

گروه صنایع دریایی High Speed Crafts Engineering

دوفصلنامه علمی دانشکده علوم و فنون شناوری
جواد الائمه (ع) نیروی دریایی سپاه

سال ۲۲ ، شماره ۶۲
بهار و تابستان ۱۴۰۲

دارای رتبه علمی از وزارت علوم، تحقیقات و فنآوری
با مجوز شماره ۶۴۸۲۷ / ۱۸ / ۳ / مورخ ۰۶ / ۰۴ / ۱۳۹۴
شماره شاپا: ۳۶۶۸-۲۴۲۳

صاحب امتیاز:

دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)
دانشکده علوم و فنون شناوری جواد الائمه (ع) نیروی دریایی سپاه

مدیر مسؤول:

کاووس بورکی

سر دبیر:

دکتر محمود سالاری؛ استاد دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مشاور سردبیر:

دکتر امین نجفی

ویراستار ادبی:

ابوذر حاجی زاده

هیئت تحریریه:

دکتر حسن قاسمی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمدرضا خدمتی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر علیرضا بیات؛ استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

دکتر یوسف ترابی گلسفید؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر عباسعلی سلمانی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر محمدجواد کتابداری؛ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر عباس وفایی صفت؛ دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

دکتر محسن شاهرضایی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

دکتر عباس دشتی منش؛ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس

مدیر اجرایی:

محمد مرادی

طراحی و صفحه آرایی:

سید محمدباقر موسوی

نشانی: گیلان - رشت - زیباکنار - دانشگاه دریایی امام خاينه ای (مدفله العالی)

معاونت پژوهش

تلفن: ۳۳۱۴۹۱۷۴ - ۳۳۱۴۹۱۶۳ - ۰۱۳ و ۰۹۱۰۵۹۱۶۰۹

کد پستی: ۴۳۴۹۱۶۳۴۳۹

پست الکترونیک: daryainfo@gmail.com

فهرست:

- ۳ مروری بر طراحی کولار در شناورهای RIB جستجو و نجات / امید زیار، سعید جامعی
- ۱۳ تحلیل تجربی گسیختگی در مواد مرکب تک جهته پلیمری با وجود اتصالات مکانیکی / محمد مهدی عطار، احسان یاری، محمد حسین قائدشرف، وحید آئینی
- ۲۴ بهبود محدوده کلیدزنی نرم (ZVS) در شارژر بدون سیم، با قابلیت استفاده در سامانه‌های زیر سطحی / محمد هادی زاده، رضا حق مرام، ابوالفضل نصیری، حسین ملایی
- بررسی پسای اصطکاکی در سکان مدل مجهز به میکروریبلت دندان‌های با مقطع NACA0025 با استفاده از شبیه‌سازی عددی / غلامرضا صالحی، پویان ادیبی، سعید نیازی، طالب زارعی
- ۴۶ بررسی عوامل مؤثر بر انتشار لیزرهای پرانرژی در محیط‌های دریایی / محمودرضا عباسی
- بررسی روش‌های جبران سازی انتقال توان بی‌سیم در حالت نیمه دینامیک و انتخاب فاصله هوایی مناسب با قابلیت استفاده در سامانه‌های زیر سطحی / سعید ریاحی، رضا حق مرام، ابوالفضل نصیری
- ۵۲ تحلیل عددی تأثیر طول کورد هیدروفویل استاتور بر عملکرد هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپ جت استاتور-روتور / محمد حسین قائدشرف، احسان یاری، مجتبی دهقان منشادی
- ۶۳ شناسایی تهدیدهای نوین جنگ الکترونیک در حوزه دریایی با تکیه بر هوش مصنوعی و داده‌کاوی / سیدرضا شرفی نژاد، محمودرضا رضوی زاده
- ۷۴ الگوی نگارش مقاله / ۸۴

مروری بر طراحی کولار در شناورهای RIB جستجو و نجات

امید زیار^۱، سعید جامعی^۲

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس omid.ziyar@mehr.pgu.ac.ir

۲- استادیار، مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس jaameisa@pgu.ac.ir

* نویسنده مسئول: jaameisa@pgu.ac.ir

چکیده:

توسعه شناورهای پروازی موجب دستیابی به کارایی مناسب‌تری در شرایط مختلف عملیاتی‌های دریایی شده است. از سویی دیگر بهینه‌سازی و طراحی فرم بدنه‌های جدید بطور مداوم مورد توجه پژوهشگران، طراحان و مهندسان در صنایع دریایی بوده است. در این بین، شناورهای RIB^۱ یک طراحی خاص و منحصر به فرد از شناورهای پروازی است. شناورهای RIB در مقایسه با دیگر بدنه‌های پروازی، پایداری و بویانسی بهتری دارند و در جذب بارهای ضربه‌ای نیز بهتر عمل می‌کنند. همچنین این نوع شناورها در ایمن‌سازی و کاهش ریسک، عملکرد مناسبی دارند. مهمترین بخش در شناورهای RIB کولار می‌باشد. کولارها مانند یک کمک فتر بزرگ بوده و در حوادث دریایی مانند یک حصار عمل می‌کنند. در مقاله حاضر به چگونگی طراحی کولارها پرداخته می‌شود و جزییات مربوط به جنس، مقاطع و همچنین اتصالات آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ در ادامه محاسبات مربوط به شناور مورد مطالعه، ارائه می‌گردد. در نهایت با بررسی موضوع مورد بحث، می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که وجود کولار در شناورهای تندرو بدنه پروازی اجتناب ناپذیر و بسیار با اهمیت است.

واژه‌های کلیدی:

شناورهای پروازی، شناورهای RIB، کولار، بویانسی

Review of Collar design in RIB Search and Rescue Boats

Omid Ziar¹, Saeed Jaamei²

^{1,2} Department of Marine Engineering, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Islamic Republic of Iran

ABSTRACT:

Development of planing boats has led to the achievement of proper performance in the various conditions. On the other hand, optimization and design of new body shapes has been considered by researchers. In between, Rigid Inflatable Boats (RIB) are a special and unique design of planing boats. Rigid Inflatable Boats (RIB) and Rescue Boats have better stability and buoyancy than other planing hulls and also perform better in absorbing impact loads. Also, this type of boat performs well in securing and reducing risk. The most important part of RIB vessels is the collar. Collars are like huge shock absorbers and act like a fence in marine accidents. In the present article, the complete design of the collars is discussed and the details related to the material, sections, as well as connections are examined, and then all the calculations related to the studied boat are performed. Finally, by examining the topic under discussion, it can be concluded that the presence of Collar in RIB Boats is inevitable and very important.

Keywords:

Planing Boat, RIB Boat, Collar, Buoyancy

¹Rigid Inflatable Boat

۱ - مقدمه

شناور گشت دریایی به دلیل وجود باد، امواج و نیروهای وارد شده به بدنه شرایط سخت و ناخوشایندی برای خدمه ایجاد می‌کند. از این رو اضافه شدن شناورهای RIB به بخش گشت دریایی و امداد و نجات به دلیل ویژگی‌های متنوع و منحصر به فرد این شناورها در ایمن سازی و کاهش ریسک مفید است و به خصوص در شرایطی که شناورها بطور مداوم در تماس با کشتی‌های دیگر هستند شرایطی ایمن را مهیا می‌کند. شناورهای RIB معمولاً با بدنه‌ای از جنس آلومینیوم دریایی (که چگالی کمتری از فولادها و ضریب پذیری مناسبتر نسبت به مواد کامپوزیت دارد) ساخته می‌شوند که در لبه بالایی این شناور کولار^۲ قرار می‌گیرد. بخش‌های داخلی کولارها می‌تواند کاملاً از هوا پر باشد و یا از ترکیب فوم و هوا تشکیل شود. ساختار مقطع آن بصورت D می‌باشد که فضای داخلی بیشتری در شناور جهت جانمایی مناسب وجود داشته باشد. البته نمونه های مقطع گرد آنها نیز به دلیل ایجاد بویانسی بیشتر، کاربرد فراوان دارد. کولارها مانند یک کمک فتر بزرگ بوده و در حوادث دریایی مانند یک حصار عمل می‌کنند. همچنین با وجود این لوله‌های توپر لاستیکی انعطاف‌پذیر، ورود و خروج از شناور راحت‌تر انجام می‌گیرد. شناورهای RIB در مقایسه با دیگر انواع بدنه‌های تندرو، پایداری و بویانسی^۳ بهتری دارند و همچنین این بدنه‌ها در جذب بارهای ضربه‌ای بهتر عمل می‌کنند. با استفاده از این شناورها می‌توان بدون وارد آمدن نیروی اضافه به افراد درون شناور و خدمه، در شرایط دریایی بحرانی با سرعت بالاتری حرکت کرد. همچنین در این بدنه، وجود همزمان مقطع V شکل و کولار، شرایط مناسب برای استراحت افراد درون شناور در آب آرام به شکل مناسب‌تری فراهم می‌شود. استفاده از کولارها در شناورهای امداد و نجات علاوه بر کاهش ورود آب به عرشه می‌تواند سبب افزایش پایداری در شرایط دریایی متفاوت نیز گردد. در صورت از بین رفتن

تعداد و واژگونی^۴ شناور، با افزایش بویانسی و نیروی رو به بالا^۵ که توسط هوای درون کولار ایجاد شده، سبب برگشت شناور به حالت تعادل می‌گردد.

اگر چه در ابتدا کولارها برای بهبود وضعیت استاتیکی شناور معرفی گردید ولی در ادامه تأثیرات آن روی حرکت و پایداری شناور، نشان از مفید بودن آن در بهبود عملکرد دینامیکی شناور داشت. از این رو با جذب بارهای ضربه‌ای حرکات روان در امواج را فراهم می‌آورد که با کاهش ارتعاشات وارد بر بدنه سبب می‌شود افراد حاضر در شناور کمتر در معرض آسیب‌های وارده از طرف بدنه قرار گیرند. تنها نکته منفی در این شناورها، نگرانی بابت نیاز به تورم و باد شدگی مجدد کولارها و همچنین سوراخ شدن کولار می‌باشد ولی با بروزرسانی امکانات و جنس‌های مورد استفاده در ساخت، عمر کولارها به ۱۰ تا ۱۵ سال می‌رسد که از این رو بسیار مناسب به حساب می‌آیند.

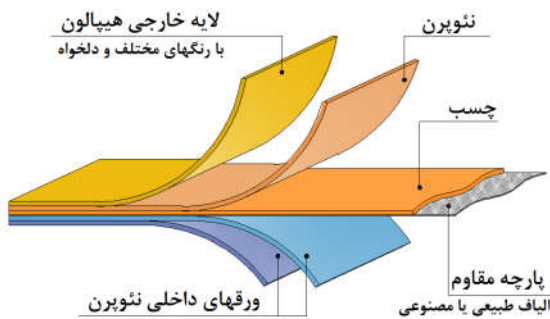
اولین پیشرفت در زمینه شناورهای RIB در سال ۱۹۶۲ در کالج اتلانتیک آغاز شد. پس از آن در سال ۱۹۶۳ این شناورها با چسباندن کولار به کف سفت گسترش یافت [1]. اولین قایق نجات مدل RIB در سال ۱۹۷۲ شروع به کار کرد [2]. کولارها بخش ویژه‌ای از شناورهای RIB را تشکیل می‌دهد که در ابتدا به منظور ایجاد ثبات شرایط استاتیکی مورد استفاده قرار گرفت اما مشخص شد که تأثیر زیادی در بهبود ویژگی‌های دریامانی شناور نیز دارد [3]. همچنین کولارها با جلوگیری از ورود آب به شناور، پایداری شناور را در حرکت با سرعت کم و یا بدون حرکت افزایش می‌دهد همچنین کولارها با جذب بارهای ضربه‌ای امکان سواری نرم تر در موج را نیز فراهم می‌آورد [4]. کولار به عنوان حایل عمل می‌کند و از آسیب به سازه جلوگیری می‌کند همچنین از جان افراد روی عرشه محافظت می‌کند [5]. علاوه بر این سرنشینان وسایل نقلیه پر سرعت دریایی از جمله شناورهای RIB به دلیل رفتار غیر خطی در معرض آسیب‌های فیزیکی و روحی قرار می‌گیرند [6].

²Collar

³Buoyancy

⁴Capsize

⁵Lift



شکل ۱- لایه های تشکیل دهنده هیپالون

۲-۱-۲- پلی وینیل کلراید

PVC در حالت ساده یک ماده انعطاف پذیر نیست و به افزودنی نیاز دارد تا بتواند آن را انعطاف پذیر کرد و از آن به عنوان روکش پارچه پایه استفاده کنند. در بین مواد حاضر PVC به عنوان ارزان ترین ماده برای تولید است و می توان آن را با استفاده از جوش یا چسب متصل کرد. کولارهای ساخته شده از این رنگ، براق هستند. پارچه های قابل تورم ساخته شده از این جنس وزن کمی دارند و از این رو در ساخت شناورهای تفریحی کاربرد دارند. یک مزیت PVC قابل جوش بودن است که درحالی که پارچه های هیپالون میبایست با چسب به هم متصل شوند. اما به دلیل عدم مقاومت در برابر تابش طولانی مدت اشعه ماوراء بنفش و مواد شیمیایی، معمولاً در شناورهای RIB بزرگ که بیشتر در معرض نور خورشید هستند مورد استفاده قرار نمی گیرند.

جدول ۱- مقایسه ویژگی های هیپالون و PVC

ویژگی ها	پی وی سی	هیپالون
مقاومت UV	بالا	خیلی بالا
مقاومت حرارت	متوسط	خیلی بالا
مقاومت شیمیایی	متوسط	خیلی بالا
طول عمر	بیش از ده سال	بیش از سی سال
قیمت	متوسط	۲۰ تا ۶۰ درصد بیشتر

۲-۱-۳- Elvaloy

این ماده از مقاومت بالایی در برابر سایش برخوردار است و ثبات رنگ عالی و خواص کلی خوبی داراست. این نوع پارچه قابل جوشکاری و چسباندن است. همچنین در جذب اشعه های فرابنفش شبیه به هیپالون عمل می کند.

کاربران این نوع شناورها عبارتند از ارتش بسیاری از کشورها، گاردهای ساحلی، سازمان های گمرک و شیلات، سازمان ها مرتبط با عملیات نجات، شرکت های نفتی و خدمات اضطراری [7].

۲- طراحی کولار

یکی از مهمترین بخش ها در شناورهای RIB طراحی کولار می باشد. بدین منظور می بایست جزئیات مربوط به جنس، طراحی مقاطع و همچنین اتصالات کولار مورد بررسی قرار گیرد که در ادامه به آن پرداخته می شود.

۲-۱- جنس کولار

برای ساخت کولار در شناورهای RIB ابتدا لازم است از مواد مورد استفاده در آن آگاهی داشته باشید تا متناسب با نوع و کاربرد شناور بهترین جنس انتخاب گردد. ویژگی های انواع مختلف پارچه امکان انتخاب گسترده محصول و عملکرد را فراهم می کند. به طور معمول در ساخت کولار از چهار جنس: پلی اتیلن کلرو سولفون شده^۶، پلی وینیل کلراید^۸، الولی^۹ و فوم روکشدار^۸ استفاده می شود [8].

۲-۱-۱- پلی اتیلن کلرو سولفون شده (هیپالون)

یک پوشش لاستیک مصنوعی است که بر اساس پلی اتیلن ساخته شده است. این ماده می تواند تا ۲۰ سال دوام داشته باشد. لایه های هاپیلون به صورت هم پوشانی به هم متصل هستند. این ماده برای استفاده مداوم تا دمای ۱۳۰ درجه سانتیگراد مناسب است. هیپالون با توجه به مقاومت بالایی که در برابر شرایط جوی و همچنین مواد شیمیایی دارند. همچنین با توجه به راحت بودن فرآیند تعمیر و نگهداری ماده ای مناسب برای ساخت کولار می باشد. مطابق شکل (۱) هیپالون روی قسمت بیرونی پارچه مالیده می شود و مقاومت در برابر اشعه فرابنفش و همچنین سایش را فراهم می کند و از داخل نیز با ماده نئوپرن پوشانده می شود تا استحکام بالایی را به پارچه بخشد.

^۸Elvaloy

^۹West Coated Foam

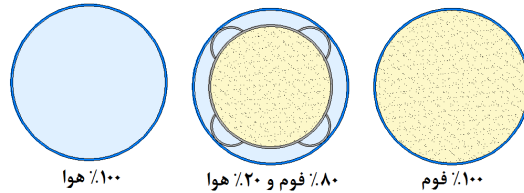
^۶Hypalon

^۷PVC

با این حال، هزینه اولیه پارچه در حال حاضر بالاتر از گزینه های دیگر است اگرچه ممکن است با گذشت زمان فضای رقابتی ایجاد کند.

۴-۱-۲- فوم روکش دار

در این ماده فوم با استفاده از ماده پلی اورتان (PU) و با حالت انعطاف پذیر پوشانده می شود. این نوع از پارچه شناوری به اندازه کولارهای بادی ساخته شده بدون امکان سوراخ شدن و افت فشار را دارد. پلی اورتان نسبت به پی وی سی و هیپالون از مقاومت و استحکام بالاتری برخوردار است.



شکل ۲- شماتیک مقطع پوشانده شده با فوم روکش دار [9]

در جدول زیر کارایی کولار با جنس های متفاوت در شناورهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است:

جدول ۲- مقایسه کارایی جنس های متفاوت در ساخت کولار

فوم روکشدار	Evaloy	هیپالون	پی وی سی	
n/a	***	**	**	قایق های ورزشی تاشو
**	***	***	**	شناورهای تندرو RIB
**	***	***	**	شناورهای ورزشی RIB
***	**	**	*	شناورهای عملیاتی RIB

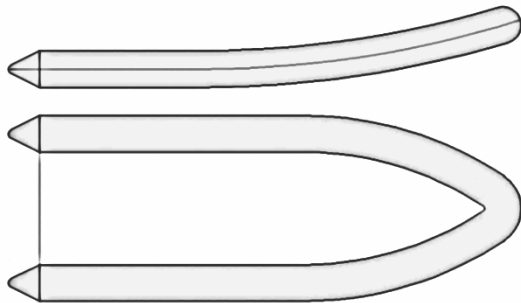
۲-۲- مقاطع

در حال حاضر برای طراحی کولار از چند نوع مقطع مختلف استفاده می کنند که براساس نوع کارایی شناور این مقاطع قابل تغییر می باشند. در طراحی می بایست به ویژگی های مورد نظر توجه بسیاری نمود. در فرآیند تولید نهایی کولارها نیاز مبرم به تجزیه و تحلیل می باشد زیرا که مواد مورد استفاده دارای ویژگی های منحصر به فرد هستند و

باید اطمینان کامل از فرآیند طراحی و تولید حاصل گردد. مقاطع در طراحی کولار انواع متفاوتی دارد که وابسته به نیاز می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۱-۲-۲- طراحی منحنی^۱

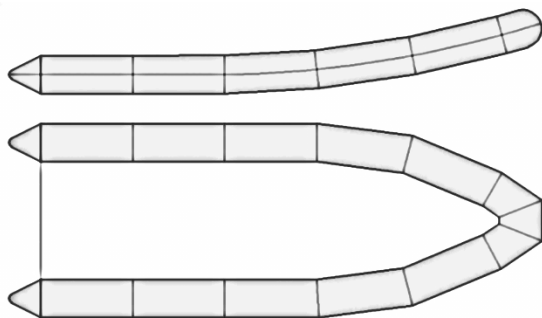
یکی از شایع ترین طراحی های موجود می باشد. طراحی شامل شکل دقیق لوله می باشد که بعد از اتصال کولار به بدنه شناور هیچ گونه خمیدگی در لوله نباشد. همچنین در طراحی هیچ گونه کاهش قطری از پاشنه تا دماغه اتفاق نمی افتد که این کار مستلزم مهارت در طراحی با در نظر گرفتن خاصیت ارتجاعی مواد است. طراحی کولار به حداقل در اتصالات نیاز دارد که سبب می شود کولار نرم و براق به نظر برسد.



شکل ۳- مقطع با طراحی منحنی

۲-۲-۲- طراحی چند بخشی^{۱۱}

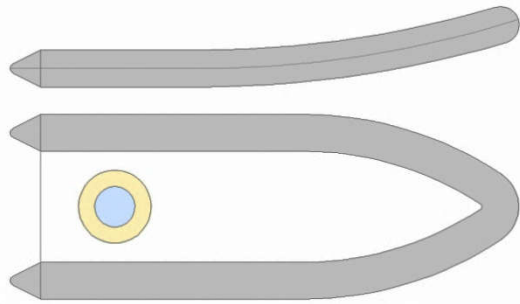
یک سبک طراحی قدیمی است که قبل از مشهور شدن طراحی منحنی مورد استفاده قرار می گرفت. با این حال این سبک از طراحی کولار هنوز در شناورهای RIB تجاری مورد استفاده قرار می گیرد. همانطور که از نام آن پیداست؛ کولار از بسیاری از قسمتهای کوچکتر و مستقیم تشکیل شده است که در قسمت خارجی به هم وصل می شوند.



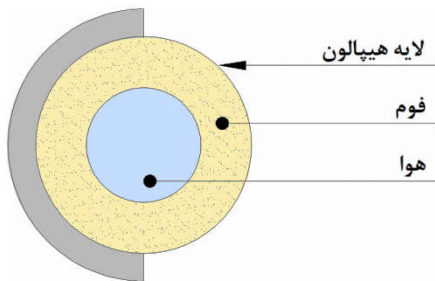
شکل ۴- مقطع چند بخشی

^۱Sectional Design

^{۱۱}Curve Design



شکل ۷- مقطع با طراحی O شکل



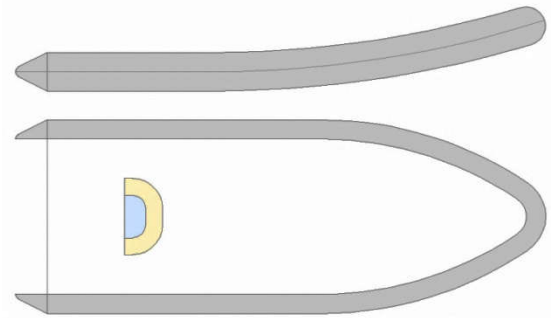
شکل ۸- مقطع فوم توپر

۲-۳- اتصالات

یکی از مهمترین نکات که در طراحی و ساخت کولار می-بایست مورد توجه قرار گیرد؛ اتصالات و نوع آن ها می باشد. اتصالات باید به گونه‌ای باشد که بیشترین استحکام را داشته باشد و همچنین از لحاظ عملیاتی نیز مقرون به صرفه باشد. در بخش هایی که نیاز به تعویض و تعمیر بیشتر می‌باشد باید از اتصالاتی استفاده کرد که بتوان به راحتی آن را باز و بسته کرد. ماده و جنس مورد استفاده در ساخت شناورها اغلب روش ساخت و ساز را نیز تعیین می‌کند. شناورهایی که از جنس هیپالون ساخته می‌شوند برای اتصال از چسب‌ها و نوارها استفاده می‌کنند در حالیکه در جنس های PVC و TPU با چسب و جوش قابلیت اتصال و مونتاژ دارند. بعضی از سازندگان شناورهای RIB با استفاده از طناب ها کولار را به بدنه متصل می‌کنند. برای این کار از ترکیب طناب و پارچه استفاده می‌شود که با استفاده از یک چسب دو قسمتی به هم متصل می‌شوند. ریل با حالت کشویی روی بدنه قرار می‌گیرد. تیوب ها با دقت بالا علامت گذاری می‌شوند و یک لایه چسب روی آن کشیده می‌شود. بعد از قراردادن کولار روی بدنه لایه دوم چسب نیز اعمال می‌شود تا کاملاً به هم متصل شوند.

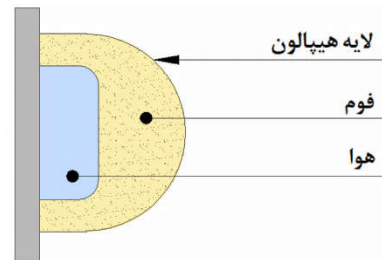
۲-۲-۳- مقطع D شکل

این سبک طراحی می‌تواند برای افزایش و تقویت تیر داخلی مفید باشد. این مقطع می‌تواند به صورت کاملاً انعطاف پذیر و قابل تورم ساخته شود. همچنین این نوع از مقطع فضای کمتری از بدنه اصلی را اشغال می‌کند.



شکل ۵- مقطع با طراحی D شکل

در ساخت کولار می‌توان صددرصد از فوم و یا ترکیبی از فوم و هوا استفاده کرد.



شکل ۶- مقطع D شکل ترکیبی از فوم و هوا

۲-۲-۴- مقطع فوم توپر^{۱۲}

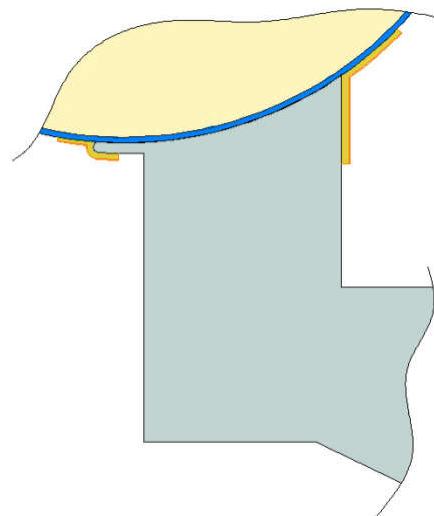
زمانی که شناور در معرض خطرهای بزرگ باشد (مانند عملیات‌های دریایی در شرایط طوفانی) کولار از تیوب‌های پوشیده شده از فوم ساخته می‌شود. معمولاً این ساختار در شناورهایی که به طور معمول با دیگر شناورها در ارتباط و اتصال هستند (عملیات نجات و کمک به شناورهای دیگر) مورد استفاده قرار می‌گیرد. کولار به گونه‌ای است که در بخش داخلی یک لوله‌ی لاستیکی قابل تورم قرار دارد و روی آن لایه‌ای از فوم پیچیده شده که ناحیه خارجی آن را لایه‌ای از هیپالون پوشش می‌دهد.

^{۱۲}Foam Filled

۱-۳-۲- چسب‌ها^{۱۳}

یکی از متداول‌ترین راه‌های اتصال کولار به بدنه شناورهای RIB استفاده از چسب است. این روش اتصال پایدار و بدون سایش تدریجی ناشی از حرکت مداوم بین کولار و بدنه RIB را فراهم می‌کند.

روش فوق از اولین روش‌های مورد استفاده در چسباندن کولار به بدنه بود که همچنان به صورت گسترده در این صنعت استفاده می‌شود. این روش در همه جنس‌های مورد استفاده کولار کاربرد دارد ولی کاربرد اصلی آن برای جنس هیپالون است. برای ایجاد یک باند محکم باید چسب در منفذ پارچه نفوذ کند. ابتدا می‌بایست نقاط مورد نظر علامت گذاری شود و سپس به هر دو طرف پارچه چسب زده شود. درزهای PVC و TPU همچنین می‌توانند از طریق چسب متصل شوند. چسب مورد استفاده در این موارد شبیه به اتصالات مکانیکی عمل می‌کند. زمانی که چسب به صورت مایع است به درون منافذ پارچه نفوذ می‌کند و بعد از خشک شدن پیوند محکمی را ایجاد می‌کند. مهمترین مشکل این چسب‌ها کیفیت آن‌ها می‌باشد. استحکام و چسبندگی این چسب‌ها به کیفیت نوع چسب و تلاش برای چسباندن آن است ولی به مرور زمان با قرارگیری در معرض اشعه ماورا بنفش استحکام چسب به آرامی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که چسب‌ها معمولاً زودتر از پارچه کولار خراب می‌شوند.



شکل ۹- اتصال توسط چسب

۲-۳-۲- جوشکاری با فرکانس بالا

جوشکاری با فرکانس بالا یا رادیو فرکانس از دهه ۱۹۴۰ میلادی شروع شده است و فن آوری پایه ای بود که منجر به توسعه جوشکاری هوای گرم می‌شود. این نوع جوش از میدان الکترومغناطیسی استفاده می‌کند تا دو پارچه را با هم ذوب کند. این عمل با بستن دو پارچه بین دو الکترود فلزی مسطح که ولتاژ فرکانس بالایی دارند اعمال می‌شود. این مولکول‌های موجود در پارچه را مجبور به لرزش در سرعت‌های زیاد می‌کند و گرمای شدید ایجاد می‌کند و باعث می‌شود که پارچه‌ها در هم فشرده شوند و به هم بپیوندند. جوشکاری با فرکانس بالا به جای گرم کردن قسمت سطحی پارچه، پارچه را از داخل گرم می‌کند. این فرایند فقط چند ثانیه طول می‌کشد و مانند میکروویو عمل می‌کند. راه اندازی این ماشین‌ها بسیار طولانی‌تر از سایر فرایندها به طول می‌انجامد. برای ایجاد یک محصول به چندین ماشین در اندازه‌های مختلف نیاز است که به طور قابل توجهی هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد. این درزها نسبت به درزهای جوش داده شده با هوای گرم ضعیف‌تر و از نظر زیبایی نیز در سطح پایین‌تری هستند.

۳-۳-۲- جوشکاری با هوای گرم

جدیدترین پیشرفت در ساخت و سازهای شناور RIB، جوشکاری هوای گرم نام دارد. این روش شامل گرم کردن دو طرف مواد تا درجه حرارت بالا تا زمانی که شروع به ذوب شدن کنند. سپس دو طرف به طور محکم با یک ماشین به هم فشرده می‌شوند و دو ورقه PVC جداگانه را به هم می‌چسبانند تا یک پیوند قدرتمند و مطمئن ایجاد شود. با توجه به ساختار CSM، استفاده از جوشکاری برای اتصال مواد به یکدیگر غیرممکن است؛ این روش فقط برای PVC و TPU کاربرد دارد.

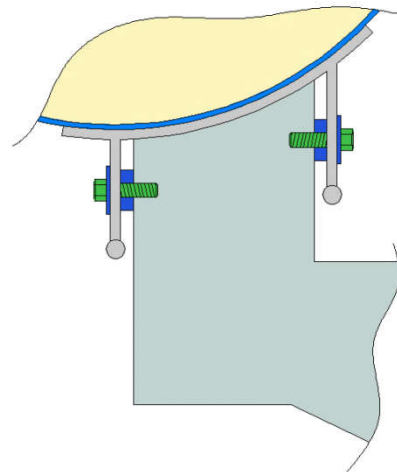
فرآیند جوشکاری با هوای گرم به ساده‌سازی روند ساخت شناورهای RIB کمک می‌کند. این امر در PVC بدون استفاده از چسب، خاصیت مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش افزایش می‌دهد. بنابراین کاهش نقص و کاهش هزینه برای مصرف‌کننده را در بر دارد. این نوع جوش حرارتی درز بسیار قوی‌ای ارائه می‌دهد که از کیفیت درزهای چسبده فراتر می‌رود. درزهای ساخته شده توسط جوشکاری هوای گرم کمترین میزان نقص کلی را

^{۱۳}Adhesives

ایجاد می کنند و با هزینه کمتری محصولی با کیفیت بالاتر ایجاد می کنند.

۲-۳-۴- اتصالات مکانیکی

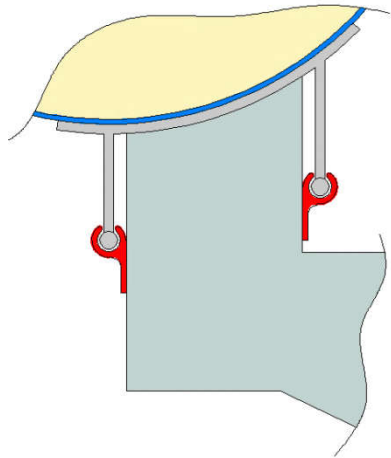
اتصالات مکانیکی در کولارها معمولاً در جاهایی استفاده می شود که به دفعات متعدد نیاز به تعویض یا برداشتن داشته باشد. از این نوع اتصال، بیشتر در قایق های سنگین، تجاری و نظامی استفاده می شود. طراحی و ساخت کولارها می تواند بدون چسب نیز انجام شود ولی قبل از آن می بایست اتصالات مکانیکی برای چسباندن تهیه و نصب شود.



شکل ۱۰- اتصال مکانیکی

۲-۳-۵- اتصالات کشویی

در این روش از یک سیستم کشویی استفاده می شود که قابلیت تغییر کولار در کمترین زمان ممکن را دارد. این اتصالات بیشتر در شناورهای با عملیات سنگین^{۱۴} و همچنین شناورهای نظامی مورد استفاده قرار می گیرد که نیاز به حذف و تعویض مکرر کولار است. در این روش با استفاده از پیچ و مهره و طناب که در طول کولار کشیده شده و همچنین یک کانال ریلی که روی بدنه تعبیه شده است اتصال صورت می پذیرد.



شکل ۱۱- اتصال کشویی

۲-۳-۶- ساختار اتصال درزها

در حالی که تکنیک های آب بندی درز محدود به چسب و جوشکاری است؛ روش های مختلفی وجود دارد که درزهای یک کولار را با هم تنظیم می کند. برخی از آنها ساختاری قوی تولید می کنند و از نظر زیبایی نیز دلبپذیر هستند؛ در حالی که برخی دیگر از دوام کمتری برخوردار هستند.

۲-۴- محاسبات و الزامات مربوط به طراحی شناور

برای طراحی اولیه کولار می بایست ابتدا چارچوب طراحی را مشخص کرد. برای اینکار با استفاده از قوانین موجود در مرکز ایمنی دریایی مربوط به طراحی بدنه شناورهای قابل انعطاف و کولار [10] روابط مربوط به طراحی کولار آورده شده است.

۲-۴-۱- بدنه شناور

استانداردهای ABS، DNV و Lloyds مربوط به موسسات رده بندی در طراحی بدنه شناور RIB قابل قبول می باشند. بخش هایی از این استانداردها به الزامات و نیازهای طراحی شناورهای RIB پرداخته اند. این استانداردها تحت عناوین:

- Lloyds Special Service Craft [11]
- ABS High Speed Craft Guide [12]
- DNV GL High Speed Light Craft [13]
- ABS Rules for Fiber Reinforced Plastic Vessels [14]

می باشند. قوانین بالا در بخش طراحی سازه ی بدنه^{۱۵} مورد تایید سازمان^{۱۶} MSC نیز می باشد.

^{۱۵}Marine Stewardship Council

^{۱۶}Heavy Duty Structure

۲-۴-۲-۲ کولار

شاخصه ی اصلی از این نوع شناور، کولار می باشد که در ادامه به فاکتورهای مهم آن اشاره خواهد شد.

۲-۴-۲-۱ خصوصیات مکانیکی کولار

ماده مورد استفاده در ساخت کولار باید حداقل ویژگی های زیر را دارا باشد: [15].

- مقاومت شکست به کشش (Breaking/Tensile Strength): 500 lbs/in
- استحکام چسبندگی (Adhesion Strength): 15lbs/in
- مقاومت پارگی (Tearing Strength): 50 lbs
- مقاومت در برابر پانچ (سوراخ شدن) (Puncture Resistance): 180 lbs

۲-۴-۲-۲ شیر و سوپاپ

هر محفظه کولار باید شامل شیر و سوپاپ جهت تنظیم فشار و مقاومت باشد. با توجه به اینکه پارچه ها دارای خواص مختلفی می باشند از این رو معادله زیر برای بدست آوردن تنش شکست به کشش مورد توجه قرار می گیرد. همانطور که مشخص است مقدار حداقل برای این ضریب ۱۰ می باشد.

$$\sigma_{crit, min} \geq 10 \times \left(\frac{P_r \times D}{2 \times t} \right) \quad (1)$$

Pr فشار نشان داده روی شیر، D قطر کولار و t ضخامت پارچه مورد استفاده در کولار می باشد.

۲-۴-۲-۳ اتصالات

معمولا از روش های مکانیکی و چسب برای اتصال کولار به بدنه استفاده می شود. برای اینکار باید در نقاط اتصال کولار تقویت شود. با استفاده از فرمول زیر حداقل مقاومت مورد نیاز در اتصالات بدست می آید:

$$F_{crit} \geq 3.33 \times P_D \times W_s \quad (2)$$

FCrit مقاومت شکست در چسب و یا مقاومت حاصل در اتصالات مکانیکی، PD بیشترین فشار وارده به کف بدنه و WS فاصله افقی بین بدنه و قسمت خرجی کولار می باشد.

۲-۴-۲-۴ حجم کولار

زمانی که کولار به اندازه فشار طراحی شده متورم باشد حجم آن اندازه گیری می شود. الزامات حجم برای کولار و کامپارتمنت ها با استفاده از دو فرمول زیر اعمال می شود:

$$v_c \geq 21 \times \Delta_{FL} \quad (3)$$

(۴)

$$V_{IB} \geq V_{IB, min} = 40.25 \times \Delta_{FL} - 0.7 \times V_C$$

که V_C حجم کولار، Δ_{FL} وزن کامل شناور، V_{IB} حجم واقعی شناوری داخل و $V_{IB, min}$ کمترین حجم واقعی شناوری داخلی می باشد.

روابط (۳) و (۴) محدودیت های زیر را نشان می دهد:

۱. حجم شناوری داخلی بدنه باید بیش از ۷۳٪ از

حجم جابجایی کامل بدنه باشد.

۲. حجم کولار باید بیش از ۶۰٪ از حجم جابجایی کامل

بدنه باشد.

۲-۴-۲-۵ تعداد کامپارتمنت های کولار

حداقل تعداد کامپارتمنت ها در کولار شناورهای RIB به شرح زیر است:

جدول ۳- حداقل تعداد کامپارتمنت ها در کولار

طول شناور (ft)	حداقل تعداد کامپارتمنت
$L \leq 30$	۴
$30 < L \leq 40$	۶
$40 < L \leq 50$	۸
$50 < L \leq 65$	۱۰

هر شناور می تواند تعداد فرد یا زوج از کامپارتمنت ها را شامل شود. هر کامپارتمنت باید دارای حجم برابر باشد که از رابطه زیر بدست می آید:

$$Compartment Volume = \frac{V_C}{N} \pm 20\% \quad (5)$$

V_C حجم کولار و N تعداد کامپارتمنت های کولار می باشد. کامپارتمنت های کولار باید حداقل طول ۲۰ فوت را داشته باشد. حداقل حجم هر کامپارتمنت نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$V_{com} \geq 0.15 \times V_{IB, min} \quad (6)$$

۳- محاسبات طراحی کولار شناور مورد مطالعه

شناور RIB مورد مطالعه با مقطع V شکل در نظر گرفته شده که در جدول زیر مشخصات و ابعاد شناور بیان شده است.

جدول ۴- مشخصات شناور مورد مطالعه

عنوان	واحد	مقدار
طول	متر (m)	۱۲
عرض	متر (m)	۳/۷
آبخور	متر (m)	۰/۷
زاویه راس	درجه (deg)	۲۲
وزن	کیلوگرم (kg)	۱۲,۰۰۰

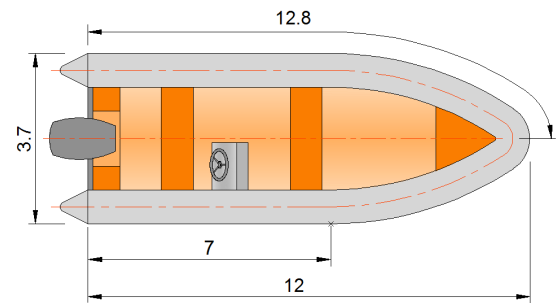
با توجه به مطالعات انجام شده پیرامون جنس کولار، ترکیبی از فوم و هیپالون به دلیل اینکه این نوع جنس به اندازه کولارهای بادی ساخته شده شناوری بالایی دارد و همچنین بدون امکان سوراخ شدن و افت فشار گزینه قابل دفاعی می‌باشد. برای طراحی کولار نیاز به محاسبه جزئیات می‌باشد. برای شروع با توجه به معادله (۳) می‌توانیم کمترین حجم کولار را محاسبه کنیم از این رو داریم:

❖ می‌دانیم تناژ برابر با $1016/04 \text{ (kg)}$ یا 2240 (lb) و حجم آن در آب دریا با چگالی $1/025 \text{ (g/ml)}$ یا 64 lb/ft^3 برابر با $0/99 \text{ (m}^3\text{)}$ یا $35 \text{ (ft}^3\text{)}$ است.

$$V_c \geq 21 \times \Delta FL$$

$$V_c = 21 \times \Delta FL = 21 \times 12 = 252 \text{ (ft}^3\text{)} = 7.2 \text{ m}^3$$

با توجه به الزامات و محدودیت های طراحی و ساخت، مقطع O برای کولار برگزیده شد. از این رو با توجه به طول شناور (۱۲ m) و عرض (۳/۷ m)، برای مقدار شعاع کولار داریم:



شکل ۱۲- شماتیک شناور RIB مورد مطالعه

$$P_{OA, collar} = 2 \times 12.8 = 25.6 \text{ m}$$

$$V_{collar} = \pi \times r^2 \times P_{OA, collar}$$

$$V_{collar} = r^2 \times 3.14 \times 25.6 = 7.2$$

$$r^2 = 7.2 / 80.384 = 0.0895 \rightarrow r = 0.299 \text{ m} = 29.9 \text{ cm}$$

$P_{OA, collar}$ طول کل کولار مورد نیاز و V_{collar} حجم کولار مورد نیاز می‌باشد؛ r شعاع کولار است؛ حداقل قطر کولار

می‌بایست ۵۹,۸ سانتیمتر باشد. همچنین از معادله (۴) برای بدست آوردن کمترین شناوری داخلی بدنه داریم:

$$V_{IB, min} = 40.25 \times \Delta FL - 0.7 \times V_c = 483 - 176.4 = 306.6 \text{ ft}^3 = 8.76 \text{ m}^3$$

کمترین حجم هر کامپارتمنت کولار نیز از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$V_{com} \geq 0.15 \times V_{IB, min} \rightarrow V_{com} = 0.15 \times 306.6 = 45.99 \text{ ft}^3$$

همچنین با توجه به جدول بالا، کمترین تعداد کامپارتمنت در کولار شناور برابر ۶ می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی مطالعات گذشته پیرامون شناورهای RIB و مزیت‌های وجود کولار، متوجه شدیم که برای این نوع شناورها وجود این سازه انعطاف‌پذیر بسیار الزامی و حیاتی است.

همچنین با توجه به خصوصیات شناورهای RIB و ماموریتی که دارند؛ مشخص شد که چه عواملی در طراحی کولار باید مدنظر باشد. عوامل مهم، وزن و سبکی کولار، فرم پذیری و ایجاد حداکثر بویانسی مورد انتظار با توجه به جنس کولار و نوع مقطع آن می‌باشد. البته در این میان باید اتصالات کولار به بدنه را نیز مدنظر داشت.

طراحی کولار بسته به نوع و کارایی شناور تغییر می‌کند و یک کولار، متناسب با نوع و وظیفه شناور طراحی می‌شود. همچنین با استفاده از استانداردهای موجود می‌توان به یک چارچوب کلی برای طراحی کولار با استفاده از روابط حاکم رسید که این تا حد زیادی از ایجاد خطا جلوگیری می‌کند. در بررسی انجام شده مشخص شد که منابع علمی کمی برای طراحی کولار وجود دارد و این نوع سازه در ابتدای راه خود است و عمری کمتر از پنجاه سال دارد.

مراجع

[1] Historical review of 20 years of technical progress of rigid inflatable boats. Stanley, G. W. London : s.n., 1981. RINA Small Craft Group Conference on Rigid bottom inflatable craft – design, construction and handling. Retrieved from https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Historical+review+of+20+years+

[11] ww2.eagle.org. [Online]
<https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/rules-and-guides.html?q=High-Speed+Craft>.

[12] rules.dnv.com. [Online]
<https://rules.dnv.com/servicedocuments/dnvpmp/packages?category=RulesHSLC&edition=%20with%20amendments%202016-07>.

[13] ww2.eagle.org. [Online]
<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/generic/generics-2023/00-part-2-jul23.pdf>.

[14] Hypalon Fabrics.
www.henshaw.co.uk. [Online]
<https://www.henshaw.co.uk/categories/6-hypalon-fabrics>.

of+technical+progress+of+rigid+inflatable+boats&author=G.+W+Stanley&publication_year=1981.

[2] 20 years of change, evolution or revolution. Dyas, C. Weymouth : s.n., 1998. Proceedings of the International Conference on Rigid Inflatables, RINA. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=20+years+of+change%2C+evolution+or+revolution&author=C+Dyas&publication_year=1998.

[3] The development of a design tool for rigid inflatable boats. D. S. Grant, P. A Wilson . Naples, Italy : s.n., 2005. Proceedings of the Conference on High speed marine vehicles (HSMV '05).

[4] Inflatable tubes offer advantage for small craft. Pike, D. 2003. Ship and Boat Int. &publication_year=1998.

[5] Bringing a 1.0 metre buoyancy tube to sea on an 18.0 metres rigid hull. . Natzijling, P. W. Weymouth : s.n., 1998. Proceedings of the International Conference on Rigid Inflatables.

[6] RIB development, design and construction . Lemmer, P. Weymouth : s.n., 1998. Proceedings of the International Conference on Rigid Inflatables.

[7] All You Need Now About Inflatable Boats. www.shmgroup.com. [Online] July 19th, 2019. <https://www.shmgroup.com/blog/all-you-need-to-know-about-inflatable-boats/>.

[8] What Makes FAST Collars Different? fastcollars.com. [Online] file:///I:/UN_Persian/Collar/FAST%20Collars%20-%20What%20Are%20FAST%20Collars%20%E2%80%94%20FAST%20Collar%20Systems.html.

[9] Marine Safety Center Review of Rigid Hull Inflatable and Rigid Hull Foam Collar Vessels. Center, Marine Safety. 2018. U.S. Department of Homeland Security.

[10] [Online]
<https://www.lr.org/en/services/classification-certification/special-service-craft/>.

تحلیل تجربی گسیختگی در مواد مرکب تک‌جهته پلیمری با وجود اتصالات مکانیکی

محمد مهدی عطار^۱، احسان یاری^۲، محمدحسین قائدشرف^۳، وحید آئینی^۴

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

^۳ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

^۴ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشگاه فنی و حرفه‌ای تهران

چکیده:

کامپوزیت‌ها (مواد چند سازه‌ای) رده‌ای از مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده ویژگی خود را حفظ کرده، در یکدیگر حل نشده و با هم ممزوج نمی‌شوند. استفاده از کامپوزیت‌ها در شناورها مزایای متعددی چون کاهش وزن، بهبود خواص راداری و مغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی و خوردگی مکانیکی و خستگی، جذب ارتعاش و نویز، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب در برابر شوک‌های زیر آب را دارد. جایگزین کردن اجزای فولادی با اجزای کامپوزیت می‌تواند سبب ۶۰ تا ۸۰ درصد صرفه‌جویی در وزن جزء و ۲۰ تا ۵۰ درصد صرفه‌جویی در وزن با تعویض قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی شود. در این تحقیق، اتصالات پینی مورد استفاده در تجهیزات دریایی کامپوزیتی در چندلایه مرکب تک‌جهته از جنس الیاف شیشه و اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به این منظور مدلی برای مسئله در نظر گرفته شد و پارامترهای نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد چندلایه به قطر پین (w/d) و نسبت عرض چندلایه به قطر پین (e/d) به عنوان متغیرهای مسئله تعریف گردید. سپس برای بدست آوردن نیروی گسیختگی و مود گسیختگی، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حداکثر تحمل نیرو و مود گسیختگی به طور چشمگیری تحت تاثیر پارامترهای w/d و e/d بوده و با افزایش نسبت w/d حد تحمل نیرو نیز افزایش یافته و مود گسیختگی از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر می‌یابد و برای هر نسبت e/d ، حد بهینه‌ای برای مقدار w/d وجود دارد.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، شناور، الیاف شیشه، اپوکسی، گسیختگی، کشش، برش، لهیدگی.

