مطالعه آزمایشگاهی اثر مقیاس و نسبت مغروقیت بر مشخصه‌های عملکردی یک پروانه نیمه مغروق

معین بیکانی[۱]، روزبه شفقت[۲*]، عبدالرضا یوسفی[۳]، مهدی یوسفی فرد[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، moeinbeykani.173@gmail.com
[۲] استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، rshafaghat@nit.ac.ir
[۳] دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ryousefi@stu.nit.ac.ir
[۴] استادیار مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، yousefifard@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

کلمات کلیدی:
پروانه نیمه مغروق
مطالعه آزمایشگاهی
تاثیر مقیاس
اثر دیواره
نسبت مغروقیت

چکیده

در این مقاله اثر مقیاس‌بندی بر دقت نتایج تجربی حاصل از تونل آب بررسی شده است. آزمون‌های تجربی برای سه پروانه‌ی نیمه‌مغروق با هندسه‌ی مشابه و قطرهای ۰/۱۲۵ ۰/۱۳۲ و ۰/۱۴۰ متر تعریف شدند. ضرایب تراست در نسبت‌های مغروقیت مختلف با یکدیگر مطابقت داشته، ضریب گشتاور پروانه با قطر ۰/۱۴۰ با دو پروانه ۰/۱۲۵ و ۰/۱۳۲ مطابقت مناسبی ندارد. با افزایش نسبت مغروقیت، نسبت انسداد افزایش یافته، گشتاور پروانه با قطر ۰/۱۴۰ نسبت به دو پروانه دیگر کاهش می‌یابد. افزایش نسبت مغروقیت سبب افزایش گشتاور و تراست در هر سه پروانه می‌شود؛ ولی با توجه به تأثیر نسبت انسداد، افزایش گشتاور در نسبت‌های مغروقیت ۰/۴۰ تا ۰/۷۰ نسبت به دو پروانه‌ی دیگر کمتر است. همچنین با افزایش نسبت مغروقیت، بازدهی کاهش می‌یابد و بیشترین بازدهی برای هر سه پروانه در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ به‌دست آمده است. با افزایش نسبت مغروقیت در هر سه پروانه، ضریب پیشروی بحرانی کاهش یافته است.

Experimental study of scale effect and immersion ratio on the performance characteristics of a surface piercing propeller

Moein beykani [1], rouzbeh Shafaghat [2*], abdorreza Yousefi [3], Mahdi Yousefifard [4]

[1] Master of Science, Babol Noshirvani University of Technology; moeinbeykani.173@gmail.com
[2] professor, Babol Noshirvani University of Technology; rshafaghat@nit.ac.ir
[3] PhD in Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology; ryousefi@stu.nit.ac.ir
[4] Assistant professor, Babol Noshirvani University of Technology; yousefifard@nit.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 05 Apr. 2022
Accepted: 31 Jul. 2022

Keywords:
Surface piercing propeller
Experimental study
Scale effect
Wall effect
Immersion ratio

ABSTRACT

In this paper, the effect of scaling on the accuracy of experimental results obtained from water tunnels was investigated. Experimental tests were defined for three surface piercing propeller with similar geometry and diameters of 0.132 - 0.125 and 0.140 m. Thrust coefficients in different Immersion ratios are compatible with each other, the torque coefficient of propeller with a diameter of 0.140 does not correspond well with two propeller of 0.125 and 0.132. As the immersion ratio increases, the obstruction ratio increases, and the propeller torque with a diameter of 0.140 decreases compared to the other two propellers. Increasing the immersion ratio increases the torque and thrust in all three propellers; However, due to the effect of the obstruction ratio, the increase in torque in the immersion ratios is 0.40 to 0.70 less than the other two propellers. Also, with increasing the immersion ratio, the efficiency decreases and the highest efficiency for all three propellers is obtained in the immersion ratio of 0.40. As the immersion ratio increases in all three propellers, the critical advance coefficient decreases.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

۱- مقدمه

پروانه‌های نیمه مغروق دسته‌ای از پروانه‌های سوپرکاویتاسیونی هستند که در مرز مشترک آب و هوا عمل می‌کنند. با توجه به ویژگی‌هایی مانند بازدهی بالا، جایگزینی پدیده کاویتاسیون با هوادهی، افزایش مانورپذیری شناور، کاهش مقاومت ملحقات و کاهش توان مورد نیاز برای چرخش پروانه سبب شده است تا این دسته از پروانه‌ها به عنوان سامانه‌ی رانش رایج شناورهای تندرو مورد استفاده قرار گیرند. یکی از گام‌های اصلی در طراحی پروانه نیمه مغروق تعیین مقادیر تراست، گشتاور و بازدهی پروانه است. این مقادیر در قالب ضرایب هیدرودینامیکی، به کمک روش‌های آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی به‌دست می‌آیند. علی‌رغم توسعه روش های عددی و تحلیلی، روش های آزمایشگاهی هنوز هم بهترین روش برای طراحی و ارزیابی پروانه نیمه‌مغروق تحت شرایط مختلف به شمار می‌رود.

با وجود توسعه شناورهای تندرو و گسترش استفاده از سامانه‌ی رانش نیمه‌مغروق در این دسته از شناورها هنوز هم داده‌های آزمایشگاهی محدودی برای بررسی عملکرد پروانه در شرایط فیزیکی مختلف وجود دارد. شیبا[1] اولین بررسی آزمایشگاهی جامع را در سال ۱۹۵۳ [۱] با هدف بررسی تاثیر عدد وبر و پارامترهای موثر بر هوادهی پروانه نیمه‌مغروق در هندسه‌های مختلف انجام داد. نتایج نشان دادند که عدد وبر ۱۸۰، عدد وبر بحرانی پروانه نیمه‌مغروق برای تعمیم نتایج از مدل به نمونه اصلی است و تاثیر این پارامتر در مقادیر بزرگ‌تر از ۱۸۰ بر ضرایب هیدرودینامیکی پروانه و هوادهی آن ناچیز است. هادلر و هکر[2] در سال ۱۹۶۸ [۲] به بررسی آزمایشگاهی دو پروانه سه پره و یک پروانه دو پره سوپر کاویتاسیونی با قطرهای متفاوت و نسبت سطح گسترش‌یافته یکسان در ضریب‌های پیشروی مختلف پرداختند. مطابق با نتایج آنها، پروانه نیمه‌مغروق دارای دو ناحیه هوادهی پایه و هوادهی کامل می‌باشد و به دلیل شکل‌گیری پدیده هوادهی[3] و نیز نسبت لیفت به درگ بالا، در ناحیه هوادهی پایه بازده بالاتری به‌دست می‌آید. آدلر و مور[4] در سال ۱۹۷۷[۳] یک پروانه نیمه‌مغروق ۸ پره را با هدف بررسی تاثیر زاویه یاو بر عملکرد پروانه نیمه‌مغروق مطالعه کردند. در آزمون‌های انجام شده، نسبت مغروقیت برابر ۳۳ درصد بود و زاویه انحراف شافت ۱۹/۵ درجه برای تمامی آزمون‌ها درنظر گرفته شد. آنها با بررسی عملکرد هیدرودینامیکی پروانه در چهار زاویه یاو مختلف نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه یاو از صفر به ۱۹/۵ درجه، بازده افزایش ۱۵ درصدی را تجربه می‌کند. اولفسون[5] در سال ۱۹۹۶[۴] یک پروانه نیمه‌مغروق ۴ پره را در زوایای یاو و انحراف شافت مختلف و نیز نسبت مغروقیت ۰/۳۳ با هدف تعیین تاثیر عدد فرود و کاویتاسیون بر ضرایب هیدرودینامیکی پروانه مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داد. با توجه به نتایج، عدد فرود ۴، عدد فرود بحرانی پروانه به منظور تعمیم نتایج مدل به نمونه اصلی معرفی شد. دایسون[6] در سال ۲۰۰۰ [۵] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی سه پروانه چهار پره و یک پروانه پنج پره را در نسبت‌های مغروقیت ۰/۳۳ و ۰/۵۰ و زوایای یاو و انحراف شافت مختلف بررسی کرد. نتایج آزمایشگاهی او نشان داد که افزایش نسبت مغروقیت سبب افزایش تراست و گشتاور پروانه خواهد شد؛ اما بر بازده تاثیر چندانی ندارد. فراندو[7] و همکاران در سال ۲۰۰۲[۶] چهار پروانه با نسبت گام متفاوت را در نسبت‌های مغروقیت ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ و زوایای انحراف شافت مختلف مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج نشان دادند که نسبت مغروقیت نیز یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عدد وبر پروانه است. همچنین ضریب پیشروی بحرانی یک پروانه نیمه‌مغروق تابع عدد وبر بحرانی و نسبت گام آن می‌باشد. فراندو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۷] تاثیر پارامترهای نسبت گام، تعداد پره، زاویه انحراف شافت را در نسبت‌های مغروقیت ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶و ۰/۷ بر عملکرد پروانه نیمه‌مغروق با استفاده از یک سری سیستماتیک پروانه با ۴ و ۵ پره مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند و به منظور پیش‌بینی ضرایب هیدرودینامیکی پروانه روابط نیمه‌تجربی ارائه نمودند. با توجه به نتایج، افزایش نسبت گام در تعداد پره‌های مختلف سبب افزایش ضریب پیشروی بحرانی و نیز تراست و بازدهی پروانه می‌شود. قاسمی و شادمانی در سال ۲۰۰۹ [۸] دو پروانه نیمه‌مغروق را در شرایط مغروقیت کامل و جزئی مورد بررسی عددی قرار دادند. نتایج نشان داد که نسبت گام و عدد وبر، دو پارامتر تاثیرگذار به منظور تشخیص سه ناحیه هوادهی پروانه نیمه‌مغروق می‌باشد. هم چنین افزایش نسبت گام سبب افزایش ضریب پیشروی بحرانی پروانه خواهد شد. در سال ۲۰۱۲ میسرا[8] و همکاران[۹] به بررسی آزمایشگاهی چهار پروانه نیمه مغروق با شکل فنجانی متفاوت در نسبت‌های مغروقیت مختلف پرداختند. با توجه به نتایج، با افزایش نسبت مغروقیت در عدد وبر ثابت، ضرایب تراست و گشتاور پروانه افزایش خواهند یافت. سیدی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۰] به بررسی آزمایشگاهی یک پروانه نیمه مغروق ۵ پره در نسبت های مغروقیت و زوایای یاو مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش نسبت مغروقیت تراست و گشتاور پروانه را افزایش می‌دهد؛ اما بر بازده تاثیر ناچیزی دارد. همچنین با افزایش نسبت مغروقیت ضریب پیشروی بحرانی پروانه کاهش می‌یابد. گنجی راد و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۱] با هدف بررسی تاثیر نسبت مغروقیت بر پارامتر هوادهی و ضرایب هیدرودینامیکی، به مطالعه عددی یک پروانه نیمه‌مغروق پنج پره پرداختند. نتایج نشان دهنده آن است که افزایش نسبت مغروقیت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

