

بررسی وضعیت علمی و پیشرفت‌های اخیر در حوزه پروانه‌های

نیمه مغروق

فرهاد کیانی فلاورجانی

دانشجوی دکترا هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، اصفهان (شاهین شهر)

چکیده

پروانه نیمه مغروق یکی از اجزای کلیدی سیستم رانش در بسیاری از شناورها، به ویژه کشتی‌ها و قایق‌های بزرگ است. این نوع پروانه به گونه‌ای طراحی شده است که بخشی از آن در زیر سطح آب قرار گرفته و بخشی دیگر در هوا قرار دارد و به علت کاربرد زیاد در شناورهای سبک و شناورهای سرشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پروانه‌های نیمه مغروق با توجه به پیشرفت‌های علمی و تکنولوژی‌های مدرن، توانسته‌اند بهبودهای چشم‌گیری در کارایی، پایداری و طول عمر به دست آورند. این پیشرفت‌ها شامل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، مواد پیشرفته و کنترل هوشمند بوده که همگی به بهبود عملکرد این پروانه‌ها در سرعت‌های بالا کمک کرده‌اند. هدف این پژوهش توسعه دانش فناوری‌های در حوزه پیشران‌های شناورهای تندرو مخصوصاً بررسی وضعیت تولیدات علمی در حوزه پروانه نیمه مغروق است. پژوهش حاضر از نوع مروری، کاربردی و داده‌کاوی است و در انجام آن از تکنیک‌های تحلیل پایگاه‌های داده علمی استفاده شده است. داده‌ها و کلیدواژه‌های مرتبط با پژوهش در فاصله بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس جستجو و ارزیابی شدند. برای تحلیل داده‌ها و مصورسازی اطلاعات به دست آمده، از نرم‌افزار وی‌وی‌و^۱ استفاده شده است. جامعه آماری پژوهش ۷۰ سند علمی (شامل مقاله پژوهشی، مقاله کنفرانسی و فصل کتاب) در زمینه فناوری مرتبط و درگیر با پروانه نیمه مغروق بوده است. تحلیل‌ها شامل، میزان فراوانی انتشار بر حسب سال، کشورهای بیشترین اسناد منتشر کننده و تهیه نقشه ساختار دانشی در این حوزه بوده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد فراوانی و روند انتشار اسناد علمی در حوزه پروانه نیمه مغروق به شدت در ارتقای سرعت و بهبود راندمان در شناورهای با اهمیت است، کشور ایران، چین و ایالات متحده بیشترین پژوهش‌ها را در این حوزه فناوری انجام داده‌اند.

واژه‌های کلیدی

شناورهای تندرو، پروانه نیمه مغروق، وضعیت توسعه علمی، مطالعات علم سنجی

Review of the Current Scientific Status and Recent Advances in the Field of Surface-Piercing Propellers (SPP)

Farhad Kiani

Malek Ashtar University of Technology; aerospace1362@gmail.com

Abstract

Surface-piercing propellers are part of modern marine propulsion systems that hold special significance due to their extensive application in lightweight and high-speed vessels. These propellers, benefiting from advancements in scientific and modern technologies, have achieved significant improvements in efficiency, stability, and lifespan. These advancements include the use of computational fluid dynamics (CFD), advanced materials, and intelligent control systems, all of which have contributed to enhancing the performance of these propellers at high speeds. The aim of this research is to expand the knowledge of technologies in the propulsion systems of high-speed vessels, with a particular focus on reviewing the scientific output related to surface-piercing propellers. This study is a practical review based on data mining, utilizing scientific database analysis techniques. Data and keywords relevant to the research were searched and evaluated using the Scopus database for the period between 2010 and 2023. For data analysis and visualization, the VosViewer software was used. The statistical population of the study included 70 articles related to technologies involving surface-piercing propellers. The analyses covered the frequency of

¹ VosViewer

publications by year, the countries with the most published documents, and the development of a knowledge structure map in this field. The results indicate that the frequency and trend of scientific publications in the field of surface-piercing propellers are crucial for improving speed and efficiency in vessels. Iran, China, and the United States have conducted the most research in this technological domain.

Keywords

High-speed boats, Surface-piercing propellers, scientific development status, scientific studies

۱. مقدمه

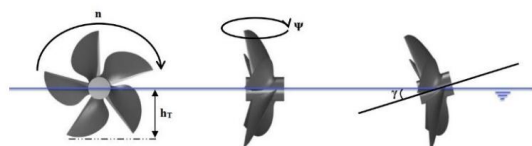
شناور سرشی یا شناور تندرو نوعی وسیله نقلیه دریایی است که با طراحی خاص خود قادر به حرکت با سرعت‌های بالا در سطح آب است. این نوع شناورها به دلیل طراحی هیدرودینامیکی و ویژگی‌های فنی خود، در کاربردهای نظامی، تجاری و تفریحی استفاده می‌شوند. سرعت این شناورها معمولاً بین ۳۰ تا ۷۰ گره دریایی (۵۵ تا ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت) و گاهی بیشتر است. یکی از انواع مختلف سیستم‌های پیشران در این شناورها پروانه‌ی نیمه مغروق می‌باشد.

از مشخصات این نوع پروانه‌ها حرکت در دو محیط سیالی متفاوت است [1-3]. برای بررسی این نوع پروانه‌ها نیاز به در نظر گرفتن شرایط پیچیده‌ای از جمله فصل مشترک بین دو سیال آب و هوا می‌باشد. پارامتر کاویتاسیون که در پروانه‌های معمولی^۱ (کاملاً مغروق^۲) سبب کاهش تراست، افزایش گشتاور و همچنین ارتعاشات روی شفت و بدنه شناور می‌شود، در سیستم رانش پروانه نیمه مغروق با پدیده‌های جاذبه‌ای می‌شود [3-4]. سیستم رانش پروانه‌ای کاملاً مغروق در گستره وسیعی از شناورهای سطحی کوچک، سبک و حتی تناژ متوسط استفاده می‌شود. پروانه‌های نیمه‌مغروق معمولاً به صورتی نصب می‌شوند که بخشی از تیغه‌ها در آب و بخشی از آنها خارج از آب باشد [5-7]. این وضعیت به این پروانه‌ها اجازه می‌دهد تا از مزایای هر دو نوع پروانه‌های کاملاً غوطه‌ور و سطح‌شکاف (نیمه مغروق) بهره‌مند شوند. در این حالت، بخشی از پروانه که در آب است، نیروی جلوبرنده ایجاد می‌کند، در حالی که بخش دیگر با کاهش تماس با آب، از میزان درگ و کاویتاسیون جلوگیری می‌کند [8]. شناورهای مجهز به پروانه نیمه مغروق قابلیت حرکت در آب‌های کم عمق، عمیق و حتی آب‌های

گل آلود را دارا می‌باشند [9-11] [6]. دانش طراحی و تحلیل پروانه نیمه مغروق به علت مواجه شدن با پارامترهای هندسی و هیدرودینامیکی مختلف مانند پروفیل سطح مقطع پره، پدیده کاویتاسیون هواده‌ی، اثر سطح آزاد و جریان چندفازی بسیار پیچیده و سخت می‌باشد [11-14].

۱-۱- پارامترهای موثر در طراحی

ضرایب هیدرودینامیکی تراست، گشتاور و بازده یک پروانه به پارامترهای مختلفی وابسته است. در پروانه‌های مغروق این ضرایب به قطر (D)، گام (P)، تعداد پره (Z)، نسبت سطح گسترش‌یافته (EAR)، زاویه ریک^۳ (θ_r)، زاویه اسکيو^۴ (θ_s)، ضخامت پره (t)، نوع پروفیل مقطع (f) و اعداد بی بعد رینولدز (Re)، ضریب پیشروی^۵ (J)، عدد فرود (Fr) و کاویتاسیون^۶ (σ) وابسته هستند. با توجه به شرایط عملکردی پروانه نیمه مغروق و شکافتن سطح آب در هر دور چرخش، چهار پارامتر عدد وبر (We)، نسبت مغروقی^۷ (I)، زاویه انحراف شافت^۷ (γ) و زاویه یاء^۷ (Ψ)، نیز علاوه بر پارامترهای ذکر شده برای پروانه‌های مغروق رایج بر ضریب هیدرودینامیکی این دسته از پروانه‌ها تاثیرگذار خواهند بود. شکل ۱ نشان دهنده شرایط مختلف زاویه‌ای یک پروانه نیمه مغروق می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت مکانی یک پروانه نیمه مغروق در شرایط زاویه‌ای مختلف [6]

³ Rake angle

⁴ Skew angle

⁵ Advance ratio

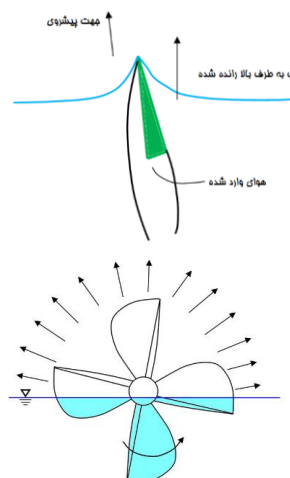
⁶ Immersion Ratio

⁷ Inclination shaft angle

¹ Conventional propellers

² Fully wetted

در هنگام برخورد پره پروانه نیمه مغروق پدیده‌هایی رخ می‌دهد که وقوع آن‌ها در این نوع پروانه‌ها نسبت به سایر پروانه‌های متداول بیشتر است. سطح بدنه شناورها در هنگام حرکت، آب را در هوا اسپری می‌کنند. پدیده تشکیل اسپری در نتیجه کاهش عدد وبر در پشت پره و ایجاد آب در هنگام خروج پروانه است [3-4].



