

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

سال ۲۱، شماره ۶۰
بهار و تابستان ۱۴۰۱

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

صاحب امتیاز:

دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)
دانشکده علوم و فنون شناوری جوادالائمه (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:

سیدمهدی ساجدی

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 ۰۹۱۰۰۹۱۶۰۹

کد پستی: ۴۳۱۴۹۱۶۳۴۳۹

پست الکترونیک: daryainfo@gmail.com

فهرست:

- سیستم رانش دریایی پمپ جت / ۳
احسان یاری، محمدحسین قائدشرف، وحید آئینی، هادی مهدوی تلارمی
- تحلیل عددی عملکرد و مقاومت شناور تندرو سرشی با اعمال اسپری ریل / ۱۷
مهشید عمله کارسنگی، سجاد حاجی زاده
- بازطراحی سامانه خنک کاری در توسعه موتور بنزینی زمینی به دریایی / ۲۶
میثم محرابیان، ادیب سوزنی
- مروری بر نانو کامپوزیت ها / ۴۵
اشکان عباسی نیکو، سعید جامعی، رامین صالح پور
- بررسی اجزاء دنباله شناورها از دیدگاه اپتیکی / ۵۲
محمودرضا عباسی کاریزبالا
- موقعیت یابی هدف متحرک دریایی با استفاده همزمان از ماهواره های GEO و فیلتر کالمن / ۶۰
محمودرضا رضوی زاده، میثم رئیس دانایی
- طراحی و ساخت دستگاه تطبیق امپدانس پهن باند برای سامانه های سوناری / ۷۱
محمدحسین قزل ایاغ، محمدرضا پالوج، امیرکبیری
- Simulation of Twist Extrusion Process Parameters of AA6061-T6 Aluminum Alloy by Artificial Neural Network / 85
Mohammad Khosravi, Iman Taheridoustabad
- الگوی نگارش مقاله / ۹۶

سیستم رانش دریایی پمپجت

احسان یاری^۱، محمدحسین قاندرشرف^۲، وحید آئینی^۳، هادی مهدوی تلامری^۴

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

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

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

۴- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

چکیده:

سیستم رانش پمپجت از انواع سیستم‌های پیشران‌ش دریایی می‌باشد که نیروی تراست را بر اساس روش اختلاف مومنتوم ایجاد می‌کند. پمپجت در درجه اول برای وسایل نقلیه زیر آبی طراحی شده است. سیستم رانش پمپجت به دلیل پنهان‌کاری و عملکرد عالی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما به دلیل محرمانه بودن و پیچیدگی آن، جزئیات کمی منتشر شده است. رفتار این سیستم پیشران‌ش تا حدود زیادی مشابه پمپ‌های جریان محوری می‌باشد. اجزای اصلی سیستم رانش پمپجت شامل داکت، روتور، استاتور، هاب و یاس می‌باشند. روتور با تعداد تیغه‌های مشخص بر روی هاب نصب شده و استاتور نیز از سمت ریشه به هاب و از سمت نوک به سطحی داخلی داکت چسبیده است. پمپجت‌ها از نظر آرایش قرارگیری روتور و استاتور در داخل داکت و همچنین مکانیزم چرخش به چهار دسته طبقه‌بندی شده‌اند: پیش‌چرخش، پس‌چرخش، رینگ محرک و دوتایی ناهمسانگرد. نوع پیش‌چرخش، نويز و راندمان کمتری نسبت به نوع پس‌چرخش دارد و به نوعی از سیستم‌های پیشران‌ش فوق بی‌صدا محسوب می‌شود. با توجه به مزایای بیشمار استفاده از قوای محرکه هسته‌ای در زیردریایی‌ها و سایر وسایل نقلیه دریایی، پمپجت با توجه به مزایای آکوستیکی و همچنین محدودیت‌های پدیده مسمومیت با زنون و کاهش توان در راکتورهای هسته‌ای، کاندید مناسبی برای سیستم‌های پیشران دریایی با محرک هسته‌ای به نظر می‌رسد. در این پژوهش سعی بر این است که این نوع پیشران معرفی و مزایای آن بررسی شود.

واژه‌های کلیدی:

پمپجت، سیستم‌های پیشران‌ش، روتور، استاتور، شناور

Jet pump propulsion system

Ehsan Yari¹, Mohammad Hossein QaedSharaf², Vahid Aeeni³, Hadi Mahdavi Talarmi⁴

1- Ehsan Yari, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malek-e- Ashtar University of Technology, Isfahan

2- Mohammad Hussein Qaedsharaf, Ph.D. Student of Mechanical Engineering - Energy Conversion, Malek-e- Ashtar University of Technology, Isfahan

3- Vahid Aeeni, Senior Expert in Mechanical Engineering, Construction and Production, Technical and Vocational University, Tehran

4- Hadi Mahdavi Talaromi, Senior Expert in Aerospace Engineering, Malek-e- Ashtar University of Technology, Tehran

The pumpjet thrust system is one of the types of marine propulsion systems that creates the thrust force based on the momentum difference method. The pumpjet is primarily designed for underwater vehicles. The pumpjet propulsion system has been widely used due to its stealth and excellent performance, but due to its secrecy and complexity, few details have been published.

The behavior of this propulsion system is similar to axial flow pumps. The main components of jet pump thrust system include duct, rotor, stator, hub and boss. The rotor is installed on the hub with a specific number of blades and the stator is attached to the hub from the root side and to the inner surface of the duct from the tip side. pumpjet are classified into four categories based on the placement of the rotor and stator inside the duct as well as the rotation mechanism: pre-stator, post-stator, rim-driven and contra rotating. The pre-stator type has less noise and efficiency than the post-stator type and is considered as a type of ultra-silent propulsion system. Considering the numerous advantages of using nuclear propulsion in submarines and other marine vehicles, the pumpjet seems to be a suitable candidate for marine propulsion systems with nuclear propulsion, considering the acoustic advantages as well as the limitations of the phenomenon of xenon poisoning and power reduction in nuclear reactors. arrives. In this research, an attempt is made to introduce this type of engine and examine its advantages.

Keywords

pumpjet, propulsion systems, rotor, stator, float

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر تقاضا برای شناورهای با سرعت بالا در بخش‌های نظامی و تجاری دارای روند رو به رشدی بوده‌است. این موضوع سبب طراحی پیش برنده‌های دریایی با هندسه‌های پیچیده گردیده‌است که دارای راندمان بالاتر، ارتعاشات و نویز کمتر و قابلیت عملکرد مطمئن‌تر هستند. سیستم‌های رانش پادار، پروانه‌های نازل‌دار و سیستم‌های داکت دار نمونه‌هایی از طرح‌های موفق در این زمینه هستند. انتخاب سیستم رانش مناسب از اولویت‌های مهم فرآیند طراحی شناورها و زیرسطحی‌ها می‌باشد. سال‌ها پیش، این تفکر که می‌توان با استفاده از پمپ و ایجاد مومنتوم نیروی رانش تولید کرد؛ باعث شد اولین سیستم جت آب ساخته شود. با ورود پمپ‌های با تکنولوژی بالاتر و راندمان بهتر این سیستم توانست به‌عنوان رقیب جدی -البته در محدوده‌های خاص- برای سایر سیستم‌ها مطرح شود.

۲- سابقه تحقیقات و مطالعات انجام‌گرفته

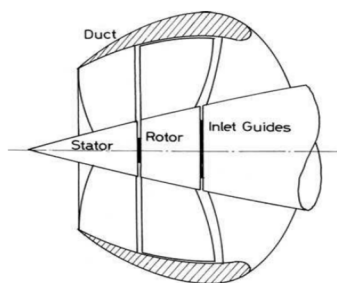
در سطح بین‌المللی دنگوی کین و همکاران [۱] در اکتبر ۲۰۲۱ تأثیر داکت و استاتور پیش‌چرخش را بر روی خصوصیات ناحیه دنباله پمپ‌جت بررسی نمودند. مجدداً وی و همکارانش [۲] در مارس ۲۰۲۱ عملکرد هیدرودینامیکی و ورטיسته دنباله دو نوع جت پمپ معمولی را مقایسه نمودند. شیاهویلو و همکاران [۳] در ژانویه ۲۰۲۱ پژوهشی در مورد انتشار نویز جت پمپ‌های فشارقوی در زیرآب انجام دادند. لین لو و همکاران [۴] در اوت ۲۰۲۰ به‌صورت عددی خصوصیات جریان یک جت پمپ را با جریان زاویه‌دار بررسی نمودند. چنگ‌چنگ کیو و همکاران [۵] در جون ۲۰۲۰ شبیه‌سازی عددی عملکرد هیدرودینامیکی و کاویتاسیون پیش‌رانه جت پمپ در فواصل مختلف نوک پره تا داکت را در جریان زاویه‌دار انجام دادند. هان لی و همکاران [۶] در می ۲۰۲۰ پژوهشی جهت تخمین گذر جریانی یک نوع جت پمپ دارای استاتور پیش‌چرخش و مقایسه بین مدل‌های RANS/LES بر ورטיسته ناحیه دنباله انجام دادند. دنگوی کین و همکاران [۷] در سپتامبر ۲۰۱۹ فناوری کاهش نویز در زیرآب با استفاده از داکت دندان‌اره‌ای را

برای جت پمپ معرفی نمودند. هان لی و همکاران [۸] در نوامبر ۲۰۱۹ تحلیل گذر جریانی سیال بر روی یک پیش‌ران جت پمپ انجام دادند. لین لو و همکاران [۹] در می ۲۰۱۸ بررسی عددی ویژگی‌های جریان فاصله خالی نوک پره تا داکت پیش‌ران جت پمپ را انجام دادند. جی گونگ و همکاران [۱۰] در اکتبر ۲۰۱۷ توزیع سرعت را در ورودی داکت پیش‌ران جت پمپ یک مدل کشتی خودران به روش PIV اندازه‌گیری کردند. در ایران، احسان یاری و همکاران [۱۱] در ۱۴۰۰ رفتار هیدرودینامیکی و پارامترهای سیالاتی میدان جریان حول سیستم رانش پمپ‌جت را به‌صورت عددی بررسی نمودند. نوروزمحمد نوری و همکاران [۱۲] در ۱۳۹۵ مزایا، معایب، چالش‌های طراحی و الگوریتم شبیه‌سازی عددی پمپ‌جت CRP را بررسی و الگوریتمی برای طراحی ارائه نمودند. امین طالع زاده شیرازی و همکاران [۱۳] در ۱۳۹۵ شبیه‌سازی عددی دنباله جریان در ناحیه و یک پشت بدنه و سیستم رانش را با نرم‌افزار تجاری موجود و مدل متداول توربولانسی دو معادله‌ای انجام دادند. مجدداً همین نویسندگان و همکاران [۱۴] در ۱۳۹۵ یک منحنی عملکرد از نمونه تحقیقاتی طراحی‌شده سیستم رانش پمپ‌جت به کمک شبیه‌سازی عددی استخراج نمودند. مهران مطلبی نژاد و همکاران [۱۵] در ۱۳۹۴ سیستم رانش پمپ‌جت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت‌بالا را مورد مطالعه قرار دادند.

۳- انواع سیستم پیش‌ران دریایی

تاکنون برای شناورها سیستم‌های رانش متعددی پیش‌بینی‌شده که هر یک در دوران خاصی بکار گرفته‌شده و پس از مدتی کنار گذاشته‌شده‌اند. رایج‌ترین نوع سیستم رانش همان پروانه می‌باشد که امروز نیز به‌صورت تکامل‌یافته‌ای استفاده می‌شود. ملاک‌های زیر در طراحی و استفاده از سیستم‌های مختلف رانش پروانه‌ای در نظر گرفته می‌شود:

- (۱) بازدهی بالاتر
- (۲) سهولت در ساخت و تعمیر و نگهداری
- (۳) امکان جانمایی در داخل شناور
- (۴) ایجاد حداقل ارتعاش و سروصدا



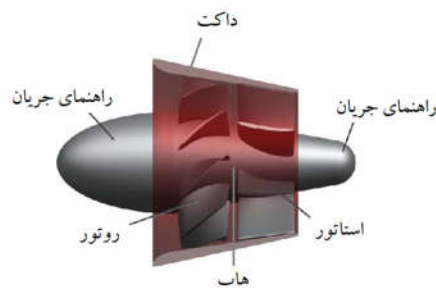
شکل ۲: آرایش ایده آل یک پمپجت [۱۶]

از شکل مشاهده می‌شود که سیستم پایه شامل یک مجرای ورودی است که به راحت‌ترین روش برای کشتی مربوطه به بدنه وارد می‌شود. از این مجرای ورودی آب سپس از روتور عبور می‌کند که ممکن است اشکال مختلفی داشته باشد. معمولاً این قسمت یک توربومشین جریان مختلط یا محوری است که شامل تعدادی تیغه از ۴ تا ۸ عدد است. مرحله بعدی عبور آب معمولاً عبور از یک حلقه استاتور است که وظیفه دوگانه صاف کردن جریان و همچنین به‌عنوان تکیه‌گاه بدنه هاب را دارد. حلقه استاتور احتمالاً از ۷ تا ۱۳ تیغه تشکیل شده است، اما باید توجه داشت که در همه طرح‌ها این‌گونه نیست. در برخی از طرح‌ها، نازل قابل هدایت است و در برخی دیگر از صفحات منحرف‌کننده برای کنترل جهت جریان و در نتیجه اعمال نیروهای فرمان به کشتی از طریق تغییر جهت حرکت جت آب خواهد بود.

۱-۴ مزایای استفاده از پمپجت:

- ۱) امکان رسیدن به سرعت‌های بالا پیش از شروع کاویتاسیون که ناشی از افزایش فشار استاتیک داخلی است
- ۲) چگالی بالای توان با توجه به حجم پیش برنده و محرک اصلی
- ۳) عدم وجود زائده‌های ایجادکننده نیروی درگ در جهت حرکت
- ۴) سروصدا و ارتعاش کم
- ۵) از بین رفتن خطر اضافه‌بار موتور
- ۶) تولید قدرت و سرعت مطلوب
- ۷) قابلیت کوپل شدن هرگونه موتور محرک بر روی این سیستم رانشی
- ۸) محافظت از هرگونه شکستگی و ضربه ایمپلر

سیستم‌های رانش پروانه‌ای انواع مختلف دارند که در بین آن‌ها می‌توان به پروانه‌های گام ثابت، پروانه‌های داکت دار، پروانه‌های غلاف دار و پروانه‌های معکوس گرد اشاره کرد.



شکل ۱: سیستم رانش پمپجت و اجزای مربوطه

۴- سیستم‌های پیشران داکت‌دار

مفهوم قوای محرکه پمپجت و واترجت به سال ۱۶۶۱ برمی‌گردد که توگود و هیز برای اولین بار این شکل از پیشرانه را پیشنهاد کردند. استفاده از آن در سال‌های گذشته عمدتاً محدود به کشتی‌های تفریحی با سرعت بالا و قایق‌های کاری بوده‌است که در آن مانور پذیری بالا موردنیاز است. تنها در سال‌های اخیر است که پمپجت برای کشتی‌های پرسرعت بزرگ موردتوجه قرار گرفته است و در نتیجه اندازه پیشران‌ها در چند سال اخیر به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. دلیل استفاده کمتر از پیشران پمپجت در مقایسه با پیشران پروانه پیچی این بود که آن‌ها عموماً پیشرانی ساده‌تر، سبک‌تر و کارآمدتر در نظر گرفته می‌شدند؛ با این حال، معرفی پمپ-جت‌های کارآمدتر و تقاضای تجاری برای کشتی‌های با سرعت بالاتر، دلایل اصلی رشد سریع آن‌ها است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است پمپجت دارای سه جزء اصلی است: یک داکت، یک مجموعه پمپ (شامل روتور و استاتور و هاب).

۹) امکان استفاده برای طیف وسیعی از شناورها و زیرسطحی‌ها

۱۰) کاهش احتمال وقوع کاویتاسیون

۲-۴ معایب سیستم پمپ‌جت:

- ۱) راندمان پایین در سرعت‌هایی کم
- ۲) تجهیزات نسبتاً زیاد سیستم که باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌گردد

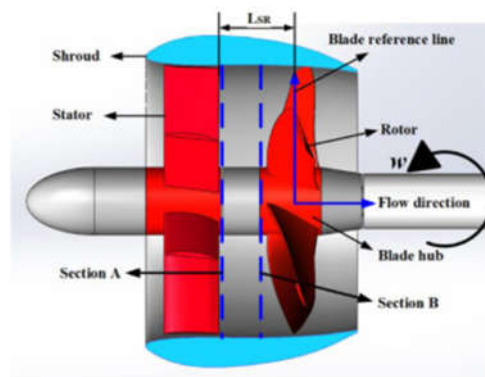
۵- انواع سیستم پیشران پمپ‌جت:

سیستم پیشران پمپ‌جت را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف از قبیل نحوه آرایش قرارگیری روتور و استاتور نسبت به هم و ... به ۴ دسته تقسیم نمود که در ادامه به توضیح آن پرداخته می‌شود.

۱-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت پیش‌چرخش:

در این نوع پمپ‌جت در قسمت ورودی داکت، استاتور قرار دارد و پس از آن بر روی هاب سیستم پیشران، روتور قرار گرفته‌است و به عبارتی استاتور قبل از روتور در راستای حرکت جریان قرار دارد.

در این حالت تعادل گشتاور تنها در یک نقطه عملکرد پمپ‌جت اتفاق می‌افتد. این نوع پمپ‌جت نسبت به سایر انواع سیستم‌های پمپ‌جت دارای نویز کمتری بوده و عملاً جزو سیستم‌های پیشران فوق بی‌صدا محسوب می‌شود.

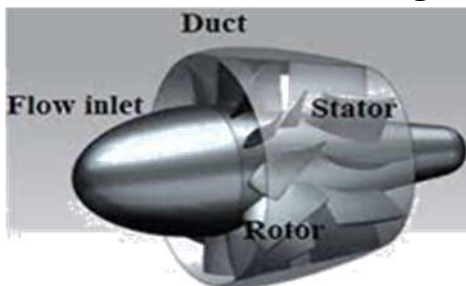


(a) Computational model

شکل ۳: شمای پمپ‌جت پیش‌چرخش

۲-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت پس‌چرخش:

در این نوع سیستم پیشران پمپ‌جت، استاتور پشت روتور قرار گرفته‌است و همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود استاتور نزدیک به قسمت خروجی داکت قرار دارد. در این نوع پمپ‌جت نیز تعادل گشتاور تنها در یک نقطه عملکردی پمپ‌جت اتفاق می‌افتد. این نوع از پمپ‌جت نسبت به سیستم پیش‌چرخش دارای راندمان بالاتری می‌باشد.



شکل ۴: شمای پمپ‌جت پس‌چرخش

۳-۵ سیستم پیشران پمپ‌جت بدون شفت یا رینگ محرک:

یکی دیگر از انواع جت پمپ که دارای یک رینگ بوده و یک موتور الکتریکی حلقه‌ای در داخل پوشش جت پمپ وجود دارد که روتور پره را در داخل حفره جت پمپ می‌چرخاند تا نیروی رانش ایجاد کند. بزرگ‌ترین مزیت آن حداقل انتشار نویز و نیاز به فضای کم است. از آنجایی که روتور مستقیماً توسط نیروهای الکترومغناطیسی هدایت می‌شود، به هیچ شفت و جعبه‌دنده‌ای نیاز نیست. آب‌بندی قطعات متحرک ضروری نیست و موتور و استاتور را می‌توان به صورت هرمتیک آب‌بندی کرد. از آنجایی که تیغه‌ها روی حلقه روتور نصب شده‌اند، هیچ فاصله خالی بین نوک پره و بدنه پمپ وجود ندارد. عدم وجود این فضای خالی به همراه عدم وجود صدای گیربکس، منابع برجسته نویز را حذف می‌کند. عیب این نوع جت پمپ کاهش راندمان به دلیل افزایش تلفات اصطکاکی در شکاف بین روتور و استاتور است.

