

# اصلاح پروانه سطحی شناور تندرو جهت رفع حالت فرابار در موتور

مجتبی پاکیان بوشه‌ری<sup>۱</sup>، جواد عباسی<sup>۲</sup>، سیدجواد هاشمی<sup>۳</sup>

۱- دکترای مهندسی مکانیک، کشتی‌سازی شهید محلاتی، [Pakianm@chmail.ir](mailto:Pakianm@chmail.ir)

۲- دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، کشتی‌سازی شهید محلاتی، [JMZ114@gmail.com](mailto:JMZ114@gmail.com)

۳- کارشناس ارشد مهندسی دریا، کشتی‌سازی شهید محلاتی، [hashemi2488@yahoo.com](mailto:hashemi2488@yahoo.com)

## چکیده:

پروانه‌های سطحی با توجه به راندمان بالا در سرعت‌های بالاتر از ۳۵ گره، در شناورهای تندروی تجاری و نظامی استفاده می‌شوند. این پروانه‌ها در دو حالت کاملاً مغروق و نیمه مغروق متناسب با حرکت شناور تندرو فعالیت می‌کنند. عدم تطبیق مناسب بین گشتاور تولیدی موتور و گشتاور پروانه، باعث ایجاد حالت‌های فرابار و یا فرادور در موتور می‌شود. یکی از راهکارهای برطرف کردن حالت فرابار، اصلاح پروانه می‌باشد. در این مقاله جهت کاهش گشتاور پروانه از روش کاهش قطر و سطح گسترش یافته استفاده شده‌است که در آن ۳ درصد از قطر و ۳.۲ درصد از سطح پروانه کاهش یافته‌است. پس از اصلاح پروانه، ۵۰ rpm به دور موتور اضافه شده‌است، سرعت ماکزیمم شناور تقریباً تغییر نکرده‌است و همچنین دور اسکی شناور 50 rpm افزایش یافته‌است. نتایج حاصله با توجه به اسپیک فنی شناور ارضاء کننده می‌باشد؛ همچنین این روش را برای حالت‌های دیگر می‌توان بهینه‌تر کرد.

## واژه‌های کلیدی:

اصلاح پروانه، پروانه سطحی، حالت فرابار، حالت فرادور

## Modification of a surface-piercing propeller of the high-speed craft to remove the engine overload

Mojtaba Pakian Bushehri<sup>1</sup>, Javad Abbasi<sup>2</sup>, Seyed Javad Hashemi<sup>3</sup>

1- PhD in Mechanical Engineering, [Pakianm@chmail.ir](mailto:Pakianm@chmail.ir)

2- PhD candidate in Industrial Management, [JMZ114@gmail.com](mailto:JMZ114@gmail.com)

3- Master of Marine Engineering, [hashemi2488@yahoo.com](mailto:hashemi2488@yahoo.com)

## Abstract

Surface-piercing propellers are used in commercial and military high-speed crafts due to their high efficiency at speeds above 35 knots. These propellers operate in two stages: fully submerged and semi-submerged according to the motion of the high-speed craft. The mismatching of engine torque and propeller torque causes overload or overspeed conditions in the engine. In this paper, the method of reducing the diameter and blade area has been used to reduce the propeller torque, in which 3% of the diameter and 3.2% of the propeller area have been reduced. After the propeller modification, 50 rpm has been added to the engine speed, the maximum speed of the boat has remained almost unchanged, and the speed of the pre-planing stage has also been increased by 50 rpm. The results obtained are satisfactory according to the technical specifications of the vessel and this method can also be optimized for other cases.

