که به عنوان 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 تنفس 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  $10$  لایه باضخامت لایه اول  $1/0.1$  میلی‌متر و با نرخ رشد  $1/1$  استفاده شده است.



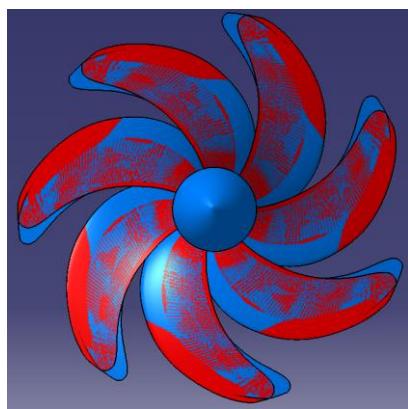
شکل ۳ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی حول پروانه



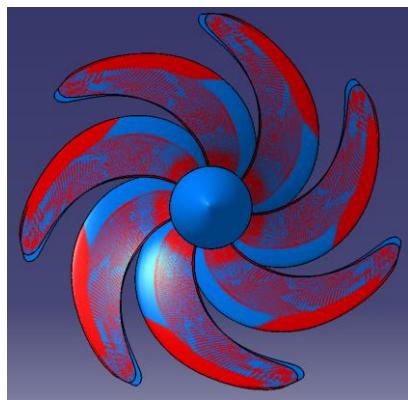
شکل ۴ لایه‌مرزی و شبکه بی‌سازمان حول پروانه

با توجه به خصوصیات آب و تعریف عدد رینولدز، عدد رینولدز از مرتبه  $10^6$  میلیون است. سیال آب به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است زیرا عدد ماخ کوچک‌تر از مقدار  $10^3$  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 به ویژه نتایج ضریب گشتاور با

Skew= 55 &  
66 deg



Skew= 75 &  
81 deg



شکل ۸ هندسه پروانه‌های اسکیو بالا با زوایای مختلف اسکیو

دامنه حل در این حالت برای پروانه‌های اسکیو بالا نیز مانند بخش قبل متشكل 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 میلی‌متر برای تحلیل سازه‌ای ۲ میلی‌متر می‌باشد.

مبناًی 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<sup>۱۷</sup> 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 معروف بسیار مناسب بوده و ضرایب هیدرودینامیکی پروانه را با دقت زیر ۲ درصد شبیه‌سازی می‌کند.

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

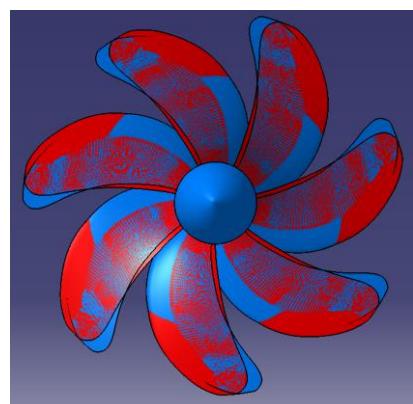
در این بخش هندسه پروانه‌های اسکیو بالا در زوایای مختلف اسکیو تولید شده است و نتایج ضرایب هیدرودینامیکی و تنش و کرنش هیدرولاستیسیته تحت شرایط جریانی مختلف استخراج شده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی پروانه اسکیو بالا ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی پروانه اسکیو بالا

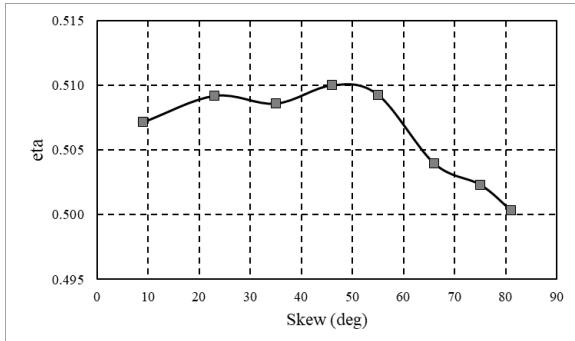
نوع پروانه	اسکیو بالا
قطر پروانه (متر)	۰/۱۷
نسبت گام به قطر	۱
تعداد پره‌ها	۷ پره

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

Skew= 35 &  
46 deg



<sup>۱۷</sup> Upwind



شکل ۱۱ نمودار راندمان هیدرودینامیکی بر حسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی  $0/5$

