

کاهش نویز یک نمونه پروانه دریایی با استفاده از بهینه‌سازی

بارگذاری نوک پره‌ها

محمدرضا نجفی*

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران

najafi.m@ihu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۷/۳

چکیده

از اصلی‌ترین عوامل تولید نویز توسط شناورهای دریایی، سیستم رانش و پروانه آن شناور است. بر همین اساس کاهش نویز پروانه‌های دریایی نقشی اساسی در کاهش نویز انتشار یافته از سامانه‌های دریایی دارند. یکی از روش‌های کاهش نویز پروانه‌های دریایی استفاده از بارگذاری نوک پره^۱ (CLT) است. در این پژوهش به بهینه‌سازی طراحی یک نمونه پروانه دریایی مغروق با هدف کاهش سطح نویز آن بواسطه ایجاد تغییرات هندسی بر روی وینگلت^۲ پره‌ها و تبدیل آن به یک پروانه CLT پرداخته شد. به منظور بهینه‌سازی قسمت وینگلت پره، از چهار پارامتر انقباض صفحه^۳، زاویه فلپ^۴، کشیدگی صفحه^۵ و زاویه برش صفحه^۶ استفاده شد. بر اساس روش تاگوچی^۷ ۹ حالت طراحی از میان ۸۱ حالت پیشنهاد شد و تراز فشار صوت آن‌ها در فرکانس پره اول و دوم استخراج شد. در ادامه به منظور یافتن سطوح بهینه نسبت به نویز تولیدی، مشخص گردید که زاویه فلپ از میان چهار پارامتر مورد بررسی بیشترین تأثیر را در کاهش سطح نویز دارد. در نهایت با تعیین بهینه‌ترین حالت طراحی، پروانه CLT طراحی شده در فرکانس اول پره به میزان ۱/۹ درصد و در فرکانس عبوری پره دوم به میزان ۱/۶۵ درصد کاهش نویز نسبت به پروانه مرجع یافت.

واژگان کلیدی: کاهش نویز، پروانه CLT، زاویه فلپ، سطح فشار صوت، بارگذاری نوک پره

۱. مقدمه

انتشار نویز در دریا اثرات زیست‌محیطی زیادی دارد. شناسایی منبع تولید نویز، اندازه‌گیری آن‌ها [۱] و بررسی روش‌های کاهش نویز، اولین گام در حذف یا کاهش این اثرات مضر است. مطالعات نشان می‌دهد که پروانه شناورهای دریایی یکی از

منابع اصلی انتشار نویز در زیرسطح بوده [۲] و کاهش نویز پروانه‌ها می‌تواند موجب کاهش اساسی نویز شناورها گردد [۳]. راهکارهای مختلفی جهت کاهش نویز پروانه‌ها مورد بررسی و اثبات رسیده است که بیش از همه تغییر در هندسه پروانه‌ها مورد توجه محققان بوده است [۴-۵]. یکی از روش‌های کاهش

نویز پروانه‌ها، استفاده از بارگذاری نوک پره CLT می‌باشد. نمونه‌ای از پروانه‌های CLT در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پروانه نوک پره‌ها دارای یک تیغه عمود به سمت عقب است که مانند یک مانع بین دو سطح پشت و روی پره عمل کرده و سبب می‌شود جریان آب از سطح پرفشار به سطح کم فشار پره کاهش یابد و در نتیجه احتمال وقوع کاویتاسیون نوک پره و نویز ناشی از آن کاهش می‌یابد [۶].



شکل ۱. نمونه‌ای از پروانه CLT [۷]

امروزه از پروانه‌های CLT در شناورهای مختلف استفاده می‌شود. [۸]، آیانیلو و همکاران [۹]، به بررسی عددی و تجربی نویز منتشر شده از یک پروانه CLT منصوب بر یک شناور RO-PAX پرداختند. تست تجربی در دریای مدیترانه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد شبیه‌سازی عددی با درصد خطای کمی نویز تولیدی اندازه‌گیری شده در تست تجربی را پیش‌بینی کرده است. گاکرو و همکاران [۱۰-۱۱]، حالات مختلف قرارگیری نوک پره پروانه CLT را شبیه‌سازی کرده و نتایج ضریب پیشروی^۸، ضریب گشتاور، تولید گردابه^۹ نوک و کاویتاسیون آن‌ها را با هم مقایسه کردند. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد طراحی مناسب کجی نوک پروانه CLT می‌تواند باعث بهبود کارایی این نوع از پروانه‌ها شود.

ایلماز و همکاران [۱۲] به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر از مدل آشفتگی^{۱۰} شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^{۱۱} (LES) برای مدل‌سازی جریان گردابی کاویتاسیون‌دار پروانه استفاده کرد و نشان دادند وجود کجی در نوک پره منجر به کاهش حجم بخار شده که به نوبه خود باعث کاهش کاویتاسیون و گرداب نوک