شکل ۳- اسپری آب ناشی از نیروهای فشاری و اسپری آب به صورت شعاعی

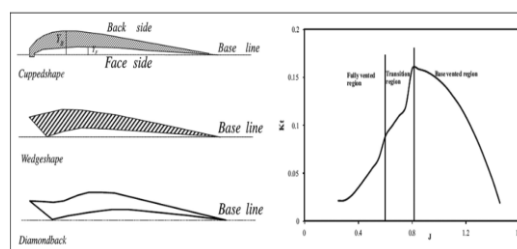
عدد رینولدز جریان آب در شرایط عملکرد در سرعت بالا از مرتبه میلیون است [23]. در این رینولدز تئوری لایه مرزی عدد رینولدز محلی پایینی را در سمت پرفشار پروانه در نزدیکی پره و هم چنین حباب‌هایی را در سمت مکش و تشکیل ناحیه‌ی لزج را پیش‌بینی می‌کند [24]. در هنگام حرکت رو بالای پره به سطح آب نیروهای ویسکوز مقداری از آب را اطراف پره نگه می‌دارند. پره می‌تواند ۷ تا ۱۲ درصد حجم آب را به اتمسفر خارج می‌کند [3-4]. در پروانه‌های کاملاً مغروق اگر فشار استاتیکی در نقطه‌ای درون میدان جریان از فشار بخار سیال در دمای مورد نظر کمتر شود، حباب‌های بخار در داخل جریان سیال تشکیل می‌گردد که به این پدیده کاویتاسیون گفته می‌شود [24-27]. حباب‌های تشکیل شده پس از رسیدن به نواحی پرفشار یا در نزدیکی دیواره‌های جامد متلاشی می‌شوند. در پروانه‌های نیمه مغروق به دلیل امکان دستیابی به اتمسفر در نواحی کم فشار علاوه بر پدیده کاویتاسیون پدیده هوادهی نیز رخ می‌دهد [3-4]. پدیده هوادهی بسیار مشابه پدیده کاویتاسیون است [15-17] در واقع پدیده هوادهی زمانی

در طراحی پروانه‌ی نیمه مغروق، برای رسیدن به شرط تراست مطلوب و قید حداقل گشتاور مجاز، با توجه به این که ضریب پیشروی ثابت است، باید توجه داشت که با تغییر کدام پارامتر، شرط تراست و گشتاور سریع‌تر ارضاء می‌شود. این پارامترها شامل زاویه‌ی اسکيو، نسبت گام به قطر، نسبت مغروقت، زاویه‌ی محور شفت و زاویه عرضی شفت (زاویه یاو) می‌باشند. برای این که بتوان شرایط را برای یک بررسی جامع فراهم نمود، دسترسی به داده‌های قابل اعتماد بسیار مهم است [15-17]. مهمترین مزایای پروانه نیمه مغروق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود [18-22]:

- امکان افزایش قطر پروانه به اندازه دلخواه
- عدم محدودیت در احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون و جایگزینی آن با پدیده هوادهی
- تغییر پروفیل سطح مقطع پره پروانه و امکان دسترسی به بازده بالا در سرعت‌های بالای شناور
- تغییر میزان غوطه‌وری پروانه و کاهش زاویه شفت شناور

۲. مفاهیم اساسی در پروانه نیمه مغروق

هندسه پروانه نیمه مغروق از نظر ظاهری متفاوت با هندسه پروانه‌های متداول است [1-3]. مقطع پره اغلب به گونه‌ای طراحی می‌شود که دارای لبه ابتدایی نوک تیز^۱ و لبه انتهایی^۲ یا لبه فرار ضخیم و پله‌دار^۳ است [2] [4]. لبه تیز ابتدایی با زاویه ورودی کم طراحی شده و توپی پروانه و ریشه پره در مقابل بارهای زیاد خارج از مرکز و تناوبی وارده مقاوم شده‌اند [7].

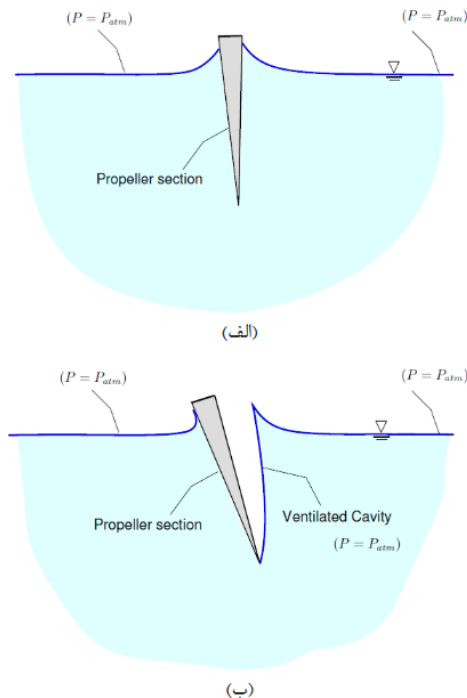


شکل ۲- سه نمونه از مقاطع پره پروانه نیمه مغروق [4]

¹ Leading Edge

² Trailing Edge

³ Stepped



شكل ٤-الف) رژيم هوادهي پايه ب) رژيم كاملا هوادهي شده

در ادامه به خصوصيات و ويژگيهاي بيشتري از اين نوع پروانهها مي پردازيم:

كاهش درگ: پروانههاي معمولي كه به صورت كامل در آب غوطه ور هستند، با مقاومت زيادي از سمت آب مواجه مي شوند اما در پروانههاي نيمه مغروق، تنها نيمي از تيغهها در آب قرار دارند و اين باعث كاهش اصطكاك بين پروانه و آب مي شود [28-30]. اين ويژگي به شناور اجازه مي دهد كه با توان كمترى به سرعتهاي بالا دست يابد و مصرف سوخت نيز بهينه تر شود [15] [31].

افزايش راندمان در سرعتهاي بالا: يكي از ويژگيهاي مهم اين پروانهها، عملکرد بهتر در سرعتهاي بالا است. در شناورهاي با سرعت بسيار زياد، پروانههاي معمولي ممكن است راندمان خود را از دست دهند يا به دليل كاويتاسيون با مشكلاتي مواجه شوند. پروانههاي نيمه مغروق با كاهش سطح تماس با آب و كاستن از پديده كاويتاسيون، مي توانند كارآمدي خود را حتي در سرعتهاي بسيار زياد حفظ كنند [32] [4].

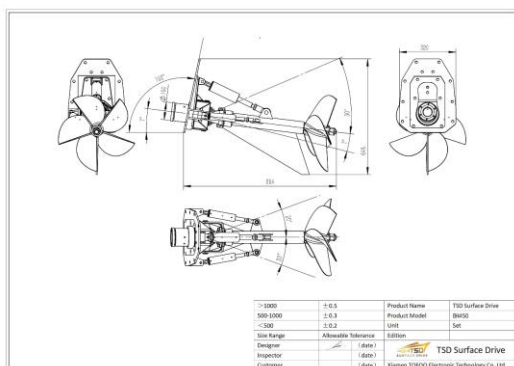
كاهش كاويتاسيون: كاويتاسيون به ايجاد حبابهاي كوچك و پر از گاز در پشت تيغههاي پروانه گفته مي شود كه مي تواند باعث كاهش راندمان و حتي آسيب به پروانه شود [33-35]. در پروانههاي نيمه مغروق، با توجه به اينكه تيغهها به صورت متناوب وارد آب مي شوند و از آن

اتفاق كه سطح هوا يا گازهاي خروجي روي سطح پره گسترده شده و امتداد يابند. بايد توجه نمود كه فشار روي سطح هوادهي ثابت است اما با فشار بخار متفاوت است. بنابراين سطح هوادهي شده مي تواند همانند سطح يك حباب، اما با فشاري متفاوت با فشار بخار، در نظر گرفته شود. با توجه به شرايط عملكردي پروانه نيمه مغروق سه نوع رژيم جرياني براي جريان آب ورودى به پرهى پروانه نيمه مغروق وجود دارد كه نوع رژيم بستگى به مقدار ضريب پيشروى دارد. اين ضريب به صورت زير تعريف مي شود [1] [15]:

$$J = \frac{V_0 \cos \gamma}{nD} \quad (1)$$

كه V_0 سرعت جريان ورودى به پروانه و بر حسب متر بر ثانيه و n سرعت دوراني (دور بر ثانيه) و D قطر پروانه و بر حسب ميلي متر مي باشد. زياد بودن ضريب پيشروى به معني عملکرد در نيروي كم و سرعت زياد است در حالي كه كم بودن ضريب پيشروى به معني عملکرد در نيروي زياد و سرعت پايين است. در ضرايب پيشروى بالا، جريان آب در سطح جلو و پشت پره بدون اينكه از سطح پره جدا شوند، روي سطح آن جريان مي يابند. همان طور كه در شكل ٤ مشاهده مي شود اين رژيم جرياني هوادهي پايه ناميده مي شود. اگر مقطه صفحه نازك تر باشد، قبل از لبه انتهائي در محل بيشتريين ضخامت در طول خط كورد هوادهي آغاز مي شود [3-4] [16]. در ضرايب پيشروى كم، حباب بخار در لبه ي جلوي پره قبل از رسيدن به انتهاي طول خط كورد تشكيل مي شود كه اين حالت را كاويتاسيون جزئي مي گويند [17]. در اين رژيم بازدهي كاهش مي يابد كه به علت تشكيل حباب تركيدن آن و ايجاد ناپايداري روي سطح پروانه است. زماني كه ضرايب پيشروى باز هم كاهش مي يابند، حباب ايجاد شده در لبه ي جلوي پره روي تمامي سطح پشتي پره گسترش مي يابد و در نهايت با رسيدن به سطح آزاد به اتمسفر ختم مي شود. اين رژيم كاملا هوادهي شده ناميده مي شود [3] [15].

نشان از بلوغ تکنولوژی آن دارد. شکل ۵ سه‌نمای این پروانه را نمایش می‌دهد.



شکل ۵- شماتیکی از سه نما پروانه نیمه مغروق نمونه BH450

ویژگی‌های طراحی این پروانه نیمه مغروق شامل موارد زیر است:

ساختار مقاوم و با دوام:

- پروانه‌های BH450 از جنس فولاد ضدزنگ 316L ساخته شده‌اند که مقاومت بالایی در برابر خوردگی و شرایط سخت دریایی دارند.
- تیغه‌های پروانه به صورت دوطرفه طراحی شده‌اند که از استحکام و سختی بالایی برخوردارند و در برابر فشارهای مکانیکی مقاومت می‌کنند.

سیستم هیدرولیک و هدایت:

- سیستم هیدرولیک دوتایی برای بلند کردن و هدایت پروانه‌ها به کار رفته است که امکان تنظیم دقیق عمق غوطه‌وری پروانه در حین حرکت را فراهم می‌کند.
- سیستم هدایت و شاخص‌ها و سنسورهای پیشرفته، کنترل بهینه پروانه را تضمین می‌کنند.