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

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

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

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

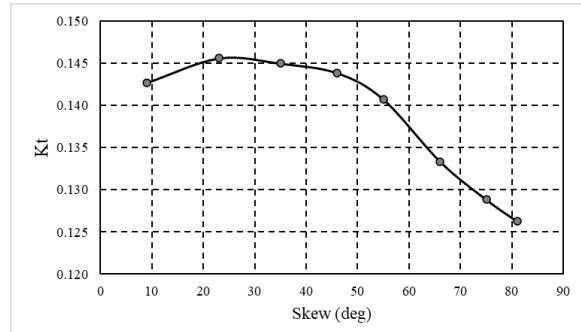
با توجه به شکل ۹، می‌توان گفت مقدار ضریب تراست از زاویه اسکیو ۹ درجه تا ۳۵ درجه افزایش می‌یابد ولی از زاویه ۳۵ به بعد افت خواهد کرد که این امر یعنی یک مقدار بهینه‌ای از نظر تراست با تغییر دادن زاویه اسکیو به وجود می‌آید که برای همه پروانه‌ها باید این موضوع بررسی شود. با توجه به شکل ۹، با افزایش زاویه اسکیو، مقدار ضریب گشتاور نیز همین رفتار مشاهده می‌شود. پروانه‌های اسکیودار باعث می‌شوند که جریان ورودی به پروانه، به صورت تدریجی وارد شود و از این‌رو نیروهای ناپایای تولید شده در یک 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  $0/5$  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، به صورت تدریجی وارد شود که باعث کاهش بازدهی می‌گردد و همان‌طور که در بالا نشان داده شده است مقدار

می‌شود. روش خطی سازی روش ضمنی<sup>۱۸</sup> مرتبه دوم است و برای میان‌یابی فشار نیز از مرتبه دوم استفاده شده است. برای حل معادلات هیدرودینامیکی از تعداد ۴ میلیون سلول محاسباتی و حل سازه‌ای از تعداد نزدیک ۱ میلیون مش استفاده شده است.

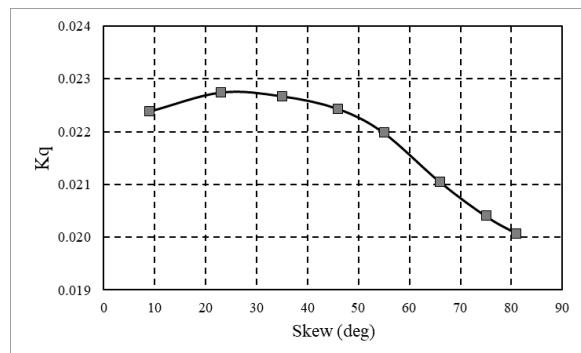
عدد کورانت<sup>۱۹</sup> معیاری در حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی<sup>۲۰</sup> است که نشان می‌دهد یک گام زمانی چه حد با توجه به سرعت جریان و اندازه المان شبکه مناسب است. در روش‌های ضمنی<sup>۲۱</sup>، محدودیت سختی روی  $\Delta t$  وجود ندارد، اما افزایش بیش از حد آن می‌تواند دقت را کاهش دهد.

### 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.



شکل ۹ نمودار ضریب تراست بر حسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی  $0/5$



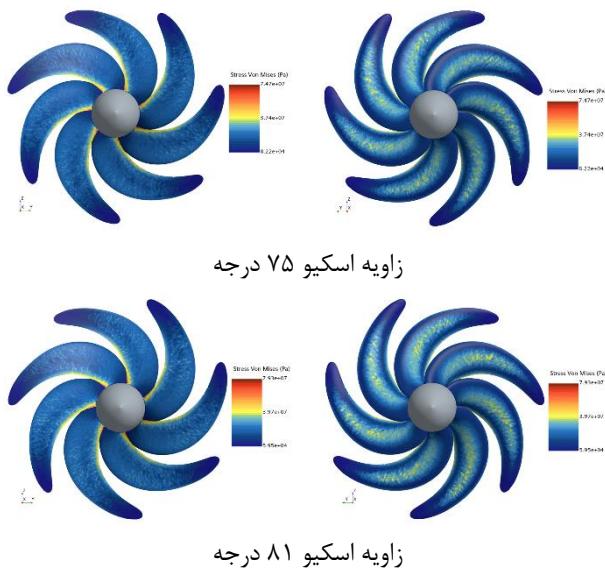
شکل ۱۰ نمودار ضریب گشتاور بر حسب زاویه اسکیو در ضریب پیشروی  $0/5$