Empirical Analysis of Fracture in Polymeric Unidirectional Composites With mechanical connections

Mohammadhusein Qaedsharaf¹, Mohammadmahdi Attar², Ehsan Yari³, Vahid Aeeni⁴

¹ Ph.D. student of mechanical engineering, University of Technology Malik Ashtar, Isfahan

² Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Hamedan Branch

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malik Ashtar University of Technology, Isfahan

⁴ Instructor of Males' No. 1 Technical and Vocational University (Shahid Mofatteh Hamedan)

Abstract

Composites are a class of advanced materials in which simple material combinations are used to create new materials with superior mechanical and physical properties. The use of composites in vessels has several advantages such as weight loss, improvement of radar and magnetic properties, resistance to chemical corrosion and mechanical corrosion and fatigue, vibration absorption and noise, high strength-to-weight ratio, good resistance to underwater shocks. Replacing steel components with composite components can save 60 to 80 percent on component weight and 20 to 50 percent weight

savings by replacing aluminum and composite components. In this study, the pin joints used in marine composite equipment were investigated in multilayer monodirectional composite made of glass and epoxy fibers. For this purpose, a model was considered for the problem and the parameters of the center of the pin from the free edge of the multilayer to the pin diameter (w/d) and the ratio of multilayer width to pin diameter (e/d) were defined as the variables of the problem. Then, to obtain the rupture force and rupture mode, the samples were subjected to tensile loading. The results showed that the maximum force tolerance and rupture mode were significantly affected by w/d and e/d parameters and with increasing the w/d ratio, the force tolerant increased and the mode of the rupture changed from shear to the mode of shear to the crush mode, and for each e/d ratio, there is an optimal limit for w/d .

Keywords: Composite, floating, glass fiber, epoxy, rupture, stretching, cutting, crush.

۱- مقدمه

استفاده از مواد مرکب در طول تاریخ نیز مرسوم بوده است. از اولین کامپوزیت‌ها یا همان چندسازه‌های ساخت بشر می‌توان به کاه گل و آجرهای گلی که در ساخت آن‌ها از تقویت‌کننده استفاده می‌شده است اشاره کرد. هنگامی که این دو با هم مخلوط بشوند در نهایت آجر پخته به دست می‌آید که بسیار ماندگارتر و مقاوم‌تر از هر دو ماده اولیه یعنی گل و کاه است. در یک کامپوزیت به طور کلی الیاف، عضو بارپذیر اصلی سازه هستند در حالی که ماتریس آن‌ها را در محل و آرایش مطلوب نگاه داشته و به عنوان یک محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می‌کند؛ به علاوه آن‌ها را از صدمات محیطی در اثر بالا رفتن دما و رطوبت حفظ می‌کند؛ اما کامپوزیت‌هایی نیز در طبیعت یافت می‌شود که بارزترین آن‌ها استخوان، چوب و صدف است. در استخوان فیبرهای هیدروکسی آپاتایت با کلاژن به هم می‌چسبند. مواد کامپوزیت برای حل مشکلات تکنولوژیکی که برای زمان طولانی وجود داشت بوجود آمدند؛ اما تنها در سال ۱۹۶۰ این مواد شروع به جلب توجه صنایع بزرگ کردند. با ورود کامپوزیت‌های پلیمری در صنعت از آن زمان به بعد، مواد کامپوزیتی، به مواد رایج مهندسی تبدیل شده‌اند و برای کاربردهای مختلف از جمله خودرو، طراحی و تولید قطعات، لوازم ورزشی، قطعات و هوافضا، کالاهای مصرفی، دریایی و صنایع نفت بکار برده شدند. اولین بار از مواد کامپوزیتی در ساخت قایق‌های گشت‌زنی کوچک و لندینگ کرافت‌ها استفاده شد. با توجه به کیفیت کم مواد و استحکام کم آن‌ها منحصراً شناورهای نظامی با طول کمتر از ۱۵ متر و جابه‌جایی ۲۰ تن ساخته شد.

درسالهای اخیر با توجه به بهبود طراحی، ساخت و مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌ها، شناورهای بزرگ گشت‌زنی، هاورکرافت، مین‌یاب و رزم‌ناوها نیز ساخته شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد که وزن قایق‌های گشت‌زنی ساخته شده از مواد کامپوزیتی فشرده GRP در حدود ۱۰ درصد نسبت به شناورهای آلومینیومی و حدود ۳۶ درصد نسبت به شناورهای فولادی هم‌اندازه کمتر است. استفاده از آخرین تکنولوژی‌های ساخت از قبیل روش فرایند تزریق کامپوزیت Seeman یا استفاده از الیاف کربن می‌تواند وزن را بیش از این هم کاهش دهد. با کاهش وزن بدنه انتظار می‌رود که ظرفیت حمل بار نظامی افزایش یافته، محدوده عملیاتی گسترش پیدا نموده و مصرف سوخت کاهش یابد. هزینه‌های عملیاتی شناورهای کامپوزیتی در مقابل شناورهای فولادی کمتر است؛ زیرا خوردگی وجود نداشته و مصرف سوخت کمتر است. هزینه چرخه عمر شناور کامپوزیتی در حدود ۷ درصد کمتر از شناور فولادی است. مزیت‌های بکارگیری کامپوزیت در شناورها عبارتند از: الف. وزن کمی دارند؛ در نتیجه باعث افزایش پایداری، محدوده عملیات و باربری و کاهش مصرف سوخت می‌شوند.

ب. به تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارند.

پ. مشخصات گرمایی، راداری و مغناطیسی کمی دارند

ت. در مقابل خوردگی شیمیایی و خوردگی مکانیکی مقاوم هستند.

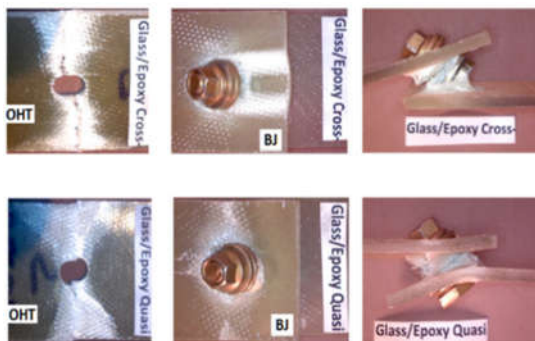
ث. در مقابل خستگی مقاوم هستند.

ج. جاذب ارتعاش و نویز هستند.

چ. نسبت استحکام به وزن بالایی دارند.

تاو و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی ارائه کردند که می‌توان با آن تنش در حوالی پین در ماده مرکب را به دست آورد. آن‌ها همچنین اثر جنس لایه‌ها بر میزان تمرکز تنش و توزیع تنش در نزدیکی پین را با این مدل بررسی کردند و دریافتند تغییر جنس لایه‌ها بر توزیع تنش تأثیر بسیاری زیادی دارد؛ بخصوص در توزیع تنش حلقه‌ای. آن‌ها برای مدل تحلیلی خود از یک سیستم جرم-فنر بعنوان مدل استفاده کردند و نتایج را با یک مدل اجزاء محدود مقایسه نمودند.

گمدانی و همکاران [۳] سال ۲۰۱۵ مقاومت کششی سه نوع مختلف ماده، کربن-اپوکسی، شیشه-اپوکسی و آلومینیوم سری ۶۰۰۰ را در حضور پین، اتصال یک طرفه و سوراخ بررسی کردند. آن‌ها دریافتند مقاومت کششی تابعی از خواص ماده است و نشان داده شد تحمل بار آلومینیوم در حضور دو عدد اتصال یک طرفه بیشترین مقدار خود را دارد؛ درحالی که در ماده مرکب کربن-اپوکسی بیشترین مقاومت در حضور چهار اتصال حاصل می‌شود که این نشان از وابستگی این موضوع به رفتار ماده است. آن‌ها همچنین نشان دادند که نمونه‌هایی که باریک‌تر هستند تعداد کمتری اتصال نیاز دارند تا به بیشترین سطح مقاومت کششی برسند. همچنین نشان داده شد در مواد مرکب اتصال پیچی یک طرفه از اتصال پینی عملکرد بهتری دارد. آن‌ها پی بردند اتصال پیچی یکطرفه از تورق جلوگیری می‌کند در حالی که اتصال پینی خود عامل تورق است.



شکل ۲: مودهای گسیختگی نمونه گلاس-اپوکسی گمدانی و همکاران

وانگ و همکاران [۴] سال ۲۰۱۵ در تحقیق خود برای بررسی اشاعه ترک‌های خستگی در مواد لایه‌ای مرکب الیاف، فلز، پلیمر از داده‌های تجربی و مدل سازی ورق‌ها با ایجاد شیار اولیه استفاده کرده‌اند و رشد ترک‌ها را در لایه‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

ح. نصب کامپوزیت‌ها طی یک فرایند سرد انجام می‌گیرد؛ بنابراین تنش‌ها در یک ناحیه کوچک متمرکز نمی‌شود.

خ. با تغییر ترکیبات و الیاف‌های بکاررفته در کامپوزیت، می‌توان به استحکام موردنیاز رسید.

د. مقاومت خوب در برابر شوک‌های زیرآبی

ذ. آغاز کاویتاسیون در سرعت‌های بالاتر برای پروانه‌های کامپوزیتی

معایب بکارگیری کامپوزیت در شناورها عبارت‌اند از: الف. در برابر گرما مقاومت کمی دارند.

ب. هزینه اتصال مواد کامپوزیتی به فولاد و آلومینیم بسیار زیاد است.

پ. تغییر شکل زیادی دارد. افزایش تغییر شکل بدنه باعث ایجاد مسائلی از قبیل ترک خوردگی خستگی در طول اتصالات و ایجاد عدم تطابق شفت-پروانه می‌گردد.

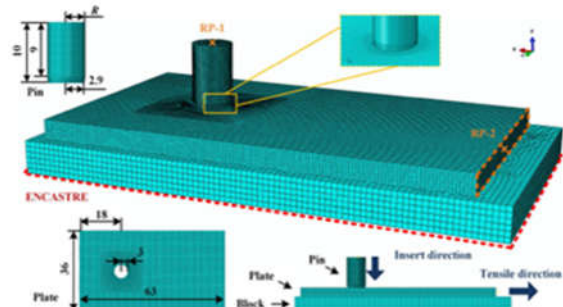
ت. الیاف‌های کربنی به‌کاررفته در کامپوزیت‌ها (جهت افزایش استحکام) قیمت بسیار بالایی دارند.

ث. کاهش مشخصات هیدرودینامیکی بعضی از پروانه‌های کامپوزیتی.

ج. افزایش تنش‌های خمشی و برشی در پروانه‌های کامپوزیتی.

۲- مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیقات انجام‌شده

عطار و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی به منظور به دست آوردن مودها و بارهای گسیختگی در چندلایه‌های کامپوزیتی ارائه کردند. آن‌ها به منظور اعتبارسنجی مدل تحلیلی یک سری آزمایش طراحی کردند و نتایج حاصل نشان داد که مدل تحلیلی معتبر بوده و قابل اعتماد است.

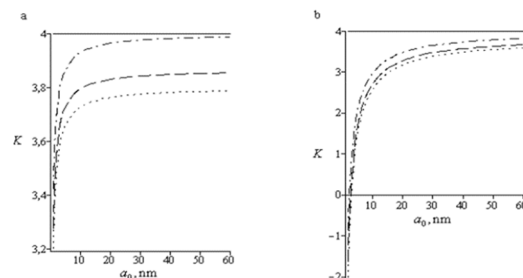


شکل ۱: مدل اجزاء محدود تاو و همکاران

مور و همکاران [۵] سال ۲۰۱۵ در بارگذاری صفحه‌ای نحوه مقاومت و تغییر خواص را در ماده کامپوزیتی لایه‌ای مورد ارزیابی قرار داده‌اند و برای ارزیابی از حالت‌های ورق‌های با سوراخ و بدون سوراخ استفاده کرده و تمرکز تغییرات خواص را در هر یک از لایه‌های ماده مرکب مورد بررسی و ارزیابی تجربی و تحلیلی قرار داده‌اند.

موهوتو و همکاران [۶] سال ۲۰۱۴ ورق‌های آلومینیومی کامپوزیت شده با لایه‌های پلی اورتان را مورد ارزیابی قرار داده و در تحقیق خود برخورد یک جسم با ماده مرکب را با سرعت تا ۱۵ متر بر ثانیه به ورق‌های مرکبی با ضخامت تا ۱۲ میلی‌متر را بررسی کرده‌اند تا تأثیر میزان جذب انرژی در این ماده مرکب و نحوه تغییر شکل و پارگی آن را با ورق‌های معمولی آلومینیوم مورد بررسی قرار دهند.

گروکوف و همکاران [۷] سال ۲۰۱۴ تأثیر تنش سطح بر مقاومت کششی ورق مرکب در حضور سوراخ دایره‌ای و مثلی در مقیاس نانو را بررسی کردند. آن‌ها برای محاسبه تنش سطح از مدل گارتین-موردوخ استفاده نمودند و در نهایت تأثیر ابعاد این نانو سوراخ‌ها و تنش سطح را بر میزان تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که تنش سطح زمانی که ابعاد سوراخ بین ۱ تا ۱۰ نانومتر است مهم‌ترین پارامتر است.



شکل ۳: نمودارهای ضریب تمرکز تنش بر حسب شعاع نانو دایره گروکوف و همکاران

وینایاک و همکاران [۸] سال ۲۰۱۴ میزان مقاومت خستگی ماده لایه‌ای مرکب را با بارگذاری صفحه‌ای در ماده‌ای مرکب با وجود سوراخی دایره‌ای شکل مورد ارزیابی قرار داده‌اند و میزان سیکل‌های مورد تحمل ماده و نیز محل‌های ایجاد عیوب و ترک‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند.

فدیل و همکاران [۹] سال ۲۰۱۳ اثر سه نوع دمایی آب گرم بر مقاومت کششی ماده مرکب دارای ۲ پین سری را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش دما مقاومت کششی ماده کاهش یافته و همچنین زمان غوطه‌وری را پارامتری

تأثیرگذار معرفی کردند. آن‌ها دریافتند زمان غوطه‌وری باعث کاهش ماکزیمم نیروی تحملی توسط چندلایه مرکب می‌شود. درویش و همکاران [۱۰] سال ۲۰۱۲ با استفاده از یک مدل اجزاء محدود ضریب تمرکز تنش را برای یک چندلایه مرکب در حضور یک سوراخ پخ‌دار بدست آوردند. آن‌ها تأثیر ضخامت، زاویه پخ، عمق پخ و زاویه الیاف هر لایه بر ضریب تمرکز تنش را بررسی کردند. در نهایت آن‌ها پی بردند مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر ضریب تمرکز تنش زاویه پخ است که این پارامتر در زوایای ۵۰ تا ۶۰ درجه تأثیر چشمگیری بر ضریب تمرکز تنش دارد.

گوربت اورسن و همکاران [۱۱] سال ۲۰۱۲ اثر آب دریا بر مقاومت لهیدگی، بارهای گسیختگی و مودهای گسیختگی را بررسی کردند. آن‌ها پس از غوطه‌ورسازی نمونه‌هایشان در آب شور به مدت ۳ تا ۶ ماه، آن‌ها را تحت تست کشش ساده قرار دادند و بارهای گسیختگی را برای هر نمونه بدست آوردند. آن‌ها دریافتند که با غوطه‌ورسازی نمونه‌ها در آب دریا مودهای گسیختگی به مود لهیدگی تبدیل می‌شود و همچنین بار تحملی توسط نمونه‌ها افت پیدا می‌کند. کامانهو و لمبرت [۱۲] سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک روش نیمه‌تحلیلی و عددی به بررسی توزیع تنش در مواد مرکب تحت تأثیر پین پرداختند. در این تحقیق با استخراج معادله دیفرانسیل بی هارمونیک و حل معادلات مزبور با استفاده از توابع مختلط، توزیع تنش در اطراف پین را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق جهت بیان اثر پین از یک توزیع فشار سینوسی، استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به معیار گسیختگی ارائه شده، مودهای مختلف گسیختگی بررسی شده است.

نظری و دیده‌ور [۱۳] در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود تأثیر افزایش لایه‌های آلومینیوم و اپوکسی و نیز تغییر نوع رزین را برای بررسی مقاومت ماده مرکب مورد ارزیابی قرار داده و با انجام تست‌های ضربه (شارپی) در ورق‌ها با وجود شیار و بدون وجود شیار مقاومت و قابلیت جذب انرژی ورق‌ها قبل از پارگی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

۳- مواد و آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش از پارچه الیاف‌های شیشه به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش استفاده شده است. الیاف شیشه E-glass تک‌جهته (UE) در بستر رزین ترموست اپوکسی EPL 1012، با سخت‌کننده EPH 112 قرار گرفت. پس

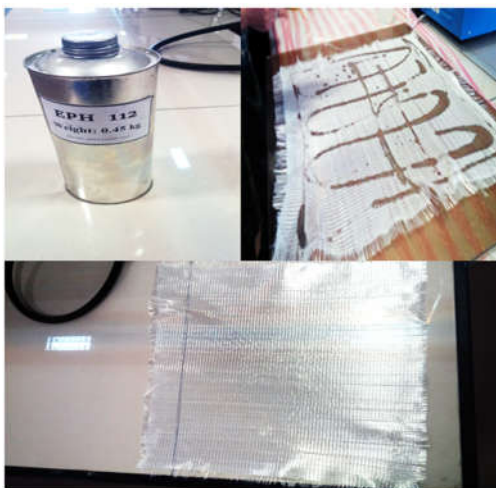
در جدول ۵ می‌توان زمان لازم را برای اجرای فرآیندهای پخت^۴ و پس‌پخت^۵ در دماهای مختلف مشاهده نمود.

جدول ۵- فرآیندهای پخت و پس‌پخت مختلف

زمان پخت	زمان پس‌پخت
۸ تا ۱۶ ساعت در ۲۵C°	۷ روز در ۲۵C°
۴ تا ۸ ساعت در ۴۰C°	۱۵ ساعت در ۵۰C°
۱ تا ۲ ساعت در ۶۰C°	۲ تا ۱۰ ساعت در ۸۰C°

۳-۱- فرآیند ساخت چند لایه مرکب

به منظور ساخت نمونه‌ها، ابتدا سه لایه از پارچه الیاف شیشه به ابعاد ۵۰*۵۰ سانتی‌متر بریده شد. سپس وزن رزین اپوکسی با توجه به اطلاعات سازنده ابتدا با ترازو اندازه‌گیری شدند سپس سخت‌کننده مربوط با توجه به درصد وزنی به رزین اضافه شدند. در قدم بعدی یک سطح صاف و صیقلی (شیشه) به عنوان قالب به واکسی مخصوص برای جلوگیری از چسبیدن چند لایه به سطح قالب آماده شد و سپس رزین با کمک قلم‌مو به سطح آن اضافه شد؛ در ادامه لایه‌های پارچه الیاف یکی پس از دیگری بصورت دستی روی هم گذاشته شدند. به منظور از بین بردن هرگونه حباب و ناپیوستگی از غلتکی مخصوص استفاده گردید. سپس با توجه به اطلاعات سازنده رزین به مدت ۱ هفته در دمای ۲۵ درجه به پخت کامل رسید. در این ۱ هفته به رزین اجازه داده می‌شود که به بالاترین استحکام خود دست یابد.



شکل ۴: هاردنر، پارچه الیاف شیشه و الیاف آغشته شده به رزین اپوکسی

از اندازه‌گیری برخی خواص، نتایج در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- برخی خواص الیاف مورد استفاده در آزمایش‌ها

ماده	چگالی (تولید کننده) (g/cm ³)	چگالی سطحی ^۱ (اندازه‌گیری) (g/cm ²)	چگالی سطحی (تولید کننده) (g/cm ²)
E	۲/۵۷	۵۰۰	۴۰۰

در جدول ۲ نحوه ترکیب رزین و سخت‌کننده به دو شیوه بیان شده است. کار ترکیب رزین و سخت‌کننده، به دو شیوه وزنی و حجمی صورت می‌گیرد که بر حسب شرایط از هر یک از آن‌ها می‌توان استفاده کرد.

جدول ۲- نسبت اختلاط رزین و سخت‌کننده

اجزاء	نسبت وزنی	نسبت حجمی
EPL 1012	۸۸	۸۵
EPH 112	۱۲	۱۵

اگر حجم زیادی از رزین و سخت‌کننده با هم مخلوط شوند، در اثر گرمای واکنش، عمر مفید سیستم، کم خواهد شد. در جدول ۳ عمر مفید سیستم^۲ در دماهای مختلف آمده است.

جدول ۳- عمر مفید سیستم در دماهای مختلف

دما (C°)	زمان (دقیقه)
۱۸	۲۸۰-۳۲۰
۲۵	۲۲۰-۲۶۰
۴۰	۴۵-۵۵

زمان ژل شدن^۳ نیز تابعی از دما است. در جدول ۴ این تغییرات به نمایش گذارده شده است.

جدول ۴- زمان ژل شدن در دماهای مختلف

دما (C°)	زمان (دقیقه)
۲۵	۴۲۰-۵۰۰
۴۰	۱۵۰-۱۷۰
۶۰	۴۰-۵۵
۸۰	۱۴-۱۷
۱۰۰	۴-۶

^۴Cure

^۵Post cure

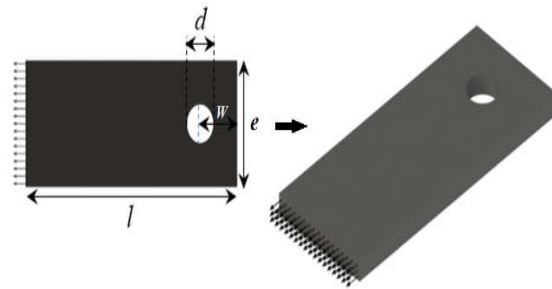
^۱Areal density

^۲Pot life

^۳Gel time

۳-۲- مدل منظور شده

شکل ۵ پارامترهای هندسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. L نشان‌دهنده طول نمونه، d نشان‌دهنده قطر سوراخ، e نشان‌دهنده عرض ورق و w فاصله مرکز سوراخ تا لبه آزاد ورق می‌باشد. تمامی نمونه‌ها دارای طول ثابت ۸۰ میلی‌متر و عرض‌های متغیر می‌باشند. نسبت‌های w/d و e/d برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شدند.



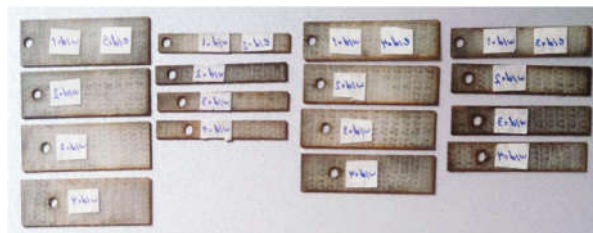
شکل ۵: پارامترهای هندسی نمونه‌های آزمایش

۳-۳- ساخت نمونه‌ها

بعد از کامل شدن پخت چندلایه پس از مدت زمان ۱ هفته، نمونه‌های آزمایش با ابعاد مورد نظر با استفاده از دستگاه برش لیزری CNC بریده شدند. شکل ۶ فرآیند برشکاری نمونه‌ها را با استفاده از دستگاه CNC نشان می‌دهد. در نهایت نمونه‌های آماده شده در شکل ۷ قابل مشاهده‌اند.



شکل ۶: ماشین برش لیزری CNC در حال کار



شکل ۷: نمونه‌های ساخته شده

۳-۴- آزمایش‌های کشش استاندارد

دستگاهی که برای تست کشش نمونه‌ها استفاده شد دستگاه کشش یونیورسال STM با ظرفیت ۶۰ تن می‌باشد (شکل ۸). دستگاه‌های تست مواد سری STM برای تست آسان و دقیق مواد با هزینه کم طراحی شده‌اند.



شکل ۸: دستگاه تست یونیورسال

۳-۵- تست کشش استاندارد

با استفاده از استاندارد ASTM D-3039-D3093M جهت بدست آوردن خواص مکانیکی ماده، تست کشش ساده صورت گرفت. نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد با استفاده از نرم افزار دستگاه STM استخراج گردید و سپس به کمک روابط (۱) و (۲) به منحنی تنش-کرنش تبدیل شد. به منظور افزایش دقت آزمایش، تست کشش ساده، ۳ بار تکرار گردید و با توجه به نتایج مشخص شد که آزمایش‌ها از دقت خوبی برخوردارند.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

۳-۶- آماده سازی نمونه‌ها برای تست کشش

برای انجام تست کشش همانطور که در شکل ۹ نیز قابل مشاهده است؛ نمونه‌ها در جهت طولی به دو فک محکم بسته می‌شوند. سپس با استفاده از نرم‌افزار تعریف شده برای دستگاه، عملیات تست کشش اجرا شده و داده‌ها بصورت میزان نیرو و جابجایی ثبت می‌گردند. مقدار نرخ کرنش، ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تعریف گردید.

۷-۳- شرایط مرزی و نحوه بارگذاری

شرایط مرزی به این صورت است که با توجه به اینکه نمونه‌ها در فک‌های دستگاه قرار می‌گیرند جابجایی در دو انتهای نمونه‌ها در دو راستای Y و Z بصورت قیدهای جابجایی صفر تعریف می‌شوند. بارگذاری کششی با دو نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه (شبه استاتیکی) و ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه (دینامیکی) به پین‌ها اعمال می‌گردد. سپس نتایج بصورت نمودارهای نیرو و جابجایی استخراج می‌شود. این جابجایی سبب ایجاد تنش کششی در نمونه و در نتیجه تمرکز تنش در اطراف سوراخ می‌گردد.



شکل ۹: نمونه تحت کشش

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱- تعریف پارامترهای متغیر و مقادیر مطلوب

مسئله

پارامترهای متغیر عبارتند از:

(الف) نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد نمونه به قطر پین:

$$\varphi = \frac{e}{d} \quad (3)$$

(ب) نسبت عرض چندلایه به قطر پین:

$$\psi = \frac{w}{d} \quad (4)$$

مقادیر مطلوب مسئله نیز عبارتند از:

(الف) حداکثر مقدار بار تحمل شده توسط نمونه (P_{max})

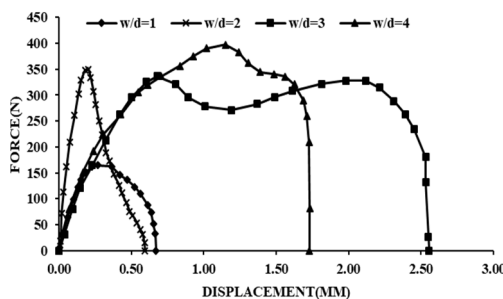
(ب) مقدار جابجایی (ΔL)

۴-۲- بررسی نتایج

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=2$ و نرخ کرنش ۱۰ mm/min نشان داده شده است. محور عمودی مقدار تغییرات نیرو و

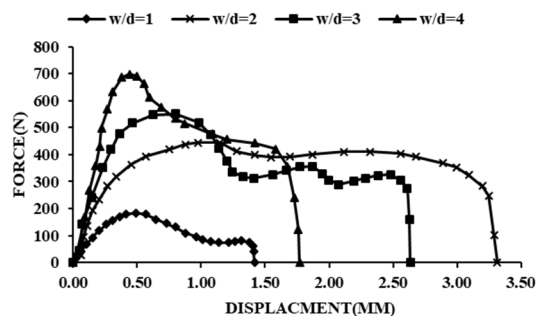
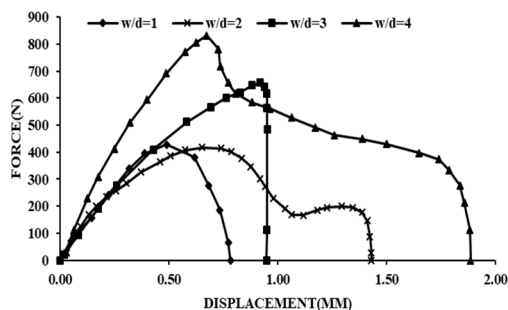
محور افقی مقدار جابجایی پین از حالت اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش پارامتر w/d، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد و مود شکست برای مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به صورت (۱) برشی، (۲) برشی و لهیدگی، (۳) لهیدگی و نت-تنشن، و (۴) لهیدگی بود. دلیل این امر را می‌توان اینطور استنباط کرد که با افزایش فاصله پین نسبت به لبه آزاد مود شکست از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر یافته که در حالت لهیدگی ماده مرکب تک‌جهته تنش بیشتری را تحمل می‌کند. به بیان دیگر مقدار حد تحمل نیرو برای نسبت‌های w/d برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۱۵۰، ۳۳۶، ۳۵۰ و ۳۹۶ کیلونیوتن بود. همچنین مقدار جابجایی در پیک نیرو برای نمونه با نسبت $w/d=4$ از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان همان تغییر به مود لهیدگی و طبعاً افزایش تحمل نیرو دانست.

میزان افزایش تحمل بار از نسبت $w/d=1$ به $w/d=2$ به مقدار ۲/۳۳ برابر، از نسبت $w/d=2$ به $w/d=3$ به مقدار ۱/۰۴ برابر، از نسبت $w/d=3$ به $w/d=4$ به مقدار ۱/۱۳ برابر بود.



شکل ۱۰: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=2$ و نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه

برای نسبت $e/d=3$ و نسبت‌های مختلف w/d نیز با افزایش پارامتر w/d حد تحمل نیرو زیاد می‌شود (شکل ۱۱). مقدار حداکثر بار برای w/d های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۱۸۳، ۴۴۴، ۵۳۴ و ۶۹۸ نیوتن بود. مود شکست برای مقادیر w/d های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به صورت برشی، برشی و لهیدگی، لهیدگی و لهیدگی مشاهده شد.



شکل ۱۱: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=3$ و نرخ کرنش 10 میلی‌متر بر دقیقه

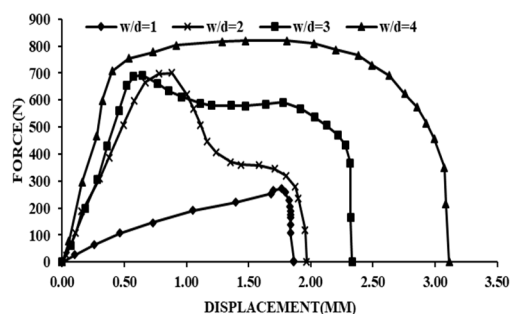
شکل ۱۲: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=5$ و نرخ کرنش 10 میلی‌متر بر دقیقه

در ادامه برای بررسی اثر سرعت کرنش بر حد تحمل بار، نمونه‌های مشابه در نرخ کرنش 75 میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمون قرار گرفتند. شکل ۱۴ تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=2$ و نرخ کرنش 75 میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش پارامتر w/d ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد و مود شکست برای مقادیر w/d برابر با 1 ، 2 ، 3 و 4 به ترتیب به صورت (۱) برشی، (۲) برشی و نت-تنشن، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و نت-تنشن بود.

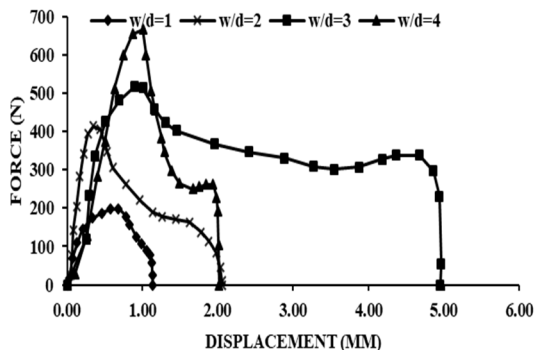
نظیر آنچه در قبل گفته شد دلیل این امر را نیز مانند آنچه قبلاً نیز گفته شد، می‌توان اینطور استنباط کرد که با افزایش فاصله بین نسبت به لبه آزاد مود شکست از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر یافته که در حالت لهیدگی ماده مرکب تک‌جهته تنش بیشتری را تحمل می‌کند. به بیان دیگر مقدار حد تحمل نیرو برای نسبت‌های w/d برابر با 1 ، 2 ، 3 و 4 به ترتیب برابر با 164 ، 244 ، 223 و 630 نیوتن بود. همچنین مقدار جابجایی در پیک نیرو برای نمونه با نسبت $w/d=4$ از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان همان تغییر به مود لهیدگی و طبعاً افزایش تحمل نیرو دانست.

میزان افزایش تحمل بار از نسبت $w/d=1$ به $w/d=2$ به مقدار $1/49$ برابر، از نسبت $w/d=2$ به $w/d=3$ به مقدار $2/55$ برابر، از نسبت $w/d=3$ به $w/d=4$ به مقدار $1/01$ برابر بود.

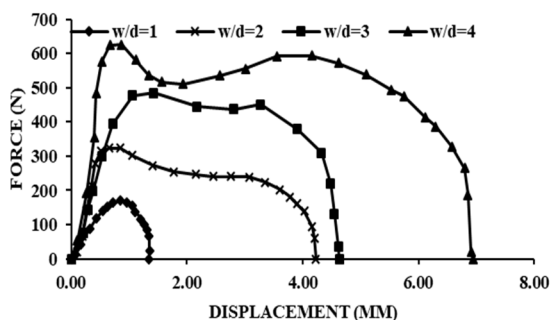
برای e/d های 4 و 5 هم روندی مشابه $e/d=2$ مشاهده گردید (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). مقادیر حداکثر بار برای w/d های 1 ، 2 ، 3 و 4 به ازای $e/d=4$ به ترتیب برابر با $270/9$ ، 700 ، 692 و 819 نیوتن و به ازای $e/d=5$ با 417 ، 656 و 831 نیوتن بود. میزان افزایش تحمل بار به ازای $e/d=4$ از نسبت $w/d=1$ به $w/d=2$ به مقدار $2/5$ برابر، از نسبت $w/d=2$ به $w/d=3$ به مقدار $0/98$ برابر، از نسبت $w/d=3$ به $w/d=4$ به مقدار $1/13$ برابر و میزان افزایش تحمل بار به ازای $e/d=5$ از نسبت $w/d=1$ به $w/d=2$ به مقدار $1/2$ برابر، از نسبت $w/d=2$ به $w/d=3$ به مقدار $1/26$ برابر بود.



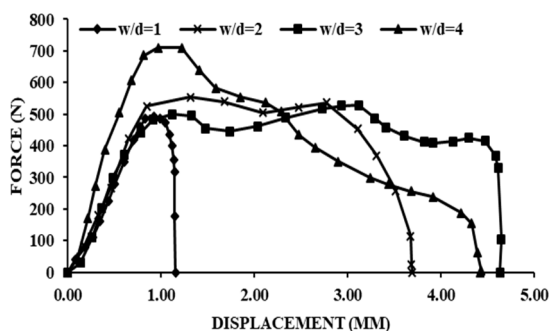
شکل ۱۳: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=4$ و نرخ کرنش 10 میلی‌متر بر دقیقه



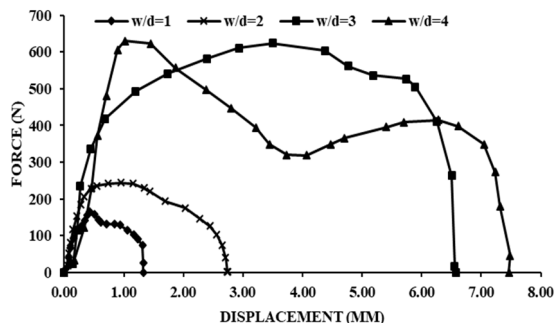
شکل ۱۵: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=3$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۶: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=4$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۷: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=5$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه
برای بهتر مقایسه کردن نتایج مقدار حد تحمل نیرو به ازای مقادیر مختلف پارامترهای w/d و e/d جدول ۶ تهیه گردید. در این جدول، مقدار حداکثر تحمل بار در نمونه‌ها با پارامترهای هندسی مختلف بیان گردیده است.



شکل ۱۴: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=2$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه

برای نسبت‌های $e/d=2, 3, 4, 5$ به ازای مقادیر مختلف w/d نیز تغییرات نیرو و جابجایی در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌گردد به ترتیب برای: (الف) نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=3$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر w/d ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۵۱۶، ۴۱۳، ۱۹۸ و ۶۶۶ نیوتن بود.

(ب) نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=4$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر w/d ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر w/d برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۱۷۰، ۳۲۴، ۴۸۴ و ۶۲۶ نیوتن بود.

(ج) نسبت‌های مختلف w/d به ازای $e/d=5$ و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر w/d ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر w/d برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۵۰۰، ۵۵۳، ۵۲۸ و ۷۱۰ نیوتن بود.

جدول ۶: حد تحمل نیرو و مود گسیختگی برای نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف w/d و e/d

	e/d	Strain rate of ۱۰ mm/min		Strain rate of ۷۵ mm/min	
		Failure load (N)	Failure modes	Failure load (N)	Failure modes
$w/d=1$	۲	۱۵۰	S	۱۶۴	S
	۳	۱۸۳	S	۱۹۸	S
	۴	۲۷۰٫۹	S	۱۷۰	S
	۵	۵۱۲	S	۵۰۰	S
$w/d=2$	۲	۳۳۶	B/S	۲۴۴	S/N
	۳	۴۴۴	B/S	۴۱۳	S
	۴	۷۰۰	B/S	۳۲۴	S
	۵	۸۱۹	B	۵۵۳	S
$w/d=3$	۲	۳۵۰	B/N	۶۲۳	B/N
	۳	۵۳۴	B	۵۱۶	B
	۴	۶۹۲	B	۴۸۴	B
	۵	۶۵۶	B	۵۲۸	B
$w/d=4$	۲	۳۹۶	B	۶۳۰	B/N
	۳	۶۹۸	B	۶۶۶	B
	۴	۸۱۹	B	۶۲۶	B
	۵	۸۳۱	B	۷۱۰	B

همانطور که در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد بیشترین حد تحمل نیرو در نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه مربوط به نمونه‌ای با مقادیر $w/d=4$ و $e/d=5$ و برای نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز مربوط به نمونه‌ای با مقادیر $w/d=4$ و $e/d=5$ می‌باشد. در نسبت‌های e/d کمتر به دلیل سطح تنش برشی کمتر در سمت پشت پین، مود گسیختگی در حالت برشی قرار می‌گیرد و در نتیجه همانطور که در جدول نیز مشاهده می‌شود حد تحمل نیرو برای آن‌ها نسبت به دیگر نمونه‌ها با نسبت‌های بالاتر، پایین می‌باشد. در نسبت‌های e/d بالاتر، اگرچه سطح تنش برشی در پشت پین افزایش یافته و تحمل بار برشی بیشتری را دارد اما ممکن است تنش در این ناحیه از مقاومت لهدیگی ماده بیشتر شده و ماده مرکب در پشت پین دچار پدیده لهدیگی گردد. با توجه به اینکه این پدیده سبب فشردگی ماده و جمع‌شوندگی آن می‌شود؛ کاهش تحمل بار در نمونه‌ها به کندی صورت می‌گیرد.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، اتصالات پینی در چندلایه مرکب تک‌جهته از جنس الیاف شیشه و اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مدلی برای مسئله در نظر گرفته شد و پارامترهای نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد چندلایه به قطر پین (w/d) و نسبت عرض چندلایه به قطر پین (e/d) به عنوان متغیرهای مسئله تعریف گردید. سپس برای بدست آوردن نیروی گسیختگی و مود گسیختگی، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که:

- در اتصالات پینی در مواد مرکب، حداکثر تحمل نیرو و مود گسیختگی به طور چشمگیری تحت تاثیر پارامترهای w/d و e/d می‌باشد.
- با افزایش نسبت w/d حد تحمل نیرو نیز افزایش یافته و مود گسیختگی از حالت برشی به حالت لهدیگی تغییر می‌یابد.
- کاهش نیرو برای نمونه‌هایی که در آن‌ها پدیده لهدیگی رخ می‌دهد به کندی صورت می‌گیرد.
- به دلیل تک‌جهته بودن الیاف در راستای بارگذاری و همچنین مقاومت کم ماتریس، فقط مودهای گسیختگی برشی و لهدیگی مشاهده شد.
- برای هر نسبت e/d ، حد بهینه‌ای برای مقدار w/d بدست آمد.

۸- مراجع

[1] Attar, Mohammad Mahdi. Barati, Farzan. Ahmadvpour, Mahdi. Rezapour, Ehsan. (2016). Failure analysis of unidirectional polymeric matrix composites with two serial pin loaded-holes. journal of mechanical science and technology, 30, pp.2583–2591.

[2] Tao, Wu. Kaifu, Zhang. Hui, Cheng. (2016). Analytical modeling for stress distribution around interference fit holes on pinned composite plates under tensile load. S1359-8368 (16) 30907-6.

[3] Gamdani, Farid. Boukhili, Rachid. Vadean, Aurelian. (2015). Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates. Materials and Design, 88, 702–712.

[4] Wang, W. Rans, C. Alderliesten, R.C. Benedictus, R. (2015). Predicting the influence of discretely notched layers on fatigue crack

[۴] کاربرد آلومینیوم و مواد کامپوزیتی در شناورها، محمد فارسی، داوود پورشمس، عباس دشتی منش، مصباح سایبانی، نهمین همایش صنایع دریایی

- growth in fibre metal laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 145, Pages 1-14.
- [5] Moure, M. M. Otero, F. García-Castillo, S. K. Sánchez-Sáez, S. Barbero, E. Barbero, E. J. (2015). damage evolution in open-hole laminated composite plates subjected to in-plane loads. *Composite Structures*, Volume 133, 1, Pages 1048-1057
- [6] Damith, Mohotti. Tuan, Ngo, Sudharshan, N. Raman. Muneeb, Ali. Priyan, Mendis. (2014). Plastic deformation of polyurea coated composite aluminium plates subjected to low velocity impact. *Materials & Design*, Volume 56, Pages 696-713.
- [7] Grekov, Mikhail. Morozov, Nikita. Yazovskaya, Anna. (2014). Effect of surface stress on strength of a plate with elliptical and triangular nanoscale holes. 20th European Conference on Fracture (ECF20)
- [8] Vinayak, B.G. Jayaprakash, K. Naik, N.K. (2012). Fatigue behavior of laminated composites with a circular hole under in-plane uniaxial random loading. *Materials & Design*, Volume 40, Pages 245-256.
- [9] Fadil, Ibrahim, Soykok. Sayman, Onur. Pasinli, Ahmet. (2013). Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints. *composite*, 54, pp.59-70.
- [10] Darwish, Feras. Tashtoush, Ghassan. Gharaibeh, Mohammad. (2012). Stress concentration analysis for countersunk rivet holes in orthotropic plates. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 37, 69-78.
- [11] Gurbet, örcen. Mustafa, Gür and. Mustafa, özen. (2012). Seawater effect on pin-loaded laminated composites with two parallel holes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (12), pp. 4055-4063.
- [12] Camanho, P. P. Melro, A. R. Andrade Pires, F. M. Pinho, S. T. Micromechanical analysis of polymer composites reinforced by unidirectional fibres: Part II – Micromechanical analyses. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 50, Issues 11–12, p. 1906–1915, 2013
- [13] Nazari, Ali. Didehvar, Neda. (2011). Analytical modeling impact resistance of aluminum epoxy laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, Volume 42, Issue 7, Pages 1912-1919.

بهبود محدوده کلیدزنی نرم (ZVS) در شارژر بدون سیم، با

قابلیت استفاده در سامانه‌های زیر سطحی

محمد هادی زاده^۱، رضا حق‌مرام^۲، ابوالفضل نصیری^۳، حسین ملایی^۴

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) mohammad.hadizadeh20@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) rghmrm@gmail.com

۳- استادیار دانشکده فنی، سیگنالی و فضایی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام) nasirieng@gmail.com

۴- پژوهشگر، دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) hosseinmollaei128@gmail.com

چکیده:

در این مقاله تغییرات فرکانس تشدید در مدارهای شارژر بدون سیم نیمه دینامیک بررسی و روشی برای بهبود محدوده کلیدزنی نرم (ZVS) ارائه شده است. ساختار مورد استفاده در این مقاله مبدل تمام‌پل می‌باشد. با توجه به تغییرات فاصله بین سیم‌پیچ‌های انتقال توان، میزان اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده و در نتیجه فرکانس تشدید مبدل تغییر می‌کند. ساختار مبدل‌های با کلیدزنی سخت عموماً دارای تلفات بالا، راندمان پایین و فرکانس محدود هستند و وجود هم‌پوشانی بین پارامترهای ولتاژی و جریانی المان‌های غیرخطی در این مبدل‌ها، باعث آسیب‌پذیرتر شدن این مبدل‌ها در سطوح بالای توان می‌گردد. به منظور عملکرد مناسب‌تر، الگوهای متفاوتی از عملکرد کلیدها و المان‌های غیرخطی در ساختارهای متفاوت در این زمینه ارائه شده است. در این ساختارها، با افزودن تعدادی المان اضافی به مدار، هم‌پوشانی جریان و ولتاژ کلیدها در لحظات روشن و خاموش شدن تقریباً از بین رفته و تلفات کلیدزنی کاهش می‌یابد. در این مقاله، ساختار جبران‌سازی LCC استفاده شده است. در این ساختار با تطبیق مناسب سلف و خازن اولیه ساختار جبران‌سازی، فرکانس تشدید از فرکانس کلیدزنی کوچک‌تر شده و شرایط کلیدزنی نرم در مبدل برقرار می‌شود. استفاده از این شارژر به دلیل بازدهی بالا و تلفات ناچیز، در زیردریایی‌ها پیشنهاد می‌شود. مدار پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی و تغییرات فرکانس تشدید در ضرایب کوپلینگ مختلف بررسی و نتایج ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی:

اندوکتانس متقابل، شارژر بدون سیم دینامیک، کلیدزنی نرم، مبدل تمام‌پل

Improved Soft Switching Range (ZVS) in Wireless Charger with Usability in Subsurface Systems

Mohammad Hadizade¹, Reza Haghmaram², Abolfazl Nasiri³, Hossein mollaei⁴

1,2,3,4 Electrical Engineering Department, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, resonance frequency changes in semi-dynamic wireless charging circuits and a method for improving soft switching range (ZVS) is presented. The structure used in this article is a full-bridge converter. Due to the changes in the distance between the powers transmission pads, the amount of mutual inductance of the transmitter and receiver coils and as a result changes the resonant frequency of the converter. The structure of hard switching converters generally has high losses, low efficiency and limited frequency. There is an overlap between the voltage and current parameters of the non-linear elements in these converters, it makes these converters more vulnerable at high power levels. The proposed method for increasing the soft switching range in the dynamic wireless charger is presented. In order to perform better, have been presented different models of the function of keys and non-linear elements in different structures in this field. In these structures, by adding a number of additional elements to the circuit, the overlapping of the current and voltage of the switches at the moments of turning on and off is almost eliminated and are eliminated switching losses. In this article, is used LCC compensation structure. In this structure, by matching the primary inductor and capacitor

in the compensator structure, the resonance frequency is smaller than the switching frequency and soft switching conditions are established in the converter. The use of this charger is recommended in submarines due to its high efficiency and low losses. The proposed circuit is simulated in MATLAB software and are investigated the resonance frequency changes in different coupling coefficients and are presented the results.

Keywords: mutual inductance, dynamic wireless charger, soft switching, full bridge converter

شوند. در مرجع [۲] یک مدل سازی کارآمد برای سیستم UWPT با استفاده از پارامترهای Z پیشنهاد می شود. با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی و تحلیل شبکه دو پورت، مدل امپدانس سیم پیچ ها با در نظر گرفتن فرکانس و رسانایی آب دریا استخراج می شود. مدل امپدانس را می توان برای ساخت مدار معادل یک سیستم UWPT استفاده کرد. تلفات جریان گردابی را می توان با استفاده از مدار معادل پیشنهادی به طور دقیق پیش بینی کرد.