پره می‌گردد. وانگ و همکاران [۱۳] با بررسی پروانه‌های غیرمتعارف به این نتیجه رسیدند که پروانه‌های نوک‌تیز و پروانه‌های با چرخش مخالف، راندمان پیشران‌ش شناورها را بهبود می‌بخشند. گونزالز و همکاران [۱۴] مشکل مقیاس‌بندی نتایج آزمایش‌های آب‌های آزاد برای پروانه‌های CLT را با همان دقت پروانه‌های معمولی به دست آوردند. پوسا [۱۵] گردابه‌های ایجاد شده بواسطه نوک دو پروانه معمولی و بارگذاری شده در نوک را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد ایجاد بارگذاری در نوک پروانه شرط کافی برای دستیابی به پیک‌های فشار منفی پایین‌تر نیست و لازم است هندسه پروانه بصورت دقیق بهینه شود. وانگ و همکاران [۱۶] تأثیر ضرایب پیشروی بر پروانه CLT را بررسی کرده و نتایج حاصل از محاسبات را با داده‌های تجربی اعتبارسنجی کردند و نشان دادند که آشفتگی‌های ناشی از پره‌های چرخان با افزایش ضریب پیشروی کوچک‌تر می‌شوند. گاکرو و فراندو [۱۷] به مقایسه دو پروانه CLT که یکی با هندسه‌ای جدید و بهینه بود پرداختند و ثابت کردند گرچه تحمل بار بیشتر در نوک پروانه می‌تواند عملکرد پروانه را بهبود دهد اما این موضوع نیازمند فرآیند ساخت پیچیده است. ژائو و همکاران [۱۸] با جایگزینی پره‌های CLT بجای پره‌های معمولی در یک پمپ جت نشان دادند طرح‌های با عرض متغیر به طور مؤثر نوسانات فشار را کاسته و به کاهش نویز دست می‌یابند. به طور خاص، مدل CW3 حداکثر کاهش در سطح کلی منبع صدا به میزان ۵/۷ دسی‌بل و ۴/۰ دسی‌بل را به ترتیب در فواصل ۱ متر و ۲۰ متر نشان می‌دهد. برعکس، طرح‌های با طول متغیر نوسانات فشار را تشدید کرده و هیچ اثر کاهش نویز قابل توجهی نشان نمی‌دهند.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته و نتایج بدست آمده پیرامون پروانه‌های CLT، آن‌چه به‌عنوان خلاء پژوهشی مطرح بوده و نیازمند بررسی است، این است که چه نوع هندسه و بارگذاری در نوک پره پروانه می‌تواند منجر به کاهش نویز تولیدی گردد. در این پژوهش با بررسی هم‌زمان اثر چهار پارامتر

شکل ۲. نمایی از پروانه مرجع

۲-۲. شرایط کارکردی پروانه

به منظور لحاظ کردن شرایط یکسان برای پروانه، یک مدل زیرسطحی استاندارد (مدل زیرسطحی سابوف^{۱۳}) جهت بررسی و طراحی پروانه انتخاب شده است [۲۰]. شکل ۳ شماتیک زیردریایی سابوف را نشان می‌دهد.

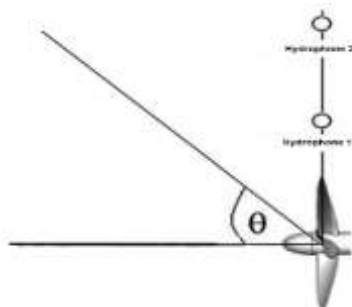


شکل ۳. شماتیک مدل زیرسطحی سابوف

۲-۳. اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی از پژوهشی که توسط باقری و همکاران [۲۱]، که به بررسی تجربی هیدروآکوستیکی پروانه DTMB^{۱۴۱۱۹} در آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی شریف پرداخته است، استفاده می‌شود. به منظور اطمینان از اعتبارسنجی، شبیه‌سازی با شرایط محیطی آزمون تجربی آن پژوهش انجام شده است.

در اعتبارسنجی انجام شده از دو هیدروفون برای استخراج سطوح فشار نويز برای شبیه‌سازی‌های آکوستیک پروانه استفاده شد. موقعیت و محور مختصات این هیدروفون‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. هیدروفون اول در فاصله ۵ برابر قطر و هیدروفون دوم در فاصله ۱۰ برابر قطر قرار دارد.



شکل ۴. موقعیت قرارگیری هیدروفون‌ها

انقباض صفحه، زاویه فلپ، کشیدگی صفحه و زاویه برش صفحه در پروانه، با استفاده از روش تاگوچی، بهینه‌ترین حالت طراحی پروانه به منظور دستیابی به کم‌ترین سطح فشار صوت مورد بررسی قرار می‌گیرد و مشخصات پروانه بهینه شده ارائه می‌شود.

۲. روش حل

۲-۱. انتخاب پروانه مرجع

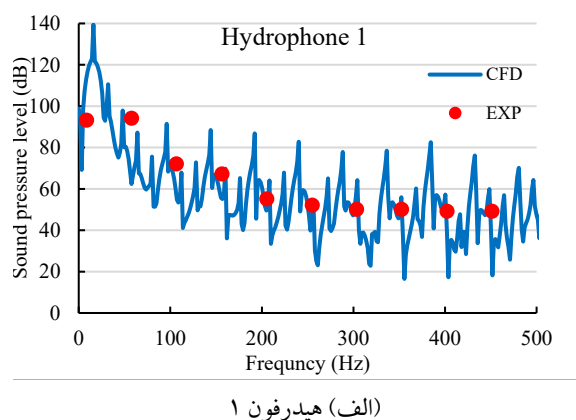
به منظور مقایسه سطح نويز پروانه، از یک پروانه اسکيو^{۱۲} بالا که توسط نجفی [۱۹] مورد بررسی قرار گرفته که مشخصات هندسی و داده‌های نويز تولیدی آن بر اساس جدول ۱ آورده شده است، استفاده می‌شود. هندسه این پروانه نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات پروانه طراحی شده توسط نجفی [۱۹]