(V_1) داده می‌شود، از آنجایی که نیرو برابر با نرخ تغییر مومنوم است، تراست تولیدشده توسط سیستم پیشران بدین صورت است:

$$T = \rho A_2 V_2 (V_2 - V_1) \quad (2)$$

و توان پیشران P_T بدین صورت خواهد بود:

$$P_T = TV_S = \dot{m} V_S (V_2 - V_1) \quad (3)$$

که V_S سرعت شناور است. اکنون برای به دست آوردن یک رابطه مفید برای توان مورد نیاز برای به حرکت درآوردن سیستم پیشران، لازم است به معادله انرژی عمومی مکانیک سیالات متوسل شویم و این را بین ورودی و خروجی پیشران اعمال کنیم. از این رو می‌توانیم برای سیستم بنویسیم:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H_P = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h + h_{loss} \quad (4)$$

که در آن H_P هد مرتبط با انرژی تأمین‌شده به سیستم (یعنی هد پمپ) است Δh اختلاف هد استاتیک بین ورودی و خروجی پمپ است.

یعنی h_{loss} ($\Delta h = h_1 + h_2$) تلفات مربوط به جریان از طریق سیستم و همچنین تلفات پمپ است.

در مورد تفاوت هد استاتیک بین ورودی و خروجی سیستم باید توجه داشت که این پارامتر در شرایط راه‌اندازی و دریاپیمایی متفاوت خواهد بود. با توجه به ترم تلفات، h_{loss} با تلفات اصطکاکی و ریزش گردابی مرتبط است که در اطراف خم‌های درون داکت، در مسیر توری‌های ورودی و موانع مختلف درون سیستم که ممکن است جریان را در طول عبور از واحد مختل کند، ایجاد می‌شود.

اکنون به معادله قبل برمی‌گردیم و برای اهداف عملی با فرض ثابت بودن p_2 بالای خط تراز آب معادله را می‌توان بدین صورت بازنویسی کرد:

$$H_P = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + h_2 + h_{loss} \quad (5)$$

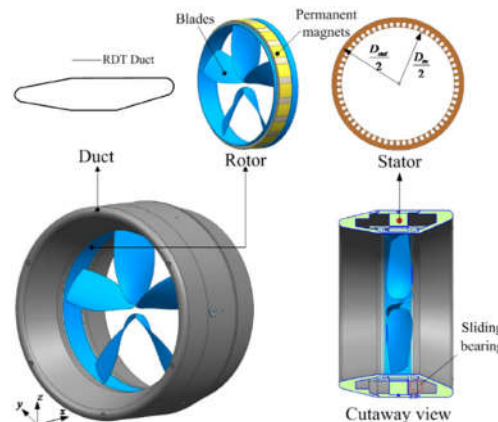
که

$$p_1 = p_2 + h_1 \rho g \quad (6)$$

توان انتقال‌یافته به آب توسط پمپ را می‌توان برحسب انرژی در واحد زمان به صورت $\dot{m} g H_P$ بیان کرد.

که از رابطه بالا منجر به این رابطه خواهد شد:

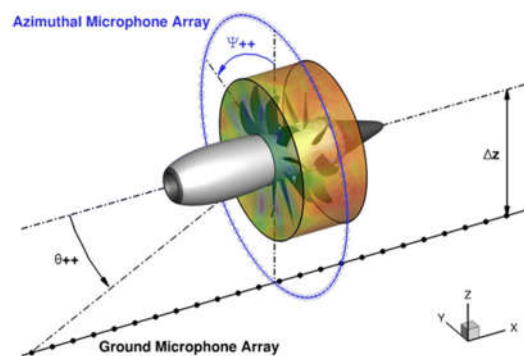
$$P_{pump} = \dot{m} \left[\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss}) \right] \quad (7)$$



شکل ۵: شمای پمپجت بدون شفت یا رینگ محرک

۴-۵ سیستم پیشران پمپجت دوتایی ناهمسانگرد:

یک نوع پمپجت که شامل ۲ وتور است؛ در جهات مختلف دوران می‌کنند و گشتاور یکدیگر را خنثی می‌نمایند. این نوع می‌تواند در نقاط عملکردی بسیاری گشتاور عکس‌العملی وارد شونده به بدنه را خنثی نماید، زیرا به ازای هر سرعت دورانی پروانه عقب یا جلو می‌توان سرعت دورانی پروانه دیگر را به نحوی تنظیم نمود که گشتاور عکس‌العملی را خنثی نماید.



شکل ۶: شمای پمپجت دوتایی ناهمسانگرد

۶- اصول اساسی پیشران:

فرض کنید آب با سرعت V_1 وارد سیستم شده و به وسیله نازلی به مساحت A_2 با سرعت V_2 از آن خارج می‌شود. دبی جرمی آب از طریق جت آب با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = \rho A_2 V_2 \quad (1)$$

که ρ چگالی آب است. از این رو، افزایش نرخ تغییر مومنوم آب عبوری از پمپجت توسط $\rho A_2 V_2 (V_2 -$

$$h_D = k_D \frac{(v_s + \Delta v)^2}{2g} \quad (13)$$

که در آن $(\Delta V = V_2 + V_1)$. ون والری پیشنهاد می‌دهد که مقدار k_D در محدوده $0.04 < k_D < 0.10$ انتخاب شود.

ترم افت هد پمپ h_P در معادله افت هد کل به پیکربندی پمپ و تلفات مربوط به آن مرتبط است. این تلفات هد را می‌توان برحسب هد پمپ H و بازده پمپ η_P بیان کرد:

$$h_P = H \left(\frac{1 - \eta_P}{\eta_P} \right) \quad (14)$$

و برای پمپ جریان محوری یا مختلط مدرن با طراحی خوب، مقدار η_P باید حدود ۰/۹۰ باشد.

بر اساس قیاس با ملخ‌ها، راندمان پمپ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta_P = \frac{\phi \psi}{2\pi K_Q} \quad (15)$$

که در آن ϕ و ψ ضرایب انتقال انرژی جریان بدین صورت تعریف شده‌اند:

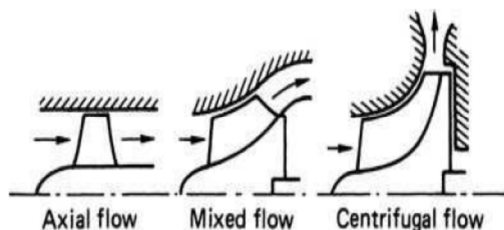
$$\psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (16)$$

$$\phi = \frac{Q}{ND^3} \quad (17)$$

و K_Q ضریب گشتاور نرمال پروانه است.

۷- انواع پروانه روتور:

هنگام طراحی یک جت برای انجام یک وظیفه معین، یکی از اولین مشکلاتی که طراح با آن مواجه می‌شود تولید مناسب‌ترین نوع پمپ برای کار موردنظر است. انتخاب پمپ‌ها بین جریان گریز از مرکز، جریان مختلط، جریان محوری یا القایی خواهد بود. شکل ۷ سه نوع اول توربوماشین را دسته‌بندی می‌کند درحالی‌که شکل ۸ نوع القایی را نشان می‌دهد.



شکل ۷: انواع پروانه [۱۶]

بنابراین راندمان حالت آب آزاد یک واحد جت را می‌توان به کمک معادلات بالا به صورت نسبت توان پیشرانیش به توان تحویلی پمپ به شرح زیر به دست آورد:

$$\eta_O = \frac{V_S(V_2 - V_1)}{\frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + g(h_2 + h_{loss})} \quad (8)$$

ترم اتلاف h_{loss} در معادله بالا مجموع دو اتلاف مستقل است. آن‌هایی که به عنوان افت هد داخلی h_D تعریف می‌شوند و آن‌هایی که مربوط به افت هد پمپ h_P هستند. بنابراین h_{loss} را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$h_{loss} = h_D + h_P \quad (9)$$

البته تلفات داخلی در درجه اول به پیکربندی پمپ جت بستگی دارد و شامل تلفات ورودی h_{DI} ، تلفات دیفیوزر h_{DD} و تلفات اصطکاک پوسته‌ای h_{DSf} است. بنابراین:

$$h_D = h_{DI} + h_{DD} + h_{DSf} \quad (10)$$

تلفات ورودی به خودی خود مجموع تلفات ناشی از محافظ ورودی، پره‌های راهنما و خم‌های مختلف است. همه این تلفات اساساً تابعی از سرعت ورودی V_1 هستند و در نتیجه می‌توان آن‌ها را به شکل زیر بیان کرد:

$$h_{DI} = k \frac{v_1^2}{2g} \quad (11)$$

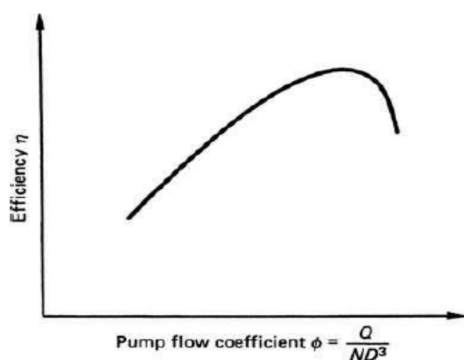
ضریب k ، مجموع دو عامل دیگر k_1 و k_2 است که نشان‌دهنده تلفات محافظ ورودی و پره‌های هدایت‌کننده و تلفات ناشی از خمیدگی‌ها به ترتیب هستند. مقادیر معمول برای k_1 و k_2 به ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۱۵ است.

تلفات هد دیفیوزر را می‌توان از روش‌های هیدرولیکی معمولی تخمین زد، که از آن عبارت h_{DD} را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$h_{DD} = (1 - \eta_D)(1 - \epsilon^2) \frac{v_2^2}{2g} \quad (12)$$

که در آن η_D بازده دیفیوزر مرتبه ۹۰ درصد در شرایط عادی و ϵ نسبت ورودی و خروجی دیفیوزر است. عبارت نهایی در معادله افت هد داخلی، h_{DSf} است که تلفات اصطکاک پوسته‌ای را تعریف می‌کند و می‌توان از محاسبه سطوح خیس‌شده ورودی، داکت، دیفیوزرها، پایه‌های نگه‌دارنده و پره‌ها و نازل در ارتباط با ضرایب اصطکاک مربوطه تخمین زده شود. اگر مجموع تلفات داخلی h_D همان‌طور که در رابطه افت هد داخلی تعریف شده است، برحسب یک ضریب تلفات منفرد به صورت زیر نمایش داده شود:

در نتیجه، شرط حداکثر بازدهی جایگزین شرط تشابه هندسی می‌شود. علاوه بر این، هر یک از انواع مختلف توربوماشین نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ بازدهی بهینه خود را در یک باند نسبتاً باریک از سرعت خاص خواهند داشت. به طور کلی اندازه پروانه، برای یک وظیفه معین توسط جریان و هد مورد نیاز تعریف می‌شود و با سرعت ویژه تغییر می‌کند. بنابراین هر چه سرعت ویژه بالاتر باشد احتمال بیشتری وجود دارد که یک ماشین جریان محوری انتخاب شود که از نظر فیزیکی کوچک‌تر از همتای گریز از مرکز خود باشد. در نتیجه، از آنجایی که سرعت ویژه بالا مستلزم یک ماشین کوچک‌تر است، مطلوب است که بالاترین سرعت خاص، مطابق با راندمان خوب، برای یک کاربرد خاص انتخاب شود.



شکل ۹: نمودار مشخصه راندمان یک نمونه پمپ [۱۶]

از ویژگی‌های پمپ‌های گریز از مرکز جریان کم و فشار بالا است؛ در حالی که برای توربوماشین‌های جریان محوری عکس این مطلب صادق است. جدول ۱ محدوده‌های کلی را نشان می‌دهد که انواع مختلف پمپ مناسب برای طراحی پمپ انتظار می‌رود در آن کار کنند. در حالی که نوع گریز از مرکز و پمپ‌های جریان محوری انواع اصلی توربوماشین‌هایی بودند که برای جت‌های آب استفاده می‌شوند. نوع جریان مختلط، که مشتقی از نوع گریز از مرکز است به سرعت خود را تثبیت نموده است. این امر به این دلیل بود که نوع مختلط قطر کمتری نسبت به پمپ گریز از مرکز داشته و هد پمپ راحت‌تر به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. ماشین‌های نشان داده شده در شکل ۸ به خوبی شناخته شده‌اند و پیش‌زمینه نظری آن‌ها به خوبی در کتاب‌های مرجع آمده است. نوع القایی، شکل ۹، در ابتدا در پاسخ به نیاز به پمپ‌های سوخت مایع بزرگ برای پیشران موشک ساخته شد. از شکل مشاهده می‌شود که نوع القایی شامل چهارپره کامل در مرحله اولیه و چهارپره



شکل ۸: نوع القایی [۱۶]

برای یک توربوماشین هیدرولیک معین، با فرض اینکه هر دو اثر رینولدز و کاویتاسیون ناچیز هستند، یک رابطه منحصر به فرد بین بازدهی سیستم و ضریب جریان وجود دارد که مشابه منحنی‌های بازدهی پروانه است. برای یک واحد پمپ، منحنی راندمان در مقابل ضریب جریان مشابه شکل ۹ خواهد بود. علاوه بر این، سایر ضرایب عملکردی را می‌توان از تحلیل ابعادی تعیین کرد و در این زمینه ضریب انتقال انرژی ψ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب جریان، راندمان تمایل به افزایش دارد و سپس به حداکثر مقدار می‌رسد که پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. نقطه بازدهی بهینه را می‌توان برای شناسایی یک مقدار منحصر به فرد ضریب جریان استفاده کرد.

علاوه بر این مقدار متناظر ψ را می‌توان به طور منحصر به فرد تعیین کرد. در فناوری پمپ، معمول است که سرعت ویژه N_s ماشین تعریف شود.

از مقادیر ϕ و ψ که مربوط به نقطه حداکثر راندمان است:

$$N_s = \frac{\phi^{1/2}}{\psi^{3/4}} \quad (18)$$

که کاهش می‌یابد به

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad (19)$$

یا بیشتر به شکل ابعادی آن:

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (20)$$

به دلیل وابستگی سرعت ویژه به نقطه حداکثر بازدهی در منحنی مشخصه پمپ، این پارامتر در انتخاب نوع توربوماشین مورد نیاز برای کار داده شده از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. برای تغییر نقطه حداکثر بازده نسبت به ضریب جریان، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است؛ نیاز است که هندسه پمپ تغییر کند؛

کوچک دیگر است که اجازه می‌دهد مرحله مکش تا حدی کوتاه شود. به عبارت دیگر این تیغه‌های بزرگ با یک ردیف تیغه‌های کوتاه دنبال می‌شوند که حدود ۶۰ درصد افزایش هد درون توربوماشین را فراهم می‌کنند.

جدول ۱: محدوده سرعت ویژه انواع مختلف پمپ [۱۶]

Pump type	Approximate N_s (rad)
Centrifugal pump	Below 1.2
Mixed flow pump	1.2-3.0
Axial flow pump	3.0-7.0
Inducers	Above 7.0

۸- طراحی اجزای جت :

عناوین در مورد طراحی و تجزیه و تحلیل سیستم پیشران جت گسترده است. این بخش به جنبه‌های طراحی عملی اجزای مختلف می‌پردازد. از لحاظ رهیافت کلی طراحی برای مسئله، پارامتر اساسی نسبت سرعت ورودی، IVR است. این پارامتر به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود که در آن V_1 سرعت ورودی آب و V_s سرعت وسیله دریایی است:

$$IVR = \frac{v_1}{v_s} \quad (21)$$

این پارامتر در واقع دبی جریان جت را همراه با نسبت سرعت، هد پمپ و راندمان کلی و علاوه بر این شروع کاویتاسیون در لبه ورودی را کنترل می‌کند. روش اصلی طراحی این است که محدوده‌ای از مقادیر IVR را در سرعت طراحی وسیله دریایی در نظر بگیریم که از آن می‌توان طراحی پمپ، توان تحویلی و راندمان را محاسبه کرد. سپس برای هر یک از این طرح‌های پمپ می‌توان عملکرد خارج از طراحی را در نظر گرفت و دوباره پارامترهای توان‌های تحویلی، راندمان و شرایط کاویتاسیون را محاسبه نمود. از نتایج ماتریس حاصله جدول ۲ طرح می‌تواند مناسب‌ترین ترکیب نتایج را متناسب با شرایط وسیله دریایی، عمدتاً سرعت کروز و سرعت هاب انتخاب کند.

جدول ۲: ماتریس طراحی [۱۶]

IVR design/condition	1	2	3	4	5
Off-design condition 1	*	*	*	*	*
Off-design condition 2	*	*	*	*	*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Off-design condition N	*	*	*	*	*

۹- طراحی داکت:

پروفیل داکت باید به گونه‌ای طراحی شود که مکش یکنواخت آب را در محدوده عملکرد کشتی فراهم کند و بنابراین از جدایش قابل توجه جریان یا کاویتاسیون در ورودی داکت جلوگیری شود. در برخی کاربردهای جت، معمولاً در کاربردهای هیدرو فویل که جریان آب باید از پایه‌های فویل عبور کند، لازم است که پره‌های راهنما به داخل تونل وارد شوند تا به جریان آب در اطراف خم‌های تونل کمک کنند، استحکام این پره‌های راهنما نیاز به توجه دقیق دارد و اگر آن‌ها به عنوان مثال، یک جزء جدایی‌ناپذیر از خم را تشکیل می‌دهند، باید ریشه آن‌ها به میزان کافی fillet بخورد. همچنین لازم است که این پره‌های هادی با جریان هم‌راستا شوند و لبه‌های پره‌ها باید صاف باشد تا باعث جدایش یا ایجاد کاویتاسیون نشود. پره‌های نصب‌شده باید برای شکست یا عیوب تهدیدکننده در طول سرویس بازمینی شوند که می‌تواند مستقیماً با بازرسی بصری یا غیرمستقیم از طریق استفاده از بوروسکوپ در داخل باشد.

۱۰- طراحی ایمپلر :

طرح هیدرودینامیکی پروانه پمپ از مشی کلی جدول ۲ پیروی می‌کند، مشخصات دقیق و شکل پروانه به صورتی آتی تعریف می‌شود. محاسبه دقیق اجزای پروانه از نظر استحکام و یکپارچگی آن‌ها باید بر اساس حداکثر توان نامی ماشین باشد. بنابراین، بارهای متوسط روی تیغه باید بر این اساس برآورد شود، و از آنجا می‌توان تحلیل تنش اجزای مختلف را انجام داد. یک روش برای برآیند استفاده از تطبیق روش تیر یک سر گیردار است. با این حال، باید به خاطر داشت که تیغه‌های پروانه، بخصوص برای پمپ‌های جریان مختلط، پمپ‌های محوری

و القاکننده‌ها، به‌طور کلی نسبت ابعاد پایینی دارند، و بنابراین تجزیه و تحلیل تیرهای یک‌سر گیردار در مقابله با این وضعیت مشکلی ذاتی دارد. بنابراین باید در تحلیل خستگی نهایی تیغه‌ها و در تعیین ضریب اطمینان، برای این مورد توجه لازم صورت گیرد، با این حال، با انجام محاسبات المان محدود بر روی کلاس‌های خاصی از تیغه‌ها می‌توان میزان خطا در نتایج تیر یک سر گیردار را به دست آورد. لذا با توجه به سهولت نسبی محاسبات اجزای محدود، این روش رضایت‌بخش‌تری برای محاسبه توزیع تنش در تیغه‌ها و هاب است و در صورت امکان باید از آن استفاده کرد.