انتقال توان القایی (IPT) یک رویکرد عملی برای شارژ وسایل نقلیه خودران زیر آب (AUV) است. از کوپلر مغناطیسی برای انتقال توان بین سیم پیچ های اولیه و ثانویه استفاده می شود. عملکرد کوپلر مغناطیسی ظرفیت انتقال سیستم را تعیین می نماید. کوپلر مغناطیسی حلقوی به طور گسترده در سیستم شارژ بدون سیم زیر آب استفاده می شود. در مرجع [۳] تکامل ساختار جفت کننده مغناطیسی تجزیه و تحلیل می شود و یک جفت کننده مغناطیسی مبتنی بر سیم پیچ دوقطبی با یک روش جدید ارائه می شود. فناوری های شارژ بدون سیم در دو حالت استاتیک (ساکن) و دینامیک (پویا) مورد بررسی قرار می گیرند. در شارژر بدون سیم استاتیک، باید فاصله سیم پیچ های اولیه و ثانویه دارای یک اندازه معین و تقریباً ثابت باشد تا میدان مغناطیسی مورد نظر انتقال توان را انجام دهد. در مرجع [۴] حاصل ضرب بازده توان انتقالی و ضریب توان ورودی ($\eta \cdot PF$) به عنوان معیاری برای استفاده کامل از ظرفیت انتقال توان سیستم و همچنین کاهش سرمایه و هزینه عملیاتی سیستم در نظر گرفته شده است. یک روش دستیابی به فرکانس بهینه برای به حداکثر رساندن $\eta \cdot PF$ سیستم با در نظر گرفتن تغییرات ناگهانی احتمالی در ضریب کوپلینگ سیستم WPT به دلیل انحرافات EV از تراز مسیر در امتداد جاده پیشنهاد شده است. شارژ دینامیک (انتقال توان همراه با تغییر فاصله میان سیم پیچ ها) یک گزینه مناسب برای

۱- مقدمه

شارژرهای بدون سیم در صنایع مختلفی مانند تلفن همراه، زیر دریایی ها، اینترنت اشیا و خودروسازی استفاده می شوند. هدف از استفاده از این فناوری، سهولت در فرآیند شارژ دستگاه هاست. اکثر سیستم های الکتریکی که امروزه به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند دارای باتری های قابل شارژ می باشند. در برخی از این وسایل امکان شارژ با اتصال سیم وجود ندارد و یا نیاز به روشی راحت تر و ایمن تر برای شارژ حس می گردد. همچنین، برخی از دستگاه های الکتریکی غیر قابل دسترس می باشند که نیازمند یک سیستم بدون سیم برای تأمین توان مورد نیاز خود هستند. طراحی چنین سیستم هایی مستلزم شناخت هر چه بهتر روش های انتقال توان بدون سیم (WPT) و قواعد حاکم بر سیستم های الکتریکی می باشد. یک سیستم انتقال توان بدون سیم از بخش های اصلی مبدل فرکانس بالا، شبکه جبران کننده و کوپلینگ مغناطیسی تشکیل شده است.

انتقال توان بدون سیم یک فناوری توان مند برای تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی است، زیرا دخالت نیروی انسانی در هنگام شارژ را حذف می نماید. چالش های اصلی برای پذیرش سیستم های انتقال توان بدون سیم شامل ناهم تراز سیم پیچ ها و فاصله هوایی بزرگ می باشد که هر دو راندمان انتقال توان را کاهش می دهند [۱]. فناوری انتقال توان بدون سیم را می توان برای شارژ بدون سیم وسایل نقلیه زیر آب بدون سرنشین استفاده نمود. با این حال، در یک سیستم انتقال توان بدون سیم زیر آب (UWPT)^۲، تلفات جریان گردابی (ECL) ناشی از رسانایی آب دریا باید در نظر گرفته شود. طرح هایی که تلفات جریان گردابی را به درستی در نظر نمی گیرند می تواند باعث کاهش غیر قابل پیش بینی کارایی سیستم

¹ Wireless Power Transfer

² Underwater Wireless Power Transfer

³ Eddy Current Loss

⁴ Inductive Power Transfer

⁵ Autonomous Underwater Vehicles

انتقال انرژی است که می‌تواند مقدار نشتی انرژی را کاهش دهد، محدودیت‌های برد را حذف کند و زمان کارکرد را افزایش دهد. در مرجع [۵] از سیم پیچ فرستنده و ماژول‌های الکترونیک قدرت برای ایجاد یک سیستم تشخیص دقیق بر اساس تغییر فاصله گیرنده استفاده می‌کند. در مرحله بعد، یک الگوریتم کنترلی برای کنترل دقیق زمان فعال‌سازی و غیرفعال شدن شارژر و ارائه انرژی مورد نیاز در طول حداکثر کوپلینگ سیم‌پیچ‌ها پیشنهاد شده است که اجازه شکل‌دهی بهینه پروفیل قدرت برای کنترل میزان انرژی تحویلی به خودرو را می‌دهد. روش‌های موجود برای تنظیم ولتاژ خروجی نیاز به اتصال بین وسیله نقلیه الکتریکی^۶ (EV) و ایستگاه شارژ دارد. این اتصال برای کنترل مبدل ایستگاه شارژ یا مبدل DC-DC در وسیله نقلیه الکتریکی نیز می‌باشد. در مرجع [۶] راه حلی برای بهینه‌سازی شبکه‌های جبرانی برای کاهش حساسیت ولتاژ خروجی با توجه به ناهماهنگی و بهبود کارایی سیستم کلی ارائه می‌دهد. چهار توپولوژی با جزئیات مطالعه شده و شبکه جبران بهینه برای هر توپولوژی توسعه داده شده است. همه توپولوژی‌ها از جنبه‌های مختلف مانند تغییرات ولتاژ خروجی، میانگین راندمان، تعداد و اندازه قطعات و توزیع تلفات توان بهینه شده و مقایسه می‌شوند. در میان توپولوژی‌های مختلف تشدید، LCC-LCC بهترین عملکرد را از نظر تغییرات ولتاژ خروجی برای طیف گسترده‌ای از ضرایب کوپلینگ ارائه کرد. سیستم‌های شارژ بدون سیم به کوپلینگ القایی بین شارژر و دستگاه گیرنده نیاز دارند و ناهماهنگی بین این دو تلفات سیستم را افزایش خواهد داد. در مرجع [۷]، آرایش جدیدی از سیم‌پیچ‌های حسگر برای تشخیص ناهماهنگی بین یک شارژر بدون سیم متحرک و یک ربات متحرک استفاده شده است. داده‌های حاصل از سیم‌پیچ‌های حسگر در کنترل دو حلقه‌ای ربات استفاده می‌شود. حلقه داخلی سرعت ربات را کنترل می‌کند و از یک تنظیم‌کننده درجه دوم خطی با عملکرد یکپارچه تشکیل شده است. حلقه بیرونی بر اساس قرائت سیم‌پیچ‌های حسگر، سرعت‌های مرجع را برای حلقه داخلی فراهم می‌کند. طرح مدولاسیون دیجیتال (IBMC) برای شارژر خودروی برقی بدون سیم

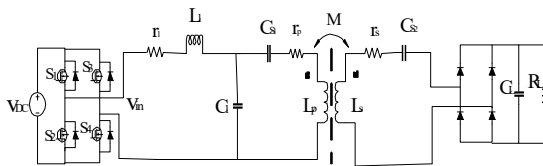
ارائه شده است. یک IBMC می‌تواند ولتاژ موج مربعی تقویت‌شده با دامنه قابل کنترل تولید و توان را به طور موثر در یک بار گسترده و یا محدوده کوپلینگ تنظیم کند و در عین حال به کلیدزنی ولتاژ صفر (ZVS) برای همه کلیدها دست یابد. در مرجع [۸] بر اصول عملکرد حالت پایدار طرح مدولاسیون دیجیتالی پیشنهادی تمرکز دارد. ملاحظات عملی کلیدی، مانند متعادل‌سازی ولتاژ خازن و انتخاب دستگاه نیمه‌رسانا، برجسته شده‌اند. مزیت کلیدی طرح مدولاسیون دیجیتالی، توانایی آن در تولید یک موج مربعی شکل تقویت شده با دامنه قابل کنترل است که می‌تواند عملکرد ZVS همه سوئیچ‌ها را در کل محدوده عملیاتی تضمین کند. به منظور تضمین عملکرد کلیدزنی ولتاژ صفر برای سیستم انتقال توان بدون سیم، زاویه فاز ورودی سمت اولیه به عنوان یک مقدار مثبت در نظر گرفته می‌شود. زاویه فاز ورودی در شرایط مختلف کوپلینگ و بار، مثبت باقی می‌ماند. در مرجع [۹]، یک روش طراحی بهینه برای شبکه جبرانی سری LCC برای یک شارژر ثابت خودروی الکتریکی بدون سیم (EV) پیشنهاد شده است. تمرکز اصلی این مقاله بهینه‌سازی شبکه تشدید مناسب برای حالت بدون بار تا بار کامل است. روش پیشنهادی از یک راندمان میانگین وزنی زمان در شرایط مختلف کوپلینگ، برای دستیابی به راندمان بالا در محدوده بدون بار تا بار کامل استفاده می‌کند. مبدل‌های الکترونیک قدرت در منابع تغذیه سیستم‌های الکترونیکی زیر دریا، به صورت سری در امتداد کابل توزیع متصل می‌شوند تا توان بارهای حسگر و وسایل نقلیه زیر آب را تأمین نمایند. در مرجع [۱۰]، یک سیستم شارژ القایی با ولتاژ خروجی ثابت برای وسایل نقلیه زیرآبی خودران که از کابل توزیع جریان dc ثابت تغذیه می‌شوند، با استفاده از شبکه جبران سری توسعه داده می‌شود. تجزیه و تحلیل حالت پایدار برای نشان دادن ویژگی‌های خروجی ولتاژ ثابت و قابلیت کنترل ولتاژ خروجی از طریق مدولاسیون تغییر فاز اینورتر ارائه شده است. همچنین یک تحلیل برای کیفیت مخازن تشدید ارائه شده تا نشان دهد که چگونه طراحی توپولوژی، برای محدوده توان مورد نیاز تأثیر می‌گذارد. ساختار خازن کنترل‌شده کلید^۹ (SCC) برای تنظیم

^۸Zero Voltage Switching

^۹Switched-Controlled-Capacitance

^۶Electrical Vehicle

^۷Integrated Boost Multilevel Converter



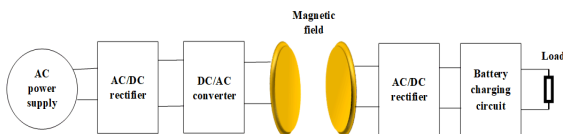
شکل ۱- ساختار پیشنهادی با یک شبکه جبران سازی LCC سری

۲- اصول و مبانی

۲-۱- بلوک دیاگرام پیشنهادی

شکل ۲ بلوک دیاگرام یک سیستم انتقال توان بدون سیم را نشان می‌دهد. این سیستم از دو بخش اولیه و ثانویه تشکیل شده است. تأمین توان ورودی از جریان متناوب (AC) فرکانس پایین (۵۰ هرتز) دریافت می‌شود. برای انتقال توان الکتریکی، بخش مرکزی شارژر بدون سیم از یک مبدل DC/DC تشکیل شده است.

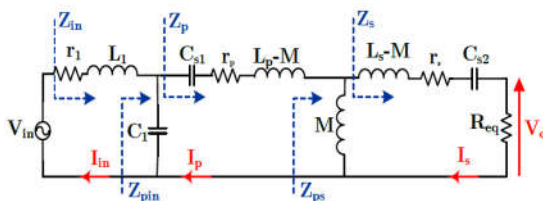
انتقال توان بین فرستنده و گیرنده به صورت الکترومغناطیسی و ترانسفورماتوری انجام می‌شود. در گیرنده ولتاژ AC یکسو شده و پس از کنترل سطح ولتاژ بر روی لینک ولتاژ DC قرار می‌گیرد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام ساختار پیشنهادی

۲-۲- مدار معادل ساختار پیشنهادی

مدار معادل سیستم انتقال توان بدون سیم پیشنهادی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- مدار معادل سیستم انتقال توان بدون سیم پیشنهادی

رابطه (۱) سری فوریه ولتاژ خروجی اینورتر V_{in} و رابطه (۲) مقدار RMS مؤلفه اصلی V_{in} می‌باشد. در این روابط، θ تغییر فاز کلیدزنی بین پایه‌های اینورتر تمام پل می‌باشد.

خازن تشدید ثانویه استفاده می‌شود. به کمک ساختار SCC، می‌توان خروجی شارژر با جریان ثابت^۱ (CC) و شارژر با ولتاژ ثابت^۱ (CV) مستقل از بار را در دو فرکانس کاری متفاوت تحت شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر برای کلیدهای اینورتر به دست آورد. در مرجع [۱۱]، ساختار خازن سوئیچ کنترل شده (SCC) مورد بررسی قرار گرفته است. سپس یک توپولوژی ترکیبی که در آن SCC برای تنظیم خازن تشدید ثانویه استفاده می‌شود، برای دستیابی به جریان و ولتاژ خروجی مستقل از بار تحت دو فرکانس کاری متفاوت پیشنهاد می‌شود. به طور همزمان، سوئیچینگ نرم تمام دستگاه‌های قدرت نیز در کل دوره شارژ قابل تحقق است. امروزه قطعات نیمه‌هادی قدرت در معرض افزایش ولتاژ و جریان و تنش‌های حرارتی قرار می‌گیرند. تلفات کلیدزنی در سمت اولیه مبدل یک سیستم انتقال توان بدون سیم با فراهم شدن شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر در طول فرآیند شارژ باتری، کاهش می‌یابد. در مرجع [۱۲] یک روش کنترل جدید را برای کنترل دینامیکی زاویه ZVS سیستم WPT در حالی که جریان و ولتاژ خروجی را در سطح مورد نظر حفظ می‌کند، مورد بحث قرار می‌دهد. شارژر CC و CV با اجرای طرح مدولاسیون تغییر فاز سنتی بر روی اینورتر تمام پل به دست آمد و زاویه ZVS با اجرای یک خازن تنظیم کنترل شد.

در این مقاله، تغییرات فاصله سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه در شارژر بدون سیم بررسی، و مقدار فرکانس تشدید در فاصله‌های مختلف محاسبه می‌گردد. پس از آن، محدوده مجاز فرکانس کلیدزنی مشخص می‌شود. شکل ۱ ساختار پیشنهادی با شبکه جبران سازی LCC (سلف، خازن، خازن) را نشان می‌دهد.

در ادامه، در بخش دوم بلوک دیاگرام و مدار معادل پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته است، در بخش سوم ساختار پیشنهادی شبیه‌سازی و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری بیان شده است.

^۱Constant Current

^۱Constant Voltage

$$\Re\{Z_s\} = r_s + R_{eq} \quad (12)$$

$$\Im\{Z_{in}\} = \omega L_1 + \Re\{Z_{P_{in}}\} = \omega L_1 - \frac{\omega C_1 \Im\{Z_P\} \Re\{Z_P\}}{(1 - C_1 \omega \Im\{Z_P\})^2 + (C_1 \omega \Re\{Z_P\})^2} \quad (13)$$

$$\Im\{Z_P\} = \omega \left(L_1 - \frac{1}{C_{s1} \omega^2} \right) + \Im\{Z_{PS}\} = \quad (14)$$

$$\left(L_1 - \frac{1}{C_{s1} \omega^2} \right) - \frac{(M\omega)^2 (\Im\{Z_s\} + M\omega)}{\Re\{Z_s\}^2 + (\Im\{Z_s\} + M\omega)^2}$$

$$\Im\{Z_s\} = \omega \left(L_s - M - \frac{1}{\omega^2 C_{s2}} \right) \quad (15)$$

توان ورودی و توان خروجی مبدل طبق روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند:

$$P_{in} = |I_{in}|^2 \Re\{Z_{in}\} \quad (16)$$

$$P_{out} = |I_s|^2 R_{eq} \quad (17)$$

انتقال توان در شارژر بدون سیم رابطه مستقیم با تغییرات فاصله دارد. با تغییرات فاصله میان سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده، ضریب کوپلینگ (K) تغییر می‌کند که طبق رابطه (۱۸) به اندوکتانس متقابل و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه بستگی دارد.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_p \times L_s}} \quad (18)$$

که L_s و L_p اندوکتانس سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه و M اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها می‌باشد. فرکانس تشدید از طریق سلف و خازن‌های معادل طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$F_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_{eq}}} \quad (19)$$

برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم به روش ZVS باید فرکانس کلیدزنی (F_s) از فرکانس تشدید (F_r) بزرگ‌تر باشد.

$$V_{in} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin \frac{\theta}{2} \sin(n\omega t) \quad (1)$$

$$V_{in,rms} = \frac{2\sqrt{2} V_{dc}}{\pi} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

با فرض یک مقدار بزرگ برای C_L ، مقاومت معادل R_{sq} سمت ثانویه را می‌توان به صورت رابطه (۳) نوشت:

$$R_{sq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (3)$$

با توجه به شکل ۳، امپدانس‌های Z_p ، Z_{ps} ، Z_s طبق روابط (۴) تا (۷) محاسبه می‌شوند.

$$Z_s = R_{sq} + r_s + j\omega \left((L_s - M) - \frac{1}{\omega^2 C_{s2}} \right) \quad (4)$$

$$Z_{ps} = j\omega M \parallel Z_s = j\omega M + \frac{(M\omega)^2}{R_{sq} + r_s + j\omega \left(L_s - \frac{1}{C_{s2} \omega^2} \right)} \quad (5)$$

$$Z_p = r_p + j\omega \left((L_p - M) - \frac{1}{\omega^2 C_{s1}} \right) + Z_{ps} \quad (6)$$

$$Z_{in} = r_1 + \omega L_1 j \parallel Z_p \parallel \frac{1}{\omega C_1} \quad (7)$$

ϕ زاویه بین ولتاژ (V_{in}) و جریان (I_{in}) خروجی اینورتر تمام‌پل (زاویه فاز ورودی مدار معادل سیستم) است که با تجزیه بخش‌های حقیقی و موهومی امپدانس ورودی مبدل (Z_{in}) طبق روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{Z_{in}} = \left| \frac{V_{in}}{Z_{in}} \right| \angle \phi \quad (8)$$

$$\phi = \angle Z_{in} = \tan^{-1} \frac{\Im\{Z_{in}\}}{\Re\{Z_{in}\}} \quad (9)$$

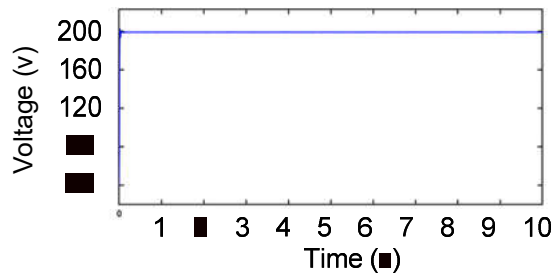
مقادیر حقیقی و موهومی Z_{in} طبق روابط (۱۰) تا (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$\Re\{Z_{in}\} = r_1 + \Re\{Z_{P_{in}}\} = r_1 + \Re\{Z_P\} \frac{[(1 - C_1 \omega \Im\{Z_P\}) + C_1 \omega \Re\{Z_P\}]}{(1 - C_1 \omega \Im\{Z_P\})^2 + (C_1 \omega \Re\{Z_P\})^2} \quad (10)$$

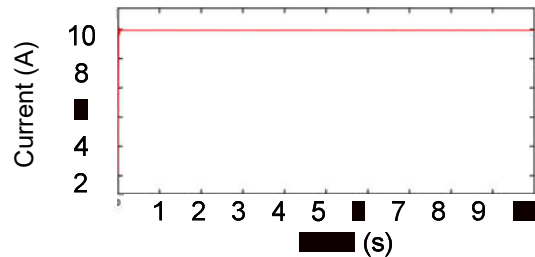
$$\Im\{Z_P\} = r_p + \frac{(\omega M)^2 \Re\{Z_s\}}{(\Re\{Z_s\} + \omega M)^2 + \Im\{Z_s\}^2} \quad (11)$$

۳- شبیه سازی ساختار پیشنهادی

شکل موج ولتاژ و جریان خروجی برای $K = 0.9$ و فرکانس کلیدزنی (F_s) برابر 85 kHz به صورت شکل ۴ می باشد. مشاهده می شود که ولتاژ و جریان خروجی به ترتیب 200 V و 10 A می باشد، در نتیجه توان خروجی 2000 W به دست می آید. در این حالت ولتاژ و جریان ورودی مبدل به ترتیب 200 V و 11.78 A می باشد. در نتیجه بازده مبدل طبق رابطه (۲۰) محاسبه می شود.



الف) شکل موج ولتاژ خروجی



ب) شکل موج جریان خروجی

شکل ۴- شکل موج های خروجی (الف) ولتاژ خروجی

(ب) جریان خروجی

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (20)$$

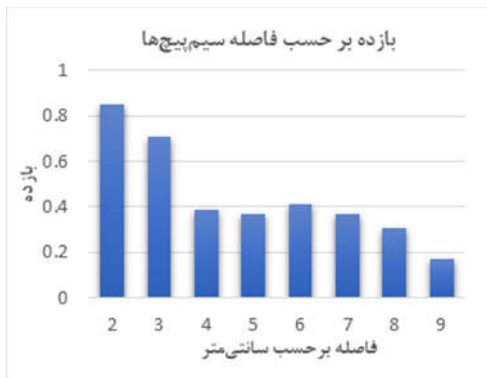
$$= \frac{200 \times 10}{200 \times 11.78} \times 100 = 84.8\%$$

بازده مبدل در این حالت همراه با جبران سازی $0.84/8$ می باشد. در ادامه، ساختار جبران سازی مبدل را حذف نموده و بازده مبدل را محاسبه می کنیم. تأثیر جبران سازی بر بازده مبدل مشاهده می شود. در این حالت ولتاژ و جریان خروجی به ترتیب 18 V و 0.9 A می باشد، در نتیجه توان خروجی 16.2 W به دست می آید. در این حالت ولتاژ و جریان ورودی مبدل به ترتیب 200 V و 2.36 A می باشد. در نتیجه بازده مبدل طبق رابطه (۲۰) محاسبه می شود.

$$\eta = \frac{18 \times 0.9}{200 \times 2.36} \times 100 = 3.43\%$$

مشاهده می شود که ساختار جبران سازی تأثیر خوبی بر بازده مبدل می گذارد. ولتاژ خروجی V_o به کوپلینگ متقابل، فرکانس کلیدزنی و ولتاژ خروجی اینورتر V_{in} بستگی دارد. هم چنین نتایج شبیه سازی برای مبدل پیش نهادی نشان داد که زاویه فاز جریان ورودی به اینورتر (I_{in}) برای ایجاد شرایط ZVS مثبت می باشد. جدول ۱ بازده مبدل را طبق مقادیر ضریب کوپلینگ (K) و اندوکتانس متقابل سیم پیچ ها (M) بر اساس فواصل مختلف طبق نتایج شبیه سازی نشان می دهد.

نمودار شکل ۵ بازده مبدل را بر حسب فاصله سیم پیچ های اولیه و ثانویه طبق نتایج جدول ۱ نشان می دهد. شکل موج ولتاژ و جریان کلیدهای مبدل تمام پل بر حسب زمان در شرایط کوپلینگ مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با روشن شدن کلیدها، ابتدا ولتاژ کلید صفر می شود سپس جریان آن به آرامی افزایش می یابد که بیانگر ایجاد شرایط ZVS برای فاصله های مختلف سیم پیچ های اولیه و ثانویه است. شرایط ZVS برای ولتاژ خروجی 200 V و جریان خروجی 10 A در همه حالت ها می باشد. مقادیر L_s و L_p برابر $100 \mu\text{H}$ می باشد.



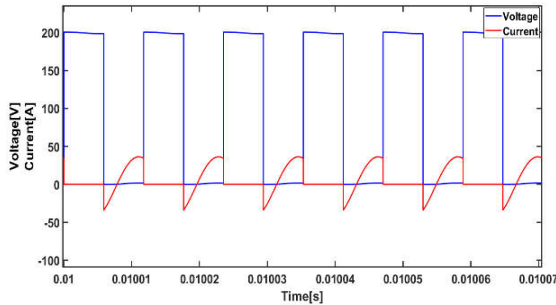
شکل ۵- بازده مبدل بر حسب فاصله سیم پیچ ها از یکدیگر

برای ایجاد شرایط ZVS برای کلیدهای اینورتر باید زاویه فاز جریان نسبت به ولتاژ خروجی اینورتر مثبت باشد. شکل ۷ شکل موج های جریان و ولتاژ خروجی اینورتر را برای شرایط کوپلینگ $K=0.9$ ، $K=0.75$ و $K=0.6$ نشان می دهد. در فواصل کم میان سیم پیچ ها زاویه جریان نسبت به ولتاژ خروجی اینورتر مثبت است و در نتیجه شرایط ZVS برقرار است. برای $K=0.6$ شکل موج جریان نسبت به ولتاژ کمی عقب تر است، لذا با

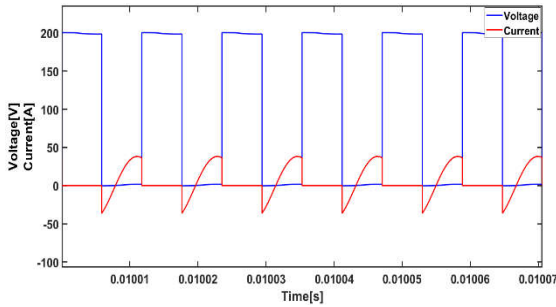
کاهش ضریب کوپلینگ و افزایش فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، شرایط ZVS به‌خوبی برقرار نشده و عملکرد ZVS برای کلیدهای مبدل ضعیف می‌شود. در ادامه یک مقایسه‌ای بین کار انجام شده از نظر شرایط کوپلینگ و بازه کلیدزنی نرم با سایر منابع در جدول ۲ گزارش شده‌است.

جدول ۱- مقادیر ضریب کوپلینگ (K) و اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌ها (M) به ازای فواصل مختلف

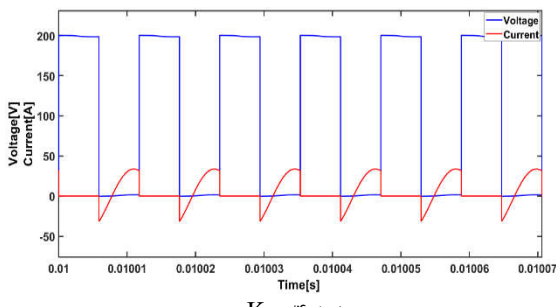
فاصله بر حسب cm	ضریب کوپلینگ (K)	اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌ها (M)	بازده
۲	۰/۹	۹۰ μH	٪۸۴/۸
۳	۰/۷۵	۷۵ μH	٪۷۰/۸
۴	۰/۶	۶۰ μH	٪۳۸/۵
۵	۰/۵	۵۰ μH	٪۳۶/۶
۶	۰/۴	۴۰ μH	٪۴۱/۲
۷	۰/۳۵	۳۵ μH	٪۳۷/۱
۸	۰/۳	۳۰ μH	٪۳۰/۶
۹	۰/۲	۲۰ μH	٪۱۷



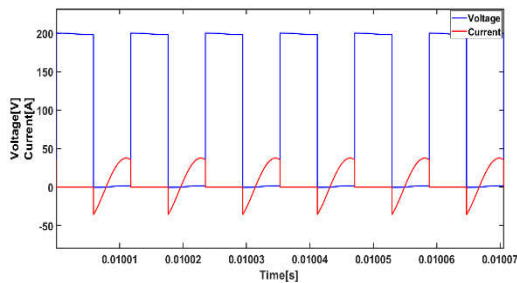
$K=0.6$ (پ)



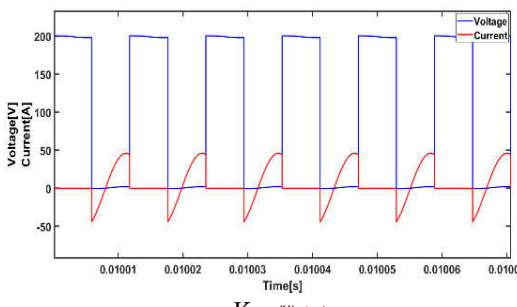
$K=0.5$ (ت)



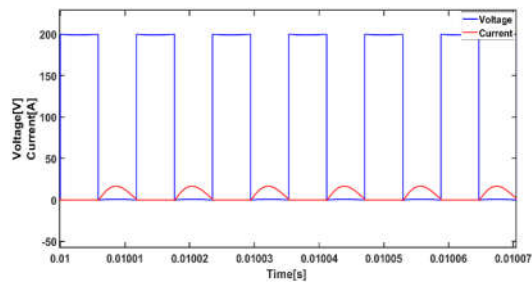
$K=0.4$ (ث)



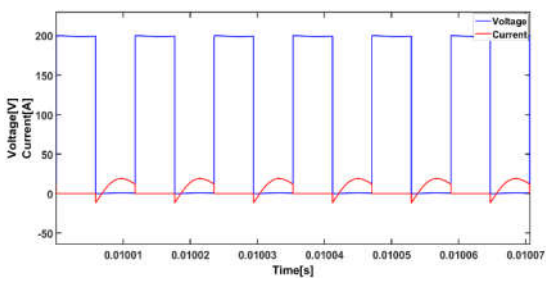
$K=0.35$ (ج)



$K=0.3$ (چ)



$K=0.9$ (الف)



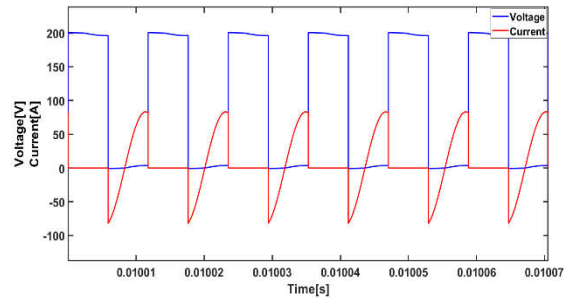
$K=0.75$ (ب)

جدول ۲- مقایسه کار انجام شده با سایر منابع

مقایسه شرایط کوپلینگ و بازه کلیدزنی نرم	مراجع
با افزایش فاصله ۲۰ سانتی متری سیم پیچ‌ها بازده مبدل ۵,۶ درصد افزایش می‌یابد. با قرار دادن شارژر در قسمت پشتی EV، می‌توان فاصله سیم پیچ‌ها را به حداقل رساند. یک سیستم کنترلی تصحیح کننده موقعیت که نیازی به حسگر ندارد، در فاصله ۵ سانتی متری سیم پیچ‌ها ارائه شد.	[۱]
در میان توپولوژی‌های مختلف تشدید، LCC-LCC بهترین عملکرد را از نظر تغییرات ولتاژ خروجی برای طیف گسترده‌ای از فاکتورهای کوپلینگ از $K=0.18$ تا $K=0.32$ ارائه کرد. با در نظر گرفتن میانگین کارایی ساختارها، LCC-LCC بهترین ساختار در جابجایی سیم پیچ‌ها است.	[۶]
هشت سیم پیچ حسگر برای تشخیص ناهماهنگی جانبی بین سیم پیچ‌های فرستنده و گیرنده شارژر استفاده می‌شود. تا زمانی که یک یا چند سیم پیچ حسگر در ناحیه بالای شارژر باقی بماند، سیم پیچ‌های حسگر گزارشی از ناهماهنگی ارائه می‌دهند.	[۷]
یک طرح مدولاسیون دیجیتال جدید را پیشنهاد می‌کند که می‌تواند توسط IBMC شرایط ZVS را در محدوده کوپلینگ مختلف ایجاد کند.	[۸]
برای دستیابی به یک طراحی بهینه، یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شد که در آن تابع هدف شامل یک بازه وزن دار زمان برای شرایط کوپلینگ مختلف بود. نتایج شبیه‌سازی برای مبدل پیشنهادی نشان داد که زاویه فاز ورودی در شرایط مختلف کوپلینگ و بار مثبت باقی می‌ماند.	[۹]
ایجاد شرایط کلیدزنی نرم به روش ZVS برای شرایط کوپلینگ مختلف در فاصله ۲ الی ۹ سانتی متری سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه با روش اضافه کردن ساختار جبران ساز به مدار و تطبیق سلف و خازن اولیه این ساختار	مبدل پیشنهادی

۴- نتیجه گیری

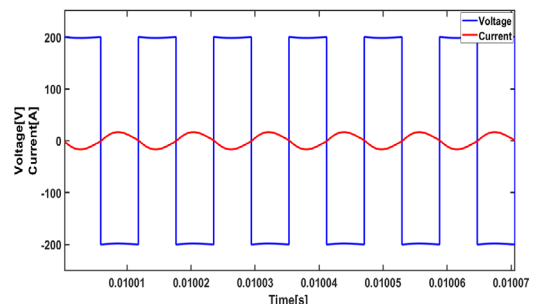
در این مقاله تغییرات فرکانس تشدید در مدارهای شارژر بدون سیم دینامیک مورد استفاده در زیردریایی‌ها بررسی شده‌است. ساختار مورد استفاده در این مقاله مبدل تمام پیل می‌باشد. ساختار جبران سازی LCC مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات فرکانس تشدید در ضرایب کوپلینگ مختلف بررسی و شبیه سازی شده‌است. با افزودن مدار جبران ساز به مبدل ارائه شده موجب شد شرایط ZVS در فاصله ۲cm تا ۹cm میان سیم پیچ فرستنده و گیرنده فراهم شود. برای افزایش بازه کلیدزنی نرم، ساختار جبران ساز LCC بسیار مناسب است و در این ساختار با تطبیق مناسب سلف و خازن اولیه ساختار جبران ساز، فرکانس تشدید از فرکانس کلیدزنی کوچک تر می‌شود. مبدل در مد جریان پیوسته



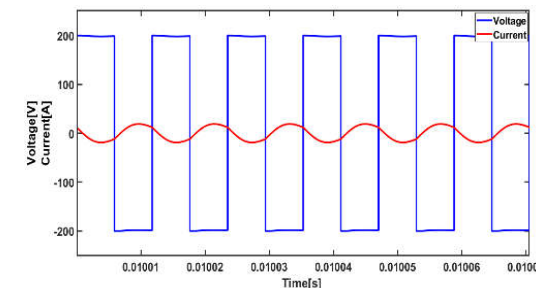
شکل ۶- (ح) $K=0.2$

شکل ۶- شکل موج ولتاژ و جریان کلیدهای مبدل تمام پیل در شرایط کوپلینگ مختلف. الف) $K=0.9$ ، ب) $K=0.75$ ، پ) $K=0.16$ ، ت) $K=0.5$ ، ث) $K=0.4$ ، ج) $K=0.35$ ، چ) $K=0.3$

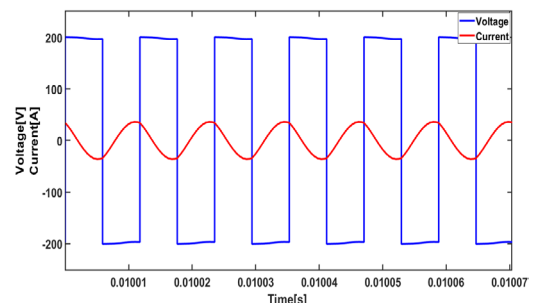
شکل ۶- (ح) $K=0.2$



شکل ۶- الف) $K=0.9$



شکل ۶- ب) $K=0.75$



شکل ۶- پ) $K=0.16$

vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 6732-6740, 2019.

[5] Wang, Hongjie and Pratik, Ujjwal and Jovicic, Aleksandar and Hasan, Nazmul and Pantic, Zeljko, "Dynamic Wireless Charging of Medium Power and Speed Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 12, pp. 12552-12566, 2021.

[6] Ramezani, Ali and Narimani, Mehdi, "Optimized electric vehicle wireless chargers with reduced output voltage sensitivity to misalignment," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3569-3581, 2019.

[7] Cortes, Ivan and Kim, Won-Jong, "Automated alignment with respect to a moving inductive wireless charger," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 605-614, 2021.

[8] Wang, Wenwei Victor and Thrimawithana, Duleepa J and Neuburger, Martin, "An Si MOSFET-Based High-Power Wireless EV Charger With a Wide ZVS Operating Range," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11163-11173, 2021.

[9] Ramezani, Ali and Farhangi, Shahrokh and Iman-Eini, Hossein and Farhangi, Babak and Rahimi, Ramin and Moradi, Gholam Reza, "Optimized LCC-series compensated resonant network for stationary wireless EV chargers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 4, pp. 2756-2765, 2018.

[10] Bagchi, Anindya Chitta and Saha, Tarak and Kamineni, Abhilash and Zane, Regan, "Analysis and design of a wireless charger for underwater vehicles fed from a constant current distribution cable," in *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL, 2018)*, pp. 1-8.

[11] Cheng, Bing and He, Liangzong, "Realize load-independent output with soft switching based on switched capacitor for wireless charger system," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10094-10104, 2021.

[12] Kavimandan, Utkarsh D and Mahajan, Satish M and Van Neste, Charles W, "Analysis and demonstration of a dynamic ZVS angle control using a tuning capacitor in a wireless power transfer system," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 1876-1890, 2020.

(CCM) کار می‌کند و شرایط کلیدزنی نرم در مبدل برقرار است. طبق نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که در $K=0.4$ حالت بهینه‌ای برای جبران‌سازی اتفاق می‌افتد و بازده مبدل در این حالت مناسب است. براساس نتایج شبیه‌سازی شرایط ZVS برای کم‌ترین فاصله میان سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه یعنی $K=0.9$ بسیار مناسب است. همچنین با توجه به این که برای ایجاد شرایط ZVS باید زاویه جریان نسبت به ولتاژ خروجی اینورتر مثبت باشد، برای ضرایب کوپلینگ $K=0.9$ و $K=0.75$ یعنی فواصل کم میان سیم‌پیچ‌ها زاویه جریان نسبت به ولتاژ خروجی اینورتر مثبت است و در نتیجه شرایط ZVS برقرار است. برای $K=0.6$ شکل موج جریان نسبت به ولتاژ کمی عقب‌تر است لذا با کاهش ضریب کوپلینگ و افزایش فاصله بین سیم‌پیچ‌ها، شرایط ZVS به‌خوبی برقرار نشده و عملکرد ZVS برای کلیدهای مبدل ضعیف می‌شود و در نتیجه تلفات کلیدزنی افزایش می‌یابد. هر چقدر فرکانس کلیدزنی بزرگ‌تر باشد، با افزایش فاصله‌ی سیم‌پیچ‌ها فرکانس تشدید دیرتر به فرکانس کلیدزنی می‌رسد و لذا مبدل در بازه بزرگ‌تری در حالت جریان پیوسته کار می‌کند.

مراجع

[1] Khan, Nameer and Matsumoto, Hirokazu and Trescases, Olivier, "Wireless electric vehicle charger with electromagnetic coil-based position correction using impedance and resonant frequency detection," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 8, pp. 7873-7883, 2020.

[2] Kim, Jongwook and Kim, Kibeom and Kim, Haerim and Kim, Dongwook and Park, Jaehyoung and Ahn, Seungyoung, "An efficient modeling for underwater wireless power transfer using Z-parameters," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no.6, pp. 2006-2014, 2019.

[3] Cai, Chunwei and Zhang, Yanyu and Wu, Shuai and Liu, Jinqun and Zhang, Zhipeng and Jiang, Longyun, "A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65432-65442, 2020.

[4] Zakerian, Ali and Vaez-Zadeh, Sadeh and Babaki, Amir, "A dynamic WPT system with high efficiency and high power factor for electric

بررسی پسای اصطکاکی در سکان مدل مجهز به میکروریبلت دندانه‌ای با مقطع NACA0025 با استفاده از شبیه‌سازی عددی

غلامرضا صالحی^۱، پویان ادیبی^۲، سعید نیازی^۳، طالب زارعی^۴

۱- دانشجوی دکترای دانشگاه هرمزگان

۲ و ۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

چکیده:

بحران انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی از چالش‌های مهمی است که بشر در عصر حاضر با آن روبرو است. کاهش سوخت‌های فسیلی نیز اهمیت اندیشیدن چاره‌ای برای این چالش‌ها را دوچندان می‌نماید. یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی، شناخت نیروی‌های مقاوم و یافتن راه‌هایی برای غلبه بر آنها است. کاهش نیروی پسا می‌تواند به کاهش مصرف سوخت و افزایش سرعت کاربری منجر گردد. در صنعت حمل‌ونقل دریایی و جابجایی شناورها در دریا که بیش از ۹۰ درصد حمل‌ونقل جهان را شامل می‌گردد؛ مقابله با نیروی مقاومی که بر شناورها و متعلقات آن از سوی آب وارد می‌شود؛ بسیار ضرورت دارد. یکی از موارد مهمی که در طراحی شناور باید مدنظر قرار گیرد بررسی وضعیت کاهش پسا در متعلقات است که کمتر مورد توجه محققان قرار می‌گیرد. سکان از متعلقات زیرآبی در انواع شناورهای دریایی است. در این پژوهش به مطالعه کاهش نیروی پسای وارد از سوی آب به سکان پرداخته می‌شود. مطالعه موردی بر روی سکانی با مقطع NACA0025 انجام شده است. ریبلت‌ها در چند نسبت مختلف بر روی هیدروفویل سکان ایجاد و نیروی پسای اعمال‌شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار استارسی‌ام محاسبه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت ارتفاع ریبلت صد میکرون و فاصله دویست میکرون، بیشترین میزان کاهش پسا به اندازه ۱۲/۵ درصد مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

ریبلت، پسا، نیروی مقاومت، هیدروفویل، میکروریبلت.

Investigating the Effect of Riblets on Frictional Drag Reduction on a Rudder Hydrofoil: A Numerical Simulation

Gholamreza salehi¹, Pouyan Adibi², Saeid niazi³, Taleb zareei⁴

1,2,3,4 Department of Mechanical Engineering, Hormozgan university, bandar abbas, Iran

Abstract:

The energy and environmental crisis pose significant challenges to humanity, necessitating solutions to reduce energy consumption. In the marine transportation industry, where over 90% of global transportation occurs, addressing resistance forces acting on vessels and their components in water is crucial for efficient design. The rudder, an essential underwater accessory in marine vessels, plays a vital role in drag reduction, leading to improved fuel efficiency and performance. This research focuses on investigating the reduction of drag force exerted by water on a rudder with NACA0025 section. Riblets of varying dimensions are implemented on the rudder hydrofoil, and the resulting drag force is calculated using simulation in STAR CCM software. The findings reveal that a riblet height of 100 microns and a distance of 200 microns yield the maximum drag reduction of 12.5%.

Keywords:

Riblet, Drag, Resistance Force, Hydrofoil, Microriblet.

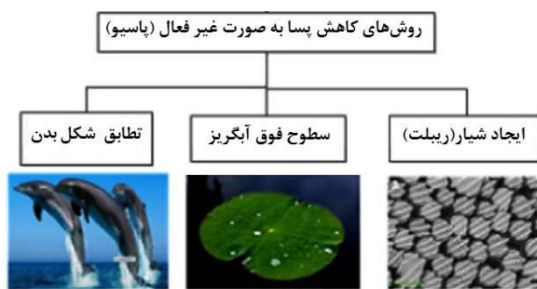
۱- مقدمه

کاربرد شناورهای تندرو بسیار متداول شده است. استفاده از این نوع شناور در زمینه‌های تفریحی، نظارتی و حتی نظامی باعث شده تقاضا برای طراحی، ساخت و به دنبال آن دستیابی به سرعت‌های بالاتر افزایش چشمگیری داشته باشد. تاکنون پژوهش‌های فراوان و معتبری در دنیا و همچنین توسط محققان داخلی بر روی انواع شناورهای تندرو صورت پذیرفته است. [۱-۷]. با توجه به بحران‌هایی مانند آلودگی هوا، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های بالای تولید، جابجایی و مصرف سوخت که در دنیا وجود دارد تحقیقات بسیاری برای به حداقل رساندن این بحران‌ها صورت پذیرفته است [۸-۱۱].

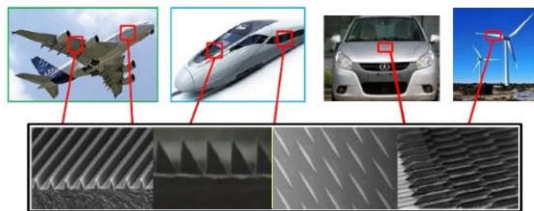
از دیرباز ارجاع به طبیعت برای حل چالش‌های بشری در جوامع اولیه مرسوم بوده و در جوامع مدرن نیز محققین برای حل چالش‌های پیچیده در صنایع به سراغ عوامل طبیعی رفته و با الهام از روشی که طبیعت این مشکلات را حل یا تعدیل نموده به دنبال راهکاری برای فائق آمدن بر چالش‌های صنعتی هستند. یکی از چالش‌هایی که در صنایع هوایی و دریایی عامل مصرف سوخت است نیروی پسا یا وارده از طرف سیال به اجزای مختلف متحرک‌های دریایی و هوایی است. تحقیقات روزافزونی در این خصوص انجام گردیده است [۱۲-۱۳]. روش‌های کاهش پسا در صنایع پیشرفته به دودسته عمده فعال و غیرفعال تقسیم می‌گردند [۱۴]. به روش‌هایی که نیاز به مصرف انرژی جداگانه دارند مانند پاشش گاز یا حباب، در لایه‌مرزی یا قسمتی از بدنه، گرم کردن یا سرد کردن بخشی از دیواره تماس جسم متحرک با سیال، ایجاد مکش در قسمتی از دیواره مشترک با سیال [۱۵-۱۷]، روش‌های فعال یا اکتیو و همچنین روش‌هایی که نیاز به مصرف جداگانه انرژی نداشته و با تغییرات کلی در شکل یا فرم بدنه یا استفاده از ابزار و روش خاص، عامل کاهش پسا می‌گردند مانند استفاده از ریبلت‌ها، سطوح آب‌گریز و سطوح نرم و انعطاف‌پذیر، روش‌های غیرفعال یا پاسیو می‌گویند [۱۸-۲۲]. از آن‌جاکه موضوع کاهش نیروی پسا توسط ریبلت از موضوعات جاری در تحقیقات پژوهشگران است [۲۳-۲۸]، طبیعی است برای یافتن راه‌های جدید از روش مهندسی معکوس و با الهام از طبیعت مانند سایر چالش‌ها استفاده گردد [۲۹-۴۱]. بررسی پوست کوسه‌ماهی‌های سریع و مکانیزم شیارها، برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های روی آن باعث

الهام محققان برای استفاده از این ساختار جهت کاهش نیروی پسا در هیدرودینامیک و آیرودینامیک بوده است [۴۲]. در شکل (۲) نمونه‌هایی از کاربرد ریبلت‌ها در صنایع مختلف مشاهده می‌شود [۴۳].

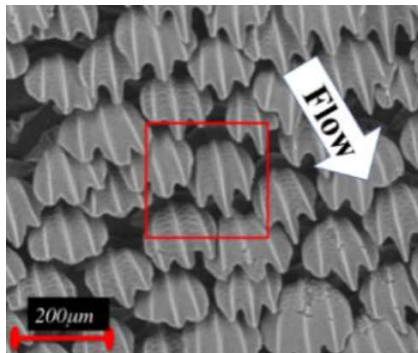
در شکل (۳) نیز وضعیت برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های روی سطح پوست کوسه که در واقع نقش شیار (ریبلت) را دارند به همراه راستای جریان مشخص گردیده است [۴۴]. شکل (۴) نیز مکمل تصویر واقعی است [۴۵]. در شکل (۵) نیز وضعیت قرارگیری ریبلت‌ها همراه با مقیاس فاصله و ابعاد ارائه گردیده است [۴۶].