طراحی قابل تنظیم:

- پروانه‌های BH450 دارای سیستم‌های نیمه‌غوطه‌ور قابل تنظیم (قابل حرکت و ثابت) هستند که امکان تنظیم عمق غوطه‌وری پروانه را در شرایط مختلف فراهم می‌آورد.
- طراحی اتصالات گلدانی یونیورسال، نصب و تعویض پروانه‌ها را ساده‌تر می‌کند.

افزایش سرعت و کارایی سوخت:

خارج می‌شوند، تشکیل این حباب‌ها کمتر اتفاق می‌افتد و پروانه با کاهش پدیده کاویتاسیون روبرو است [36].

طراحی خاص تیغه‌ها: تیغه‌های این پروانه‌ها دارای طراحی خاصی هستند تا هنگام ورود و خروج از آب کمترین لرزش و شوک را به شناور منتقل کنند. این طراحی معمولاً شامل لبه‌های تیزتر و هندسه‌های منحنی‌تری است تا به راحتی از سطح آب خارج شوند و وارد آب شوند بدون اینکه راندمان کاهش یابد [37-40].

نیاز به تنظیم دقیق: یکی از چالش‌های اصلی استفاده از پروانه‌های نیمه مغروق، نیاز به تنظیم دقیق موقعیت و زاویه پروانه نسبت به سطح آب است [33]. اگر زاویه درست نباشد پروانه نمی‌تواند به درستی از پتانسیل خود استفاده کند و راندمان آن کاهش می‌یابد. برای رسیدن به بهترین کارایی، معمولاً از سیستم‌های کنترل‌کننده اتوماتیک برای تنظیم زاویه پروانه در حین حرکت شناور استفاده می‌شود [34].

۳. بررسی یک نمونه پروانه نیمه مغروق

پروانه نیمه‌مغروق BH450 یک سیستم پیشرفته محرکه دریایی است که برای قایق‌های پرسرعت طراحی شده است و توسط شرکت Tofo Electronics Engineering توسعه یافته است. این سیستم تحت آزمایش‌های میدانی در قایق‌های پرسرعت در چانگشا چین مورد استفاده قرار گرفته و سرعتی تا ۷۸.۹ کیلومتر بر ساعت را به ثبت رسانده است. ویژگی‌های فنی این پروانه شامل موارد زیر است:

- قطر تیغه: ۴۵۰/۴۰۰ میلی‌متر
- قدرت تطبیقی: ۸۰-۱۳۰ اسب بخار
- گشتاور ورودی: ۵۰۰ نیوتون متر
- وزن هر دستگاه: ۶۰ کیلوگرم
- وزن کشتی مناسب برای نصب تک‌محوره: ۱.۲ تن و برای نصب دومحوره ۲.۵ تن
- دارای ۴، ۵ یا ۶ تیغه
- سرعت ورودی موتور اصلی: ۱۰۰۰-۲۵۰۰ دور در دقیقه

این سیستم محرکه نیمه‌مغروق برای قایق‌های پرسرعت طراحی شده و از لحاظ ایمنی، کارایی و صرفه‌جویی در هزینه، عملکرد بالایی دارد. همچنین این تکنولوژی دارای چندین اختراع ثبت شده و مدل‌های کاربردی است که

- پروانه BH450 نسبت به سیستم‌های سنتی تا ۱۵ تا ۳۰ درصد سریع‌تر عمل می‌کند.
- مصرف سوخت نیز به میزان ۱۵ تا ۳۰ درصد بهینه‌تر شده است که موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

کاهش نویز و فرسایش:

- هوادهی پروانه به سطح آب، میزان نویز تولیدی را کاهش داده و از فرسایش بدنه کشتی جلوگیری می‌کند.
- این ویژگی به ویژه در سرعت‌های بالا اهمیت دارد و موجب افزایش عمر مفید کشتی می‌شود.
- **کاهش مقاومت آب و افزایش پایداری:**
- قرارگیری پروانه در سطح آب باعث کاهش درگ و مقاومت کلی کشتی می‌شود.
- طراحی شیب‌دار پروانه‌ها به افزایش پایداری کشتی در شرایط آب و هوایی مختلف کمک می‌کند.
- امکان تنظیم عمق غوطه‌وری پروانه در حین حرکت، انعطاف‌پذیری بیشتری را فراهم می‌کند.

پروانه نیمه‌غوطه‌ور BH450 با قدرت ۱۳۰ اسب بخار، یکی از بهترین گزینه‌ها برای کشتی‌ها و قایق‌های سرعت بالا است که به دنبال افزایش سرعت، کارایی سوخت و کاهش هزینه‌های عملیاتی هستند. طراحی پیشرفته و ویژگی‌های منحصر به فرد این پروانه، آن را به یک انتخاب ایده‌آل برای کاربردهای حرفه‌ای و تفریحی تبدیل کرده است.

۴. محصولات و فناوری‌های شرکت‌های پیشرو در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق

شرکت‌های بزرگ در صنعت دریانوردی در توسعه پروانه‌های نیمه مغروق پیشگام بوده‌اند و از فناوری‌های پیشرفته برای افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود پایداری زیست‌محیطی استفاده می‌کنند. در این بخش به محصولات و فناوری‌های برجسته‌ای که توسط این شرکت‌ها ارائه شده‌اند، ارایه می‌گردد:

▪ شرکت رولز-رویس^۱

محصولات: پروانه‌های نیمه مغروق تندرو

- ✓ طراحی شده برای شناورهای تندرو و قایق‌های مسابقه‌ای.
- ✓ استفاده از تیغه‌های آیرودینامیک با کاهش نویز و افزایش راندمان در سرعت‌های بالا.

فناوری‌ها:

- ✓ **چاپ سه‌بعدی:** رولز-رویس از فناوری چاپ سه‌بعدی برای تولید تیغه‌های پروانه استفاده می‌کند که امکان طراحی پیچیده‌تر و سبک‌تر را فراهم می‌سازد.
- ✓ **مواد پیشرفته:** استفاده از آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم برای کاهش وزن و افزایش مقاومت در برابر خوردگی.

- ✓ **شبیه‌سازی پیشرفته:** این شرکت از نرم‌افزارهای CFD برای طراحی و تحلیل عملکرد پروانه‌ها بهره می‌برد.

▪ شرکت وارتسیلا^۲

محصولات: پروانه‌های Silent-X پروانه‌هایی با طراحی خاص برای کاهش نویز زیرآبی و مناسب برای شناورهای تحقیقاتی و نظامی.

- ✓ **سیستم‌های ترکیبی رانش:** ترکیب پروانه‌های نیمه مغروق با رانشگرهای الکتریکی برای بهبود مصرف انرژی و کاهش آلودگی.

فناوری‌ها:

- ✓ **سیستم‌های هوشمند کنترل:** پروانه‌های این شرکت به سامانه‌های هوشمندی مجهز هستند که سرعت و زاویه تیغه‌ها را بر اساس شرایط عملیاتی تنظیم می‌کنند.

- ✓ **پوشش‌های ضد کاویتاسیون:** استفاده از پوشش‌های پیشرفته که اثرات ناشی از کاویتاسیون را کاهش داده و عمر مفید پروانه‌ها را افزایش می‌دهند.

- ✓ **پلتفرم‌های دیجیتال:** وارتسیلا از فناوری دوقلوی دیجیتال برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد پروانه‌ها در شرایط مختلف استفاده می‌کند.

▪ شرکت ABB Marine & Ports

^۲ Wärtsilä

^۱ Rolls-Royce

✓ **کنترل هوشمند رانش:** تجهیز پروانه‌ها به حسگرهایی برای اندازه‌گیری فشار و سرعت آب و تنظیم عملکرد بلادرنگ.

✓ **مواد زیست‌سازگار:** استفاده از مواد قابل بازیافت برای تولید پروانه‌ها به منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی.

جدول ۱- مقایسه شرکت‌ها و فناوری‌ها

ویژگی‌ها	محصول برجسته	فناوری کلیدی	شرکت
طراحی سبک و مقاوم برای عملکرد در سرعت‌های بالا	پروانه‌های نیمه مغروق تندرو	چاپ سه‌بعدی و مواد پیشرفته	Rolls-Royce
کاهش نویز و کاپیتاسیون برای شناورهای تحقیقاتی	Silent-X	کنترل هوشمند و کاهش نویز	Wärtsilä
کاهش مصرف انرژی و آلایندگی	رانشگرهای هیبریدی	هوشمندسازی و مدیریت انرژی	ABB Marine
مناسب برای شناورهای نظامی و تجاری کوچک	رانشگرهای شفت‌دار	آبرودینامیک پیشرفته	Kongsberg Maritime
سازگار با محیط زیست و انعطاف‌پذیر در تنظیم زاویه تیغه‌ها	پروانه‌های الکتریکی	مواد زیست‌سازگار و تنظیم بلادرنگ	Schottel

شرکت‌های پیشرو در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق از فناوری‌هایی مانند چاپ سه‌بعدی، هوش مصنوعی، کنترل هوشمند و مواد پیشرفته استفاده می‌کنند تا راندمان را افزایش دهند و تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. این شرکت‌ها به‌طور مداوم در حال توسعه محصولاتی هستند که با نیازهای مدرن صنعت دریانوردی هماهنگ باشند.

۵. آخرین پیشرفت‌ها و دستاوردهای علمی در

حوزه پروانه‌های نیمه مغروق

پروانه نیمه مغروق به عنوان نوع خاصی از پروانه‌های سوپرکاپیتاسیونی اغلب به عنوان سیستم‌های رانشی با

محصولات: رانشگرهای هیبریدی نیمه مغروق، ترکیب پروانه‌های نیمه مغروق با موتورهای الکتریکی برای شناورهای سبز و کم‌مصرف.

✓ **سیستم رانش Azipod:** سیستم رانشی که انعطاف‌پذیری بالایی دارد و با استفاده از پروانه‌های نیمه مغروق کار می‌کند.

فناوری‌ها:

✓ **هوشمندسازی سیستم‌های رانش:** توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشینی برای بهینه‌سازی عملکرد پروانه‌ها و کاهش مصرف سوخت.

✓ **مدیریت انرژی:** یکپارچه‌سازی پروانه‌ها با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (باتری) برای کاهش آلایندگی.