**Key words:** Propeller modification, surface-piercing propeller, Overload condition, over speed condition.

## ۱- مقدمه

انتخاب پروانه متناسب با فرم بدنه، موتور و گیربکس شناور، یکی از فاکتورهای مهم در کارخانجات کشتی‌سازی است که با توجه به تکنولوژی پیچیده طراحی پروانه، همواره از اهمیت خاصی برخوردار است. عدم تطابق موتور و پروانه موجب می‌شود که موتور دچار حالت فرابار<sup>۱</sup> و یا فرادور<sup>۲</sup> گردد که در حالت اول موتور دچار بار اضافی شده و قادر به رسیدن به دور نهایی نیست و در حالت دوم بار روی موتور کم بوده و دور موتور از مقدار ماکزیمم عبور می‌کند. فاکتورهای تأثیر گذار در گشتاور پروانه شامل قطر، گام، طول کورد به ضخامت پره، سطح گسترش یافته، زاویه اسکیو و غیره است که تناسب این نسبت‌ها بسیار مهم است. در حالت اول کوچک بودن قطر و گام و یا یکی از آنها باعث می‌شود که موتور دچار فرادور شود و در حالت دوم بزرگ بودن قطر و گام و یا یکی از آنها باعث بار زیاد به موتور می‌گردد و بدین معناست که گشتاور پروانه در دور  $n \text{ rpm}$  بیشتر از گشتاور تولیدی موتور در آن دور بوده‌است و در نتیجه دمای آگروز موتور نیز افزایش می‌یابد که نشان دهنده وارد شدن بار زیادی به موتور می‌باشد و کارکرد موتور در این شرایط بسیار خطرناک است و هیچگاه موتور نباید در این دو حالت کار کند.

پروانه باید به گونه‌ای طراحی گردد که موتور نتواند بیشتر از ۱۰۳٪ تا ۱۰۵٪ از ماکزیمم دور خود را کار کند [۱]. در صورتی که موتور دچار فرادور گردد راهی جز طراحی مجدد پروانه جهت دستیابی به نقطه مطلوب کارکرد موتور نیست. اما اگر موتور دچار افزایش بار باشد می‌توان با اصلاح پروانه مقدار بار اضافی را برداشت. اصولاً سه راهکار برای اصلاح پروانه جهت افزایش دور و کاهش بار اضافی روی موتور وجود دارد که شامل موارد زیر است.

۱- کاهش قطر پروانه ۲- کاهش گام پروانه ۳- کاهش همزمانی قطر و گام

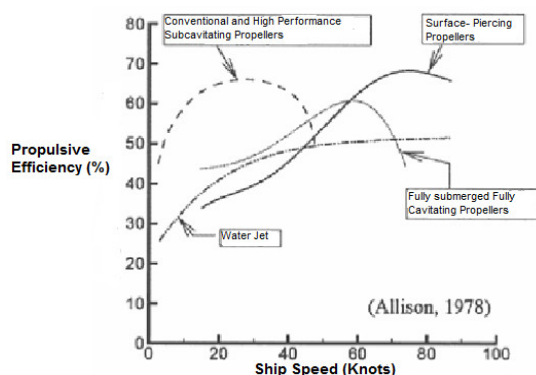
در روش کاهش قطر، از نوک پره‌های پروانه برش داده می‌شود و قطر کاهش می‌یابد و در نتیجه نسبت گام و نسبت سطح گسترش یافته افزایش می‌یابد.

در روش دوم با استفاده از چرخش پره‌های پروانه صورت می‌گیرد و بدین صورت است که ناحیه نزدیک به ریشه

پره‌ها (۰.۳ تا ۰.۴ شعاع) به آرامی حرارت داده می‌شود و سپس جیگ به ناحیه بالای پره‌ها (۰.۷ شعاع) ثابت می‌شود و بار روی سطح مکش و فشار بوسیله جک اعمال می‌گردد. پره‌ها می‌چرخند و تغییر شکل ثابتی صورت می‌گیرد و گام کاهش می‌یابد. در این روش سرعت چرخش پروانه ۳ الی ۵٪ افزایش می‌یابد.

روش سوم بسیار حساس می‌باشد. برای این کار روی لبه‌ی پره‌ها برش اندکی داده می‌شود و از آنجا که سطح مقطع پروانه فویل می‌باشد سپس فرایند شکل دهی صورت می‌گیرد. میزان برش پره‌ها می‌بایست حدود ۳٪ از عرض پره باشد. در این روش می‌بایست دقت کرد که راندمان پروانه کاهش محسوسی نداشته باشد. تغییرات در ۰.۶ تا ۰.۷ شعاع صورت می‌گیرد که در آنجا ناحیه گام موثر می‌باشد. از آنجا که ممان اینرسی قطبی سطح پره‌ها کاهش می‌یابد. لذا در این روش می‌بایست پروانه مجدداً بالانس گردد تا دچار ارتعاشات پیچشی نشود.