<sup>18</sup> Implicit

<sup>19</sup> Courant Number

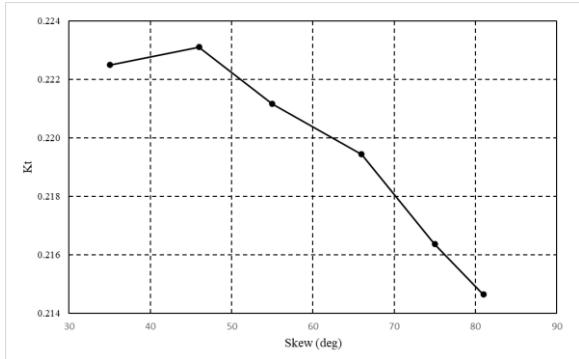
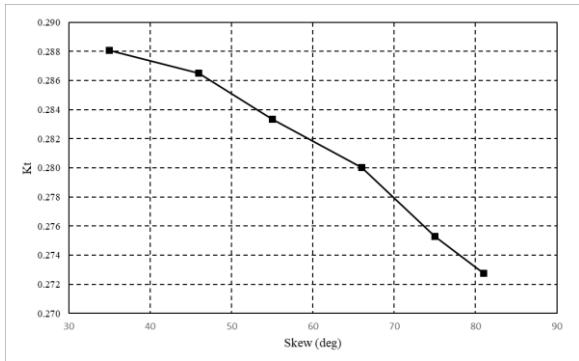
<sup>20</sup> PDE

<sup>21</sup> Implicit



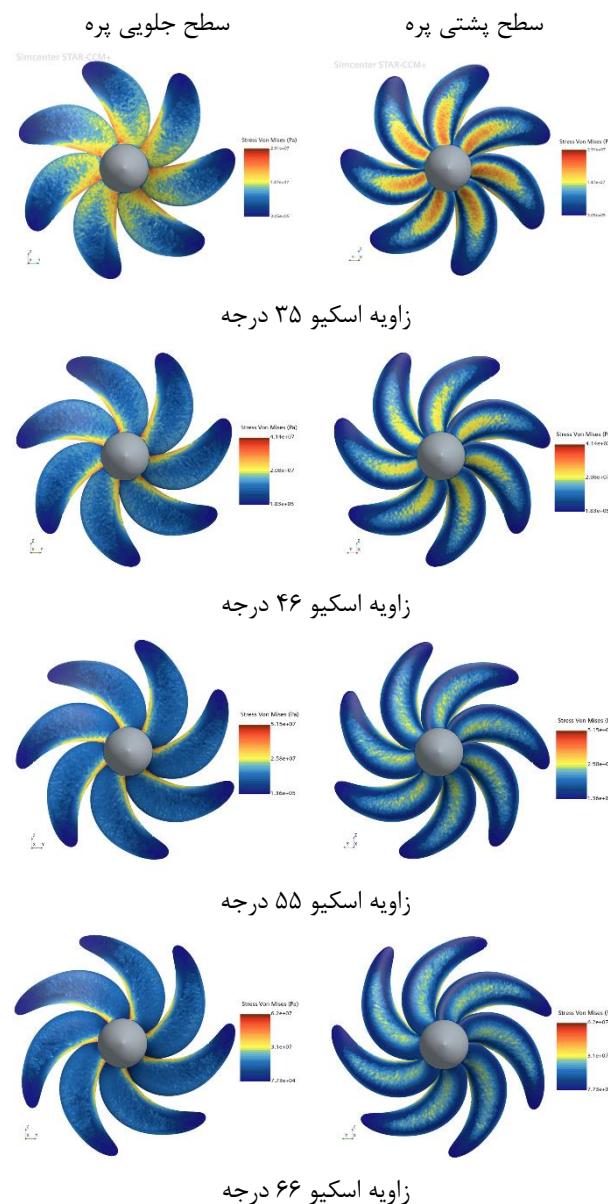
شکل ۱۲ کانتور تنش بر روی سطح جلویی و پشتی پروانه

در ادامه نتایج حاصل تحلیل اندرکنش سازه و سیال را در ضریب پیشروی  $0/4$  برای تمام پروانه‌ها با اسکیوهای مختلف ارائه شده است.