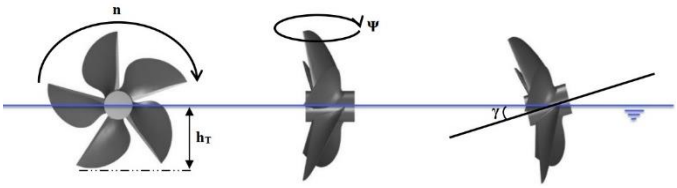
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

تراست و گشتاور پروانه را افزایش می‌دهد؛ اما ضریب پیشروی بحرانی پروانه کاهش می‌یابد. همچنین پروانه بازده بالاتری را در ضرایب پیشروی بالا و نسبت مغروقیت پایین تجربه می‌کند. یوسفی و شفقت در سال ۲۰۲۰ [۱۲] به بررسی عددی پارامتر هوادهی یک پروانه نیمه‌مغروق پنج پره در موقعیت‌های شعاعی مختلف پره پرداختند. آنها دو پارامتر طول و ضخامت هوادهی را برای تشریح این پدیده معرفی کردند. با توجه به نتایج، در ضرایب پیشروی ثابت، با افزایش نسبت شعاع، ضخامت و طول ناحیه هوادهی کاهش می‌یابد. سیدی و شفقت در سال ۲۰۲۰ [۱۳] در یک مطالعه جامع به بررسی آماری مطالعات آزمایشگاهی تحلیلی و عددی صورت گرفته توسط پژوهشگران مختلف در مورد پروانه‌های نیمه‌مغروق و در شرایط عملیاتی مختلف پرداختند. در این مطالعه‌ی مروری، پارامترهای هندسی و فیزیکی مهم در مطالعات تئوری و آزمایشگاهی معرفی شدند و نگاهی جامع از آینده‌ی پژوهش‌ها در زمینه پروانه نیمه‌مغروق ارائه شد. در سال ۲۰۲۱ [۱۴] بوشهری و حقیقی به بررسی آزمایشگاهی و عددی یک پروانه نیمه‌مغروق پنج پره پرداختند. در این بررسی آزمایشگاهی کارایی پروانه در شرایط عملکردی مختلف یک شناور کاتاماران در آزمون‌های دریایی ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم سرعت کم شناور و نیز بازدهی کمتر پروانه پیش از فاز پروازی (حالت مغروق)، تراست و گشتاور پروانه نسبت به اولین مرحله فاز پروازی شناور (حالت نیمه‌مغروق) بزرگتر می‌باشد.

مطالعات آزمایشگاهی گذشته نشان می‌دهد که در پروسه طراحی و انتخاب پروانه نیمه‌مغروق بهره گیری از نتایج آزمون مدل در شرایط آزمایشگاهی آب آزاد با وجود هزینه بالاتر نسبت به روش‌های عددی، روش مناسب‌تری است. اندازه‌ی مدل یکی از مباحث مهم در فرایند بررسی آزمایشگاهی به‌شمار می‌رود. تونل آب سطح آزاد یکی از ابزارهای پرکاربرد در راستای آزمونهای آزمایشگاهی پروانه‌های نیمه‌مغروق می‌باشد. اندازه‌ی مدل در آزمون‌های تونل آب، به‌طور معمول بر روی دقت تجهیزات اندازه‌گیری و نیز امکان آشکارسازی بهتر پدیده‌های هیدرودینامیکی موثر است؛ به‌گونه‌ای که تلاش می شود تا اندازه‌ی مدل تا حد امکان بزرگ‌تر درنظر گرفته شود. اما بزرگ‌تر شدن ابعاد مدل با توجه به محدودیت‌های بخش آزمون می‌تواند اثرات نامطلوبی مانند انسداد و اثرات دیواره و نیز کاهش دقت نتایج را درپی داشته باشد. بنابراین انتخاب اندازه بهینه مدل نقش مهمی در امکان تعمیم نتایج از مدل به نمونه اصلی دارد. در کار حاضر به بررسی اثرات مقیاس‌بندی بر ضرایب هیدرودینامیکی یک پروانه نیمه‌مغروق پرداخته شده است. بدین منظور سه پروانه با نسبت گام یکسان و قطرهای متفاوت در محدوده ضرایب پیشروی (۰/۴-۱/۰۵) و چهار نسبت مغروقیت (۰/۴-۰/۷) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- 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[۹] (θ_r)، زاویه اسکیو[۱۰] (θ_s)، ضخامت پره (t)، نوع پروفیل مقطع (f) و اعداد بی‌بعد رینولدز (Re)، ضریب پیشروی[۱۱] (J)، فرود (Fr) و کاویتاسیون (σ) وابسته هستند. با توجه به شرایط عملکردی پروانه نیمه‌مغروق و شکافتن سطح آب در هر دور چرخش، چهار پارامتر عدد وبر (We)، نسبت مغروقیت[۱۲] (I)، زاویه انحراف شافت[۱۳] (γ) و زاویه یاو[۱۴] (Ψ) نیز علاوه بر پارامترهای ذکر شده برای پروانه‌های مغروق رایج، بر ضرایب هیدرودینامیکی این دسته از پروانه‌ها تاثیر گذار خواهند بود. شکل ۱ نشان‌دهنده شرایط مختلف زاویه‌ای یک پروانه نیمه‌مغروق می‌باشد.