✓ **مواد نانوکامپوزیتی:** بهبود کارایی و کاهش وزن تیغه‌ها با استفاده از نانوکامپوزیت‌ها.

▪ شرکت Kongsberg Maritime

محصولات: پروانه‌های کم‌مصرف برای شناورهای تندرو (طراحی شده برای کاهش مصرف سوخت و افزایش راندمان در شرایط عملیاتی متنوع).

✓ **رانشگرهای شفت‌دار نیمه مغروق:** مناسب برای شناورهای نظامی و تجاری کوچک.

فناوری‌ها:

✓ **طراحی آبرودینامیک بهینه:** استفاده از ابزارهای CAD پیشرفته برای طراحی پروانه‌هایی با کمترین مقاومت هیدرودینامیکی.

✓ **سیستم‌های کاهش نویز:** فناوری‌هایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و نویز زیرآبی، به‌ویژه برای شناورهای گشتی.

▪ شرکت Schottel

محصولات: پروانه‌های الکتریکی نیمه مغروق (ترکیب موتورهای الکتریکی با پروانه‌های نیمه مغروق برای استفاده در کشتی‌های سبز)

✓ **رانشگرهای قابل تنظیم:** پروانه‌هایی که زاویه تیغه‌ها در آن‌ها متناسب با سرعت و بار شناور قابل تغییر است.

فناوری‌ها:

بالاترین بازده برای شناورهای تندرو شناخته می‌شوند [1]. از جمله مهمترین مزایای پروانه‌های نیمه مغروق نسبت به پروانه‌های مغروق می‌توان به دستیابی به سرعت‌های بالاتر، افزایش بازده سیستم رانش، کاهش نویز و ارتعاشات، امکان طراحی در ابعاد بزرگتر به دلیل عدم وجود محدودیت در فاصله نوک پره تا بدنه یا بیشینه آب‌خور و همچنین کاهش خوردگی سایشی سطح پره‌ها به دلیل کاهش و یا فقدان پدیده مخرب کاویتاسیون اشاره کرد [3, 7, 15]. علاوه بر این پروانه‌های نیمه مغروق سبب کاهش قابل توجه در مقاومت شناور می‌شوند. بنابراین قدرت مورد نیاز برای رانش شناورهایی با این نوع پروانه نسبت به شناورهای دارای پروانه‌های معمولی، کاهش قابل توجهی دارد. با این حال، به علت کارکرد پروانه‌های نیمه مغروق در شرایط دو فازی [4]، در یک سیکل دورانی، هر پره یک بار به سطح آب برخورد می‌کند که در نتیجه آن نیروی پیش‌رانش و گشتاور یک پره از صفر به مقدار بیشینه و مجدداً به صفر می‌رسد [12] و این باعث نوسانی شدن نیروی پیش‌رانش و گشتاور در پروانه‌های نیمه مغروق می‌شود [14]. علی‌رغم آن که بیش از یک قرن از شروع استفاده از پروانه‌های دریایی برای رانش شناورها می‌گذرد، تحقیق و بررسی بر روی عملکرد آن‌ها یک موضوع بسیار مهم بشمار می‌آید بطوریکه امروزه باتوجه به کاربرد گسترده پروانه‌های نیمه مغروق در محدوده وسیعی از شناورها، دانشمندان سرگرم انجام تحقیقات و مطالعات تجربی و عددی در خصوص این نوع پروانه‌ها هستند [34-39].

پروانه‌های نیمه مغروق نقش بسیار مهمی در عملکرد کشتی‌ها و وسایل نقلیه دریایی با سرعت بالا دارند. به دلیل اینکه بخشی از پروانه در آب و بخش دیگر در هوا قرار می‌گیرد، این نوع پروانه‌ها ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند کاهش مقاومت در برابر آب و افزایش راندمان در سرعت‌های بالا را ارائه می‌دهند. با این حال، طراحی و بهینه‌سازی آن‌ها به دلیل چالش‌هایی مانند کاویتاسیون، لرزش، و فرسایش نیازمند تحقیق و نوآوری‌های علمی است. در ادامه برخی از جدیدترین دستاوردهای علمی و تحقیقاتی در این زمینه با جزئیات بیشتری توضیح داده می‌شوند:

۵-۱- شبیه‌سازی پیشرفته برای بررسی جریان‌های سیال

Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) یا شبیه‌سازی RANS ناپایا یک روش شبیه‌سازی پیشرفته برای بررسی جریان‌های سیال در اطراف اجسام متحرک، مانند پروانه‌های نیمه مغروق است [39]. در این روش، ناپایداری‌های زمانی جریان سیال و تأثیرات دینامیکی آن‌ها بر روی عملکرد پروانه به دقت شبیه‌سازی می‌شود URANS به‌ویژه در مسائل پیچیده‌ای که جریان سیال دارای تغییرات زمانی و نوسانات دینامیکی است، بسیار کاربرد دارد. پروانه‌های نیمه مغروق به دلیل تعامل هم‌زمان با آب و هوا، جریان‌های بسیار پیچیده و ناپایداری ایجاد می‌کنند. تیغه‌های پروانه به صورت متناوب از آب خارج شده و دوباره به داخل آن وارد می‌شوند. این تعاملات باعث ایجاد جریان‌های غیرپایا می‌شود که به‌طور مستقیم بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه و همچنین ایجاد کاویتاسیون و جریان‌های گردابی تأثیر می‌گذارد. استفاده از URANS برای شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها به طراحی بهینه‌تر و پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد پروانه کمک می‌کند. مزایای استفاده از URANS در شبیه‌سازی پروانه‌های نیمه مغروق شامل موارد زیر است [36-39]:

- **دقت بالاتر در شبیه‌سازی جریان‌های ناپایا:** URANS قادر است رفتار ناپایدار جریان‌ها را به‌صورت دقیق‌تری نسبت به مدل‌های پایا شبیه‌سازی کند. این امر برای پروانه‌های نیمه مغروق که در معرض نوسانات شدید جریان هستند، بسیار مهم است.
- **پیش‌بینی بهتر عملکرد دینامیکی پروانه:** شبیه‌سازی ناپایداری‌های زمانی، URANS به طراحان امکان می‌دهد تا عملکرد دینامیکی پروانه را در شرایط واقعی دریایی بهتر پیش‌بینی کنند. این شامل بررسی نوسانات فشار، سرعت و نیروهای وارد بر تیغه‌های پروانه است.
- **کاهش خطای شبیه‌سازی در شرایط بحرانی:** در شبیه‌سازی پروانه‌های نیمه مغروق با سرعت بالا، جریان‌های غیرپایا و نوسانات دینامیکی می‌توانند باعث بروز مشکلاتی مانند کاویتاسیون و گرداب‌های غیرخطی شوند. URANS به دلیل توانایی در مدل‌سازی

این ناپایداری‌ها، به کاهش خطاهای شبیه‌سازی در شرایط بحرانی کمک می‌کند.

چالش‌ها و محدودیت‌های URANS در شبیه‌سازی پروانه‌های نیمه مغروق شامل موارد زیر است [37]:

- **هزینه محاسباتی بالا:** شبیه‌سازی URANS به دلیل حل معادلات ناپایا و نیاز به دقت بالا، به توان محاسباتی بسیار بیشتری نسبت به مدل‌های RANS پایا نیاز دارد. این می‌تواند زمان و هزینه‌های محاسباتی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

- **پیچیدگی در مدل‌سازی شرایط مرزی:** در URANS، مدل‌سازی دقیق شرایط مرزی (مانند مرزهای سطحی بین آب و هوا) بسیار پیچیده‌تر از مدل‌های پایا است. این پیچیدگی ممکن است نیاز به تکنیک‌های پیشرفته‌تری برای تنظیم شرایط مرزی داشته باشد.

- **نیاز به مدل‌های توربولانسی دقیق‌تر:** مدل‌های توربولانسی که در URANS استفاده می‌شوند، باید قادر به مدل‌سازی نوسانات زمانی جریان‌های آشسته باشند. مدل‌های توربولانسی استاندارد ممکن است برای این نوع شبیه‌سازی کافی نباشند و نیاز به مدل‌های پیچیده‌تری مانند SST^۱ یا $k-\omega$ وجود دارد.

نوآوری‌ها

- **مدل‌سازی ناپایداری‌های جریان:** در شبیه‌سازی URANS، معادلات Navier-Stokes برای مدل‌سازی حرکت سیال به کار می‌روند، اما این معادلات به‌گونه‌ای حل می‌شوند که نوسانات زمانی در سرعت و فشار سیال به‌صورت میانگین‌گیری شده (RANS) به همراه نوسانات ناپایا در نظر گرفته شوند. در پروانه‌های نیمه مغروق، جریان‌های سیال تحت تأثیر تغییرات مداوم سرعت، ورود و خروج پروانه از آب، و تعامل با سطح آب و هوا قرار دارند [38]. URANS این ناپایداری‌ها را مدل‌سازی می‌کند و به محققان اجازه می‌دهد رفتار واقعی پروانه در این شرایط پیچیده را بررسی کنند [39].

- **مدل‌سازی جریان‌های دو فاز (آب و هوا):** پروانه‌های نیمه مغروق با جریان‌های دو فاز مواجه هستند؛ یعنی هم‌زمان در دو محیط آب و هوا کار

می‌کنند. URANS با استفاده از مدل‌های دو فاز، مانند مدل‌های VOF^۲، رفتار جریان‌های دو فاز را شبیه‌سازی می‌کند. این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند تغییرات در فشار و سرعت جریان‌های دو فاز را به‌صورت ناپایا در اطراف پروانه نشان دهند [39].

- **بررسی اثرات کاویتاسیون:** یکی از مسائل مهم در پروانه‌های نیمه مغروق، کاویتاسیون است که در اثر تغییرات شدید فشار در پشت تیغه‌های پروانه رخ می‌دهد. URANS قادر است این پدیده را به‌خوبی مدل‌سازی کند، زیرا معادلات RANS ناپایا به‌گونه‌ای حل می‌شوند که تأثیرات کاویتاسیون را با دقت بیشتری در نواحی با تغییرات شدید فشار نشان دهند. این به طراحان کمک می‌کند تا تیغه‌های پروانه را به‌گونه‌ای طراحی کنند که کاویتاسیون و اثرات فرسایش ناشی از آن به حداقل برسد [39].