تمایل افزایش سرعت در شناورهای مسابقه‌ای، تفریحی و نظامی، محققین را به سمت پیشبرنده‌های دریایی سطحی سوق داده‌است. پروانه‌های سطحی، آب را می‌شکافند و وارد هوای اتمسفر می‌شوند، بنابراین در اطراف پره‌ها به جای بخار آب، هوا می‌باشد. این پروانه‌ها از خانواده پروانه‌های سوپرکاویتاسیونی هستند. شکل ۱ راندمان پروانه‌های مختلف را بر حسب سرعت شناور نشان داده‌است.



شکل ۱- نمودار راندمان انواع پروانه‌ها

همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت شناور، راندمان پروانه‌های نیمه مغروق از پروانه‌های دیگر بیشتر است. در سرعت ۷۵ گره دریایی، این پروانه بیشترین راندمان رانشی را ارائه می‌کند. با کاهش سرعت

<sup>2</sup> Overspeed

<sup>1</sup> Overload

## ۲- شرح مسئله و روش حل

هدف پروژه دستیابی به دور ۲۶۰۰ rpm موتور شناور مورد مطالعه می باشد که با توجه به گشتاور پروانه، دور موتور تا ۲۵۵۰ rpm افزایش نمی یابد. جدول ۱ مشخصات شناوری را که پروانه روی آن نصب شده است نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات شناور

توان موتور (hp)	نسبت گیربکس	نوع بدنه	طول بدنه (m)	عرض بدنه (m)
۱۳۱۲	۱.۵	کاتاماران سرشی	۱۶	۵

شکل ۲ پروانه نصب شده روی شناور را نشان می دهد. همانطور که از شکل این پروانه ها پیدا است، لبه ی فرار پروانه ضخیم است و باعث فروپاشیدن حباب های هوا می شود و از وقوع کاویتاسیون جلوگیری می کند.



شکل ۲- نمای پروانه نیمه مغروق 5\*980\*770

اصلاح و برش می بایست از سطح مکش صورت گیرد؛ لذا در ابتدا شابلن سطح مکش پره برداشته شده است. شکل ۳ روش برداشتن شابلن از پره ها را نشان می دهد. همانطور که از تصویر مشخص است با پوشاندن سطح یکی از پره ها توسط کاغذ و سپس بریدن آن مطابق با فرم هندسی پره شابلن تهیه شده است.

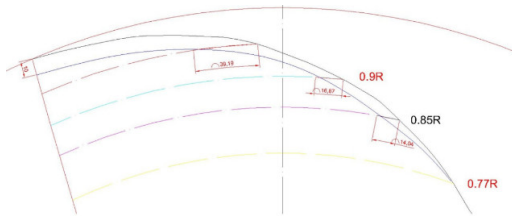
پس از تهیه شابلن، سطح گسترش یافته پروانه در نرم افزار اتوکد مدل گردید. با توجه به دور ۲۵۵۰ rpm که موتور دچار فرابار شده است می توان درصد فرابار را از رابطه ۱ محاسبه کرد [1].

$$LF = 1 - \frac{RPM1}{RPM2} \quad (1)$$

به زیر ۳۵ گره، سیستم رانش سطحی انتخاب مناسبی نیست زیرا کمترین راندمان را دارد [2].