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

می‌توان پارامترهای تاثیرگذار بر ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور یک پروانه نیمه‌مغروق را به شکل زیر تعریف کرد [۱۳]:

(۱.۰)

$$K_T \text{ and } K_Q = f\left(D, {}^{P}\!/_{D}, Z, EAR, J, \theta_s, \theta_r, t, f, \mathrm{Re}, \sigma, We, I_T, \gamma, \Psi\right)$$

پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه (۲) تعریف می شود:

$$Fr = \frac{n.D}{\sqrt{g.D}} \qquad J = \frac{V_A \cos(\gamma)}{nD}$$

$$We = \sqrt{\frac{n^2.D^3}{\kappa}} \qquad \mathrm{Re} = \frac{n.D^2.EAR}{\nu.Z} \qquad (۲.۰)$$

$$I = \frac{h_T}{D}$$

κ و ν کشش سطحی دینامیکی و ویسکوزیته سینماتیکی آب، h_T ارتفاع غوطه‌وری پروانه و n سرعت دورانی پروانه است. ضرایب هیدرودینامیکی پروانه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

(۳.۰)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

$$K_T = \frac{T}{\rho.n^2.D^4} \qquad K_Q = \frac{Q}{\rho.n^2.D^5} \qquad \eta = \frac{J}{2\pi}.\frac{K_T}{K_Q}$$

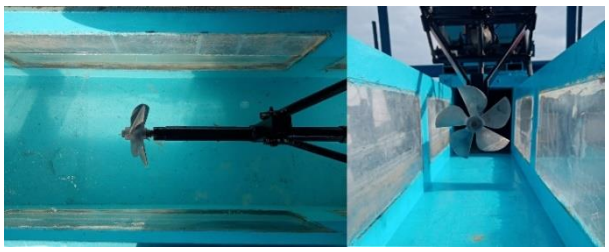
T تراست، Q گشتاور و ρ چگالی آب است.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی و کالیبراسیون

همان‌طور که بیان شد، برای آزمون‌های تجربی از تونل آب سطح آزاد استفاده شده است (شکل ۲). دو نما از پروانه‌ی نصب شده در بخش آزمون در شکل ۳ نشان داده شده است. سرعت جریان در بخش آزمون به‌همراه تراست و گشتاور پروانه مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در هر آزمون اندازه‌گیری می‌شوند. برای اندازه‌گیری تراست و گشتاور از یک دینامومتر دوملفه‌ای پروانه (شکل ۴) استفاده می‌شود. به منظور اعمال شرایط گوناگون آزمون‌های عملکردی، امکان تغییر زاویه‌ی انحراف شافت و نسبت مغروقیت فراهم شده است. مشخصات عمومی تونل سطح آزاد و تجهیزات اندازه‌گیری در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵]. برای داده‌برداری و پس‌پردازش داده‌های خروجی از نرم افزار LabVIEW استفاده می‌شود (شکل ۵).



شکل ۲- نمایی از تونل آب سطح آزاد گروه انرژی‌های دریاپایه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل



شکل ۳-نمای از روبه‌رو و بالای یک پروانه نیمه مغروق در مقطع تست

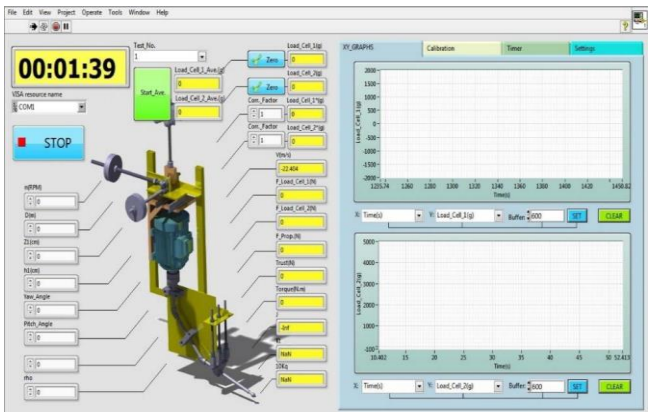
پیش از آزمون‌ها کلیه‌ی تجهیزات اندازه‌گیری کالیبره می‌شوند. برای کالیبراسیون سرعت بخش آزمون، نتایج به‌دست آمده از سرعت‌سنج مانومتری از یک دبی‌سنج التراسونیک (Fluxus ADM 6725,Flexim company) استفاده شد. همچنین برای بررسی تکرارپذیری اندازه‌گیری سرعت بخش آزمون آنالیز عدم قطعیت انجام شد. با توجه به دقت‌های تعریف شده و نیز خطاهای موجود، ۶ تکرار برای اندازه‌گیری سرعت در نظر گرفته شد. انحراف استاندارد و ضریب تغییر برای سرعت جریان در بخش آزمون در جدول ۲ آورده شده است. انحراف استاندارد برابر با ۰/۰۶۳۵ به‌دست آمده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی سامانه تست[۱۵]

بخش	پارامتر	مقدار
بخش تست	طول (m)	۲
	عرض (m)	۰/۳
	ارتفاع (m)	۰/۳
	ماکزیمم سرعت در بخش تست (m/s)	۵
نازل	نسبت مساحت انقباض	۹به ۱
پمپ	توان (kw)	۴۵
دینامومتر	بیشترین سرعت دورانی (rpm)	۳۶۰۰
	بیشینه تراست (N)	۹۸۱
	بیشینه گشتاور (N.m)	۶۷



شکل ۴- نمایی از دینامومتر مورد استفاده به منظور اندازه گیری ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور یک پروانه نیمه مغروق



شکل ۵- نمایی از نرم افزار LabVIEW [۱۰]

در مرحله بعد تست‌ها به منظور کالیبره کردن سنسورهای تراست و گشتاور دینامومتر تونل و هم چنین اطمینان از صحت نتایج

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

استخراج شده در چهار مرحله تکرار برای یکی از پروانه‌ها تکرار می‌شوند. جدول ۳ نشاندهنده نتایج بدست آمده ضرایب تراست و گشتاور در دو ضریب پیشروی و نسبت مغروقیت ثابت ۰/۴۰ برای پروانه با قطر ۰/۱۲۵ متر است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان اختلاف برای ضریب تراست و گشتاور در ضریب پیشروی ۰/۹ به ترتیب برابر ۰/۰۰۱۳۹ و ۰/۰۰۳۸ بوده که نشاندهنده دقت قابل قبول نتایج بدست آمده می‌باشد.

جدول ۲- محاسبه انحراف معیار داده سرعت در بخش تست

ارتفاع جیوه(سانتی متر)	تست۱ (متر بر ثانیه)	تست ۲ (متر بر ثانیه)	تست ۳ (متر بر ثانیه)	تست ۴ (متر بر ثانیه)	تست ۵ (متر بر ثانیه)	تست ۶ (متر بر ثانیه)	میانگین	انحراف استاندارد	ضریب تغییر
۱۹	۱/۸۵۴	۱/۸۰	۱/۸۳۶	۱/۸۷۱	۱/۷۱۹	۱/۷۲۳	۱/۸۰۳	۰/۰۶۳۵	± ۰/۰۲۵۹

جدول ۳- کالیبراسیون سنسورهای تراست و گشتاور در دو ضریب پیشروی

	ضریب پیشروی	تعداد	تست۱	تست۲	تست۳	تست۴	میانگین	انحراف استاندارد	ضریب تغییر
ضریب تراست	۰/۹	۴	/۰۳۶۹	/۰۳۷۲	/۰۳۹۹	/۰۳۷۵	۰/۰۳۸	۰/۰۰۱۳۹	۰/۰۰۰۷
	۰/۵۹۹	۴	/۰۴۶۷	/۰۴۴۰	/۰۴۰۷	/۰۴۹۸	۰/۰۴۵	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۱۹
ضریب گشتاور	۰/۹	۴	/۱۵۶۱	/۱۶۶۰	/۱۲۶۱	/۲۰۵۹	۰/۱۶۳۵	۰/۰۳۲۹	۰/۰۱۶۴
	۰/۵۹۹	۴	/۱۳۲۴	/۱۲۵۴	/۱۱۷۷	/۱۹۹۷	۰/۱۴۳۸	۰/۰۳۷۷	۰/۰۱۸۸

۴- خصوصیات پروانه‌های مدل

پروانه‌های مدل از جنس پلاستیک PLA بوده، مشخصات هندسی آنها در جدول ۴ ارائه شده است. نسبت مقیاس پروانه مرجع قطر ۰/۱۲۵) با پروانه‌های ۰/۱۳۲ و ۰/۱۴۰ به ترتیب برابر ۱/۰۵۶ و ۱/۱۲ می‌باشد. شکل ۶ نمایی از پروانه با قطر ۰/۱۲۵ را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مشخصات هندسی پروانه‌های مدل

پارامتر	نماد		مقدار	
قطر(mm)	D	۰/۱۲۵	۰/۱۳۲	۰/۱۴۰
قطر توپی(mm)	d	۲۵	۲۶/۴	۲۸
نسبت قطر توپی	d/D	۰/۲	۰/۲	۰/۲
تعداد پره	z	۵	۵	۵
نسبت گام به قطر در شعاع ۰/۷	P/D	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۶
جهت چرخش	-	راست گرد	راست گرد	راست گرد

به منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیکی پروانه، آزمون‌های آزمایشگاهی در چهارده ضریب پیشروی [۰/۴-۱/۰۵] و چهار نسبت مغروقیت [۰/۴-۰/۷] انجام شد (جدول ۵).