- **تعامل پروانه با سطح آب:** پروانه‌های نیمه مغروق به‌طور مداوم با سطح آب در تعامل هستند و تیغه‌های آن‌ها به‌صورت متناوب وارد آب می‌شوند و از آن خارج می‌شوند. این تعامل باعث ایجاد پدیده‌هایی مانند گرداب‌های سطحی و امواج سطحی می‌شود که عملکرد پروانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. URANS این تعاملات پیچیده را با دقت بیشتری نسبت به مدل‌های RANS پایا (Steady RANS) شبیه‌سازی می‌کند و به پیش‌بینی رفتار پروانه در شرایط واقعی کمک می‌کند.

- **مدل‌سازی اثرات نوسانات سرعت و زاویه حمله:** نوسانات سرعت و زاویه حمله تیغه‌های پروانه در اثر ورود و خروج مداوم آن‌ها از آب ایجاد می‌شود. این نوسانات به‌طور مستقیم بر نیروهای آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی وارد بر پروانه تأثیر می‌گذارد. URANS به دلیل توانایی در حل ناپایداری‌های زمانی، می‌تواند تغییرات لحظه‌ای در نیروهای وارد بر پروانه و تأثیرات آن‌ها بر کارایی کلی پروانه را مدل‌سازی کند.

استفاده از شبیه‌سازی Unsteady RANS یا URANS در طراحی و بهینه‌سازی پروانه‌های نیمه مغروق ابزار بسیار قدرتمندی برای بررسی رفتار جریان‌های ناپایدار و پیچیده اطراف این پروانه‌ها است. این روش به محققان و مهندسان کمک می‌کند تا پدیده‌هایی مانند کاویتاسیون،

^۲ Volume of Fluid

^۱ Shear Stress Transport

ناپایداری‌های جریان، و تعامل با سطح آب و هوا را به‌طور دقیق‌تری مدل‌سازی کرده و به طراحی پروانه‌های کارآمدتر و بهینه‌تر دست یابند [40].

۵-۲- بهینه‌سازی طراحی با استفاده از CFD (دینامیک سیالات محاسباتی)

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای اخیر در زمینه پروانه‌های نیمه مغروق، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بهینه‌سازی طراحی پروانه است. این روش به محققان امکان می‌دهد تا جریان آب و هوا را به‌طور دقیق مدل‌سازی کرده و عملکرد پروانه را در شرایط مختلف پیش‌بینی کنند. با CFD می‌توان اثرات کاویتاسیون، فشار و سرعت جریان آب روی پروانه را بررسی کرد و تغییرات لازم را در شکل و زاویه تیغه‌های پروانه اعمال نمود [33]. نرم‌افزارهای پیشرفته CFD مانند ANSYS Fluent و OpenFOAM به‌طور گسترده برای این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند [32-35].

نوآوری‌ها:

- **بهبود شکل تیغه‌ها:** مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح جزئی در انحنای تیغه‌ها و زاویه حمله آن‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کاویتاسیون را کاهش داده و کارایی کلی پروانه را افزایش دهد.
- **شبیه‌سازی اثرات شرایط محیطی:** یکی دیگر از کاربردهای CFD شبیه‌سازی شرایط محیطی مانند امواج، باد و جریان‌های متقاطع است که می‌تواند عملکرد پروانه را تحت تأثیر قرار دهد. این شبیه‌سازی‌ها به طراحی پروانه‌هایی منجر شده که در شرایط محیطی چالش‌برانگیز پایداری بهتری دارند.
- **تحلیل الگوی جریان دو فازی (آب و هوا):** پروانه‌های نیمه مغروق هم‌زمان در دو محیط آب و هوا کار می‌کنند. شبیه‌سازی این شرایط پیچیده نیاز به استفاده از مدل‌های دو فازی دقیق دارد تا اثرات نیروی برشی بین آب و هوا و اثرات فشار بر روی تیغه‌های پروانه به‌خوبی مدل‌سازی شود.
- **تحلیل غیرخطی نیروها:** هنگام کار پروانه‌های نیمه مغروق، نیروهای هیدرودینامیکی غیرخطی ناشی از ترکیب نیروهای هیدرولیکی و آیرودینامیکی ایجاد می‌شود. CFD این امکان را می‌دهد که تأثیر این نیروها

در طراحی تیغه‌ها و زاویه حمله پروانه به‌خوبی بررسی و بهینه‌سازی شود.

- **کاهش جریان‌های گردابی:** CFD کمک می‌کند تا نواحی ایجاد گرداب و تلفات انرژی را در پشت پروانه شناسایی کرده و با تغییر شکل تیغه‌ها، جریان گردابی را به حداقل برساند. این به کاهش مقاومت هیدرودینامیکی و افزایش راندمان کمک می‌کند [1].

۵-۳- مواد پیشرفته برای ساخت پروانه

استفاده از مواد جدید و پیشرفته یکی از دیگر حوزه‌های تحقیقاتی فعال در ساخت پروانه‌های نیمه مغروق است. به دلیل سرعت بالای چرخش پروانه و تماس مداوم آن با آب و هوا، پروانه‌ها باید دارای استحکام بالا، مقاومت به خوردگی و سبک وزن باشند. در سال‌های اخیر، استفاده از مواد کامپوزیتی و آلیاژهای فلزی با تکنولوژی‌های پیشرفته بهبود یافته است. با استفاده از مواد پیشرفته، مانند الیاف کربن و آلیاژهای سبک‌وزن، عملکرد پروانه‌های نیمه مغروق بهبود چشم‌گیری پیدا کرده است. این مواد علاوه بر سبک‌سازی پروانه، استحکام بیشتری در برابر تنش‌ها و فشارهای بالا ایجاد می‌کنند و از خستگی مواد جلوگیری می‌کنند [49-50].

نوآوری‌ها:

- **الیاف کربن:** این ماده به دلیل نسبت بسیار بالای استحکام به وزن و مقاومت بالا در برابر خوردگی، به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای ساخت پروانه‌های سبک و کارآمد در سرعت‌های بالا به کار گرفته شده است.
- **آلیاژهای تیتانیوم:** این آلیاژها دارای خواص مکانیکی عالی و مقاومت به خوردگی بوده و می‌توانند پروانه‌های نیمه مغروق را برای استفاده در شرایط سخت دریایی بسیار مقاوم کنند.
- **کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف:** کامپوزیت‌های چندلایه تقویت‌شده با الیاف کربن یا شیشه وزن را کاهش داده و مقاومت مکانیکی بالایی دارند. این مواد علاوه بر کاهش وزن پروانه، به بهبود تحمل در برابر نیروهای پیچشی و خمشی دینامیکی کمک می‌کنند که در سرعت‌های بالا بسیار مهم است.
- **آلیاژهای تیتانیوم و نیکل:** این آلیاژها به دلیل مقاومت بالایشان در برابر خوردگی دریایی و

مقاومت مکانیکی در شرایط دما و فشار بالا، مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از این مواد به طول عمر بیشتر پروانه و کاهش هزینه‌های نگهداری منجر شده است [49].

۴-۵- پایداری هیدرودینامیکی و کاهش ارتعاشات

پایداری هیدرودینامیکی یکی از چالش‌های بزرگ در پروانه‌های نیمه مغروق است، چرا که بخشی از پروانه در هوا و بخشی دیگر در آب کار می‌کند. این شرایط باعث ایجاد ناپایداری‌ها و ارتعاشات ناخواسته می‌شود. تحقیقات اخیر به سمت طراحی‌هایی رفته‌اند که این ناپایداری‌ها را به حداقل برساند. یکی از چالش‌های اساسی در پروانه‌های نیمه مغروق، برخورد هم‌زمان با محیط‌های مختلف آب و هوا و تغییرات دینامیکی سریع است [34]. برای کاهش ناپایداری‌ها، از تکنیک‌های طراحی پیشرفته و شبیه‌سازی‌های پیچیده استفاده می‌شود تا پایداری حرکتی و عملکرد پروانه بهینه شود.

نوآوری‌ها:

- **طراحی تیغه‌های جدید:** تغییرات در شکل و زاویه تیغه‌ها به‌طور قابل توجهی ارتعاشات ناشی از تماس مداوم پروانه با آب و هوا را کاهش داده است. تیغه‌های خمیده و پروفیل‌های نامتقارن می‌توانند با توزیع بهتر نیروی هیدرودینامیکی، پایداری بهتری فراهم کنند.

- **مدل‌سازی ناپایداری‌ها:** با استفاده از ابزارهای مدل‌سازی هیدرودینامیک، محققان قادر به پیش‌بینی و بهینه‌سازی رفتار پروانه‌ها در سرعت‌های بالا و جلوگیری از ناپایداری‌های دینامیکی بوده‌اند.

- **طراحی تیغه‌های نامتقارن:** تیغه‌های پروانه به شکلی طراحی می‌شوند که بتوانند تغییرات در شرایط محیطی را جبران کنند. تیغه‌های نامتقارن می‌توانند نیروهای ناشی از چرخش پروانه در آب و هوا را متعادل کرده و لرزش‌های دینامیکی را کاهش دهند.

- **پروفیل‌های خاص تیغه‌ها:** تغییر در پروفیل تیغه‌ها باعث می‌شود که نوسانات نیروهای هیدرودینامیکی به حداقل برسند. تحقیقات جدید نشان داده‌اند که استفاده از پروفیل‌های چندمنظوره، علاوه بر بهبود کارایی، باعث کاهش تولید گرداب‌ها و جریان‌های ناخواسته نیز می‌شود.

- **تحلیل حرکت در شرایط نامتعادل:**

شبیه‌سازی شرایط دینامیکی و سرعت‌های بالا نشان داده که می‌توان با طراحی‌های دقیق و متغیرهای کنترلی، حرکت پروانه را در شرایط ناهموار مانند امواج بلند یا جریان‌های مخالف بهبود بخشید.

۵-۵- مدیریت کاویتاسیون

کاویتاسیون یکی از بزرگترین چالش‌های پروانه‌های نیمه مغروق است. کاویتاسیون باعث ایجاد حباب‌های گاز در پشت تیغه‌های پروانه می‌شود که می‌تواند به کاهش راندمان و فرسایش تیغه‌ها منجر شود. کاویتاسیون یکی از مشکلات بزرگ در پروانه‌های نیمه مغروق است که باعث کاهش کارایی و افزایش فرسایش می‌شود. برای کاهش این پدیده، تحقیقات به سمت بهبود طراحی تیغه‌ها و استفاده از روش‌های پیشرفته برای کنترل جریان‌های ناخواسته متمرکز شده است. در تحقیقات جدید، تلاش‌های بسیاری برای کاهش این پدیده از طریق طراحی و مواد بهتر انجام شده است [15-18].