شکل ۱- برخی روش‌های غیرفعال کاهش پسا [۴۲]

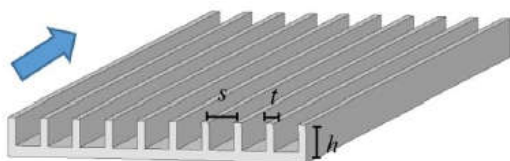


شکل ۲- استفاده از ریبلت در صنایع مختلف [۴۳]

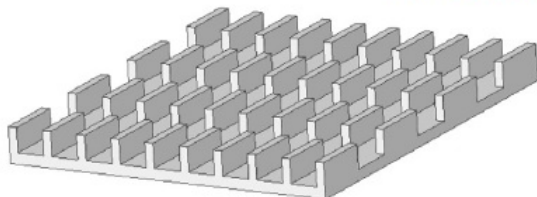


شکل ۳- وضعیت ریبلت روی پوست کوسه [۴۶]

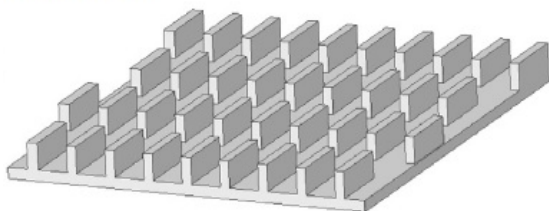
آرایش‌های مختلف نحوه قرارگیری ریبلت‌ها صرفاً برای یک نوع ریبلت (تیغه‌ای) نشان داده شده است.



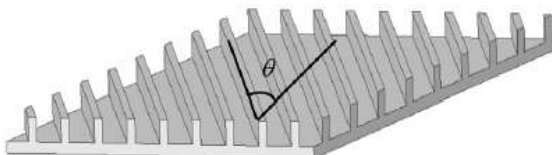
شکل ۷- ریبلت با آرایش ممتد



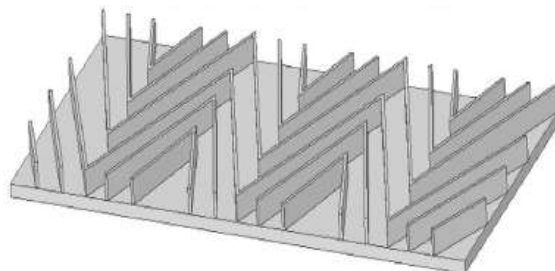
شکل ۸- ریبلت با آرایش غیر ممتد و پشت سرهم



شکل ۹- ریبلت با آرایش غیر ممتد و غیر پشت سرهم



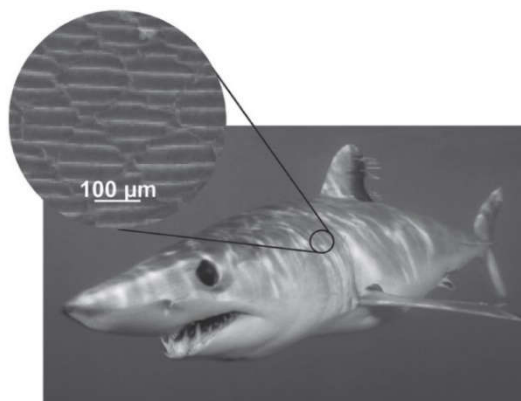
شکل ۱۰- ریبلت ممتد و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان



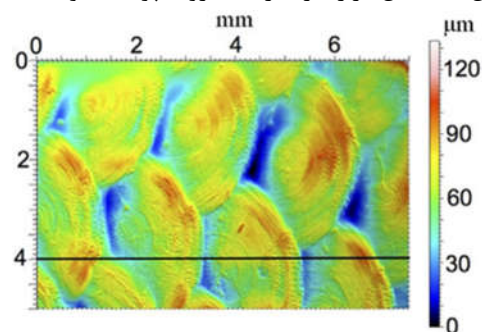
شکل ۱۱- ریبلت زاویه‌دار نسبت به جهت جریان و غیر ممتد

ابعاد مشخص شده در شکل‌های بالا بزرگ‌نمایی شده‌اند؛ ابعاد واقعی ریبلت در محدوده میکرون قرار دارد. این ابعاد در میزان درصد کاهش یا افزایش پسا نیز تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارند.

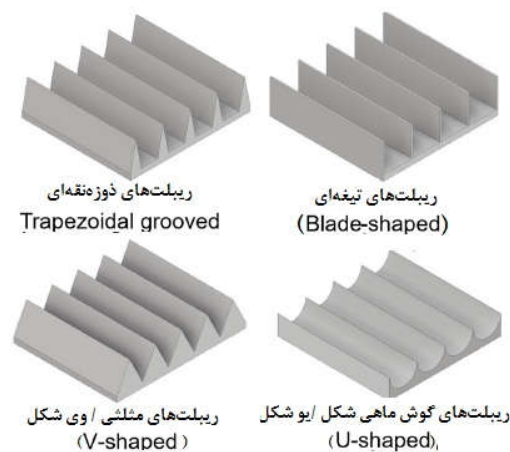
مؤلفه‌های مؤثر در میزان تأثیر ریبلت در کاهش پسا بسیار متنوع هستند. نوع ریبلت، عدد رینولدز، نسبت بی‌بعد ارتفاع و فاصله قرارگیری ریبلت‌ها از همدیگر هر کدام می‌تواند بر میزان کاهش و حتی افزایش پسا مؤثر



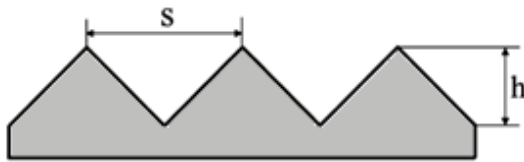
شکل ۴- محل قرارگیری ریبلت روی پوست کوسه [۴۵]



شکل ۵- نحوه قرار گرفتن ریبلت روی پوست ماهی [۴۶] ریبلت‌ها فرم‌ها و مدل‌های مختلفی دارند به نحوی که هم مدل ریبلت و هم نحوه قرارگیری و آرایش آن‌ها در کنارهم، در کاهش پسا مؤثر است. در شکل (۶) نمونه‌های اصلی که رایج است نشان داده شده است.



شکل ۶- مدل ریبلت‌های مرسوم در تحقیقات [۴۶] بیان شد علاوه بر شکل ریبلت‌ها، نحوه قرارگیری آن‌ها نیز در میزان کاهش پسا مؤثر است. نحوه قرارگیری ریبلت‌ها می‌تواند هم به صورت ممتد و هم به صورت بخش‌بخش ایجاد گردد که در آرایش‌های پشت سرهم و غیر پشت سرهم قرار می‌گیرد. در شکل‌های (۷) تا (۱۱)



شکل ۱۲- هندسه ریبلت دندانه‌ای

۲-۵- ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک تئوری صفحه صاف نیز که با عکس توان $0.1/2$ رینولدز ارتباط دارد طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$C_f = 0.074Re^{-0.2} \quad (4)$$

عدد رینولدز بستگی به سرعت سیال دارد.

۲-۶- اندازه بی‌بعد ارتفاع و فاصله ریبلت

رابطه‌های شماره (۵) و (۶) معادله ابعاد بی‌بعد مربوط به ریبلت هستند.

$$s^+ = \frac{sU}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (5)$$

$$h^+ = \frac{hU}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (6)$$

U در این روابط سرعت جریان است، ν ویسکوزیته سینماتیکی، S و h نیز به ترتیب فاصله و ارتفاع ریبلت‌ها برابر شکل شماره (۱۲) است. C_f نیز ضریب اصطکاک تئوری صفحه تخت که برابر رابطه (۴) (ضریب حل تئوری بلازیوس) تعریف می‌گردد.

۲-۷- درصد تأثیر ریبلت

در صد کاهش پسا در حضور ریبلت توسط رابطه (۷) تعریف می‌شود. این رابطه را می‌توان به صورت راندمان ریبلت نیز نشان داد که اختلاف دو ضریب پسا در حضور ریبلت و بدون حضور ریبلت است.

$$DR\% = 100 \times \frac{CD(with\ rib) - CD(no\ rib)}{CD(with\ rib)} \quad (7)$$

در این رابطه DR% مخفف در صد کاهش پسا است؛ در واقع اختلاف پسا در حضور ریبلت و پسا بدون حضور ریبلت است. اگر کاهش پسا را تحت عنوان راندمان تعریف کنیم می‌توان به صورت زیر نشان داد.

باشند. لذا بررسی حالت‌های مختلف از لحاظ عددی و تطبیق با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته ضروری است.

۲- مؤلفه‌های مؤثر در کاهش پسا با ریبلت

مؤلفه‌های زیادی وجود دارند که در میزان کاهش یا افزایش ضریب پسا مؤثرند. در این میان تعدادی مهم‌ترینند:

۲-۱- عدد رینولدز

اولین و یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر نیروی پسا عدد رینولدز است؛ که معادله آن به صورت رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

که در این معادله U سرعت جریان، L طول جسم (با Lx نیز نشان داده می‌شود) و ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال است.

۲-۲- ضریب پسا

معادله دوم، معادله ضریب پسا است:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U^2 s} \quad (2)$$

در معادله (۲) s, ρ, F_d به ترتیب نیروی پسا، چگالی سیال و سطح خیس شده (مساحت سطح تماس سیال و جسم) هستند؛ U نیز سرعت جسم در سیال یا سرعت سیال گذرنده در تماس با جسم ساکن است.

۲-۳- سرعت برشی

معادله سرعت برشی از رابطه (۳) به دست می‌آید که ریشه دوم نسبت تنش برشی به چگالی سیال است.

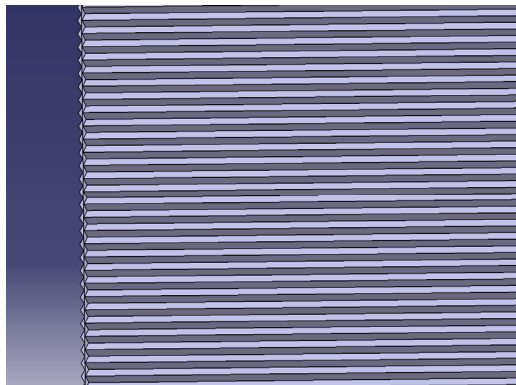
$$u_\tau = \left[\frac{\tau_w}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

۲-۴- مشخصات هندسی ریبلت دندانه‌ای

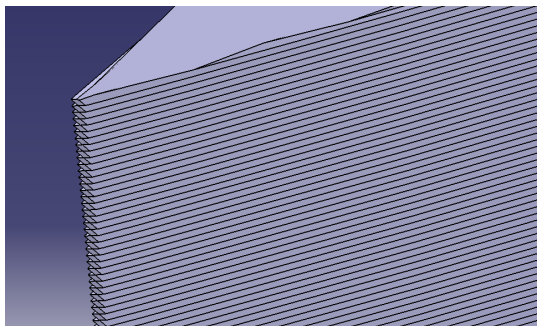
ارتفاع ریبلت از سطح صفحه پایه که با h نمایش داده می‌شود و فاصله هر ریبلت تا ریبلت بعدی که با S نمایش داده می‌شوند. هندسه این ابعاد در شکل (۱۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ارتفاع و فاصله ریبلت‌های روی مقطع

#	ارتفاع (h) متر	فاصله (s) متر
1	0.0001	0.0001
2	0.0001	0.00014
3	0.0001	0.0002
4	0.00025	0.0005
5	0.0005	0.0005



شکل ۱۵- شیارها (ریبلت) روی مقطع هیدروفویل



شکل ۱۶- شماتیک ریبلت روی سطح هیدروفویل سکان

۲-۲- مش‌بندی و دامنه حل

مش‌بندی‌ها نیز که یکی از جنبه‌های کلیدی اجرای شبیه‌سازی است با استفاده از نرم‌افزار استار سی سی‌ام صورت می‌گیرد. البته این فرآیند شامل مراحل مختلفی است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) چگونگی مش‌بندی اطراف هیدروفویل را نشان می‌دهد. اطراف ریبلت‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که وضعیت جریان قابل‌پایش باشد. به‌منظور مش‌بندی مؤثر، اطراف مؤثر مجموعاً از حدود ۳۷ میلیون سلول استفاده می‌گردد.

$$\eta = \frac{F(\text{بدون ریبلت}) - F(\text{با ریبلت})}{F(\text{بدون ریبلت})} \times 100 \quad (8)$$

در این رابطه η راندمان (برحسب درصد) و F نیروی وارد بر سطح است.

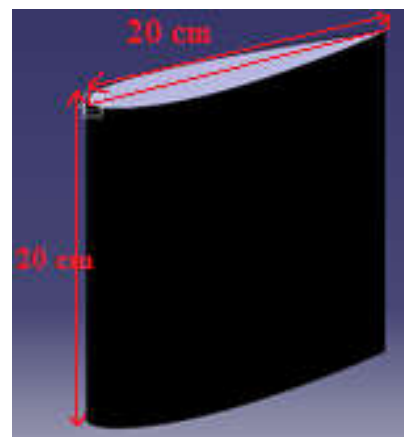
۳- روش

۱-۳- تولید هندسه

برای تنظیم چهارچوب حل معادلات، یک مدل با نرم‌افزارهای CAD تولید می‌کنیم. برای این کار مقطع NACA0025 را انتخاب می‌کنیم. مقطع هیدروفویل تولید شده در نرم‌افزار کتیا در شکل (۱۳) نشان داده شده است. اندازه‌های ارتفاع و طول ۲۰ سانتی‌متر تعیین و ریبلت‌ها (شیار) را ایجاد می‌کنیم. مدل سه‌بعدی ریبلت خورده شده در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



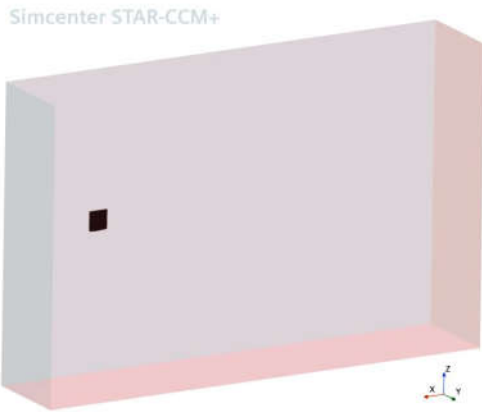
شکل ۱۳- مقطع هیدروفویل NACA0025



شکل ۱۴- هیدروفویل سکان دارای ریبلت

در شکل (۱۵) نمای نزدیک و بزرگ‌نمایی شده ریبلت‌ها نشان داده شده است. به‌این‌علت که در ابعاد میکرون هستند نمایش در شکل کامل امکان‌پذیر نیست؛ اما در شکل (۱۶) به‌صورت شماتیک مشخص گردیده است. ابعاد ریبلت‌ها در چند ارتفاع و فاصله متفاوت برای بررسی و مقایسه ایجاد می‌گردد. اندازه‌ها در جدول (۱) ارائه گردیده است.

با در نظر گرفتن ابعاد بزرگ‌تر جهت اطمینان از پاسخ‌ها در نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۱- دامنه حل معادلات و فضای اطراف سکان

۳-۳- معادلات حاکم و تنظیمات حل گر

شبیه‌سازی جریان روش‌های مختلفی دارند که برای پیش‌بینی جریان می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از هر کدام از این روش‌ها بستگی به شرایط ویژگی‌های جریان دارد. برای شبیه‌سازی جریان از معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس استفاده می‌گردد:

$$\frac{\partial(pU)}{\partial t} + \nabla \cdot (pUU) = -\nabla p + \quad (9)$$

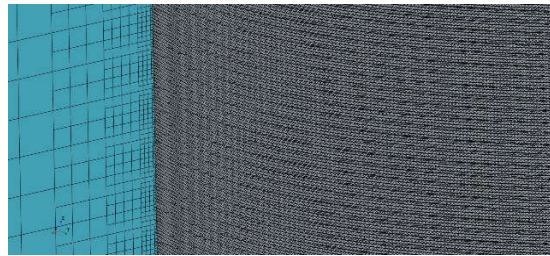
$$\nabla \cdot [\mu(\nabla U + (\nabla U)^T)] + pg - \nabla \left(\frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot U) \right) - \nabla \cdot (\overline{pU'U'})$$

$$-\overline{pU'U'} = \mu_t (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} pkI - \frac{2}{3} (\nabla \cdot U)I \quad (10)$$

معادله (۹) در بیانگر معادله RANS است. آخرین جمله به‌عنوان تنش رینولدز شناخته می‌شود. برای حل آن از فرضیه بوسینسک استفاده می‌شود که در معادله (۱۰) نشان داده شده است. این فرضیه تنش رینولدز را به گرادیان سرعت متوسط با ضریب μ_t مرتبط می‌کند که ویسکوزیته گردابی نام دارد. برای تخمین ویسکوزیته گردابی مدل‌های فراوانی وجود دارد. از آنجاکه این شبیه‌سازی نیاز به تمرکز گسترده‌ای در نزدیکی سطوح هندسه موردنظر دارد از مدل دو معادله‌ای $k - \omega SST$ (کی-اومگا اس‌اس‌تی) استفاده می‌کنیم. این مدل در طول دهه‌ها برای تقریب بهتر توسعه یافته است. مدل

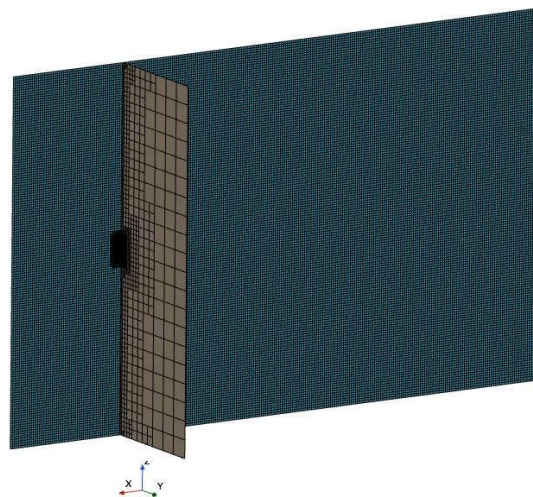


شکل ۱۷- محل قرارگیری هیدروفویل سکان در دامنه

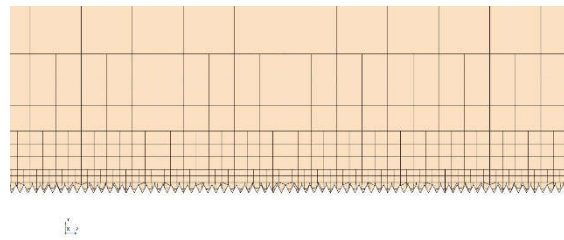


شکل ۱۸- نحوه مش‌بندی در لبه حمله و نزدیک مقطع

Simcenter STAR-CCM+



شکل ۱۹- سکان در دامنه محاسباتی حل و مش‌بندی دامنه

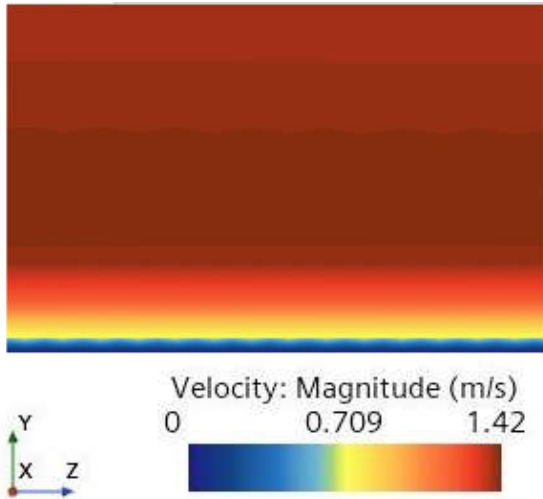


شکل ۲۰- بزرگ‌نمایی مش‌بندی در نزدیک ریبلت‌ها

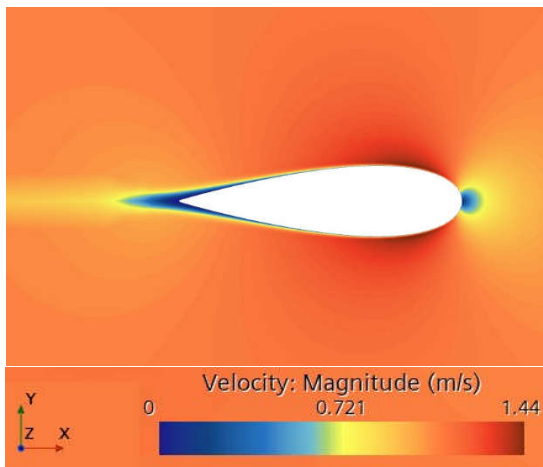
همان‌طور که در شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) مشخص گردیده در تنظیمات مش‌بندی در نزدیکی بدنه حداقل دو نقطه در داخل ریبلت‌ها جهت پایش وضعیت سرعت پیش‌بینی گردیده است. فضای دامنه حل معادلات

۴-۱- کانتور سرعت فشار

کانتورهای سرعت در حالت بدون ریبلت و با نسبت ریبلت‌های مختلف به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برابر تنظیمات انجام شده در شکل‌های (۲۳) تا (۳۲) ارائه گردیده است. باید توجه داشت که نمای ارائه گردیده نمای روبروی سکان در حالت وسط است.



شکل ۲۳- کانتور سرعت در حالت بدون ریبلت



شکل ۲۴- کانتور سرعت در حالت بدون ریبلت نمای بزرگ

مورد استفاده در این مطالعه SST است که بر اساس فرموله کردن تنش برشی انتقالی عمل می‌کند. در این مدل ویسکوزیته گردابی به صورت زیر فرض می‌گردد.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 w, SF_2)} \quad (11)$$

K انرژی جنبشی آشفتگی، ω نرخ اضمحلال،

مدل سازی معادلات به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot u) - \rho \beta^* \omega k + S_k \quad (12)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_w \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{v} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot u) - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) CD_{k\omega} + S_\omega \quad (13)$$

$$k = \frac{3}{2} (I |u_{ref}|)^2 \quad (14)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} L} \quad (15)$$

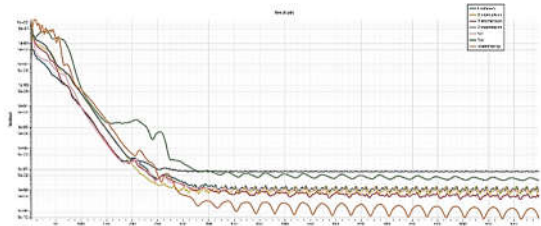
معادلات (۱۴) و (۱۵) همان‌طور که مشخص است

انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال (ω) را مدل می‌نماید. برای مقاردهی اولیه از روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده می‌گردد.

C_μ مقدار ثابتی است که اندازه آن ۰/۹ است. بعد از محاسبه این مقدار، روند محاسبات ادامه می‌یابد؛ البته برای حل این معادلات الگوریتم‌های خاص نیز توسعه یافته و از روش‌های صریح یا نیمه ضمنی مبتنی بر فشار و حل معادلات خطی فشار استفاده می‌گردد [47]. این مدل به علت پایداری روش کارآمدی است و از محاسبات کمتری برخوردار است؛ به‌ویژه برای جریان‌های ساده‌تر همگرایی سریع‌تر حاصل می‌گردد.

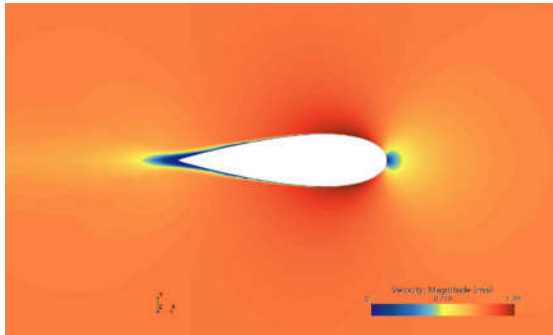
۴-۳- معیار همگرایی

معیار همگرایی حل مقدار 10^{-7} در نظر گرفته شد. تا مطمئن شویم معادلات به همگرایی قابل قبولی خواهند رسید. شکل (۲۲) نمودار همگرایی حل معادلات را نشان می‌دهد.

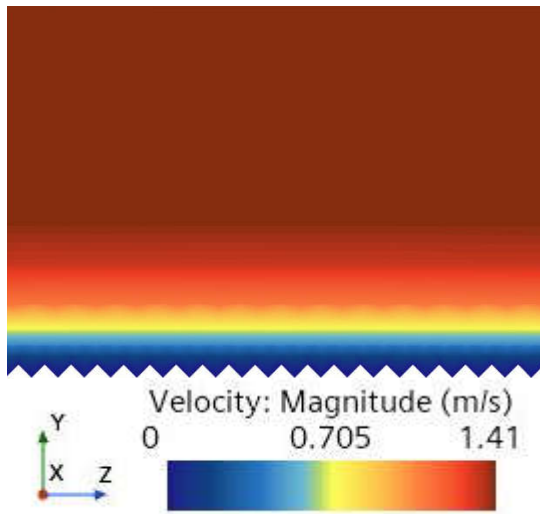


شکل ۲۲- نمودار همگرایی حل معادلات

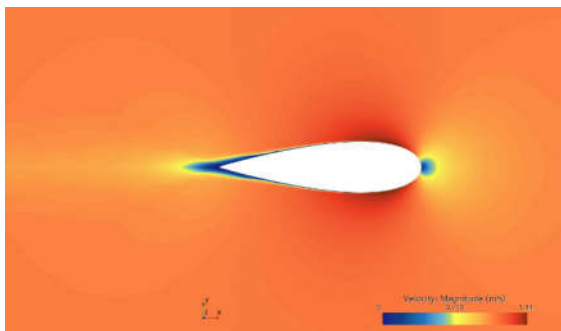
۴- نتایج و بحث



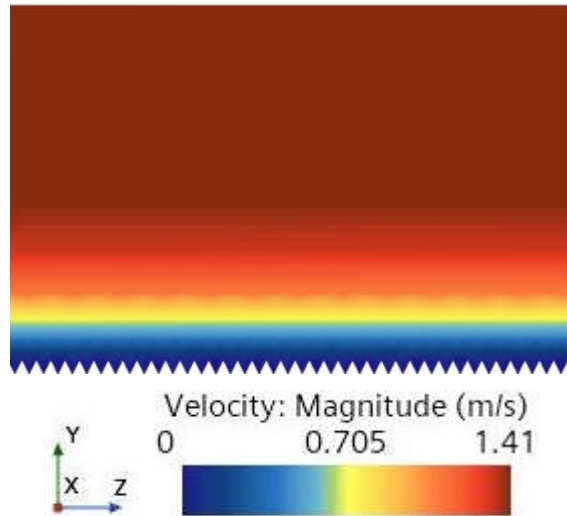
شکل ۲۸- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=140$ میکرون
نمای بزرگ



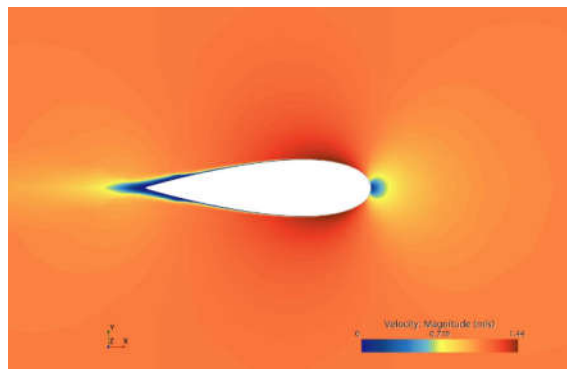
شکل ۲۹- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=200$ میکرون



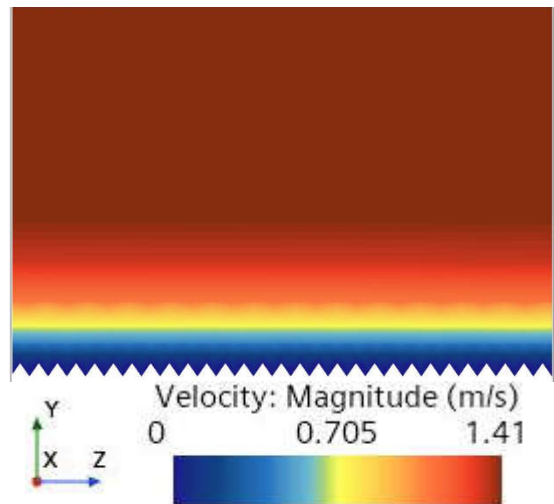
شکل ۳۰- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=200$ میکرون



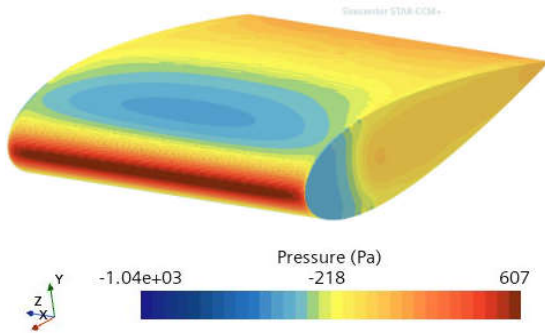
شکل ۲۵- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=100$ میکرون



شکل ۲۶- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=100$ میکرون
نمای بزرگ



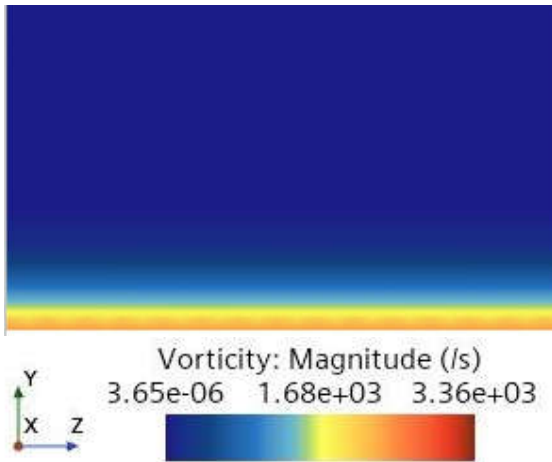
شکل ۲۷- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=140$ میکرون



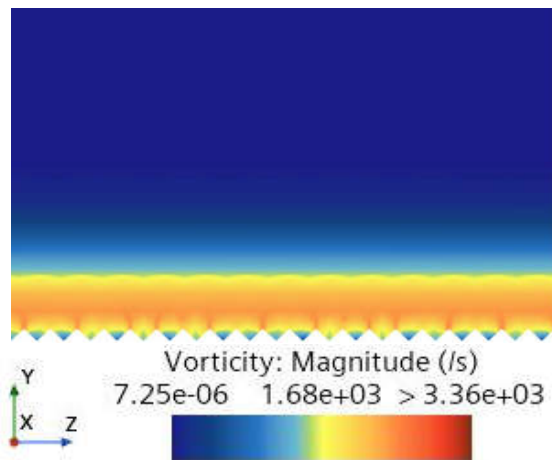
شکل ۳۳- کانتور فشار در اطراف مقطع سکان

۲-۴- وضعیت گردابه‌ها در اطراف ریبلت

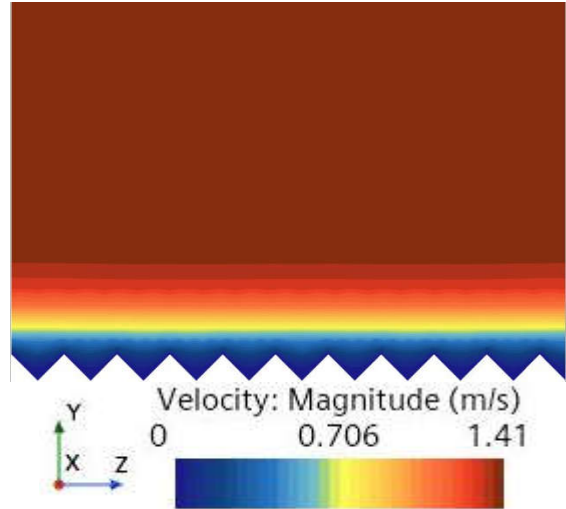
در شکل‌های (۳۴) و (۳۵) وضعیت گردابه‌ها در اطراف ریبلت با کمترین پسا و حالت بدون ریبلت مشخص نمایش داده شده است.



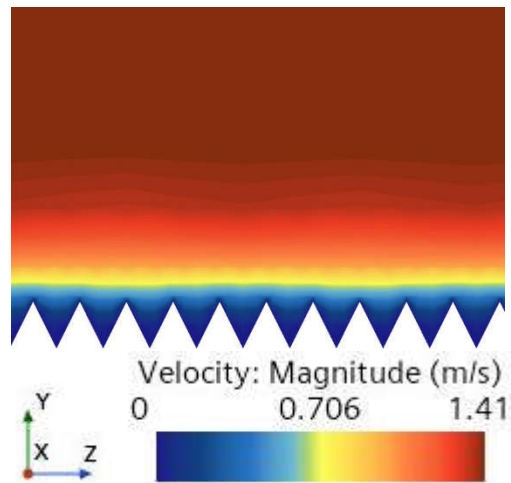
شکل ۳۴- کانتور وُرتیسیتی در حالت بدون ریبلت



شکل ۳۵- کانتور وُرتیسیتی در $h=100$ و $S=200$ میکرون



شکل ۳۱- کانتور سرعت $h=250$ و $S=500$ میکرون



شکل ۳۲- کانتور سرعت $h=500$ و $S=500$ میکرون

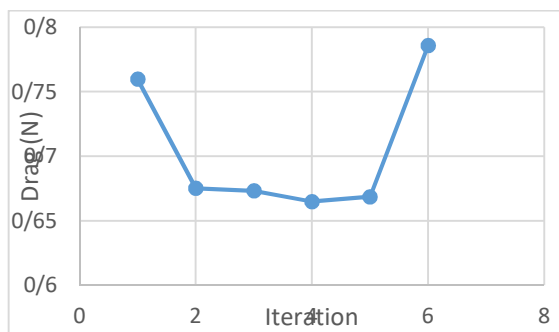
با توجه به شکل‌های ارائه شده مشخص است لایه درونی کم سرعت و نزدیک به سطح ریبلت‌های ۱۰۰-۲۰۰ فاصله بیشتری از نوک ریبلت‌ها دارد. در حالت بدون ریبلت نیز طول این ارتفاع لایه از سطح کمتر است. به بیانی دیگر دورتر شدن لایه جریان آشفته و پرسرعت از سطح باعث دور شدن ناحیه حامل گردابه‌های بزرگ‌تر است؛ این موضوع باعث کاهش ویسکوزیته آشفتگی و نهایتاً کاهش میزان تنش در دیواره می‌گردد لذا طبیعی است که شاهد کاهش پسا باشیم. نکته مهم این است که در مقابل این کاهش پسا افزایش سطح ناشی از ایجاد ریبلت باعث افزایش پسا می‌گردد. لذا نکته مهم پیدا کردن حالتی است که این کاهش پسا بیشتر از افزایش باشد. در شکل (۳۳) کانتور فشار بر روی بدنه ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقادیر به دست آمده در حالت‌های مختلف

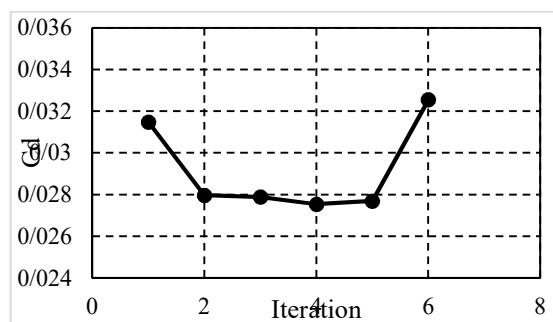
ریبیلت

#	وضعیت ریبیلت	نیروی پسا	ضریب پسا
۱	بدون ریبیلت	۰,۷۵۹۷۷۱۴۲۸	۰,۰۳۱۴۷۲۲۷۱
۲	۱۰۰-۱۰۰	0.675126863	0.027966013
۳	۱۰۰-۱۴۰	0.673235953	0.027887686
۴	100-200	0.664866213	0.027540983
۵	250-500	0.668542862	0.027693282
۶	500-500	0.785754	0.032548559

همان‌طور که مشخص است کمترین میزان خروجی در حالت شماره (۴) و در ارتفاع ۱۰۰ میکرون و فاصله ۲۰۰ میکرون از یکدیگر به دست آمده است. شکل‌های (۳۶) و (۳۷) وضعیت تغییرات نیروی پسا و ضریب پسا را برابر مقادیر جدول (۲) نشان می‌دهد.



شکل ۳۶- نیروی پسا در آرایش‌های مختلف ریبیلت



شکل ۳۷- ضریب پسا در آرایش‌های مختلف ریبیلت

همان‌طور که در شکل‌های بالا مشخص است کمترین میزان کاهش ضریب و نیروی پسا در آرایش شماره (۴) به ارتفاع صد میکرون و فاصله دو بیست میکرون از یکدیگر است. نکته قابل توجه این است که اثر ریبیلت دارای یک ناحیه بهینه است و در یک ناحیه محدود دارای اثر کاهش پسا است و چنانچه این ناحیه درست انتخاب نگردد شاهد

همان‌طور که مشاهده می‌شود ایجاد ناحیه با سرعت کم در فضای بین ریبیلت‌ها می‌تواند عامل کاهش ایجاد گردابه‌های در تماس با سطح گردد. نکته دیگر ایجاد ناحیه گردابه و پرتنش و گردابه در نزدیکی دندانها است.

۳-۴- مکانیزم کاهش فشار در ریبیلت

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان این‌گونه بیان کرد که جریان در زیر لایه لزج، منظم بوده و در لایه‌های بیرونی آشفته، نامنظم و درهم. حرکات درهم در بالای این زیر لایه می‌تواند به دلیل انتقال گردابه‌های در جهت جریان که در سطح زیر لایه لزج تولید شده باشد. گردابه‌هایی که در واقع حول محور در راستای جهت سرعت متوسط می‌گردند. این گردابه‌ها می‌چرخند و در جهت سطح جریان پیدا می‌کنند. به‌طور طبیعی در راستای عمود بر راستای جریان نیز دارای حرکت هستند. اندرکنش بین گردابه‌ها و سطح و همچنین بین گردابه‌های مجاور که در هنگام حرکت باهم برخورد دارند باعث آغاز حرکت انفجاری شده که در آن گردابه‌ها به سرعت از زیر لایه لزج به سمت لایه‌مرزی خارجی انتقال می‌یابند. زمانی که گردابه‌ها به بیرون منتقل شدند با دیگر گردابه‌ها برخورد داشته و طوری می‌گردند که بردارهای سرعت لحظه‌ای، در راستای حرکت جریان، به بزرگی بردارهای سرعت متوسط جریان اضافه شوند [۴۸]. این عامل (انفجار و انتقال) گردابه‌ها به بیرون از زیر لایه لزج از روش‌های انتقال مومنوم به سیال هستند و عوامل حائز اهمیت در مقدار پسای اعمال شده می‌باشند. کاهش رفتار انتقالی گردابه‌ها در راستای جریان یکی از اهداف کلیدی برای کاهش پسا است؛ زیرا احتمال کاهش پسا با این روش قابل توجه است [۴۹]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت: ریبیلت‌ها از سه طریق موجب کاهش پسا می‌شوند، اولاً با ایجاد مانع برای انتقال گردابه‌ها از زیر لایه لزج به بیرون و افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش پسا و دوم با جابجایی گردابه‌های سطحی به بالاتر و کاهش اثرات متقابل این گردابه‌ها بر سطح جسم شناور و نهایتاً اینکه با به تأخیر انداختن جدایش جریان که این موارد به‌نوعی دارای همپوشانی هستند و به همدیگر نیز بستگی دارند.

۴-۴- بررسی نتایج و خروجی‌ها

در جدول شماره (۲) مقادیر ضریب پسا و نیروی پسا در حالت‌های مختلف ارتفاع ریبیلت و فاصله ریبیلت‌ها از یکدیگر ارائه گردیده است.

۶-مراجع

- [1] Sajedi, S. M., and Ghadimi, P. Experimental and Numerical Assessment of the Effect of Transverse, Pointed Aft, and Re-entrant Vee Steps as well as Ventilation on Hydrodynamic Performance of Mono-hull Planing Crafts in Calm Water. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, 46(3), pp.715–731, 2022. doi:<https://doi.org/10.1007/s40997-022-00519-8>.
- [2] Najafi, A., Nowruzi, H., Ameri, M.J. and Karami, M. An experimental study of the wetted surfaces of two- stepped planing hulls. *Ocean Engineering*, 222, p. 108589, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108589>.
- [3] Najafi, A., Nowruzi, H., and Ameri, M. J. Hydrodynamic assessment of stepped planing hulls using experiments. *Ocean Engineering*, 217, p.107939, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107939>.
- [4] Nowruzi, H., and Najafi, A. An experimental and CFD study on the effects of different pre-swirl ducts on propulsion performance of series 60 ship. *Ocean Engineering*, [online] 173, pp.491–509, 2019.
- [5] Najafi, A., Nowruzi, H., and Ghassemi, H. Performance prediction of hydrofoil- supported catamarans using experiment and ANNs. *Applied Ocean Research*, 75, pp.66–84, 2018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.017>.
- [6] Ghadimi, P., Sajedi, S. M., Ghadimi, A., and Sheikholeslami, M. R. Experimental and numerical probe into the effects of adding one and two steps to a mono-hull planing vessel on its performance in calm water. *Scientia Iranica*, 2021. doi:<https://doi.org/10.24200/sci.2021.57177.5101>.
- [7] Ghadimi, P., Sajedi, S. M., and Tavakoli, S. Experimental Study of the Wedge Effects on the Performance of a Hard-chine Planing Craft in Calm Water. *Scientia Iranica*, 0(0), 2018. doi:<https://doi.org/10.24200/sci.2018.20607>.
- [8] Saraji, M. K., Aliasgari, E., Streimikiene, D. Assessment of the challenges to renewable energy technologies adoption in rural areas: a Fermatean CRITICVIKOR approach, *Technical Forecasting and Social Change* 189, 122399, 2023.
- [9] Energy and Mineral Regulatory Commission (EMRC), <https://emrc.gov.jo/>, accessed on 10 Feb 2023 [in Arabic].

افزایش نیروی پسا خواهیم بود. برابر خروجی‌ها میزان یا اثر ریبلت در مقدار بهینه به اندازه ۱۲/۵ درصد کاهش پسا در مقایسه باحالت بدون ریبلت هستیم.

۴-۵-اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبار سنجی مقادیر به دست آمده به نتایجی که سایر پژوهشگران در تحقیقات به دست آورده‌اند رجوع می‌کنیم این نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳- نتایج تحقیقات و میزان کاهش پسا

ردیف	نوع مقطع	درصد کاهش پسا/%	مرجع
۱	NACA	۴/۳	[۵۰]
۲	NACA	۱۳/۳	[۵۱]
۳	NACA	۱۳	[۵۲]
۴	Flat plate	۷/۳۳	[۵۳]
۵	Flat plate	۹	[۵۴]

بیشینه کاهش پسای به دست آمده حاصل از پژوهش جاری برابر ۱۲/۵ درصد کاهش در نیروی پسا است این موضوع مؤید تطابق خوبی با نتایج تحقیقات مراجع ذکر شده است.

۵-نتیجه‌گیری

در بررسی اثر ریبلت بر روی سکان با مقطع NACA0025 با ابعاد مختلف در پژوهش حاضر نتایج زیر به دست آمد:

- ۱-ریبلت‌ها باوجود اثر افزایش مساحت سطح خیس در تماس با شناور می‌توانند در شرایط خاصی از ابعاد عامل کاهش ضریب پسا گردند.
- ۲-وضعیت نسبت ارتفاع و فاصله به صورت بی‌بعد تأثیر قابل ملاحظه‌ای در یافتن محدوده اثر کاهش ریبلت دارد.
- ۳-در ابعاد ارتفاع ۱۰۰ میکرون و فاصله ۲۰۰ میکرون ریبلت‌ها از یکدیگر شاهد بیشترین میزان کاهش نیروی پسا و ضریب پسا به اندازه ۱۲/۵ درصد نسبت به حالت بدون ریبلت بوده‌ایم.
- ۴-در ابعاد ارتفاع ۵۰۰ میکرون و فاصله ۵۰۰ میکرون شاهد افزایش نیروی پسا هستیم.

- [22] Huey, J. C., Gene, E. K., Michael, S. F., et al, DRA for gas pipelining successful in gulf of mexico trial, *Oil Gas J.* 98 (23), 54–58, 2000.
- [23] Mitchell Quinn, Dylan McGrath, Duncan C. Bell, Henry C. Bilinsky, Joseph Builth-Williams, Christoph Feichtinger, Peter A. Leidl, Andreas Flanschger and Shahfiq Shahjahan. "Advancements in Drag-Reducing Riblet Film Production for Aviation and Other Applications," AIAA 2022-0920. AIAA SCITECH 2022 Forum. January 2022.
- [24] Hu, j., and Yao, Zh. Drag reduction of turbulent boundary layer over sawtooth riblet surface with superhydrophobic coat. *Physics of Fluids* 1 January, 35 (1): 015104, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0132403>
- [25] Chan, Kevin, L. Skvortsov, A., and Ooi, A. Effect of straight riblets of the underlying surface on wall bounded flow drag, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 102, 109160, ISSN 0142-727X, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109160>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X23000590>).
- [26] Chan, Kevin, L. Skvortsov, A., and Ooi, A. Effect of straight riblets of the underlying surface on wall bounded flow drag, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 102, 109160, ISSN 0142-727X, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109160>.
- [27] Cafiero, G., and Iuso, G. Drag reduction in a turbulent boundary layer with sinusoidal riblets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 139, 110723, ISSN 0894-1777, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110723>.
- [28] Soleimani, Sh. and, Eckels, S. A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow, *International Journal of Thermofluids*, Volume 9, 100053, ISSN 2666-2027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>. Volume 9, 2021, 100053, ISSN 2666-2027,
- [29] Gordon, J. E. *The new science of strong materials, or why you don't fall through the floor*, 2nd Ed., Pelican–Penguin, London, UK 1976.
- [30] *Design and Nature II Comparing Design in Nature with Science and Engineering* (Eds: M. W. Collins, C. A. Brebbia), WIT Press, Southampton, UK 2004.
- [10] Nchofoung, T.N., Fotio, H. K., Miamo, C. W. Green taxation and renewable energy technologies adoption: a global evidence, *Renew. Energy Focus* 44, 334–343 Volume2023ISSN 1755-0084, 2023. doi: 10.1016/j.ref.2023.01.010
- [11] Erős, N., Török, Z., Hossu, C. A., Réti, K. O., Maloş, C., Kecskés, P., Morariu, S. D., Benedek, J., Hartel, T. Assessing the sustainability related concepts of urban development plans in Eastern Europe: a case study of Romania, *Sustain. Cities Soc.* 85, 104070 VolumeISSN 2210-6707, 2022. doi: 10.1016/j.scs.2022.104070
- [12] Khan, A., Shah, I., Aziz, S., Waqas, M., Zaman, U. K. U., Jung, D. W. Numerical and Experimental Analysis of Drag and Lift Forces on a Bullet Head. *Aerospace*, 9, 816, 2022. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120816>
- [13] Rahman, M. R. Computational Analysis of Aerodynamic Parameters for Supersonic Artillery Projectiles *International journal of mechanical engineering. J. Mech. Civ. Eng.* 6, 1–18, 2020.
- [14] Croke, T. C., Thomas, F. O. Active and passive turbulent boundary-layer drag reduction, *AIAA J.* 56 (10), 3835–3847, 2018.
- [15] Cecil, S. L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 42, 183–203, 2009.
- [16] Krope, A., and Lipus, L. C. Drag reducing surfactants for district heating, *Appl. Therm. Eng.* 30 (8), 833–838, 2010.
- [17] Zheng, X. B., Jiang, N., and Zhang, H. redetermined control of turbulent boundary layer with a piezoelectric oscillator, *Chin. Phys. B* 25 (1), 014703, 2016.
- [18] Wang, X. TRPIV Experimental research of drag reduction mechanism by a riblet surface, Tianjin University, Tianjin, 2017.
- [19] White, C. M., and Mungal, M. G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40, 235–256, 2008.
- [20] Shokry, F., Abd Elfattah, M., El-Gayar, D. A., et al. Effect of drag reducing polymers and impeller geometry on the rate of mass Fig. 17 The relation between vortexes and heat transfer at the wall of a cylindrical stirred tank reactor in relation to catalytic reactor design, *Alexandria Eng. J.* 59 (1), 509–518, 2020.
- [21] Lai, S. C. S. *Mimicking nature: physical basis and artificial synthesis of the lotus-effect*, University of Leiden, Friesland, 2003.