شکل ۶- نمایی از پروانه

جدول ۵- محدوده پارامترهای مورد بررسی

پارامتر	نماد	مقدار
ضریب پیشروی	J	۰/۴ -۰/۴۵ -۰/۵ -۰/۵۵ -۰/۶ -۰/۶۵ -۰/۷ -۰/۷۵ -۰/۸ -۰/۸۵ -۰/۹ -۰/۹۵ -۱ -۱/۰۵
نسبت مغروقیت	I_T	۰/۴ -۰/۵ -۰/۶ -۰/۷

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

۵- شرایط آزمون

یکی از محدودیت‌ها برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی پروانه‌های نیمه‌مغروق، استقلال نتایج آزمایشگاهی از تاثیر اعداد بی‌بعد رینولدز، فرود و وبر می‌باشد. زیرا ارضای قوانین تشابه برای تعمیم نتایج آزمایشگاهی مدل به نمونه اصلی در آزمون‌های پروانه در تونل آب سطح آزاد ضروری است. مقادیر اعداد بی‌بعد نام‌برده برای ارضای قونین تشابه باید از مقادیر بحرانی تعریف شده بالاتر باشد. در این شرایط می‌توان تاثیر این اعداد را بر ضرایب هیدرودینامیکی و شرایط عملکردی پروانه نادیده گرفت. مطابق با نتایج آزمایشگاهی اولفسون [۴] و شیبا [۱] اگر عدد فرود از ۴ بزرگ‌تر باشد، تاثیری بر ضرایب هیدرودینامیکی پروانه و ضریب پیشروی آن در طول فازهای مختلف هوادهی پروانه نخواهد داشت؛ به‌گونه‌ای که حباب‌های هوادهی به شکل نهایی خود نزدیک شده، نتایج را می‌توان مستقل از عدد فرود در نظر گرفت. هم چنین شیبا [۱] عدد وبر بحرانی را به منظور تعمیم نتایج مدل به نمونه اصلی برابر با ۱۸۰ اعلام نمود. در مقادیر بالاتر از ۱۸۰، ضریب پیشروی بحرانی و پارامتر هوادهی پروانه مستقل از تاثیر عدد وبر خواهد شد. پوستشنی[۱۵] و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱۶] به منظور تعمیم نتایج مدل به نمونه اصلی محدودیت‌های اعداد رینولدز، فرود و وبر را تعیین کردند (رابطه‌ی ۴).

با توجه به مقادیر بحرانی اشاره شده، برای سه پروانه با قطرهای ۰/۱۲۵ ، ۰/۱۳۲ و ۰/۱۴۰ به ترتیب سرعت دورانی ۳۴/۸ ، ۳۳ و ۳۱ دور بر ثانیه تعیین شده است.

$$\mathrm{Re}=\frac{n.D^2.(A_E/A_0)}{\nu.Z}\geq 5\times10^5$$

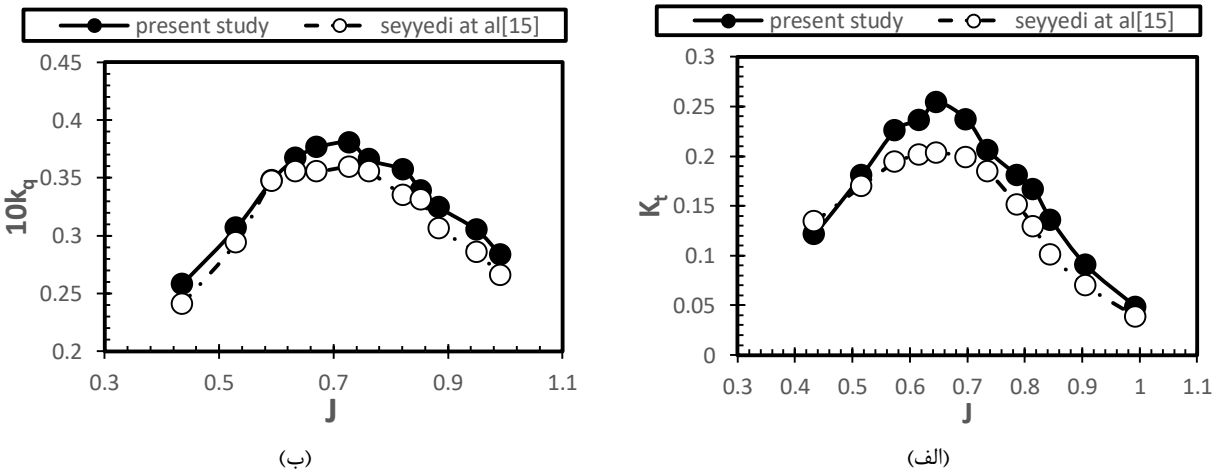
$$Fr=n.\sqrt{\frac{D}{g}}\geq 3.5 \qquad (۴.۰)$$

$$We=\sqrt{\frac{\rho.n^2.D^3}{\sigma}}\geq 180$$

۶- اعتبار سنجی نتایج

نتایج آزمایشگاهی با نتایج آزمایشگاهی سیدی و همکاران (۲۰۱۹) [۱۰] اعتبارسنجی شد. برای این منظور، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی یک پروانه پنج پره با قطر ۰/۱۳۲ و در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ انجام شدند.

مقایسه‌ی نتایج مربوط به ضرایب هیدرودینامیکی تراست و گشتاور در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مطابقت مناسبی با هم دارند.



(الف) (ب)

شکل ۷- مقایسه ضرایب (الف)تراست (ب) گشتاور با نتایج سیدی و همکاران(۲۰۱۹)

۷- نتیجه گیری و بحث

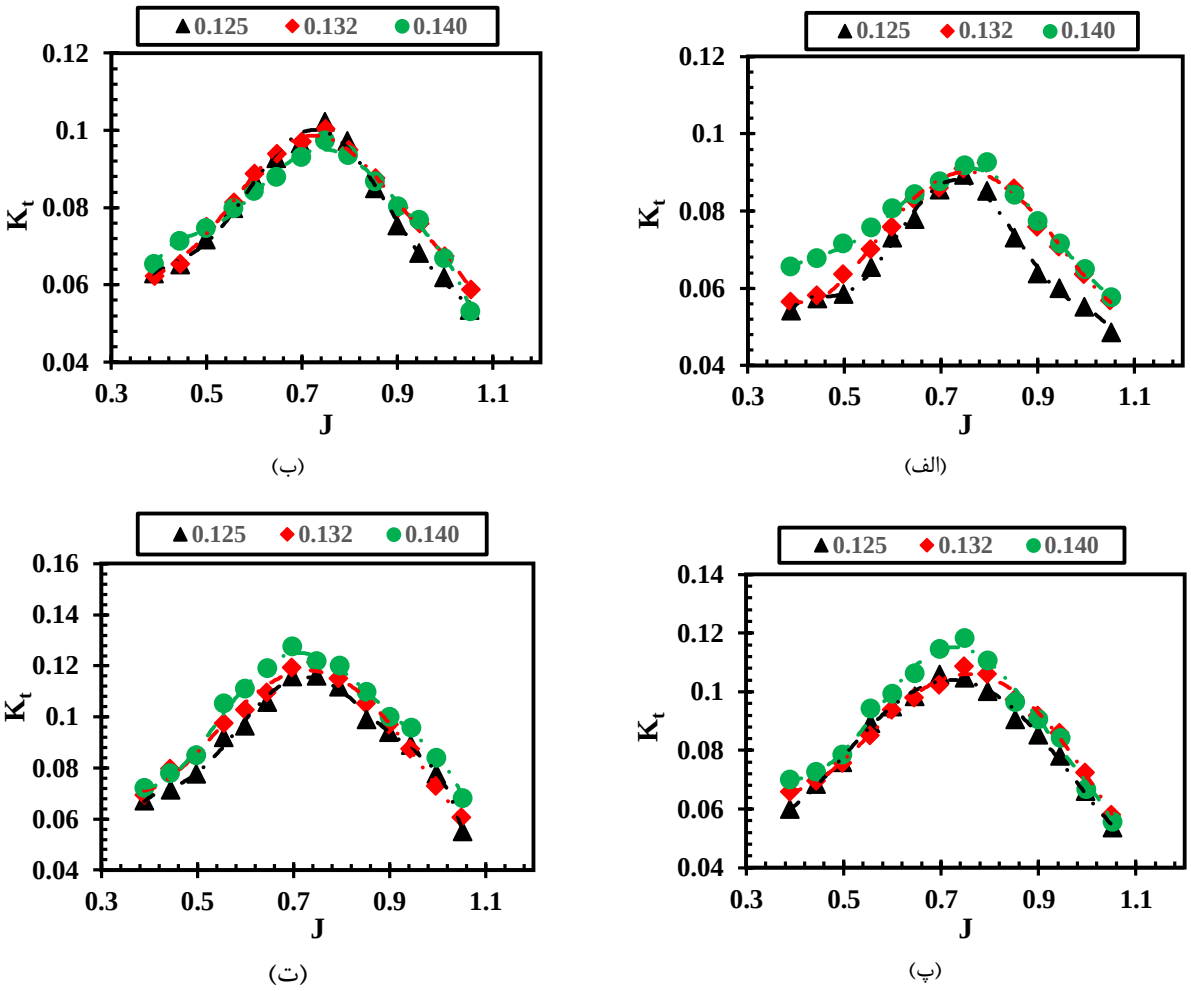
تاثیر مقیاس‌بندی بر ضرایب هیدرودینامیکی سه پروانه با قطرهای ۰/۱۲۵ ، ۰/۱۳۲ و ۰/۱۴۰ متر بررسی شده است. پروانه‌های برگزیده دارای نسبت گام و سطح گسترش‌یافته‌ی یکسان می‌باشند. در ادامه به‌منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج اثر نسبت مغروقیت بر ضرایب هیدرودینامیکی و بازده و نیز ضریب پیشروی بحرانی هر پروانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که در گذشته نیز اشاره شده است، یکی از محدودیت‌ها در آزمون‌های تونل آب پدیده انسداد و اثر نامطلوب دیواره در بخش آزمون می‌باشد. اثر این پدیده با مفهومی به نام نسبت انسداد سنجیده می‌شود. نسبت مساحت تصویر روبه‌روی پروانه به نسبت مقطع عرضی بخش آزمون نسبت انسداد نامیده می‌شود (رابطه ۵). جدول ۶ نسبت انسداد سه پروانه را در نسبت‌های مغروقیت مختلف نشان می‌دهد. با افزایش نسبت مغروقیت، نسبت انسداد هر پروانه نیز افزایش می‌یابد.