شکل ۱۳ نمودار ضریب پیشروی در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی  $0/4$  برای پروانه با اسکیو متفاوتشکل ۱۴ نمودار ضریب گشتاور در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی  $0/4$  برای پروانه با اسکیو متفاوت

بازدهی پروانه‌ها در ضریب پیشروی  $0/5$ ، با افزایش زاویه اسکیو تا ۴۶ درجه مقدار بازدهی پروانه افزایش یافته و بعد از این زاویه اسکیو به بعد، بازده پروانه در این ضریب پیشروی رو به کاهش است.

**۲-۵- تحلیل‌های هیدرولاستیک و نتایج عددی پروانه اسکیو بالا** با توجه به اینکه پروانه‌ها از زاویه ۳۵ درجه به بعد از نظر هیدرولاستیک بسیار مناسب است، برای تحلیل‌های هیدرولاستیکی، از زوایای ۳۵ درجه تا ۸۱ درجه در ضریب پیشروی  $0/4$  پرداخته می‌شود. با بررسی کانتور تنش بر روی سطوح جلویی و پشتی پروانه‌ها 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.



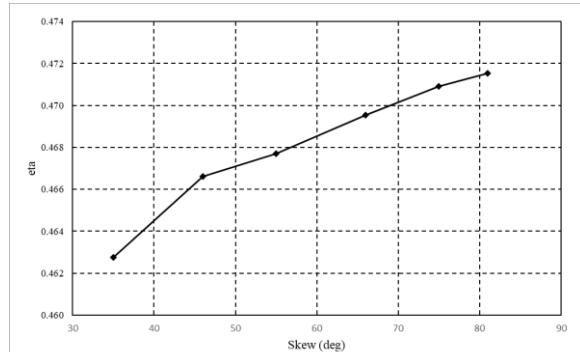
نواحی نزدیک به سطوح پروانه و در ناحیه ویک ناشی از پره‌ها، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده نمود. مبنای حل در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام به روش حجم محدود است. گستته سازی معادلات در روش حجم محدود از مرتبه دوم و با به کارگیری الگوریتم آپ ویند مرتبه دوم صورت گرفته است. جهت کوپل سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل سی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

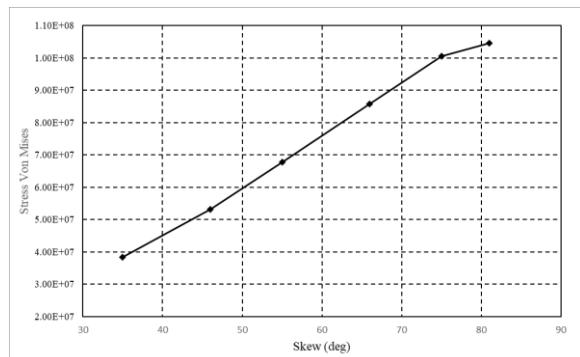
بر اساس نتایج هیدرودینامیکی حاصل از تحلیل‌های عددی پروانه با اسکیو ۴۶ درجه مناسب‌ترین پروانه می‌باشد. با توجه به تنش‌های حاصله از شبیه‌سازی اندرکنش سازه و سیال بیشینه تنش در ریشه پروانه و زیادی با تنش تسلیم مواد فلزی مانند فولاد زنگ نزن، فسفر برنز و همچنین رزین اپوکسی داشته و این بدین معنی است که برای 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 هیدروfon 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 [-]



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



شکل ۱۶ نمودار تنش بیشینه در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و ضریب پیشروی ۴/۰ 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، به منظور 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

$Q$	[N.m]	گشتاور
$R$	[m]	شعاع پروانه
SPL	[db]	سطح فشار صوت
$T$	[N]	تراست
$V$	[m/s]	سرعت
$\eta$	[-]	راندمان هیدرودینامیکی
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	چگالی
$\mu$	[Pa.sec]	ویسکوزیتete دینامیکی
$\theta$	[deg]	زاویه با راستای جریان سیال

#### - 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,