[46] Bliamis, C., Vlahostergios, Z., Misirlis, D., Yakinthos, K. Numerical Evaluation of Riblet Drag Reduction on a MALE UAV. 9, 218, Aerospace 2022.

<https://doi.org/10.3390/aerospace9040218>

[47] Caretto L. S., Gosman A. D., Patnakar S. V., and Spalding, D. B. Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation, 1972.

[48] Bixler, G. D., and Bhushan, B. Biofouling: lessons from nature. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1967): p. 2381-2417, 2012.

[49] Heydarian, A., Rishchri, M., Dehghanian, A. and Kazempour, A. Numerical Simulation of the Effects of Micro Riblets on Hydrodynamics Parameters of Planning Vessels. *High Speed craft*, 15(48), pp.42–50, 2016. [in Persian]

[50] Han, M., Lim, H. C., Jang, Y. G., Seung, S. L., Lee, S. J. Paper # 0-7803-7731-1, presented at 12 th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, MA 2003.

[51] Caram, J. M., Ahmed, A. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J. 1991, 29, 1769.

[52] Sundaram, S., Viswanath, P. R., Rudrakumar, S. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J. 34, 676.

[53] Gu, Y., Fan, T., Mou, J., Wu, D., Zheng, S. and Wang, E. Characteristics and mechanism investigation on drag reduction of oblique riblets. *Journal of Central South University*, 24(6), pp.1379–1386, 2017.

doi:<https://doi.org/10.1007/s11771-017-3542-5>.

[54] Rohr, J. J., Andersen, G. W., Reidy, L.W., Hendricks, E. W. A comparison of the dragreducingbenefits of riblets in internal and external flows, *Exp. Fluids* 13 (6), 361–368, 1992.

[31] Learning from Nature How to Design New Implantable Biomaterials (Eds: R. L. Reis, S. Weiner), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA 2004.

[32] Bhushan, B. *Philos. Trans. R. Soc.*, 367, 1445, 2009.

[33] Bhushan, B. *Biomimetics: Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany 2012.

[34] *Bulletproof Feathers How Science Uses Nature's Secrets to Design Cutting Edge Technology*, (Ed: R. Allen), Ivy Press, London 2010.

[35] *Bio-Inspired Innovation and National Security* (Eds: R. E. Armstrong, M. D. Drapeau, C. A. Loeb, J. J. Valdes), National Defense University Press, Washington, DC 2010.

[36] Bar-Cohen, Y. *Biomimetics: Nature Based Innovation*, CRC Press, Boca Raton, FL 2011.

[37] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge 1970.

[38] Blevins, R. D. *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand- Reinhold, New York 1984.

[39] *Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers* (Ed: M. Davies), McGraw-Hill, New York 2002.

[40] White, F. *Viscous Fluid Flow*, 3 rd ed., McGraw Hill, New York 2006.

[41] Fox, R. W. and McDonald, A. T. *Introduction to Fluid Mechanics*, 11 th Ed. John Wiley & Sons, New York 2011.

[42] Fu, Y.F., Yuan, C.Q. and Bai, X.Q. *caramsurfaces. Biosurface and Biotribology*, 3(1), pp.11–24, 2017.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>.

[43] Sayad Saravi, S., and Cheng, K. A Review of drag reduction by riblet and micro-textures in the turbulent boundary. *European Scientific Journal*, 9(33), 2013.

doi:<https://doi.org/10.19044/ESJ.2013.V9N33P>.

[44] Boomsma, A., and Sotiropoulos, F. Direct numerical simulation of shark skin denticles in turbulent channel flow. *Physics of Fluids* 28, 035106, 2016.

[45] Bixler, G. D., and Bhushan, B. Fluid Drag Reduction with Shark-Skin Riblet Inspired Microstructured Surfaces. *Advanced Functional Materials*, 23(36), 4507–4528, 2013.

<https://doi.org/10.1002/adfm.201203683>

بررسی عوامل مؤثر بر انتشار لیزرهای پرنرژی

در محیط‌های دریایی

محمودرضا عباسی

گروه علوم پایه، دانشکده علوم، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)،

phys.ocean.abbasi@gmail.com

چکیده:

این مقاله به فرآیندهای فیزیکی کلیدی مرتبط با انتشار پرتوهای لیزری با توان متوسط در یک محیط دریایی می‌پردازد. تعداد زیادی از فرآیندهای فیزیکی بر مقدار انرژی لیزری که می‌تواند به هدف تحویل داده شود تأثیر می‌گذارد و آن را محدود می‌کند. این اثرات به هم مرتبط هستند و شامل شکوفایی حرارتی، تلاطم، و جذب و پراکندگی مولکولی/آئروسول هستند. این فرآیندها با تغییر ضریب شکست هوا بر مشخصات شدت لیزر تأثیر می‌گذارند که باعث انحراف جبهه موج پرتو لیزر می‌شود. اعوجاج جبهه موج منجر به افزایش گسترش پرتو لیزر عرضی می‌شود و می‌تواند مقدار انرژی قابل انتشار را به شدت محدود کند. محیط دریایی به دلیل وجود بخار آب و محتوای آئروسول نسبتاً بالا، انتشار لیزر با انرژی بالا چالش برانگیز است. در رژیم مادون قرمز، مولکول‌های آب و ذرات معلق در هوا منبع اصلی جذب و پراکندگی انرژی لیزر هستند و محدودیتی را برای لیزرهای با انرژی بالا نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی:

لیزر، انرژی بالا، جو، انتشار، جذب، پراکندگی، شکوفایی حرارتی

Investigating factors affecting the emission of high-energy lasers in marine environments

Mahmud Reza Abbasi

Imam Hussain officer and guard training university, Science College, Basic Science, Department,

phys.ocean.abbasi@gmail.com

Abstract

This article addresses key physical processes associated with the propagation of high-average power laser beams in a maritime environment. A number of physical processes affect and limit the amount of laser energy that can be delivered to a target. These effects are interrelated and include thermal blooming, turbulence, and molecular/aerosol absorption and scattering. These processes affect the laser intensity profile by modifying the refractive index of the air, which causes the laser beam wavefront to distort. Wavefront distortion results in enhanced transverse laser beam spreading, and can severely limit the amount of energy that can be propagated. The maritime environment is particularly challenging for high energy-laser (HEL) propagation because of its relatively high water vapor and aerosol content. In the infrared regime, water molecules and aerosols constitute the dominant source of absorption and scattering of laser energy, and represent a limitation for HELs propagating in a maritime atmosphere.

Keywords:

Laser, high energy, atmosphere, emission, absorption, scattering, thermal bloom

۱- مروری بر لیزرهای پرنرزی

اصطلاح «سلاح های انرزی هدایت شده» برای توصیف سلاح های فناوری پیشرفته الکترومغناطیسی (EM) از جمله امواج مایکروویو پر قدرت و لیزرهای پرنرزی (HEL) استفاده می شود. این سلاح ها معمولاً از انرزی EM مانند مایکروویو و اشعه مادون قرمز استفاده می کنند. یکی از مزیت های کلیدی HEL نسبت به سلاح های جنبشی سنتی، مانند موشک ها و تفنگ ها، این است که برای رهگیری هدف نیازی به شلیک پرتابه ندارند [۱].

به طور خاص برای HEL، مزایای دیگر عبارتند از: (۱) هزینه کمتر درگیری زیرا نیازی به پرتابه نیست، (۲) انتقال سریعتر انرزی با سرعت نور در مقایسه با سلاح های سنتی، (۳) مدت زمان عملیاتی بیشتر، محدود شده فقط با قدرت و ذخیره انرزی در دسترس و (۴) سطوح مختلف کشندگی [۱]. با این حال، معایبی نیز برای سلاح های HEL وجود دارد، از جمله (۱) نیاز به درگیری تنها در خط دید، (۲) عملکرد وابسته به آب و هوا، (۳) زمان توقف محدود برای درگیری با یک هدف، که توانایی انجام چندگانه همزمان را محدود می کند (مدت زمان ماندن لیزر روی هدف) و (۴) آسیب احتمالی جانبی به هواپیما و یا ماهواره ها [۱].

کاربرد لیزرها برای مقاصد نظامی برای چندین دهه مورد بررسی قرار گرفته است. برای کاربردهای انرزی هدایت شده، سه نوع اصلی لیزر (گاز/شیمیایی، الکترون آزاد و حالت جامد) بر اساس محیط فعال لیزر وجود دارد [۲]. این موارد در بخش بعدی به اختصار مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲- انواع لیزر

۱-۲- لیزرهای گازی/شیمیایی

لیزرهای گازی/شیمیایی از یک محیط گازی و از طریق فرآیند احتراق به لیزر دست می یابند. اولین لیزر گازی با قدرت بالا توسط نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۷۲ تحت پروژه DELTA توسعه یافت. برای دستیابی به توانی تا ۱۰۰ کیلووات در طول موج ۱۰٫۶ میکرومتر از یک محیط افزایش CO₂ استفاده کرد [۳]. از آنجا که طول موج عملیاتی ۱۰٫۶ میکرومتر برای استفاده در محیط دریایی

مناسب نیست، بنابراین در دهه ۱۹۸۰ تمرکز به لیزرهای شیمیایی تغییر کرد. نیروی دریایی آمریکا لیزر شیمیایی پیشرفته مادون قرمز (MIRACL) را در سال ۱۹۸۰ با استفاده از فلوراید دوتریوم توسعه داد که در طول موج حدود ۳٫۸ میکرومتر لیزر می شود. این تنها سلاح لیزری بود که قادر به دستیابی به خروجی نسبتاً پر قدرت مگاوات بود. لیزرهای شیمیایی در سطح مگاوات انرزی تولید می کردند، لیزرهای شیمیایی اغلب بزرگ بودند، یکپارچه سازی آنها دشوار بود، در "ماده تولید لیزر" محدود بودند و بسیاری از آنها از گازهای سمی استفاده می کردند [۳].

۲-۲- لیزرهای الکترون آزاد

لیزرهای الکترون آزاد (FEL) از یک شتاب دهنده ذره برای افزایش سرعت یک پرتو الکترون آزاد تا نزدیک به سرعت نور استفاده می کنند، قبل از اینکه آن را از یک سری آهنرباهای متناوب به نام موج ساز عبور دهند. این باعث می شود که الکترون ها در طول موج خاصی نوسان کنند و نور منسجم ساطع کنند. مزیت قابل توجه FEL این است که در طول موج مناسبی کار کند که تضعیف جوی را به حداقل می رساند و امکان انتشار لیزری بهتر را فراهم می کند. از دیگر مزایای استفاده از FEL این است که از گازهای سمی استفاده نمی شود (برخلاف مواد شیمیایی) و حذف راحت تر گرمای زائد از محیط لیزر را دارد (که در لیزرهای حالت جامد دشوارتر است) [۳].

۲-۳- لیزرهای حالت جامد

چالش هایی که هم لیزرهای گازی/شیمیایی و هم لیزرهای FEL با آن مواجه بودند منجر به تغییر تمرکز به سمت لیزرهای حالت جامد (SSL) شد که ارزان تر و قابل استفاده تر روی سکوها روی زمین، دریایی و هوآبرد بودند. پیشرفت های قابل توجه در چند دهه گذشته در فناوری SSL برای کاربردهای تجاری، مانند جوشکاری، منجر به استفاده از SSL تجاری برای کاربردهای انرزی هدایت شده شده است [۳].

SSL های رایج مورد استفاده برای کاربردهای تجاری و تحقیقاتی در حال حاضر بر پایه جامدات آغشته به

³ Solid state laser

¹ high-energy laser

² Free electron laser

ایتربیم (Yb) یا نئودیمی (Nd) هستند. هر دو نوع در طول موجی در حدود ۱ میکرومتر کار می‌کنند که انتقال کافی در جو را نشان می‌دهد. مزیتی که SSL نسبت به سایر لیزرها دارد اندازه جمع و جور و کارایی آنهاست. در حال حاضر دو نوع اصلی از طرح های لیزر حالت جامد وجود دارد که در حال توسعه هستند:

الف- لیزرهای ورقه ای که یک پرتو لیزر با توان خروجی ۱۰۵ کیلووات در ۱,۰۶۴ میکرومتر تولید می‌کند. این پرتو لیزر همچنین دارای کیفیت پرتو مناسبی در هنگام برخورد به هدف است. با این حال، SSL ورقه ای به راحتی تا سطوح توان MW مقیاس پذیر نیستند، زیرا حذف گرما همچنان یک چالش برای آنها است.

ب- لیزرهای فیبری. SSL فیبری از دیودهای لیزری به عنوان پمپ برای تحریک محیط بهره استفاده می‌کند. پرتو لیزر حاصل از یک فیبر عبور می‌کند. یکی از مزیت‌های لیزر فیبر نسبت سطح به حجم بزرگ آن است که امکان خنک‌سازی کارآمدتری را در مقایسه با نوع ورقه ای فراهم می‌کند. مزایای دیگر SSL فیبری این است که آنها فشرده تر از لیزرهای ورقه ای هستند و اینکه لیزرهای فیبری پر قدرت به صورت تجاری در دسترس هستند. یک نوع لیزر ۳۳~ کیلووات در طول موج ۱,۰۶۴ میکرومتر کار می‌کند. البته کیفیت پرتو این نوع لیزر پایین است زیرا لیزرهای هر یک از فیبرهای SSL به طور نامنسجمی برای دستیابی به توان بالاتر ترکیب می‌شوند [۳].

۳- انتشار لیزر در اتمسفر دریایی

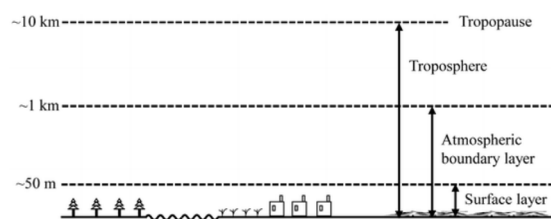
جذب و پراکندگی انرژی لیزر توسط مولکول ها، بخار آب و ذرات معلق در هوا کاملاً تابع طول موج است. بنابراین، انتخاب طول موج لیزر برای به حداکثر رساندن انرژی لیزری که می‌تواند به یک هدف برسد، حیاتی است. یکی از مزایای عمده استفاده از FEL برای سیستم سلاح لیزری، علاوه بر پتانسیل آن برای متوسط توان و راندمان بالا، توانایی آن برای کار در یک طول موج از پیش تعیین شده است. جذب انرژی لیزر، باعث گرم شدن موضعی هوا می‌شود. کاهش موضعی حاصل در چگالی هوا و ضریب شکست، باعث می‌شود پرتو لیزر تحت شکوفایی حرارتی قرار گیرد، یعنی از دست دادن کانونی شدن پرتو [۴].

این فرآیند مضر را می‌توان با انتخاب طول موج عملیاتی در یک پنجره اتمسفر که در آن جذب کم است،

به میزان قابل توجهی کاهش داد. در یک محیط دریایی، جذب بخار آب نقش اصلی را در تعیین طول موج بهینه ایفا می‌کند. بخار آب دارای یک پنجره انتقال در مرکز ۱,۰۴۵ میکرومتر است که به اندازه کافی گسترده است تا امکان انتشار یک قطار از پالس های فوق کوتاه مشخصه FEL ها را فراهم کند. یعنی، پهنای طیفی مرتبط با پالس های FEL به خوبی در پنجره بخار آب در $1,045 \pm 0,004$ میکرومتر قرار دارد که در شکل ۲ نشان داده شده است. ساختار خط دقیق در پنجره های اتمسفر در ۱,۶ میکرومتر و ۲,۲ میکرومتر منجر به جذب موثر بالاتر برای پالس های FEL بسیار کوتاه می‌شود. همه این فرآیندها در رژیم پارامتر مورد علاقه در اینجا مهم نیستند. با این حال، این قابلیت برای مدل سازی انتشار پالس های لیزری با شدت های بسیار بالاتر برای تعدادی از کاربردهای دیگر وجود دارد [۴].

۴- فرآیندهای جوی موثر بر انتشار لیزر در اتمسفر دریایی

جو به طور کلی از چهار لایه مجزا تشکیل شده است که لایه مورد علاقه در اینجا تروپوسفر خواهد بود. این لایه از سطح تا حدود ۱۰ کیلومتر قرار دارد. در داخل تروپوسفر (شکل ۱)، لایه متمایز دیگری به نام لایه مرزی جو (ABL) وجود دارد که تقریباً ۱ کیلومتر بالاتر از سطح است اما ساختار حرارتی آن در طول روز متفاوت است [۱۵]. این واریانس ناشی از فعل و انفعالات بین سطح زمین و بادهای است. در ABL، محتوای بخار آب و غلظت ذرات معلق در هوا نسبت به ارتفاع ثابت است [۵].



شکل ۱- تروپوسفر و زیرلایه های آن

انتشار یک پرتو لیزر در اتمسفر تحت تأثیر اجزای مختلف اتمسفر مانند گازهای جوی خواهد بود. از پرتوهای لیزر این اثرات نامطلوب شامل شکوفایی حرارتی، آشفستگی، جذب مولکولی/آئروسول و پراکندگی است و هر یک از این اثرات ممکن است با کاهش شدت پیک لیزر، کارایی لیزر را کاهش دهد. در ادامه، این فرآیندهای کلیدی را مورد بحث

قرار می‌دهیم که بر انتشار لیزر در اتمسفر دریایی به طور کلی تأثیر می‌گذارند.

۴-۱- تضعیف پرتو لیزر

مولکول‌ها و آئروسول‌های موجود در اتمسفر وقتی پرتو لیزر را از طریق جو منتقل می‌کنند، پرتو را جذب و پراکنده می‌کنند [۶]. ترکیب این دو اثر به بهترین وجه توسط قانون بیر توضیح داده شده‌است:

$$p(r) = p_0 e^{-\epsilon r} \quad (1)$$

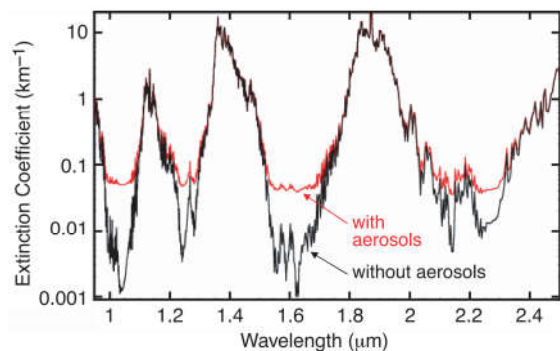
در معادله ۱، کل توان تحویل شده به هدف را در فاصله دور از منبع نشان می‌دهد و p_0 توان خروجی اولیه در منبع است. عبارت ϵ نشان‌دهنده ضریب تضعیف کل است که چگونگی کاهش قدرت لیزر را در حین انتشار کمی نشان می‌دهد.

این ضریب از چهار قسمت اصلی تشکیل شده‌است که در معادله ۲ نشان داده شده‌است.

$$\epsilon = \alpha_m + \alpha_a + \beta_a + \beta_m \quad (2)$$

در رابطه ۲، α و β به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی را نشان می‌دهند. زیرنویس‌های m و a به سهم نسبی مولکول‌ها و ذرات معلق در جو در هر دو فرآیند اشاره دارد [۶].

شکل ۲ ضریب تضعیف، یعنی مجموع پراکندگی و جذب را به عنوان تابعی از طول موج نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده‌است، چندین پنجره انتقال مولکولی در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک به ۱،۶، ۲،۲ و میکرومتر وجود دارد [۶].



شکل ۲- ضریب تضعیف هوا با و بدون ذرات معلق براساس طول موج

شکل ۲ اثرات روی ضریب تضعیف با و بدون ذرات معلق در جو (به ترتیب خطوط قرمز و سیاه) را نشان می‌دهد.

هنگامی که جذب مولکولی کوچک است، اثرات تضعیف نسبتاً بارزتر است، همانطور که در شکل ۲ منعکس شده‌است (که در آن ضریب تضعیف بر اساس مقیاس لگاریتمی ترسیم می‌شود). هنگامی که ذرات معلق در هوا وجود دارند، ضریب تضعیف به طور قابل توجهی (~ 100 برابر) در مناطق حدود ۱ میکرومتر و ۱،۶ میکرومتر بالاتر است [۶].

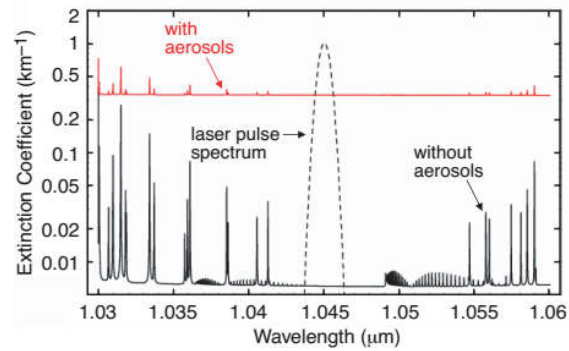
۴-۲- جذب

پراکندگی و جذب آئروسول می‌تواند نقش مهمی در محدود کردن انرژی لیزری که می‌تواند به هدف برسد، ایفا می‌کنند. ذرات معلق دریایی از قطرات آب تشکیل شده‌اند که در طیف وسیعی از شعاع ($0.1 - 10 \mu\text{m}$) و چگالی حدود 10^3cm^{-3} توزیع شده‌اند.

جذب زمانی اتفاق می‌افتد که انرژی فوتون‌های منتقل شده توسط پرتو لیزر، اجزای تشکیل دهنده جو (مولکول‌ها یا ذرات معلق در هوا) را به سطوح انرژی بالاتر برانگیزد. این انتقال انرژی در نهایت می‌تواند جو را گرم کند. برای جذب مولکولی، اگرچه نیتروژن و اکسیژن تا حد زیادی فراوان‌ترین مولکول‌های تشکیل‌دهنده هوا هستند، اما دارای گشتاورهای دوقطبی الکتریکی غیردائمی هستند و بنابراین نسبتاً عاری از خطوط جذب در فرورسرخ هستند. برعکس، اگرچه H_2O (بخار آب) و CO_2 درصد بسیار کمی از جو را تشکیل می‌دهند، اما به دلیل پیوندهای نامتقارنشان منبع اصلی جذب انرژی در طیف مادون قرمز هستند. برای جذب آئروسول، اثرات مشابه است اما بیشتر به اندازه و خواص توده ای آئروسول‌ها بستگی دارد.

جذب مولکولی انرژی لیزر در خطوط مجزا اما نزدیک به هم (طول موج) اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال، شکل ۳ جذب هوا را در نزدیکی پنجره انتقال ۱ میکرومتری نشان می‌دهد. انرژی لیزر جذب شده به حالت‌های چرخشی و ارتعاشی مولکول‌های هوا تبدیل می‌شود. انرژی چرخشی/ارتعاشی از طریق فرآیندهای برخوردی هوا را گرم می‌کند [۶].

برای انتشار HEL در محیط دریایی، مولکول‌های آب تا حد زیادی مهم‌ترین جاذب IR در ارتفاعات پایین هستند. در پنجره جوی نزدیک به ۱ میکرومتر، جذب مولکولی برای یک پالس لیزر فوق کوتاه عمدتاً توسط جذب پیوسته، که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، تعیین می‌شود. با این حال، هنوز نیاز به آزمایش برای تعیین دقیق ضریب جذب پیوسته وجود دارد.



شکل ۳- ضریب تضعیف بر حسب طول موج و وجود پنجره جوی نزدیک به ۱ میکرومتر

(زیرا اجزای نور آبی نور خورشید بیشتر پراکنده می‌شوند) و غروب‌ها قرمز هستند. وقتی اندازه آئروسول با طول موج لیزر قابل مقایسه باشد، از توصیف کامل پراکندگی Mie استفاده می‌شود. منابع اصلی پراکندگی Mie در اتمسفر پایین قطرات آب، دود و گرد و غبار است. برای پراکندگی اجسام با اندازه‌های قابل مقایسه یا بزرگتر از طول موج نور، بازده پراکندگی نسبتاً مستقل از طول موج است. به همین دلیل است که ابرها سفید یا خاکستری هستند زیرا تمام رنگ‌های نور خورشید "سفید" به طور مساوی توسط قطرات بزرگتر آب در ابر پراکنده می‌شوند.

اگرچه میانگین چگالی جرم آب در آئروسول‌های دریایی کوچک است، اما می‌تواند تأثیر زیادی بر پراکندگی تابش لیزر داشته باشد. ضریب پراکندگی آئروسول در محدوده طول موج مورد نظر می‌تواند به بزرگی $\sim 0.2 \text{ km}^{-1}$ باشد [۷].

۴-۴- شکوفایی حرارتی

شکوفایی حرارتی در نتیجه فرآیند جذبی که قبلاً توضیح داده شد رخ می‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر انتشار پرتو لیزر در توان‌های بالا (صدها کیلووات) و بردهای طولانی (چند کیلومتر) دارد. به دلیل افزایش دما ناشی از گرما هنگام جذب، چگالی هوا و ضریب شکست تغییر می‌کند. هوای گرم شده منبسط می‌شود و ضریب شکست را کاهش می‌دهد و در نتیجه یک "عدسی" تشکیل می‌شود. این "عدسی" پرتو لیزر را از کانونی شدن خارج می‌کند و باعث پخش شدن آن می‌شود که باعث کاهش تابش به هدف می‌شود.

وجود باد می‌تواند به کاهش اثرات شکوفایی حرارتی کمک کند زیرا ستون هوا را که در آن پرتو در حال انتشار است با وارد کردن "هوای جدید" خنک می‌کند. پرتو لیزر نیز به سمت باد خم می‌شود و در نتیجه یک نقطه هلالی شکل مشخصه روی هدف ایجاد می‌شود. از طرف دیگر، انتخاب طول موجی که به طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیند جذب قرار نگیرد، می‌تواند به کاهش اثرات شکوفایی حرارتی کمک کند. در شکوفایی حرارتی فرآیند حساس به مکانیسم‌های گرمایشی موجود در هوا است. گرمایش آئروسول نیز با گرم کردن هوای اطراف توسط مکانیسم‌های مختلفی بر شکوفایی حرارتی تأثیر می‌گذارد [۷].

۴-۵- آشفستگی

اثرات تلاطم به دلیل تغییرات تصادفی در چگالی هوا، عمدتاً به دلیل نوسانات دما در هوا است. این تغییر در

میانگین محتوای آب ذرات معلق در هوا معمولاً کمتر از هوای مرطوب است. به عنوان مثال، در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد، چگالی جرم بخار آب $10^{-5} \times 1/5 \sim$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، در حالی که چگالی جرم متوسط آئروسول‌های دریایی معمولاً بسیار کمتر است، حدود 10^{-9} گرم بر سانتی‌متر مکعب. برای آب اقیانوسی، ضرایب جذب در طول موج‌های ۱/۰۴۵، ۱/۶۲۵ و ۲/۲۶۴ میکرومتر به ترتیب برابر ۷، ۲۰ و ۵۰ در سانتی‌متر است. توجه داشته باشید که برای آب خالص، ضریب جذب تا حدودی کمتر از آب اقیانوس است [۶]. برخلاف بخار آب، هیچ پنجره جذبی برای آب مایع وجود ندارد، زیرا فرکانس برخورد مولکولی در مایعات ۱/۳ برابر بیشتر است.

۴-۳- پراکندگی

پراکندگی زمانی اتفاق می‌افتد که فوتون‌های منتقل شده توسط لیزر در جهت‌های تصادفی توسط اجزای اتمسفر هدایت شوند. نوع پراکندگی که رخ می‌دهد به طول موج لیزر و اندازه پراکنده بستگی دارد و می‌توان آن را با استفاده از نظریه پراکندگی Mie توصیف کرد. نظریه پراکندگی Mie فرض می‌کند (۱) همه ذرات اتمسفر کروی هستند، (۲) ذرات پراکنده همگن هستند و ضریب شکست یکسانی دارند، و (۳) نور فرودی یک موج مسطح است. هنگامی که اندازه ذره بسیار کوچک است (کوچکتر از طول موج لیزر)، از حد پراکندگی ریلی برای توضیح اثرات پراکندگی در جو استفاده می‌شود. منابع اصلی پراکندگی ریلی مولکول‌های O_2 و N_2 در هوا هستند. اثرات پراکندگی ریلی برای طول موج‌های کوتاه‌تر، قوی‌تر است. به همین دلیل است که آسمان در روز، آبی به نظر می‌رسد

انتشار تبدیل می شود. برعکس، هنگامی که تلاطم شدید وجود دارد، r_0 کوچک است و پرتو لیزر نامنجم می شود و به پرتوهای جداگانه در سراسر جبهه موج می شکند (شبهه اثرات نشان داده شده در بالا در شکل ۴) [۷].

۵- بحث و نتیجه گیری

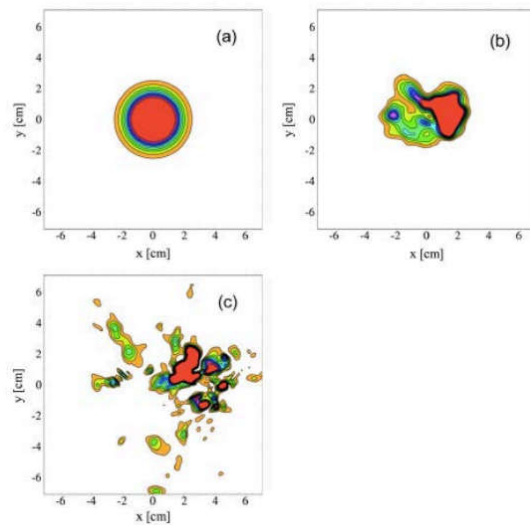
تسلیحات انرژی هدایت شده مبتنی بر لیزر به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از کشتی های نیروی دریایی آینده در نظر گرفته شده است. لیزر الکترون آزاد، به ویژه، برای کاربردهای دریایی مناسب است. می توان آن را برای عملکرد در طیف گسترده ای از طول موج ها طراحی کرد و قادر به تولید توان متوسط بالا در راندمان بالا است. در این مقاله، فرآیندهای فیزیکی کلیدی که بر انتشار لیزرهای پرنرژ در یک محیط دریایی تأثیر می گذارند، مورد بحث و تحلیل قرار گرفت. این فرآیندها شامل شکوفایی حرارتی، تلاطم، جذب و پراکندگی مولکولی/آئروسول است. پراکندگی و جذب ذرات معلق در هوا و همچنین جذب بخار آب می تواند یک محدودیت عمده برای انتشار HEL در یک محیط دریایی باشد.

۶- منابع و مراجع

- [1] A. Rossiter, "High-Energy Laser weapons: Overpromising readiness," *Parameters*, vol. 48, no. Winter 2018-19, pp. 33-44, 2018.
- [2] Y. Kalisky, "Solid-state lasers (SSL) in defense programs," in *Handbook of Solid State Lasers*, Elsevier, 2013, pp. 598-615.
- [3] D. Carroll, "Overview of High Energy Lasers: Past, Present, and Future?," in *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Honolulu, Hawaii, 2011.
- [4] R. O'Rourke, "Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense," p. 64.
- [5] X. Lee, "Introduction," in *Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology*, X. Lee, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1-10.
- [6] P. Sprangle, J.R. Renano, A. Ting, B. Hafizi, and D.F. Gordon, "Propagation of Short, High-Intensity Laser Pulses in Air," *J. Dir. Energy* 1, 73 (2003).
- [7] P. Sprangle, B. Hafizi, A. Ting, and R. Fischer, "High-power lasers for directed energy applications," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, p. F201, 2015.

چگالی هوا در طول مسیر انتشار لیزر منجر به ضریب شکست متغیر در طول مسیر می شود که باعث سرگردانی و عدم تمرکز پرتو لیزر می شود. این نوسانات ذاتی هوا هستند و توسط لیزر القا نمی شوند. از این رو، بر خلاف شکوفایی حرارتی، تأثیر تلاطم بر انتشار لیزر مستقل از شدت لیزر است. اثر تلاطم را می توان با پارامتر ساختار شکست (C_n^2) و پارامتر فرید (r_0) تعیین کرد [۷].

پارامتر ساختار شکست (C_n^2) برای توصیف شدت تلاطم موضعی استفاده می شود. مقدار بزرگ این پارامتر ($10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$) نشان دهنده تلاطم نسبتاً قوی است در حالی که مقدار کوچکتر ($10^{-18} \text{ m}^{-2/3}$) نشان دهنده تلاطم ضعیف است. شکل ۴ اثرات افزایش آشفتگی (خلاء تا تلاطم شدید) را بر شدت پرتو لیزر در ۰.۵ کیلومتر برای طول موج ۱.۰۴۵ میکرومتر نشان می دهد. با افزایش مقدار C_n^2 ، پرتو لیزر شروع به "شکستن" می کند همانطور که در شکل ۴ (ج) نشان داده شده است. C_n^2 همچنین تابعی از ارتفاع با مقادیر معمولاً کوچکتر در ارتفاعات بالاتر است [۷].



شکل ۴- اثرات افزایش آشفتگی (خلاء تا تلاطم شدید) را بر شدت پرتو لیزر در ۰.۵ کیلومتر برای طول موج ۱.۰۴۵ میکرومتر با افزایش مقدار پارامتر ساختار شکست

پارامتر r_0 Fried به عنوان قطری تعریف می شود که پرتو لیزر روی آن انسجام عرضی را در طول انتشار حفظ می کند و با پارامتر ساختار شکست (C_n^2) رابطه معکوس دارد. زمانی که تلاطم ضعیفی وجود داشته باشد r_0 بزرگ به دست می آید و این به انسجام پرتو در سراسر مسیر

بررسی روش‌های جبران‌سازی انتقال توان بی‌سیم در حالت نیمه دینامیک و انتخاب فاصله هوایی مناسب با قابلیت استفاده در

سامانه‌های زیرسطحی

سعید ریاحی^۱، رضا حق مرام^۲ و ابوالفضل نصیری^۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، saeedriahy@ihu.ac.ir

۲-دانشیار دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، rhaghmm@ihu.ac.ir

۳-استادیار دانشکده فنی، سیگنالی و فضای، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، nasirieng@gmail.com

چکیده:

در این تحقیق به بررسی روش‌های جبران‌سازی به کار رفته در سامانه انتقال بدون سیم در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی پرداخته شده است. انتخاب فاصله هوایی مناسب برای انتقال توان بدون سیم به ملاحظات فنی نیاز دارد. در کنار این موارد باید ویژگی هر سیم‌پیچ و ساختار شبکه جبران‌سازی نیز مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش ساختار شبکه‌های جبران‌سازی رایج برای سامانه انتقال توان در حالت نیمه‌دینامیک مورد بررسی قرار گرفته و پس از بررسی ویژگی‌های مختلف هر شبکه جبران‌ساز، برای شبکه‌های منتخب بررسی و آزمایش بیشتر انجام پذیرفته‌است. فاصله هوایی انتقال توان در سامانه رابطه عکس با ضریب تزویج سامانه دارد به نحوی که با افزایش بیش از حد فاصله هوایی ضریب تزویج بسیار کاهش می‌یابد و انتقال توان بطور کامل قطع می‌گردد، لذا بازه ضریب تزویج ایده‌آل در سامانه با سیم‌پیچ‌های دایره‌ای شکل به ازای تغییر فاصله هوایی بیان شد. در پایان ساختار شبکه جبران‌ساز مناسب سامانه انتقال توان در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی با توان ۳kW انتخاب شده و فاصله هوایی مناسب برای دریافت توان با بیشترین بازده انتخاب گردیده است. بازده سامانه با شبکه جبران‌ساز منتخب و فاصله هوایی معین در حدود ۸۹٪ بدون استفاده از مبدل کنترل‌کننده برای کاهش فضای نصب و ابعاد در سمت ثانویه و در فاصله هوایی تقریبی ۴۰٪ قطر پد حاصل شد. نتایج تحقیق با استفاده از نرم افزار Psim، بررسی و مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

انتقال توان بدون سیم، شبکه جبران‌ساز، نیمه‌دینامیک

Investigation of Methods of Compensation of Wireless Power Transmission in Semi-Dynamic Mode and Selection of Suitable Air Distance with Usability in Subsurface Systems

Saeed Riahy¹, Reza Haghmaram², Abolfazl Nasiri³

1 Electrical Engineering Department, Imam Hossein University

2,3 Raad Center, Electrical Faculty, Imam Hossein University

Abstract:

This study investigates the compensation methods used in the wireless power transfer system in the semi-dynamic subsurface mode. Choosing the appropriate air gap for wireless power transfer requires technical considerations. Along with these, the characteristics of each coil and the compensation network structure should also be considered. In this study, the structure of common compensation networks for the power transfer system in the semi-dynamic subsurface mode was investigated and after examining the different characteristics of each compensation network, further investigation and testing was performed for the selected networks. The air gap of power transfer in the system has an inverse relationship with the coupling coefficient of the system, so that with

increasing the air gap excessively, the coupling coefficient decreases significantly and the power transfer is completely cut off, so the ideal coupling coefficient range in the system with circular coils was expressed for changing the air gap. The appropriate compensation network structure for wireless power transmission in semi-dynamic mode with 3 kW power and appropriate airspace for receiving the maximum efficiency power was selected. Suitable efficiency of the converter was obtained with the selected compensator network and an approximate air distance of 40% of the diameter of the pad. The results of the research have been investigated and confirmed using PSIM software.

Keywords: Compensating network, Semi-dynamics, Wireless power transmission

کاهش می‌دهد [9]، [12]. دلیل اهمیت سطح شارژ باتری و قابلیت اطمینان سیستم و عدم دخالت فیزیکی انسان، شارژ باتری با ایمنی، سرعت و بازده بیشتر نسبت به شارژر سیم‌دار از شارژر بدون سیم استفاده می‌شود [13-15].

مرجع [16] نمونه‌ای از پدهای انتقال توان برای شارژر را طراحی نموده است و کمیت‌های طراحی کلیدی برای تعیین تأثیر آنها بر توان سیم‌پیچ و عملکرد آن را مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [17]، سیر تکامل ساختار جفت‌کننده مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و یک جفت‌کننده مغناطیسی مبتنی بر سیم‌پیچ دوقطبی با یک روش جفت‌سازی محیطی جدید ارائه نموده است. سیم‌پیچ‌های حلقوی به‌طور گسترده در سامانه شارژر بدون سیم زیر آب استفاده می‌شود اما وزن سیم‌پیچ حلقوی، بار منبع تغذیه و وسایل نقلیه زیر آب را به شدت افزایش می‌دهد. در [18]، یک سامانه انتقال توان زیرسطحی با ساختار پدهای سیم‌پیچ خمیده برای انطباق با بدنه استوانه‌ای وسایل نقلیه زیر آب خودران پیشنهاد شده است. سیم‌پیچ‌ها در حالت‌های تک‌قطبی و دوقطبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ساختار سیم‌پیچ دوقطبی دارای ثانویه سنگین تری نسبت به ساختار سیم‌پیچ خمیده تک‌قطبی است. میدان الکترومغناطیسی در وسایل نقلیه زیر آب ساختار سیم‌پیچ دوقطبی بسیار کوچکتر از ساختار سیم‌پیچ خمیده تک‌قطبی است، به این معنی که ساختار سیم‌پیچ دوقطبی تأثیر کمتری بر ادوات الکترونیکی در وسایل نقلیه زیر آب دارد. فناوری انتقال توان بدون سیم به دو حالت کلی متحرک و ثابت دسته‌بندی می‌شود. نمونه رایج انتقال توان بدون سیم حالت ثابت (استاتیک) است. در شارژر بدون سیم استاتیک فاصله گیرنده و فرستنده همواره در یک اندازه معین و تقریباً ثابت می‌باشد. در این حالت ناهماهنگی میان پدها و مشکلات ضریب تزویج در نظر گرفته نمی‌شود. مشکلات مذکور با تنظیم دقیق شبکه جبران‌ساز و طراحی مناسب یک مبدل تثبیت توان در ثانویه تا حدود بسیار زیادی مرتفع می‌شوند [6-8].

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر گسترش صنایع و مصرف سوخت‌های فسیلی سبب افزایش آلودگی‌های زیست محیطی و تغییرات آب و هوایی شده‌اند. به همین منظور فعالیت خودروهای برقی، وسایل نقلیه عمومی برقی، تجهیزات زیردریایی، کشتی‌ها، حمل و نقل ریلی برقی و نمونه‌های بسیار دیگر افزایش یافته است و انتقال توان الکتریکی و شارژ باتری‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]، [2].

امروزه سامانه‌های شارژ الکتریکی در دو نوع سیم‌دار و بدون-سیم در دسترس هستند. با توجه به کاربرد و فضای استفاده از وسایل الکتریکی یکی از این دو نوع روش شارژر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت‌هایی در بین شارژرهای با اتصال فیزیکی سیم‌دار با سامانه‌های شارژر بدون سیم وجود دارد که سبب شده‌اند روش شارژر بدون سیم، کاربردی‌تر و باعث پیشرفت در صنعت خودروهای الکتریکی شود [3-7].

انتقال توان بدون سیم به دو دسته کلی میدان نزدیک و میدان دور دسته‌بندی می‌گردد. در میدان نزدیک فرکانس کاری پایین و بصورت امواج الکترومغناطیسی و یا امواج الکتریکی بصورت مسیر انتقال دید مستقیم هستند. در دسته دیگر که میدان دور هستند و به روش تابشی معروف هستند با کمک انتقال امواج رادیویی، مایکروویو و یا تابش نوری توان را منتقل می‌کنند. انتقال توان بدون سیم از طریق القا مغناطیسی و یا امواج آکوستیک انجام می‌شود و دارای مزایا متعددی نسبت به انتقال توان سیم‌دار است [7-9].

انتقال توان بدون سیم می‌تواند محدودیت‌های ذخیره‌سازی انرژی را کاهش دهد. اولین مزیت شارژر بدون سیم حذف کابل انتقال انرژی است؛ در شارژر سیم‌دار، محدودیت محل شارژر مطرح است، با حذف کابل انتقال توان، قابلیت انعطاف-پذیری در محل شارژر افزایش یافت و این مشکل مرتفع شد [10]، [11]. این روش انتقال توان، زمان شارژر را با توجه به کاهش محدودیت‌های اتصال به منبع و محل شارژ شدن،

در حالت متحرک (دینامیک) برای شارژ باتری وسیله نقلیه نیاز به توقف کامل نیست و با حرکت در جهت‌های مختلف نیز می‌توان باتری را شارژ کرد. برای این حالت باید اینورتر فرکانس بالا، سیم‌پیچ‌های مناسب، شبکه جبران‌ساز و تشدیدکننده‌های مناسب با تغییرات ضریب تزویج طراحی شوند [19-22]. حالت نیمه‌دینامیک بسیار نزدیک به حالت استاتیک است. در این روش، سامانه در ابتدای روند شارژ شرایط با توجه به فاصله هوایی پدها تنظیم می‌شود، سپس این شرایط تا اتمام شارژدهی به باتری ثابت باقی می‌ماند [23]، [24]. تغییرات در فاصله هوایی پدها سبب تغییرات ضریب تزویج سیم‌پیچ‌ها می‌شود که باعث به وجود آمدن توان غیرحقیقی مازاد نیاز در خروجی اینورتر و به طبع آن کاهش بازده سامانه و موارد از این قبیل می‌شود که سبب شد شبکه‌های جبران‌ساز در انتقال توان بدون سیم از اهمیت بالایی برخوردار باشند [25]. با توجه به وابسته بودن توان انتقالی و ضریب تزویج میان سیم‌پیچ‌ها، تشخیص موقعیت سیم‌پیچ‌ها و حذف ناهماهنگی میان سیم‌پیچ در انتقال توان بدون سیم بسیار حائز اهمیت است. مرجع [26]، یک استراتژی انتخاب خازن تشدید تنظیم‌شده برای از بین بردن تأثیر تغییر ضریب تزویج بر توان و بازده یک سامانه انتقال توان بدون سیم با استفاده از جبران‌ساز LCC-S پیشنهاد می‌کند. در [27]، طراحی مبدل تشدیدشده با جبران‌ساز مستقل از سیم‌پیچ‌ها برای کاربرد شارژ وسیله نقلیه الکتریکی با شکاف هوایی 80 mm و ولتاژ خروجی با برد وسیع ارائه شده است. به جای داشتن فرکانس تشدید یکسان در مدارهای جبران‌ساز اولیه و ثانویه رایج در این نوع سامانه‌ها، از فرکانس‌های تشدید متفاوت برای برآوردن مشخصات سامانه استفاده شده است.

مقاله [13]، یک روش جدید با استفاده از سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده تعبیه شده در سامانه و ماژول‌های الکترونیک قدرت برای ایجاد یک سامانه تشخیص موقعیت و زمان شارژ بر اساس اثرات توان به جای مانده از یک گیرنده استفاده می‌کند. مرجع [14] یک الگوریتم برای پیش‌گیری از اشباع سیم‌پیچ‌ها ارائه می‌کند. برای این منظور مبدل‌های dc-dc تمام‌پل فعال که در سامانه شارژ استفاده می‌شوند را مورد هدف قرار می‌دهد. پیش‌گیری از اشباع با تشخیص تغییر در شیب جریان سیم‌پیچ‌ها در نزدیکی مرز اشباع و تغییرات چرخه کاری بر روی مبدل حاصل می‌شود. مرجع [21]، یک استراتژی کنترلی برای به حداکثر رساندن بهره‌وری انرژی در شرایط ناهماهنگی مختلف بین پدها و رابطه بین بازده و

نسبت ولتاژهای خروجی اینورترهای سمت فرستنده تحت ناهم‌ترازی‌های مختلف ارائه نمود.

در این پژوهش، تحلیل و بررسی تأثیر تغییر فاصله هوایی بین پدهای گیرنده و فرستنده در شارژر بدون سیم در محدوده تغییرات معین و یافتن مناسب‌ترین ساختار جبران‌سازی با بیشترین بازده در مبدل 3kW با ولتاژ خروجی 60V و جریان خروجی 50A با فرکانس کلیدزنی 50kHz است.

در این پژوهش با شبیه‌سازی شبکه‌های جبران‌ساز مختلف، چند شبکه جبران‌ساز مناسب برای کاربری زیرسطحی انتخاب شد تا شرایط کار سامانه زیرسطحی را فراهم کند. سپس شبکه جبران‌ساز طراحی شده بصورت نیمه‌دینامیک با تغییرات فاصله هوایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و کمیت‌های توان، بازده و تغییرات ناگهانی ولتاژ و جریان بررسی شده‌اند و در نهایت یک ساختار با شرایط مناسب و فاصله هوایی مناسب برای کاربری در انتقال توان بدون سیم نیمه-دینامیک بدون استفاده از مبدل DC-DC تثبیت توان در ثانویه انتخاب شده است.