کارهای تحقیقاتی مختلفی روی پروانه ها به روش های مختلفی جهت طراحی بهینه و همچنین اصلاح، صورت گرفته است. بتز، گلداستین و لربز تئوری خط لیفت را معرفی کردند [3,4,5]. چانگ و سالیوان، چپو و پتر این تئوری ها را در کارهایشان بکار بردند [6,7]. طاهری و همکاران در یک طراحی معکوس، بهینه سازی یک پروانه را انجام دادند [8]. برندن و همکاران مطالعه ای را روی پره های پروانه یک کشتی ناوشکن کلاس ایالات متحده آمریکا جهت بهبود کاویتاسون در سرعت های نهایی انجام دادند. آنها دو روش بهینه جهت عملکرد بهتر در سرعت های بالا ارائه کردند [9]. پاکیان و گلپهار مطالعه رفتار پروانه های سطحی را در دو حالت قبل و بعد اسکی شناور تندر و بررسی کردند و دینامیک سیال اطراف پروانه را شبیه سازی کردند [10]. پاکیان و گلپهار رفع حالت فرابار در موتور یک شناور مسافربری را با تغییر ضریب تبدیل گیربکس مورد مطالعه قرار دادند و بدون تغییر در پروانه و فقط با افزایش ضریب تبدیل گیربکس انطباق خوبی در سیستم رانش ایجاد کردند [11]. پاکیان و همکاران هوادهی مصنوعی به پروانه سطحی را در فاز قبل اسکی شناور و در حالت کاملاً مغروق پروانه مورد بررسی قرار دادند [12]. پاکیان و همکاران علت شکست پروانه های سطحی را در حداکثر دور بررسی کردند و دریافتند که ترک های نزدیک به ریشه پره دارای عمر کمتری هستند [13]. پاکیان و همکاران در تحقیق دیگر اثر سیال بر سازه این پروانه را در عمق مغروقت مختلف با FSI یک طرفه و دو طرفه بررسی کردند. تنش در ریشه پره حداکثر و در نوک پره کمترین می باشد [14].

پروانه های سطحی با توجه به پیچیدگی و کاربردهای خاص آنها، همواره مورد مطالعات محققین مختلف بوده است ولی مطالب موثری در رابطه با اصلاح هندسه آنها بعد از ساخت وجود ندارد. امید است که نتایج این مقاله بتواند گامی موثر در مطالعه این نوع پروانه باشد. در این کار، یک پروانه سطحی نیمه مغروق سوپر کاویتاسیونی با قطر ۷۷۰ و گام ۹۶۰ با پنج پره که روی یک شناور ۱۶ متری تندر و کاتاماران نصب شده و موتور شناور دچار بار اضافی گردیده است؛ مورد بررسی قرار گرفته و اصلاح می شود.



شکل ۵- منحنی برش روی سطح مکش یک پره

پس از مشخص شدن خط برش، برشکاری با دقت خاصی انجام گرفته است. جهت حفظ حالت اولیه ضخامت پره، قالب حالت اولیه تهیه شده و سپس پروانه سنگ کاری شده است. شکل ۷ عملیات برش را نشان می دهد.



شکل ۶- اعمال الگوی برش روی پره ها



شکل ۷- نحوه برش کاری پروانه

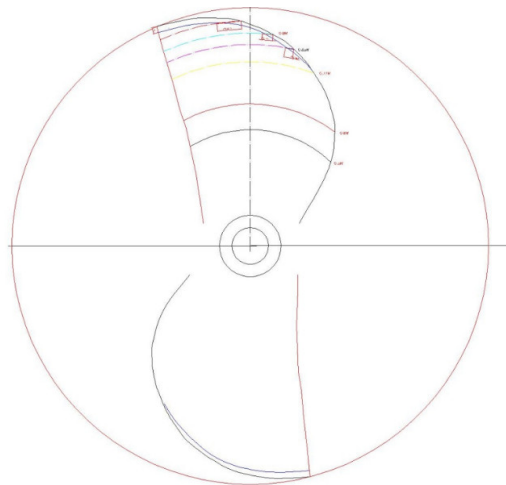
با توجه به نبود نمودار  $K_q$  و  $K_t$  برای بدست آوردن میزان  $K_q$  می توان از روش زیر استفاده کرد.

- ۱- در دور فرابار  $2550 \text{ rpm}$  گشتاور موتور را از گراف گشتاور- دور موتور بدست می آید.
- ۲- از آنجا که نمودار گشتاور- دور پروانه همواره می بایست زیر نمودار گشتاور- دور موتور باشد لذا این حالت در موتور فرابار شده تغییر می کند و نمودار گشتاور پروانه در نقطه دور فرابار، گشتاور موتور را قطع می کند لذا در نقطه فرابار گشتاور مورد نیاز پروانه و گشتاور موتور با هم برابر می باشد.
- ۳- با داشتن گشتاور، دور و قطر پروانه و با استفاده از رابطه ۲ به محاسبه  $K_q$  پرداخته می شود.