$$B=\frac{A_{Blockage}}{A_{S.T}} \qquad (۵.۰)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

شکل ۸ ضرایب تراست سه پروانه با قطرهای ۰/۱۲۵، ۰/۱۳۲ و ۰/۱۴۰ را در نسبت‌های مغروقیت مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب تراست سه پروانه در ضرایب پیشروی و نسبت‌های مغروقیت مختلف تقریباً با یکدیگر مطابقت خوبی دارند. البته ضریب تراست پروانه با قطر ۰/۱۲۵ در ضرایب پیشروی بالاتر از مقدار بحرانی و در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ کم‌تر از دو پروانه دیگر است. همچنین ضریب پیشروی بحرانی هر سه پروانه در نسبت‌های مغروقیت مختلف یکسان هستند. بنابراین با افزایش قطر پروانه مدل در آزمون‌های آزمایشگاهی ضریب پیشروی بحرانی پروانه بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین هوادهی مستقل از قطر پروانه‌های مدل خواهد بود.



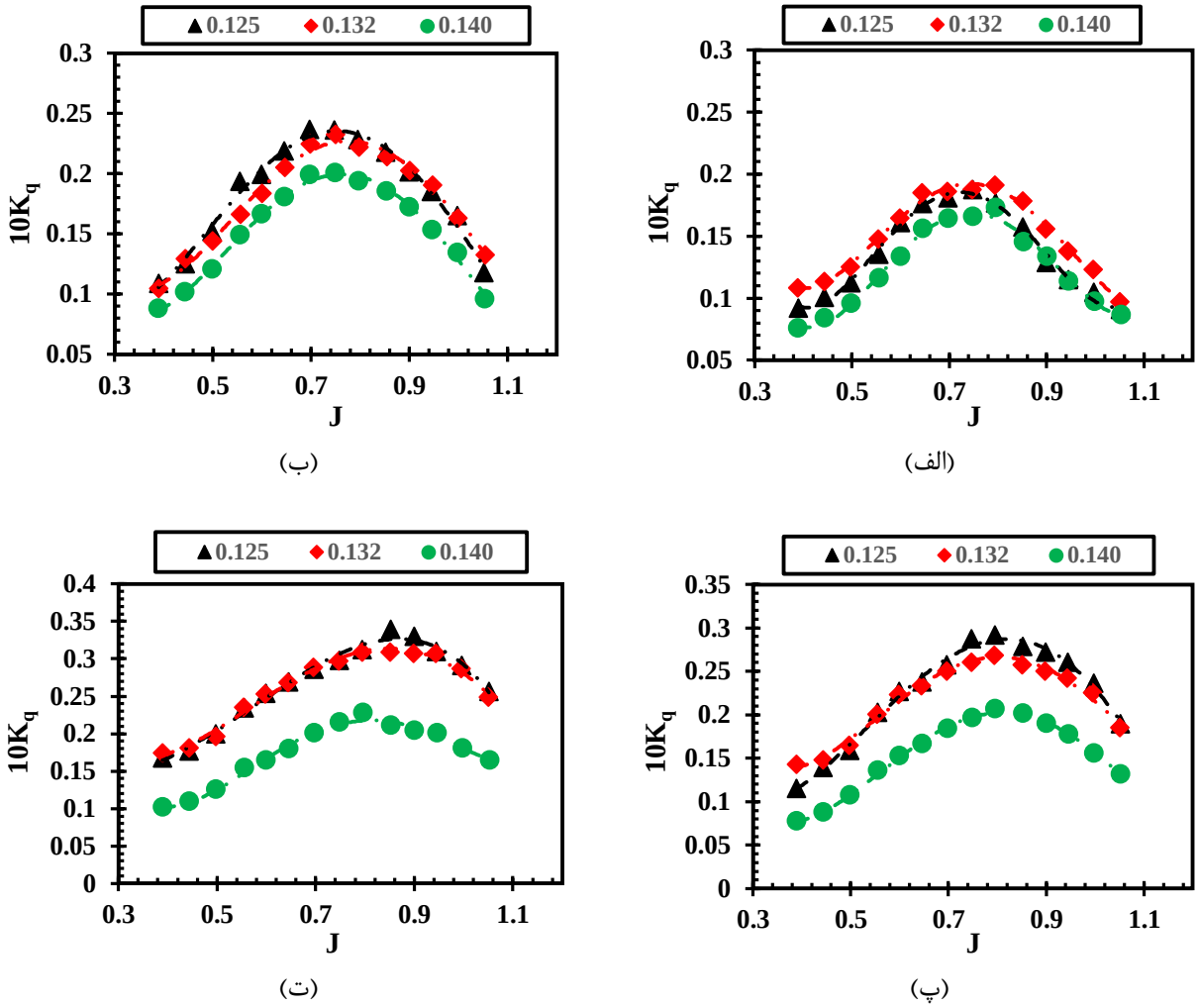
شکل ۸- منحنی ضریب تراست سه پروانه در نسبت‌های مغروقیت (الف) ۰/۴۰ (ب) ۰/۵۰ (پ) ۰/۶۰ (ت) ۰/۷۰

جدول ۴- درصد نسبت انسداد سه پروانه غیر آلومینیومی در نسبت‌های مغروقیت مختلف

قطر	نسبت مغروقیت			
	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۶۰	۰/۷۰
۰/۱۲۵	۷/۶۳	۱۰/۲۲	۱۲/۸۱	۱۵/۲۹
۰/۱۳۲	۸/۵۱	۱۱/۴۰	۱۴/۲۸	۱۷/۰۵
۰/۱۴۰	۹/۵۸	۱۲/۸۲	۱۶/۰۷	۱۹/۱۸

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]



