

مطالعه عددی ارتباط بین زاویه اسکيو و تعداد پره بر روی عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه زیر دریایی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

رحیم مالمیر^۱

^۱ معاون پژوهش و فناوری و عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

چکیده

در مطالعه حاضر، ارتباط بین زاویه اسکيو و تعداد پره بر عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه زیردریایی به صورت عددی با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی شده است. بدین منظور، تعداد سه پره مختلف (۳، ۵ و ۷) و چهار زاویه اسکيو مختلف (از ۰ درجه تا ۵۲ درجه) بر اساس مدل پروانه INSEAN E1619 به عنوان هندسه اصلی در نظر گرفته شده است. شبیه سازی عددی به صورت سه بعدی براساس معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز ناپایا (URANS) همراه با مدل توربولانسی SST k- ω می باشد. ضرایب و راندمان هیدرودینامیکی با نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود در ضرایب پیشروی (J) مختلف مقایسه و تطابق خوبی به دست آمده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش تعداد پره، ضرایب هیدرودینامیکی بهبود یافته است. تداخل بین ۷ پره، ناحیه ویک منفی در مکان های نزدیک به پره های پروانه زیر دریایی که منجر به تولید راندمان هیدرودینامیکی بالاتری نسبت به سایر پروانه ها می شود، از بین می برد. حداکثر ضریب گشتاور توسط پروانه با ۷ پره بدست آمده است که نسبت به پروانه با ۳ پره در شرایط $J = 0.8$ در حدود ۱۱/۸٪ افزایش یافته است. علاوه بر این، زاویه اسکيو پایین، مقدار کمی عملکرد بالاتری نسبت به پروانه با زاویه اسکيو بالا داشته است. به طور کلی، راندمان هیدرودینامیکی پروانه با زاویه اسکيو برابر ۰ درجه در حدود ۱۹/۴٪ در مقایسه با پروانه با زاویه اسکيو ۵۲ درجه در شرایط $J = 0.88$ افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: پروانه، زاویه اسکيو، تعداد پره، هیدرودینامیک، دینامیک سیالات محاسباتی.

۱. مقدمه

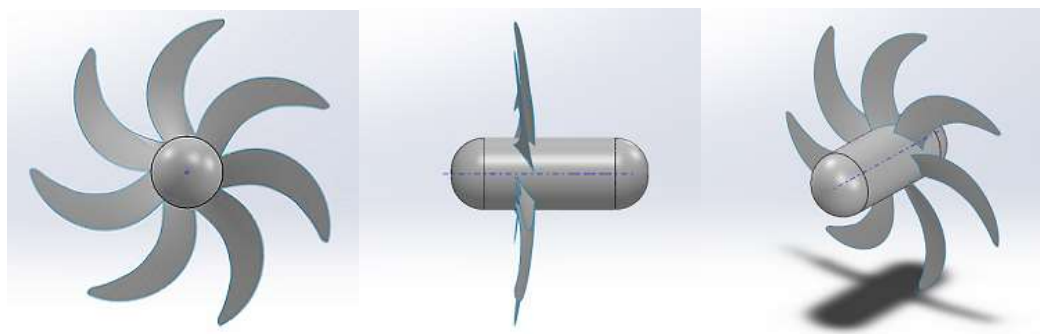
پروانه های دریایی در قیاس با توربین ها و فن های معمولی از لحاظ هندسی پیچیدگی بیشتری دارند. چرا که در راستای شعاع پروانه، پروفیل و طول وترهای مقاطع و زاویه گام و زاویه اسکيو آنها تغییر می کنند. همچنین به منظور تحمل بارهای سنگین مورد نیاز برای شناورهای کنونی، باید بتوانند در سرعت های چرخشی بالا عمل کنند. وجود این عوامل، تحلیل جریان اطراف پروانه دریایی را به یکی از مشکل ترین مسائل در مکانیک سیالات تبدیل کرده است. در گذشته بررسی جریان سیال در اطراف تجهیزات با استفاده از روش های تحلیلی و تجربی انجام می گرفت. در روش های تحلیلی فرض های ساده کننده ای باید اعمال کرد تا مسئله قابل حل شود. روش های تجربی نیز اگرچه برای بسیاری از مسائل، نتایج واقعی بدست می دهند ولی با محدودیت های زیادی از جمله هزینه بالای آزمایش و دشواری تطبیق جریان در تونل باد، مواجه هستند. روشی که در سال های اخیر شهرت زیادی یافته، استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. در خصوص اصول حاکم بر طراحی و تحلیل هیدرودینامیکی پروانه ها مطالعات زیادی انجام شده است [۱-۳]. چیس و کریا [۴] به بررسی دنباله جریان پشت پروانه زیر دریایی با استفاده از نرم افزار CFD Ship-Iowa پرداختند. در این تحقیق علاوه بر استخراج منحنی عملکرد به مدل سازی دنباله غیردائم جریان پشت پروانه نیز پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که اولاً تراکم بیشتر شبکه بر روی نتایج نیرویی و گشتاوری تاثیر چندانی ندارد ولی بر روی نتایج شبیه سازی دنباله جریان به شدت تاثیرگذار است. ری و جوشی [۵] مدل سازی جریان اطراف یک پروانه ۵ پره را در شرایط آب باز و از روش مرجع چرخان انجام دادند. نتایج آنها در محاسبه ضرایب نیروی محوری و گشتاور در بدترین حالت به ترتیب از خطای ۸٪ و ۱۱٪ برخوردار بوده است. القراب و همکاران [۶] به بررسی تجربی پروانه B-Series در شرایط آب آزاد پرداختند. آنها پس از اعتبار سنجی جهت پیش بینی ضرایب تراست و گشتاور به خطایی در حدود ۲۵٪ رسیدند. توجیه آنها برای این محدوده خطای زیاد صرف نظر از دقت وسایل اندازه گیری، اختلاف عدد رینولدز میان آزمایش انجام شده توسط آنها و نتایج تجربی گزارش شد. اچی و همکاران [۷] گردابه های محور شفت پروانه را مورد مطالعه عددی قرار دادند. آنها بیان نمودند که کاهش تراست به دو علت ۱- افزایش درگ در قسمت کلاهدک شفت پروانه و ۲- کاهش تراست در پره های پروانه بود. شین و همکاران [۸] دو نوع پروانه معمولی و پروانه با زاویه اسکيو بالا را به طور عددی مورد مطالعه قرار دادند. الگوهای مختلف کاویتاسیون تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت هر چند در سطوح توسعه یافته حفره ها مقداری اختلاف مشاهده شد که مرتبط با نرخ تبخیر و چگالش در مدل کاویتاسیون بکار برده شده گزارش شد. حیاتی و همکاران [۹] به بررسی تأثیر زاویه ریک بر عملکرد پروانه ها در آزمایش آب آزاد پرداختند. آنها بیان نمودند افزایش زاویه ریک، سبب بهبود نیروی تراست پروانه به خصوص در بارگذاری بالا می شود اما همزمان باعث زیاد شدن نیروی گشتاور شده که عاملی نامطلوب در فرایند طراحی پروانه می باشد. نوری و محمدی [۱۰]، تأثیر نسبت کمبر پره NACA پروانه یک زیر دریایی را بر روی مشخصه های هیدرودینامیکی به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که حداکثر راندمان پروانه نسبت به ضریب پیشروی با تغییر نسبت کمبر، بدون تغییر بوده است. سانچز کاجا و همکاران [۱۱] به تأثیر تغییر هندسه نوک پره بر عملکرد هیدرودینامیکی آن پرداختند. طبق گزارش آنها اثر تغییر نوک پره حدود ۲٪ بازده را افزایش می دهد. ژو [۱۲] اثر تغییر زاویه اسکيو در پروانه ها بر پدیده کاویتاسیون را مطالعه نمود. طبق گزارش او در بارگذاری سنگین (عدد کاویتاسیون بالا)، با افزایش زاویه اسکيو اثر کاویتاسیون صفحه ای ضعیف شد، ولی در بارگذاری سبک (عدد کاویتاسیون پایین)، افزایش اسکيو سبب افزایش اثر کاویتاسیون صفحه ای گردید. در انتها بیان نمود که با انتخاب زاویه اسکيو مناسب می توان پدیده کاویتاسیون حول پروانه را کنترل کرد.