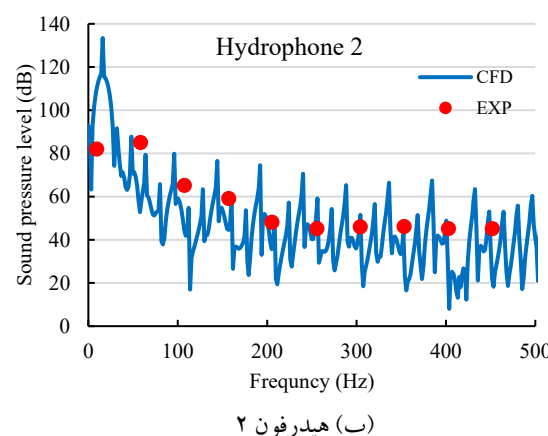
مقدار	مشخصات
۲۲۰	قطر (mm)
۳	تعداد پره
۰/۸	گام هندسی
۹۰/۱	فرکانس اول پره (Hz)
۱۰۰/۳	شدت صوت فرکانس اول (dB) SPL
۱۸۰/۲	فرکانس دوم پره (Hz)
۹۰/۶	شدت صوت فرکانس دوم (dB) SPL



نمودار سطح فشار صوت در فرکانس‌های ۰ تا ۵۰۰ هرتز در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی [۲۱] در شکل ۵ آورده شده است.



(الف) هیدروفون ۱



(ب) هیدروفون ۲

شکل ۵. مقایسه نمودار سطح فشار صوت پژوهش حاضر (آبی رنگ) با نتایج حاصل از داده‌های تجربی باقری و همکاران (نقاط قرمز رنگ) [۲۱]

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، نقاط قرمز رنگ نتایج آزمایشگاهی پژوهش باقری و همکاران و نمودار آبی رنگ نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر است که نشان دهنده تطابق خوب بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی است.

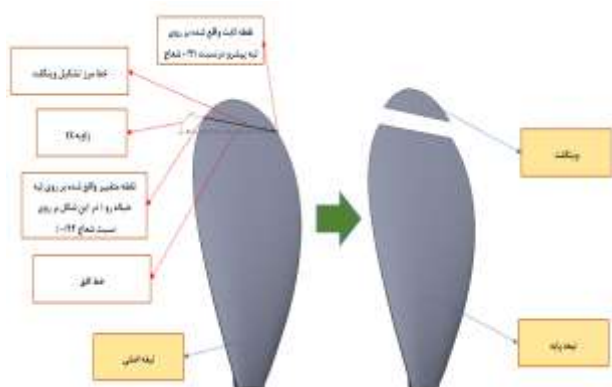
۳. پارامترهای بهینه‌سازی

۳-۱. پارامترهای مورد بررسی پروانه CLT

با توجه به پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته، چهار پارامتر انقباض صفحه، زاویه فلپ، کشیدگی صفحه و زاویه برش صفحه پروانه CLT که مؤثرترین پارامترها هستند، بررسی می‌شود که به ترتیب به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱. انقباض صفحه

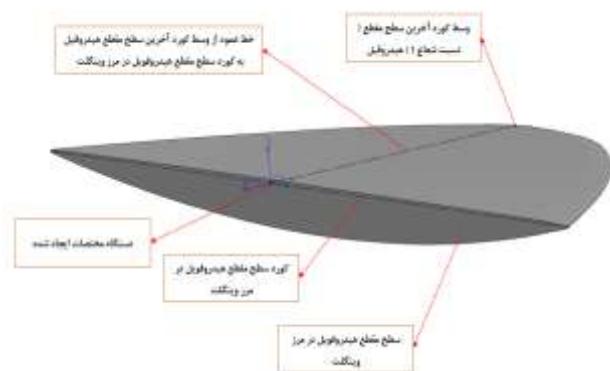
این پارامتر نشان دهنده خط مرزی است که با افق زاویه α می‌سازد و هر تیغه اصلی پروانه را به دو قسمت وینگلت و تیغه پایه تقسیم می‌کند. این پارامتر توسط دو نقطه که یکی از آن‌ها بر روی لبه پیشرو و دیگری بر روی لبه دنباله‌رو پروانه قرار دارد بدین‌گونه معرفی شده است که نقطه قرار گرفته شده بر روی لبه پیشرو پروانه ثابت در نظر گرفته شده و نقطه در نظر گرفته شده بر روی لبه دنباله‌رو پروانه متغیر است. پارامتر مورد نظر در این پژوهش در سه نسبت شعاع (r/R) پروانه ۰/۹۲، ۰/۹۴، ۰/۹۰ بر روی لبه دنباله‌رو پروانه بررسی می‌شود. تمام مشخصات هندسی این پارامتر برای فهم بهتر در شکل ۶ آورده شده است.