کدهای RANS دینامیک سیالات محاسباتی قادر به تخمین میدان سرعت جریان در مسیر پروانه هستند، با این حال، در غیاب داده‌های میدان ویک، برآورد واقعی تنش‌های نوسانی در عمل دشوار است. با این وجود یک تخمین واقع‌بینانه مورد نیاز است و باید بر اساس در نظر گرفتن موانع بالادست و تأثیر آن‌ها بر جریان به پروانه باشد. پس از تکمیل این تخمین، می‌توان آن را در ارتباط با تنش متوسط و برآورد تنش پسماند برای ارزیابی خستگی طرح با استفاده از روش‌های سودربرگ یا اصلاح‌شده گودمن استفاده کرد.

تیغه‌های پروانه باید دارای فیلتهای کافی در ریشه باشد. چنین فیلتهایی باید با دقت طراحی شوند تا درجه کاهش تنش مورد نیاز را فراهم کنند. در این خصوص، طرح فیلت بیضوی یا مرکب ترجیح داده می‌شود. اگرچه فیلت با یک شعاع کفایت می‌کند؛ مشروط بر اینکه شعاع آن بزرگ‌تر از ضخامت تیغه باشد؛ اما به‌اندازه طرح مرکب مؤثر نخواهد بود. در برخی طراحی‌ها تیغه‌ها روی هاب پمپ پیچ می‌شوند؛ آنگاه توجه زیادی به جزییات آرایش پیچ و تنش‌های حاصله در صفحه و بدنه هاب مورد نیاز است، چون محل این اتصالات یک منبع بالقوه خرابی است. طراحی مقطع تیغه پروانه نیز توجه بالایی را می‌طلبد. پروانه‌های پمپ در مقایسه با اکثر پروانه‌ها با سرعت چرخشی بالاتر کار می‌کنند. در نتیجه، درحالی‌که طراحی کلی آن‌ها مبتنی بر کاویتاسیون قابل قبول و کنترل اثرات مضر آن است. عدم توجه به جزییات می‌تواند این مفهوم کلی را به‌طور کامل از بین ببرد. در نتیجه در همه پمپ‌ها به‌جز سانتریفیوژ، تیغه‌ها به فرم‌های آیرودینامیک برای کمک به کنترل خواص

کاویتاسیون پمپ نیاز است. با توجه به هد مورد نیاز برای توسعه پمپ، تیغه می‌تواند از نوع کمبردار یا بدون کمبر باشد. علاوه بر این، باید کنترل کافی بر روی ساخت تیغه اعمال شود تا اطمینان حاصل شود که دقت ساخت پروفیل‌های تیغه برای عملکرد کاویتاسیون مناسب آن‌ها کافی است. به علت خواص هیدرودینامیکی، بایستی فضای خالی تیغه‌ها در حداقل مقدار در نظر گرفته شود تا از تلفات بی‌مورد نیز جلوگیری شود. با این حال، این مقدار باید با مقدار فاصله کافی برای پاسخگویی به هرگونه رفتار ارتعاشی گذرای مکانیسم چرخشی، حرکت محوری شفت یا انبساط حرارتی قسمت‌های مختلف سیستم انتقال قدرت تصحیح شود. به‌منظور محافظت در برابر شکست تیغه توسط ارتعاش، فرکانس طبیعی تیغه باید با ابزار مناسب محاسبه شود. سپس نتایج این محاسبه باید در خارج از محدوده عملیاتی اولیه واحد پمپ تطبیق داده شود. در انجام این محاسبه، به‌جای محاسبه صرفاً بر اساس قرار گرفتن تیغه‌ها در هوا، باید برای تأثیرات آب بر پره‌ها مقدار مناسبی در نظر گرفته شود. از آنجایی‌که پروانه‌های پمپ با سرعت بالا کار می‌کنند به‌وضوح نیاز به بالانس آن‌ها وجود دارد. در بسیاری از موارد، که قسمت دوار کوچک است؛ کافی است عملیات بالانس را به یک روش استاتیکی که به یک استاندارد مناسب (به‌طور معمول استاندارد ISO) محدود کنیم. با این حال، اگر احساس شود که قسمت چرخان به میزان زیادی «خارج از بالانس» است بخصوص از نظر سیستم شفتینگ، آنگاه باید بالانس دینامیکی اجرا شود. به دلیل ماهیت پروانه پمپ و حساسیت ذاتی آن به آسیب، نیاز است تمهیداتی برای بازرسی این قطعه در حین سرویس، ترجیحاً بدون دمونتاژ کردن کل واحد اندیشیده شود. در مورد پروانه، به‌وضوح ترجیح داده می‌شود که بازرسی بصری باشد، با این حال، اگر این به هر دلیلی مقدور نبود، بازرسی با بورتوسکوپ کافی خواهد بود، اما به‌اندازه قابلیت بازرسی بصری مستقیم رضایت‌بخش نخواهد بود.

۱۱- طراحی تیغه استاتور:

همه واحدهای جت با تیغه استاتور طراحی نشده‌اند. با این وجود، در طراحی که استاتور وجود دارد طراحی باید هم شرایط حداکثر تولید توان مداوم و هم مانورهای توقف

را در نظر بگیرد؛ زیرا استاتور فشار وارد به خود را به مجموعه پیشران وارد می کنند. اثرات مانورهای فرمان عموماً شرایط سخت تری نسبت به مانورهای توقف ایجاد می کند.

همان مواردی که در مورد تیغه پروانه در مورد شکل مقطع، بارگذاری و استحکام تیغه مطرح شد؛ به طور متشابه برای استاتور اعمال می شود. اما در مورد تیغه های استاتور، یک فیلت ریشه باید در هر دو انتهای تیغه اعمال شود و اثرات نیروهای واکنشی بر روی مقاومت داکت در تعامل تیغه-داکت باید در نظر گرفته شود. علاوه بر این، فرکانس طبیعی تیغه های استاتور باید محاسبه شود که باید خارج از محدوده فرکانس های پیش بینی شده پره های روتور و جریان باشد.

۱۲- ضرایب بی بعد سیستم پیشران پمپ جت:

مشخصات عملکرد سیستم پیشران پمپ جت را می توان مشابه با پروانه معمولی به صورت ضرایب بی بعد طبق روابط ذیل تعریف نمود که به ترتیب عبارتند از ضریب پیشروی، ضریب گشتاور و تراست. به دلیل آن که در این سیستم پیشران استاتور نیز علاوه بر روتور تراست تولید می کند بایستی در تعیین تراست کل سیستم رانش این مطلب در نظر گرفته شود. همچنین داکت اطراف روتور و استاتور مقداری از تراست تولیدی را مصرف می نماید به همین دلیل تراست کل سیستم پیشران در روابط زیر تعریف شده است. همچنین در تعریف راندمان سیستم پیشران، گشتاور روتور مبنای محاسبات قرار گرفته است. به منظور ارزیابی بی بعد تراست و یا درگ وارد بر کل بدنه پارامتر تراست باقی مانده نیز تعریف شده است. در روابط زیر، n سرعت دورانی روتور، V سرعت پیشروی بدنه و D قطر روتور می باشد.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (22) \quad \text{ضریب تراست:}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (23) \quad \text{ضریب گشتاور:}$$

برای پیشران های داکت دار:

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (24) \quad \text{ضریب تراست داکت:}$$

$$K_{TP} = \frac{T_P}{\rho n^2 D^4} \quad (25) \quad \text{ضریب تراست پیشران:}$$

ضریب تراست کل برای یک پیشران داکت دار:

$$K_{TT} = K_{TP} + K_{TD} \quad (26)$$

ضریب پیشروی:

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (27)$$

۱۳- جزییات عملکرد:

به طور کلی پمپ جت در سرعت های پایین راندمان کمی دارد که به نوعی باید آن را یک نقیصه بزرگ برای آن برشمرد. یک پدیده هیدرودینامیکی خاص به نام "جدایش جریان" را می توان به عنوان علت اصلی کاهش بازده پمپ جت در سرعت های بسیار پایین شناسایی کرد. به زبان ساده، داکت پیرامونی پمپ جت یک مانع اضافی ایجاد می کند که آب هنگام حرکت از پیشران باید از آن عبور کند. در سرعت های آب بسیار کم، این مانع و مقاومت اضافی برای متوقف کردن مقداری از جریان در حال حرکت از طریق جت کافی است و گرداب های ناپایداری ایجاد می کند که انرژی را از سیستم کاهش می دهد، اما نیروی رانش ایجاد نمی کند و در سرعت های بسیار کم جریان، کارایی را به صفر می رساند.

طراحی پمپ جت برای مقاصد نظامی، یعنی کاهش نشانه های صوتی و آکوستیکی، به طور مؤثری استفاده از داکت را الزام می کند. عمل کند کردن آب لزوماً معادل عمل افزایش فشار آن است. این فشار بالا در نقطه ای است که تیغه ها کار خود را روی آب انجام می دهند که تیغه ها را قادر می سازد از کاویتاسیون (انبساط سریع و فروپاشی حفره ها یا حباب های کوچک در آب) که منبع بسیار بزرگی برای ایجاد صدا در زیر آب است، اجتناب شود. حفظ این مزیت مستلزم طراحی صحیح داکتی است که سرعت آب را به میزان مطلوب کاهش می دهد. عمل کاهش سرعت آب زمانی که به کندی پیش می رود باعث توقف جریان می شود و هنگامی رخ می دهد که جدایش جریان اتفاق می افتد.

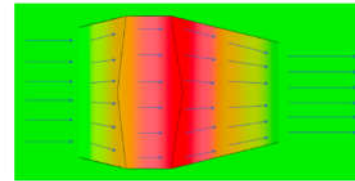
ایجاد و جهت از بین بردن این ناپایداری‌ها تلف شود. به‌طور کلی می‌توان پمپ‌جت‌ها را از نظر داشتن مزایای آکوستیکی نسبت به سایر انواع پیشران‌ها برتر دانست.

۱۴- تفاوت بین نیروی محرکه هسته‌ای و متعارف:

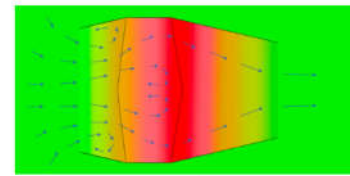
قدرت و انرژی زیردریایی‌های هسته‌ای به دلیل ابزار تولید نیروی خود به‌طور قابل توجهی با زیردریایی‌های معمولی متفاوت هستند. به دلیل چگالی انرژی بسیار بالا در اورانیوم یا پلوتونیوم غنی شده، راکتورهای موجود در زیردریایی‌های هسته‌ای مدار فراوانی انرژی تولید می‌کنند. طبق گزارش‌ها، اکثر راکتورهای زیردریایی می‌توانند بین ۲۵ تا ۵۰ مگاوات (MW) نیرو تولید کنند، اگرچه زیردریایی‌های روسی صدها مگاوات توان در دسترس دارند.

در مقابل، موتور اصلی زیردریایی کلاس کالینز در کمتر از ۶ مگاوات رتبه‌بندی می‌شود و طرح‌های زیردریایی آینده فقط کمی بیشتر به نظر می‌رسد. منصفانه است که بگوییم از نظر حداکثر توان خروجی، زیردریایی‌های هسته‌ای می‌توانند چیزی حدود ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از زیردریایی‌های دیزلی-الکتریکی - حتی در اوج توان خود- توان تولید کنند. با این حال، تفاوت بین اوج قدرت زیردریایی‌ها به‌طور قابل توجهی نشان می‌دهد که طراحی‌ها چقدر متفاوت هستند، زیرا تفاوت در مقدار کل انرژی ذخیره شده و در دسترس برای استفاده در یک سفر دریایی یا غواصی بسیار بیشتر است.

یک زیردریایی هسته‌ای ممکن است به‌طور گسترده‌ای عملاً برای همه مقاصد در یک سفر مشخص نامحدود به معنای واقعی کلمه میلیون‌ها برابر انرژی بیشتری در اختیار داشته باشد. در نتیجه، هنگامی که یک زیردریایی هسته‌ای ممکن است به‌طور منظم ترانزیت‌ها را با حداکثر توان خود یا نزدیک به آن انجام دهد، یک زیردریایی برقی دیزلی احتمالاً با کمتر از نیمی از سرعت متوسط در کل مسیر حرکت می‌کند (و کمتر از یک‌چهارم انرژی مشابه با زیردریایی هسته‌ای را مصرف می‌کند) و هنگام گشت زنی ممکن است با یک‌دهم حداکثر سرعت کار کند و شاید فقط ۱٪ از همان قدرت را در پیشران مصرف کند.



(a)



(b)

شکل ۱۰: (a) در سرعت‌های بالا، ورودی یک پمپ‌جت جریان آب را کند می‌کند و فشار آن را افزایش می‌دهد و متعاقباً از طریق نازل انقباض شتاب می‌گیرد تا یک جت کارآمد تشکیل دهد (b) در سرعت‌های پایین، گردان فشار ایجادشده توسط داکت باعث می‌شود مقداری از جریان آب متوقف و معکوس شود. این «جدایش جریان» انرژی آب چرخان را در دایره‌ها هدر می‌دهد و کارایی سیستم را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

جدایش جریان پیامدهای آکوستیکی نیز دارد؛ گرداب‌هایی که در اثر جدایش جریان ایجاد می‌شوند معمولاً ناپایدار هستند و به‌طور دوره‌ای به جریان اصلی می‌ریزند که منجر به نوسانات فشار در داخل داکت می‌شود و انواع شدیدتر و ناپایدارتر از توربولانس ناپایدار در مقیاس بزرگ با وارد شدن این گرداب‌ها به پره‌های روتور رخ می‌دهد. این اثرات احتمالاً باعث ایجاد علائم آکوستیکی می‌شود که با کاهش سرعت زیردریایی فرکانس آن‌ها کمتر می‌شود. این برخلاف مراحل اولیه کاویتاسیون است، که در زمانی که اندازه حباب‌ها کوچک است، فرکانس بالایی دارد و با افزایش سرعت و گسترش حباب‌ها به فرکانس‌های پایین‌تر می‌رود. در سرعت‌های بالاتر نیز به دلایلی که قبلاً ذکر شد جدایش جریان کاهش‌یافته و مزیت آکوستیکی بیشتر می‌شود. فرکانس‌های پایین‌تر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند، زیرا تمایل به انتشار بیشتر دارند و به‌طور مؤثری توسط داکت محافظت می‌شوند. این احتمال وجود دارد که در غیاب کاویتاسیون، سروصدای ایجادشده در پیشران توسط جدایش جریان به اندازه کافی بلند نباشد که نگرانی تاکتیکی قابل توجهی داشته باشد؛ جدایش جریان مستلزم آن است که دو یا سه برابر بیشتر انرژی توسط پمپ‌جت

در چنین شرایطی، مقدار نیرویی که برای روشنایی، پاک‌سازی CO₂، شستشو، پخت‌وپز، گرمایش و همچنین وسایل الکترونیکی که سیستم‌های جنگی را به حرکت درمی‌آورند (بار هتل) ممکن است قابل توجه باشد و حتی به اندازه توان موردنیاز پیش‌رانش یا بزرگ‌تر باشند. در نتیجه، تفاوت بین توان خروجی یک زیردریایی معمولی و یک زیردریایی هسته‌ای که ممکن است به طور منظم در آن کار کند، می‌تواند بسیار بیشتر از حداکثر مقدار انرژی باشد که آن‌ها می‌توانند به سیستم‌های پیش‌ران خود اختصاص دهند. این موضوع عواقب قابل توجهی برای طراحی تمام سیستم‌های زیردریایی از جمله سیستم پیش‌ران دارد.

نیروی مقاوم درگ مستقیماً انرژی موردنیاز برای طی کردن یک مسافت معین را تعیین می‌کند. فیزیک مربوط به زیردریایی‌ها مستلزم آن است که درگ با مجذور سرعت افزایش یابد و توان موردنیاز یک کشتی برای رسیدن به مقیاس سرعت معین با مکعب سرعت افزایش می‌یابد. در نتیجه، انرژی موردنیاز برای حرکت یک کشتی در یک فاصله معین می‌تواند به شدت در سرعت‌های مختلف متفاوت باشد.

این بدان معناست که اکثر کشتی‌ها می‌توانند با حرکت بسیار آهسته، تقریباً بدون توجه به جزییات نحوه طراحی و سیستم‌های محرکه‌ای که استفاده می‌کنند، مسافت بسیار بیشتری بپیمایند. همچنین به این معنی است که تقریباً تمام توجه طراحی سیستم پیش‌ران بر «سرعت طراحی» متمرکز است، که عموماً بسیار نزدیک به حداکثر سرعت است، زیرا در سرعت بسیار پایین، نیروی رانش بسیار کمی (بنابراین سوخت کمتری) موردنیاز است و مقدار بازده چندان نگران‌کننده نیست. با این حال، برای زیردریایی‌های معمولی، وضعیت بسیار متفاوت است. در حال حاضر از سرعت‌های بسیار پایین (۸ تا ۱۰ نات) برای حمل‌ونقل استفاده می‌کنند تا مسافتی را که می‌توانند از انرژی ذخیره‌شده خود دریافت کنند به حداکثر برسانند. حتی بیشتر حمل‌ونقل‌های تجاری، معمولاً بسیار سریع‌تر انجام می‌شود (۱۶-۲۴ نات). هنگامی که یک زیردریایی در زیر سطح پیمایش و غواصی می‌کند، به باتری‌های خود متکی است، که ممکن است بتواند کمتر از ۱٪ از انرژی ذخیره‌شده در سوخت دیزل خود را در باتری‌ها ذخیره کند و در نتیجه باید دوباره سرعت خود را کاهش دهد (۴)

نات) تا قبل از بازگشت به سطح دریا و شارژ مجدد بتواند مسافت معنی‌داری را بپیماید. در حالی که سرعت‌های بسیار بالاتر حتی در هنگام غواصی تا ۲۰ نات امکان‌پذیر است، این تأثیر چشمگیری بر قدرت موردنیاز دارد که نمی‌توان آن را برای دوره‌های زمانی زیادی حفظ کرد و در نتیجه فقط در مواقع اضطراری یا بسیار خاص می‌توان سرعت را بالا برد. از آنجایی که یک زیردریایی معمولی برای به دست آوردن برد غواصی و استقامت خوب باید سرعت خود را تا مقدار کمی کاهش دهد؛ کارایی پیش‌ران اکنون اهمیت بسیار زیادی پیدا می‌کند، زیرا راندمان ضعیف در اینجا تأثیر قابل توجهی بر روی مدت زمان بازگشت آن‌ها به سطح جهت شارژ مجدد خواهد داشت. در مقابل زیردریایی‌های هسته‌ای ذخایر انرژی نامحدودی دارند و برای استفاده از آن نیازی به هوا و اکسیژن ندارند و در نتیجه این نگرانی‌ها را ندارند. همچنین ممکن است در نتیجه بتوانند زمان بیشتری از غواصی خود را با سرعت‌های بسیار بالاتر سپری کنند.