به طور کلی، در اکثر مطالعات قبلی به بررسی و یافتن هندسه مناسب مدل پروانه INSEAN E۱۶۱۹ و همچنین ارتباط بین زاویه اسکيو و تعداد پره بر عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه زیر دریایی پرداخته نشده است. بنابراین، این مطالعه به یافتن ارتباط بین تأثیر تعداد پره و زاویه اسکيو پروانه با در نظر گرفتن تعداد عدد پره مختلف (۳، ۵ و ۷ پره) و چهار زاویه مختلف اسکيو که از ۰ تا ۵۲ درجه متغیر است، پرداخته است. ارتباط بین تعداد پره و زاویه اسکيو پروانه به تفصیل توسط معادلات

URANS و مدل توربولانسی SST k- ω تحلیل شده است. علاوه بر این، ضرایب هیدرودینامیکی، راندمان هیدرودینامیکی و شبیه سازی میدان ویک پروانه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل هندسی

در شکل ۱ هندسه پروانه زیر دریایی INSEAN E1619 شامل ۷ پره به قطر ۴۸۵ میلیمتر به صورت سه بعدی نشان داده شده است [۱۳]. پارامترهای اصلی پروانه زیر دریایی در جدول ۱ آمده است. هندسه پروانه با استفاده از نرم افزار SolidWorks طراحی شده است. علاوه بر این، هندسه پروانه با تعداد پره ها و زوایای اسکيو مختلف به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این مطالعه، سه تعداد پره مختلف (۳، ۵ و ۷ پره) و چهار زاویه اسکيو مختلف از ۰ تا ۵۲ درجه انتخاب شده است. برای حل مسأله حاضر، دامنه محاسباتی مطابق شکل ۴ نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد پروانه در جریان یکنواخت، حجم کنترل استوانه ای در اطراف پروانه با شرایط مرزی سرعت ورودی و فشار خروجی در نظر گرفته شده است. برای دیوار تشکیل شده بین پره پروانه و هاب، شرط مرزی بدون لغزش در نظر گرفته شده است. ابعاد دامنه محاسباتی بر اساس مطالعات قبلی [۱۷-۱۴] و به منظور جلوگیری از اثرات خارجی در پیش بینی عملکرد پروانه [۱۵] به اندازه کافی و مناسب در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱ - هندسه پروانه زیر دریایی INSEAN E1619

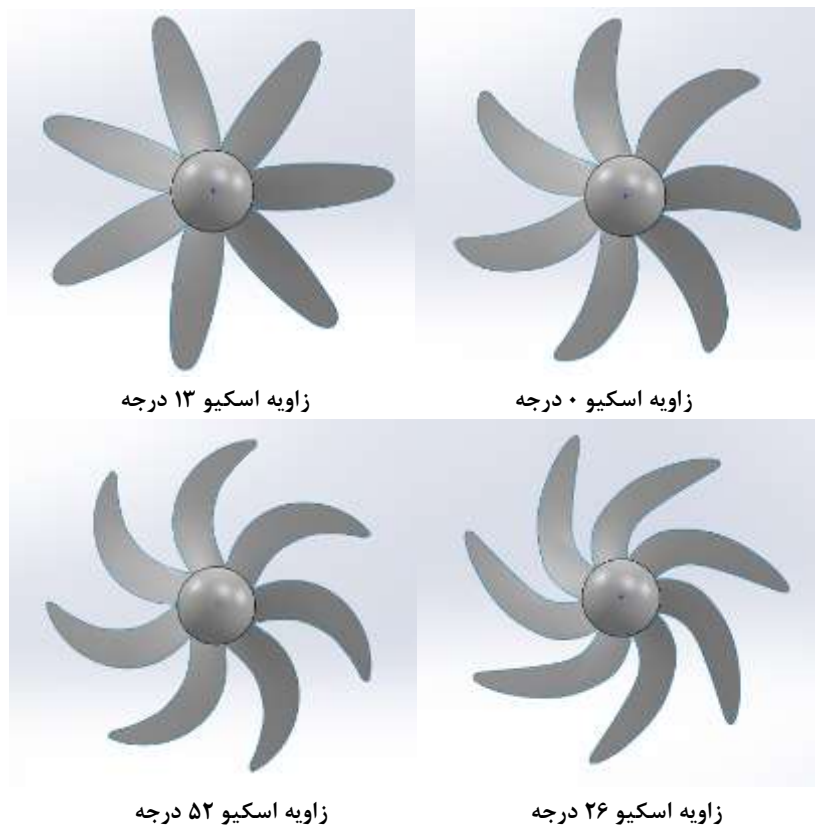


۳ پره

۵ پره

۷ پره

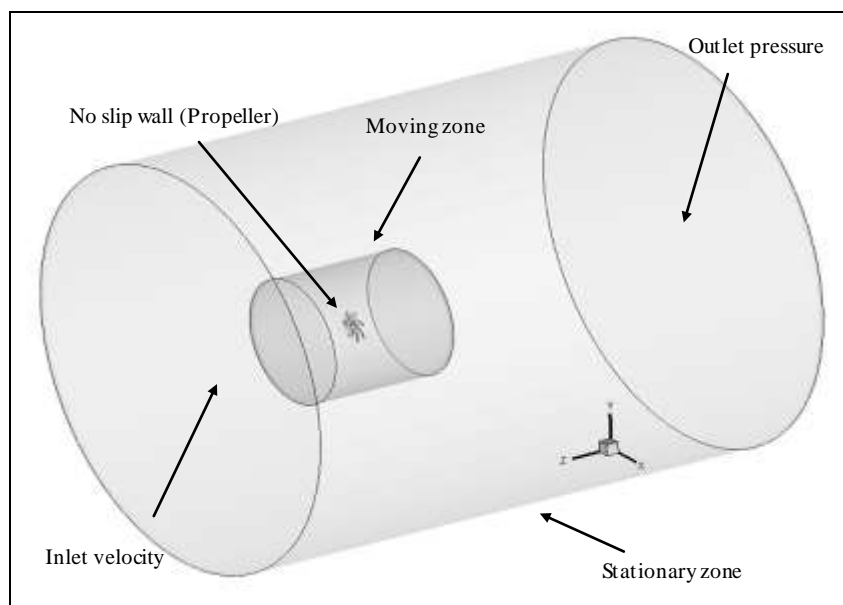
شکل ۲ - پروانه زیر دریایی به همراه تعداد پره های مختلف