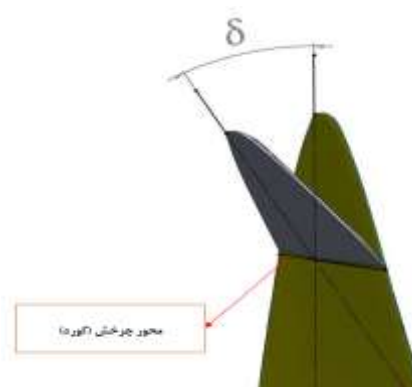
شکل ۶. مشخصات هندسی پارامتر انقباض صفحه

۳-۱-۲. زاویه فلپ

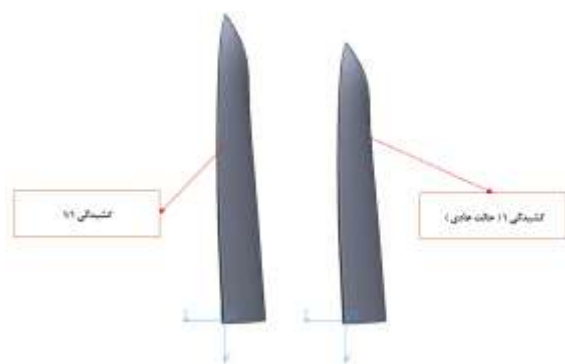
زاویه فلپ (δ) به زاویه چرخشی که نسبت به محور چرخش که همان کورد^{۱۵} سطح مقطع هیدروفویل پروانه است، گفته می‌شود که نمای هندسی آن در شکل ۷ آورده شده است. این پارامتر در پژوهش حاضر در سه سطح اندازه زاویه ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه بررسی خواهد شد. این زاویه برای تیغه اصلی (بدون وینگلت یا حالت عادی) صفر است.



شکل ۸. نمای هندسی نحوه تشکیل دستگاه مختصات



شکل ۷. نمای هندسی زاویه فلپ



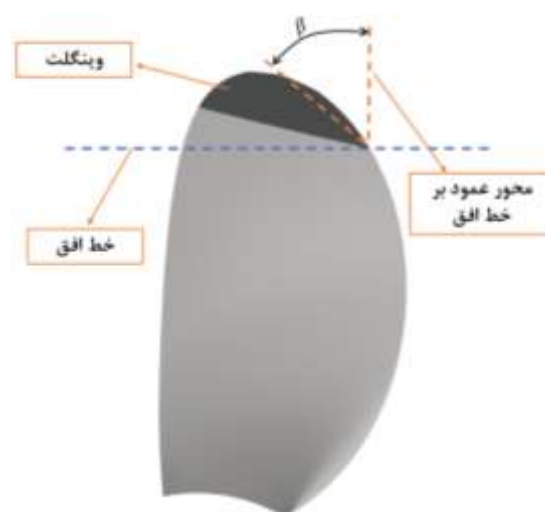
شکل ۹. نمایی از تغییرات اعمال شده بعد از کشیدگی

۳-۱-۴. زاویه برش صفحه

این پارامتر به جهت این که تأثیر زاویه برش صفحه (β) وینگلت از طرف لبه پیشرو پروانه مشخص گردد، مورد بررسی قرار گرفته شده است. این زاویه نسبت به محور عمود بر خط افق همانند شکل ۱۰ تعریف شده است. این پارامتر نیز در سطح زاویه صفر (حالت عادی)، ۳۵ و ۴۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته شده است. اختلاف غیرعادی این سطح زاویه به این دلیل است که تغییرات اعمالی از این برش تا زاویه ۵۵ درجه کم و بعد از آن زیاد است. به همین دلیل این سه زاویه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا تغییرات زاویه برش در آن‌ها نمایان باشد.

۳-۱-۳. کشیدگی صفحه

با توجه به این که زاویه فلپ می‌تواند شعاع تیغه اصلی پروانه را کاهش دهد، این پارامتر جهت این بررسی می‌شود که کشیدگی وینگلت که سبب افزایش شعاع تیغه نیز می‌شود، چه میزان می‌تواند بر روی نویز پروانه تأثیرگذار باشد. این کشیدگی نیازمند ایجاد دستگاه مختصاتی سه‌محوره است که یک محور آن خطی است که از وسط کورد آخرین (نسبت شعاع ۱) هیدروفویل پروانه به کورد سطح مقطع هیدروفویل پروانه در مرز وینگلت عمود شده است، محور دیگر آن همان کورد سطح مقطع هیدروفویل پروانه در مرز وینگلت بوده و آخرین محور نیز به جهت کامل شدن دستگاه مختصات خطی که بر دو محور قبلی گفته شده، عمود است، انتخاب شده است. نمای هندسی محور مختصات ایجاد شده در شکل ۸ آورده شده است. همچنین تأثیر پارامتر کشیدگی در شکل ۹ مشخص است. پارامتر کشیدگی در این پژوهش در سه سطح مقایسه ۱ (حالت عادی)، ۱/۰۵ و ۱/۱ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱۰. تغییرات هندسی سه زاویه برش انتخاب شده

گام بعدی نحوه تقابل و ترکیب سطوح پارامترها باهم می باشد که در روش تاگوچی به وسیله آرایه های متعامد تعیین می گردد. به طور کلی با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن ها آرایه های متعامد زیادی وجود دارد، اما در این تحقیق با توجه به این که چهار پارامتر در سه سطح بررسی می شوند از جدول بندی آرایه متعامد که برای این تعداد از پارامترها و سطوح متناسب هستند، استفاده می شود. لازم به ذکر است که استفاده از این روش سبب می شود که تعداد کلی شبیه سازی ها از ۸۱ مورد به ۹ مورد کاهش یابد. مشخصات آرایه متعامد به وسیله ترکیب سطوح مختلف پارامترها در جدول ۳، نوع طراحی هندسی وینگلت هایی که باید بررسی گردند را معین کرده است.