۱۵- مسمومیت با زنون و محدودیت کاهش توان در زیردریایی‌های هسته‌ای:

شاید مهم‌ترین مورد برای طراحی توان زیردریایی‌های هسته‌ای، پدیده‌ای به نام مسمومیت زنون است که کمتر مورد بحث قرار گرفته که راکتورهای هسته‌ای زمانی که خاموش می‌شوند یا قدرت خود را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هنگامی که اتم‌های اورانیوم یا پلوتونیوم به دو اتم ایزوتوپ کوچک‌تر تقسیم می‌شوند (یا شکافت می‌شوند)؛ انواع مختلفی از رادیو هسته‌های مختلف (انواع ناپایدار اتم‌ها) تولید می‌شوند. دو مورد از آن‌ها زنون-۱۳۵ و ید-۱۳۵ هستند. ید خیلی بیشتر تولید می‌شود و به سرعت به زنون-۱۳۵ تجزیه می‌شود (که نیمه عمر آن حدود ۹ ساعت است) و این فرآیندی است که اکثریت زنون را در راکتور تولید می‌کند. این زنون نقش بسیار ویژه و شاید منحصربه‌فردی در راکتورها دارد؛ زیرا آن‌ها به راحتی نوترون‌های آزادی را جذب می‌کنند که باعث ادامه واکنش‌های شکافت اورانیوم یا پلوتونیوم می‌شوند که راکتور را به حرکت درمی‌آورند. به این ترتیب، زنون به عنوان "سم" راکتور شناخته می‌شود زیرا می‌تواند واکنش‌پذیری راکتور را در دوزهای بسیار بالا از بین ببرد.

این جذب نوترون بالا از زنون به این معنی است که رابطه دوگانه ای با سطح توان راکتور دارد. در سطوح بالای قدرت راکتور، مقدار زیادی زنون-۱۳۵ و ید-۱۳۵ توسط فرآیند شکافت تولید می شود. حضور زیاد زنون باعث کاهش واکنش پذیری راکتور می شود. اما فرآیند دیگری در جهت مخالف عمل می کند که این امر را خنثی می کند و نوترون های زیادی را که برای «سوزاندن» زنون در دسترس هستند را جذب می کند تا به ایزوتوپ متفاوت تبدیل شوند. این عمل مقدار کلی زنون را در کنترل نگه می دارد.

هنگامی که راکتور دچار تغییر ناگهانی در توان خروجی می شود، وضعیت به طور ناگهانی تغییر می کند. اگر توان به طور چشمگیر و ناگهانی کاهش یابد، تولید زنون برای مدتی به دلیل اضمحلال ذخایر بزرگید-۱۳۵ به سرعت ادامه می یابد. با شار نوترونی کمتری که برای «سوختن» زنون در دسترس است، سطح زنون افزایش می یابد و واکنش پذیری راکتور را پایین می آورد. مگر اینکه راکتور به سرعت به توان نسبتا بالا (۶۰٪) خیلی سریع (یک ساعت یا کمتر) برگردد وگرنه سطح زنون آنقدر بالا می رود که راکتور باید خاموش شود. در غیر این صورت اقدامات شدید (و خطرناک) برای ادامه کار راکتور مورد نیاز است. (این اساسا همان چیزی است که منجر به انفجار چرنوبیل شد).

در نتیجه، راکتورهای هسته ای برای نوسانات سریع توان، به ویژه کاهش چشمگیر توان، مناسب نیستند، زیرا این امر می تواند منجر به بی ثباتی در هسته راکتور شود. اگر راکتور به منظور اجتناب از چنین شرایط خطرناکی خاموش شود، معمولا تا زمانی که سطح زنون دوباره کاهش پیدا نکند، نمی توان آن را دوباره راه اندازی کرد، که ممکن است چند روز طول بکشد. بدیهی است که این امر برای یک زیردریایی نظامی مطلوب نیست و از این رو تقریبا به هر قیمتی از آن اجتناب می شود. این اثر، تأثیر چشمگیری بر طراحی زیردریایی های هسته ای دارد؛ زیرا بیشتر طراحی آن ها به جای حفظ توان حول این است که بتوانند به راحتی مقادیر زیاد توان اضافی را به سهولت پراکنده کنند. این موضوع داشتن یک پیشران کم راندمان در سرعت های پایین مانند پمپ جت را به یک مزیت قابل توجه تبدیل می کند. از آنجایی که راکتور به احتمال زیاد به ویژه در هنگام کاهش سرعت نیاز به دفع توان اضافی

دارد، یک سیستم محرکه کم راندمان در سرعت پایین یک منبع جذب انرژی را فراهم می کند. به شرطی که توربولانس بیش از حد داخل پمپ جت خیلی پرسروصدا نباشد، هدر دادن انرژی از طریق پیشران در مواقعی که مازاد وجود داشته باشد در سرعت هایی کمتر از حداکثر سرعت مفید است.

۱۶- نتیجه گیری و جمع بندی:

همان طور که در پیش تر آمد؛ استفاده از پیشران های داکت دار مزایای زیادی دارد و تمامی کشورهای پیشرفته در حال کار بر روی آن هستند. با توجه به مزایای بیشمار استفاده از قوای محرکه هسته ای در زیردریایی ها و سایر وسایل نقلیه دریایی، پمپ جت با توجه به مزایای آکوستیکی و همچنین محدودیت های پدیده مسمومیت با زنون و کاهش توان در راکتورهای هسته ای، کاندید مناسبی برای سیستم های پیشران دریایی با محرک هسته ای به نظر می رسد. با توجه به اینکه پمپ جت ها در سطح دنیا دوران رشد و تکامل خود را می گذرانند و دائما آرایش های مختلف و بهینه سازی های متعدد از آنان ارائه می شود، تحقیق و پژوهش بر روی آن ها جهت نیل به روش طراحی مطلوب و انتخاب کارآترین نمونه آن کارساز خواهد بود.

۱۷- فهرست علائم :

V	سرعت،
A	مساحت، m^2
ρ	چگالی، kg/m^3
PT	توان پیشران،
Vs	سرعت شناور،
KQ	ضریب گشتاور نرمال پروانه
ψ و ϕ	ضرایب انتقال انرژی جریان
H	هد پمپ
η_p	بازده پمپ
hp	افت هد پمپ
η_D	بازده دیفیوزر
hD	افت هد داخلی پمپ

Ocean Engineering Volume 191, 1 November 2019, 106520.

[9] Lin Lu, Yuefei Gao, Qiang Li, Lin Du, "Numerical investigations of tip clearance flow characteristics of a pumpjet propulsor", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering Volume 10, Issue 3, May 2018, Pages 307-317.

[10] Jie Gong, Chun-yu Guo, Tie-cheng Wu, Da-gang Zhao, "Particle image velocimetry measurement of velocity distribution at inlet duct of waterjet self-propelled ship model", Journal of Hydrodynamics, Ser. B Volume 29, Issue 5, October 2017, Pages 879-893.

[۱۱] بررسی عددی رفتار هیدرودینامیکی و پارامترهای سیالاتی میدان جریان حول سیستم رانش پمپ جت، احسان یاری، سید مهدی اعرابی مقدم، بیست و نهمین همایش سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران و هشتمین همایش صنعت نیروگاه‌های حرارتی

[۱۲] طراحی سیستم رانش پمپجت CRP، نوروز محمد نوری، صابر محمدی، اولین همایش پیشرفته‌های دریایی

[۱۳] شبیه‌سازی عددی دنباله جریان پشت سیستم رانش پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۴] استخراج منحنی عملکرد یک نمونه تحقیقاتی سیستم پیشران پمپجت، امین طالع زاده شیرازی، محمدرضا نظری، مجتبی دهقان منشادی، هجدهمین همایش صنایع دریایی

[۱۵] مطالعه سیستم رانش پمپجت و امکان‌سنجی استفاده از آن در شناورهای سرعت بالا، مهران مطلبی نژاد، حسن قاسمی، چهارمین همایش ملی شناورهای تندرو

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

[۱۷] مونسان، م. م. کتاب جامع مهندسی معماری دریایی، انتشارات کمالی نژاد، ۱۳۹۱

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

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

نسبت ورودی و خروجی دیفیوزر ε

Ns سرعت ویژه ماشین

n سرعت دورانی روتور،

V سرعت پیشروی بدنه

D قطر روتور

۱۸-مراجع:

[1] DenghuiQin, QiaogaoHuang, GuangPan, YaoShi, PengHan, XinguoDong, "Effect of the duct and the pre-swirl stator on the wake dynamics of a pre-swirl pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 237, 1 October 2021, 109620.

[2] DenghuiQin, QiaogaoHuang, GuangPan, YaoShi, PengHan, XinguoDong, "Comparison of hydrodynamic performance and wake vortices of two typical types of pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 224, 15 March 2021, 108700.

[3] XiaohuiLuo, QiupingLi, ZutiZhang, JijianZhang, "Research on the underwater noise radiation of high pressure water jet propulsion ", Ocean Engineering Volume 219, 1 January 2021, 108438.

[4] Lin Lu, Chen Wang, Denghui Qin, "Numerical investigations of flow characteristics of a pumpjet propulsor in oblique inflow", Applied Ocean Research Volume 103, October 2020, 102343.

[5] Chengcheng Qiu, Qiaogao Huang, Guang Pan, Yao Shi, Xinguo Dong, "Numerical simulation of hydrodynamic and cavitation performance of pumpjet propulsor with different tip clearances in oblique flow", Ocean Engineering Volume 209, 1 August 2020, 107285.

[6] Han Li, Qiaogao Huang, GuangPan, Xinguo Dong, "The transient prediction of a pre-swirl stator pump-jet propulsor and a comparative study of hybrid RANS/LES simulations on the wake vortices", Ocean Engineering Volume 203, 1 May 2020, 107224.

[7] Denghui Qin, Guang Pan, Seongkyu Lee, Qiaogao Huang, Yao Shi, "Underwater radiated noise reduction technology using sawtooth duct for pumpjet propulsor", Ocean Engineering Volume 188, 15 September 2019, 106228.

[8] Han Li, Guang Pan, Qiaogao Huang, "Transient analysis of the fluid flow on a pumpjet propulsor",

تحلیل عددی عملکرد و مقاومت شناور تندرو سرشی با اعمال

اسپری ریل

مهشید عمله کارسنگی^۱، سجاد حاجی زاده^۲

۱ و ۲ گروه مهندسی دریا- دانشکده مهندسی- دانشگاه خلیج فارس

چکیده:

در چند دهه اخیر شناورهای تندرو اهمیت فوق العاده‌ای پیدا کرده‌اند و برای دستیابی به سرعت‌های بالا فرم بدنه‌های مختلفی پیشنهاد، طراحی و ساخته شده‌اند. شناورهای تندرو به چهار گروه شناورهای تک بدنه، هیدروفویلی، اثر سطحی و چند بدنه تقسیم می‌شوند. در اینجا، تمرکز اصلی بر روی شناورهای سرشی (اسپری ریل) می‌باشد. شناورهای تندرو سرشی برای رسیدن به سرعت‌های بالا و مدنظر طراح، با چالش‌های مختلفی روبرو هستند. شناورهای با مقطع عرضی V شکل نیروی برای هیدرودینامیکی را به خوبی ایجاد نمی‌کنند. یک روش برای ایجاد نیروی برای هیدرودینامیکی در شناورهای تندرو، اضافه نمودن اسپری ریل در راستای طولی بدنه می‌باشد. هنگامیکه آب به طرف کناره شناور جریان می‌یابد، با استفاده از اسپری ریل جریان آب به سمت پایین هدایت داده شده و باعث نیروی برای هیدرودینامیکی می‌شود. در این کار با در دست داشتن تحلیل آزمایشگاهی شناور سرشی در شرایط آب آرام، یکبار با اسپری ریل در موقعیت مکانی ۲۴٪ آب‌خور و یکبار بدون نصب اسپری ریل، که شامل تریم، مقاومت و جابه‌جایی ارتفاع مرکز ثقل شناور می‌باشد، با تحلیل عددی آن در شرایط کاملاً یکسان مقایسه شده است که داری درصد خطای قابل قبولی می‌باشد. این بهینه‌سازی در شناور که با اعمال اسپری ریل انجام می‌شود، تریم و مقاومت را در سرعت‌های بالا به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و همچنین تغییرات ارتفاع مرکز ثقل را نیز افزایش می‌دهد. کار حاضر، می‌تواند مرجع معتبری برای بهبود عملکرد شناورهای پروازی در آینده باشد.

واژه‌های کلیدی:

تحلیل عددی، تندرو سرشی، شبیه سازی عددی، شناور سرشی، اسپری ریل

Numerical analysis on resistance and seakeeping performance wave-piercing high speed vessels whit spray rails

Mahshid Amalehkarsangi¹, Sajad Hajizadeh²

Marine Engineering, Engineering Department, Persian Gulf University

Abstract:

In recent decades, speedboats have become extremely important and various hull shapes have been proposed, designed and built to achieve high speeds. High-speed vessels are divided into four groups: single-hull, hydrophilic, surface-effect and multi-hull vessels. Here, the main focus is on the wave piercing vessel with spray rail. Speedboats face various challenges to reach the high speeds intended by the designer. V-shaped transverse vessels do not generate hydrodynamic lifting force well. One way to create a hydrodynamic lifting force in fast vessels is to add a spray rail in the longitudinal direction of the hull. When water flows to the side of the float, the water flow is directed downwards using a spray rail, causing a hydrodynamic lifting force. In this dissertation, with the laboratory analysis of the wave piercing vessel, which includes trim, resistance and displacement of the height of the center of gravity (VCG) of vessel, once in calm water conditions with spray rail at a location of 24%T and once without installing spray rail, it has been compared by numerical analysis under exactly the same conditions, which has an acceptable error rate. This optimization, which is done by applying spray rail, significantly reduces trim and resistance at high speeds, as well as increasing center of gravity height changes. This dissertation can be a reliable reference for improving the performance of planning body vessels in the future.

Keywords:

Numerical analysis, wave-piercing high speed, spray rails

۱- مقدمه

شناورهای تندرو سرشی از جایگاه بسیار مهمی برخوردارند و به لحاظ فرم ویژه‌ای که بدنه آن‌ها دارد با افزایش سرعت خود مقدار قابل توجهی از وزنشان را به وسیله نیروی برآی هیدرودینامیکی جبران می‌کنند. در بعضی از این موارد نیروی برآی هیدرودینامیکی آن‌ها حتی تا نصف وزن نیز می‌رسد.

اگرچه هیدرودینامیک سطوح سرشی به طور کامل شناخته شده نیست و هنوز مجهولات زیادی در این رابطه وجود دارد ولی دانشمندان از سال‌های گذشته تاکنون تلاش زیادی کرده‌اند تا بتوانند با فرمول‌بندی تحلیلی، برخی از مشخصه‌های هیدرودینامیکی آن‌ها را بررسی کنند. به همین منظور به جهت سهولت، اغلب این تحقیقات بر روی سطوح سرشی منشوری صورت گرفته است. در سال‌های گذشته، با توسعه شناورهای تندرو سرشی، سرعت در شناورها افزایش چشمگیری پیدا کرده است.

اگرچه سطح سرشی منشوری به طور کامل شبیه شناورهای تندرو نیست ولی می‌توان از نتایج آن برای تخمین عملکرد یک شناور تندروی واقعی استفاده کرد. این موضوع را می‌توان این گونه توجیه کرد که اغلب شناورهای تندرو پس از رسیدن به حالت سرشی در وضعیتی قرار می‌گیرند که سطح فشاری آن‌ها بسیار شبیه سطح سرشی منشوری است.

شناورهای با مقطع عرضی V شکل نیروی برآی هیدرودینامیکی را به خوبی ایجاد نمی‌کنند. یک روش برای ایجاد نیروی برآی هیدرودینامیکی در شناورهای تندرو اضافه نمودن اسپری ریل در راستای طولی بدنه می‌باشد. هنگامی که آب به طرف کناره شناور جریان می‌یابد؛ با استفاده از اسپری ریل جریان آب به سمت پایین هدایت شده و باعث نیروی برآی هیدرودینامیکی می‌شود.

۱-۱ شناورهای پروازی

شناورهای پیشرفته را می‌توان به چهار گروه شناور تک بدنه، هیدرو فویلی، اثر سطحی و چندبدنه تقسیم کرد.

۲-۱ نیروهای وارد بر شناورهای تندرو

بر اساس قانون ارشمیدس، یک جسم با سرعت صفر در سیال با استفاده از نیروی بویانسی، که برابر با وزن سیال جابجا شده است بر روی سطح آب باقی می‌ماند. زمانی که جسم شروع به حرکت می‌کند؛ جریان آب اطراف بدنه علاوه بر یک فشار بویانسی استاتیکی، فشار دینامیکی نیز تولید می‌کند. بدین وسیله، یک سیستم موج، شامل امواج عرضی و واگرا با زاویه معین نسبت به راستای حرکت جسم تشکیل می‌گردد.

امواج مستقیماً با تغییرات فشار در طول بدنه و برآی ایجاد شده، مرتبط می‌باشند. نیروی برآی در قله موج و مکش در قعر موج وجود دارد. در سرعت‌های پایین تر، آبخور و تریم شناور مشابه با حالت سرعت صفر هستند و وزن شناور به وسیله نیروهای بویانسی تحمل می‌شود. در این حالت قدرت مورد نیاز نسبتاً پایین بوده و بخش اعظم مقاومت هیدرودینامیکی، ناشی از اصطکاک است. شناوری که در این شرایط به فعالیت می‌پردازد، به عنوان شناور جابجایی شناخته می‌شود. در سرعت‌های بالاتر طول موج تولید شده، بلندتر از طول شناور خواهد بود و شناور بر روی امواج سینه، که به وسیله شناور تولید شده‌اند بالا می‌آید که در نتیجه باعث ایجاد یک فشار منفی در بخش انتهایی بدنه شده و شناور، زاویه یا تریمی^۱ به سمت پاشنه^۲ خواهد داشت و آبخور افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که پاشنه ترانسوم^۳ دارای خطوط باتوک تخت باشد؛ جریان مجبور می‌شود تا به آرامی از پاشنه شناور جدا شده و یک فشار دینامیکی مثبت در سرتاسر کف بدنه گسترش یابد. افزایش سرعت در شناور تندرو باعث کاهش تریم و آبخور شناور می‌شود. در این شرایط، شناور از سطح آب جدا شده و اصطلاحاً به آن، حالت پروازی^۴ می‌گویند. در این حالت کل نیروی وارد شده به شناور از نوع نیروی دینامیکی می‌باشد.