شکل ۳ - پروانه زیر دریایی به همراه زوایای اسکيو مختلف

جدول ۱- پارامترهای اصلی پروانه زیر دریایی INSEAN E۱۶۱۹ [۱۳]

۷	تعداد پره ها
۴۸۵	قطر (میلیمتر)
۰/۲۲۶	نسبت قطر به هاب
۱/۱۵	گام در $r = ۰,۷ R$
۶/۸	قطر در $R ۰,۷۵$ (میلیمتر)
راست گرد	جهت چرخش



شکل ۴ - دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

جدول ۲- پارامترهای ابعاد دامنه محاسباتی

فاصله از مرکز پروانه تا مرزها			
مرز ورودی	مرز خروجی	مرز شعاعی	ناحیه متحرک
۳/۵ قطر	۸/۵ قطر	۴/۵ قطر	۱/۵ قطر

۳. معادلات حاکم و روش حل عددی

در این مطالعه، جریان به صورت سه بعدی، آشسته و تراکم ناپذیر می باشد. برای تجزیه و تحلیل میدان جریان اطراف پروانه، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی باید حل شوند. از آنجا که جریان به صورت ایزوترمال در نظر گرفته شده است، معادله انرژی صرفنظر می شود. محاسبات با استفاده از Ansys Fluent انجام شده است که براساس کد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می باشد که به عنوان یک نرم افزار تجاری کاربردی در تجزیه و تحلیل پروانه های دریایی با توجه به چندین مطالعه منتشر شده در این زمینه می باشد [۲۰-۱۸، ۱۴]. در این مطالعه، شبیه سازی عددی بر اساس معادلات URANS است. معادلات تراکم ناپذیر مومنتوم و پیوستگی به شرح زیر است [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۵-۳)$$

که در آن u_i و x_i به ترتیب شکل تانسوری مختصات محوری و سرعت هستند.

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (۶-۳)$$

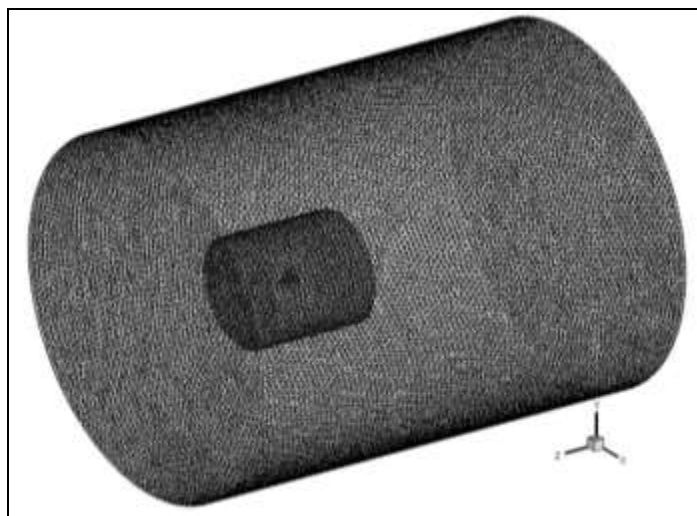
که ρ چگالی سیال است، μ ضریب ویسکوزیته دینامیکی است، δ_{ij} دلتای کرانکر و $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ترم تنش رینولدز است که برای بستن معادله (۶-۳) نیاز به مدل های توربولانسی می باشد. مدل توربولانسی k- ω SST [۲۱] برای شبیه سازی جریان با گرادیان فشار نامطلوب با در نظر گرفتن اثر تنش برشی دیواره در پیش بینی گردابه ناحیه ویک پروانه استفاده می شود. این

مدل که تلفیقی از مدل $k-\omega$ و $k-\epsilon$ است، توانایی بالایی در شبیه سازی جریان اطراف دیواره و نیز جریان خارج از ناحیه ویک دارد. مدل توربولانسی $k-\omega$ SST، یکی از پیشرفته ترین مدل های آشفتگی دو معادله است و در محاسبه میدان جریان ویسکوزیته [۲۲] دارای برتری است. علاوه بر این، وانگ و همکاران [۲۲] ثابت کرد که مدل ذکر شده می تواند با دقت پارامترهای جریان و ارتباط بین مشخصه های گردابه ناحیه ویک و اسکيو پروانه را شبیه سازی کند. معادلات انتقال برای مدل $k-\omega$ SST توسط منتر [۲۱] ارائه شده است. در مطالعه حاضر از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST جهت شبیه سازی جریان آشفته استفاده شده است.

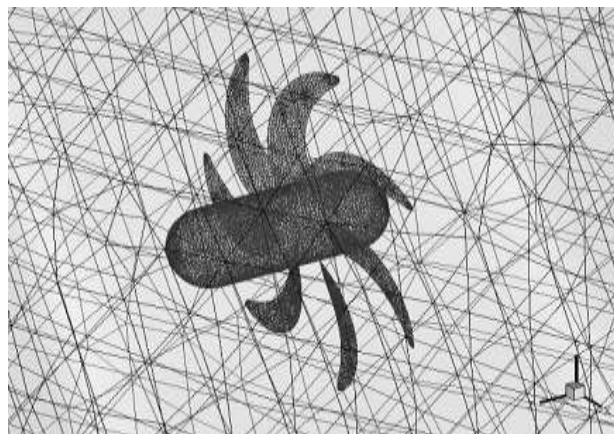
در مدل مورد بررسی به منظور گسسته سازی معادلات از روش بالادست مرتبه دوم برای معادلات مومنتوم و فشار، k و ω استفاده شده است. برای الگوی پیوند فشار-سرعت از الگوریتم SIMPLE و به منظور حل معادلات حول پروانه چرخشی از روش قاب مرجع چرخان (MRF) استفاده شده است [۱۵، ۱۱]. در این مطالعه معیار همگرایی برای کاهش باقیمانده های (RMS) متغیرهایی نظیر پیوستگی، مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانس، نرخ پراکندگی ویژه کمتر از 10^{-5} در نظر گرفته شده است تا نتایج را با دقت قابل قبول بدست آورد. همچنین، برای رسیدن به محدوده مناسب عدد کورانت-فریدریچ-لوی (CFL)، یک گام زمانی مناسب به اندازه 2×10^{-5} استفاده شده است.