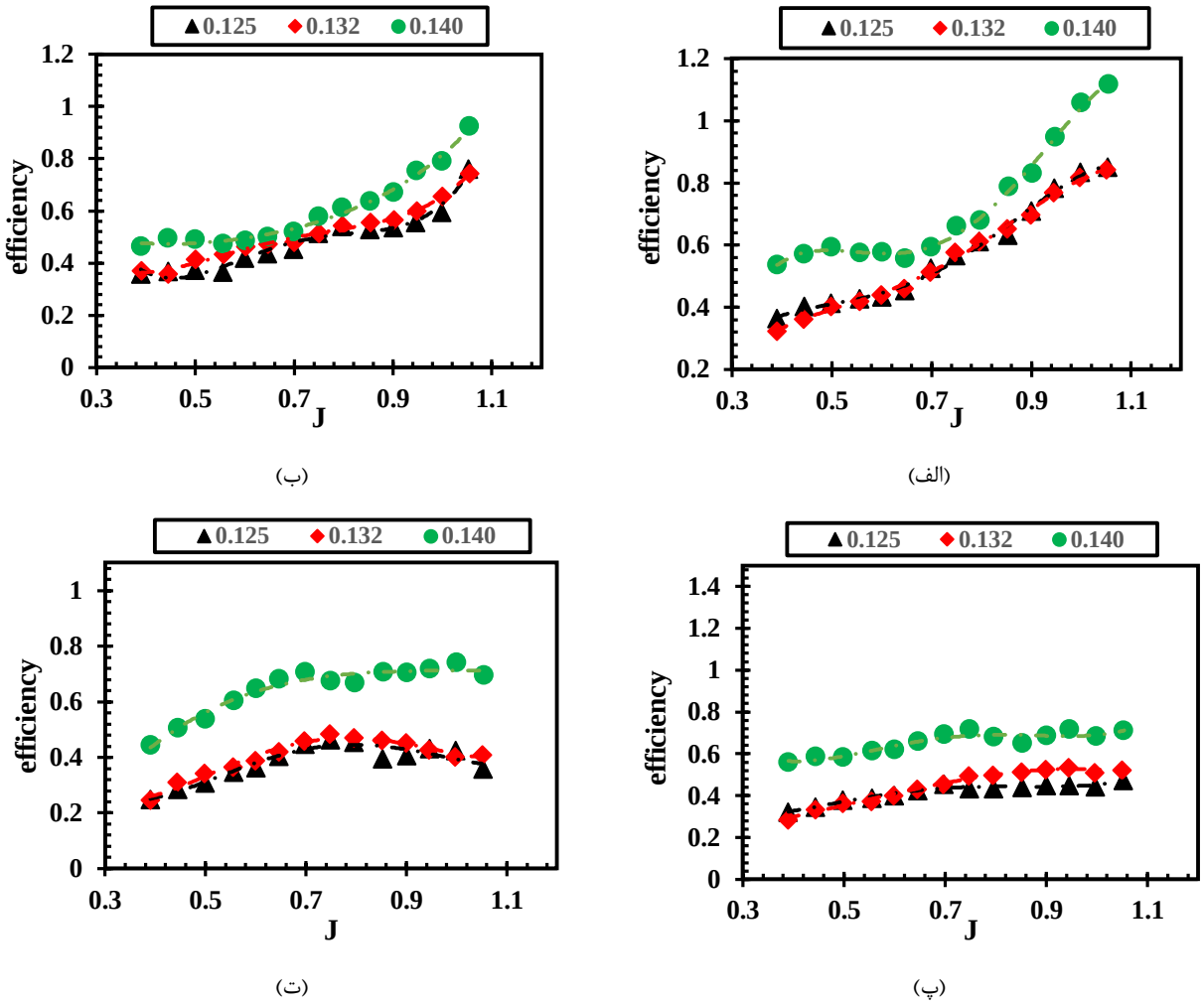
شکل ۹- منحنی ضریب گشتاور سه پروانه در نسبت‌های مغروقیت (الف) ۰/۴۰ (ب) ۰/۵۰ (پ) ۰/۶۰ (ت) ۰/۷۰

شکل ۹ ضریب گشتاور سه پروانه را در نسبت‌های مغروقیت مختلف برحسب ضریب پیشروی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت مغروقیت از ۰/۴۰ تا ۰/۷۰، نتایج ضریب گشتاور دو پروانه با قطر ۰/۱۲۵ و ۰/۱۳۲ مطابقت خوبی با هم دارند؛ نسبت به دو پروانه‌ی دیگر کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مغروقیت، میزان و به دنبال آن نسبت انسداد پروانه با قطر ۰/۱۴۰، سبب اختلاف نتایج شده است؛ به‌گونه‌ای که در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ اختلاف نتایج تقریباً به ۱۹/۲ درصد رسیده است. افزایش نسبت انسداد سبب افزایش اثرات نامطلوب دیواره بر جریان عبوری از پروانه شده، در نتیجه گشتاور تولیدی پروانه را کاهش می‌دهد.

منحنی بازده سه پروانه برحسب ضریب پیشروی و در نسبت‌های مغروقیت مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بازدهی در تمامی نسبت مغروقیت‌ها برای هر سه پروانه روند صعودی دارد و میزان تقعر نمودار در ضرایب پیشروی بالا کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت مغروقیت، اختلاف بازدهی پروانه با قطر ۰/۱۴۰ با دو پروانه دیگر افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش نسبت مغروقیت و به‌دنبال آن افزایش اثر انسداد دیواره بر جریان عبوری از پروانه، گشتاور تولیدی پروانه با قطر ۰/۱۴۰ نسبت به دو پروانه دیگر کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به هم‌خوانی نتایج ضریب تراست سه پروانه، با کاهش ضریب گشتاور پروانه با قطر ۰/۱۴۰ بازدهی پروانه با قطر ۰/۱۴۰ مقدار بیشتری را در ضرایب پیشروی مختلف تجربه می‌کند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]



شکل ۱۰- منحنی بازده سه پروانه در نسبت‌های مغروقیت (الف) ۰/۴۰ (ب) ۰/۵۰ (پ) ۰/۶۰ (ت) ۰/۷۰

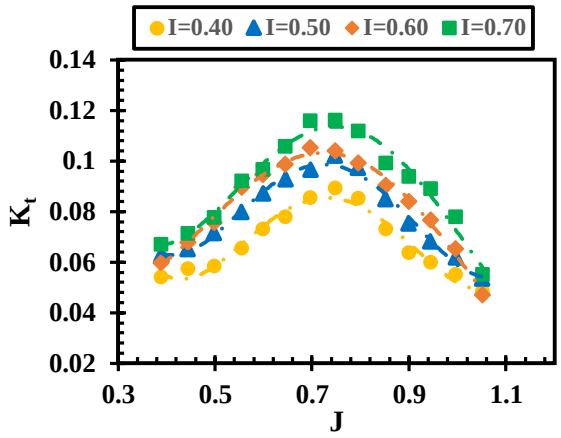
نسبت مغروقیت یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه نیمه‌مغروق است. شکل ۱۱ تاثیر نسبت مغروقیت را بر عملکرد هیدرودینامیکی پروانه با قطر ۰/۱۲۵ نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب) با افزایش نسبت مغروقیت ضرایب تراست و گشتاور پروانه افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ در تمامی ضرایب پیشروی، میزان ضریب تراست و گشتاور پروانه در مقایسه با نسبت مغروقیت ۰/۴۰ افزایش چشم‌گیری داشته است. شکل ۱۱(پ) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مغروقیت، میزان بازدهی پروانه در ضرایب پیشری بالا کاهش می‌یابد. بازدهی بیشینه در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ برابر با ۸۴/۵٪ و در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ برابر با ۳۵٪ می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ (پ)، بازدهی بیشینه‌ی پروانه با قطر ۰/۱۲۵ در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ رخ می‌دهد.

ضرایب هیدرودینامیکی تراست، گشتاور و بازده پروانه با قطر ۰/۱۳۲ در ضرایب پیشروی و نسبت‌های مغروقیت مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۱۲ (الف) و (ب)، با افزایش نسبت مغروقیت تراست و گشتاور پروانه افزایش می‌یابد. با افزایش نسبت مغروقیت از ۰/۴۰ به ۰/۷۰ در ضرایب پیشروی بالا، ضریب گشتاور پروانه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج تراست، ضریب پیشروی بحرانی پروانه در نسبت مغروقیت ۰/۴۰، ۰/۵۰ و ۰/۷۰ به ترتیب برابر ۰/۸، ۰/۷۵ و ۰/۷ به‌دست آمده است. بنابراین با افزایش نسبت مغروقیت ضریب پیشروی بحرانی کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ (پ) نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مغروقیت بازدهی پروانه در ضرایب پیشروی مختلف کاهش می‌یابد. همچنین بازدهی بیشینه‌ی پروانه در همه ضرایب پیشروی، در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ رخ می‌دهد. بازدهی بیشینه‌ی پروانه از ۸۴٪ در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ به ۴۰٪ در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ کاهش می‌یابد.