جدول ۳. آرایه با روش تاگوچی برای چهار پارامتر در سه سطح

شماره طراحی	انقباض صفحه	زاویه فلپ	کشیدگی صفحه	زاویه برش صفحه
۱	۱	۳	۳	۳
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۱	۱	۱
۴	۲	۳	۱	۲
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۱	۲	۳
۷	۳	۳	۲	۱
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۱	۳	۲

مشخصات هندسی ۹ حالت طراحی مستخرج از روش تاگوچی، در جدول ۴ آورده شده است. لازم به ذکر که سایر مشخصات هندسی پروانه ثابت بوده و فقط قسمت وینگلت این پروانه طبق مشخصات هندسی این جدول تغییر خواهد کرد.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای وینگلت در طراحی به روش تاگوچی

شماره طراحی	انقباض صفحه	زاویه فلپ	کشیدگی صفحه	زاویه برش صفحه
۱	۰/۹	۹۰	۱/۱	۴۰

۲-۳. طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در این پژوهش جهت بررسی اثر پارامترهای هندسی پروانه CLT بر نویز پروانه به دست آمده از پارامترهای متعامد پرداخته خواهد شد. بعد از بررسی نتایج هندسه شبیه سازی شده، جهت یافتن بهینه ترین حالات ممکن CLT، به بررسی سطوح بهینه با استفاده از روش تاگوچی پرداخته خواهد شد. گام نخست در روش تاگوچی تعیین کردن تعداد پارامترها و سطوح آن است [۲۲] که در این تحقیق با توجه به بررسی های صورت گرفته شده چهار پارامتر تأثیرگذار جهت بررسی هندسه وینگلت بر نویز پروانه انتخاب شده است که از این چهار پارامتر یکی از آن ها در سه سطح، همان طور که در بخش قبل نیز توضیح داده شد، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مشخصات پارامترها و سطوح آن ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای بهینه سازی در سه سطح

سطح	انقباض صفحه	زاویه فلپ	کشیدگی صفحه	زاویه برش صفحه
۱	۰/۹	۳۰	۱	۰
۲	۰/۹۲	۶۰	۱/۰۵	۳۵
۳	۰/۹۴	۹۰	۱/۱	۴۰

۲	۰/۹	۶۰	۱/۰۵	۳۵
۳	۰/۹	۳۰	۱	۰
۴	۰/۹۲	۹۰	۱	۳۵
۵	۰/۹۲	۶۰	۱/۱	۰
۶	۰/۹۲	۳۰	۱/۰۵	۴۰
۷	۰/۹۴	۹۰	۱/۰۵	۰
۸	۰/۹۴	۶۰	۱	۴۰
۹	۰/۹۴	۳۰	۱/۱	۳۵

در ادامه با انجام ۹ طراحی شبیه‌سازی پیشنهاد شده از روش تاگوچی به بررسی عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌های طراحی شده، پرداخته می‌شود و با ارائه خروجی شبیه‌سازی به تاگوچی، بهینه‌ترین حالت ممکن CLT انتخاب می‌شود.

۴. نتایج

۴-۱. پارامترهای مورد بررسی پروانه CLT

بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۴ شبیه‌سازی‌ها در شرایط یکسان و با سرعت جریان ورودی ۵/۴۸ گره دریایی انجام شده و برای اندازه‌گیری شدت فشار صوت، هیدروفون در فاصله ۱ متری بالای پروانه در نرم افزار STAR-CCM+ قرار داده شده است. هندسه طراحی پروانه‌ها بر اساس روش تاگوچی در شکل ۱۱ آورده شده است.

۴-۲. استخراج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌های

طراحی شده

با قرار دادن هر یک از پروانه‌های طراحی شده در شرایط شبیه‌سازی، میزان شدت فشار صوت را از طریق هیدروفونی که در فاصله یک متری از پروانه قرار گرفته است، بدست می‌آوریم. در جدول ۵ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع در مقایسه با ۹ پروانه طراحی شده ارائه شده است.



شکل ۱۱. شماتیک پروانه‌های طراحی شده پیشنهادی با روش تاگوچی

جدول ۵. مقایسه عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه‌های طراحی شده