نوآوری‌ها:

- **تغییر شکل تیغه‌ها:** بهبود طراحی تیغه‌ها به کاهش نواحی با فشار پایین کمک می‌کند که می‌تواند میزان کاویتاسیون را به حداقل برساند [22]. طراحی‌های جدید شامل تیغه‌های با پروفیل‌های نازک‌تر و استفاده از انحنای خاص است که باعث کاهش ایجاد حباب‌های کاویتاسیون می‌شود.

- **مطالعه شرایط محیطی:** تغییرات دما، فشار و خواص فیزیکی آب می‌تواند تاثیر زیادی بر کاویتاسیون داشته باشد. تحقیقات جدید به بررسی این اثرات پرداخته و راهکارهایی برای مقابله با آن در شرایط محیطی مختلف پیشنهاد داده‌اند [26].

- **طراحی تیغه‌های ضدکاویتاسیون:** تغییرات در شکل و انحنای تیغه‌ها می‌تواند به کاهش نواحی با فشار پایین و جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون کمک کند. تیغه‌های ضدکاویتاسیون دارای لبه‌های منحنی و صیقلی هستند که جریان آب را بهتر هدایت می‌کنند و از ایجاد حباب‌های هوا جلوگیری می‌کنند.

- **پوشش‌های ضدکاویتاسیون:** استفاده از پوشش‌های نانوتکنولوژی و مواد مقاوم به فرسایش، برای کاهش اثرات فرسایشی کاویتاسیون روی تیغه‌های پروانه

مفید بوده‌اند. این پوشش‌ها سطح تیغه را صاف‌تر کرده و مقاومت به جریان‌های متلاطم را افزایش می‌دهند [30].

• **مدل‌سازی دقیق کاویتاسیون:** با استفاده از مدل‌های CFD می‌توان رفتار کاویتاسیون را به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد و با اصلاحات طراحی، از آن جلوگیری کرد. مدل‌های Erosion-Cavitation برای پیش‌بینی نواحی که کاویتاسیون رخ می‌دهد و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی به‌کار گرفته می‌شوند [39].

۵-۶- کنترل هوشمند و مانیتورینگ

پیشرفت‌های اخیر در حوزه سیستم‌های هوشمند و کنترل‌های تطبیقی، امکان بهبود عملکرد پروانه‌های نیمه مغروق را در شرایط واقعی فراهم کرده است. این سیستم‌ها به‌صورت بلادرنگ پارامترهای مختلف مانند سرعت، دما و فشار را مانیتور کرده و تغییرات لازم برای بهینه‌سازی عملکرد را اعمال می‌کنند. با پیشرفت در سیستم‌های الکترونیکی و کنترل، استفاده از سیستم‌های مانیتورینگ پیشرفته و کنترل هوشمند در پروانه‌های نیمه مغروق مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم‌ها امکان تنظیم خودکار پروانه را در حین حرکت فراهم می‌کنند تا عملکرد بهینه در هر لحظه تضمین شود.

نوآوری‌ها:

• **سنسورهای دما و فشار:** این سنسورها به‌طور مداوم وضعیت پروانه را اندازه‌گیری کرده و اطلاعات را به سیستم کنترلی ارسال می‌کنند تا تنظیمات لازم برای بهینه‌سازی عملکرد پروانه اعمال شود. سنسورهای دما، فشار، و جریان‌های دینامیکی در سیستم‌های کنترل پروانه نصب شده‌اند که می‌توانند وضعیت پروانه را در هر لحظه تحلیل کرده و به سیستم کنترلی گزارش دهند.

• **کنترل تطبیقی:** سیستم‌های کنترل تطبیقی می‌توانند به‌صورت بلادرنگ تغییرات در شرایط محیطی و سرعت را شناسایی کرده و عملکرد پروانه را متناسب با آن‌ها تنظیم کنند. این باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان کلی سیستم می‌شود [49]. سیستم‌های کنترل تطبیقی با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند تغییرات در شرایط محیطی را به‌صورت بلادرنگ شناسایی کنند و پارامترهای عملکردی پروانه را برای بهبود کارایی تنظیم کنند.

• **سیستم‌های پیش‌بینی خرابی:** استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی و جلوگیری از خرابی در پروانه‌های نیمه مغروق به بهبود نگهداری و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. این سیستم‌ها می‌توانند خرابی‌های احتمالی را پیش‌بینی کنند و قبل از وقوع مشکل، تعمیرات لازم را پیشنهاد دهند.

این پیشرفت‌ها نه تنها به بهبود کارایی و افزایش عمر پروانه‌های نیمه مغروق کمک کرده، بلکه باعث شده تا کاربرد آن‌ها در صنایع دریایی، از جمله قایق‌های تندرو نظامی و تجاری گسترش یابد [50].

۶. روش‌شناسی پژوهش

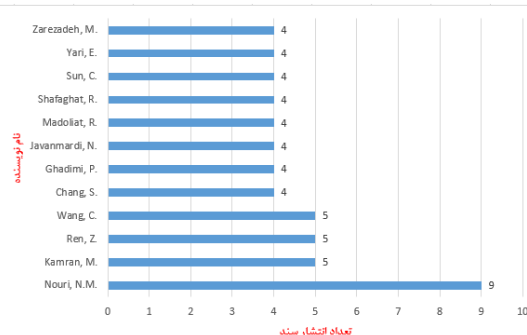
این پژوهش از لحاظ هدف جز تحقیقات کاربردی است زیرا پژوهشگران می‌توانند از نتایج آن برای بهبود شرایط و یافتن مسیر تحقیقاتی خود در زمینه فناوری مرتبط با پروانه نیمه مغروق بهره ببرند.

نتایج ارایه شده در این مقاله شامل بررسی مدارک (شامل مقالات چاپ شده در مجلات، مقالات کنفرانسی، کتاب، گزارش و غیره) منتشر شده در جهان در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق می‌باشد. برای این منظور پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس که یک پلتفرم آنلاین و فرمت‌های مختلف اطلاعاتی (مقاله، مجله، کتاب، ویدئو، پایان نامه، عکس، گزارش‌ها، اسنادها و سایر منابع تحقیقاتی) را در یک حوزه تخصصی یا چند موضوعی نگهداری می‌کند برای این منظور انتخاب شده است این پایگاه هم اکنون یکی از ابزارهای اصلی تحقیقات دانشگاهی و پژوهش‌های علمی محسوب می‌شوند.

۱۱ بررسی وضعیت علمی پروانه‌های نیمه مغروق

(یافته‌های پژوهش)

تعداد مدارک منتشر شده در این حوزه در شکل ۶ نشان داده شده است. یکی از چالش‌های اساسی در تحلیل و توسعه دانش در حوزه پروانه نیمه مغروق وابستگی شدید این نوع دانش به حوزه تست و ارزیابی عملکرد در محیط واقعی است. این فرایندی بسیار پرهزینه و نیازمند زیرساخت‌های متعدد است. به همین دلیل این حوزه دانشی بسیار وابسته به حمایت‌های مالی و زیرساختی و آزمایشگاهی است. روند انتشار اسناد علمی در این حوزه

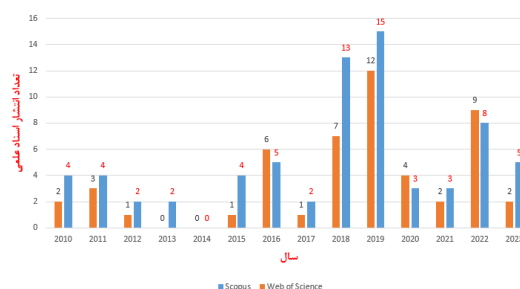


شکل ۸- شماتیکی از نویسندگان فعال (بیشترین انتشار اسناد علمی) در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق

جدول ۲- لیستی از جدیدترین مقالات منتشر شده در حوزه پروانه نیمه مغروق

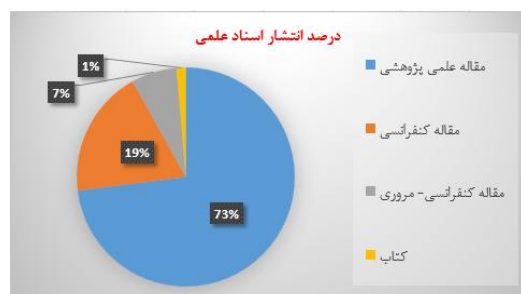
سال انتشار	محل چاپ	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی	عنوان مقاله (انگلیسی)	ردیف
2024	Scientific Reports	Masoud Zarezadeh Nowrouz Mohammad Nouri Reza Madoliat	بهینه سازی پارامترهای پروانه نیمه مغروق توسط شبکه عصبی مصنوعی	Position parameters optimization of surface piercing propeller by artificial neural network	1
2023	Ocean Engineering	Seif, Mohammad Saeed Teimouri, Mahdi	بررسی اثرات پوسته پوسته شدن در پروانه نیمه مغروق	The study on the scaling effects in the surface piercing propeller	2
2022	Scientific Reports	Kamran, Maryam Nouri, Norouz Mohammad Goudarzi, Hossein Golrokhifara, Saeed	ارزیابی تجربی تأثیر پارامترهای موقعیت و عملکرد بر عملکرد پروانه نیمه مغروق	Experimental evaluation of the effect of positioning and operating parameters on the performance of a surface-piercing propeller	3
2022	Ocean Engineering	Seif, Mohammad Saeed Teimouri, Mahdi	بررسی تجربی و عددی عملکرد هیدروینامیکی یک خانواده پروانه نیمه مغروق جدید	Experimental and numerical investigation of hydrodynamic performance of a new surface piercing propeller family	4
2022	Ocean Engineering	Kamran M Nouri N.M	مدلسازی رگرسیونی عملکرد پروانه نیمه مغروق بر اساس پارامترهای هندسی لبه انتهایی با استفاده از روش CFD	Regression Modeling of surface piercing propeller performance based on trailing edge geometrical parameters using CFD method	5

در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ به بالاترین تعداد انتشار اسناد علمی رسیده است.