شکل ۳- نمای تهیه شابلن از پره ها

که در آن  $1 \text{ RPM}$  دور فرابار و  $2 \text{ RPM}$  دور ماکزیمم موتور می باشد. میزان فرابار موتور  $3.1$  درصد می باشد. در این نوع پروانه با توجه به شکل خاص آن، از روش همزمانی برش قطر و لبه پروانه استفاده شده است که با توجه به استاندارد رعایت فاصله گرفتن  $3$  درصد از عرض پره ها، برش از  $0.77$  شعاع پروانه شروع شده و  $1$  سانتی متر از شعاع کاهش یافته است. شکل ۴ مدل سطح گسترش یافته را برای دو پره پروانه و شکل ۵ منحنی برش را روی پروانه نشان می دهد.



شکل ۴- مدل سطح گسترش یافته پروانه

در این برش،  $3$  درصد از قطر پروانه و حدود  $3.2$  درصد از سطح پره کاهش یافته است. در شکل ۶ شابلن برش پره ها مشاهده می شود که روی پره جهت علامت زدن خط برش قرار گرفته است.

تست این شناور قبل و بعد از اصلاح پروانه در دریا با آب آرام انجام شده است. مدت زمان تست در هر دو حالت قبل و بعد از اصلاح پروانه، تقریباً دو ساعت و چهل دقیقه به طول انجامید. قبل از انجام تست‌ها، مانیتورینگ موتور کالیبره گردید. جهت اطمینان از عملکرد صحیح شناور، هر دو تست با بار کامل<sup>۳</sup> انجام گرفته است. جدول ۲ مقایسه نتایج هر دو تست را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه نتایج تست شناور قبل و بعد از اصلاح

ردیف	نوع تست	وضعیت بار	ماکزیمم دور موتور rpm	ماکزیمم سرعت Knot	دور موتور در هنگام اسکی rpm
۱	قبل از اصلاح	بار کامل	۲۵۵۰	۴۴.۱	۱۷۰۰
۲	بعد از اصلاح	بار کامل	۲۶۰۰	۴۴.۲	۱۷۵۰

شکل ۸ نمای پاشنه شناور را بعد از اسکی نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است بدلیل نیمه مغروق بودن پروانه، ویک به همراه اسپری آب در پاشنه شناور ایجاد شده است. با مقایسه چشمی در هر دو تست، تفاوت محسوسی در ارتفاع و طول اسپری مشاهده نگردید.



شکل ۸- نمایی از اسپری آب توسط پروانه در حالت اسکی شناور

همانطور که از نتایج سرعت مشخص است میزان دور افت شده موتور برگشته است و مقدار سرعت ماکزیمم تقریباً تغییری نکرده است. دور اسکی در حالت بدون اصلاح rpm ۱۷۰۰ است و بعد از اصلاح پروانه به rpm ۱۷۵۰ رسیده است که افزایش rpm ۵۰ داشته است.

عملکرد پروانه اصلاح شده در دورهای پایین و در حالت کاملاً مغروق (قبل اسکی شدن شناور) مطلوب نمی باشد بطوریکه برای مثال در دور rpm ۱۸۰۰ موتور، سرعت شناور کاهش چشم گیری داشته است. علت این موضوع را

$$K_q = \frac{q}{\rho n^2 D^5} \quad (2)$$

تراست پروانه نیز از رابطه ۳ محاسبه می گردد.

$$T = K_t \rho n^2 D^4 \quad (3)$$

که در آن گشتاور، چگالی، سرعت چرخش و قطر به ترتیب بر حسب نیوتن متر، کیلوگرم بر متر مکعب، دور بر ثانیه و متر می باشد. با توجه به نمودار توان- دور، توان موتور در دور rpm ۲۵۵۰ برابر hp ۹۰۰ است که با توجه به رابطه ۴ می توان گشتاور موتور را محاسبه کرد.