۴. تولید شبکه محاسباتی

در این مطالعه از مش ترکیبی غیر سازمان یافته برای تولید شبکه استفاده شده است. سطوح پره ها با سلول های مثلثی مش بندی شده اند. مثلث های کوچک با اندازه حدوداً $0.01D$ (برابر قطر پروانه می باشد) برای نواحی نزدیک ریشه، لبه و نوک پروانه برای تحلیل بهتر جریان در این نواحی به کار برده شده است. سطوح دیگر با مثلث های بزرگتر با با اندازه حدوداً $0.1D$ مش بندی شده اند. علاوه بر این، برای پیش بینی بهتر جریان بین پره های پروانه، یک ناحیه مش متحرک در اطراف پروانه تولید شده است (شکل ۵). همچنین، مش تولید شده در اطراف پروانه در شکل ۶ نشان داده شده است. در نهایت، مناطق باقی مانده در دامنه با سرعت رشد مناسب $1/1$ با سلول های چهار وجهی مش بندی شده است. مقدار Y^+ برابر ۳۰ به عنوان فاصله اولین گره شبکه از دیواره محسوب می شود. همچنین، در این مطالعه از ۴ شبکه بندی مختلف که به ترتیب ۹۵۱۱۰۸، ۱۵۴۹۹۸۱، ۲۳۷۱۳۶ و ۳۱۰۱۵۴۳ می باشند در دامنه محاسباتی تشکیل شده است به منظور محاسبه ضریب تراست استفاده گردید. مقایسه ضریب تراست بین چهار شبکه بندی مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. در نهایت دیده شد که به منظور صرفه جویی در وقت محاسبات، شبکه بندی با تعداد سلول ۲۳۷۱۳۶۸ برای استخراج نتایج مناسب تر از دیگر شبکه بندی هاست.



شکل ۵ - ناحیه مش بندی



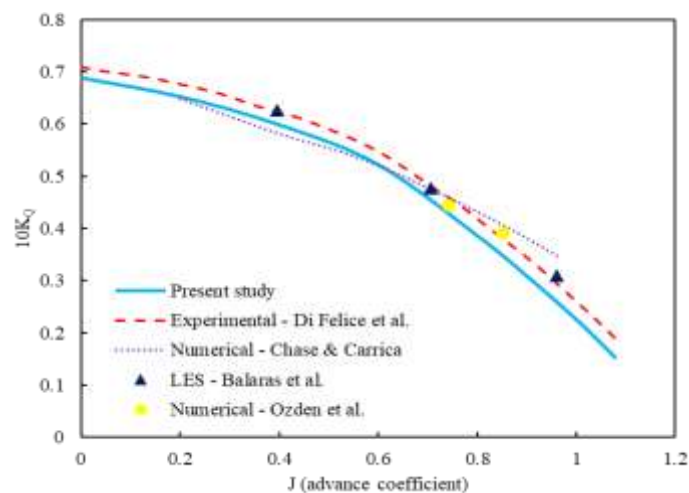
شکل ۶ - مش تولید شده اطراف پروانه

جدول ۳ - بررسی استقلال از شبکه ($J = 0.6$)

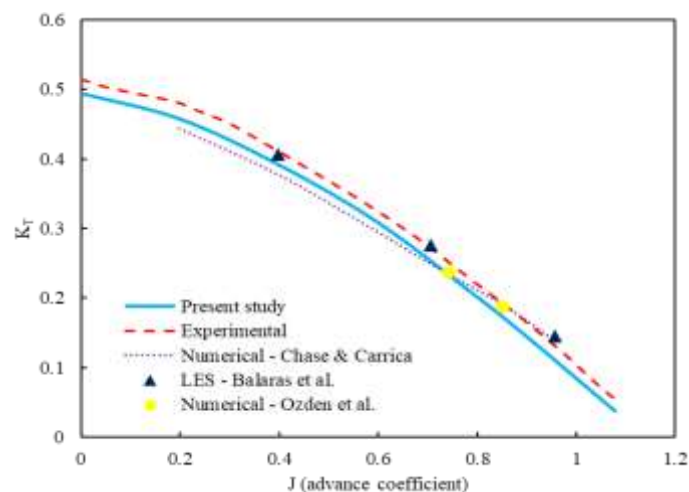
خطا (%)	مقدار ضریب گشتاور آزمایشگاهی (K_Q) [۱۳]	مقدار ضریب گشتاور مطالعه حاضر (K_Q)	تعداد سلول	نوع مش
۲۸/۴۵	۰/۴۷۱	۰/۳۳۷	۹۵۱۱۰۸	درشت
۱۴/۰۱	۰/۴۷۱	۰/۴۰۵	۱۵۴۹۹۸۱	متوسط
۴/۲۵	۰/۴۷۱	۰/۴۵۱	۲۳۷۱۳۶۸	ریز
۱/۹۱	۰/۴۷۱	۰/۴۶۲	۳۱۰۱۵۴۳	بسیار ریز

۵. صحت سنجی

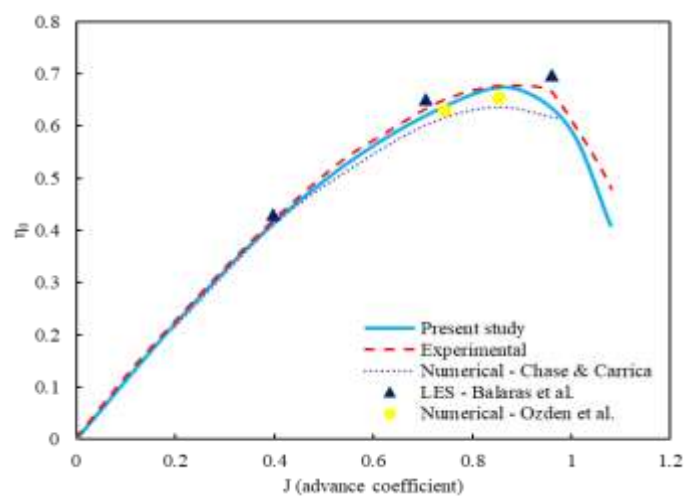
عملکرد سیستم نیروی محرکه به شدت وابسته به نیروی تراست، گشتاور پروانه و راندمان آن است [۲۳]. بنابراین برای ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه زیر دریایی، ضرایب K_T (ضریب تراست)، K_Q (ضریب گشتاور) و η (راندمان هیدرودینامیکی) و J (ضریب پیشروی) باید بررسی شوند [۲۴-۲۶، ۱]. در مطالعه حاضر، نتایج محاسباتی بدست آمده از ضریب گشتاور (K_Q)، ضریب تراست (K_T) و راندمان هیدرودینامیکی (η) بر حسب ضریب پیشروی (J) حاصل از شبیه سازی CFD با نتایج آزمایشگاهی موجود در فلیچه و همکاران [۱۳] مقایسه شده است. علاوه بر این، نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج LES بالاراس و همکاران [۱۶]، نتایج عددی چیس و کاریکا [۴] و ازدن و همکاران [۱۷] مقایسه گردید. همانطور که در شکل های ۷ تا ۹ نشان داده شده است، نتایج عددی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود تطابق خوبی دارند و ماکزیمم خطایی در حدود ۵ درصد بدست آمده که حاکی از دقت نتایج عددی این مطالعه می باشد.