زمانی که شناور از سطح آب برخاسته و در شرایط پروازی قرار می‌گیرد؛ تولید موج و مقاومت ناشی از آن به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل (۱) نموداری از رابطه میان مقاومت کل و سرعت یک بدنه پروازی را در مقایسه با بدنه جابه‌جایی نشان می‌دهد. افزایش مقاومت

¹ Lift² Trim³ Stern⁴ Transom stream⁵ Planing

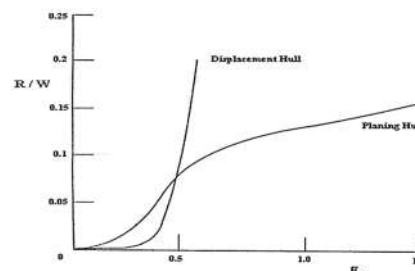
بررسی قرارگرفت [4]. در سال ۱۹۵۰، مواردی از این نتایج برای توسعه یک روش محاسباتی در تخمین مشخصه‌های سطح سرشی مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۹۵۴، ساویتسکی و نیدینگر^{۱۳} این مطالعات را توسعه داده و مطالعات تجربی سطح سرشی را که به معادلات ساویتسکی مشهورند ارائه کردند [5]. بطوریکه با این معادلات محدوده کاربرد متغیرها در پارامترهای سرشی افزایش یافت و بسیار بهتر از چیزی بود که تا قبل از آن ارائه شده بود. اگرچه این روش‌ها اصلاحاتی را به خود دیده‌اند ولی تا امروز همچنان معتبر بوده و به‌طور گسترده مورد استفاده هستند.

اولین بار اشتون^{۱۴} در سال ۱۹۴۹ اثر نوارهای اسپری را در طراحی شناورهای قدرتی^{۱۵} بررسی کرد [6]. در روش تخمینی مقاومت شناورهای سرشی که در اکتبر ۱۹۶۴ توسط ساویتسکی منتشر شده و تاکنون نیز مورد استفاده می‌باشد، تنها به بررسی مؤلفه‌های درگ لزجی و فشاری پرداخته شده است [7]. این نیروها به سطح کف بدنه سرشی، آن‌هم بعد از خط سکون^{۱۶} وارد می‌شوند. بنابراین لازم است مؤلفه‌های دیگر مقاومت، که سبب بروز خطا در روش ساویتسکی می‌شود مورد مطالعه قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین این مؤلفه‌ها، نیروی درگ ناشی از اسپری جاروبکی^{۱۷} است که در جلوی خط سکون اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در روش مذکور این مؤلفه به حساب نیامده است. البته در تحقیقات ساویتسکی - رأس^{۱۸} (۱۹۵۲) [9] و ساویتسکی - نیدینگر^{۱۹} (۱۹۵۴) نیز در مورد مؤلفه درگ اسپری جاروبکی اشاراتی شده است اما هیچ‌گاه نتایج تحلیلی کاملی ارائه نشده و مقدار بزرگی این مؤلفه نیز محاسبه نشده است.

در سال ۱۹۶۳ کلمنت^{۲۰} تست‌هایی را بر روی پنج مدل مختلف از شناورهای سری ۶۲ انجام داد و در آن‌ها اثرات افزودن نوارهای اسپری (اسپری ریل) در کف شناور را مورد بررسی قرار داد [10].

در شناورهای جابه‌جایی، مانع از افزایش سرعت می‌شود. هامپ^۶ موجود در منحنی بدنه پروازی مربوط به کاهش مقاومت موج در انتقال میان حالت جابه‌جایی به پروازی است.



شکل (۱): رابطه بین سرعت و مقاومت کل بدنه‌های جابه‌جایی و پروازی

۲- مروری بر کارهای انجام‌شده

اولین سری مطالعات تجربی قابل‌ملاحظه بر روی سطح سرشی منشوری در سال ۱۹۱۰ میلادی توسط بیکر^۷ انجام گرفته است [1]؛ ولی اولین نتایج جامع ارائه شده تجربی، به‌وسیله سوتورف^۸ گردآوری شده است [2]. در همین راستا دانشمندانی نظیر سامبراس، سیدو و لوکو^۹ اقداماتی را انجام داده‌اند؛ بطوریکه حاصل کار همه آن‌ها منجر به تهیه یک مجموعه بزرگ از داده‌های آزمایشگاهی شده است [3].

آنچه امروزه بیشتر مورد توجه است و نتایج قابل‌قبولی را ایجاد می‌کند معادلات و روش‌هایی است که بر اساس تحقیقات ساویتسکی^{۱۰} استوار شده است. اغلب تحقیقات صورت گرفته توسط این دانشمند در آزمایشگاه دیویدسون^{۱۱}، صورت گرفته که از سال ۱۹۴۷ تاکنون به‌طور جدی بر روش‌های تحلیلی و تجربی متمرکز شده است و تا امروز نیز ادامه دارد. این دانشمند بزرگ هنوز هم به تصحیح نظرات و معادلات خود مشغول است.

در سال ۱۹۴۹، کوروین کروکوفسکی^{۱۲} و ساویتسکی گزارشی را ارائه کردند که در آن به‌طور کامل مشخصات سطح سرشی، درگ و سطح خیس چند بدنه شناور مورد

^۶ Hump: به تداخل نامطلوب امواج سینه و پاشنه شناور گویند، که باعث افزایش مقاومت موج سازی می‌شود.

^۷ Baker

^۸ Sottorf

^۹ Sambras, sedov & locko

^{۱۰} Savitsky

^{۱۱} Davidson laboratory-new jersey-USA

^{۱۲} Krovin kroukovsky

^{۱۳} Neidinger

^{۱۴} Ashton

^{۱۵} Power boat

^{۱۶} Stagnation line

^{۱۷} Whisker Spray

^{۱۸} Ross

^{۱۹} Neidinger

^{۲۰} Clement

روش ارائه شده توسط ساویتسکی برای تخمین میزان مقاومت بدنه سرشی تا سال ۲۰۰۷ به صورت جدی توسط طراحان بکار گرفته می شد؛ البته اکنون نیز با اصلاحاتی قابل استفاده است. در این سال خود ساویتسکی به اصلاحاتی در این روش دست زد و دقت بیشتری به آن بخشیده است. در این روش از مشخصه های هیدرودینامیکی یک سطح سرشی (نیروی برآ، سطح خیس شده، مرکز فشار و ...) برای تعیین شرایط کاری متعادل شناور (تربیم، آبخور، طول خیس شده کیل، طول چاین ها و مقاومت) استفاده شده است. همچنین در روش ارائه شده توسط ساویتسکی می توان با استفاده از بارگذاری ها، زاویه برخاست کف، ابعاد، موقعیت LCG و سرعت به بررسی پدیده ناپایداری طولی^{۲۱} نیز پرداخت. در این روش از معادلات هیدرودینامیکی تنها برای سطح فشاری کف شناور که در قسمت عقب خط سکون قرار دارد استفاده می کنند، اما مشخص است در جلوی خط سکون نیز سطح خیس شده ای وجود دارد که آن را سطح خیس اسپری جاروبکی می نامند. اگرچه این سطح در سال ۱۹۶۴ توسط ساویتسکی معرفی شده ولی تا سال ۲۰۰۷ سهم آن در مقاومت کل شناور به طور دقیق شناخته شده نبود.

۳- معادلات حاکم

اکنون به بررسی معادلات حاکم بر دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته می شود. در ادامه مقدمه ای از معادلات مورد استفاده در علم دینامیک سیالات محاسباتی ارائه خواهد شد.

۱-۳ معادله بقا جرم و پیوستگی

معادله بقای جرم پیوستگی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

ρ چگالی سیال و u_i مؤلفه سرعت در جهت i می باشد. این معادله به شکل عمومی معادله بقای جرم بوده و برای هر دو جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر اعتبار دارد. جمله اول سمت چپ، نرخ تغییر چگالی در واحد زمان را بیان می -

کند و جمله دوم بیانگر جریان خالص عبوری از المان - هاست که جابه جایی^{۲۲} نامیده می شود.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (2)$$

۲-۳ معادله بقا مومنوم

قانون دوم نیوتون بیان می کند که نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره سیال برابر با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره است. در نتیجه معادلات بقای مومنوم در جهت کلی i به صورت معادله زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \\ + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (3)$$

که P فشار استاتیک، تانسور تنش τ_{ij} (که در زیر توضیح داده شده است)، ρg_i و F_i نیروهای جسمی گرانشی جسمی خارجی در جهت i می باشند. F_i همچنین می تواند شامل ترم هایی نظیر مدل محیط متخلخل شود. تانسور تنش τ_{ij} به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \left[u \left(\frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \right] - \frac{2}{3} u \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

که μ لزجت مولکولی و ترم دوم در سمت راست تأثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی می باشد. برای شبیه سازی جریان اطراف شناور تندرو، سیال تراکم - ناپذیر در نظر گرفته می شود و جریان سیال ناپایاست.

۳-۳ معادلات حاکم بر جریان آشفته

ابتدا معادلات برای کمیت های لحظه ای، یعنی کمیت های متوسط همراه کمیت های نوسانی نوشته می شود. آنگاه از طرفین هر معادله متوسط گیری زمانی گرفته می شود. البته در این رابطه باید به این نکته توجه نمود که چنانچه تساوی برای معادلات لحظه ای برقرار باشد؛ این تساوی برای متوسط زمانی آن (برای دامنه مشخصی از زمان) نیز برقرار خواهد بود. در نهایت معادلات را ساده سازی کرده تا جایی که کمیت های متوسط زمانی ظاهر گردند.

۱-۳-۳ معادلات پیوستگی برای جریا آشفته

²² convection

²¹ Proposing

برای جریان تراکم پذیر داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{p' u'_i}) = 0 \quad (5)$$

برای جریان تراکم ناپذیر از آنجایی که $\rho' = 0$ می باشد، معادله فوق به صورت زیر در خواهد آمد.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

۲-۳-۳ معادله مومنوم برای جریان آشفته

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$= \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right]$$

تنها تفاوت معادله مومنوم فوق با معادله مومنوم با کمیت های لحظه ای، اضافه شدن عبارت آخر در سمت راست معادله یعنی $\rho \overline{u'_i u'_j}$ می باشد. این عبارت را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز می گویند. تنها تفاوت معادله جریان آرام با آشفته نیز فقط حضور همین عبارت می باشد. به طور کلی این عبارت از لحاظ فیزیکی یک تنش نیست، بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنوم) می باشد. فراموش نشود که این عبارت از سمت چپ معادله مومنوم یعنی جایی که با عبارت های اینرسی سروکار داریم به سمت راست منتقل شده است. بنابراین ریشه و بنیان این عبارت از جنس اینرسی مومنوم می باشد.

۴-موقعیت نصب و طراحی اسپری ریل ها

می توان مرزهای جریان اسپری جاروبکی در طول کف بدنه را چنین بیان کرد.

۴-۱ موقعیت و سطح اسپری ریل ها

(۱) محاسبات مقاومت بدنه بدون ریل با طول کیل خیس عملکردی L_K و طول خیس چاین L_c به عنوان تابعی از سرعت به دست می آید. خط پیوسته L_K و L_c در طول کف بدنه معرف مرز عقبی اسپری جاروبکی است و در صفحه عمودی نسبت به طول مرکزی صفحه، زاویه ای برابر α می سازد.

(۲) محاسبات مقاومت اسپری جاروبکی مقدار زاویه $\theta = 2\alpha$ را تعریف می کند که همان زاویه بین لبه جلویی اسپری و کیل می باشد. این مقدار در یک صفحه عمودی نسبت به صفحه مرکزی بدنه (طولی) اندازه گیری می شود.

(۳) مساحت خیس شده کف توسط اسپری جاروبکی، با لبه های جلویی و عقبی اسپری و چاین ها مرزبندی می شود.

۴-۲ چینش و اندازه اسپری ریل ها

بهترین موقعیت عرضی اسپری ریل ها تقریباً برابر 0.25 ، 0.5 و 0.75 از کیل در نظر گرفته می شوند و موقعیت طولی هر یک از این اسپری ریل ها نیز تا کمی بعد از خط سکون ادامه پیدا می کند.

چون موقعیت و جهت اسپری تابعی از سرعت و بارگذاری است بنابراین طراحان باید موقعیت مناسب منحرف کننده ها را برای داشتن بهترین وضعیت در ماکزیمم سرعت در نظر بگیرند. نتایج کلمنت و مطالعات ارائه شده، تشریح می کند که منحرف کننده های اسپری، بایستی نسبتاً کوتاه باشند. زیرا اگر آن ها دراز باشند و به ناحیه سطح فشار، یعنی جایکه جریان سیال در یک جهت طولی حرکت می کند برسند؛ این دراز بودن نه تنها اثری بر جدایش اسپری از بدنه ندارد بلکه بر مقاومت کل شناور نیز می افزاید.

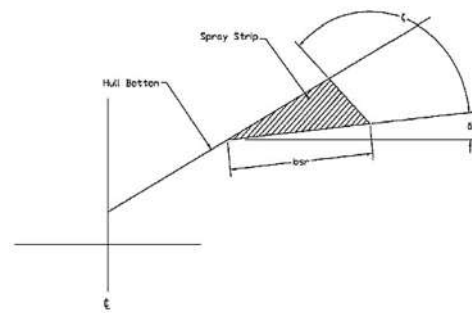
۴-۳ شکل مقطع عرضی اسپری ریل ها

مولرگراف نتایجی را از یک سری مدل تست ارائه کرده اند که به عنوان سیستم های اسپری ریل پیشرفته برای بدنه های نیمه جابجایی شناخته شده اند. بر همین اساس انجمن بدنه های سرشی نیز شکل هایی با مقطع مثلثی را برای منحرف کننده ها پیشنهاد می کند که در شکل (۲) آمده است. تیز بودن لبه های خارجی برای تسهیل جدایش اسپری از بدنه الزامی است.

مشخصه این مقاطع عبارتند از:

$\theta = 90^\circ$ زاویه شکست منحرف کننده اسپری که بزرگتر از 90° درجه است.
 $\delta = 8^\circ$ زاویه کف منحرف کننده اسپری که تقریباً برابر 8° درجه است.

$bsr =$ پهنای منحرف کننده اسپری که تقریباً $LWL/0.05$ است.

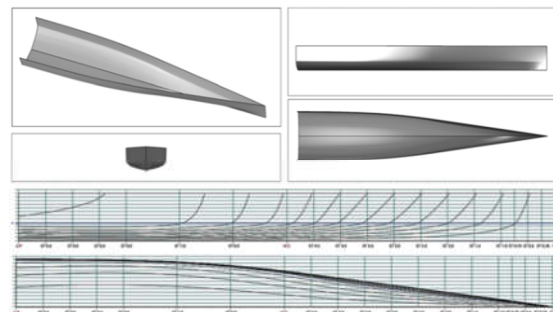


شکل (۲): هندسه نمای جانبی اسپری ریل های مرسوم

۵- شبیه سازی های هندسی و عددی

۵-۱ مدل سازی هندسی مسئله موردنظر

شناور مورد مطالعه طبق ابعاد مدل مورد بررسی در مقاله ی موردنظر با استفاده از خطوط بدنه ی ارائه شده در مقاله رسم و مدل سازی هندسی شده است.



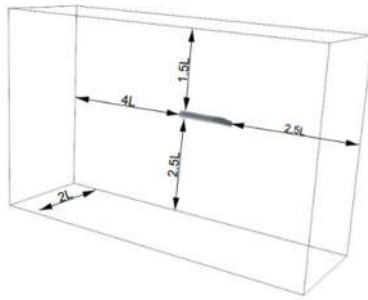
شکل (۳): مشخصات هندسی ارائه شده از شناور مورد مطالعه [8]

۵-۲ شبیه سازی عددی مسئله موردنظر

در این شبیه سازی جهت مدل سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی $K - \epsilon$ دو لایه تحقق پذیر استفاده شده است. همچنین به منظور مدل سازی سطح آزاد سیال مدل VOF مورد استفاده قرار گرفته است. رفتار دینامیکی مدل دارای دو درجه آزادی هیو^{۲۳} و پیچ^{۲۴} است. در نتیجه برای مدل سازی این درجات آزادی از به کارگیری مدل DFBI شبیه سازی می شود. ابتدا نیاز است هندسه ی مدل سازی شده از بخش قبل را با دقت مورد نیاز به محیط نرم افزار شبیه سازی عددی وارد کنیم. دقت ترسیم هندسه یا تolerانس طراحی طبق استاندارد و راهنمای نرم افزار استار-سی سی ام، 10^{-6} میلی متر در نظر گرفته می شود.

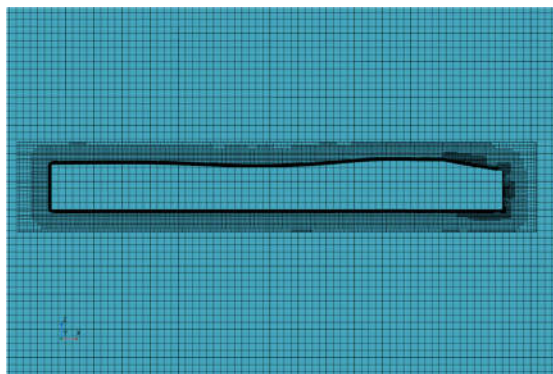
دامنه محاسباتی، ناحیه در فضای سه بعدی است که شبیه سازی در آن صورت می گیرد. چون در شبیه سازی آزمایش مقاومت، مدل ثابت نگه داشته می شود و سیال با سرعت تعیین شده (سرعتی برابر با حرکت مدل در حوضچه کشش) به آن برخورد می کند؛ اندازه دامنه محاسباتی به مراتب از زمانی که مدل با سرعت مشخص در آب آرام حرکت کند کوچک تر است.

Simcenter STAR-CCM+



شکل (۴) ابعاد دامنه ی محاسباتی آزمایش بر حسب طول بین دو عمود طبق استاندارد ITTC

شبکه بندی حجمی شامل شبکه های شش وجهی است که به صورت غیر سازمان یافته^{۲۵} تولید می شود به منظور ایجاد چنین شبکه ای، نرم افزار STAR CCM+ از تابع شبکه تراش خورده^{۲۶} استفاده می نماید. همچنین جهت دستیابی به تخمینی مناسب از تنش های برشی، بر روی سطح بدنه از شبکه بندی لایه مرزی^{۲۷} جهت گسسته سازی استفاده می گردد [11].