$$q = \frac{h}{2\pi n} \quad (4)$$

### ۳- نتایج

گشتاور تولیدی موتور با توجه به توان ۶۷۱۶۴۱ W و دور rps ۴۲.۵ برابر N.m ۲۵۱۵.۳۲ می باشد. اما توان موتور در هنگام انتقال به پروانه کاهش می یابد. این کاهش برای گیربکس به مقدار ۳ درصد و برای هر براکت نگهدارنده شافت حدود ۰/۵ درصد می باشد که با توجه به دو براکت نگهدارنده شافت و یک گیربکس شناور، توان در مجموع ۴ درصد کاهش می یابد. با توجه به نسبت کاهنده ۱.۵ گیربکس نصب شده روی شناور، مقدار دور، ۱.۵ برابر کاهش می یابد. لذا با توان شافت ۶۴۴۷۷۵.۳ وات و دور rpm ۱۷۰۰ شافت پروانه، گشتاور پروانه از رابطه ۴ به دست می آید.

$$q_p = 3622.13 \text{ N.m} \quad n_p = 1700 \text{ rpm}$$

با استفاده از رابطه ۲ میزان  $K_q$  پروانه در این دور با توجه به چگالی  $1025 \text{ kg/m}^3$  و قطر ۷۷۰ mm پروانه برابر ۰.۰۱۶ می باشد.

حال با توجه به کاهش ۲۰ mm قطر و با فرض تغییرات ناچیز مقدار  $K_q$  بدلیل تغییرات بسیار کم در پروانه، میزان گشتاور پروانه در دور rpm ۲۵۵۰ موتور با استفاده از رابطه ۲ برابر N.m ۳۱۱۹.۴۶ می باشد که حدود N.m 502.67 کاهش یافته است.

بدلیل تغییر در ممان اینرسی قطبی سطح پره ها و جلوگیری از ارتعاشات پیچشی، پروانه مجدداً مورد تست استاتیکی و دینامیکی قرار گرفت.

<sup>۳</sup> Full load

می‌توان در برش لبه پروانه دید که در آن طول کورد پرها کاهش یافته‌است و این موضوع تأثیر خود را در سرعت شناور در دوره‌های پایین و همچنین دور اسکی نشان داده‌است. این کاهش سرعت بیانگر کاهش تراست تولیدی پروانه در حالت مغروق است و هنگامی که شناور اسکی می‌شود میزان کاهش تراست ناچیز شده‌است و به عبارتی هنگامی که پروانه بعد از اسکی به صورت نیمه مغروق قرار می‌گیرد میزان کاهش تراست ناچیز شده‌است و با افزایش 50 rpm دور در حالت اصلاح، سرعت شناور تقریباً به حالت اولیه (بدون تغییرات) رسیده‌است. با توجه به کارکرد این شناور در حالت اسکی و پروانه نیمه مغروق می‌توان از این کاهش سرعت در دوره‌های پایین چشم‌پوشی کرد. میزان لغزش پروانه در دو حالت قبل و بعد از اصلاح نیز محاسبه گردیده‌است. از آنجا که تغییرات در قسمت بالای ۰.۸ شعاع صورت گرفته‌است لذا می‌توان میزان گام را در هر دو تست ثابت در نظر گرفت. برای محاسبه میزان لغزش از روابط ۵ تا ۷ استفاده شده‌است.

$$Shaft\ rps = motor\ rpm / ratio\ gear\ box / 60 \quad (5)$$

$$V_{no\ slip}(Knot) = shaft\ rps * P(m) * 1.95 \quad (6)$$

$$Slip\ (\%) = 1 - \frac{V_{slip}}{V_{no\ slip}} \quad (7)$$

جدول ۳ مقایسه لغزش را در دور ماکزیمم نشان می‌دهد. همانطور که از جدول نیز مشخص است میزان لغزش بعد از اصلاح پروانه، حدود ۴ درصد افزایش یافته‌است که علت آن را در کاهش سرعت شناور و به تبع آن کاهش تراست ناشی از کاهش سطح پره می‌توان یافت. بدیهی است که میزان اختلاف لغزش در دو حالت قبل و بعد از اصلاح در دوره‌های پایین‌تر پروانه، بیشتر می‌شود.