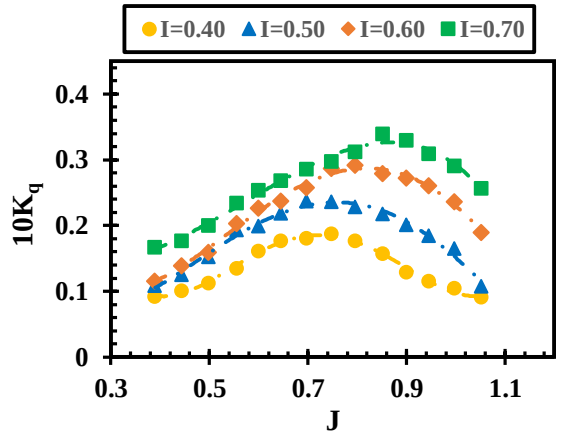
شکل ۱۳ تاثیر نسبت مغروقیت را بر ضرایب هیدرودینامیکی تراست، گشتاور و بازده پروانه با قطر ۰/۱۴۰ در ضرایب پیشروی و نسبت‌های مغروقیت مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳(الف) و (ب)، با افزایش نسبت مغروقیت، تراست و گشتاور پروانه در ضرایب پیشروی مختلف افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای‌که با افزایش نسبت مغروقیت از ۰/۴۰ به ۰/۷۰، ضریب تراست بیشینه و ضریب گشتاور بیشینه‌ی پروانه به‌ترتیب ۴۱٪ و ۳۱٪ افزایش خواهد یافت. شکل ۱۳(پ) نشان می‌دهد که در ضرایب پیشروی پایین، با افزایش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

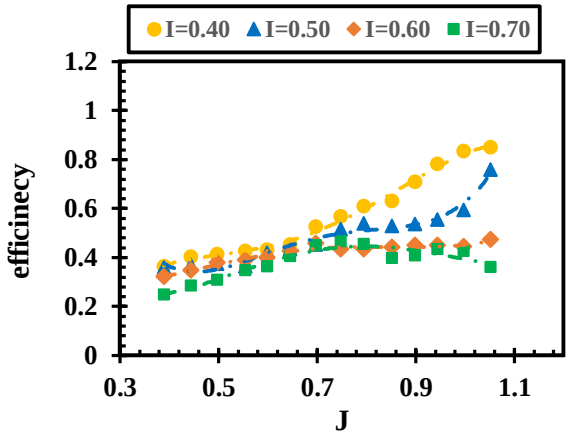
نسبت مغروقیت به بیش از ۵۰ درصد، بازدهی پروانه افزایش می‌یابد؛ اما در ضرایب پیشروی بالا، با افزایش نسبت مغروقیت بازدهی کاهش خواهد یافت. مقایسه ضریب گشتاور پروانه در نسبت‌های مغروقیت مختلف نشان می‌دهد که میزان افزایش گشتاور در اثر افزایش نسبت مغروقیت در پروانه ۰/۱۴۰ کم‌تر از دو پروانه دیگر است. زیرا افزایش نسبت مغروقیت سبب افزایش اثرات نامطلوب دیواره می‌شود.



(الف)

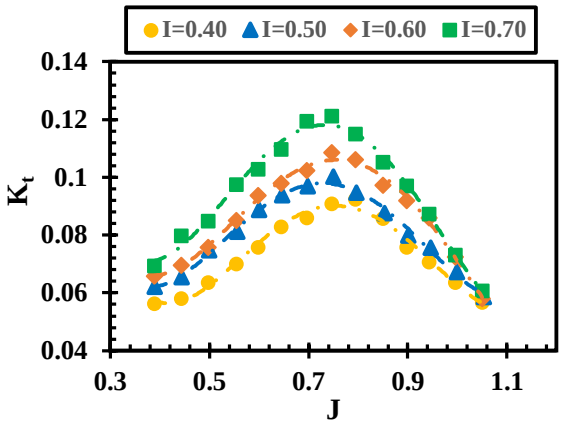


(ب)

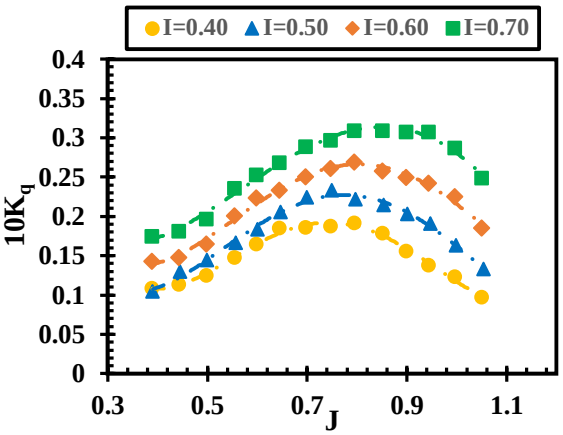


(پ)

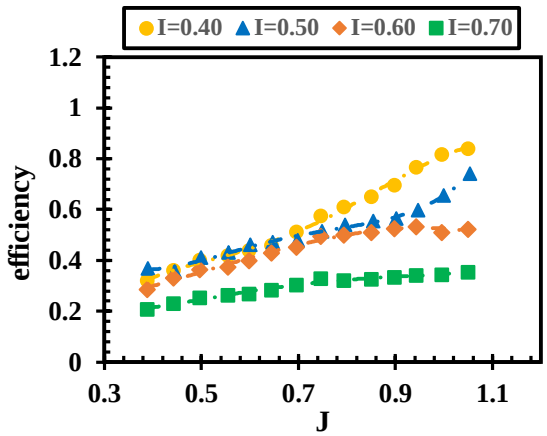
شکل ۱۱- منحنی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه با قطر ۰/۱۲۵ در نسبت‌های مغروقیت مختلف



(الف)



(ب)



(پ)

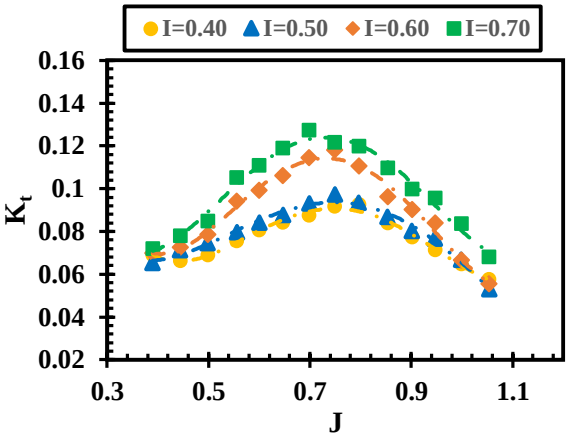
شکل ۱۲- منحنی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه با قطر ۰/۱۳۲ در نسبت‌های مغروقیت مختلف

به طور کلی افزایش نسبت مغروقیت سبب کاهش ضریب پیشروی بحرانی پروانه می‌شود. با افزایش نسبت مغروقیت مدت زمان حضور پروانه در سطح آزاد کاهش یافته، در نتیجه با افزایش ضریب پیشروی در دور و سرعت ثابت، پروانه فرصت کم‌تری برای مکش هوا به عمق آب خواهد داشت. در نتیجه محدوده‌ی هوادهی کامل پروانه کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت مغروقیت، سطح خیس پره افزایش یافته، مدت زمان حضور پروانه در هوا کاهش یافته، تراست

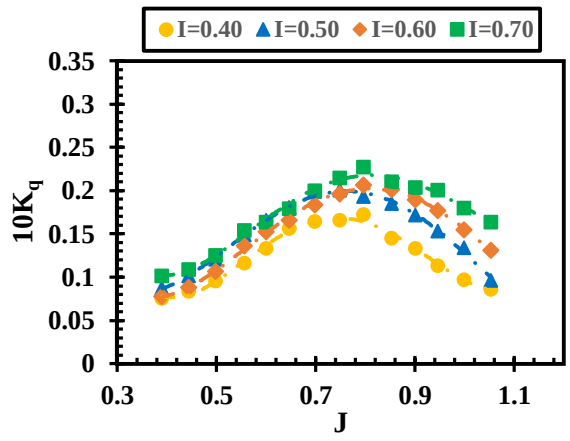
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