شکل (۵): شبکه بندی لایه ی مرزی پیرامون بدنه ی مدل (نما از بغل)

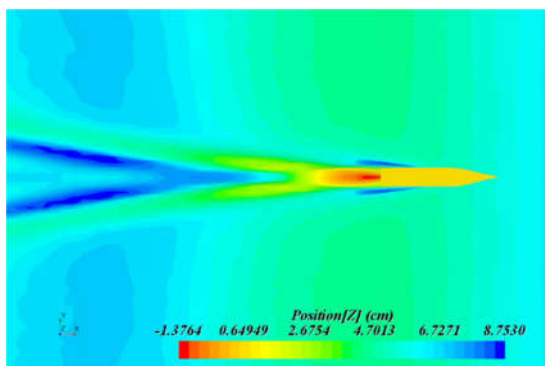
²⁵ Unstructured

²⁶ Trimmer Mesh

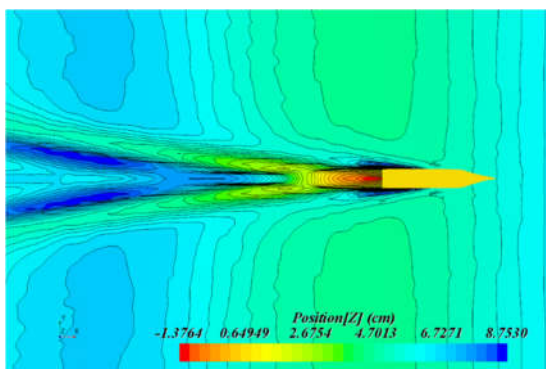
²⁷ Prism Layer

²³ Heave

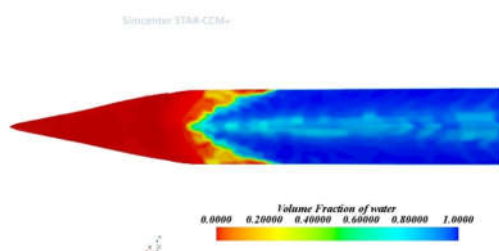
²⁴ Pitch



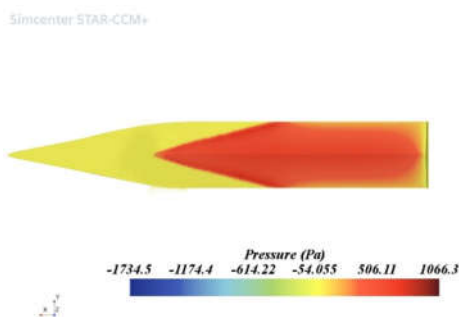
شکل (۸): سیستم موج کلوین به وجود آمده در سطح آزاد حاصل از آزمایش



شکل (۹): سیستم موج کلوین به وجود آمده در سطح آزاد نمایش به صورت وکتور



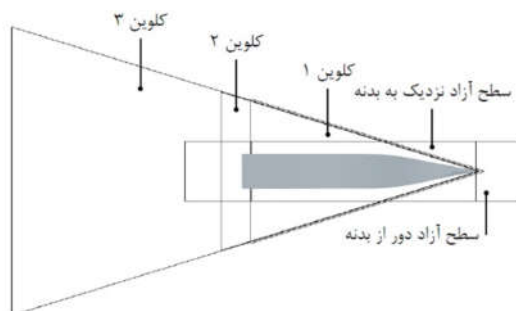
شکل (۱۰): نسبت حجمی آب و هوا در کف مدل پس از شرایط پایا



شکل (۱۱): توزیع ضریب فشار بر روی بدنه در حالت پایا

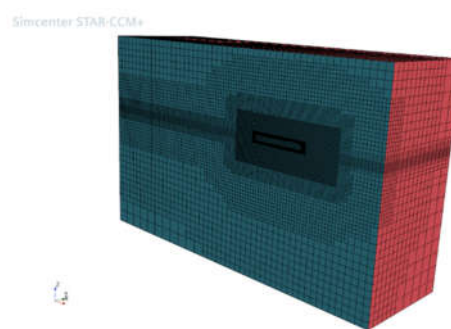
مدل ابتدا در آب آرام و یکبار با پوسته خالی و یکبار با موقعیت‌های مکانی اسپری ریل ۲۴٪ آبخور در حوضچه

ناحیه‌های کلوین ۱، کلوین ۲، کلوین ۳ جهت مدل‌سازی موج کلوین تعریف و ابعاد آن بر اساس نظریه موج کلوین تعیین شده است.



شکل (۶): نواحی بهبود شبکه در محیط شبیه‌سازی عددی (نما از بالا)

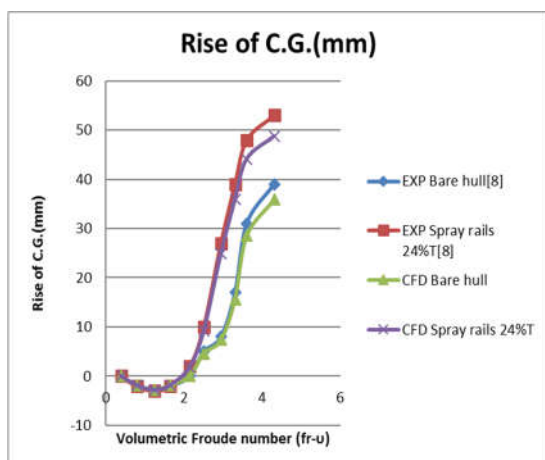
نمای کلی شبکه‌بندی حجمی دامنه‌ی محاسباتی در صفحه‌ی تقارن ارائه گردیده است.



شکل (۷): نمای کلی شبکه‌بندی حجمی دامنه‌ی محاسباتی (نما از صفحه‌ی تقارن)

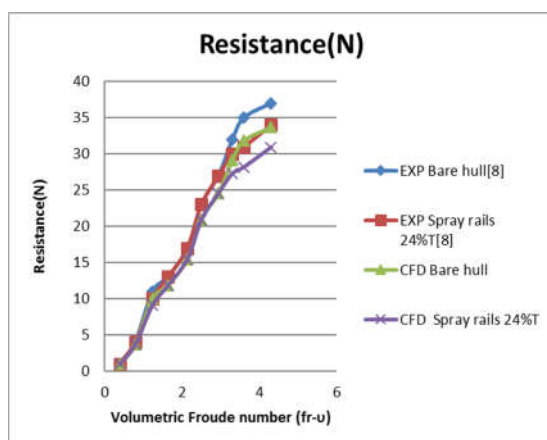
۶- نتایج

یکی از ویژگی‌های رسیدن به حالت پایا در شبیه‌سازی آزمایش مقاومت، تشکیل سیستم موج کلوین است. شکل ۸ و شکل ۹ موج کلوین تشکیل شده ناشی از برخورد سیال به مدل را در حالت پایا به نمایش می‌گذارد. در این شکل نقاط پرفشار در سینه و پاشنه شناور که موج ایجاد قله موج ایجاد گردیده، قابل مشاهده است. در انتهای دامنه محاسباتی شرایطی در نظر گرفته شده است که موج انتشاری پس از توسعه میرا گردد. این امر از برخورد امواج به خروجی دامنه و بازگشت مجدد آن به سوی شناور جلوگیری می‌کند.



شکل (۱۳): مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای افزایش ارتفاع مرکز ثقل شناور در حالت نصب اسپری ریل و پوسته خالی بدنه

با مقایسه شرایط آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که مقاومت شناور در سرعت‌های بالا در بدنه دارای اسپری-ریل، کمتر از بدنه بدون اسپری ریل است. در تست عددی شناور هم این نتایج با درصد خطای ۰,۰۹ که در محدوده قابل قبولی قرار دارد نمایش داده شده است.

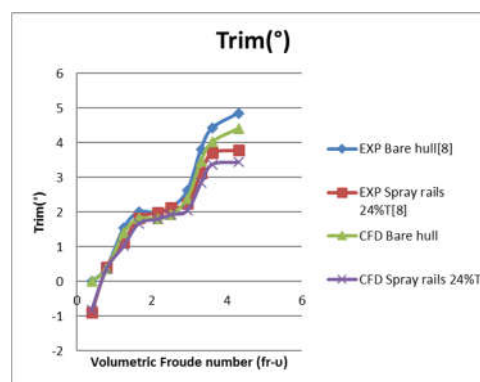


شکل (۱۴): مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای مقاومت شناور در حالت نصب اسپری ریل و پوسته خالی بدنه میزان درصد خطای نتایج عددی با آزمایشگاهی در نمودار تریم حدود ۹ درصد است که از رابطی زیر محاسبه شده است.

$$Error = \frac{Exp\ value - Nom\ value}{Exp\ value} \times 100 \quad (۸)$$

کشش تست شده است و تریم، مقاومت و افزایش مرکز ثقل^{۲۸} محاسبه شده است.

آزمایش‌های مقاومت در شرایط آب آرام در حالت پوسته خالی نشان می‌دهد که تریم در سرعت‌های بالا افزایش پیدا می‌کند (در عددی‌های فرود بالای ۳/۳۲۶ که معادل سرعت ۴۰ نات در شناور اصلی است). بیرون آمدن سینه شناور به دلیل تریم بیش از اندازه و برخورد کف سینه‌ی شناور به جای لبه‌ی تیز سینه‌ی شناور باعث اسپری و پاشش آب به اطراف بدنه می‌شود. با مقایسه شرایط آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که تریم در سرعت‌های بالا در بدنه دارای اسپری ریل، کاهش قابل توجهی نسبت به بدنه بدون اسپری ریل دارد. در تست عددی شناور هم این نتایج با درصد خطای ۰,۰۹ که در محدوده قابل قبولی قرار دارد نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای تریم شناور در حالت نصب اسپری ریل و پوسته خالی بدنه با مقایسه شرایط آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که ارتفاع مرکز ثقل در سرعت‌های بالا در بدنه دارای اسپری ریل، بیشتر از بدنه بدون اسپری ریل است. در تست عددی شناور هم این نتایج با درصد خطای ۰,۰۸ که در محدوده قابل قبولی قرار دارد نمایش داده شده است.

²⁸ Rise of CG

[۶] Ikeda, Y, Katayma, T. porpoising oscillations of very-high-speed marine craft, Phil.Trans.R.Soc.Land.A.358, 2000.

[۷] Savitsky.D ,Morabito,Morabito,M. Surface wavecontors associatated with the forebody wake of stepped planing hull, Meeting of the NEW YORK Metropolitan Section of The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2009.

[۸] Jeonghwa Seo, Hak-Kyu Choi, Uh-Cheul Jeong, Dong Kun Lee, Shin Hyung Rhee, Chul-Min Jung, Jaehoon Yoo. Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails. *Ocean Engineering July 2016*.

[۹] Savitsky. Daniel, Michael F. DeLorme, and Raju Datla. Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls. *Marine Technology* 44.1, 2007.

[۱۰] Pierson,J.D.and Leshnover S, An analysis of fluid flow in the spray root and wade region of flat planing surface. Davidson Laboratory Technology Report NO.382, 1958.

[۱۱] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines (Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD), 2014.

۷- نتیجه گیری:

جهت مشاهده و مقایسه‌ی رفتار شناور تندرو ویو پیرسینگ، این بدنه در محیط نرم افزار Star CCM ، یکبار بدون نصب اسپری ریل و بار دیگر با نصب اسپری- ریل تست شده است و در نهایت نتایج بدست آمده از این تست با نمونه‌ی آزمایشگاهی خود مقایسه شده است. تست‌هایی که از بدنه گرفته شده است به شرح زیر می- باشند:

۱- تست زاویه تریم شناور

۲- تست ارتفاع مرکز ثقل شناور

۳- تست مقاومت شناور

در هر سه تست شناور در محیط نرم افزاری، بهبود در شرح حال‌های بالا حاصل شده است. به این صورت که تریم و مقاومت شناور در سرعت‌های بالا در بدنه دارای اسپری- ریل، کمتر از بدنه بدون اسپری ریل شده است. همچنین مشاهده می‌شود که ارتفاع مرکز ثقل در سرعت‌های بالا در بدنه دارای اسپری ریل، بیشتر از بدنه بدون اسپری ریل است.

منابع:

[1] Holloway, Damien Scott. A high froude number time domain strip theory applied to the seakeeping of semi-SWATHs. Diss. University of Tasmania, 1999.

[۲] Savisky,d. chapter iv planning craft of modern ship and craft, Naval Engineers Journul, 1985.

[۳] Pierson,JD. and Leshnover, An Analysis of fluid flow the spray root and wade region of flat planing surface davidson laboratory technical report No.335, 1948.

[۴] Smiley, Robert F. A Semiempirical Procedure for Computing the Water-Pressure Distribution on Flat and V-Bottom Prismatic Surfaces During Impact or Planing. No. NACA-TN-2583. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON DC, 1951.

[۵] Shoemaker, J.M. Tank tests of flate and V-bottom planing Surface , NACA TN 509, 1934.

بازطراحی سامانه خنک کاری در توسعه موتور بنزینی زمینی به دریایی

میثم محرابیان^۱، ادیب سوزنی^{۲*}

^۱ دانش آموخته، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران maisam.mehrabian70@gmail.com
^۲ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم (طراحی و ساخت)، دانشگاه تهران، تهران، ایران adib.souzani@ut.ac.ir

چکیده:

امروزه یکی از راه‌های طراحی موتور، توسعه موتورهای موجود در کشور است. با این کار نیازی به طراحی کامل یک موتور که نیازمند صرف هزینه و وقت بسیار است نخواهد بود. یکی از کاربری‌های راهبردی موتورهای بنزینی، کاربرد آن در مصارف دریایی می‌باشد. جهت دریایی‌سازی یک موتور خودرویی، بسیاری از سامانه‌های موتور نیازمند تغییرات می‌باشد. در حالت نصب عمودی موتور که تفاوت زیادی با حالت افقی دارد، جهت نیل به تغییر کاربری می‌بایست تغییرات اساسی در سامانه‌های موتور مبنا که از جمله با اهمیت‌ترین آن‌ها سامانه خنک کاری است؛ ایجاد کرد. در واقع توسعه موتور دریایی بدون توسعه همزمان سامانه خنک کاری ناقص می‌باشد. در این پروژه خنک کاری اجزای موتور ارتقاء یافته دریایی‌سازی شده توسط دو مدار باز و بسته صورت می‌گیرد. با توجه به طراحی انجام شده، سامانه خنک کاری در مدار باز شامل یک خنک کن روغن، یک خنک کن میانی هوا و یک مبدل آب شیرین می‌باشد. هدف اصلی این پروژه، طراحی مبدل‌های حرارتی مورد نیاز در مدار باز خنک کاری می‌باشد. با استفاده از نرم افزار HTRI برای هر یک از مبدل‌های هوا، روغن و آب شیرین ۴ نوع طراحی ارائه گردید. هر سه مبدل حرارتی مورد نیاز در سامانه خنک کاری مدار باز موتور، از نوع پوسته و لوله در نظر گرفته شده و بدلیل جلوگیری از خوردگی تجهیزات و رسوب‌زا بودن آب دریا (سیال سرد)، این سیال در هر سه مبدل درون لوله جریان دارد و سیال گرم (هوا، روغن و آب شیرین) در سمت پوسته جریان دارند. در مبدل اینترکولر طراحی‌های شماره ۲ و ۳ به دلیل وزن کمتر و ضریب انتقال حرارت بالاتر برگزیده شدند (با توجه به تعداد پاس‌های لوله آنان). در مبدل خنک کن روغن، طراحی‌های شماره ۲ و ۴ مزایای بهتری داشته و انتظارات را برآورده می‌کند. همچنین در مبدل خنک کن آب شیرین طراحی‌های شماره ۲ و ۴ برتر شناخته شد.

کلیدواژه‌ها: موتور تنفس طبیعی، توربوشارژر، توان ترمزی، گشتاور ترمزی، GT-POWER

Redesign of the cooling system in the development of land-to-sea gasoline engines

Mehrabian, Meysam¹, Souzani, Adib^{2,*}

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Biosystem Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran, adib.souzani@ut.ac.ir

Abstract:

the development of the marine engine is incomplete without the simultaneous development of the cooling system. In this project, the components of the upgraded marine engine are cooled by two open and closed circuits. According to the design, the cooling system in the open circuit includes an oil cooler, an intermediate air cooler and a fresh water exchanger. The main goal of this project is the design of heat exchangers required in the open cooling circuit. Using HTRI software, 4 types of designs were presented for each of the air, oil and fresh water converters. All three heat exchangers required in the open circuit cooling system of the engine are considered to be shell and tube type, and due to the prevention of equipment corrosion and sedimentation of sea water (cold fluid), this fluid flows inside the tube in all three exchangers and the fluid Hot (air, oil and fresh water) flow on the shell side. In the intercooler exchanger, designs number 2 and 3 were chosen due to their lower weight and higher heat transfer coefficient (according to the number of their pipe passes). In the oil cooling converter, designs number 2 and 4 have better advantages and meet expectations. Also, designs No. 2 and 4 were recognized as the best in fresh water cooling converter.

Keywords:

naturally aspirated engine, turbocharger, braking power, braking torque, GT-POWER

۱- مقدمه

انتقال حرارت رضایت بخش در موتور به دلایل زیادی از قبیل محدودیت های دمای مواد، محدودیت عملکرد روغن روانکاری، آلاینده ها و پدیده ضربه^۱ اهمیت زیادی دارد. حین کارکرد موتور، دمای درون محفظه احتراق به حدود ۲۷۰۰ کلوین و حتی بالاتر می رسد و مواد بکار رفته در موتور نمی توانند چنین دمایی را تحمل کنند و اگر به سرعت خنک نشوند و حرارت آن ها دفع نگردد دچار تنش های حرارتی شدید شده و از بین می روند. از آن جایی که فرایند احتراق در یک موتور احتراق داخلی بر خلاف یک موتور احتراق خارجی به شکل ممتد و ادامه دار نیست، دمای قطعات از دمای بیشینه احتراق بسیار کمتر خواهد بود [۱].

بخش هایی از محفظه احتراق که دما و سرعت گازهای سوخته شده در تماس با دیواره ی آن بیشتر است؛ دارای شار حرارتی بالاتری هستند. در این نواحی احتمال وقوع پدیده ی ترک ناشی از خستگی^۲ افزایش می یابد. جهت جلوگیری از این پدیده دما می بایست در کمتر از 400°C برای چدن و 300°C برای آلیاژ آلومینیوم نگه داشته شود [۳]. از طرفی راندمان موتور با افزایش ماکزیمم دمای محفظه احتراق افزایش می یابد [۲]. می توان تأثیر انتقال حرارت را از سه جنبه بیان کرد: ۱- بهبود عملکرد موتور، ۲- عملکرد روغنکاری، ۳- کاهش سطح آلاینده ها [۳].

شار حرارتی وارده به دیواره سیلندر از سوی گازهای احتراقی، شامل شار تشعشعی و جابجایی است. پروفیل دمای متوسط گاز و سیال خنک کن نیز به ترتیب با T_g و T_c نشان داده می شود. علت افت شدید دما در نزدیکی سطح داخلی دیواره سیلندر، مقاومت حرارتی ناشی از لایه مرزی است. به همین علت لایه مرزی علی رغم ضخامت اندک میکرونی، از اهمیت خاصی برخوردار است. شار حرارتی سپس در داخل دیواره به صورت هدایتی و در انتها نیز به صورت جابجایی از جداره خارجی دیواره سیلندر به سیال خنک کن منتقل می گردد.

۲- تغییر سامانه خنک کاری موتور زمینی به دریایی

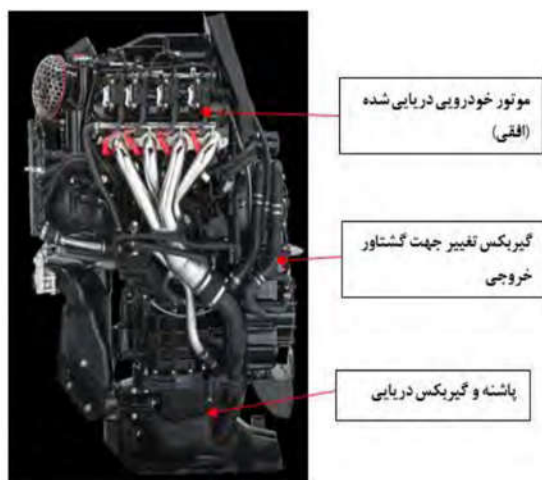
از آنجایی که فراهم نمودن موتورهای بنزینی دریایی با توان بالا با مشکلاتی همراه است؛ توسعه موتورهای

بنزینی زمینی موجود در کشور یکی از راه های برطرف نمودن نیازها می باشد [۹]. سیستم های رانش بنزینی برای شناورها شامل دو نوع مختلف، موتورهای درون نصب^۳ و برون نصب^۴ می باشد. موتورهای برون نصب به دلیل داشتن مزیت های فراوان در مقایسه با موتورهای درون نصب، در صنایع نامبرده، اهمیت ویژه ای پیدا نموده اند. طراحی و تولید این موتورها تنها توسط کشورهای محدودی صورت می گیرد و نیازمند وجود دانش فنی و سطح تکنولوژی بسیار بالایی می باشد [۱۰].