شکل ۷- مقایسه مقادیر ضریب گشتاور بر حسب ضریب پیشروی مطالعه حاضر و نتایج آزمایشگاهی دی فلیچه و همکاران [۱۳] نتایج LES بالاراس و همکاران [۱۶]، نتایج عددی چیس و کاریکا [۴] و ازدن و همکاران [۱۷]



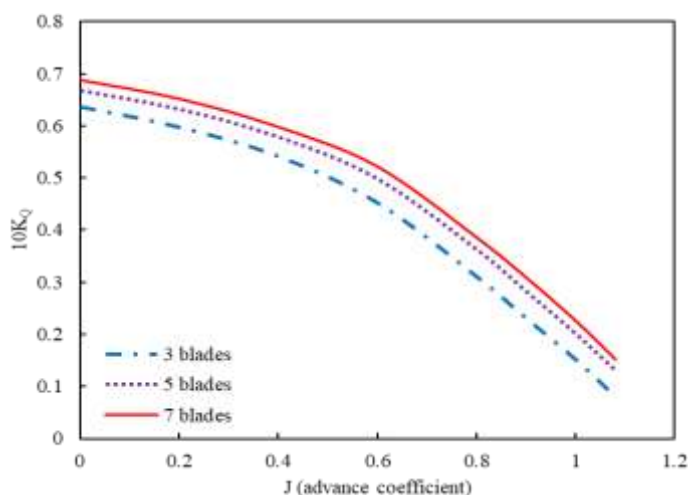
شکل ۸- مقایسه مقادیر ضریب تراست بر حسب ضریب پیشروی مطالعه حاضر و نتایج آزمایشگاهی دی فلیچه و همکاران [۱۳] نتایج LES بالاراس و همکاران [۱۶]، نتایج عددی چیس و کاریکا [۴] و ازدن و همکاران [۱۷]



شکل ۹- مقایسه مقادیر راندمان هیدرودینامیکی بر حسب ضریب پیشروی مطالعه حاضر و نتایج آزمایشگاهی دی فلیچه و همکاران [۱۳] نتایج LES بالاراس و همکاران [۱۶]، نتایج عددی چیس و کاریکا [۴] و ازدن و همکاران [۱۷]

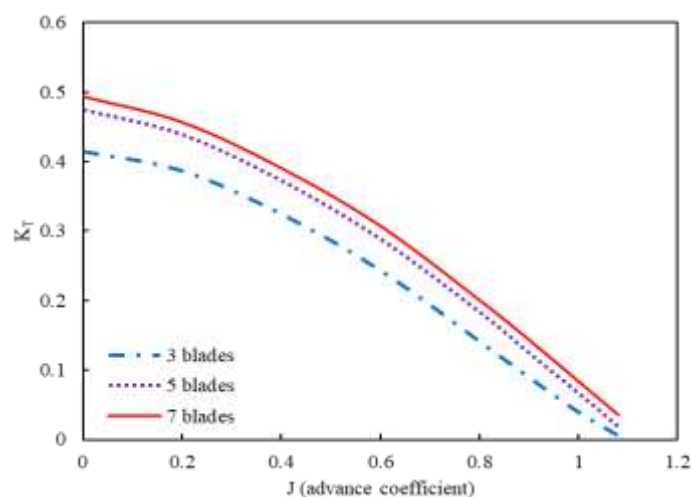
۶. نتایج

شکل ۱۰ تأثیر تعداد پره بر ضریب گشتاور (K_Q) را نشان می دهد. به طور کلی، تعداد پره پروانه یک شناور دریایی بین ۳ تا ۷ پره است [۲۷]. بنابراین در این مطالعه، هندسه مدل پروانه INSEAN E۱۶۱۹ با ۷ پره به ۵ پره و ۳ پره تغییر یافته است، اما پارامترهای پروانه اصلی ثابت نگه داشته شده است. ضریب گشتاور که بیان کننده گشتاور مورد نیاز برای چرخش پروانه در یک ضریب پیشروی مشخص می باشد، حداکثر مقداری در محدوده بارهای کم بین ۰ تا ۰/۵۵ تولید می کند. این مقدار نشان می دهد که گشتاور بیشتری برای چرخش پروانه لازم است. پس از آن، این مقدار با افزایش ضریب پیشروی بین ۰/۵۵ تا ۱/۱ به طور چشمگیری کاهش می یابد. در این شکل، ضریب گشتاور برای همه پروانه ها با افزایش ضریب پیشروی به تدریج کاهش یافته است. حداکثر ضریب گشتاور توسط پروانه با ۷ پره تولید شده است. افزایش تعداد پره منجر به افزایش سرعت جریان می شود، یعنی مؤلفه محوری سرعت جریان نسبت به پره پروانه. با افزایش تعداد پره، پخش ورتیسیت قوی تر در گردابه ایجاد شده نوک پره ظاهر می شود و تداخل بین تعداد پره های بالاتر بر ناحیه ویک منفی در مکان های نزدیک به پره های پروانه تأثیر می گذارد. در شرایط $J = 0.88$ ، اضمحلال ناحیه منفی ویک توسط پروانه با ۷ پره، ضریب گشتاور را در حدود ۱۰٪ و ۱۱/۸٪ نسبت به پروانه ها با ۵ و ۳ پره افزایش می دهد.