شماره طراحی	فرکانس اول (Hz)	شدت صوت (dB) SPL	تغییر SPL (%)	فرکانس دوم (Hz)	شدت صوت (dB) SPL	تغییر SPL (%)
پروانه مرجع	۹۰/۱	۱۰۰/۳	-	۱۸۰/۲	۹۰/۶	-
طراحی ۱	۹۷/۴	۱۰۰/۷	۳/۹۸	۱۹۴/۷	۹۱/۹	۱/۴۴
طراحی ۲	۹۶/۲	۱۰۰	-۲/۹۹	۱۹۲/۳	۹۰/۴	-۰/۲۲
طراحی ۳	۹۴/۷	۹۹/۱	-۱/۲	۱۸۹/۳	۸۹/۹	-۰/۷۷
طراحی ۴	۹۷/۷	۱۰۰/۸	-۰/۵	۱۹۵/۳	۹۰/۹	-۰/۳۳
طراحی ۵	۹۷/۴	۱۰۰/۶	-۰/۳	۱۹۴/۷	۹۰/۱	-۰/۵۵
طراحی ۶	۹۴/۲	۹۸/۶	-۱/۶۹	۱۸۸/۵	۸۹/۱	-۱/۶۶
طراحی ۷	۹۸/۳	۱۰۱/۴	۱/۱	۱۹۶/۵	۹۰/۸	-۰/۲۲
طراحی ۸	۹۶/۵	۹۹/۷	-۰/۵۹	۱۹۲/۹	۸۹/۸	-۰/۶۶
طراحی ۹	۹۴/۴	۹۸/۵	-۱/۷۹	۱۸۸/۴	۸۹/۲	-۱/۵۵

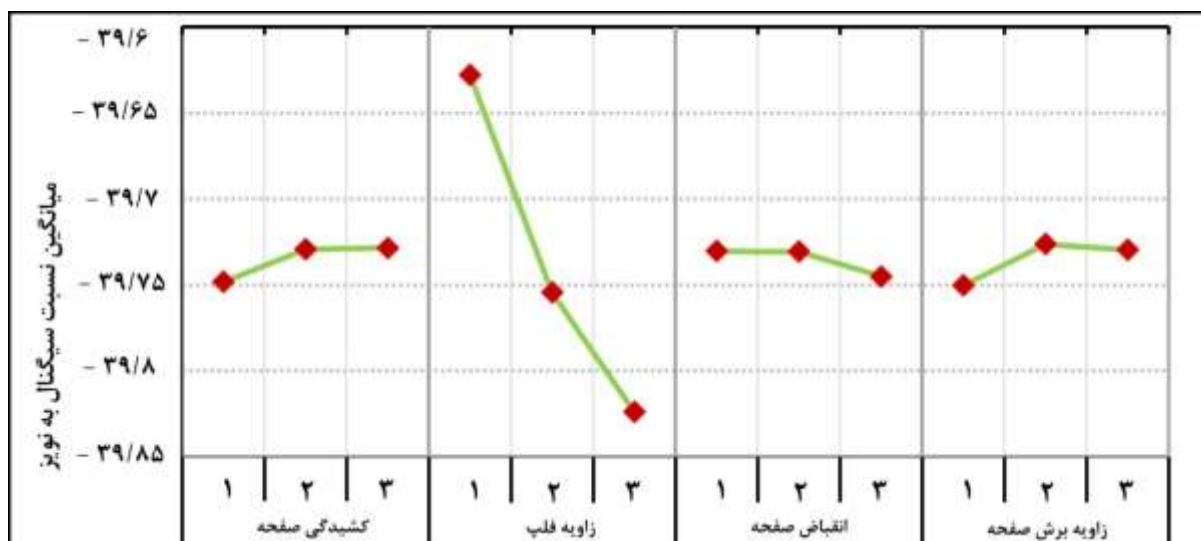
۳-۴. یافتن سطوح بهینه نسبت به نویز تولیدی

با ملاحظه نتایج، مشاهده می‌شود اکثر ترکیب‌های هندسی استخراج شده پروانه CLT از روش تاگوچی باعث کاهش نویز تولیدی نسبت به پروانه مرجع هستند. از این میان طراحی ۶ و ۹ بیشترین کاهش نویز تولیدی را در فرکانس‌های عبوری اول و دوم داشته‌اند.

در این بخش با استفاده از خروجی‌های بدست آمده از روش تاگوچی به بررسی بهینه‌ترین حالت ممکن از ترکیب پارامترها می‌پردازیم به طوری که نمودارهای نسبت سیگنال به نویز سطوح هر یک از پارامترهای هندسی پروانه CLT نسبت به خروجی نویز تولیدی پروانه استخراج شده و سطوح بهینه تعیین می‌شود. سپس با مشخص شدن پارامترهای هندسی بهینه، از طریق نمودارهای میانگین نسبت سیگنال به نویز به ترسیم بهینه‌ترین حالت پروانه CLT پرداخته می‌شود.

جهت تعیین سطوح بهینه پارامترها نسبت به خروجی نویز تولیدی پروانه که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده بود، نیاز است که نمودار نسبت سیگنال به نویز برای این خروجی بررسی شود. این نمودار که در شکل ۱۲ نشان داده شده، از طریق نرم‌افزار مینی‌تب^{۱۶} به دست آمده است. لازم به ذکر است که با توجه به این که نویز تولیدی هر چه کمتر باشد بهتر است، از معیار عملکردی مشخصه کیفیت هرچه کمتر، بهتر، استفاده شده است.