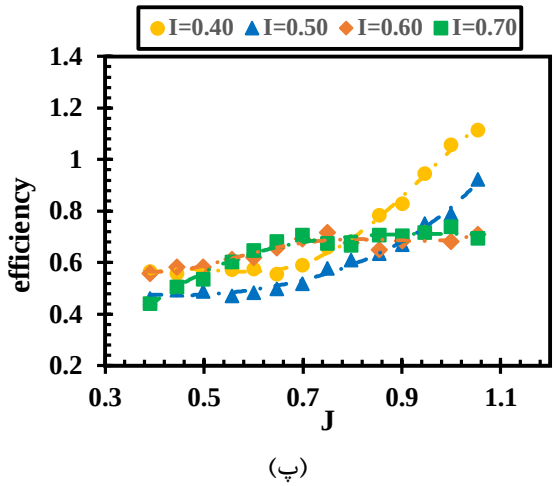
بیشتری تولید می‌شود. همچنین از نگاهی دیگر می‌توان گفت: با توجه به ماهیت فشاری نیروی تراست، با افزایش سطح خیس پره، اختلاف فشار ایجاد شده بین دو سطح پشت و جلوی پره افزایش یافته، درنتیجه تراست پروانه افزایش می‌یابد. با توجه به کاهش زمان حضور پره پروانه در هوا، پروانه به گشتاور بیشتری برای رسیدن به یک سرعت دورانی معین نیاز دارد. درنتیجه افزایش نسبت مغروقیت پروانه، گشتاور مورد نیاز را افزایش خواهد داد. نسبت مغروقیت به عنوان پارامتری تعادلی سبب کاهش نوسانات تراست و گشتاور پروانه شناخته می‌شود و امکان کنترل بازدهی پروانه در شرایط عملیاتی مختلف را فراهم می‌کند. به‌عنوان یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت؛ اگر ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شود که از انسداد و اثرات نامطلوب دیواره در بخش آزمون بتوان چشم‌پوشی کرد، با استخراج نتایج آزمایشگاهی پس از ارضای مقادیر بحرانی اعداد بی‌بعد، امکان تعمیم نتایج آزمون مدل به نمونه‌ی نهایی فراهم خواهد شد.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۳- منحنی ضرایب هیدرودینامیکی و بازده پروانه با قطر ۰/۱۴۰ در نسبت‌های مغروقیت مختلف

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر مقیاس‌بندی و نیز نسبت مغروقیت بر مشخصه‌های عملکردی یک پروانه نیمه‌مغروق به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. بدین منظور از سه پروانه با قطرهای متفاوت و نسبت گام به قطر و سطح گسترش یافته یکسان استفاده شد. جنس هر سه پروانه PLA بوده، به‌وسیله پرینتر سه بعدی تولید شده‌اند. آزمایش‌ها در تونل آب سطح آزاد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شدند. برای بررسی مقیاس‌بندی از سه پروانه در چهار نسبت مغروقیت مختلف استفاده شد. پدیده‌ی انسداد و اثرات نامطلوب دیواره‌ی بخش آزمون بر جریان گذرنده از پروانه نیز در ارزیابی نتایج به‌دست آمده بررسی شد. نتایج مهم به‌دست آمده به شرح زیر ارائه می‌شوند:

۱) بررسی ضرایب هیدرودینامیکی نشان می‌دهد که ضریب تراست سه پروانه در نسبت‌های مغروقیت و ضرایب پیشروی مختلف مطابقت مناسبی با هم دارند. درحالی‌که گشتاور پروانه با قطر ۰/۱۴۰ نسبت به دو پروانه‌ی دیگر با افزایش نسبت مغروقیت مقدار کم‌تری خواهد داشت. میزان کاهش گشتاور روند صعودی داشته، در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۲) انسداد و اثر دیواره بخش آزمون پارامتری مهم در تعیین قطر پروانه مدل می‌باشد. با توجه به عمل کردن پروانه نیمه‌مغروق در سطح آزاد، اثر انسداد رابطه مستقیمی با نسبت مغروقیت دارد. با افزایش قطر پروانه نسبت انسداد هر سه پروانه با افزایش نسبت مغروقیت افزایش می‌یابد. افزایش نسبت انسداد پروانه سبب کاهش ضریب گشتاور

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]

پروانه با قطر ۰/۱۴۰ شد. نمودار ضریب گشتاور در نسبت‌های مغروقیت مختلف نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مغروقیت، کاهش ضریب گشتاور در تمامی ضرایب پیشروی روندی افزایشی دارد.

۳) افزایش نسبت مغروقیت سبب افزایش ضرایب تراست و گشتاور هر سه پروانه در ضرایب پیشروی مختلف می‌شود. ضرایب تراست و گشتاور بیشینه برای هر سه پروانه در نسبت مغروقیت ۰/۷۰ به‌دست آمد. با افزایش نسبت مغروقیت ضریب پیشروی بحرانی و محدوده هوادهی کامل در هر سه پروانه کاهش یافت. همچنین بازدهی هر سه پروانه در تمامی نسبت‌های مغروقیت روند صعودی دارد. با افزایش ضریب پیشروی میزان تقعر نمودار کاهش می‌یابد. البته با توجه به روند نتایج به‌دست آمده انتظار می‌رود که بازدهی پروانه در ضرایب پیشروی بالاتر از ۱/۰۵ روند کاهشی داشته باشد. با افزایش نسبت مغروقیت، بازده هر سه پروانه کاهش می‌یابد و بازدهی بیشینه در هر سه پروانه در نسبت مغروقیت ۰/۴۰ رخ می‌دهد.

۴) به‌عنوان یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت؛ اگر ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شود که از انسداد و اثرات نامطلوب دیواره در بخش آزمون بتوان چشم‌پوشی کرد، با استخراج نتایج آزمایشگاهی پس از ارضای مقادیر بحرانی اعداد بی‌بعد، امکان تعمیم نتایج آزمون مدل به نمونه‌ی نهایی فراهم خواهد شد.

کلید واژگان

1- Shiba
2- Hadler and Hecker
3- ventilation
4- Adler and Moore
5- Olofsson
6- Dyson
7- Ferrando
8- Misra
9- Rake angle
10- Skew angle
11- Advance ratio
12- Immersion Ratio
13- Inclination shaft angle
14- Yaw angle
15- Pustoshny

۶ – مراجع

1- Shiba, H., 1953. Air-Drawing of Marine Propellers, Report of Transportation Technical Research Institute 9. pp. 1–320.

2- Hadler, J. and Hecker, R. Performance of partially submerged propellers, 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome, Italy, 25–30 August 1968.

3- Alder, RS. and Moore, DH. Performance of an inclined shaft partially submerged propeller operating over a range of shaft yaw angles, (Report No SPD-802-01), 1977, https://trid.trb.org/view/69542.

4- Olofsson, N., 1996. Force and Flow Characteristics of a Partially Submerged Propeller. Doctoral Thesis. Goteborg: Chalmers University of Technology–Department of Naval Architecture and Ocean Engineering.

5- P.K. Dyson, the modeling, testing and design of a surface piercing propeller drive, department of mechanical and marine engineering, University of Plymouth, 2000 PhD Thesis.

6- Ferrando, M., Scamardella, A., Bose, N., Liu, P., Veitch, B., 2002.Performance of family of Surface Piercing Propellers, Royal Institution for Naval Architects (RINA)Transactions 2002 Part A 11p

7- Ferrando, M., Crotti, S., Viviani, M., 2007. Performance of a family of surface piercing propellers, Proceedings of 2nd International Conference on Marine Research and Transportation (ICMRT), Ischia

8- Ghassemi, H. shademani, R., 2009. Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propellers for the planning craft. J Mar Sci Apple; 8: 267–274

9- Misra, S., Gokarn, R., Sha, O., Suryanarayana, C., Suresh, R., 2012. Development of a four-bladed surface piercing propeller series. Naval Eng. J. 4.

10- Seyyedi, S.M., Shafaghat, R., Siavoshian, M., 2019. Experimental study of immersion ratio and shaft inclination angle in the performance of a surface-piercing propeller. Mech. Sci. 10, 153–167.

11- Rad, R.G., Shafaghat, R., Yousefi, R., 2019. Numerical investigation of the immersion ratio effects on ventilation phenomenon and the performance of a surface piercing propeller. Appl. Ocean Res. 89, 251–260.

12- Yousefi, R., Shafaghat, R., 2020. Numerical study of the parameters affecting the formation and growth of ventilation in a surface-piercing propeller. Appl. Ocean Res. 104, 102360

13- Seyyedi, S.M., Shafaghat, R., 2020. A review on the Surface-Piercing Propeller: Challenges and opportunities. Journal of Engineering for the Maritime Environment.

14- Pakian.Bushehri, M., Golbahar. Haghighi, M.R., 2021. Experimental and numerical analysis of Hydrodynamic Characteristics of a surface piercing propeller mounted on high-speed craft. International Journal of Maritime Technology. IJMT Vol.15/ Winter 2021 (79-91).

15- Seyyedi, S. M. and Shafaghat, R.: Design Algorithm of a Free Surface Water Tunnel to Test the Surface-Piercing Propellers (SPP); Case Study Water Tunnel of Babol Noshirvani University of Technology, Int. J. Marit. Technol., 6, 19–30, 2016.

16- Pustoshny, A. V., Bointsov, V. P., Lebedev, E. P., and Stroganov, A. A.2007. Development of 5-blade SPP series for fast speed boat, 9th International Conference on Fast Sea, Shanghai, China Ship Scientific Research Center.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1401.18.35.10.1]