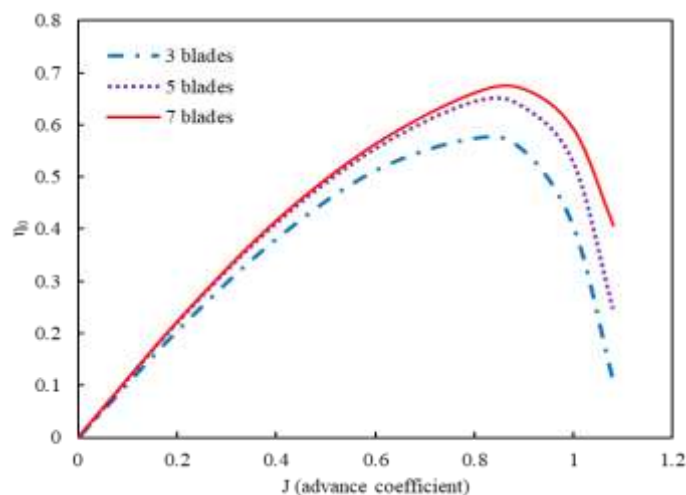
شکل ۱۰- تأثیر تعداد پره بر ضریب گشتاور

تأثیر تعداد پره بر تغییرات ضریب تراست (K_T) به طور کلی به همان ترتیب روند ضریب گشتاور (K_Q) است. ضریب پیشروی (J) با افزایش سرعت ورودی افزایش می یابد در حالی که سرعت چرخش پروانه ثابت است. همانطور که مشاهده می شود برای محدوده گسترده ای از ضریب پیشروی، از جمله بارهای سنگین و معمولی (J)، ضریب تراست متفاوت عمل می کند. همچنین، ضریب تراست که نشان دهنده تراست مورد نیاز برای چرخش پروانه در یک ضریب پیشروی مشخص می باشد، حداکثر مقداری در محدوده بارهای سنگین بین ۰ تا ۰/۳ ایجاد می کند. تولید نیروی تراست بیشتر منجر به نیاز به انرژی بیشتر برای چرخش پروانه می شود. پس از آن، این مقدار با افزایش ضریب پیشروی بین ۰/۳ تا ۱/۱ به طور چشمگیری کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، پروانه با ۳ پره دارای کمترین مقادیر ضریب تراست نسبت به پروانه های دیگر است. با افزایش تعداد پره، ضریب تراست افزایش یافته است اما این افزایش با افزایش تعداد پره از ۵ به ۷ چندان قابل توجه نیست. در شرایط $J = 0.88$ ، ضریب تراست پروانه با ۷ پره حدود ۱۶/۷٪ و ۶۴/۷٪ نسبت به پروانه های ۵ و ۳ پره افزایش یافته است.



شکل ۱۱- تأثیر تعداد پره بر ضریب تراست

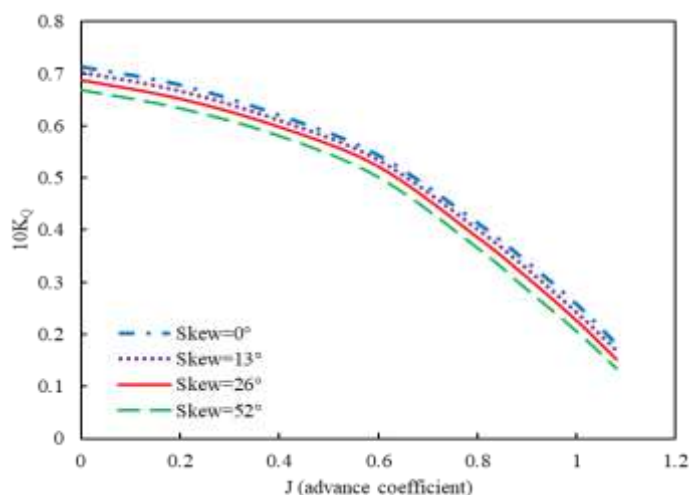
همچنین، تأثیر تعداد پره بر راندمان هیدرودینامیکی (η) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. راندمان هیدرودینامیکی (η)، نسبت تراست تولیدی به گشتاور مورد نیاز در ضریب پیشروی مشخص را نشان می دهد. این مقدار با افزایش ضریب پیشروی در بار سنگین پروانه به طور قابل توجهی افزایش می یابد تا زمانی که در $J=0.88$ به حداکثر مقدار خود می رسد و سپس به طور چشمگیری به کمترین مقدار کاهش می یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی CFD، راندمان هیدرودینامیکی با افزایش تعداد پره پروانه ها بهبود یافته است به طوری که پروانه با ۷ پره دارای حداکثر مقدار راندمان هیدرودینامیکی در میان سه پروانه است.



شکل ۱۲- تأثیر تعداد پره بر راندمان هیدرودینامیکی

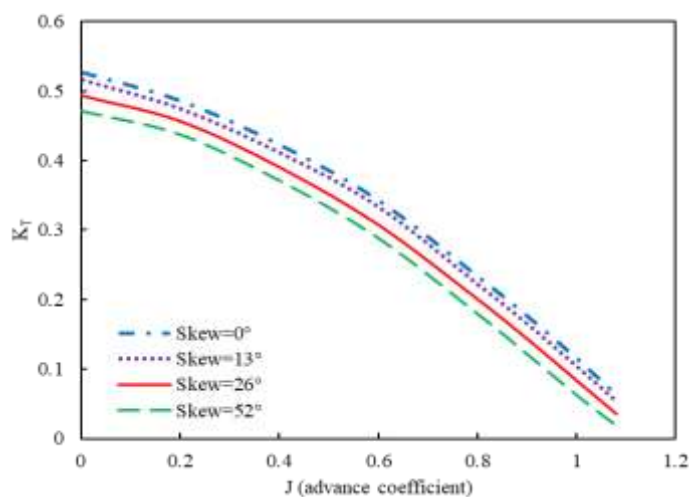
از آنجاییکه پروانه با ۷ پره دارای بیشترین ضرایب هیدرودینامیکی است، به منظور بررسی تأثیر زاویه اسکيو بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه INSEAN E۱۶۱۹ با ۷ پره، چهار زاویه اسکيو مختلف از ۰ تا ۵۲ درجه انتخاب شده است. شکل ۱۳ تأثیر زاویه اسکيو بر ضریب گشتاور را نشان داده است. تأثیر زاویه اسکيو بر مشخصه های هیدرودینامیکی پروانه مهم است. زاویه اسکيو پایین، مقدار کمی عملکرد بالاتری نسبت به پروانه با زاویه اسکيو بالا داشته است. همان گونه که مشخص است با افزایش زاویه اسکيو، ضریب گشتاور کاهش یافته است. در شرایط $J=0.88$ ، ضریب گشتاور پروانه با زاویه اسکيو برابر با ۵۲

درجه در حدود $۰.۱۵/۲$ ، $۰.۱۲/۵$ و $۰.۸/۵$ در مقایسه با پروانه ها با زوایای اسکيو به ترتیب برابر ۰ ، ۱۳ و ۲۶ درجه کاهش یافته است.