در ادامه در بخش دوم، قسمت‌های مختلف سامانه انتقال توان بدون سیم القایی معرفی شده است. در بخش سوم روش انجام کار معرفی شده و در بخش آخر نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- انتقال توان بدون سیم القایی

۲-۱- سیم‌پیچ انتقال توان

انتقال حامل‌های انرژی به کمک سیم‌پیچ از پرکاربردترین حالت‌های انتقال توان است. نحوه عملکرد این سیم‌پیچ‌ها با کمک قانون القا فارادی و قانون لنز انجام می‌شود و عملکردی شبیه به موتور القایی دارند. با اعمال ولتاژ به دو سر یک سیم‌پیچ و عبور جریان از سیم‌پیچ اول، شارژ مغناطیسی تولید می‌گردد. با قرارگیری سیم‌پیچ دوم در مسیر شار، جریان و ولتاژی در سیم‌پیچ دوم القا می‌شود، هر چه فاصله هوایی میان دو سیم‌پیچ کمتر باشد، توان انتقالی و بازده سامانه بیشتر می‌شود ضمناً برای کاهش جریان‌های گردابی و ایجاد مسیر حلقه بسته برای شار تولیدی از هسته فریت استفاده می‌گردد.

سیم‌پیچ‌ها با توجه به شرایطی نظیر فاصله هوایی پدها، تحمل جریان عبوری، شکل بدنه و محیط کاری سامانه در اندازه، شکل و مقدار سلفی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۲- مبدل‌های الکترونیک قدرت

پیشرفت انتقال‌دهنده‌های توان بدون سیم مرهون پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت است. با پیشرفت دانش در ساخت نیمه‌هادی‌ها، دیود و ترانزیستورهای سریع با توان بالا ساخته شد. در مبدل‌های الکترونیک قدرت ادوات نیمه-هادی کنترل‌پذیر نظیر ماسفت‌ها و IGBT ها نقش مهمی بر عهده دارند. روش‌های مختلف برای کلیدزنی این مبدل‌ها وجود دارد نظیر مدولاسیون پهنای باند (PWM). در هنگام کلیدزنی تداخل الکترومغناطیسی و تغییرات ناگهانی ولتاژ و جریان سبب آسیب‌پذیر شدن مبدل‌ها می‌شود؛ به این منظور از مبدل‌های تشدید شده استفاده شد. در انتقال توان القایی از شبکه جبران‌ساز برای اندوکتانس پدها و تبدیل مبدل‌های الکترونیک قدرت معمولی به مبدل‌های تشدید شده استفاده می‌شوند که به دلیل وجود مبدل‌های تشدید شده، بازده سامانه انتقال توان بیشتر شد. مبدل‌های الکترونیک قدرت مختلف نظیر یکسوساز، اینورتر و چاپر در قسمت‌های مختلف سامانه انتقال توان کاربرد دارند. در این سامانه‌ها از اینورتر برای تولید ولتاژ با فرکانس و سطح ولتاژ معین و از چاپر به منظور کنترل سطح ولتاژ برای شارژ باتری و وسایل الکتریکی، همچنین تثبیت توان خروجی با کنترل ولتاژ و جریان خروجی استفاده می‌شوند.

۲-۳- شبکه‌های جبران‌ساز

شبکه جبران‌ساز متشکل از مجموعه‌ای از سلف و خازن-هاست که در سمت اولیه و ثانویه سامانه قرار می‌گیرند. برای کاهش تاثیر فاصله‌هوایی پدها و کاهش تلفات سامانه به جهت غیر هم‌فاز بودن کمیت‌ها، کافی است یک شبکه جبران‌ساز با پدها سری شود. شبکه جبران‌ساز اثر اندوکتانس متقابل پدها را محدود می‌کند؛ ضمناً جریان غیرحقیقی را کاهش می‌دهد و تنها به مقدار نیاز برقراری ارتباط میان دو پد در سامانه باقی می‌گذارد. با کمک شبکه جبران‌ساز با ایجاد هم‌فازسازی ولتاژ و جریان و ایجاد شبکه تشدید برای مبدل الکترونیک قدرت، بازده را افزایش داده و در حالت حداکثر قرار می‌دهد. شبکه جبران‌ساز با توجه به نوع و شرایط کاری سامانه، کمیت‌های خروجی را در حالت تغییرات کم ولتاژ یا جریان قرار می‌دهد که به منبع ولتاژ و یا منبع جریان نزدیک می‌شود. شبکه جبران‌ساز مناسب در سامانه زیرسطحی باید سمت ثانویه سبک و با فضای نصب کم انتخاب شود. ضمناً عدم دسترسی آسان به درون زیرسطحی سبب می‌گردد سمت ثانویه با حداقل درجه

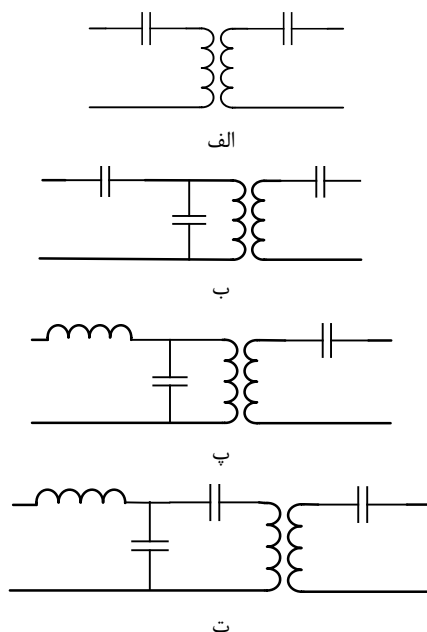
آزادی ممکن طراحی شود. به همین منظور از میان تمام شبکه‌ها، جبران‌سازهای با ثانویه خازن سری انتخاب شده‌اند تا علاوه بر فضای نصب کم، قابلیت اطمینان سامانه افزایش یافته و در حالت ولتاژ ثابت عمل کند.

ساختارهای PP و SP به دلیل متغیر بودن ولتاژ در خروجی همچنین ساختار PS بدلیل تغییرات ناگهانی ولتاژ با تغییر فاصله هوایی انتخاب نشده‌اند. جبران‌سازهای پیچیده نظیر LC-LC و LCC-LCC ضمن مستقل بودن از تغییرات ضریب تزویج و تغییرات کم ولتاژ و جریان در خروجی، اما به دلیل درجه آزادی زیاد در سمت ثانویه، نیاز به فضای نصب بیشتر نسبت به ثانویه تک‌عضوی و افزایش تلفات به-سبب وجود المان‌های زیاد، مورد انتخاب قرار نگرفتند.

در این پژوهش جبران‌سازهای SS، SP-S، LC-S و LCC-S مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱ شمای شبکه‌های جبران‌ساز منتخب را نمایش می‌دهد.

۳- طراحی سامانه

برای طراحی سامانه انتقال توان بدون سیم باید مقاومت‌های معادل سامانه در نظر گرفته شوند. با محاسبه مقاومت معادل و ولتاژ ورودی و خروجی می‌توان جریان‌های سمت اولیه و ثانویه را محاسبه کرد و طراحی سیم‌پیچ، انتخاب خازن مناسب برای شبکه جبران‌ساز و دیگر موارد نیز ممکن می‌گردد.



شکل ۱- شبکه‌های جبران‌ساز انتقال توان بدون سیم

الف) SS ب) SP-S پ) LC-S ت) LCC-S [22]

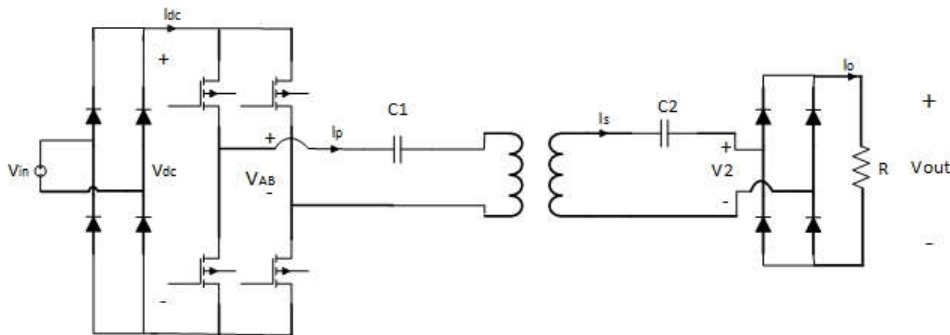
همچنین از رابطه (۴) و (۵) روابط جریان برای جبران‌ساز SS محاسبه می‌شود [7]:

$$I_p = \frac{4V_0 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{2} - \pi + \theta\right)}{\pi \omega M} \quad (4)$$

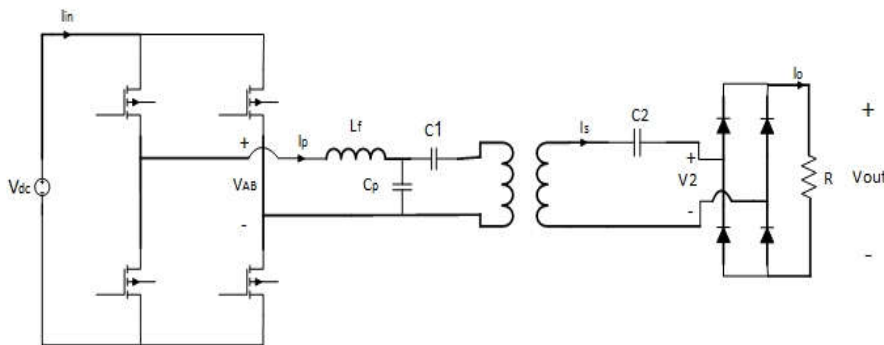
$$I_s = \frac{4V_0 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{2} - \pi\right)}{\pi \omega M} \quad (5)$$

که α و β زاویه هدایت ساق‌های اینورتر، M القای متقابل سیم‌پیچ‌ها و ω_0 فرکانس زاویه‌ای مدار است. ولتاژ خروجی اینورتر پس از جبران‌سازی که به سمت ثانویه منتقل می‌شود از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$V_{AB} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (6)$$



شکل ۲- سامانه انتقال توان با شبکه جبران‌ساز SS



شکل ۳- سامانه انتقال توان با شبکه جبران‌ساز LCC-S

k ضریب تزویج میان سیم‌پیچ‌هاست. ضریب تزویج سیم-پیچ‌ها از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p I_s}} \quad (8)$$

برای محاسبه C_{eq} می‌توان از روابط (۱۰) استفاده کرد:

$$C_{eq} = \frac{\pi^2 \sin \theta}{4\omega_0 R (\cos(2\theta) + 1)} \quad (10)$$

که θ زاویه فاز و R مقاومت معادل سامانه است.

برای طراحی شبکه جبران‌ساز فرکانس کلیدزنی مورد نظر است. طراحی شبکه جبران‌ساز با توجه ساختار شبکه

روابط محاسبه مقادیر سامانه با شبکه‌های جبران‌ساز SS و LCC-S برای محاسبه کمیت‌ها و طراحی سامانه در ادامه قرار داده شد. مقاومت معادل سمت اولیه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Z_{ref} = \frac{j\omega_0 M I_s}{I_p} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_{eq}} (1 + j\omega_0 C_{eq} R_{eq}) \quad (1)$$

I_p جریان سمت اولیه و I_s جریان ثانویه است. از رابطه (۲)، I_p و رابطه (۳)، I_s برای جبران‌ساز LCC-S محاسبه می‌شود [21]:

$$I_p = \frac{V_{AB}}{j\omega L_f} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{j\omega M I_p}{R_s + R} \quad (3)$$

ولتاژ خروجی (V_o) سامانه پس از یکسوسازی به بار منتقل می‌گردد. ولتاژ خروجی یکسوساز است. برای محاسبه ولتاژ V_o از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$V_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{AB}' \quad (7)$$

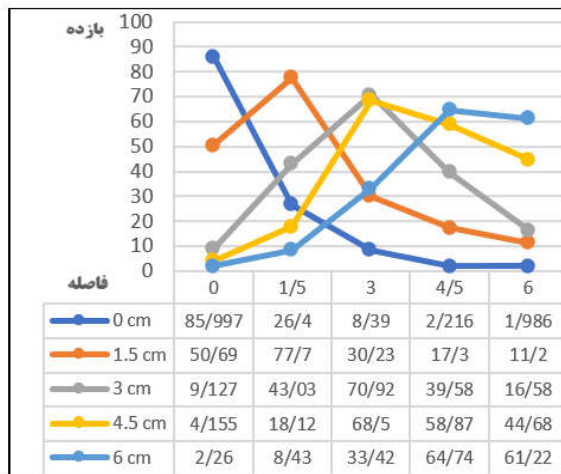
V_{AB}' ولتاژ خروجی قبل یکسوسازی و V_o ولتاژ خروجی سامانه است. I_p سیم‌پیچ سمت اولیه و I_s سیم‌پیچ سمت ثانویه است.

۴- شبیه‌سازی سامانه

شبکه‌های جبران‌ساز طراحی شده‌اند و نتایج مختلف به ازای بارهای مختلف با بیشترین بازده برای سامانه با توان ۳kW در نمودار شکل ۴ تا شکل ۷ نمایش داده شده است. سامانه انتقال توان بدون سیم با قطر پد ۱۱cm مدنظر است. میزان خاصیت سلفی هر سیم‌پیچ و ضریب تزویج به ازای فاصله هوایی‌های مختلف محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شد.

جدول ۲- اندوکتانس پدها در فاصله هوایی مختلف

فاصله	اولیه (uH)	ثانویه (uH)	ضریب تزویج
فاصله ۰mm	۹۰٫۷	۹۲٫۳	۰٫۸۵
فاصله ۱۵mm	۶۹٫۲	۶۸٫۳	۰٫۴۹۱
فاصله ۳۰mm	۶۴٫۵	۶۳٫۸	۰٫۲۸
فاصله ۴۵mm	۶۳٫۳	۶۲٫۳	۰٫۱۶۲
فاصله ۶۰mm	۶۲٫۹	۶۱٫۷	۰٫۱



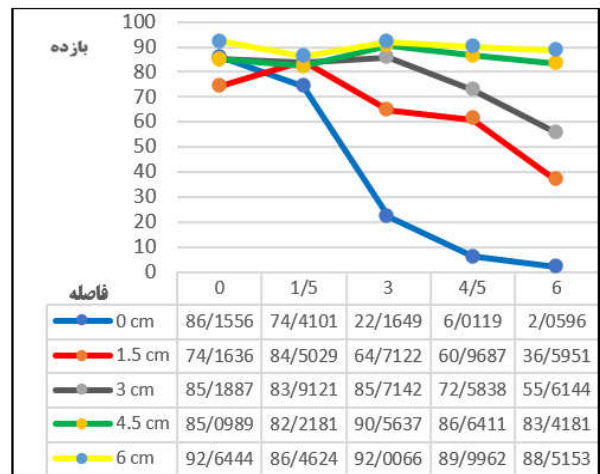
شکل ۵- نمودار بازده-فاصله ساختار SP-S

متفاوت است برای این منظور در جدول ۱ روابط محاسبه شبکه‌های جبران‌ساز مختلف نمایش داده شده است.

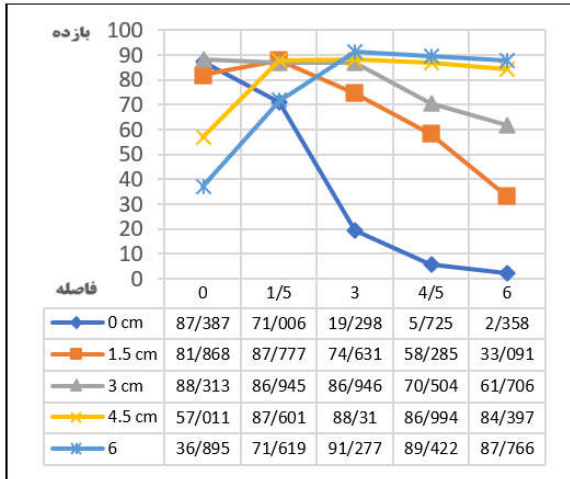
جدول ۱- روابط محاسبه شبکه جبران‌ساز

محاسبات	ساختار
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1 L_1}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}}$	SS
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_p^2}{M} C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_p^2}{L_p - M} C_p}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}}$	SP-S
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_p(L_1 - L_M)}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}} \quad L_f = L_M$	LC-S
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 - L_M)}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}} = \frac{1}{\sqrt{C_p L_f}} \quad ; L_f = L_M$	LCC-S

ساختاری انتخاب می‌گردد که کمترین تغییرات بازده و بیشترین تثبیت توان را دارا باشد. سامانه مورد نظر برای کاهش فضای نصب و کاهش وزن سامانه مبدل DC-DC حذف گردید پس فاصله مناسب بر طراحی شبکه جبران‌ساز و فاصله هوایی مناسب شارژ باید با محدوده تغییرات معین تعیین گردد.

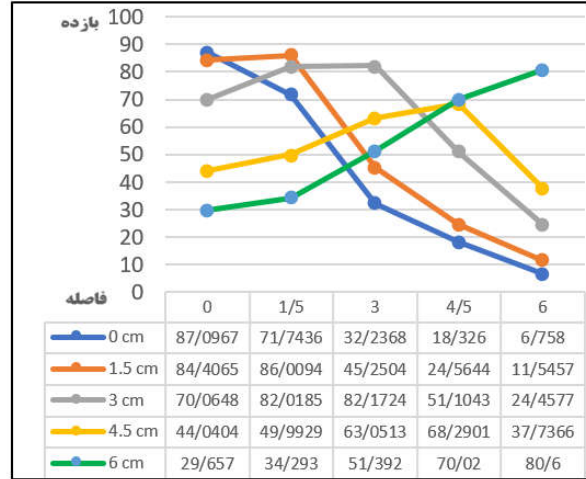


شکل ۴- نمودار بازده-فاصله ساختار SS



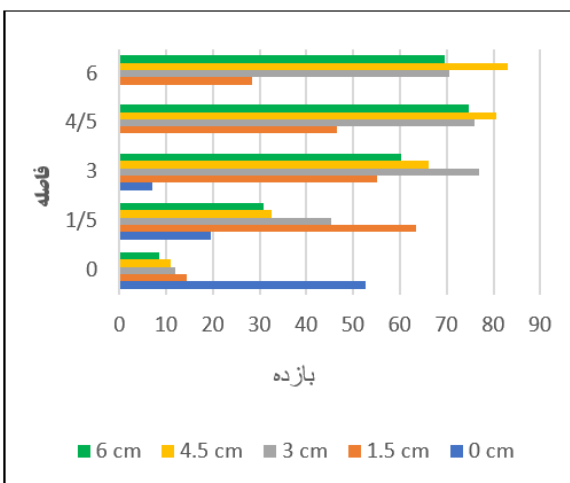
شکل ۷- نمودار بازده-فاصله ساختار LCC-S

ساختار LCC-S و ویژگی‌های نزدیک دارند و در شکل ۴ و شکل ۷ به بررسی ویژگی‌های ساختار در سامانه ۳kW ثابت ۱،۲ اهم انجام شده و انتخاب بین ساختارهای SS و LCC-S در شرایط یکسان را فراهم می‌کند و امکان انتخاب بهتر را فراهم می‌کند. در این نمودارها محور افقی بازده و محور عمودی فاصله هوایی را نمایش می‌دهد. هر فاصله هوایی بررسی قرار گرفته است.

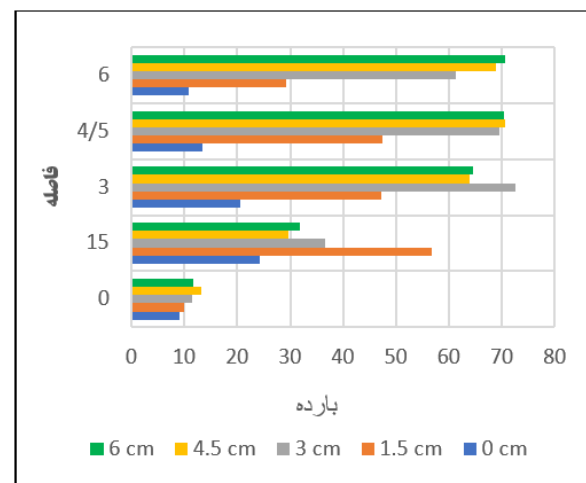


شکل ۶- نمودار بازده-فاصله ساختار LC-S

در سامانه انتقال توان تثبیت توان و بازده بسیار اهمیت دارد. در شکل ۴ تا شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی سامانه با ساختار شبکه جبران‌سازهای مختلف مشاهده می‌شود. در نمودارهای ارائه شده، هر نمودار تغییرات بازده - فاصله هوایی را به ازای طراحی شبکه جبران‌ساز در فاصله هوایی مرجع نشان داده است هر رنگ نمودار به ازای یک مقدار فاصله هوایی مرجع طراحی شده است. ساختارهای LC-S و SP-S با توجه به شکل ۵ و شکل ۶ در فاصله مرجع جبران‌سازی بیشترین بازده را دارند و با تغییر فاصله هوایی تغییرات زیادی دارند و مناسب حالت نیمه‌دینامیک نیستند.



الف



ب

شکل ۸- نمودار بازده-فاصله ساختار SS با بار ۱،۲ اهم (ب) ساختار LCC-S با بار ۱،۲ اهم

جدول ۳- کمیت‌های ورودی و خروجی و بازده ساختارهای LCC-S و SS در بازه‌های متفاوت با بارهای متفاوت

فاصله هوایی	فاصله هوایی مرجع	بازده SS	بازده LCC-S	SS				LCC_S			
				I _{out}	V _{out}	I _{in}	V _{in}	I _{out}	V _{out}	I _{in}	V _{in}
۰	۰	۸۶,۱	۸۷,۳۶	۳۵,۸	۸۶,۱	۳۵,۸	۱۰۰	۳۹,۵	۷۱	۳۲,۱	۱۰
۱,۵		۷۴,۴۴	۷۱,۱۵	۳۳,۵	۸۴	۳۷,۸	۱۰۰	۱۰	۳۷	۵,۲	۱۰
۰	۱,۵	۷۴,۰۵	۸۱,۷۵	۳۸,۹	۸۳	۴۳,۶	۱۰۰	۲۹,۹	۹۱	۳۳,۳	۱۰
۱,۵		۸۴,۴	۸۷,۵	۳۹,۵	۷۵	۳۵,۱	۱۰۰	۴۰	۷۲	۳۲,۹	۱۰
۱,۵	۳	۸۳,۸	۸۶,۳	۳۴,۴	۸۶	۳۵,۳	۱۰۰	۳۲,۸	۸۸,۵	۳۳,۸	۱۰
۳		۸۵,۶۵	۸۶,۸۱	۳۹,۴	۷۵	۳۴,۵	۱۰۰	۳۹,۵	۷۵,۱	۳۴,۲	۱۰
۱,۵	۴,۵	۸۵,۶۲	۸۵,۴۲	۳۴,۴	۷۷	۳۲,۲	۱۰۰	۳۴,۲	۸۵,۵	۳۴,۲	۱۰
۳		۹۰,۵۹	۸۸,۳	۴۰	۷۶,۱	۳۳,۶	۱۰۰	۳۹,۳	۷۴,۷	۳۳,۱	۱۰
۴,۵		۸۶,۷۴	۸۷,۱۴	۴۵,۱	۶۷,۷	۳۵,۲	۱۰۰	۴۰,۱	۷۲,۳	۳۳,۳	۱۰
۳	۶	۹۲,۱۶	۹۱,۶۶	۴۱۱	۷۴	۳۳	۱۰۰	۳۱,۲	۹۵,۴	۳۲,۵	۱۰
۴,۵		۹۰,۴۳	۸۹,۲۹	۴۱,۶	۷۰	۳۲,۲	۱۰۰	۳۸,۴	۷۶,۹	۳۳,۱	۱۰
۶		۸۸,۶۳	۸۷,۷۶	۴۸,۶	۶۳,۱	۳۴,۶	۱۰۰	۴۷,۸	۶۲,۳	۳۴	۱۰

جدول ۴- ویژگی‌های ساختار شبکه جبران‌ساز در سامانه

ساختار سمت اولیه	نوع منبع توان	اندازه و حجم ساختار
SS	ولتاژ	کم
SP	ولتاژ و جریان	متوسط
LC	ولتاژ	متوسط
LCC	ولتاژ و جریان	زیاد

سامانه شارژ بدون سیم باید توانایی تثبیت توان و ضمنا ویژگی در دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت را داشته باشد. ساختار LCC-S ویژگی این را دارد تا بصورت منبع جریان در فواصل بیشتر از مرجع طراحی جبران‌ساز کار کند و بصورت منبع ولتاژ در فواصل کمتر از فاصله هوایی مرجع جبران‌سازی کار کند. ساختارهای SS، LC-S و SP-S در

طبق جدول ۳ و شکل ۸ مشاهده شد بازده در ساختار LCC-S در اکثر فاصله هوایی‌ها بیشتر از ساختار SS است. ضمنا دامنه تغییرات بازده در فاصله هوایی‌های مرجع در ساختار SS بیشتر از ساختار LCC-S است. همچنین تغییرات بازده در سامانه با جبران‌ساز طراحی شده براساس فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm و ضریب تزویج ۰,۱۶، بازده با کمترین تغییرات را نسبت به دیگر فاصله‌ها دارد. در دو جبران‌ساز بیشترین بازده در فاصله ۳ cm و ضریب تزویج ۰,۲۸ حاصل شد. در شارژر دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت وجود دارد که بعد از بررسی ساختارها نتیجه در جدول ۴ قرار داده شد.

اکثر شرایط ویژگی منبع ولتاژی دارند و حالت کاری وابسته به بار سامانه و فاصله هوایی سامانه است.

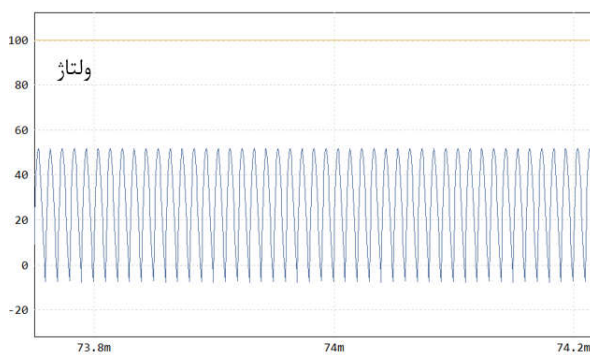
با توجه به بررسی‌های انجام شده و مشاهده نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۴ تا شکل ۷ و سپس شکل ۸ و جدول ۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود جبران‌ساز LCC-S مناسب‌ترین شرایط برای انتقال توان با بازده بالا با کمترین دامنه تغییرات در فاصله هوایی برابر را ایجاد می‌کند. ضمناً این ساختار جبران‌سازی تغییرات ولتاژ و جریان را با توجه به سطح بار و تغییرات فاصله محدود می‌کند و در صورت تغییرات بیش از حد محدودیت‌ها سبب جلوگیری از آسیب‌های زیاد به سامانه می‌شوند.

بر این اساس فاصله هوایی با ضریب تزویج بازه ۰,۱۵ تا ۰,۵ فاصله هوایی مناسب جهت دریافت بیشترین بازده و

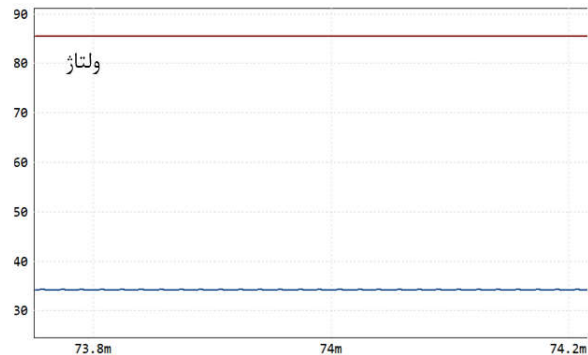
کمترین تغییرات بازده و ولتاژ خروجی است. این فاصله هوایی در سامانه‌ها با پدهای دایره‌ای شکر حدود ۳۰٪ الی ۴۰٪ طول قطر پد را شامل می‌شود.

فاصله هوایی مناسب جهت طراحی جبران‌سازی نیز باید بیشتر از فاصله هوایی انتقال توان انتخاب شود تا علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان بتواند قابلیت جابجایی بیشتری را برای سامانه فراهم کند. فاصله هوایی مرجع طراحی مناسب در حدود ۴۰٪ قطر پد یا ضریب تزویج بازه ۰,۱۵ تا ۰,۲ است.

در شکل ۹ تا شکل ۱۱ کمیت‌های الکتریکی سامانه با جبران‌ساز LCC-S در فاصله هوایی مرجع انتخاب شده طی تغییرات فاصله هوایی میان پدها قابل مشاهده است.

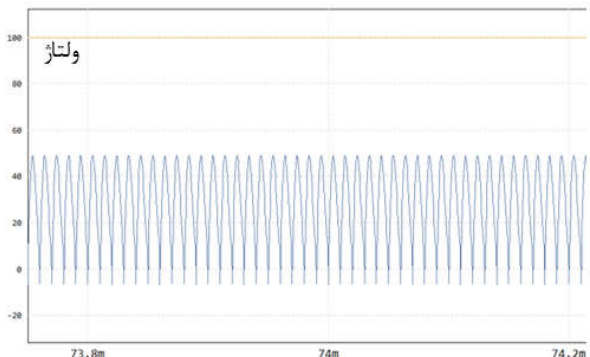


ب

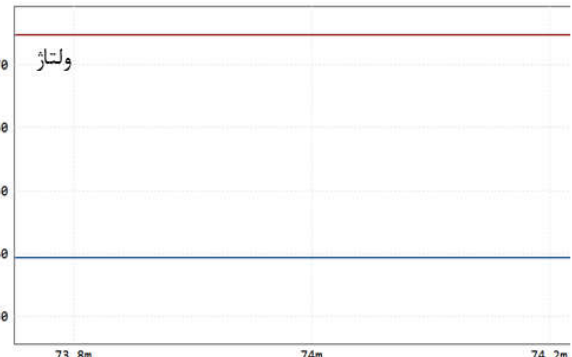


الف

شکل ۹- سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۱,۵ cm در فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm (الف) خروجی (ب) ورودی

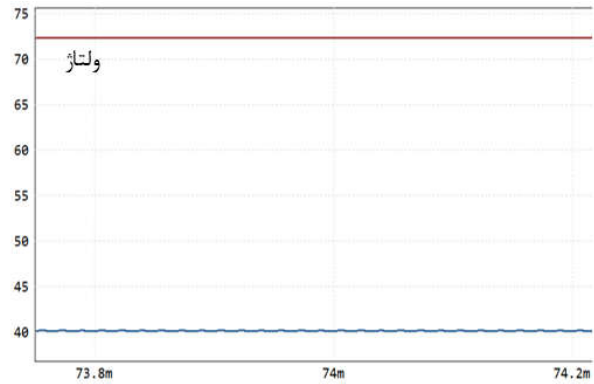
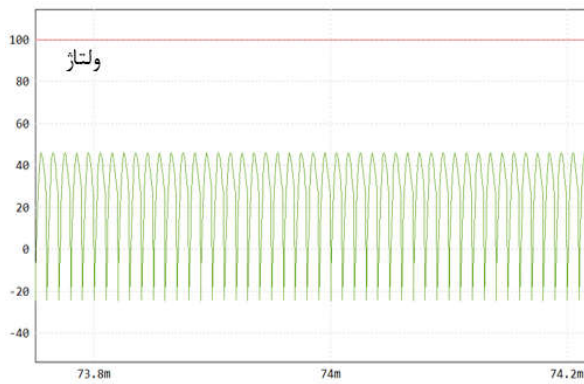


ب



الف

شکل ۱۰- سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۳ cm در فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm (الف) خروجی (ب) ورودی



ب

الف

شکل (۱) - سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۴٫۵ cm در فاصله هوایی مرجع ۴٫۵ cm (الف) خروجی (ب) ورودی

of multiple vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42404–42421, 2020.

- [2] G. Li, Q. Sun, L. Boukhatem, J. Wu, and J. Yang, “Intelligent vehicle-to-vehicle charging navigation for mobile electric vehicles via VANET-based communication,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 170888–170906, 2019.
- [3] Y. Zhang, S. Chen, X. Li, and Y. Tang, “Design of high-power static wireless power transfer via magnetic induction: An overview,” *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 281–297, 2021.
- [4] A. Masood, J. Hu, A. Xin, A. R. Sayed, and G. Yang, “Transactive energy for aggregated electric vehicles to reduce system peak load considering network constraints,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 31519–31529, 2020.
- [5] S. Y. Choi and C. T. Rim, “Recent progress in developments of on-line electric vehicles,” in *2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, IEEE, 2015, pp. 1–8.
- [6] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, “Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6533–6545, 2016.
- [7] F. Xu, S.-C. Wong, and K. T. Chi, “Overall loss compensation and optimization control in single-stage inductive power transfer converter delivering constant power,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 37, no. 1, pp. 1146–1158, 2021.
- [8] S. A. Q. Mohammed and J.-W. Jung, “A comprehensive state-of-the-art review of wired/wireless charging technologies for battery electric vehicles:

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روش‌های جبران‌سازی به کار رفته در سامانه انتقال بدون‌سیم در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی پرداخته شده است. برای انتخاب فاصله هوایی مناسب برای انتقال توان بدون‌سیم در کنار ویژگی هر سیم-پیچ و مبدل الکترونیک قدرت باید ساختار شبکه جبران-سازی نیز مورد توجه قرار گیرد. در سامانه زیر سطحی بدلیل عدم دسترسی آسان به سامانه زیر آب بخش ثانویه باید پیچیدگی کمی داشته باشد. ویژگی‌های ساختار SS و LCC-S بسیار نزدیک به هم است اما ساختار LCC-S توانایی فعالیت در هر دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت را دارد. بازده LCC-S در فاصله هوایی ثابت نسبت به جبران‌ساز SS به ازای خروجی ۳kW، حدود ۲٪ تغییرات نسبت دارد. در LCC-S طبق نتایج شبیه‌سازی قابل اطمینان‌ترین ساختار برای حالت نیمه‌دینامیک است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، فاصله هوایی ۴٫۵cm فاصله مناسب برای طراحی جبران‌ساز و فاصله ۳cm مناسب جهت انتقال توان و شارژ رسانی است. بیشترین بازده در این فاصله بدون نیاز به مبدل تثبیت توان DC-DC برابر ۸۸٫۳٪ است و تغییرات کمتر از ۲٪ را به ازای تغییرات کمتر از ۲۰٪ قطر پد نیز متحمل می‌شود. نسبت فاصله هوایی به قطر پد مناسب حدود ۰٫۴۰ بوده و ضریب تزویج مناسب در محدوده ۰٫۲ تا ۰٫۵ است.

مراجع

- [1] X. Liu, “Dynamic response characteristics of fast charging station-evs on interaction

- AUVs,” *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 10, pp. 2559–2565, 2019.
- [19] X. Mou, Y. Zhang, J. Jiang, and H. Sun, “Achieving low carbon emission for dynamically charging electric vehicles through renewable energy integration,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 118876–118888, 2019.
- [20] A. Zakerian, S. Vaez-Zadeh, and A. Babaki, “A dynamic WPT system with high efficiency and high power factor for electric vehicles,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 7, pp. 6732–6740, 2019.
- [21] Y. Li *et al.*, “Efficiency analysis and optimization control for input-parallel output-series wireless power transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 1, pp. 1074–1085, 2019.
- [22] J. Hou, Q. Chen, Z. Zhang, S.-C. Wong, and K. T. Chi, “Analysis of output current characteristics for higher order primary compensation in inductive power transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 8, pp. 6807–6821, 2017.
- [23] J. Shin *et al.*, “Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1179–1192, 2013.
- [24] A. Foote and O. C. Onar, “A review of high-power wireless power transfer,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, IEEE, 2017, pp. 234–240.
- [25] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. C. Mi, “An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 12, pp. 8471–8482, 2016.
- [26] W. Li, W. Mei, Q. Yuan, Y. Song, Z. Dongye, and L. Diao, “Detuned Resonant Capacitors Selection for Improved Misalignment Tolerance of LCC-S Compensated Wireless Power Transfer System,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 49474–49484, 2022.
- [27] Z. U. Zahid *et al.*, “Design and control of a single-stage large air-gapped transformer isolated battery charger for wide-range output voltage for EV applications,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, 2013, pp. 5481–5487.
- Classification/common topologies/future research issues,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19572–19585, 2021.
- [9] G. Palani, U. Sengamalai, P. Vishnuram, and B. Nastasi, “Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 2138, 2023.
- [10] J. Van Mulders *et al.*, “Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5573, 2022.
- [11] J. Shi, D. Li, and C. Yang, “Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications,” *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, vol. 15, no. 1, pp. 51–62, 2014.
- [12] Z. Li, K. Dey, M. Chowdhury, and P. Bhavsar, “Connectivity supported dynamic routing of electric vehicles in an inductively coupled power transfer environment,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 370–377, 2016.
- [13] H. Wang, U. Pratik, A. Jovicic, N. Hasan, and Z. Pantic, “Dynamic wireless charging of medium power and speed electric vehicles,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 70, no. 12, pp. 12552–12566, 2021.
- [14] S. A. Assadi, H. Matsumoto, M. Moshirvaziri, M. Nasr, M. S. Zaman, and O. Trescases, “Active saturation mitigation in high-density dual-active-bridge DC–DC converter for on-board EV charger applications,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 4, pp. 4376–4387, 2019.
- [15] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z. Y. Shao, and L. Jian, “The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, p. 109302, 2019.
- [16] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, 2011.
- [17] C. Cai, Y. Zhang, S. Wu, J. Liu, Z. Zhang, and L. Jiang, “A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65432–65442, 2020.
- [18] Z. Yan, Y. Zhang, K. Zhang, B. Song, and C. Mi, “Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for

تحلیل عددی تأثیر طول کورد هیدروفویل استاتور بر عملکرد

هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپجت استاتور-روتور

محمدحسین قاندرشرف^۱، احسان یاری^۲، مجتبی دهقان منشادی^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده:

پمپجت یک نوع سیستم پیشراننده دریایی است که تراست لازم را بر اساس روش اختلاف مومنتوم و بر اساس اصول پمپهای جریان محوری ایجاد می‌کند. سیستم پمپجت از روتور، استاتور، داکت و هاب تشکیل شده است. در دو دهه اخیر سیستم رانش پمپجت با توجه به شتاب و قدرت مانور بالا، راندمان و عملکرد بالاتر و همچنین سطح نویز پایین‌تر بیشتر مورد توجه صنایع دریایی بخصوص در حوزه زیرسطحی قرار گرفته است. پمپجت‌ها به چهار دسته مختلف روتور-استاتور، استاتور-روتور، رانش از لبه و معکوس گرد طبقه‌بندی می‌شوند. در مقاله حاضر تأثیر طول کورد هیدروفویل استاتور بر عملکرد هیدرودینامیکی پمپجت استاتور-روتور مورد بررسی قرار گرفته است. استاتور در این نوع پمپجت‌ها نقش یکنواخت کننده جریان ورودی را داشته و بر روی عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشراننده نقش بسزایی دارد. لذا ۵ هندسه با طول کوردهای استاتور L برابر $0.14DR$ ، $0.15DR$ ، $0.16DR$ ، $0.17DR$ و $0.18DR$ (قطر روتور: DR) به روش طراحی مستقیم تولید گردید تا به کمک نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه‌سازی عددی بررسی شوند. در بین حالات بررسی شده بیشینه راندمان آب آزاد با مقدار $64/51$ مربوط به حالت $L=0.18DR$ و کمینه راندمان آب آزاد مربوط به حالت $L=0.15DR$ با مقدار $63/53$ بود. با بررسی سایر نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به نظر می‌رسد مقدار $L=0.18DR$ به دلیل داشتن حداکثر راندمان آب آزاد (حدود 1% بیشتر نسبت به کمترین مقدار) و محدوده بزرگ‌تر پوشش دهی ضرایب پیشروی با راندمان بالاتر، یکنواخت و تکروندی بودن ضریب تراست تولیدی و نمودار ضریب گشتاور متعارف نسبت به سایر حالات مورد بررسی برتری دارد.

واژه‌های کلیدی:

پمپجت، استاتور-روتور، طول کورد، قطر روتور، راندمان آب آزاد، ضریب تراست، ضریب گشتاور

Numerical Analysis of the Effect of Stator Hydrofoil Cord Length on Hydrodynamic Performance of Pre-swirl Pump Jet Propulsion

Mohammad Husein Qaedsharaf¹, Ehsan Yari², Mojtaba Dehghan Manshadi³

1,2,3 Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Pump jet is a type of marine propulsion system that establishes the necessary trust based on the momentum difference method and based on axial flow pumps. The pump jet system is composed of rotors, stators, ducts and hubs. In the last two decades, pump jet propulsion system due to higher efficiency and performance, as well as lower noise level, has been more important for marine industry, especially in the subsurface area. In this paper, the effect of stator hydrofoil chords length on the hydrodynamic performance of the stator-rotor pump jet has been investigated. The stator has an integral role in this type of pump jet and has a significant role on the hydrodynamic performance of the propulsion complex. Therefore, 5 geometries with the length of the stator cords L (DR 0.14, 0.15DR, 0.16DR, 0.17DR and 0.18DR) (rotor diameter: DR) were produced by direct design method to investigate computational fluid dynamics and numerical simulation using commercial software. Among the investigated cases, the maximum open water efficiency (64.51) was related to $L=0.18 DR$ and the minimum open water efficiency was related to $L=0.15 DR$ (63.53). By examining the other

results of the simulations, it seems that $L=0.18DR$ is superior to other scenarios due to having maximum open water efficiency (about 1% higher than the lowest value) and the larger coverage area of the leading coefficients with higher efficiency, uniformity and monotrend of the production trust coefficient and conventional torque coefficient graph.

Keywords: Pump jet, Stator-Rotor Pump jet, Cord length, Rotor diameter, Open water efficiency, Trust coefficient, Torque coefficient

مختلف با هدف به حداکثر رساندن راندمان پیشرانه در پایین‌ترین شاخص شروع کاویتاسیون مقایسه شدند. سان دی و همکاران [۲] اثر کنترل گرداب نوک تیغه را بر روی عملکرد آب آزاد پیشران پمپجت بررسی نمود. برای کنترل میدان جریان فضای خالی نوک پره در یک پیشرانه جت پمپ و کاهش کاویتاسیون، تعداد معینی شیار در دیواره داخلی مجرای پیشرانه جت پمپ تعبیه شد. بر اساس روش DES محاسبه عددی فضای خالی نوک پره پیشران جت پمپ انجام شد و آزمایش عملکرد پیشران پمپجت بصورت آب آزاد در حوضچه کشش طراحی و انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ساختار شیار می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای فشار هسته گرداب نوک و حجم ناحیه کم فشار نوک را افزایش دهد. همچنین گردابه ناحیه دنباله پشت روتور را می‌توان تا تقریباً نصف کاهش داد که می‌تواند به طور مؤثر کاویتاسیون گرداب نوک پره را به تأخیر بیندازد. بی‌جی‌ام و همکاران [۳] تأثیر وجود حلقه در نوک تیغه‌های پره روتور و شیار درون دیواره داخلی داکت را بر عملکرد هیدرودینامیکی پمپجت بررسی نمودند. کو‌جی و همکاران [۴] تحلیلی عددی بر روی نویزهای کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی جریان پمپجت انجام دادند. در این مطالعه سهم نویز توسط داکت، استاتور و روتور برای شناسایی منبع نویز جریان در شرایط کاویتاسیون و غیر کاویتاسیون در پیشرانه پمپجت ارزیابی شد. در نتیجه پیش‌بینی نویز سهم استاتور ناچیز است اما بر تولید منبع نویز جریان به دلیل جدا شدن جریان در داکت و روتور تأثیر می‌گذارد و نویز را عمدتاً به سمت بالا و سمت راست جایی که جدا سازی جریان است تابش می‌کند. همچنین نویز به دلیل نوسان فشار بین دو طرف مکش و فشار روی پره‌های روتور در جهت پیشروی تابش می‌شود. بی‌جی‌ام و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۲ پژوهشی بر روی عملکرد کنترل جریان نوک پره و مکانیزم شیارهای محوری پیشران پمپجت انجام دادند. در این مطالعه، روش جدیدی برای کنترل

۱- مقدمه

سابقه استفاده از سیستم رانش پمپجت برای زیردریایی‌ها و سامانه‌های زیرسطحی به چند دهه اخیر برمی‌گردد اما طی سال‌های اخیر سیستم رانش پمپجت بخصوص برای زیردریایی به‌طور ویژه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌است. در سال ۲۰۱۸ به درخواست وزارت دفاع استرالیا تحقیقاتی در زمینه مقایسه پیشران‌های پروانه‌ای و پمپجت‌ها انجام شد که نتیجه این بود که در محدوده سرعت‌ها و ضرایب پیشروی بالا کارایی پیشران پمپجت بهتر از انواع پروانه‌ها است. پمپجت‌ها بیشتر برای زیردریایی‌ها طراحی می‌گردند که نیاز به نویز کمتر و مخفی‌کاری بیشتر دارند که این امر استفاده این پیشران را توجیه می‌کند. در شکل (۱) یک نمونه سیستم رانش پمپجت بر روی زیردریایی مشاهده می‌شود.



شکل ۱- سیستم رانش پمپجت بر روی زیردریایی کلاس ویرجینیا ایالات متحده آمریکا

۲- سابقه تحقیقات و مطالعات انجام گرفته

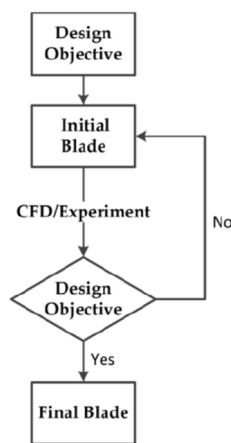
گاگرو و همکاران [۱] در ۲۰۲۳ پژوهشی بر روی طراحی و تحلیل پیشران پمپجت بر اساس بهینه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند. آن‌ها طراحی پیشران‌های پمپجت را از طریق یک رویکرد بهینه‌سازی طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی که بر اساس یک تو صیف پارامتری از ویژگی‌های هندسی اصلی سیستم، یک حل‌کننده RANSE با قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک بود انجام دادند و در فرآیند بهینه‌سازی چندمنظوره مقادیر

نزدیک لبه ورودی داکت می‌باشد پروفیل مقطع و طول کورد و زاویه حمله آن بر روی میدان جریان ورودی به روتور مؤثر می‌باشند. لذا در این مقاله تأثیر طول کورد استاتور بر روی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپجت استاتور-روتور مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۳- روش پژوهش

۳-۱- استخراج هندسه

طراحی هندسه مدل سیستم رانش پمپجت بر اساس بیشینه عملکرد هیدرودینامیکی به روش طراحی مستقیم [۱] انجام شده‌است.



شکل ۲- الگوریتم طراحی مستقیم [۱]

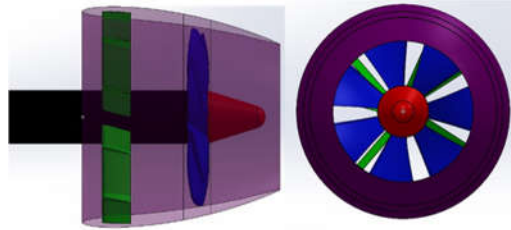
در جدول ۱ مشخصات هندسی سیستم رانش طراحی شده قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات هندسی سیستم رانش پمپجت

مقدار	مشخصه
۲۱	قطر روتور (سانتی‌متر)
NACA16-7	تعداد تیغه‌های روتور و مقطع آن
NACA66-11	تعداد تیغه‌های استاتور و مقطع آن
کاهنده- NACA6608	نوع داکت و مقطع آن
۲۵/۳۱، ۱۹/۱۵ و ۲۷/۴۲	قطر ورودی، قطر خروجی و طول داکت (سانتی متر)
۸/۵۳	فاصله روتور و استاتور (سانتی متر)

شمای کلی پیشران طراحی شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.