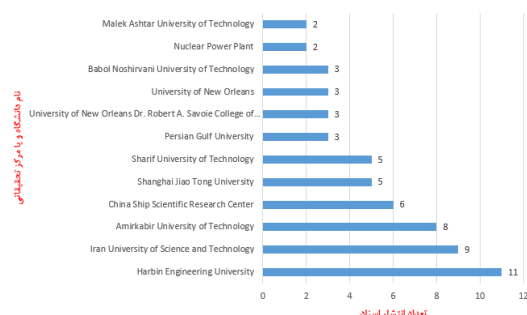
شکل ۶- شماتیکی از روند انتشار اسناد علمی در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق در دو پایگاه استنادی وب آف ساینس و اسکوپوس

شکل ۷ وضعیت نوع مدارک منتشر شده (مقاله کنفرانسی، مقاله علمی پژوهشی، کتاب و غیره) در دنیا را در این حوزه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص شده است مقالات علمی پژوهشی منتشر شده با بیش از ۷۳ درصد بیشترین میزان مدارک منتشر شده در این حوزه را به خود اختصاص داده است. مقالات کنفرانسی با ۱۹ درصد و مقالات کنفرانسی مروری با ۷ درصد در رتبه بعدی قرار گرفته اند.



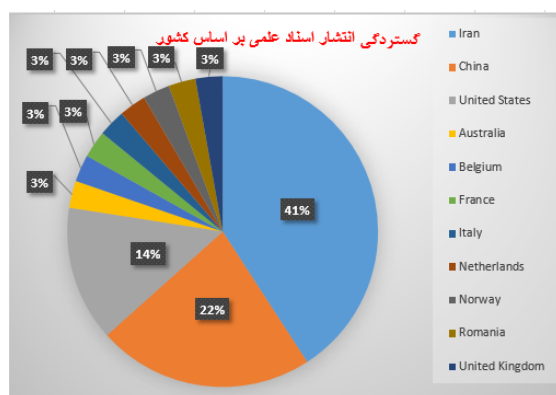
شکل ۷- شماتیکی از درصد و گستردگی انتشار اسناد علمی در حوزه پروانه های نیمه مغروق

نویسندگان این حوزه در سطح بین‌المللی با بیشترین تعداد مدرک در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع شناورهای تندرو در کشور، اکثر نویسندگان مطرح و فعال در این حوزه را دانشجویان و اعضای هیئت علمی دانشگاه‌های کشور ایران تشکیل داده اند. در جدول ۱ لیستی از جدیدترین انتشارات مراکز دانشگاهی ایران لیست شده است.



شکل ۹- شماتیکی از مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های فعال و پیشرو در حوزه انتشار اسناد علمی مرتبط با پروانه‌های نیمه مغروق

شکل ۱۰ وضعیت انتشار اسناد علمی در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق را بر اساس کشور نمایش می‌دهد. با توجه به اهمیت شناورهای تندرو در دکتترین دفاعی و اقتصاد دریای پایه مشاهده می‌شود که بیشترین اسناد علمی چاپ شده در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق متعلق به کشور عزیزمان ایران بوده است. چین و کشور ایالات متحده در رتبه‌های بعدی در این حوزه علم و فناوری قرار گرفته‌اند. بر اساس این مطالعات در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۳ کشور ایران حدود ۲۹ سند علمی در حدود ۴۱ درصد از کل اسناد علمی منتشر شده در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق را تولید و منتشر کرده است. کشور چین در حدود ۱۶ سند علمی در حدود ۲۲ درصد و کشور ایالات متحده در حدود ۱۰ سند علمی و حدود ۱۴ درصد از تولیدات علمی را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱۰- شماتیکی از گستردگی انتشار اسناد علمی در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق

در ادامه به منظور ترسیم ساختار دانشی در این حوزه در ابتدا با استفاده از خروجی‌های حاصل از پایگاه استنادی اسکوپوس و با بهره‌گیری از نرم‌افزار VosViewer تحلیل واژگان مربوطه انجام شده است. در این قسمت لغات موجود در مدارک استخراج و مرتبط‌ترین واژگان از میان

سال انتشار	محل چاپ	نویسندگان	عنوان مقاله به فارسی	عنوان مقاله (انگلیسی)	ردیف
2022	Journal of Applied Fluid Mechanics	Teimoori M. Seif, Mohammad Saeed	بررسی پروانه های نیمه مغروق در عمق غوطه وری متفاوت با استفاده از روش عددی	A Study into Surface-Piercing Propellers at Different Immersion Depths using a Towing Tank and a Numerical Method	6
2022	Applied Ocean Research	Kamran M Nowrouz Mohammad Nouri Askarpour H	بررسی عددی اثر شکل لبه انتهایی (فرار) بر عملکرد پروانه نیمه مغروق	Numerical Investigation of the Effect of Trailing Edge Shape on Surface-Piercing Propeller Performance	7
2022	Measurement: Journal of the International Measurement Confederation	Kamran, Maryam, Nouri, Norouz Mohammad	سیستم آزمایش مدل برای پروانه های نیمه مغروق در یک تونل آب: روش طراحی و کالیبراسیون درجا	Model testing system for surface-piercing propellers in a water tunnel: Design and in situ calibration methodology	8
2021	Ocean Engineering	Amini, Ali Nouri, Nowrouz Mohammad Abedi, Aria Kamran, Maryam	بهبود عملکرد پروانه نیمه مغروق سطحی در ضرایب پیشروی پایین توسط هوادهی	Performance improvement of surface piercing propeller at low advance coefficients by aeration	9
2020	Applied Ocean Research	Yousefi, Abdorreza Shafaghat, Rouzbeh	بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر شکل‌گیری و رشد هوادهی در پروانه نیمه مغروق	Numerical study of the parameters affecting the formation and growth of ventilation in a surface-piercing propeller	10

در شکل ۹ مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی پیشرو در این حوزه لیست شده‌اند. در حوزه مطالعات و فعالیت‌های علمی و پژوهشی دانشگاه هاربین چین، دانشگاه علم و صنعت و دانشگاه امیرکبیر از ایران در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفته‌اند. دانشگاه‌های صنعتی شریف، خلیج فارس بوشهر، نوشیروانی بابل و صنعتی مالک اشتر جزء مراکز تحقیقاتی پیشرو و فعال در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق هستند. این موضوع نشان دهنده اهمیت توسعه دانش بومی در حوزه پروانه‌های نیمه مغروق در کشور عزیزمان ایران می‌باشد.

- [5] Amini , Nowrouz Mohammad Nouri, Aria li ,Maryam Kamran, "Performance improvement of surface piercing propeller at low ice coefficients by aeration," *Ocean Engineering*, vol. ۲۳۸, pp. 34-55, ۲۰۲۱. 116/j.oceaneng.2021.109551
- [6] Seyyed Mostafa Seyyedi, Rouzbeh Shafaghat ,Negin Donyavizadeh, "A Review on the Hydrodynamic Characteristics of the SPP Concerning to the Available Experimental Data and Evaluating Regression Polynomial Functions," *International Journal of Maritime Technology (IJMT)*, vol. 10, pp. 25-38, 2018. 10.29252/ijmt.10.25
- [7] Abdorreza Yousefi, Rouzbeh Shafaghat, "Numerical study of the parameters affecting the formation and growth of ventilation in a surface-piercing propeller," *Applied Ocean Research*, vol. 104, pp. 56-72, 2020. DOI:10.1016/j.apor.2020.102360
- [8] M. Tadros, M. Ventura, C. Guedes Soares, "Optimization procedures for a twin controllable pitch propeller of a ROPAX ship at minimum fuel consumption," *Journal of Marine Engineering and Technology (JMET)* , vol. 22, no. 4, pp. 167-175, 2022. doi.org/10.1080/20464177.2022.2106623
- [9] Yousefi, A. & Shafaghat, R. Numerical study of the parameters affecting the formation and growth of ventilation in a surfacepiercing propeller. *Appl. Ocean Res.* **104**, 102360 2020, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102360>
- [10] Abbas Dashtimanesh, Mohammad Hossein Ghaemi, Youjiang Wang, Rasul Niazmand Bilandi, Spyros Hirdaris, "Digitalization of High Speed Craft Design and Operation Challenges and Opportunities," in *3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing*, Shanghai, China, 2022, DOI:10.1016/j.procs.2022.01.254.
- [11] Seyyedi, Seyyed Mostafa, Shafaghat, Rouzbeh, "A review on the Surface-Piercing Propeller: Challenges and opportunities," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Volume 234, Issue 4, , pp. 743 - 770, 2020, DOI:10.1177/1475090220906917
- [12] S. Y. Sun and G. X. Wu, "Local flow at plate edge during water entry," *Phys.Fluids* 32, 072103 (2020), DOI:10.1063/5.0013914

بازه زمانی نشان می‌دهد که در مجموع ۷۰ مدرک در پایگاه اسکوپوس نمایه شده است. پروانه‌های نیمه‌مغروق نوع ویژه‌ای از پروانه‌های سوپر کاویتاسیونی هستند که در شرایط نیمه‌مغروق عمل می‌کنند. این نوع پروانه‌ها طوری طراحی گردیده‌اند که بهترین عملکرد و بیشترین راندمان را در بالاترین سرعت دارند. مزایای پروانه‌های نیمه‌مغروق باعث شده که اکثر شناورهای تندرو از این نوع پروانه‌ها استفاده نمایند. مهم‌ترین پارامترهای موثر در رفتار پروانه‌های نیمه‌مغروق شامل؛ ویژگی‌های هندسی، مانند تعداد پره، نسبت گام، نسبت سطح گسترش‌یافته، زاویه کجی، زاویه شلاقی، مقطع پره، و نیز ویژگی‌های فیزیکی، مانند زاویه عمودی شفت، زاویه عرضی شفت، ضریب پیشروی، نسبت مغروقی و اعداد بی‌بعد رینولدز، کاویتاسیون، وبر و فرود می‌باشند. از لحاظ علمی کشور ایران در صدر تولیدات علمی در این حوزه فناوری است و به منظور پایداری و پشتیبانی فنی در این حوزه لازم است از سایر مشوق‌های علمی نظیر بورسیه‌های تحصیلی، برگزاری همایش‌های تخصصی، برگزاری دوره‌های آموزشی مشترک با سایر دانشگاه‌های مطرح، فرصت‌های مطالعاتی این روند موفقیت در کشور ادامه‌دار شود.