شکل ۱۳- تأثیر زاویه اسکيو بر ضريب گشتاور

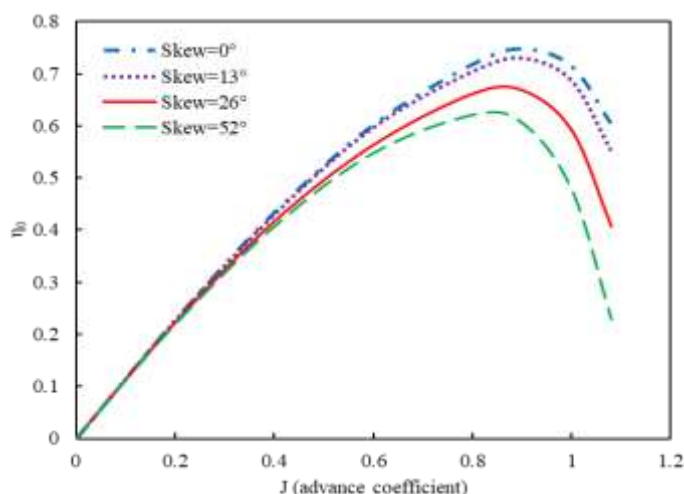
علاوه بر این، تأثیر زاویه اسکيو بر ضريب تراست در شکل ۱۴ نشان داده شده است. برای تمامی زوایای اسکيو، ضريب تراست با افزایش ضريب پیشروی کاهش یافته است. همان طور که آشکار است با افزایش زاویه اسکيو، ضريب تراست کاهش یافته است. حداکثر مقدار ضريب تراست برای پروانه با زاویه اسکيو برابر ۰ درجه است. در شرایط $J=۰.۸۸$ ، ضريب تراست پروانه با زاویه اسکيو برابر ۰ درجه در حدود $۰.۶/۳$ ، $۰.۲۱/۴$ و $۰.۴۲/۸$ در مقایسه با پروانه ها با زوایای اسکيو به ترتیب برابر ۱۳ ، ۲۶ و ۵۲ درجه افزایش یافته است.



شکل ۱۴- تأثیر زاویه اسکيو بر ضريب تراست

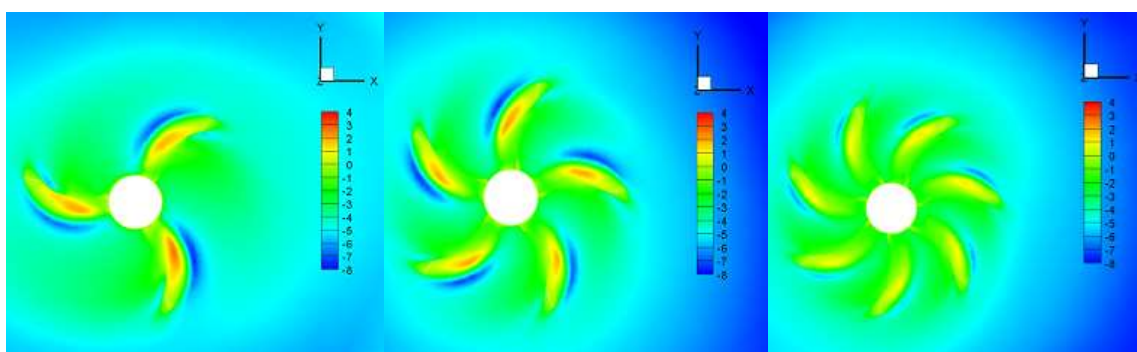
شکل ۱۵ تأثیر زاویه اسکيو بر راندمان هیدرودینامیکی را نشان داده است. اسکيو در پره های پروانه تأثیر منفی بر عملکرد هیدرودینامیکی دارد. همانطور که در این شکل مشخص است کاهش زاویه اسکيو می تواند بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه تأثیر مثبتی بگذارد. این تأثیر در مقادیر بالای ضريب پیشروی چشمگیرتر است. به طوری که در شرایط $J=۰.۸۸$ که در آن حداکثر راندمان هیدرودینامیکی برای تمامی زوایای اسکيو بدست آمده است، راندمان هیدرودینامیکی پروانه با زاویه اسکيو

برابر ۰ درجه در حدود ۱۹/۴٪، ۹/۷٪ و ۱/۴٪ در مقایسه با پروانه‌ها با زوایای اسکيو به ترتیب برابر ۵۲، ۲۶ و ۱۳ درجه افزایش یافته است. اگرچه اسکيو پروانه باعث اختلال در عملکرد هیدرودینامیکی می‌شود اما پروانه با اسکيو بالا موجب کاهش سروصدا و ارتعاش نسبت به پروانه با اسکيو پایین می‌گردد.



شکل ۱۵- تأثیر زاویه اسکيو بر راندمان هیدرودینامیکی

توزیع ویک در اطراف پروانه‌ها با پره‌های ۳، ۵ و ۷ با زاویه اسکيو برابر با ۲۶ درجه در $Z = 0.05$ به ترتیب در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در این شکل، اثر تعداد پره در میدان ویک به درستی توسط شبیه سازی CFD مطالعه حاضر بدست آمد. برای تمامی پروانه‌ها، نوک پره سرعت محوری بالایی را ایجاد می‌کند. همچنین، در این شکل مشاهده شده است که پروانه با ۷ پره، پخش ورتیسیتته قوی تر در گردابه ایجاد شده نوک پره را نسبت به دیگر پروانه‌ها تولید کرده است. از طرف دیگر، تداخل بین ۷ پره، ناحیه ویک منفی را در مکانهای نزدیک به پره‌های پروانه از بین می‌برد. این اثرات مثبت منجر به تولید راندمان هیدرودینامیکی بالاتری نسبت به سایر پروانه‌ها می‌شود.



شکل ۱۶- توزیع ویک در اطراف پروانه‌ها به ترتیب با پره‌های ۳، ۵ و ۷ با زاویه اسکيو برابر با ۲۶ درجه در $Z = 0.05$

۷. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شبیه سازی سه بعدی CFD به منظور بررسی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه INSEAN E1619 انجام شده است. همچنین، ارتباط بین زاویه اسکيو و تعداد پره بر عملکرد هیدرودینامیکی یک پروانه زیردریایی به صورت عددی بررسی شده است. بدین منظور، تعداد سه پره مختلف (۳، ۵ و ۷) و چهار زاویه اسکيو مختلف (از ۰ درجه تا ۵۲ درجه) بر اساس مدل پروانه INSEAN E1619 به عنوان هندسه اصلی در نظر گرفته شده است. جریان حول پروانه به کمک روش CFD با استفاده

از معادلات URANS همراه با مدل توربولانسی SST k- ω شبیه سازی شده است. تطابق خوبی بین نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی موجود به دست آمده است که تصدیق می کند مطالعه CFD حاضر می تواند به طور قابل قبولی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه را شبیه سازی کند. نتایج نشان می دهد که ضرایب گشتاور و تراست برای همه پروانه ها با افزایش ضریب پیشروی به تدریج کاهش می یابد. از سوی دیگر، تعداد پره ها تأثیر مثبتی بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه دارد و پروانه با ۷ پره بالاترین راندمان هیدرودینامیکی را تولید می کند. تداخل بین ۷ پره، ناحیه ویک منفی را در مکانهای نزدیک به پره های پروانه از بین می برد که منجر به تولید راندمان هیدرودینامیکی بالاتری نسبت به سایر پروانه ها می شود. با افزایش تعداد پره، ضرایب گشتاور و تراست افزایش یافته است. در شرایط $J = 0.88$ ، ضریب تراست پروانه با ۷ پره در حدود $1.6/7\%$ و $6.4/7\%$ نسبت به پروانه ها با ۵ و ۳ پره بهبود یافته است. علاوه بر این، زاویه اسکيو بالا، مقدار کمی عملکرد پایین تری نسبت به پروانه با زاویه اسکيو پایین داشته است. در شرایط $J = 0.88$ ، ضریب گشتاور پروانه با زاویه اسکيو برابر 52° درجه در حدود $1.5/2\%$ ، $1.2/5\%$ و $8/5\%$ در مقایسه با پروانه ها با زوایای اسکيو به ترتیب برابر ۰، ۱۳ و ۲۶ درجه کاهش یافته است.