گرداب نشستی نوک پیشران جت پمپ با افزودن شکاف‌های محوری مستطیلی به دیواره داخلی داکت توسعه داده شده‌است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که شکاف‌های محوری می‌توانند به طور موثری گرداب نوک پره را کنترل کنند؛ فشار هسته گرداب را به طور قابل توجهی افزایش دهند و تأثیر جزئی بر رانش و گشتاور پیشران داشته باشند. در ۲۰۲۲ جونگ وو آن و همکاران [۶] مطالعه‌ای بر روی تست آب آزاد و تحلیل یک نمونه پیشران پمپجت را در تونل کاویتاسیون انجام دادند. به منظور مطالعه روش‌های آزمایش و تحلیل آب آزاد برای پیشران‌های پمپجت در تونل کاویتاسیون بزرگ در موسسه تحقیقات کشتی‌ها و مهندسی اقیانوس کره، مجموعه‌ای از تجهیزات آزمایشی طراحی و ساخته شد. بر اساس نتایج و از آنجایی که کل پمپجت به عنوان یک پیشران تعریف می‌شود، تصور می‌شود که آزمایش و آنالیز خود محرکه را می‌توان به همان روش پروانه معمولی انجام داد. در ۲۰۲۲ یونکای ژو و همکاران [۷] پژوهشی بر روی طراحی و عملکرد پیشران پمپجت انجام دادند و مزایا، چالش‌ها و چشم‌اندازها را ترسیم نمودند. یاری [۸] در ۲۰۲۱ آنالیز هیدرودینامیکی-سازه ای و ارتعاشاتی بر روی پیشران پمپجت یک زیرسطحی را انجام داد. بر اساس نتایج این پژوهش ریشه پره‌های روتور و استاتور بایستی برای تحمل تنش‌های وارده تقویت شوند. نوروزمحمد نوری و همکاران [۹] در ۱۳۹۵ مزایا، معایب، چالش‌های طراحی و الگوریتم شبیه‌سازی عددی پمپجت CRP را بررسی و الگوریتمی را برای طراحی ارائه نمودند. طالع زاده و همکاران [۱۰] در ۱۳۹۵ شبیه‌سازی عددی دنباله جریان در ناحیه ویک پشت بدنه و سیستم رانش را با نرم‌افزار تجاری موجود و مدل متداول توربولانسی دو معادله‌ای انجام دادند. در فعالیت پژوهشی دیگری طالع‌زاده و همکاران [۱۱] یک منحنی عملکرد از نمونه تحقیقاتی طراحی شده سیستم رانش پمپجت به کمک شبیه‌سازی عددی استخراج نمودند. مهران مطلبی‌نژاد و همکاران [۱۲] در ۱۳۹۴ سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت‌بالا را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به فعالیت‌های فوق‌الذکر، پارامترهای هندسی هر یک تأثیر بسزایی در میدان فشار و عملکرد سیستم رانش پمپجت دارند. در طرح پمپجت استاتور-روتور با توجه به موقعیت قرارگیری استاتور که



شکل ۳- شمای هندسه طراحی شده به روش طراحی مستقیم

جهت بررسی تأثیر طول کورد بر عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشران ۵ مدل با طول کورد های L برابر $0.18DR$ و $0.17DR$ ، $0.16DR$ ، $0.15DR$ ، $0.14DR$ (قطر روتور: DR) طراحی شد تا به صورت جداگانه بر روی هر کدام شبیه‌سازی عددی انجام شود.

۳-۲- رهیافت شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش سیال عامل به صورت غیرقابل تراکم و همگن و نیوتنی در نظر گرفته شده است. از نیروهای بدنه و شتاب جاذبه و انتقال حرارت چشم‌پوشی شده است. جریان سیال توسط معادلات ناویر-استوکس محاسبه می‌شود که حل تحلیلی بسیار زمان‌بر و تقریباً غیرممکن است. استفاده از روش میانگین رینولدز برای ۵ معادله، رویکرد رایج برای حل جریان ویسکوز و معادلات ناویر استوکس است. این رویکرد تنش‌های رینولدز را معرفی می‌کند که باید حل شوند. مدل‌های توربولانسی با معرفی یک ویسکوزیته توربولانسی μ به محاسبه تنش‌های رینولدز می‌پردازند. در این پژوهش از مدل توربولانسی $k-\omega$ SST استفاده شده است. در بین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k-\omega$ - نسبت به مدل $k-\epsilon$ مزایای متعددی دارد. برجسته‌ترین مزیت آن در انتگرال‌گیری از این مدل بدون مؤلفه‌های اضافی در زیرلایه ویسکوز می‌باشد. این مسئله منجر به غیرحساس شدن رفتار y^+ و سراسر شدن آن شده است. به علاوه مدل $k-\omega$ SST در پیش‌بینی جدایش و گرادیان فشار ناخواسته، بهتر عمل می‌کند. از جمله معایب معادله $k-\omega$ Standard، حساسیت شدید حل به مقدار جریان آزاد k و ω در بیرون لایه برشی است. به این دلیل استفاده از مدل $k-\omega$ Standard در نرم‌افزار انسیس فلونت توصیه نمی‌شود. مدل‌های $k-\omega$ BSL و $k-\omega$ SST، با ترکیب مؤلفه‌های معادلات ω و ϵ برای اجتناب از حساسیت به جریان آزاد در مدل $k-\omega$ Standard طراحی شده‌اند. همچنین مدل $k-\omega$ SST

جهت محاسبه دقیق جدایش از سطوح صاف به خوبی کالیبره شده است. بین مدل‌های $k-\omega$ توصیه می‌شود که از مدل SST یا BSL استفاده شود. از آنجایی که اعداد رینولدز دو طرف داکت پمپ جت متفاوت است؛ بخش قابل توجهی از ناحیه جریان آرام در خارج از داکت وجود دارد. به ویژه در ضرایب پیشروی پایین. تفاوت در رژیم‌های جریان بر رانش داکت تأثیر می‌گذارد. طبق مطالعات انجام شده هنگامی که تفاوت قابل توجهی در اعداد رینولدز دو طرف داکت وجود دارد و مجرای بیرونی دارای عدد رینولدز کمتر از حداقل عدد رینولدز پذیرفته شده توسط ITTC (5×10^5) هنگامی که سرعت پیشروی کم باشد تأثیر تفاوت رژیم‌های جریان بر رانش داکت ناچیز بوده زیرا رانش داکت تحت تأثیر مؤلفه فشار آن است و مؤلفه اصطکاک آن بسیار ناچیز خواهد بود. بنابراین، در این پژوهش گذرش روی داکت نادیده گرفته شده است.

۳-۳- پارامترهای عملکردی پمپ جت

برای بررسی عملکرد هیدرودینامیکی سیستم رانش پمپ جت ضرایب بی‌بعدی به شرح زیر تعریف شده‌اند:

$$J = \frac{V_A}{nD}, K_{TR} = \frac{T_R}{\rho n^2 D^4}, K_{TS} = \frac{T_S}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4}, K_{QR} = \frac{Q_R}{\rho n^2 D^5}, K_Q = K_{QR}$$

$$K_T = K_{TR} + K_{TS} + K_{TD}, \eta_o = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (1)$$

که:

J ضریب پیشروی:

K_T ضریب تراست کل:

K_{TR} ضریب تراست روتور:

K_{TS} ضریب تراست استاتور:

K_{TD} ضریب تراست داکت:

K_Q ضریب گشتاور پیشران:

K_{QR} ضریب گشتاور روتور:

η_o راندمان پیشران در حالت آب آزاد:

D قطر پیشران (متر):

n سرعت دورانی پروانه پیشران (دور بر ثانیه):

V_A سرعت پیشروی پروانه مدل (متر بر ثانیه):

ρ چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب):

کورد مقطع پره به قطر پره، P/D نسبت گام حرکت پره به قطر پره، T/c نسبت بیشتترین ضخامت مقطع پره به کورد پره و F/c نسبت بیشتترین میزان چرخش به کورد پره است.

جدول ۲- مشخصات هندسی پروانه مدل DTMB 4119 [۱۳]

D (m)	0.3048
Z	3
Skew (°)	0
Rake (°)	0
Blade section	NACA66 a=0.8
Rotation direction	Right

جدول ۳- مشخصات مقاطع مختلف پروانه DTMB 4119 [۱۳]

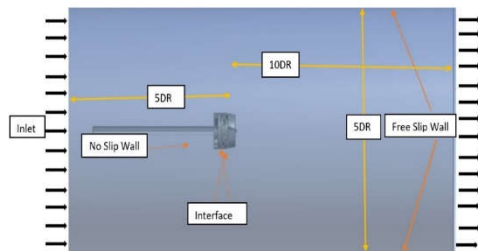
r/R	c/D	P/D	T/c	F/c
0/2	0/3200	1/1050	0/20550	0/01429
0/3	0/3625	1/1020	0/15530	0/02318
0/4	0/4048	1/0980	0/11800	0/02303
0/5	0/4392	1/0930	0/09160	0/02182
0/6	0/4610	1/0880	0/06960	0/02072
0/7	0/4622	1/0840	0/05418	0/02003
0/8	0/4347	1/0810	0/04206	0/01967
0/9	0/3613	1/0790	0/03321	0/01817
0/95	0/2775	1/0770	0/03228	0/01631
1	0/0000	1/0750	0/03160	0/01175

به منظور تولید شبکه و شبیه سازی میدان جریان سیال اطراف پروانه، از یک دامنه حل استوانه‌ای استفاده شد. مرز ورودی جریان در فاصله $5D$ از پروانه در جریان بالادست، مرز خروجی جریان در فاصله $10D$ از پروانه در جریان پایین دست و قطر مرز جانبی استوانه $5D$ در نظر گرفته شده که D قطر پروانه است. برای تولید شبکه از ابزار شبکه بندی^۲ موجود در نرم افزار انسیس استفاده شده است. این ابزار امکان تولید شبکه روی هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده است. برای تولید شبکه ابتدا یک شبکه پایه بدون ساختار^۳ چهاروجهی^۴ و منشوری^۵ و سپس در فضای دامنه حل، برای کاهش تعداد شبکه و زمان حل و افزایش دقت حل، شبکه بدون ساختار چندوجهی^۶ تولید شده است. برای بحث و بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل عددی، جریان به صورت سه بعدی، کاملاً متلاطم، تراکم ناپذیر و برای شرایط بدون

۳-۴- گره محاسباتی و تنظیمات شبیه سازی

عددی

کل حوزه محاسباتی به دو زیر دامنه تقسیم می شود: دامنه روتور و دامنه خارجی. دامنه خارجی دارای بخش مشابه تونل کاویتاسیون و طول $15D$ است. روتور در فاصله $5D$ از ورودی قرار می گیرد. همه زیر دامنه‌ها دارای مش بی سازمان و چندوجهی هستند. در نزدیکی دیواره‌ها، ارتفاع لایه‌های اول از زیر لایه‌های لایه مرزی با مقدار y^+ در محدوده ۵ تا ۳۰ محاسبه می شود که مناسب حل کننده RANS با مدل آشفتگی SST k-w می باشد. شرایط مرزی نیز در شکل ۴ آمده است. جریان یکنواخت بالادست با مقدار سرعت V مربوط به ضریب پیشروی J و شدت اغتشاش 1% روی مرز ورودی تنظیم شده است. یک شرط مرز خروجی فشار به خروجی با فشار ثابت Pout برابر با 1 atm داده می شود. دیوار میدان دور دست به عنوان دیوار با تنش برشی صفر تنظیم شده است. در طول شبیه سازی، سرعت چرخش روتور n برابر 27.8 r/s تثبیت شده است. تمام شبیه سازی‌ها توسط ANSYS-Fluent به صورت طرح SIMPLEC و گسسته سازی مرتبه دوم مومنتوم و گسسته سازی استاندارد فشار با 1000 تکرار انجام می شود. کیفیت هر یک از زیر دامنه‌های محاسباتی بیش از 0.5 است.



شکل ۴- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه سازی عددی

۳-۵- صحت سنجی شبیه سازی عددی

به منظور صحت سنجی روش شبیه سازی عددی جریان پروانه DTMB 4119 با مشخصات هندسی که در جدول ۲ آورده شده انتخاب گردیده است. مشخصات مقاطع مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است که در آن r/R موقعیت مقطع پره در راستای شعاعی، c/D نسبت

⁴Tetrahedron

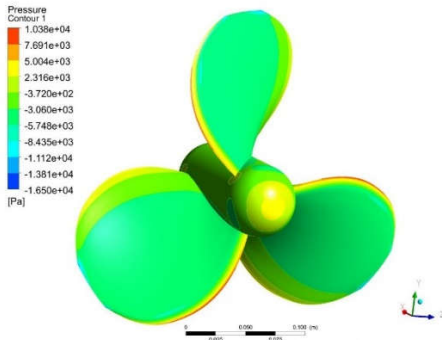
⁵Wedge

⁶Polyhedral

¹Grid Generation

²Meshing

³Unstructured



شکل ۶- کانتور توزیع فشار بر روی سطح پشت پره

۳-۶- آنالیز استقلال حل از تعداد گره محاسباتی

در همه شبیه‌سازی‌های عددی لازم است تا از عدم وابستگی نتایج به تعداد و نوع گره‌های محاسباتی تولید شده اطمینان حاصل نمود. در این زمینه از روش شاخص همگرایی شبکه برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط رچ [۱۴] به منظور ارزیابی خطای گسسته‌سازی و عدم قطعیت‌های عددی ارائه شد. برای استفاده از این روش حداقل به ۳ شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف نیاز است. این شبکه با اسامی S1, S2, S3 با تعداد المان‌های N1, N2, N3 از ریزترین (۱) تا درشت‌ترین (۳) شبکه نام‌گذاری می‌شوند. فاکتور ریزکردن شبکه (τ) به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$\tau_{21} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^{1/3} \quad (2)$$

در صورتی که $\tau > \sqrt{3}$ باشد خطای برون‌یابی کاهش می‌یابد [۹۵]. طبق روش رچ، نسبت همگرایی به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود. η_1 , η_2 و η_3 راندمان آب آزاد برای سه حالت هستند:

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_3 - \eta_2} \quad (3)$$

در این معادله ε_{ij} بیانگر اختلاف نتایج به دست آمده از حل با شبکه i و j است. برای نسبت همگرایی سه حالت زیر متصور است:

$R > 1$ واگرایی شبکه

$R < 0$ همگرایی نوسانی

$0 < R < 1$ همگرایی یکنواخت شبکه

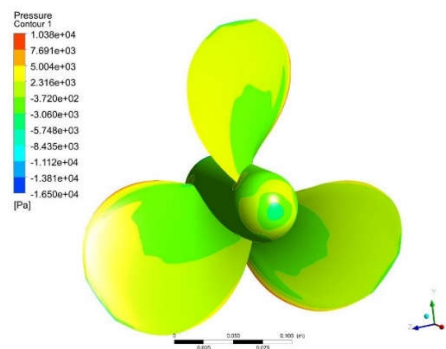
هنگامی که حل انجام شده با شبکه‌های مورد بررسی در وضعیت همگرایی باشد، برون‌یابی ریچاردسون برای تخمین

کاویتا سیون ثابت در نظر گرفته می‌شود. مدل $k-\omega$ SST به‌عنوان مدل آشفتگی انتخاب شده است. میدان فشار با استفاده از الگوریتم ساده^۷ که مبتنی بر کوپل فشار - سرعت^۸ است حل شده است. سطوح ورودی و خروجی به ترتیب به‌عنوان شرط مرزی ورودی سرعت و شرط مرزی خروجی فشار تعریف شده‌اند. پس از ایجاد هندسه مدل، شبکه‌بندی و تعیین شرایط مرزی و فیزیکی، حل مسئله با ۱۰۰۰ تکرار شروع می‌شود. در جدول ۴ نتایج ضرایب تراست و گشتاور در مقایسه با داده‌های تجربی در ضرایب پیش‌روی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد ماکزیمم خطا در ضریب تراست ۱۰/۵ درصد و در ضریب گشتاور ۹/۸ درصد می‌باشد که محدوده قابل قبولی می‌باشد.

جدول ۴- نتایج حل عددی ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیش‌روی مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی

J	K_T	K_Q	درصد میزان خطا K_T	درصد میزان خطا K_Q
0.5	۰/۲۸۳۰	۰/۰۴۸۳	۰/۷۴	۴/۴۶
0.7	۰/۱۹۶۰	۰/۰۳۶۷	۵/۳	۱/۱۳
0.833	۰/۱۳۹۲	۰/۰۲۷۱	۱۰/۰۱	۳/۲۰
0.9	۰/۱۱۰۰	۰/۰۲۴۸	۹/۶۰	۲/۱۷
1.1	۰/۰۳۳۱	۰/۰۱۰۱	۱۰/۵۴	۹/۸۲

در شکل ۵ کانتور توزیع فشار بر روی سطح جلویی پره و در شکل ۶ کانتور سطح پستی نمایش داده شده است.



شکل ۵- کانتور توزیع فشار بر روی سطح جلویی پره

⁸Pressure-Velocity Coupling

⁷Simple

شدت همگرایی استفاده می‌شود. مرتبه دقت این الگوریتم طبق معادله (۴) محاسبه می‌شود که همان ضریب ریز شدن شبکه است که پیش از این تعریف شد.

$$P = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)}{\ln(r)} = \frac{\ln\left(\frac{\eta_3 - \eta_2}{\eta_2 - \eta_1}\right)}{\ln(r)} \quad (4)$$

در نهایت، شاخص همگرایی شبکه با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود. در این معادله ضریب FS ضریب اطمینان همگرایی بوده و مقدار آن برابر با FS=1.25 پیشنهاد شده است [۱۴]. همچنین در این معادله نماد $|\varepsilon_{ij}|$ خطای نسبی تقریبی است.

$$GCI_{fine} = F_s \frac{|\varepsilon_{12}|}{r^{p-1}} = \frac{F_s}{(r^p - 1)} \left| \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} \right| \quad (5)$$

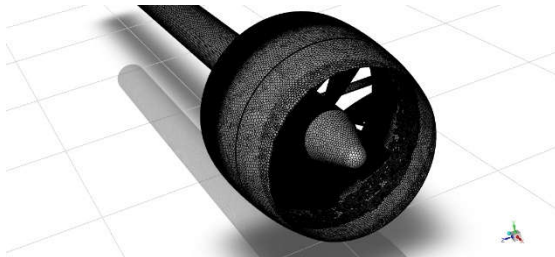
$$GCI_{coarse} = F_s r^p \frac{|\varepsilon_{23}|}{r^p - 1} = \frac{F_s r^p}{(r^p - 1)} \left| \frac{\eta_2 - \eta_3}{\eta_2} \right|$$

شاخص همگرایی شبکه نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده چه میزان از مقدار دقیق فاصله دارد. به بیان دیگر این روش تغییرات نتایج را با ریزتر شدن شبکه نشان می‌دهد. مقادیر کوچک این کمیت نشان می‌دهد که ریزتر شدن بیشتر شبکه دیگر تأثیری بر بهبود نتایج نخواهد داشت. شبکه‌های محاسباتی با کاهش و افزایش ارتفاع شبکه‌های لایه اول (First Layer Height) بازسازی می‌شوند. بر اساس Y+ برابر ۳۰ ضخامت اولین لایه ۰/۰۴۷ میلی‌متر (بعنوان شبکه درشت) محاسبه می‌شود. جهت آنالیز استقلال حل از شبکه مقادیر ۰/۰۳۲ بعنوان مقدار متوسط و ۰/۰۱۷ بعنوان ریز انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی عددی در دو مقدار ضریب پیشروی ۰/۸ و ۰/۹ برای شبکه‌های ریز، متوسط و درشت انجام شد که نتیجه در جدول ۵ قابل مشاهده است.

جدول ۵- نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای ضریب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف

ضریب پیشروی	First Layer Height	تعداد سلول (میلیون)	K_T	K_Q
J=0.8	$\Delta s_1 = 0.047$	$N_1 = 56.1$	$K_{T1} = 0.3691$	$K_{Q1} = 0.0812$
	$\Delta s_2 = 0.032$	$N_2 = 68.7$	$K_{T2} = 0.3632$	$K_{Q2} = 0.0791$
	$\Delta s_3 = 0.017$	$N_3 = 79.3$	$K_{T3} = 0.3640$	$K_{Q3} = 0.0780$
J=0.9	$\Delta s_1 = 0.047$	$N_1 = 56.1$	$K_{T1} = 0.3183$	$K_{Q1} = 0.0742$
	$\Delta s_2 = 0.032$	$N_2 = 69.7$	$K_{T2} = 0.3141$	$K_{Q2} = 0.0735$
	$\Delta s_3 = 0.017$	$N_3 = 79.3$	$K_{T3} = 0.3152$	$K_{Q3} = 0.0739$

همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است خطاهای ضرایب رانش و گشتاور بین سه نوع شبکه بسیار کم است و صحت استقلال شبکه تأیید شده است. علاوه بر این، شاخص همگرایی شبکه (GCI) نیز محاسبه شده است. راندمان سه شبکه تعریف شده در $J=0.9$ به ترتیب عبارتست از ۰/۱۲۵۰، ۰/۱۳۱۲ و ۰/۱۳۷۳. همچنین GCI_{fine} و GCI_{coarse} به ترتیب عبارتند از ۰/۰۲۱۹ و ۰/۰۲۲۲ که مقادیر کوچک و مطلوبی هستند و همچنین نسبت همگرایی R برابر ۱/۰۱ که مقداری نزدیک به عدد ۱ و نشان‌دهنده همگرایی شبکه است. لذا مقدار $\Delta s_2 = 0.032$ جهت شبکه‌بندی در کلیه حالات انتخاب گردید. نمونه‌ای از شبکه بندی انجام‌شده را در شکل ۷ قابل مشاهده است.



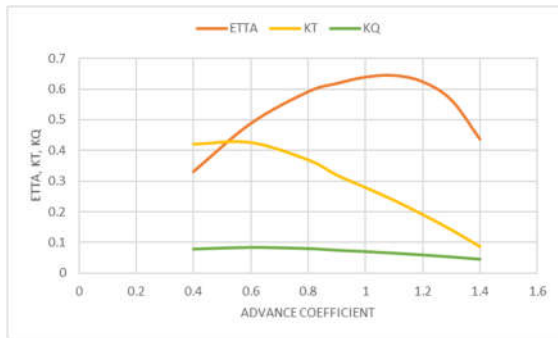
شکل ۷- شمای هندسه شبکه بندی شده

۴- بحث و نتایج

۴-۱- حالت اول $L=0.14DR$

در این حالت طول کورد برابر ۰/۰۲۹۴ متر در نظر گرفته شده و اسکتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر ۰/۰۲۴۴، حداکثر ضریب تراست ۰/۴۳۴۷ و حداکثر ضریب گشتاور ۰/۰۸۵۹ می‌باشد. با افزایش ضریب پیشروی ضریب تراست روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده $J=1.1$ روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. نمودار ضریب تراست نیز با افزایش ضریب پیشروی بجز یک پیک نوسانی در $J=0.6$ مابقی به‌صورت قابل انتظار روندی کاملاً نزولی دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۸ آمده است.

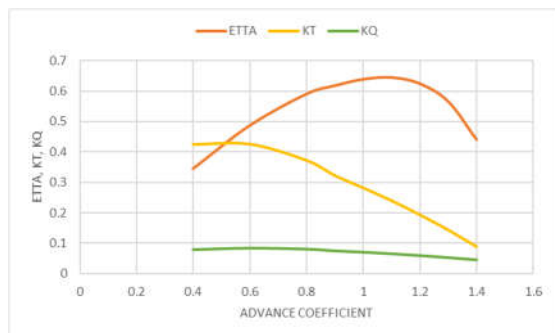
روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. مانند حالت قبل در نمودار ضریب تراست پیک نوسانی محسوس نیست و روندی تقریباً نزولی وجود دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز مانند حالات قبل روندی تقریباً نزولی دارد. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۰ آمده است.



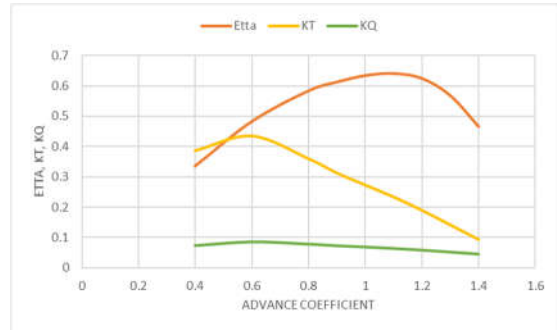
شکل ۱۰- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت $L=0.16DR$

۴-۴ حالت چهارم $L=0.17DR$:

در این حالت طول کورد برابر 0.357 متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر $64/42$ ، حداکثر ضریب تراست 0.4257 و حداکثر ضریب گشتاور 0.834 می باشد. در این حالت نیز مانند حالات قبلی نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده $J=1.1$ روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. در نمودار ضریب تراست روندی تقریباً نزولی وجود دارد. ضریب گشتاور نیز مشابه حالات قبل است. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۱ آمده است.



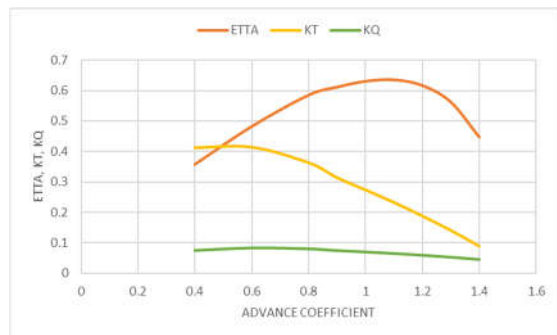
شکل ۱۱- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت $L=0.17DR$



شکل ۸- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت $L=0.14DR$

۴-۲ حالت دوم $L=0.15DR$:

در این حالت طول کورد برابر 0.315 متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر $63/53$ ، حداکثر ضریب تراست 0.4142 و حداکثر ضریب گشتاور 0.821 می باشد. مانند حالت قبل نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده $J=1.1$ روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد. در نمودار ضریب تراست برخلاف حالت قبلی با افزایش ضریب پیشروی پیک نوسانی تقریباً حذف شده و روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار ضریب گشتاور نیز روندی تقریباً نزولی دارد. نمودار مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت $L=0.15DR$

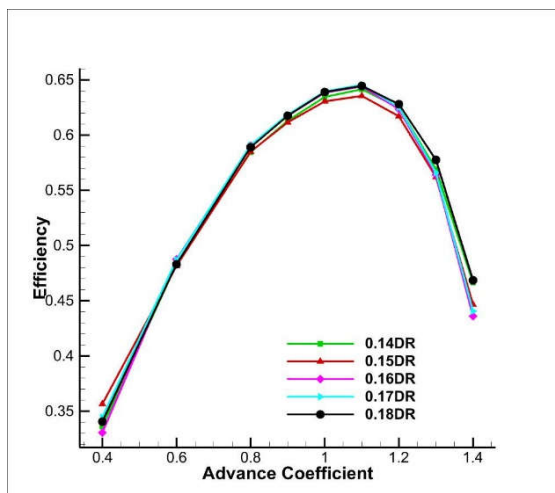
۴-۳ حالت سوم $L=0.16DR$:

در این حالت طول کورد برابر 0.336 متر در نظر گرفته شده و اسلتاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر $64/36$ ، حداکثر ضریب تراست 0.4251 و حداکثر ضریب گشتاور 0.832 می باشد. مانند حالات قبلی نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده $J=1.1$

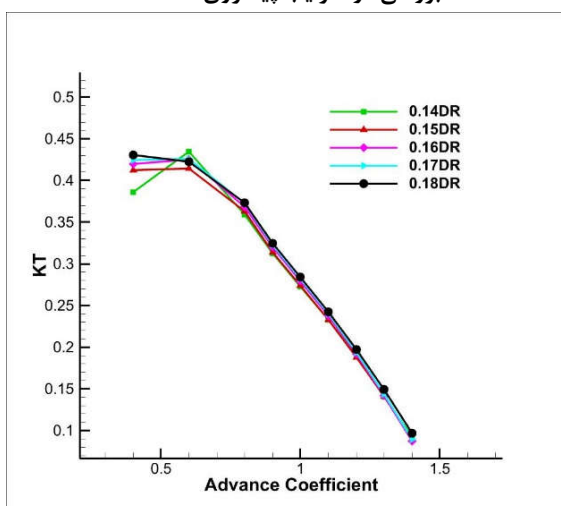
در $J=1.4$ کمترین راندمان را دارد. حالت $L=0.14DR$ و $L=0.17DR$ روندی در میانه بقیه حالات دارند.

۲-۶-۴ ضریب تراست:

با توجه به نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۴ در محدوده $J=0.4$ تا $J=0.6$ بین ضریب تراست حالات مختلف اختلاف‌های محسوسی مشاهده می‌شود و از این ضریب پیشروی به بعد نمودار حالات مختلف تدریجاً بر هم منطبق می‌شوند. بیشترین ضریب تراست متعلق به حالت $L=0.14DR$ است. تنها حالت $L=0.18DR$ روندی صرفاً نزولی دارد و در سایر حالات در محدوده $J=0.4$ تا $J=0.6$ نوسان و تغییر روند مشاهده می‌شود که بیشترین نوسان نیز مربوط به حالت $L=0.14DR$ بوده که در $J=0.4$ کمترین ضریب تراست و در $J=0.6$ بیشترین ضریب تراست را دارد.



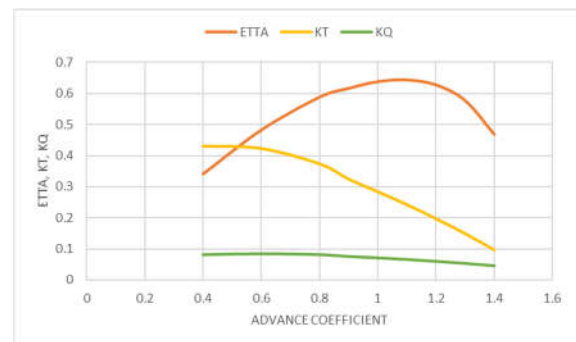
شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای راندمان برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای ضریب تراست برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف

۴-۵ حالت پنجم $L=0.18DR$:

در این حالت طول کورد برابر 0.378 متر در نظر گرفته شده و استاتور در دهانه ورودی داکت قرار گرفته است. بر این بنیاد در ضرایب پیشروی مختلف حداکثر راندمان برابر $64/51$ ، حداکثر ضریب تراست 0.4303 و حداکثر ضریب گشتاور 0.0836 می‌باشد. مشابه حالات قبل نمودار راندمان آب آزاد تا محدوده $J=1.1$ روند کاملاً صعودی و از این ضریب پیشروی به بعد روندی کاملاً نزولی دارد و حداکثر راندمان در بین تمامی حالات بررسی شده در این حالت وجود دارد. نمودار ضریب تراست و گشتاور روندی نزولی دارند. مقادیر راندمان و ضرایب گشتاور و تراست در ضرایب پیشروی مختلف در شکل ۱۲ آمده است.



شکل ۱۲- نمودار راندمان، ضرایب تراست و گشتاور در ضرایب پیشروی مختلف برای حالت $L=0.18DR$

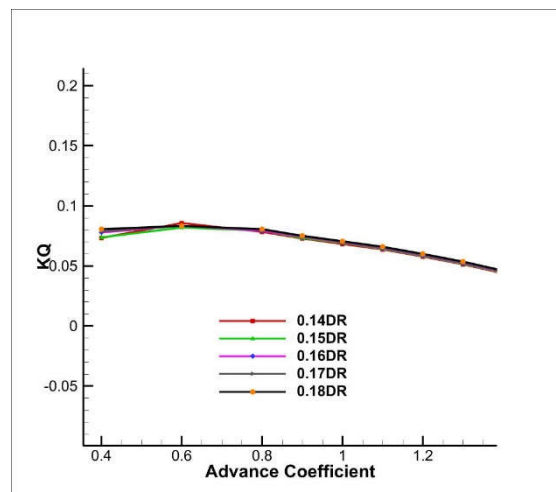
۴-۶ بحث در نتایج:

۴-۶-۱ راندمان آب آزاد:

همان طور که از نمودار مقایسه‌ای شکل ۱۳ مشخص است با افزایش طول کورد استاتور و هدایت بیشتر و صحیح خطوط جریان به لبه‌های حمله تیغه روتور (که با توجه به نحوه چیدمان تیغه‌های استاتور باعث افزایش زاویه حمله جریان به تیغه‌های روتور و به تبع آن افزایش ضریب لیفت تیغه‌های روتور می‌شود) راندمان آب آزاد پیشران افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود حالت $L=0.18DR$ بیشینه راندمان حداکثر آب آزاد را دارد و در اغلب ضرایب پیشروی علی‌الخصوص در محدوده $J=0.8$ تا $J=1.3$ نیز راندمانی بیشتر از مابقی دارد. حالت $L=0.15DR$ کمینه راندمان حداکثر را دارد، علیرغم اینکه در $J=0.4$ بیشترین راندمان را دارد. حالت $L=0.16DR$ هم در $J=0.4$ و هم

۳-۶-۴ ضریب گشتاور:

با دقت در نمودار شکل ۱۵ در محدوده $J=0.4$ تا $J=0.6$ بین مقادیر ضرایب گشتاور حالات مختلف اختلاف‌های جزئی مشاهده و در همگی نوسان و تغییر روند وجود دارد که همانند نمودار ضریب تراست بیشترین نوسان مربوط به حالت $L=0.14DR$ است و پس از آن نمودار حالات مختلف به تدریج به هم می‌پیوندند. در محدوده مذکور بیشترین کمترین ضریب گشتاور متعلق به حالت $L=0.14DR$ است، یعنی در $J=0.4$ کمترین ضریب گشتاور و در $J=0.6$ بیشترین ضریب گشتاور را دارد.



شکل ۱۵- نمودار مقایسه‌ای ضریب گشتاور برای ۵ طول کورد مورد بررسی در ضرایب پیشروی مختلف

همانگونه که ملاحظه می‌شود هم در ضریب تراست و هم در ضریب گشتاور بیشترین نوسانات به علت تأثیر سرعت‌های القایی استاتور روی روتور در ضرایب پیشروی پایین رخ می‌دهد. از طرفی با افزایش طول کورد استاتور و هدایت صحیح جریان با زاویه حمله بالاتر به لبه حمله روتور نوسانات تقلیل یافته و ملاحظه می‌گردد که در حالت $L=0.18DR$ این نوسانات مضر تقریباً حذف و روند یکنواخت گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی:

بر اساس مطالبی که پیش‌تر عنوان گردید و بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده طول کورد استاتور بر عملکرد هیدرودینامیکی مجموعه پیشران پمپ‌جت تأثیر گذار است. در بین حالات بررسی‌شده در این پژوهش بیشینه حداکثر راندمان آب آزاد با مقدار $64/51$ مربوط به حالت $L=0.18DR$ ، کمینه حداکثر راندمان آب آزاد مربوط به حالت $L=0.15DR$ با مقدار $63/53$ ، بیشینه

ضریب تراست با مقدار $4347/0$ مربوط به حالت $L=0.14DR$ و کمینه ضریب گشتاور با مقدار $441/0$ مجدداً مربوط به حالت $L=0.14DR$ می‌باشد. از این رو به نظر می‌رسد در بین حالات بررسی‌شده مقدار $L=0.18DR$ به دلیل داشتن بیشینه حداکثر راندمان آب آزاد (حدود ۱٪ بیشتر نسبت به کمترین مقدار) و محدوده بزرگ‌تر پوشش دهی ضریب پیشروی با راندمان بالاتر، یکنواخت بودن و تک‌روندی بودن ضریب تراست تولیدی و نمودار ضریب گشتاور متعارف نسبت به سایر حالات مورد بررسی برتری دارد.

۶-مراجع:

- [1] Gaggero S., "Design and analysis of pumpjet propulsors using CFD-based optimization", Ocean Engineering Volume 227, 1 October <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114304>
- [2] Sun D., "Tip vortex control effect and open-water performance of grooves in a pumpjet propulsor", Harbin Gongcheng Daxue, Volume 44 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816703006>
- [3] Ye J.M., "Hydrodynamic study of pumpjet propulsor with a ring at rotor tip and embedded in the groove of the inner wall of the duct", Chuan Bo Li Xue/Journal of Ship Mechanics, Volume 27 <https://doi.org/10.3390/jmse11101926>
- [4] Ku G., "Numerical investigation on cavitation and non-cavitation flow noise on pumpjet propulsion", Journal of the Acoustical Society of Korea, Volume 42 [doi:10.7776/ASK.2023.42.3.250](https://doi.org/10.7776/ASK.2023.42.3.250)
- [5] Ye J.m., "Tip flow control performance and mechanism of axial slots in a pumpjet propulsor", Ocean Engineering, Volume 226 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112950>
- [6] Jong-Woo Ahn, Han-Shin Seol, Hong-Seok Jung, Young-Ha Park: Study of the Open-Water Test and Analysis for a Pumpjet Propulsor in LCT. Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 59, No. 3, pp. 149-156, June 2022 <https://doi.org/10.3744/SNAK.2022.59.3.149>
- [7] Yunkai Zhou, Giorgio Pavesi, Jianping Yuan and Yanxia Fu, A Review on Hydrodynamic Performance and Design of

Pump-Jet: Advances, Challenges and Prospects, Journal of Marine Science and Technology, 10, 1514 (2022).

<https://doi.org/10.3390/jmse10101514>

[8] Yari E., Numerical Analysis of Hydrodynamic-Structural and Vibration of PumpJet Propulsion System of AUV, INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOGY, 16 (2021).

<http://ijmt.ir/article-1-765-en.html>

[۹] طراحی سیستم رانش پمپجت *CRP*، نوروز محمد نوری،

صابر محمدی، اولین همایش پیشرفته‌های دریایی

[۱۰] شبیه‌سازی عددی دنباله جریان پشت سیستم رانش

پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی

دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۱] استخراج منحنی عملکرد یک نمونه تحقیقاتی سیستم

پیش‌رانش پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری،

مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۲] مطالعه سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از

آن در شناورهای سرعت‌بالا، مهران مطلبی نژاد، حسن قاسمی،

چهارمین همایش ملی شناورهای تندرو

[13] Report of the propulsor Committee, (1992), "Workshop Organized by 20th ITTC Propulsor", 23 August, Seoul Korea.

[14] Roache, P. J.: Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual review of fluid Mechanics, 29, 123-160 (1997).

[15] Carlton, J. S., Marine propellers and propulsion, third ed., Amsterdam, Netherland, Elsevier (2012)

[16] Dawson, C.: The early history of water - jet propulsion. MARINERS MIRROR, 89, 88-92(2003)

[17] Bertram, V., Practical ship hydrodynamics Oxford, U.K, Butterworth Heinemann (2012)

[18] Suryanarayana, C., Rao, M. N., Raju, P. N., Balakrishan, T., and Lambada, S.: Torque Balance and Cavitation Studies on Underwater Vehicle Propulsion System. International Journal of Innovative Research and Development, 1, 62-73 (2012)

شناسایی تهدیدهای نوین جنگ الکترونیک در حوزه

دریایی با تکیه بر هوش مصنوعی و داده کاوی

سیدرضا شرفی نژاد^۱، محمودرضا رضوی زاده^۲

۱- مدرس ارشد ارتباطات و امنیت، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)؛ r.sharafi@ut.ac.ir

۲- مدرس جنگ الکترونیک، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)؛ bijdono@gmail.com

چکیده

هوش مصنوعی به الگوریتم‌هایی گفته می‌شود که می‌توانند واکنش‌هایی درست و منطقی و همچنین رفتارهایی مشابه رفتارهای هوشمند انسانی داشته باشند؛ از جمله درک شرایط پیچیده، شبیه‌سازی فرایندهای تفکری و شیوه‌های استدلالی انسانی، پاسخ موفق به آن‌ها، یادگیری و توانایی کسب دانش و استدلال برای حل مسائل. هوش مصنوعی، به‌نوعی دانش شناخت و طراحی عامل‌های هوشمند بوده و دامنه کاربرد آن جهانی است. هوش مصنوعی عرصه پهناور تلاقی بسیاری از دانش‌ها و نیز حلقه اتصال علوم و فنون قدیم و جدید است. هوش مصنوعی بدون شک یک اتفاق نوپدید در عرصه علم و فناوری است که تأثیرات زیادی در حوزه تجهیزات نظامی دریایی داشته است. هوش مصنوعی نیز مانند هر فناوری دیگر دارای مزایا و معایب و به‌تبع آن فرصت‌ها و تهدیدهای فراوانی است. در این مقاله پس از بیان مقدمه و ارائه طرح مسأله و تشریح آن، در مورد فرصت‌های استفاده از هوش مصنوعی و داده‌کاوی برای بهبود عملکرد سامانه‌های جنگ الکترونیک در حوزه دریایی بحث می‌شود. سپس، به مزیت استفاده از داده‌کاوی با هوش مصنوعی در مقایسه با سایر روش‌ها برای شناسایی تهدیدات سایبر الکترونیک در حوزه دریایی پرداخته می‌شود. در نهایت، فازهای شناسایی تهدیدات سایبر الکترونیک در حوزه دریایی با تلفیق هوش مصنوعی و داده‌کاوی معرفی می‌شود. در پایان، نیز پس از طرح راهکارها و پیشنهادها، مباحث، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود. واژه‌های کلیدی: جنگ الکترونیک، هوش مصنوعی، داده‌کاوی، تهدیدهای نوپدید دریایی

Identifying New Threats of Electronic Warfare in the Maritime Domain by Relying on Artificial Intelligence and Data Mining

Seyed Reza Sharafi nejad¹, MahmoudReza Razavi zade²

^{1,2} Imam Hossein (as) University

Abstract

Artificial intelligence refers to algorithms that can have correct and logical reactions as well as behaviors similar to intelligent human behaviors; including understanding complex situations, simulating human thought processes and reasoning methods, successfully responding to them, learning and the ability to acquire knowledge and reason to solve problems. Artificial intelligence is a kind of knowledge of knowing and designing intelligent agents and its scope of application is global. Artificial intelligence is a vast field of intersection of many knowledges as well as a connecting link of old and new sciences and techniques. Artificial intelligence is undoubtedly a new phenomenon in the field of science and technology, which has had a great impact on the field of naval military equipment. Artificial intelligence, like any other technology, has advantages and disadvantages, and as a result, many opportunities and threats. In this article, after stating the introduction and presenting the problem plan and its description, the opportunities of using artificial intelligence and data mining to improve the performance of electronic warfare systems in the maritime domain are discussed. Then, the advantage of using data mining with artificial intelligence compared to other methods to identify cyber-electronic threats in the maritime domain is discussed. Finally, the identification phases of cyber-electronic threats in the maritime domain are introduced by combining artificial intelligence and data mining. In the end, after the solutions and proposals are proposed, discussions, summaries and conclusions are presented.

Keywords: Electronic warfare, artificial intelligence, data mining, emerging maritime threats.

هوش مصنوعی^۱ یکی از حوزه‌های پیشرفته و جذاب علوم کامپیوتر است که در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. هوش مصنوعی به ما امکان می‌دهد تا سیستم‌های کامپیوتری را به گونه‌ای طراحی کنیم که بتوانند فعالیت‌های هوشمندانه انجام دهند و وظایفی را انجام دهند که قبلاً نیاز به تفکر و هوش بشری داشته‌اند. هوش مصنوعی به طور کلی به استفاده از رایانه‌ها و سیستم‌های کامپیوتری برای انجام وظایفی اشاره دارد که قبلاً نیاز به تصمیم‌گیری انسانی داشته‌اند. هدف اصلی هوش مصنوعی، توسعه سیستم‌هایی است که قادر به تفکر، یادگیری، استنتاج و اتخاذ تصمیمات مشابه به انسان باشند. هوش مصنوعی در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی کرده است و در زمینه‌های مختلفی مانند پردازش زبان طبیعی، بینایی ماشین، تشخیص الگو، تصمیم‌گیری خودکار و رباتیک به کار می‌رود. این فناوری می‌تواند به صورت بسیار ساده مانند یک سیستم تشخیص صدا کار کند یا به صورت پیچیده‌تر مانند سیستم‌های خودران و خودربا با قابلیت‌های هوشمند عمل کند.

یکی از مفاهیم کلیدی در هوش مصنوعی، یادگیری ماشین است. یادگیری ماشینی، روشی برای آموزش کامپیوترها بر اساس داده‌ها است. به طور ساده، در یادگیری ماشینی، سیستم‌ها قادر به تشخیص الگوها، انجام پیش‌بینی‌ها و اتخاذ تصمیمات مبتنی بر داده‌های قبلی می‌باشند. با تغییرات و بهبود روش‌های یادگیری ماشینی مثل شبکه‌های عصبی عمیق، رشد قابل توجهی در ظرفیت هوش مصنوعی صورت گرفته است.

هوش مصنوعی یک زمینه تخصصی در علوم کامپیوتر است که به طراحی و توسعه سیستم‌های کامپیوتری با قابلیت انجام وظایف هوشمندانه و شبیه به انسان می‌پردازد. هدف اصلی هوش مصنوعی، توسعه سیستم‌هایی است که قادر به تفکر، یادگیری، استنتاج و اتخاذ تصمیمات مشابه به انسان باشند. هوش مصنوعی به منظور تقلید و شبیه‌سازی قابلیت‌های ذهنی انسان ساخته شده است. این قابلیت‌ها شامل پردازش اطلاعات، تحلیل داده‌ها، تشخیص الگوها، اتخاذ تصمیمات، ارتباطات زبانی، یادگیری و بهبود عملکرد بر اساس تجربه و حتی تعامل با محیط و عوامل خارجی

می‌باشند. هوش مصنوعی به کامپیوترها امکان می‌دهد تا الگوها و قواعد پیچیده را در داده‌ها تشخیص داده و از آن‌ها برای تصمیم‌گیری و پیش‌بینی استفاده کنند. این فناوری با استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های ریاضی توانایی یادگیری و استنتاج را به سیستم‌ها اضافه می‌کند. هوش مصنوعی در دهه‌های اخیر توسعه و پیشرفت چشمگیری داشته است. از کاربردهای هوش مصنوعی می‌توان به تشخیص الگوها در تصاویر، ترجمه زبان، پیش‌بینی رفتار مشتریان، خودروهای خودران، رباتیک، بازی‌های رایانه‌ای و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد. در کل، هوش مصنوعی به عنوان یک زمینه بسیار گسترده در علوم کامپیوتر و مهندسی نرم‌افزار شناخته می‌شود و تلاش می‌کند تا سیستم‌های هوشمند با توانایی تصمیم‌گیری و حل مسائل پیچیده را توسعه دهد.

در این مقاله سعی شده است با استفاده از الگوریتم شبکه‌های عصبی و داده‌کاوی به منظور شناسایی تهدیدات سایبرالکترونیکی و دسته‌بندی آن‌ها ارائه شده است. بخش‌های مقاله به شرح ذیل سازماندهی شده است: در بخش ۲ پیشینه و تاریخچه‌ی تحقیق آورده شده است. در این بخش سابقه‌ی هوش مصنوعی و دسته‌بندی‌های هوش مصنوعی آورده شده است. همچنین، به بررسی مقالاتی و منابعی که از هوش مصنوعی در حوزه‌ی نظامی بهره گرفته‌اند پرداخته شده است. در بخش ۳ روش پیشنهادی برای شناسایی و دسته‌بندی تهدیدات سایبرالکترونیک در حوزه‌ی دریایی ارائه شده است. در نهایت در بخش ۴ نتیجه‌گیری مقاله و کارهای آتی آورده شده است.