بررسی این نمودار نشان می‌دهد که به طور کلی نویز تولیدی پروانه، بیشتر تحت تأثیر پارامتر زاویه فلپ بوده و دیگر پارامترها تأثیر کمی بر روی این خروجی دارند به طوری که از نتایج جدول ۵ نیز مشخص است که طراحی‌های شماره ۳، ۶ و ۹ بیشترین میزان کاهش نویز را بواسطه داشتن زاویه فلپ ۳۰ درجه داشته‌اند. این بدان معناست که با افزایش زاویه فلپ، سطح نویز تولیدی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. میانگین نسبت سیگنال به نویز سطوح پارامترها نسبت به نویز تولیدی برای پروانه CLT

جدول ۶. مقایسه عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه طراحی شده با استفاده از بهینه‌سازی تاگوچی

پارامتر مورد بررسی	پروانه مرجع	طراحی بهینه
فرکانس اول (Hz)	۹۰/۱	۹۴/۵
شدت صوت SPL (dB)	۱۰۰/۳	۹۸/۴
بهبود SPL (%)	-	-۱/۹
فرکانس اول (Hz)	۱۸۰/۲	۱۸۸/۷
شدت صوت SPL (dB)	۹۰/۶	۸۹/۱
بهبود SPL (%)	-	-۱/۶۵

با بررسی نتایج بدست آمده، بهینه‌ترین هندسه طراحی بر اساس تاگوچی بدست آمد که سبب کاهش نویز به میزان ۱/۹ درصد در فرکانس عبوری پره اول و ۱/۶۵ درصد در

از میان سه پارامتر دیگر، بهینه‌ترین سطوح برای حالت هندسه‌ای که ممکن است کم‌ترین نویز تولیدی را داشته باشند با توجه به بزرگ‌ترین میانگین نسبت سیگنال به نویز سطح هر پارامتر تعیین می‌شود.

نمودار فوق نشان می‌دهد از میان سه پارامتر هندسی باقی مانده، وضعیت کاهش نویز در انقباض صفحه ۰/۹۴ اندکی از انقباض صفحه ۰/۹۲ بهتر است. همچنین وضعیت پارامتر کشیدگی صفحه ۱/۰۵ به میزان بسیار اندکی از ۱ مناسب‌تر بوده و زاویه برش صفحه ۳۵ درجه نیز از منظر کاهش نویز از زاویه برش صفحه ۴۰ درجه‌ای مناسب‌تر است. بنابراین روش تاگوچی پیشنهاد می‌کند که پروانه‌ای که دارای انقباض صفحه ۰/۹۴، زاویه فلپ ۳۰ درجه، کشیدگی صفحه ۱/۰۵ و زاویه برش صفحه ۳۵ درجه باشد، احتمالاً دارای کم‌ترین نویز تولیدی است.

بنابراین در ادامه پژوهش از بررسی نسبت سیگنال به نویز خروجی نویز تولیدی پروانه، حالت هندسی گفته شده به عنوان بهینه، بررسی می‌شود. در جدول ۶ نتایج عملکرد هیدروآکوستیکی پروانه مرجع با پروانه بهینه طراحی شده با استفاده از بهینه‌سازی تاگوچی ارائه شده است.

فرکانس عبوری پره دوم نسبت به پروانه مرجع شده است. شکل ۱۳ نمایی از پروانه نهایی CLT را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. نمایی از پروانه نهایی CLT بهینه شده

پروانه CLT پرداخته شد. پس از تعیین پارامترهای چهارگانه انقباض صفحه، زاویه فلپ، کشیدگی صفحه و زاویه برش صفحه در پروانه، ۹ حالت طراحی پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی در شرایط یکسان مورد ارزیابی عملکرد هیدروآکوستیکی قرار گرفته و میزان سطح فشار صوت آن‌ها در فرکانس پره اول و دوم استخراج شد. در ادامه به منظور یافتن سطوح بهینه نسبت به نویز تولیدی، مشخص گردید که زاویه فلپ بیشترین تأثیر را در کاهش سطح نویز دارد به طوری که سطح فشار صوت در سه پروانه‌ای که در زاویه فلپ ۳۰ درجه طراحی شدند، کمترین میزان بوده است. همچنین مشخص شد که هرگونه تغییر در وینگلت پره، موجب کاهش سطح نویز نمی‌شود بلکه در اثر بهینه‌سازی پارامترهای هندسی می‌توان به سطح نویز پایین‌تر رسید. در نهایت با تعیین بهینه‌ترین حالت طراحی از میان چهار پارامتر مورد بررسی، پروانه CLT در فرکانس اول پره به میزان ۱/۶۵ درصد و در فرکانس عبوری پره دوم به میزان ۱/۶۵ درصد کاهش نویز نسبت به پروانه مرجع پیدا کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بهینه‌سازی طراحی یک نمونه پروانه دریایی مغروق با هدف کاهش سطح نویز آن بواسطه ایجاد تغییرات هندسی بر روی وینگلت پره‌ها و تبدیل آن به یک

۶. منابع

- [1] Bagheri, Mohammad Reza., Seif, Mohammad Saeid. & Mahdigholi, Hamid., "Marine propeller noise measurement in a cavitation tunnel.". *Journal of Vibration and Sound* 3, no. 5 (2014): 28-39.
- [2] Alizadeh, Valiollah, Madjid Abbaspour, Afshin Mohseni Arasteh, Kamran Lari, and Masoud Torabi Azad. "Numerical solution and experimental investigation for hydro-acoustic analysis and noise reduction assessment of ship ducted propeller." *Heliyon* 10, no. 8 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29632>
- [3] Bagheri, Ali, and Mohammad Reza Najafi. "Acoustic analysis of modern propellerless subsurface propulsion: a review of performance and noise." *Journal of Vibration and Sound* 14, no. 27 (2025): 174-202.
- [4] Wen, Hao, Wei Zhao, Yijun Mao, Jingzhou Zeng, Haocheng Yu, and Jianguo Zheng. "Numerical investigation of noise reduction of a pump-jet propulsor using porous metal." *Ocean Engineering* 314 (2024): 119736. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119736>
- [5] Elhami, M. Reza, Mohammad Reza Najafi, and Mohammad Tashakori Bafghi. "Vibration analysis and numerical simulation of fluid-structure interaction phenomenon on a turbine blade." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43, no. 5 (2021): 245. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02933-6>