۸. منابع

۱. Carlton, J. (۲۰۱۲). Marine propellers and propulsion. Butterworth-Heinemann, London.
۲. Bertram, V. (۲۰۱۲). Practical ship hydrodynamics. Oxford, U.K: Butterworth-Heinemann, Elsevier, pp. ۳۷-۶۱.
۳. Molland, A. F. (۲۰۰۸). The Maritime Engineering. The Maritime Engineering Reference Book, first edition, Oxford, U.K: Butterworth-Heinemann, pp. ۱۸۱-۳۴۳.
۴. Chase, N., & Carrica, P. M. (۲۰۱۳). Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff. Ocean Engineering, ۶۰, ۶۸-۸۰.
۵. Rhee, S. H., & Joshi, S. (۲۰۰۵). Computational validation for flow around a marine propeller using unstructured mesh based Navier-Stokes solver. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, ۴۸(۳), ۵۶۲-۵۷۰.
۶. Elghorab, M. A., Aly, A. A. E. A., Elwetedy, A. S., & Kotb, M. A. (۲۰۱۳, January). Experimental Study of Open Water Non-Series Marine Propeller Performance. In Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology (No. ۷۸, p. ۹۲۴). World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET).
۷. Ochi, F., Fujisawa, T., Ohmori, T., & Kawamura, T. (۲۰۰۹). Simulation of propeller hub vortex flow. In First International Symposium on Marine Propulsors.
۸. Shin, K. W., Andersen, P., & Mikkelsen, R. (۲۰۱۱). Cavitation simulation on conventional and highly-skewed propellers in the behind-hull condition. In Second International Symposium on Marine Propulsors.
۹. Hayati, A. N., Hashemi, S. M., & Shams, M. (۲۰۱۲). A study on the effect of the rake angle on the performance of marine propellers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, ۲۲۶(۴), ۹۴۰-۹۵۵.
۱۰. Nouri, N. M., & Mohammadi, S. (۲۰۱۸). Numerical investigation of the effects of camber ratio on the hydrodynamic performance of a marine propeller. Ocean Engineering, ۱۴۸, ۶۳۲-۶۳۶.

۱۱. Sánchez-Caja, A., González-Adalid, J., Pérez-Sobrinho, M., & Sipilä, T. (۲۰۱۴). Scale effects on tip loaded propeller performance using a RANSE solver. *Ocean Engineering*, ۸۸, ۶۰۷-۶۱۷.
۱۲. Zhu, Z. (۲۰۱۵). Numerical study on characteristic correlation between cavitating flow and skew of ship propellers. *Ocean Engineering*, ۹۹, ۶۳-۷۱.
۱۳. Di Felice, F., Felli M., Liefvendahl M., Svennberg U. (۲۰۰۹). Numerical and experimental analysis of the wake behavior of a generic submarine propeller. In: *First International Symposium Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
۱۴. Watanabe, T., Kawamura, T., Takekoshi, Y., Maeda, M., & Rhee, S. H. (۲۰۰۳, November). Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation (Cav)*.
۱۵. Hayati, A. N., Hashemi, S. M., & Shams, M. (۲۰۱۲). A study on the effect of the rake angle on the performance of marine propellers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, ۲۲۶(۴), ۹۴۰-۹۵۵.
۱۶. Balaras, E., Schroeder, S., & Posa, A. (۲۰۱۵). Large-eddy simulations of submarine propellers. *Journal of Ship Research*, ۵۹(۴), ۲۲۷-۲۳۷.
۱۷. Özden, M. C., Gürkan, A. Y., Özden, Y. A., Canyurt, T. G., & Korkut, E. (۲۰۱۶). Underwater radiated noise prediction for a submarine propeller in different flow conditions. *Ocean Engineering*, ۱۲۶, ۴۸۸-۵۰۰.
۱۸. Martínez-Calle, J., Balbona-Calvo, L., González-Pérez, J., & Blanco-Marigorta, E. (۲۰۰۲, January). An open water numerical model for a marine propeller: A comparison with experimental data. In *ASME ۲۰۰۲ Joint US-European Fluids Engineering Division Conference* (pp. ۸۰۷-۸۱۳). American Society of Mechanical Engineers.
۱۹. Li, D. Q. (۲۰۰۶). Validation of RANS predictions of open water performance of a highly skewed propeller with experiments. *Journal of Hydrodynamics*, ۱۸(۱), ۵۰۹-۵۱۷.
۲۰. Benini, E. (۲۰۰۴). Significance of blade element theory in performance prediction of marine propellers. *Ocean Engineering*, ۳۱(۸-۹), ۹۵۷-۹۷۴.
۲۱. Menter, F. R. (۱۹۹۴). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, ۳۲(۸), ۱۵۹۸-۱۶۰۵.
۲۲. Wang, L. Z., Guo, C. Y., Su, Y. M., & Wu, T. C. (۲۰۱۸). A numerical study on the correlation between the evolution of propeller trailing vortex wake and skew of propellers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, ۱۰(۲), ۲۱۲-۲۲۴.
۲۳. Boucetta, D., & Imine, O. (۲۰۱۶). Numerical Simulation of the Flow around Marine Propeller Series. *Journal of Physical Science and Application*, ۶(۳), ۵۵-۶۱.
۲۴. Hughes, M. J., Kinnas, S. A., & Kerwin, J. E. (۱۹۹۲). Experimental validation of a ducted propeller analysis method. *Journal of fluids engineering*, ۱۱۴(۲), ۲۱۴-۲۱۹.
۲۵. Ekinici, S. (۲۰۱۱). A practical approach for design of marine propellers with systematic propeller series. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, ۶۲(۲), ۱۲۳-۱۲۹.

۲۶. Gaafary, M. M., El-Kilani, H. S., & Moustafa, M. M. (۲۰۱۱). Optimum design of B-series marine propellers. Alexandria Engineering Journal, ۵۰(۱), ۱۳-۱۸.
۲۷. Ghassemi, H., & Ghadimi, P. (۲۰۱۱). Hydrodynamic efficiency improvement of the high skew propeller for the underwater vehicle under surface and submerged conditions. Journal of Ocean University of China, ۱۰(۴), ۳۱۴-۳۲۴.