۲- پیشینه تحقیق

تاریخچه هوش مصنوعی به قدمتی بیش از شش دهه برمی‌گردد. شکل‌گیری این حوزه با برخی از رویدادها و پیشرفت‌های کلیدی در طی سال‌های گذشته همراه بوده است. در ادامه مقاله، به برخی از مهم‌ترین مراحل در تاریخچه هوش مصنوعی اشاره خواهیم کرد:

پیدایش هوش مصنوعی: اصول و مفاهیم اولیه هوش مصنوعی در دهه ۱۹۵۰ میلادی توسط پژوهشگرانی همچون آلن تورینگ و جان مک کارتی و آرتور ساموئل مطرح شد. آن‌ها به دنبال ایجاد سیستم‌هایی بودند که بتوانند هوش مصنوعی را تجربه کنند.

¹ Artificial Intelligence (AI)

۲-۱- یادگیری ماشین

در این روش، سیستم‌ها با استفاده از داده‌ها و الگوریتم‌های یادگیری، توانایی بهبود خود را به دست می‌آورند و به سیستم‌ها اجازه می‌دهد که از داده‌ها یاد بگیرند و الگوها و قواعد را تشخیص دهند. این روش شامل یادگیری نظارت‌شده، یادگیری بدون نظارت و یادگیری تقویتی است. در روش یادگیری نظارت‌شده، سیستم با استفاده از داده‌های آموزشی که همراه با برچسب‌ها هستند، توانایی تشخیص الگوها و پیش‌بینی را پیدا می‌کند. در حالی که در یادگیری بدون نظارت، سیستم با استفاده از داده‌های بدون برچسب، قواعد و الگوهای پنهان را تشخیص می‌دهد و ساختار داده‌ها را درک می‌کند. در یادگیری تقویتی، سیستم با ارزشیابی تجربیات خود و بهره‌گیری از تکرار و آزمایش، توانایی انجام تصمیم‌گیری‌های بهتر را پیدا می‌کند. [۲]

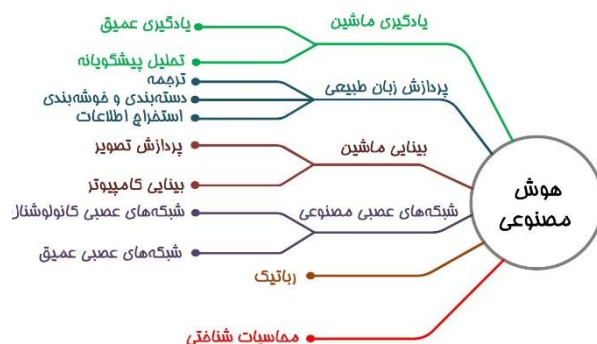
۲-۲- پردازش زبان طبیعی

این روش به سیستم‌ها امکان می‌دهد تا زبان انسانی را تشخیص داده و تفسیر کنند. با استفاده از پردازش زبان طبیعی، سیستم‌ها می‌توانند دستورات و پرسش‌های زبان طبیعی را درک و پاسخ دهند. پردازش زبان طبیعی، یکی از حوزه‌های مهم هوش مصنوعی است که به بررسی و تحلیل زبان طبیعی انسان می‌پردازد. هدف اصلی پردازش زبان طبیعی، درک و تفسیر زبان طبیعی انسان با استفاده از سیستم‌های کامپیوتری است. در پردازش زبان طبیعی، سیستم‌های کامپیوتری به منظور درک متون و جملات زبانی، تشخیص الگوها و ساختارهای گرامری، استخراج اطلاعات و پاسخ به سؤالات از متن‌ها استفاده می‌شوند. این فناوری به وسیله الگوریتم‌ها و مدل‌های یادگیری ماشینی، مدل‌سازی زبانی و تحلیل داده‌های زبانی عمل می‌کند. پردازش زبان طبیعی در کاربردهای متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، در سیستم‌های ترجمه ماشینی، پردازش زبان طبیعی برای ترجمه متون از یک زبان به زبان دیگر استفاده

در دهه ۱۹۶۰، تلاش‌های فراوانی در زمینه‌هایی مانند منطق، ریاضیات، نظریه اطلاعات و زبان‌شناسی انجام شد. پژوهشگران مهمی همچون جان مک کارتی و هربرت سایمون به مطالعه مسائلی مانند حل مسئله و تصمیم‌گیری با استفاده از روش‌های قابل برنامه‌ریزی می‌پرداختند. در دهه ۱۹۸۰، با رشد توجه به شبکه‌های عصبی، تحقیقات در این زمینه گسترش یافت. شبکه‌های عصبی الهم‌بخشی بسیار بزرگی برای ساختار برنامه‌های هوش مصنوعی بودند و روش‌های یادگیری ماشینی را بهبود بخشیدند. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش قدرت محاسباتی در دهه ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰، استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌های پیچیده‌تر در هوش مصنوعی امکان‌پذیر شد. این پیشرفت‌ها به توسعه روش‌های یادگیری ماشینی و تحلیل کلان داده‌ها کمک کرد. [۱]

به‌طور کلی هوش مصنوعی به شش زیر گروه یادگیری ماشین^۱، پردازش زبان طبیعی^۲، بینایی ماشین^۳، شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴، رباتیک^۵ و محاسبات شناختی^۶ تقسیم می‌شود. شکل ۱ شاخه‌های هوش مصنوعی را به تصویر می‌کشد.

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در هوش مصنوعی رخ داده است. الگوریتم‌های پیشرفته‌تری در حوزه یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی عمیق به کار گرفته شده‌اند. هوش مصنوعی در حوزه‌هایی مانند پردازش زبان طبیعی، بینایی ماشین، خودروهای خودران و رباتیک پیشرفت‌های قابل توجهی کرده است. در زیربخش‌های بعدی به معرفی هریک از زیرگروه‌های هوش مصنوعی پرداخته می‌شود. سپس، کاربردهای عمومی و کاربرد هوش مصنوعی در حوزه‌ی نظامی آورده می‌شود.



شکل ۱- دسته‌بندی روش‌های هوش مصنوعی

5 Artificial Neural Networks (ANN)
6 Robotic
7 Cognitive computing

1 Big data
2 Machine Learning (ML)
3 Natural Language Processing (NLP)
4 Machine Vision (MV)

می‌شود. همچنین در سیستم‌های پرسش و پاسخ، پردازش زبان طبیعی به سیستم‌ها کمک می‌کند تا به درک سوالات کاربران پاسخ دهند. علاوه بر این، پردازش زبان طبیعی در تحلیل احساسات، استخراج اطلاعات از متون، خلاصه‌سازی متون، تشخیص تقلب و فیلتر کردن متن‌های ناسازگار نیز به کار می‌رود. همچنین، با پیشرفت تکنولوژی هوش مصنوعی، پردازش زبان طبیعی در سیستم‌های گفتار به مفهوم بازیابی گفتار و تولید گفتار نیز به کار می‌رود. پردازش زبان طبیعی به‌عنوان یک حوزه فعال در تحقیقات هوش مصنوعی، بهبود چشمگیری داشته است و در آینده نقش مهمی در توسعه سیستم‌های هوشمند در حوزه زبان طبیعی خواهد داشت.

۲-۳- بینایی ماشین

این روش به سیستم‌ها امکان می‌دهد تا تصاویر و ویدئوها را تشخیص داده و تفسیر کنند. سیستم‌های بینایی ماشین قادر به تشخیص الگوها، تشخیص اشیاء و تشخیص چهره هستند.

نام دیگر این روش بینایی کامپیوتری است و یک زیرشاخه از هوش مصنوعی است که به توانایی سیستم‌های کامپیوتری در درک و تحلیل تصاویر و ویدئوها می‌پردازد. هدف اصلی بینایی ماشین، بهبود قابلیت‌های بینایی سیستم‌های کامپیوتری به‌گونه‌ای است که بتوانند الگوها، اشیاء و ویژگی‌های مختلف در تصاویر را تشخیص داده و تفسیر کنند. در بینایی ماشین، از تکنیک‌ها و الگوریتم‌های مختلفی استفاده می‌شود تا سیستم‌های کامپیوتری بتوانند تصاویر را پردازش کرده و اطلاعات مفیدی را استخراج کنند. بینایی ماشین شامل وظایفی مانند تشخیص الگوها، تشخیص و تمییز دادن اشیاء، شناسایی چهره، تشخیص حرکت، تحلیل تصاویر پزشکی و بسیاری موارد دیگر است. بینایی ماشین در بسیاری از زمینه‌ها و صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در صنعت خودروسازی، بینایی ماشین برای تشخیص تابلوهای راهنما، تشخیص خودروهای پیش رو، سیستم‌های هشداردهنده تصادف و خودروهای خودران استفاده می‌شود. همچنین، در حوزه پزشکی، بینایی ماشین به‌منظور تحلیل تصاویر رادیولوژی، تشخیص بیماری‌ها و رصد علائم بالقوه استفاده می‌شود.

بینایی ماشین به‌عنوان یک فناوری صرفاً محدود به تصاویر نیست و در ترکیب با سایر حس‌گرها مانند حسگرهای صوتی، سنسورهای تشخیص حرکت و سایر حسگرها می‌تواند به سیستم‌های هوشمند فراگیری کمک کند و بهبود قابلیت ارتباط بین انسان و ماشین را فراهم آورد. [۳]

۲-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی ساختارهایی هستند که الهام گرفته از ساختار مغز انسان هستند. این شبکه‌ها از یک مجموعه از واحدهای محاسباتی که نورون‌ها یا نودها نامیده می‌شوند و ارتباطاتی که بین آن‌ها وجود دارد، تشکیل شده‌اند. هدف اصلی استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، تقریب زدن یا تقلید کردن رفتار مغز انسان به‌منظور انجام وظایف هوشمندانه است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی قادرند الگوها، ترندها^۱ و ارتباطات پیچیده را در داده‌ها تشخیص دهند و یاد بگیرند. آن‌ها قادر به استخراج ویژگی‌های مهم از داده‌ها و تشخیص الگوهای پنهان در آن‌ها هستند. این شبکه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی، از جمله پس انتشار خطا، وزن‌دهی و تنظیم پارامترها، توانایی یادگیری و بهبود عملکرد خود را دارند. از شبکه‌های عصبی مصنوعی در بسیاری از زمینه‌ها استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در تشخیص تصاویر، تشخیص الگو، تشخیص گفتار، ترجمه ماشینی، پیش‌بینی و تحلیل داده‌ها، تشخیص احساسات و بسیاری دیگر. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش قدرت محاسباتی، شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌بهبود چشمگیری کرده‌اند و در حوزه‌های مختلفی از جمله علوم پزشکی، صنعت، تجارت و تکنولوژی اثربخش بوده‌اند. استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در حوزه هوش مصنوعی نشان می‌دهد که این فناوری بسیار قدرتمند و واعظ است و در آینده می‌تواند نقش مهمی در توسعه فناوری‌های هوشمند و بهبود جامعه‌ها ایفا کند. [۴]

۲-۵- رباتیک

رباتیک بخش بین‌رشته‌ای علم و مهندسی به‌حساب می‌آید که بر طراحی، ساخت و استفاده از ربات‌های مکانیکی

اختصاص دارد. با مطالعه این راهنما، درک عینی و منسجمی نسبت به پرسش رباتیک چیست به دست خواهد آمد و انواع مختلف روبات، کاربرد رباتیک و نحوه استفاده از آن‌ها در حوزه‌های تخصصی مختلف شرح داده شده است. ربات ماشینی قابلیت برنامه‌نویسی شدن دارد، به طوری که می‌تواند وظیفه‌ای را تکمیل کند. اصطلاح رباتیک حوزه‌ای مطالعاتی را توصیف می‌کند که بر توسعه ربات‌ها و خودکارسازی تمرکز دارد. هر ربات دارای سطح متفاوتی از خودکارسازی است. گستره این سطوح متفاوت، از ربات‌های تحت کنترل انسان با قابلیت انجام وظیفه‌ای مشخص تا بات‌های کاملاً خودکاری ادامه پیدا می‌کند که وظایف را بدون هیچ‌گونه تأثیر خارجی انجام می‌دهند. [۵]

۲-۶- محاسبات شناختی

رایانش یا محاسبات شناختی یک حوزه تحقیقاتی در علوم کامپیوتر و هوش مصنوعی است که سعی در شبیه‌سازی فعالیت‌های شناختی انسان در کامپیوتر دارد. هدف اصلی محاسبات شناختی، توسعه سیستم‌های هوشمند کامپیوتری است که قادر به پردازش اطلاعات به سبک انسان هستند و می‌توانند از عناصری مانند تشخیص صدا، تشخیص تصویر، تحلیل زبان طبیعی و انجام وظایف تصمیم‌گیری پیچیده بهره ببرند. در محاسبات شناختی از مدل‌های ریاضی و الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که بر پایه تجربیات انسان در زمینه‌هایی مانند پردازش زبان، حل مسئله، یادگیری و تصمیم‌گیری ساخته شده‌اند. این مدل‌ها و الگوریتم‌ها به کامپیوتر اجازه می‌دهند تا بهبود قابل توجهی در تفهیم و تجزیه و تحلیل اطلاعات داشته باشند و درکی عمیق‌تر از داده‌ها و مفاهیم را ارائه دهند.

یکی از رویکردهای رایانش شناختی، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است که با الهام از ساختار مغز انسان طراحی شده‌اند. این شبکه‌ها قادر به یادگیری مدل‌هایی هستند که بتوانند الگوهای پیچیده‌تری را تشخیص دهند و از آن‌ها برای تفسیر داده‌ها و ارائه پاسخ‌های بهتر استفاده کنند.

با استفاده از رایانش شناختی، قابلیت‌های هوشمندی مانند تشخیص چهره، ترجمه زبان، پیشنهاد محتوا و تحلیل داده‌های بزرگ را می‌توان به سیستم‌ها و برنامه‌های کامپیوتری اضافه کرد. [۱]

۲-۷- کاربردهای عمومی هوش مصنوعی

هوش مصنوعی در بسیاری از زمینه‌ها و صنایع غیرنظامی کاربرد دارد. برخی از کاربردهای مهم آن عبارتند از:

- پزشکی: هوش مصنوعی در تشخیص بیماری‌ها، تحلیل تصاویر پزشکی و پیش‌بینی بیماری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله‌ی استفاده اخیر این ابزار در تشخیص بیماران مبتلا به کووید ۱۹ و درمان آن‌ها بوده است. [۶]
- خودروهای خودران: هوش مصنوعی در توسعه خودروهای خودران و سیستم‌های هوشمند رانندگی کاربرد دارد.
- رباتیک: سیستم‌های رباتیک با استفاده از هوش مصنوعی قادر به انجام وظایف پیچیده و همکاری با انسان‌ها هستند. [۷]

- پیش‌بینی بورس: هوش مصنوعی به تحلیل داده‌های بازار سهام و پیش‌بینی روند قیمت‌ها کمک می‌کند.

هرچند هوش مصنوعی پیشرفت‌های زیادی کرده است، اما با چالش‌هایی نیز مواجه است. برخی از این چالش‌ها شامل تمرکز بر اخلاقیات هوش مصنوعی، حفظ امنیت و حریم خصوصی، تأثیرات اجتماعی و اقتصادی و توانایی تعامل با انسان‌ها است. با پیشرفت روزافزون فناوری‌های هوش مصنوعی، آینده این حوزه بسیار پر از امکانات و فرصت‌های جدید است. هوش مصنوعی قدرتمندتر و همراه با اختراعات نوآورانه می‌تواند در زمینه‌های مختلفی از جمله بهبود سیستم‌های بهداشتی، حمل‌ونقل هوشمند و راهکارهای تجارت الکترونیک به کار گرفته شود. [۸]

۲-۸- کاربرد هوش مصنوعی در مسائل نظامی

در زمینه‌ی استفاده از هوش مصنوعی در حوزه‌ی نظامی مقالات متعددی [۹]، [۱۰]، [۱۱] و [۱۲] وجود دارد که به کاربرد هوش مصنوعی در ربات‌های جنگنده، پهپادها و شهپادها، سلاح‌های خودمختار و ... می‌پردازند. در این مقالات تنها از هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری که بتواند یک کار را به‌صورت منفصل از سایر ابزارها و دیگر تجهیزات انجام دهد پرداخته شده است و به این موضوع که بتوان از هوش مصنوعی به‌عنوان شبکه‌ای از سامانه‌ها و تجهیزات استفاده کرد تا به‌طور دقیق‌تری تشخیص، شناسایی و دسته‌بندی تهدیدات را به انجام برساند پرداخته نشده است. در [۷]، کاربرد علم رباتیک و هوش مصنوعی در مسائل

نظامی را بررسی شده است. در این مقاله سعی شده ربات‌هایی که در طی سال‌های ۲۰۰۱ تاکنون در مناطق عملیاتی به کار گرفته شده‌اند، معرفی شوند. همچنین به معرفی ربات‌هایی که احتمالاً تا سال ۲۰۱۰ بدنه اصلی یک تیم عملیاتی نظامی را تشکیل خواهند داد، پرداخته است. از کاربرد ربات‌ها در حادثه ۱۱ سپتامبر، جنگ افغانستان و عراق شروع نموده و بررسی‌های خود را به دو دسته ربات‌های نیروی زمینی و نیروی دریایی تقسیم کرده است. در این تحقیق، در مورد زمینه‌های مطالعاتی که قرار است در تکنولوژی ربات‌های نسل آینده به کار گرفته شود، بحث شده است. طبق نظر نویسنده این مقاله، هرچند هزینه ساخت ربات‌ها بسیار بالا است؛ اما به دلیل آنکه وسایلی بدون ترس و بدون خستگی به حساب می‌آیند و قادرند کارهای تکراری را به سرعت و با دقت انجام دهند، مورد توجه صنایع نظامی هستند.

در [۱۳] هوش مصنوعی نظامی را به‌عنوان تهدیدی نوپدید در نبرد آینده مورد بررسی قرار داده شده است. این فناوری در سامانه‌های بدون سرنشین، آنالیز حجم بالایی از اطلاعات مربوط به حوزه شناسایی تا توسعه سامانه‌های جدید مکان‌یابی و هدف‌گیری برای مهمات نسل جدید، سامانه‌های پدافندی، سامانه‌های هدایت انواع موشک‌ها، امنیت سایبری، شبیه‌سازهای رزمی، رصد وضعیت نیروهای خودی و دشمن در میدان نبرد و امور مربوط به بحث تدارکات و حمل‌ونقل واحدها در میدان نبرد آینده، کاربرد دارد. یک نمونه از استفاده هوش مصنوعی در شناورهای هوشمند بدون سرنشین «پروژه شکارچی دریا» است. این شناور برای ساخت و مطالعه بر اساس یک شناور بدون سرنشین با مأموریت ضدزیردریایی در نیروهای مسلح آمریکا طراحی شده است. این ناو جنگی با هدف عملیات نظامی برای ساعت‌های طولانی بدون حتی یک خدمه و هدایت خود به داخل و خارج بندر طراحی شده است.

در [۱۴] به بررسی توسعه و کاربرد هوش مصنوعی در زمینه نظامی پرداخته شده است. همچنین کاربردهایی نظیر تشخیص تصویر، تجزیه و تحلیل متن، وسایل نقلیه خودران^۱؛ فرایند رباتیک هدایت‌شده^۲؛ سیستم‌های رباتیک خودگردان^۳ و سیستم‌های سلاح خودمختار^۴ به‌عنوان

بخشی از کارایی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در کاربردهای نظامی آورده شده است. اگر قرار باشد هوش مصنوعی در بخش نظامی گنجانده شود، نیاز است که سیستم‌های هوشمند کاملاً قابل اعتماد باشند. علاوه بر این، استراتژی نظامی مناسب برای اجتناب از درگیری‌های غیرضروری حیاتی است. دانستن زمان و نوع سیستم هوش مصنوعی برای استقرار، ضرورت و مناسب بودن یک سیستم هوش مصنوعی برای مدیریت یک موقعیت و فعالیت‌هایی که یک سیستم هوش مصنوعی مجاز به انجام آن است، از جمله سؤالات مهمی است که قبل از اقدام به برنامه استراتژیک نیاز است به آن‌ها پاسخ داده شود.

در [۱۵] یک مدل برای هوشمندسازی رادارهای پشتیبانی الکترونیکی جنگ الکترونیک پیشنهاد شده است که مبتنی بر هوش مصنوعی است.

همچنین ابزارهای بسیاری در حوزه سایبری^۵ معرفی شده‌اند که می‌توانند به سرعت تهدیدات سایبری و نفوذ را شناسایی و راهکاری برای مقابله با آن ارائه دهند. از جمله این ابزارها می‌توان به [۱۶] Cyberason، [۱۷] FortiAI و [۱۸] DarkTrace اشاره کرد.

باین‌حال ابزار و پلتفرم بومی و ملی که بتواند تهدیدات جنگ الکترونیکی را شناسایی کرده و راهکار مطمئنی برای مقابله با آن ارائه کند معرفی نشده است.

۳- روش پیشنهادی برای شناسایی و دسته‌بندی تهدیدات جنگ الکترونیکی

به‌منظور پیشگیری در مقابل تهدیدات موشکی، راداری و به‌طور کلی جنگ الکترونیکی نیاز است که ابتدا با استفاده از ابزارهایی تهدیدات را شناخته و آن‌ها را دسته‌بندی و کلاس‌بندی نماییم. سپس، در مقابل این تهدیدات راهکاری که میزان آسیب را کاهش داده و یا از بین می‌برد ایجاد نماییم. بدین‌صورت، در مواقعی که تهدیدی به وجود آمد امکان آمادگی برای مقابله با آن و احتمال از بین بردن تهدید بیشتر می‌شود. وظیفه شناسایی انواع تهدیدات یادشده در حوزه جنگ الکترونیک بر عهده پشتیبانی

4 Autonomous system seapons

5 Cyber

6 Electronic War (EW)

1 Self-driving vehicles

2 Robotic process automation

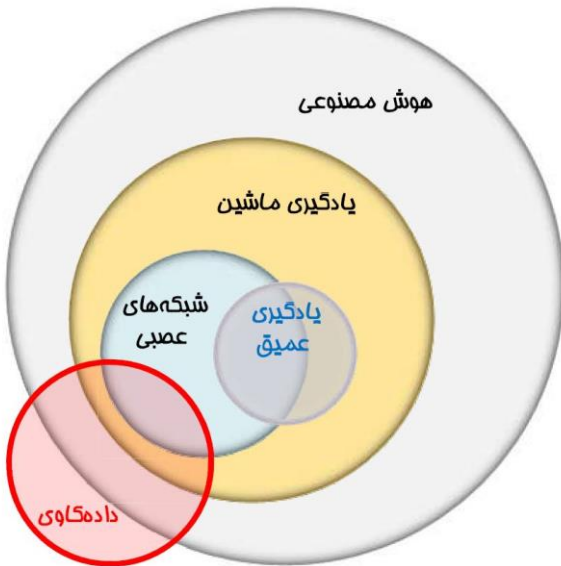
3 Autonomous system

الکترونیکی^۱ و در حوزه‌ی سایبری بر عهده‌ی مرکز عملیات امنیت است.

یکی از مشکلات بزرگی که در مقابل شناسایی این نوع تهدیدات وجود دارد نداشتن پایگاه داده قوی و منسجم از انواع تهدیدات و دسته‌بندی آن‌ها است. این امر از این بابت طبیعی است که اکثر سیستم‌ها و تجهیزات جنگ الکترونیکی استفاده‌شده در سازمان نیروی مسلح به‌صورت مستقل از یکدیگر کار کرده و مجموعه اختصاصی از پایگاه داده دارند. حتی تجهیزات هر یک از این حوزه‌های پشتیبانی الکترونیکی اعم از راداری، مخابراتی و نوری نیز از همدیگر مستقل هستند و همجوشی داده ندارند. از طرف دیگر، اگر بخواهیم داده‌های که از هر یک از سامانه‌های جنگ الکترونیکی به دست می‌آید را با همدیگر ادغام کرده و یا اصطلاحاً هم‌جوشی کنیم و سپس به شناسایی یک تهدید بپردازیم با مجموعه‌ی عظیم و گیج‌کننده‌ی از اطلاعات مواجه می‌شویم که امکان بهره‌برداری از آن‌ها را نداریم.

در چند سال اخیر دانشی به نام داده‌کاوی در حوزه‌ی فناوری اطلاعات برای کلان داده‌ها به وجود آمده است که به معنای استخراج و کاوش در حجم وسیعی از داده‌های موجود برای دست یافتن به اطلاعاتی گران‌بها و با ارزش است. داده‌کاوی به دلیل اینکه موجب تصمیم‌گیری بر اساس واقعیات و واقع‌بینانه می‌شود و علاوه بر آن سبب تکرار تصمیمات سودآور گذشته می‌شود از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. داده‌کاوی در حقیقت علمی است که بر تحلیل و پردازش استوار بوده و زمانی به سراغ آن می‌رویم که به دنبال حل یک مشکل و یافتن راه‌حل و مسئله‌ای برای آن باشیم.

برای داده‌کاوی الگوریتم‌ها و روش‌های متعددی پیشنهاد می‌شود که با توجه به مسأله شناسایی تهدیدات و دسته‌بندی آن‌ها در حوزه جنگ الکترونیک و دفاع سایبری در این مقاله پیشنهاد می‌شود که از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای حل این مسأله استفاده کنیم. در شکل (۲) رابطه‌ی بین هوش مصنوعی و داده‌کاوی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ارتباط بین زیرگروه‌های هوش مصنوعی با داده‌کاوی

۱-۳- مزیت استفاده از داده‌کاوی با هوش مصنوعی در مقایسه با سایر روش‌ها

در داده‌کاوی از دو روش آماری و هوش مصنوعی برای حل مسائل بهره گرفته می‌شود. در روش آماری از فرضیات و برآوردهایی برای استخراج یک نتیجه استفاده می‌شود در حالی که در روش هوش مصنوعی از هیچ فرضی استفاده نمی‌شود و تنها به مجموعه‌ی عظیمی از اطلاعات که باعث آموزش سیستم شده‌اند بسنده می‌کند. همین امر باعث تفاوت دو روش شده و جواب‌های متفاوتی برای حل یک مسأله ممکن است تولید کنند. به‌عنوان مثال، در روش آماری فرض می‌شود که داده‌ها نرمال هستند که این برای حالتی که داده‌ها متناقض باشند مشکل پیش می‌آورند. هوش مصنوعی در جاهایی که داده‌ها ناقص باشند یا با یکدیگر متناقض باشند بهتر از روش آماری عمل می‌کند. از طرف دیگر روش‌های هوش مصنوعی برای طبقه‌بندی، خوشه‌بندی و بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری در مقایسه با روش‌های آماری بهتر عمل می‌کند. همچنین روش هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های آماری حساسیت کمتری نسبت به تنظیم پارامترها دارند و ساختار آن انعطاف‌پذیرتر هستند.

² Security Operation Center (SOC)

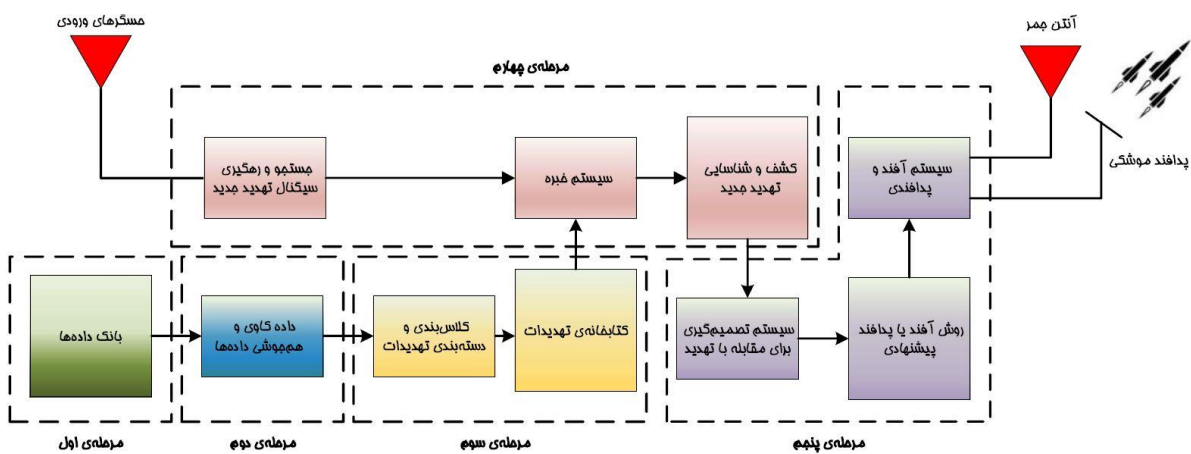
¹ Electronic Support (ES)

۳-۲- مراحل شناسایی تهدیدات سایبر الکترونیک با تلفیق هوش مصنوعی و داده کاوی

در این مقاله، یک مدل برای شناسایی و مقابله با تهدیدات حوزه‌ی جنگ الکترونیک در یک منطقه عملیاتی پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی دارای پنج مرحله است که این مراحل عبارتند از:

- **مرحله اول:** جمع‌آوری و نگهداری طولانی‌مدت داده‌هایی که از هریک از سامانه‌های جنگ الکترونیکی آن منطقه و مناطق مشابه به دست می‌آیند در مکانی به نام بانک داده اولیه.
- **مرحله دوم:** ادغام و هم‌جوشی داده‌ها با روش داده کاوی.

- **مرحله سوم:** استفاده از یادگیری ماشین برای دسته‌بندی و کلاس‌بندی کردن تهدیدات جنگ الکترونیکی یک منطقه عملیاتی مشخص و تولید کتابخانه‌ای از تهدیدات.
- **مرحله چهارم:** جستجو و رهگیری سیگنال‌های منطقه و تشخیص تهدید جدید با استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق و انتصاب آن به داده‌های کتابخانه‌ی تهدیدات.
- **مرحله پنجم:** پیشنهاد راهکاری برای مقابله با تهدید با استفاده از هوش مصنوعی به‌نوعی که کمترین آسیب به خودی و بیش‌ترین اثرگذاری را داشته باشد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

شکل (۳) بلوک دیاگرام روش پیشنهادی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر را نشان می‌دهد. در ادامه به توضیح و تشریح هر یک از این مراحل روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳-۳- مرحله اول: تولید بانک داده‌ی اولیه

در این مرحله از کار می‌بایست از تمامی منابع تشخیص، شناسایی و پشتیبانی جنگ الکترونیکی اعم از مخابراتی، راداری، اکتیو و پسیو، زیرساخت و ... سیگنال‌ها و داده‌های مربوط به تهدیدات را جمع‌آوری کنیم. این تهدیدات می‌تواند شامل تمام تلاش‌های دشمن برای ممانعت از ارتباطات رادیویی، ارتباطات ماهواره‌ای و سیستم‌های GPS و ناوبری باشند. همچنین، سیگنال و مشخصه‌های ناشی از رادارهای جستجو و رهگیری، سامانه‌های لیزری و فرسوخ نیز می‌بایست در این مرحله از کار شناسایی شوند. به‌طور نوعی یک نوع تهدید ممکن است چندین سیگنال، داده و به‌طور کلی مشخصه داشته باشد. به‌عنوان مثال، اگر

جنگنده‌ی دشمن اقدام به پرتاب موشک به سمت سامانه‌ی پدافندی خودی می‌کند هم از سیستم لیزری نصب‌شده بر روی موشک و هم از رادار پالسی جنگنده برای مورد هدف قرار دادن استفاده می‌کند؛ بنابراین، به‌منظور شناسایی دقیق این تهدید می‌بایست تمام سیگنال‌هایی که یک تهدید از آن برای هدف‌گیری و ضربه زدن استفاده می‌کند کسب و سپس برچسب‌گذاری اولیه شود.

هرچند این میزان از اطلاعات ممکن است بسیار زیاد و تا اندازه‌ی زیادی گیج‌کننده و سنگین باشند؛ اما در این مرحله از کار هرچه میزان اطلاعات ما از سامانه‌ها و تجهیزات دشمن بیشتر باشد در مراحل نتیجه‌گیری با نتایج بهتر و دقیق‌تری روبرو خواهیم شد.

در این مرحله از کار با مجموع عظیمی از اطلاعات مواجه می‌شویم که اصطلاحاً به آن کلان داده گفته می‌شود. این بخش از کار نشان‌دهنده‌ی میزان سرمایه‌ی یک سازمان است که چه مقدار اطلاعات و داده‌های خود را به صحیحی

ذخیره‌سازی و حفظ کرده است. مسلماً این میزان از اطلاعات با حجم زیاد در مدت کوتاهی قابل جمع‌آوری نبوده و در طول سالیان متوالی که سایت‌های جنگ الکترونیکی و سامانه‌های آن‌ها فعال بوده‌اند باید ذخیره و جمع‌آوری شوند.

۳-۴- مرحله‌ی دوم: داده‌کاوی و هم‌جوشی داده‌ها

به‌منظور تلفیق داده‌ها و سیگنال‌های به‌دست‌آمده از سامانه‌های مختلف جنگ الکترونیکی که در مرحله قبل کسب شد می‌توانیم از روش داده‌کاوی استفاده کنیم. علت استفاده از این روش این است که داده‌های به‌دست‌آمده از مرحله قبل داده‌های نامتجانس بوده و از منابع مختلفی به‌دست‌آمده‌اند.

در این مرحله از کار داده‌هایی که از سنسورها و سامانه‌های مختلف پشتیبانی الکترونیکی و به‌عام‌تر از سامانه‌های SIGINT به‌دست‌آمده است در خوشه‌های مختلفی قرار می‌گیرند. هر خوشه شامل اطلاعات مختلف و از زوایای متفاوت یک تهدید است. البته باید خاطر نشان کرد که این خوشه‌ها هنوز کلی بوده و نمی‌توانیم به‌طور دقیق تهدید را تشخیص دهیم.

به‌عنوان‌مثال، یک جنگنده خاص ممکن است دارای سیگنال راداری ارسالی، سیگنال راداری دریافتی و صوت تولیدشده و پروتکل ارتباطی متفاوتی باشند. همه این موارد که از طریق منابع مختلف و سنسورهای متفاوتی به‌دست‌آمده‌اند در یک خوشه قرار می‌گیرند؛ اما ممکن است این سیگنال‌ها تهدیدی را مشخص کرده و یا نکنند؛ بنابراین، این مرحله از کار سطح یک تلفیق و ترکیب در نظر گرفته می‌شود.

۳-۵- مرحله‌ی سوم: دسته‌بندی دقیق تهدیدات و تولید بانک تهدیدات

در این مرحله از کار اطلاعات دقیق‌تری از سامانه‌های آفندی، پدافندی و شناسایی دشمن که در سطح یک تلفیق (مرحله‌ی دوم) از سنسورهای مختلف به‌دست‌آمده تولید می‌شود. از جمله این اطلاعات می‌توان به سرعت، زاویه ورود، ارتفاع حرکت، انواع اقداماتی که در زمان درگیری ممکن است انجام دهند و... اشاره کرد. این اطلاعات دقیق با استفاده از یادگیری عمیق دسته‌بندی شده و به‌عنوان

یک کلاس تهدید معرفی می‌شود. در پایان این مرحله کتابخانه‌ای از تهدیدات و مشخصه‌های آن‌ها را در اختیار داریم. این مرحله از کار سطح دو ترکیب و تلفیق اطلاعات نامیده شده و به‌صورت آفلاین تکمیل می‌شود.

۳-۶- مرحله‌ی چهارم: جستجو و رهگیری هدف و تشخیص تهدید جدید

این مرحله از کار از دو بخش مجزا تشکیل شده است. بخش اول به پایش منطقه پرداخته و سیگنال و اطلاعاتی را از محیط توسط حسگرها مختلف به دست می‌آورد. در بخش دوم اطلاعات به‌دست‌آمده را در هر لحظه به سیستم خبره داده تا آن را با کتابخانه‌ی تهدیدات مقایسه کند. خروجی این مرحله شامل یک پیام که نشان‌دهنده هشدار تحت عنوان تهدید جدید است می‌باشد.

۳-۷- مرحله‌ی پنجم: تصمیم‌گیری برای اقدام و تعیین نوع اقدام

در این مرحله از کار با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی اقدامات لازم برای مقابله با تهدید جدید تصمیم‌گیری می‌شود. ممکن در این مرحله از کار به این نتیجه برسیم که اقدام مناسبی برای تهدید وجود ندارد و یا اینکه بنا به علت‌هایی نیاز به اقدام خاصی نیست.

در هر صورت، اگر نوع اقدام مشخص شود پیغامی به مسئول پدافند یا مسئول سایت جنگال مبنی بر نوع اقدام داده می‌شود و فرد می‌تواند بنا بر نظر خود و با توجه به تحلیل صورت گرفته دستور به اقداماتی از جمله فریب، اختفا و اختلال و انهدام تهدید دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابعاد هوش مصنوعی، تهدیدها و فرصت‌های آن در بخش نظامی و غیرنظامی آورده شد. همچنین در ادامه، یک مدل برای شناسایی و تشخیص تهدیدهای نوین در حوزه‌ی جنگ الکترونیک با استفاده از هوش مصنوعی و داده‌کاوی پیشنهاد شد. مهم‌ترین عامل برای به دست آوردن حداکثر دقت در روش‌های هوش مصنوعی داشتن پایگاه داده‌ی غنی و کامل است. بنابراین پیشنهاد می‌شود

که داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده از سایت‌ها به نحو مطلوبی ذخیره‌سازی و برچسب‌گذاری شوند.

منابع و مراجع

- [۱۲] احمدی لاشکی، ر.، استفاده از هوش مصنوعی در پرند ه‌های بدون سرنشین نظامی و تجاری، هفتمین کنفرانس ملی مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، ۱۳۹۹.
- [۱۳] قنبریان، ح. و صراف جوشقانی، ح.، هوش مصنوعی نظامی تهدیدی نوپدید در نبرد آینده، هشتمین همایش ملی علوم و مهندسی دفاعی با رویکرد تهدیدات نوپدید، ۱۴۰۰.
- [۱۴] عباسی، م. و عباسی ح.، بررسی توسعه و کاربرد هوش مصنوعی در زمینه نظامی، in هشتمین همایش ملی علوم و مهندسی دفاعی با رویکرد تهدیدات نوپدید، ۱۴۰۰.
- [15] Sharma, P., K.K. Sarma, and N.E. Mastorakis, Artificial intelligence aided electronic warfare systems-recent trends and evolving applications, IEEE Access, vol.8, pp. 224761-22478, 2020.
- [16] Kanwal, M. and S. Thakur. An app based on static analysis for android ransomware. in IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2017.
- [17] Defo Aymar, T., Matching expectations and reality in AI systems-cybersecurity use case, 2023.
- [18] Cooke, P., From the machine learning region to the deep learning region: Tesla, DarkTrace and DeepMind as internationalized local to global cluster firms, In the Globalization of Regional Clusters, Edward Elgar Publishing, pp. 33-57, 2021.
- [1] Muthukrishnan, N., et al., Brief history of artificial intelligence. *Neuroimaging Clinics*, vol. 30, no. 4, pp. 393-399, 2020.
- [2] Wang, H., C. Ma, and L. Zhou, A brief review of machine learning and its application, In *IEEE International conference on information engineering and computer science*, 2009.
- [3] Mihalcea, R., H. Liu, and H. Lieberman, NLP for natural language programming, In *7th International Conference, Computational Linguistics and Intelligent Text Processing*, Mexico City, Mexico, pp. 19-25, 2006.
- [4] biodun, O.I., et al., State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey, *Heliyon*, vol. 4, no. 11, 2018.
- [5] Brady, M., L.A. Gerhardt, and H.F. Davidson , Robotics and artificial intelligence. Springer Science & Business Media, vol. 11, 2012.
- [۶] کاظمی و همکاران، مروری بر کاربردهای هوش مصنوعی در شناسایی و مقابله با بیماری همه گیر کووید-۱۹، علوم پیراپزشکی و بهداشت نظامی، ۱۳۹۹.
- [۷] قنبری تلوکی، آ. و همکاران، بررسی کاربرد علم رباتیک و هوش مصنوعی در مسائل نظامی، دومین کنفرانس ملی توسعه علوم مهندسی، ۱۳۹۴.
- [۸] قلی زاده، م. و همکاران، کاربردها و چالشهای فناوری هوش مصنوعی در حوزه نظامی، هفتمین کنفرانس ملی مطالعات مدیریت در علوم انسانی، ۱۴۰۰.
- [۹] منجزی، ی. و جعفری ع.، کاربرد هوش مصنوعی در صنایع نظامی، هجدهمین کنفرانس ملی مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک، ۱۴۰۲.
- [۱۰] نعیم‌زاده، م. ، کاربرد هوش مصنوعی در صنایع نظامی، مجله‌ی اینترنتی ویراسنس، ۱۴۰۱.
- [۱۱] قلیزاده، م. و همکاران، هوش مصنوعی نحوه‌ی عملکرد آن در امنیت دفاعی کشورهای پیشرفته و کاربرد و ضرورت آن در امور نظامی، کنفرانس بین المللی امنیت، پیشرفت و توسعه پایدار مناطق مرزی، سرزمینی و کلانشهرها، راهکارها و چالش ها با محوریت پدافند غیر عامل و مدیریت بحران، ۱۳۹۷.

الگوی نگارش مقاله در دوفصلنامه «مهندسی شناورهای تندرو»

نام و نام خانوادگی نویسنده

سازمان متبوع نویسنده، Author@Email

چکیده:

چکیده حداکثر شامل ۳۰۰ کلمه در یک یا دو پاراگراف بوده با قلم BNazanin-11- Bold برای نوشتار فارسی و با قلم Times New Roman-10- Bold برای لغات انگلیسی و به صورت تک‌ستونی آورده شود.

واژه‌های کلیدی:

مجزاشده با ویرگول، با قلم BNazanin-11 برای نوشتار فارسی و با قلم Times New Roman-10 برای لغات انگلیسی.

حاشیه بالا و چپ ۲/۵ سانتی‌متر و حاشیه راست و پایین ۲/۷ سانتی‌متر باشد. این حاشیه برای تمام صفحات شامل صفحه اول نیز اعمال می‌گردد. متن باید در دو ستون با عرض هر کدام ۷/۴ سانتی‌متر و با فاصله بین دو ستون ۱/۰ سانتی‌متر تنظیم شود. تورفتگی پاراگراف‌های بعدی ۰/۵ سانتی‌متر است.

۱- مقدمه

۲۷mm

عنوان فارسی مقاله بایستی با قلم B Triffic-18- Bold بوده و از دو خط تجاوز نکرده و نام نویسندگان مقاله با قلم B Nazanin-12- Bold و رتبه علمی آنها با قلم B Nazanin-10- فارسی و Times New Roman-9 لاتین به ترتیب در زیر عنوان مقاله آورده شود. بقیه تیترهای اصلی بایستی با قلم B Nazanin-12- Bold و تیترهای فرعی (زیربخش‌ها) با قلم B Nazanin-11- Bold متن مقاله، با قلم BNazanin-12 و قلم Times New Roman-11 برای لغات انگلیسی، با نرم‌افزار Word 2007 یا Word 2003 تحت ویندوز XP و با فواصل بین خطوط به صورت (Single) نوشته شود. عنوان بخش‌ها باید با قلم BNazanin-12- Bold و شماره‌گذاری شده با شروع از ۱ و با تورفتگی از ابتدای خط و فضای سفید ۶ نقطه با بخش بالایی نوشته شود.

۴- جدول‌ها و شکل‌ها (نمودارها و عکس‌ها)

هر جدول یا شکل باید دارای شماره، عنوان و توضیح بوده و با قلم BNazanin-12 نوشته شود. عنوان جداول به صورت وسط‌چین در بالای جدول و عنوان شکل‌ها به صورت وسط‌چین در زیر شکل نوشته شود. ذکر واحد کمیت‌ها در جدول و شکل الزامی است. در متن مقاله باید به همه جدول‌ها یا شکل‌ها ارجاع داده شود. در صورتی که ناچار به استفاده از شکل‌های بزرگ‌تر از یک ستون هستید شکل را در بالا یا پایین صفحه مورد نظر قرار دهید. شکل‌ها و جدول‌ها نباید پیش از اولین اشاره به آنها در متن مقاله ظاهر شوند. هیچ‌گاه عناوین را به عنوان قسمتی از شکل به صورت تصویری ذخیره نکنید. همچنین، اطراف عنوان‌ها، شکل‌ها و جدول‌ها از کادر اضافی استفاده نکنید.

۲- فرمت مقاله

مقالات باید در اندازه صفحه A4 چاپ شده باشند. مقاله بایستی بین ۱۰ تا ۱۵ صفحه دواستونی بوده و شکل‌ها و جدول‌های آن داخل متن آورده شود. این تعداد صفحات با در نظر گرفتن تمامی شکل‌ها، جدول‌ها و مراجع مقاله می‌باشد. هر مقاله باید به صورت‌های Word و PDF تهیه و ارسال شود.

۵- فرمول‌ها و معادلات

معادلات باید به ترتیب از ابتدا تا انتها شماره‌گذاری شوند. شماره معادلات باید در انتهای سمت راست هر ستون و در امتداد خط حاوی معادلات در پرانتز قید شود. تمام متغیرها، پارامترها و نمادهای یک عبارت ریاضی باید

۳- حاشیه‌ها

[2] Family, F., and Family, J., Principles of solar engineering, Hemisphere-McGraw Hill. 1978.

[3] Family, R. R., Family, M. X., and Family, M. J., "Fundamental studies of transition-metal sulfide catalytic materials," In *Advances in Catalysis*, Vol. 40, edited by D. D., Eley, H., Pines, and W. O., Haag, Burlington, Mass, Academic press. 1994.

[4] سیف محمدسعید، سالاری محمود، تیموری مهدی، «کاهش مقاومت در شناورهای تندرو با استفاده از جدایش جریان به کمک پله‌های عرضی»، اولین همایش ملی هیدرودینامیک کاربردی، تهران، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۹.

[5] Family, C. H., Family, B. X., and Family, X. F., "Experimental investigation on boiling of nano-particle suspension," Boiling Heat Transfer Conference, Jamaica, 2003.

[6] <http://www.website.com>

توضیح داده شوند. کلمات و یا عبارت لاتین (غیر از اختصارات) فقط می‌تواند در زیرنویس ظاهر شود.

۶- سیستم واحدها

سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین‌المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری معادل آن در سیستم واحدهای دیگر در داخل پرانتز به کار رود.

۷- نتایج

این بخش شامل ارائه نتایج تحقیق و مباحث مربوط به آنها می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق در این بخش ذکر شود.

۹- تشکر و قدردانی (در صورت لزوم)

در صورت لزوم نویسندگان می‌توانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از حامیان تحقیق در این قسمت درج کنند.

۱۰- فهرست علائم (در صورت لزوم)

محل فهرست علائم قبل از مراجع است. ابتدا علائم انگلیسی به ترتیب الفبا و سپس علائم یونانی به ترتیب الفبا تایپ شود.

مساحت، $A \text{ m}^2$

چگالی، $\rho \text{ kg/m}^3$

۱۱- مراجع

منابع اشاره شده در متن باید توسط شماره‌هائی مانند [۱] در داخل کروشه نشان داده شوند. بدیهی است مشخصات کامل مقاله در بخش مراجع با ذکر همان شماره آورده می‌شود. ترتیب قرار گرفتن مقالات در بخش مراجع همانند ترتیب رجوع به آن مقالات در متن مقاله می‌باشد. به جز مراجع نامبرده شده در متن، مرجع دیگری در بخش مراجع نوشته نشود. نحوه نوشتن عنوان مراجع بر حسب اینکه مقاله مجله [۱]، کتاب [۲]، مطلبی متعلق به کتابی که توسط افراد مختلف نوشته شده باشد [۳] یا مقاله کنفرانس [۴،۵] باشد، به ترتیب زیر خواهد بود:

[1] Family, M. M., and Family, J. G., "The concepts of energy, environment, and cost for process design," *International Journal of Green Energy*, Vol. 1, pp. 137-151, 2004.