- [6] Leaper, Russell, Martin Renilson, and Conor Ryan. "Reducing underwater noise from large commercial ships: current status and future directions." *Journal of Ocean Technology* 9, no. 1 (2014): 51.
- [7] Gennaro, Giulio, and Juan Gonzalez-Adalid. "Improving the propulsion efficiency by means of contracted and loaded tip (CLT) propellers." *Soc. Nav. Archit. Mar. Eng* (2012).
- [8] Wang, Chao, Peng Li, Chunyu Guo, Lianzhou Wang, and Shuai Sun. "Numerical research on the instabilities of CLT propeller wake." *Ocean Engineering* 243 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110305>
- [9] S. Ianniello, R. Muscari, and A. Di Mascio, "Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy, part III: Measurements versus numerical predictions on a full-scale ship," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 125–142, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s00773-013-0228-z>.
- [10] Gaggero, Stefano, Juan Gonzalez-Adalid, and Mariano Perez Sobrino. "Design and analysis of a new generation of CLT propellers." *Applied Ocean Research* 59 (2016): 424-450. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.06.014>.
- [11] Gaggero, Stefano, Juan Gonzalez-Adalid, and Mariano Perez Sobrino. "Design of contracted and tip loaded propellers by using boundary element methods and optimization algorithms." *Applied Ocean Research* 55 (2016): 102-129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.12.004>.
- [12] Yilmaz, Naz, Mehmet Atlar, and Mahdi Khorasanchi. "An improved Mesh Adaption and Refinement approach to Cavitation Simulation (MARCS) of propellers." *Ocean Engineering* 171 (2019): 139-150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.11.001>
- [13] Wang, You-jiang, Long Yu, and Moustafa Abdel-Maksoud. "A literature review of unconventional marine propellers in hydrodynamics." *China Ocean Engineering* (2026): 1-21. <https://doi.org/10.1007/s13344-026-0055-8>
- [14] Gonzalez-Adalid, J., M. Perez Sobrino, A. Garcia Gomez, G. Gennaro, Stefano Gaggero, Michele Viviani, and A. Sanchez-Caja. "Comparison of different scaling methods for model tests with CLT propellers." In *11th International Conference on Hydrodynamics [ICHHD]*. 2014.
- [15] Posa, Antonio. "The dynamics of the tip vortices shed by a tip-loaded propeller with winglets." *Journal of Fluid Mechanics* 951 (2022): A25. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.852>
- [16] Wang, Chao, Peng Li, Yang Han, and Lei Hao. "The study on the wake of a CLT propeller under different advance coefficients." *Applied Ocean Research* 118 (2022): 102996. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102996>
- [17] Gaggero, Stefano, and Marco Ferrando. "Wake instabilities of tip-loaded propellers: Comparison between CLT and "new generation" CLT configurations." *Journal of Marine Science and Engineering* 11, no. 1 (2023): 112. <https://doi.org/10.3390/jmse11010112>
- [18] Zhao, Yu, Chao Wang, Cong Sun, Yi-Ming Hu, Hao-Yu Liu, and Min Liu. "A Comparative Numerical Study of Hydrodynamic and Acoustic Performance Between Contracted and Loaded Tip Pump-Jet and Conventional Pump-Jet." *Journal of Marine Science and Engineering* 14, no. 17 (2026): 1631. <https://doi.org/10.3390/jmse14171631>

- [19] Najafi, Mohammad Reza. "Hydroacoustic and hydrodynamic optimization of a high skew marine propeller." *Journal Of Marine Engineering* 21, no. 46 (2025): 44-57. <http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.4>
- [20] M. Renilson, *Submarine Hydrodynamics*, 2nd ed. Springer International Publishing, 2018. doi: <https://doi.org/10.3723/ut.33.137>.
- [21] Bagheri, Mohammad Reza, Mohammad Saeed Seif, Hamid Mehdigholi, and Omar Yaakob. "Analysis of noise behaviour for marine propellers under cavitating and non-cavitating conditions." *Ships and Offshore Structures* 12, no. 1 (2017): 1-8. doi: <https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1099224>.
- [22] Sumnu, Ahmet, Veysel Erol, and Yuksel Eraslan. "Aeroacoustic optimization of a UAV propeller using the Taguchi method." *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 98, no. 1 (2026): 85-93.

پی نوشت:

¹ Contracted and Loaded Tip, CLT

² Winglet

³ Plate Contraction

⁴ Flap Angle

⁵ Plate Elongation

⁶ Plate Cutting Angle

⁷ Taguchi method

⁸ Thrust coefficient

⁹ Vortex

¹⁰ Turbulence

¹¹ Large Eddy Simulation, LES

¹² Skew

¹³ Suboff Subsurface Model

¹⁴ David Taylor Model Basin

¹⁵ Chord

¹⁶ Minitab