جدول ۳- مقایسه میزان لغزش در دو حالت قبل و بعد از اصلاح پروانه

ردیف	نوع تست	دور ماکزیمم rpm	سرعت بدون لغزش Knot	سرعت شناور Knot	درصد لغزش (%)
۱	قبل از اصلاح	۲۵۵۰	۵۳.۲۳	۴۴.۱	۱۴.۲
۲	بعد از اصلاح	۲۶۰۰	۵۴.۰۸	۴۴.۲	۱۸.۳

#### ۴- نتیجه گیری

اصلاح پروانه یکی از راهکارهای برداشتن بار اضافی روی موتور می‌باشد. در این مقاله از روش همزمانی برش قطر و لبه فرار استفاده شده‌است و از ۰.۷۷ شعاع برش انجام شده‌است. نتایج بیانگر برگشتن دور افت شده‌ی موتور به مقدار ۵۰ rpm می‌باشد. سرعت نهایی شناور تغییر چندانی نداشته‌است. میزان لغزش پروانه بعد از اصلاح حدود ۴ درصد افزایش یافته‌است که با توجه به استاندارد لغزش زیر ۲۰ درصد برای شناورهای سرشی، مقدار قابل قبولی می‌باشد. همچنین با بررسی گراف دور- سرعت شناور، شاهد کاهش راندمان پروانه خصوصاً در دورها و سرعت‌های پایین هستیم که در آن پروانه کاملاً مغروق می‌باشد. نتایج بدست آمده با توجه به اسپیک فنی شناور از نظر سرعت نهایی، دور اسکی و عملکرد موتور قابل قبول می‌باشد.

#### مراجع

- [1] Caterpillar Handbook, Marine Analyst Service, printed in USA, LEBV4830-03,
- [2] www.topcompany.ir
- [3] Betz, A., "Schrauben Propeller mit geringstem Energieverlust". K. Ges. Wiss. Gottingen Nachr. Math. Phys. Klasse, 1919
- [4] Goldstein, S., "On the Vortex Theory of Screw Propellers". Proc. R. Soc. London Ser. A 123 :440-465, 1929
- [5] Lerbs, H. W., "Moderately Loaded Propellers with a Finite Number of Blades and an Arbitrary Distribution of Circulation". SNAME Trans, 60, 1952
- [6] Chang, L. K., and Sullivan, J. P., "Optimization of Propeller Blade Twist by an Analytical Method". AIAA Journal, 22(2), 22, 1982
- [7] Chiu, Y. D., and Peters, D. A., "Numerical Solution of Induced Velocities by Semi-Infinite Tip Vortex Lines". Journal of Aircraft, 25(8), 684, 1987
- [8] Taheri, R., Mazaheri, k., "Hydrodynamic optimization of propeller using Gradient based approach". 14<sup>th</sup> Conference on Fluid Dynamics, Birjand, Iran, May 1-3, 2012.
- [9] Brenden, E., Oscar, V., Chrystostomos, C., "Dual-operating-point blade optimization for high-speed propellers". 11<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2011, Honolulu, Hawaii, USA, September 2011.
- [10] Pakian Bushehri M, Golbahar Haghghi MR. Experimental and numerical analysis of Hydrodynamic Characteristics of a surface piercing propeller mounted on high-speed craft. International

Journal of Maritime Technology. 2021 Apr 10;15:79-91.

[11] Pakian Bushehri MP, Haghghi MG. Propulsion System Matching Analysis of a Catamaran Passenger Ship by Changing the Gear Ratio. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering. 2023 Mar;47(1):91-107.

[12] Pakian Bushehri M, Golbahar Haghghi MR, Malekzadeh P, Bahmyari E. Investigating the Effects of Air Duct Dimensions on Aeration and Hydrodynamic Characteristics of a Surface-piercing Propeller. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2024 Apr 1;10(2):392-405.

[13] Pakian Bushehri M, Golbahar Haghghi MR, Malekzadeh P, Bahmyari E. Investigating the growth of surface crack and high cycle fatigue in surface-piercing propeller. Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2025 Feb 1;53(2):1544-71.

[14] Pakian Bushehri M, Haghghi MG, Malekzadeh P, Bahmyari E. Fluid-structure interaction analysis of an elastic surface-piercing propellers. Journal of Fluids and Structures. 2025 Jan 1;132:104228.