تغییر کاربری موتور خودرویی به دریایی شامل دو روش زیر می باشد:

- تغییر کاربری موتور بدون تغییر راستای خروجی گشتاور (افقی).
- تغییر کاربری موتور با تغییر وضعیت قرارگیری خروجی گشتاور (عمودی).

در روش افقی در صورت استفاده از یک گیربکس تغییر جهت گشتاور خروجی، موتور خودرویی را بر روی پاشنه و گیربکس مخصوص موتورهای برون نصب مونتاژ می کنند (شکل ۱). تغییر کاربری در حالت افقی نیازمند تغییر در سامانه های اساسی موتور نمی باشد و تنها مسئله اساسی تغییر جهت دوران خروجی موتور است [۱۱].



شکل ۱: نمایی از موتور خودرویی دریایی شده به روش افقی.

در موتور خودرویی معمولاً از مبدل های حرارتی هوا خنک استفاده می شود. اما در یک موتور با کاربری دریایی به جهت اینکه موتور در معرض پاشیده شدن آب دریا قرار

³ Inboard engine

⁴ Outboard engine

¹ Knock

² Fatigue cracking

نگیرد موتورها در داخل پوشش محافظ قرار می‌گیرند که عملاً استفاده از مبدل هواخنک را غیرممکن می‌نماید. در این موتورها می‌توان از آب دریا برای خنک‌کاری مجموعه استفاده کرد [۱۳ و ۱۲]. برای خنک‌کاری موتورهای دریایی به طور کلی سه روش وجود دارد:

- خنک‌کاری در فضای کف کشتی^۱
- مدار خنک‌کاری باز با آب دریا
- مدار خنک‌کاری بسته و باز

در روش اول، آب خنک کننده پس از دفع حرارت از موتور، با تماس مستقیم توسط آب دریا خنک شده و دوباره وارد مدار می‌شود. در روش دوم، آب دریا پس از پمپاژ شدن به داخل موتور، مستقیماً قسمت‌های مختلف را خنک کرده و به سمت مسیر دود شناور هدایت شده و از آن خارج می‌شود. در روش سوم، خنک‌کاری اجزا توسط دو مدار باز و بسته صورت می‌گیرد که در مدار باز، آب دریا جریان داشته و در مدار بسته آب شیرین وظیفه خنک‌کاری بلوکه موتور را بر عهده دارد. بسته به نوع طراحی سامانه خنک‌کاری خنک‌کن روغن، خنک‌کن میانی هوا و منیفولد دود می‌توانند در مدار باز یا بسته قرار داشته باشند [۱۳].

در این پروژه، برای جلوگیری از خوردگی و کاهش عمر موتور به علت آب شور دریا، از روش سوم به عنوان سیستم خنک‌کاری موتور ارتقاء یافته استفاده شد.

در پژوهشی، نازک تبار و محبی به کمک تجربه و داده‌های الگوبرداری و نیز انجام آزمون، سامانه خنک‌کاری یک موتور ارتقاء یافته دیزلی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن دبی و دمای آب ورودی برای موتورهای دو و چهار زمانه در دوره‌های مختلف یک موتور توانستند برای هر المان سیستم خنک‌کاری روابط تجربی استخراج کنند و به کمک آنها نشان دادند با ارتقاء توان یک موتور زمینی به دریایی، میزان بار حرارتی مجموعه افزایش می‌یابد [۹].

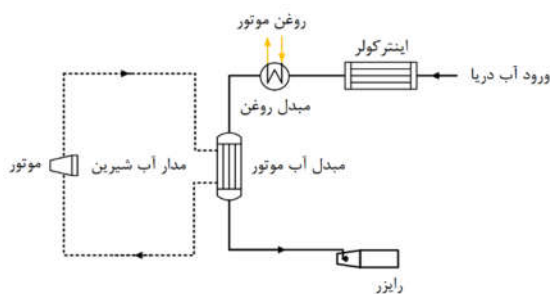
باری و همکاران با بررسی مدار خنک‌کاری موتورهای دریایی ۳۰۰ اسب بخار مرکوری و ۲۵۰ اسب بخار یاماها و مقایسه آن با یک موتور خودرویی ۲۲۷ اسب بخار، در دو حالت نصب عمودی و افقی، سیستم خنک‌کاری مورد نظر را طراحی و آن را بر روی یک شناور نصب نموده و توانستند اطلاعاتی راجع به افزایش دمای آب ورودی و خروجی به

موتور، روند تغییر دمای آب دور دو جداره موتور برحسب دور موتور و میانگین افزایش دمای دود آگزوز متناسب با دور موتور را استخراج کنند [۱۰].

قطعاتی مانند مبدل اصلی (آب شیرین-آب دریا)، پمپ آب موتور، پمپ آب دریا، خنک‌کن میانی هوا، خنک‌کن روغن باید مطابق با محاسبات بار حرارتی موتور ارتقاء یافته سفارش‌گذاری شود. همچنین در صورت نیاز و بالا بودن دمای کارکردی، باید منیفولد دود و توربین توربوشارژر در مدار خنک‌کاری قرار بگیرد و پوسته آن‌ها خنک شود.

۳- طراحی سامانه خنک‌کاری موتور دریایی

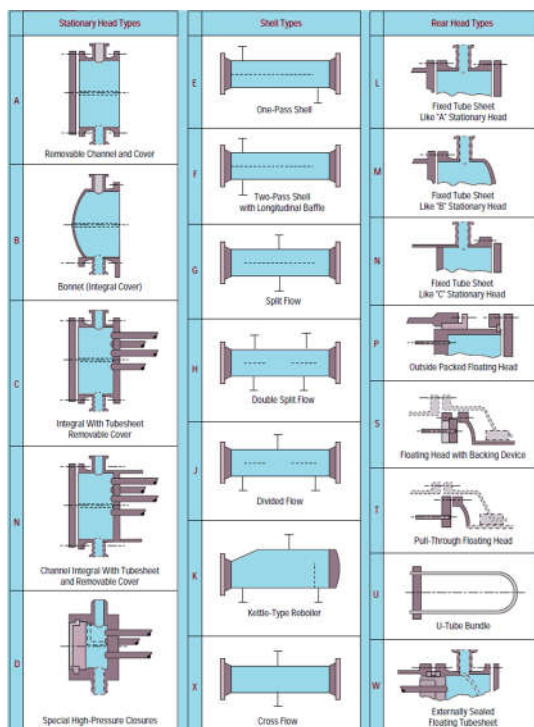
باتوجه به قیدهای موجود پروژه برای ارتقاء توان موتور، باید خنک‌کن میانی دمای هوا را به کمتر از ۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌داد، این اتفاق در سیکل بسته آب شیرین موتور امکان نخواهد داشت. چراکه دمای کاری سیکل بسته آب شیرین به منظور عملکرد مناسب موتور بین ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. از این رو به منظور کاهش دمای هوا باید از سیکل آب شور مدار خنک‌کاری استفاده نمود [۱۳]. آرایش نهایی برای موتور ارتقاء یافته پیشنهاد گردید (شکل ۲). برای این سامانه یک مبدل حرارتی آب شور و شیرین و پمپ آب شور به مدار اضافه شد. همچنین از یک مبدل روغن و پمپ روغن با ظرفیت بالاتر استفاده گردید. لازم به ذکر است هر سه این مبدل‌ها از نوع پوسته و لوله^۲ می‌باشند که به دلیل جلوگیری از خوردگی تجهیزات، آب دریا در لوله‌ها و سیال گرم (آب شیرین، روغن و هوا) در پوسته جریان دارند.



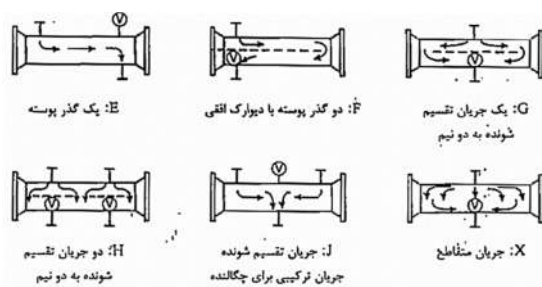
شکل ۲: آرایش پیشنهادی مبدل‌ها در سیستم خنک‌کاری موتور ارتقاء یافته دریایی سازی شده

² Shell and tube heat exchanger

¹ Keel cooling



شکل ۴: انواع مختلف کلگی‌های عقب، جلو و پوسته بر اساس استاندارد TEMA



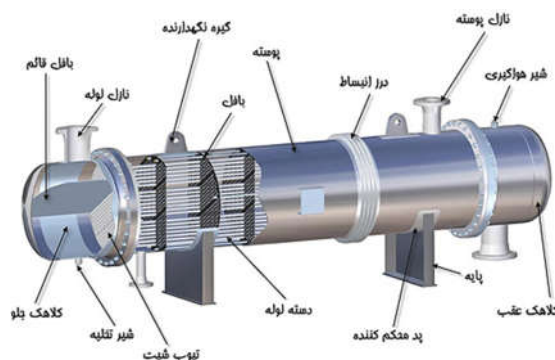
شکل ۵: طرح شماتیک رایج‌ترین انواع پوسته‌های استاندارد TEMA

H که دارای دو ورودی با تقسیم جریان به دو نیم است، مشابه پوسته G می‌باشد ولی این پوسته دارای دو نازل خروجی و دو بافل افقی است. پوسته K، ری‌بویلر^۲ کتری مانند است که دارای یک دسته لوله در کف پوسته و فضای بدون لوله در بالای آن است. این پوسته وقتی استفاده می‌شود که نیاز است بخشی از جریان ورودی به مبدل تبخیر شود و بخار به ستون تقطیر وارد گردد.

۳-۲- دسته لوله

مهم‌ترین اهداف طراحی در نظر گرفتن انبساط دمایی، تمیزکاری آسان و ایجاد کمترین هزینه ساخت می‌باشد.

این مبدل‌ها نسبت‌های بزرگی از سطح انتقال گرما به حجم و وزن را فراهم آورده و به آسانی تمیز می‌شوند و تقریباً برای هر کاربردی می‌توانند استفاده شوند. همچنین می‌توانند برای فشارهای زیاد سیال در پوسته و اختلاف فشار زیاد بین جریان‌های سرد و گرم طراحی شوند. این مبدل‌ها از لوله‌های دایره‌ای قرار گرفته در یک پوسته استوانه‌ای ساخته می‌شوند که لوله‌ها، موازی با پوسته می‌باشند.



شکل ۳: اجزای اصلی تشکیل دهنده مبدل پوسته و لوله

۳-۱- پوسته

انواع متعدد پوسته و انواع متعدد کلگی‌های جلویی و عقبی توسط انجمن سازندگان مبدل‌های لوله‌ای^۱ استاندارد شده‌اند (شکل ۴) [۱۴]. از میان انواع مختلف پوسته‌ها، پوسته نوع E بدلیل ارزانی و سادگی، رایج‌ترین پوسته است.

برای افزایش اختلاف دماهای مؤثر و در نتیجه افزایش کارایی مبدل، آرایش مخالف جهت خالص، برای یک مبدل دارای دو گذر لوله مطلوب است. این آرایش با استفاده از پوسته نوع F بدست می‌آید. سایر انواع مهم پوسته‌ها، پوسته نوع J و پوسته نوع X هستند. در پوسته J با جریان تقسیم شده، سیال ورودی در وسط قرار داده شده و به دو قسمت تقسیم می‌شود. پوسته نوع X دارای ورودی و خروجی قرار گرفته در وسط و معمولاً دارای توزیع‌کننده گنبدی شکل می‌باشد. پوسته G، با تقسیم جریان به دو نیم، دارای بافل افقی می‌باشد که دو انتهای آن‌ها برداشته شده‌است، نازل‌های ورودی و خروجی با زاویه 180° در وسط لوله‌ها هستند.

² Reboiler

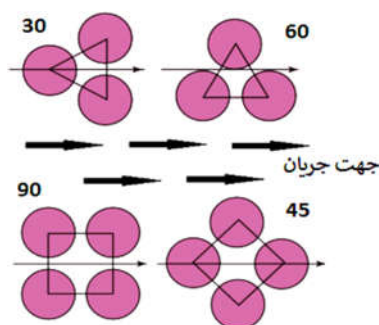
¹ TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association)

دمایی، دماهای مورد نظر حاصل نمی‌گردد و از چندین واحد به صورت سری استفاده می‌شود.

عموماً تعداد زیاد گذرهای لوله، برای افزایش سرعت سیال سمت لوله (در محدوده‌های افت فشار مجاز) و افزایش ضریب انتقال گرما و به جهت کاهش تشکیل رسوب، استفاده می‌شوند. فلز لوله معمولاً کم کربن، فولاد کم آلیاژ، فولاد ضدزنگ^۲، مس، ادمیرالیتی (آلیاژ مس، روی و قلع)، کاپرونیکل (آلیاژ مس و نیکل)، اینکونل (آلیاژ نیکل و آهن و کروم)، آلومینیوم (به شکل آلیاژها)، یا تیتانیوم است. ضخامت دیواره لوله‌های مبدل حرارتی بر مبنای شاخص ضخامت بیرمنگهام^۳ (BWG) استاندارد می‌گردند. قطرهای کوچک لوله (۸ تا ۱۵ میلیمتر) برای سطح گرمایی بزرگتر در واحد حجم، به بقیه ترجیح دارند؛ ولی برای تمیز کاری داخل لوله، قطر نباید از ۲۰ mm کوچک‌تر باشد. نسبت قطر پوسته به طول لوله باید در محدوده ۱/۵ تا ۱/۱۵ باشد. حداکثر طول لوله به واسطه محل قرارگیری و جانمایی مبدل و محدودیت‌های حمل و نقل، به حدود ۳۰ متر محدود می‌شود.

۳-۴- جانمایی لوله‌ها

جانمایی لوله، بوسیله زاویه بین لوله‌ها، مطابق شکل ۸ نشان داده شده است. جانمایی ۳۰°، بیشترین تراکم لوله را حاصل می‌کند و بنابراین بیشتر استفاده می‌شود؛ مگر اینکه نیازهای دیگری، جانمایی دیگری را تحمیل کند. گام لوله^۴ معمولاً به نحوی انتخاب می‌شود که نسبت گام^۵ بین ۱/۲۵ و ۱/۵ باشد.



شکل ۸: زوایای جانمایی لوله در مبدل حرارتی پوسته-لوله

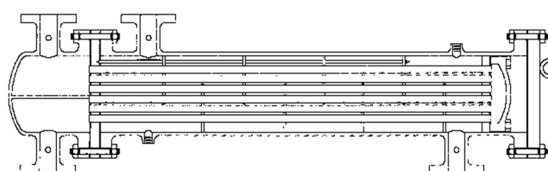
نوعی از طراحی که امکان انبساط گرمایی مستقل لوله‌ها و پوسته را فراهم می‌کند، لوله U شکل می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. لوله U شکل نمی‌تواند با وسایل مکانیکی تمیز گردد. در این نوع از دسته لوله‌ها، فقط تعداد زوجی از گذر لوله‌ها می‌تواند بکار رود و تنها لوله‌های قرار گرفته در ردیف بیرونی دسته لوله قابل تعویض می‌باشند.

نوع دیگر دسته لوله، در مبدل با صفحه لوله ثابت است. در این انتخاب کم هزینه، فقط انبساط حرارتی نمی‌تواند وجود داشته باشد که می‌توان با استفاده از فانوسی‌ها^۱، این امر را امکان‌پذیر نمود. در این طراحی، لوله‌های تکی قابل تعویض هستند و تمیزکاری لوله بصورت مکانیکی آسان است.

نوع کلاسیک از طراحی یک سر شناور با قابلیت بیرون کشیدن سر و دسته لوله‌ها از پوسته، در شکل ۷ نشان داده شده است. دسته لوله می‌تواند با حداقل نیاز برای بازکردن قطعات، خارج شود که در واحدهای با تشکیل رسوب سنگین، مهم است.



شکل ۶: دسته لوله U شکل



شکل ۷: دسته لوله با یک سر شناور [۱۵]

۳-۳- لوله‌ها و گذرهای لوله

فقط پوسته E با یک گذر و پوسته F با دو گذر لوله، می‌توانند جریان مخالف جهت ایجاد کنند. برای سایر تعداد گذرهای لوله، به استفاده از ضریب تصحیح تغییرات دما، F نیاز است. در برخی موارد، به دلیل نیاز به تقاطع

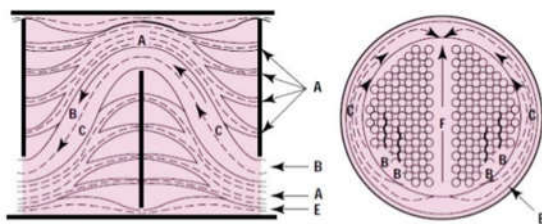
^۲ Stainless steel

^۳ Birmingham Wire Gauge

^۴ Tube pitch

^۵ Pitch ratio

^۱ Lantern



شکل ۱۰: دیاگرام نشان دهنده مسیرهای مختلف جریان سیال درون پوسته

جریان A نشتی در لقی بین لوله‌ها و بافل می‌باشد. جریان B جریان اصلی متقاطع یا دسته لوله است. این جریان، جریان مطلوب در سمت پوسته مبدل می‌باشد. جریان C جریان کنارگذر (میان‌بر) دست لوله است که در اطراف دسته لوله، بین بیرونی‌ترین لوله‌ها در دسته لوله و سطح داخلی پوسته جریان دارد. جریان E جریان نشتی بین بافل و پوسته است که در لقی بین بافل‌ها و قطر داخلی پوسته جریان دارد. سپس جریان F وجود دارد که سیال در هر کانالی که برای ایجاد چندین گذر لوله در دسته لوله‌ها بوجود می‌آید جریان می‌یابد.

ابتدا ضرایب انتقال حرارت هر جریان و ضرایب رسوب مربوطه باید تخمین زده شود. جداول تخمین ضرایب انتقال گرمای هر جریان و ضرایب کلی انتقال حرارت در کتب مرجع و هندبوک‌های متعددی وجود دارند.