۲- منابع و مراجع

- [1] Masoud Zarezadeh, Nowrouz Mohammad Nouri, Reza Madoliat, "Position parameters optimization of surface piercing propeller by artificial neural network," *scientific reports*, vol. 14, no. 2295, pp. 1162-1190, 27 January 2024. DOI:10.1038/s41598-024-52325-8
- [2] Javanmard, Ehsan, Yari, Ehsan, Mehr, Javad A, "Numerical investigation on the effect of shaft inclination angle on hydrodynamic characteristics of a surface-piercing propeller," *Applied Ocean Research*, vol. 98, 2020. DOI:10.1016/j.apor.2020.102108
- [3] Yari E., Ghassemi H. Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8(1): 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002>
- [4] Matveev, K.I., Wheeler, M.P., Xing, T., Numerical simulation of air ventilation and its suppression on inclined surface-piercing hydrofoils, *Ocean Engineering*, 175, 2019, 251-61. DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.02.040

- [21] Biao Huang, Si-cong Qiu, Qin Wu, Guo-yu Wang, "A review of transient flow structure and unsteady mechanism of cavitating flow," *Journal of Hydrodynamics*, vol. ۳۱, p. 429–444, ۲۰۱۹, DOI: 10.1007/s42241-019-0050-0
- [22] Yang, D., Numerical analysis on the hydrodynamic performance of an artificially ventilated surface-piercing propeller, *Water*, 10(11), 2018, DOI:10.3390/w10111499
- [23] N. Javanmardi and P. Ghadimi, "Hydroelastic analysis of surface piercing hydrofoil during initial water entry phase," *Sci. Iran*. 26,295–310 (2019), DOI: 10.24200/sci.2017.20010
- [24] Amini, A., Nouri, N.M., Niazi, S., Abedi, A., A Numerical Study on Surface-piercing Propellers using Sliding Mesh Method via Openfoam Software, *Iranica Journal of Energy & Environment*, 14(4), 2023, 415-22, doi: 10.5829/ijee.2023.14.04.11.
- [25] Wheeler, M.P., Matveev, K.I., Numerical Modeling of Surface-Piercing Flexible Hydrofoils in Waves, *Journal of Ship Research*, 67(02), 2023, 140-9, DOI: 10.3390/jmse11020246
- [26] Gao, Z., Numerical analysis on the effect of artificial ventilated pipe diameter on hydrodynamic performance of a surface-piercing propeller, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 2019, 240, DOI: 10.3390/jmse7080240
- [27] Javanmard, E., Yari, E., Mehr, J.A., Mansoorzadeh, S., Hydrodynamic characteristic curves and behavior of flow around a surface-piercing propeller using computational fluid dynamics based on FVM, *Ocean Engineering*, 192, 2019, 106445.
- [28] Wajdi Rajhi, Ahmed Mohamed Mahmoud Ibrahim, Abdel-Hamid I. Mourad ,Mohamed Boujelbene , Manabu Fujii ,Ammar Elsheikh , "Prediction of milled surface characteristics of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone using an optimized machine learning model by gazelle optimizer," *Measurement*, vol. 222, no. 30, pp. 25-41, 2023, doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113627
- [29] Rajhi, W. *et al.* Prediction of milled surface characteristics of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone using an optimized machine learning model by gazelle optimizer. *Measurement* **222**, 113627 (2023), DOI:10.1016/j.measurement.2023.113627
- [30] Wang Z., Huang B., Zhang M. et al. Experimental and numerical investigation of ventilated cavitating flow structures with special emphasis on vortex shedding dynamics [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2018, 98: 79–95,
- [13] Seif, Mohammad Saeed, Teimouri, Mahdi, "The study on the scaling effects in the surface piercing propeller," *Ocean Engineering*, vol. 267, 2023, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113156
- [14] Chang, Shengming, Wang, Chao, Sun, Cong, Ding, Enbao, "Optimization design of surface piercing propeller blade profile based on TOPSIS method," *Huazhong Keji Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, vol. 51, no. 10, pp. 57 - 63, 2023.
- [15] Nouroozi, H., Zeraatgar, H., A, "reliable simulation for hydrodynamic performance prediction of surface-piercing propellers using URANS method," *Applied Ocean Research*, vol. ۹۲, ۲۰۱۹, DOI:10.1016/j.apor.2019.101939
- [16] Pakian Bushehri, M., Golbahar Haghighi, M., "Experimental and numerical analysis of Hydrodynamic Characteristics of a surface piercing propeller mounted on high-speed craft," *International Journal of Maritime Technology*, vol. 15, pp. 79-91, 2021.
- [17] Yari, E., Moghadam, A.B, "BEM applied to the cup effect on the partially submerged propeller performance prediction and ventilation patte," *Journal of Applied and Computational Mechanic*, pp. ۳۹۲-۴۰۵, ۲۰۲۴., DOI: 10.22060/mej.2016.662
- [18] Kamran, M., Nouri, N., Askarpour, H, "Numerical Investigation of the Effect of Trailing Edge Shape on Surface-Piercing Propeller Performa," *Applied Ocean Research*, vol. ۱۲۵, pp. ۱۰۵-۱۲۲, ۲۰۲۲, DOI:10.1016/j.apor.2022.103230
- [19] Shuai Sun, Chao Wang, Chunyu Guo, Yuan Zhang, Pengfei Liu, "Numerical study of scale effect on the wake dynamics of a propeller," *Ocean Engineering*, vol. ۱۹۵, no. ۱۵, ۲۰۲۰, DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.106810.
- [20] Siamak Alimirzazadeh, Saeed Zabihzade Roshan, Mohammad Saeed Seif, "Unsteady RANS simulation of a surface piercing propeller in oblique flow," *Applied Ocean Research*, vol. ۵۶, pp. 79-91, ۲۰۱۶, DOI:10.1016/j.apor.2016.01.003

DOI:10.1016/j.apor.2016.01.003

- [42] Zhang M., Chen H., Wu Q. et al. Experimental and numerical investigation of cavitating vortical patterns around a Tulin hydrofoil [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 298–307, DOI:10.1016/j.oceaneng.2018.12.064
- [43] Zhang M., Chen H., Wu Q. et al. Experimental and numerical investigation of cavitating vortical patterns around a Tulin hydrofoil [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 298–307.
- [44] Wang C. C., Huang B., Wang G. Y. et al. Numerical simulation of transient turbulent cavitating flows with special emphasis on shock wave dynamics considering the water/vapor compressibility [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(4): 573–591, doi.org/10.1007/s42241-018-0058-x
- [45] Long Y., Long X., Ji B. et al. Verification and validation of URANS simulations of the turbulent cavitating flow around the hydrofoil [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(4): 610–620, Doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60774-6
- [46] Long Y., Long X., Ji B. et al. Verification and validation of large eddy simulation of attached cavitating flow around a Clark-Y hydrofoil [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 115: 93–107, DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.03.026
- [47] Park J., Seong W. Novel scaling law for estimating propeller tip vortex cavitation noise from model experiment [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(6): 962–971, DOI:10.1016/S1001-6058(16)60810-7
- [48] Wu Q., Huang B., Wang G. et al. Numerical modelling of unsteady cavitation and induced noise around a marine propeller [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 160: 143–155, 10.1016/j.oceaneng.2018.04.028
- [49] Aursand, M., P. J. Haagenzen, and B. H. Skallerud. 2023. “Remaining Fatigue Life Assessment of Corroded Mooring Chains Using Crack Growth Modelling.” *Marine Structures* 90: 103446, doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103446
- [50] Bui, T. Q., and X. Hu. 2021. “A Review of Phase-Field Models, Fundamentals and Their Applications to Composite Laminates.” *Engineering Fracture Mechanics* 248, DOI:10.1016/j.engfracmech.2021.107705
- [51] S. Y. Sun and G. X. Wu, “Oblique water entry of an inclined finite plate with gravity effect,” *Phys. Fluids* 35, 042112 (2023), /doi.org/10.1063/5.0147309
- DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.08.014
- [31] Chen T., Huang B., Wang G. et al. Numerical investigation of thermo-sensitive cavitating flows in a wide range of free-stream temperatures and velocities in fluoroketone [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 125–136, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.023
- [32] Wang Y., Xu C., Wu X. et al. Ventilated cloud cavitating flow around a blunt body close to the free surface [J]. *Physical Review Fluids*, 2017, 2(8): 084303, DOI:10.1103/PhysRevFluids.2.084303
- [33] Xiang M., Cheung S., Tu J. et al. Numerical research on drag reduction by ventilated partial cavity based on two-fluid model [J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(17–18): 2023–2032, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.013
- [34] Liu T., Huang B., Wang G. et al. Experimental investigation of ventilated partial cavitating flows with special emphasis on flow pattern regime and unsteady shedding behavior around an axisymmetric body at different angles of attack [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 289–303.
- [35] Wu Q., Wang C., Huang B. et al. Measurement and prediction of cavitating flow-induced vibrations [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(6): 1064–1071, doi.org/10.1007/s42241-018-0115-5
- [36] Wu Q., Huang B., Wang G. et al. Numerical modelling of unsteady cavitation and induced noise around a marine propeller [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 160: 143–155, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.028
- [37] Wu Q., Wang Y., Wang G. Experimental investigation of cavitating flow-induced vibration of hydrofoils [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 144: 50–60, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.005
- [38] Zhang H., Wu Q., Li Y. et al. Numerical investigation of the deformation characteristics of a composite hydrofoil with different ply angles [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163: 348–357, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.064.
- [39] Long Y., Long X. P., Ji B. et al. Verification and validation of URANS simulations of the turbulent cavitating flow around the hydrofoil [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(4): 610–620, doi.org/10.1016/S1001-6058(16) 60774-6
- [40] Liu M., Tan L., Liu Y. et al. Large eddy simulation of cavitation vortex interaction and pressure fluctuation around hydrofoil ALE 15 [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163: 264–274, oi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.005
- [41] Alimirzazadeh S., Roshan S. Z., Seif M. S. Unsteady RANS simulation of a surface piercing propeller in oblique flow [J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 56: 79–91,