ضریب کلی انتقال گرما، U_o بر مبنای قطر خارجی لوله‌ها می‌تواند از مقادیر تخمین زده شده ضرایب انتقال حرارت هر جریان، مقاومت حرارتی دیواره و رسوب و بازده کلی سطح، با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردد:

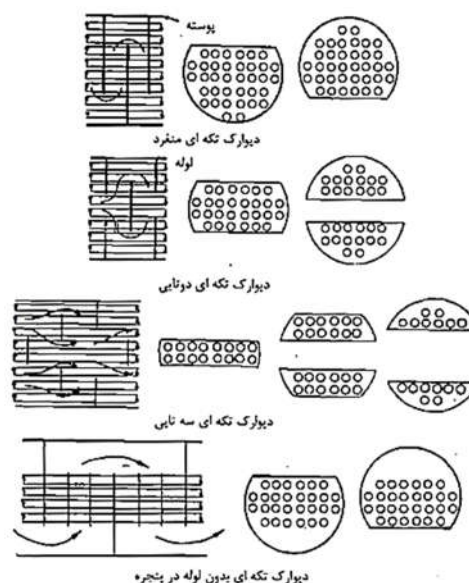
$$\frac{1}{U_o} = \frac{A_o}{A_i} \left(\frac{1}{\eta_i h_i} + \frac{R_{fi}}{\eta_i} \right) + A_o R_w + \frac{R_{fo}}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_o h_o} \quad (1)$$

در این مرحله، تعیین توزیع مقاومت‌های حرارتی تحت شرایط تمیز و رسوب گرفته، مفید می‌باشد. برای مبدل‌های حرارتی دارای یک گذر لوله، جریان مخالف جهت خالص وجود دارد و $F=1$ می‌باشد. برای طراحی مقدماتی پوسته با هر تعداد زوج از گذرهای لوله، F می‌تواند برابر 0.9 در نظر گرفته شود. بنابراین بار حرارتی می‌تواند از موازنه گرمایی به صورت رابطه ۲ تخمین زده شود:

$$Q = (\dot{m} C_p)_c (T_{c2} - T_{c1}) = (\dot{m} C_p)_h (T_{h1} - T_{h2}) \quad (2)$$

۳-۵- بافل

بافل‌ها دو کار انجام می‌دهند؛ اولین و مهم‌ترین آن، نگهداشتن لوله‌ها و استحکام سازه و جلوگیری از لرزش و خمیده شدن لوله می‌باشد. دومین کار، منحرف کردن جریان در جهت عرضی و متقاطع با دسته لوله‌ها برای بدست آوردن ضریب انتقال گرمای بزرگتر است. بافل‌ها می‌توانند به انواع عرضی^۱ و طولی^۲ دسته‌بندی شوند (برای مثال پوسته نوع F دارای بافل طولی است). انواع بافل‌های صفحه‌ای مورد استفاده، در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. فاصله بهینه بافل‌ها بین 0.4 تا 0.6 قطر پوسته است و معمولاً برش ۲۵ تا ۳۵ درصد بافل توصیه می‌شود.



شکل ۹: انواع بافل‌های صفحه‌ای

۴- طراحی مبدل حرارتی

۴-۱- روش مقدماتی Kern

محاسبات قابل انجام توسط این روش برای تحلیل انتقال حرارت و آفت فشار سمت پوسته، یک روش ساده شده می‌باشد. تحلیل سمت پوسته به سادگی تحلیل سمت لوله نیست، این بدان دلیل است که جریان در پوسته، پیچیده بوده و به صورت ترکیبی از جریان متقاطع، جریان در پنجره بافل، جریان‌های کنارگذر بافل-پوسته و دسته لوله-پوسته می‌باشد. این الگوی پیچیده جریان، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

¹ Transverse baffles

² Longitudinal baffles

از سوی دیگر مساحت تصویر شده جانمایی لوله‌ها، A_1 عبارتست از:

$$A_1 = (CL)P_T^2 \quad (۶)$$

که P_T گام لوله‌ها و CL ثابت جانمایی لوله است که مقادیر آن به ازای جانمایی‌های مختلف لوله در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲: مقادیر مختلف CL به ازای جانمایی‌های مختلف لوله

نوع جانمایی لوله	مقدار ثابت CL
۴۵ و ۹۰ درجه	۱/۰
۳۰ و ۶۰ درجه	۰/۸۷

بنابراین تعداد کل لوله‌ها بوسیله معادله ۷ بدست خواهد آمد:

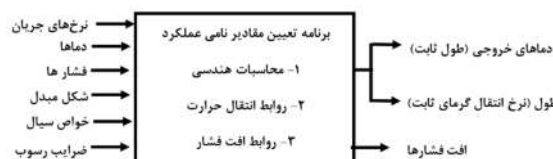
$$N_t = 0.875 \left(\frac{CTP}{CL} \right) \frac{D_s^2}{P_T^2} \quad (۷)$$

نهایتاً با ترکیب معادلات رابطه زیر برای محاسبه قطر پوسته مبدل بدست می‌آید:

$$D_s = 0.637 \sqrt{\frac{CL}{CTP} \left[\frac{A_o (PR)^2 d_o}{L} \right]^{1/2}} \quad (۸)$$

۴-۲- تعیین مقادیر نامی عملکرد در طراحی مقدماتی

پس از انتخاب و محاسبه پارامترهای آزمایشی طراحی ساختار مبدل حرارتی (یعنی پس از آنکه مبدل حرارتی با مشخصات فرایند انتخاب و تعیین شد)، این داده‌ها می‌توانند به عنوان ورودی به یک برنامه کامپیوتری یا محاسبات دستی، برای تعیین مقادیر نامی عملکرد استفاده شوند. طرح برنامه تعیین مقادیر نامی عملکرد در دیاگرام شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۱: ساختار برنامه تعیین مقادیر نامی عملکرد مبدل حرارتی

اکنون نیاز است تا اختلاف دمای لگاریتمی یا LMTD برای جریان مخالف جهت، از چهار دمای ورودی داده شده، مطابق معادله ۳ محاسبه گردد. اگر سه دما معلوم باشند، دمای چهارم می‌تواند از موازنه حرارتی بدست آید.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right)} \quad (۳)$$

اکنون در این مرحله و سعی اول، مساحت سطح انتقال حرارت محاسبه شده در قسمت بالا باید به ابعاد منطقی مبدل حرارتی تبدیل گردد. هدف، یافتن تعداد لوله‌هایی به قطر d_o و قطر پوسته D_s است به نحوی که لوله‌ها به تعداد N_t در پوسته جای بگیرد. بنابراین برای طول مشخص L ، مساحت سطح خارجی انتقال حرارت عبارتست از:

$$A_o = \pi d_o N_t L \quad (۴)$$

بدین ترتیب می‌توان قطر پوسته D_s را یافت تا تعداد لوله‌های معادل با N_t و با قطر خارجی d_o را در بگیرد.

تعداد کل لوله‌ها، N_t ، در پوسته می‌تواند با تقریب مناسبی به صورت تابعی از قطر پوسته پیش‌بینی شود. این امر با تقسیم سطح مقطع داخلی پوسته بر مساحت تصویر شده جانمایی لوله‌ها، A_1 ، صورت می‌پذیرد.

$$N_t = (CTP) \frac{\pi D_s^2}{4 A_1} \quad (۵)$$

در معادله ۵، CTP یک مقدار ثابت است که مربوط به شماره لوله^۱ است که پوشیده شدن ناقص قطر پوسته با لوله‌ها را در محاسبه وارد می‌کند. این پوشش ناقص، بدلیل لقی ضروری بین پوسته و دایره بیرونی لوله‌ها و حذف لوله‌ها به دلیل مسیرهای گذر لوله برای طرح‌های دارای چند گذر لوله می‌باشد. بر مبنای انتخاب پوسته و صفحه لوله ثابت، مقادیر جدول ۱ پیشنهاد می‌شوند.

جدول ۱: مقادیر مختلف CTP در گذرهای مختلف لوله.

تعداد گذر لوله	مقدار ثابت CTP
یک گذر لوله	۰/۹۳
دو گذر لوله	۰/۹
سه گذر لوله	۰/۸۵

^۱ Tube count calculation constant

۳-۴- ضریب انتقال حرارت سمت پوسته

ضریب انتقال حرارت سمت بیرونی دسته لوله‌ها، ضریب انتقال حرارت سمت پوسته گفته می‌شود. ضریب انتقال حرارت هنگامی که دسته لوله همراه با بافل استفاده می‌شود. به علت اغتشاش، جریان در طول محور لوله‌ها نسبت به حالت دسته لوله بدون بافل بزرگ‌تر است. اگر هیچ بافلی وجود نداشته باشد جریان داخل پوسته، در امتداد طول مبدل حرارتی خواهد بود. سپس ضریب انتقال حرارت می‌تواند بر مبنای قطر معادل، De ، محاسبه گردد. در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با بافل، سرعت سیال به دلیل عبور از میان لوله‌های مجاور، در عرض دسته لوله نوسان می‌کند. لذا روابط به دست آمده برای جریان داخل لوله‌ها با بافل‌های تکه‌ای بکار نمی‌رود. Kern رابطه ۹ را برای محاسبه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته پیشنهاد کرد:

$$\frac{h_o De}{k} = 0.36 \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{De G_s}{\mu} \right)^{0.55} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (9)$$

$$2000 < Re_s = \frac{De G_s}{\mu} < 10^6$$

که در آن h_o ضریب انتقال حرارت سمت پوسته، De قطر معادل سمت پوسته و G_s سرعت جرمی سمت پوسته است.

خواص در متوسط دمای سیال در پوسته محاسبه می‌شوند. در رابطه بالا قطر معادل، De ، اساساً برای جریان در امتداد طول (به جای امتداد عرضی) پوسته محاسبه می‌شوند. قطر معادل پوسته چهار برابر سطح خالص جریان تقسیم بر محیط‌تر شده‌است، که سطح خالص جریان به کمک محل قرارگیری لوله‌ها بر روی صفحه لوله (برای جانمایی با گام‌های مربعی و یا مثلثی) تعیین می‌گردد.

در سمت پوسته، مساحت جریان آزادی وجود ندارد که با آن بتوان سرعت جرمی سمت پوسته را محاسبه نمود. به این دلیل مقادیر G_s می‌توانند بر مبنای حداکثر سطح جریان فرضی، که فاصله بین لوله‌ها در ردیفی واقع در قطر پوسته تشکیل می‌دهند تعریف گردند.

متغیرهایی که بر سرعت اثر می‌گذارند، قطر داخلی پوسته (DS)، لقی C بین لوله‌های مجاور، اندازه گام PT و فاصله بافل (B)، می‌باشند. عرض سطح جریان در ردیف لوله‌های

قرار گرفته در مرکز پوسته، $C \times (D_s/P_T)$ می‌باشد و طول سطح جریان، فاصله دیوارک B ، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مساحت جریان متقاطع با دسته لوله در مرکز پوسته (As) عبارت است از:

$$A_s = \frac{D_s \times C \times B}{P_T} \quad (10)$$

نهایتاً نرخ جرمی جریان سمت پوسته با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G_s = \frac{\dot{m}_s}{A_s} \quad (11)$$

۳-۱-۴- اُفت فشار سمت پوسته

اُفت فشار سمت پوسته به تعداد لوله‌ها، تعداد دفعات عبور جریان از روی دسته لوله بین بافل‌ها و طول هر تقاطع بستگی دارد. اگر فرض شود که طول دسته لوله با چهار بافل تقسیم گردد، در نتیجه تمام سیال، پنج بار در عرض دسته لوله با آن تقاطع خواهد داشت.

اُفت فشار در سمت پوسته با عبارت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2 (N_b + 1) D_s}{2 \rho D_e \phi_s} \quad (12)$$

که $\phi_s = \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14}$ ، N_b تعداد بافل‌ها و $(N_b + 1)$ تعداد دفعاتی است که سیال در پوسته، دسته لوله را قطع می‌کند. f ضریب اصطکاک برای پوسته است.

۳-۱-۵- اُفت فشار سمت لوله

اُفت فشار در سمت لوله، با داشتن تعداد گذرهای لوله و طول مبدل حرارتی محاسبه می‌شود.

کل اُفت فشار سمت لوله از معادله ۱۳ بدست می‌آید:

$$\Delta P_{total} = \left(4f \frac{LN_p}{d_i} + 4N_p \right) \rho \frac{U_m^2}{2} \quad (13)$$

۳-۲- روش Bell-Delaware

روش Bell-Delaware، اثرات جریان‌های مختلف نشستی و کنارگذر را بر اُفت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته لحاظ می‌کند. در روش Bell-Delaware جریان B ، جریان اصلی و اساسی می‌باشد. سایر جریان‌ها، جریان B را کاهش می‌دهند و باعث تغییر توزیع دمای سمت پوسته می‌گردند که منجر به کاهش ضریب انتقال گرما می‌شود.

۳-۲-۱- ضریب انتقال حرارت سمت پوسته

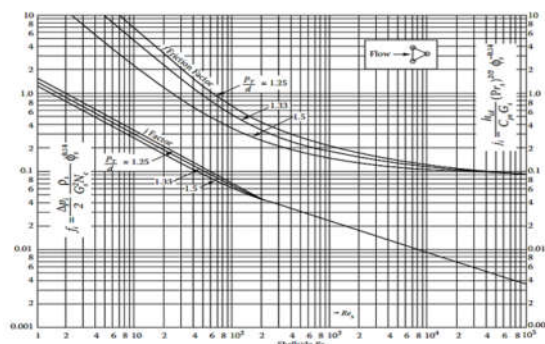
معادله پایه برای محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط سمت پوسته، مطابق با رابطه ۱۴ ارائه می‌شود:

$$h_o = h_{id} J_c J_b J_s J_r \quad (۱۴)$$

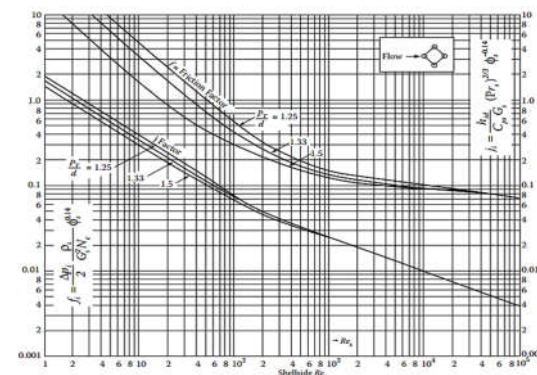
در این معادله h_{id} مقدار ایده‌آل ضریب انتقال حرارت برای جریان کاملاً متقاطع با مجموعه لوله ایده‌آل می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{id} = j_i c_{ps} \left(\frac{\dot{m}_s}{A_s} \right) \left(\frac{k_s}{c_{ps} \mu_s} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_s}{\mu_{s,w}} \right)^{0.14} \quad (۱۵)$$

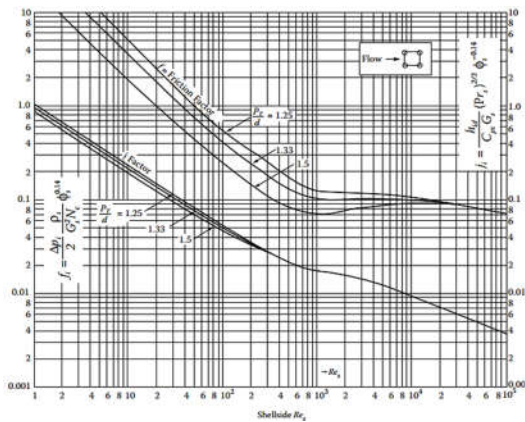
در رابطه بالا j_i مربوط به کولبرن^۱ برای یک مجموعه لوله ایده‌آل و A_s مساحت سطح جریان متقاطع با لوله‌ها در خط مرکز پوسته، در بین دو بافل می‌باشد. نمودارهایی برای تعیین این پارامتر به صورت تابعی از عدد رینولدز جریان سمت پوسته، جانمایی لوله و اندازه گام لوله‌ها وجود دارند که در همان نمودارها ضرایب اصطکاک نیز جهت محاسبات افت فشار ارائه شده‌اند.



شکل ۱۲: ضرایب j_i و f_i مجموعه لوله ایده‌آل برای جانمایی تناوبی ۳۰ درجه [۱۵]



شکل ۱۳: ضرایب j_i و f_i مجموعه لوله ایده‌آل برای جانمایی تناوبی ۴۵ درجه [۱۵]



شکل ۱۴: ضرایب j_i و f_i مجموعه لوله ایده‌آل برای جانمایی تناوبی ۹۰ درجه [۱۵]

J_c ضریب تصحیح برای درصد برش بافل‌ها و فاصله بین آن‌هاست. J_b ضریب تصحیح برای اثرات نشستی بافل، شامل نشستی مابین دسته لوله و بافل و نشستی مابین پوسته و بافل (جریان‌های A و E) می‌باشد.

J_b ضریب تصحیح برای اثرات جریان‌های کنارگذر (میان‌بر) دسته لوله ناشی از لقی بین بیرونی‌ترین لوله‌ها و پوسته از یک طرف و کانال بوجود آمده در دسته لوله برای ایجاد گذرهای لوله از طرف دیگر (جریان‌های C و F) می‌باشد.

J_s ضریب تصحیح برای فاصله متغیر بافل‌ها در ورودی و خروجی پوسته می‌باشد

ضریب J_r زمانی به کار می‌رود که عدد رینولدز سمت پوسته کمتر از ۱۰۰ باشد. اگر $Re_s < 20$ باشد، این ضریب کاملاً مؤثر است. اگر $Re_s > 100$ باشد، J_r برابر یک خواهد بود. اثر ترکیبی تمام این ضرایب تصحیح برای مبدل حرارتی پوسته و لوله با طراحی خوب و منطقی، از مرتبه ۰/۶ می‌باشد.

۳-۲-۲- افت فشار سمت پوسته

برای مبدل حرارتی نوع پوسته و لوله با جریان‌های کنارگذر و نشستی، افت فشار کلی از نازل ورودی تا نازل خروجی برابر است با:

$$\Delta P_s = \Delta P_e + \Delta P_w + \Delta P_c \quad (۱۶)$$

$$\Delta P_s = [(N_b - 1) \Delta P_{bi} R_b + N_b \Delta P_{wi}] R_l + 2 \Delta P_{bi} (1 + N_{cw} / N_c) R_b R_s \quad (۱۷)$$

$$\Delta P_{bi} = 4 f_i \frac{G_s^2}{2 \rho_s} \left(\frac{\mu_{s,w}}{\mu_s} \right)^{0.14}, \quad \Delta P_{wi} = \frac{\dot{m}_s^2 (2 + 0.6 N_{cw})}{2 \rho_s A_s A_w} \quad (۱۸)$$

^۱ Coulborn

شده در جدول ۳ آورده شده است. هر سه مبدل حرارتی مورد نیاز در سامانه خنک کاری مدار باز موتور، از نوع پوسته و لوله در نظر گرفته شده اند. همچنین بدلیل جلوگیری از خوردگی تجهیزات و رسوب زای بودن آب دریا (سیال سرد)، این سیال در هر سه مبدل درون لوله جریان دارد و سیال گرم (هوا، روغن و آب شیرین) در سمت پوسته جریان دارند. لوله های هر سه مبدل حرارتی نیز، بدلیل عبور سیال با خوردگی بالا (آب دریا)، از جنس مس-نیکل ۹۰/۱۰ در نظر گرفته می شوند.

جدول ۳: مقادیر ورودی در نظر گرفته شده برای طراحی مبدل های حرارتی موتور دریایی سازی شده

پارامتر	مقدار
دمای هوای ورودی به اینترکولر	۱۷۵°C
دمای هوای خروجی از اینترکولر	۴۰°C
بیشینه دمای روغن ورودی	۱۲۰°C
دمای بیشینه آب شیرین	۹۵°C
بار حرارتی مطلوب مبدل آب شیرین	۳۰۰ kW
دبی هوا	۰/۵ kg/s
دبی روغن	۱/۱ kg/s
دبی آب دریا	۴/۹ kg/s
دبی آب شیرین	۷/۱ kg/s
ضریب رسوب آب دریا [۲۰]	m2K/W ۰/۰۰۰۱۷۶

۵-۱- طراحی مبدل اینترکولر

این مبدل به منظور خنک سازی هوای خروجی از توربوشارژر که دمای ۱۷۵°C را دارد به دمای مطلوب ۴۰°C استفاده می گردد. هوا بعنوان سیال گرم در سمت پوسته و بصورت جریان مخالف با آب دریا بعنوان سیال سرد که در سمت لوله جریان دارد؛ در تماس است. دو مورد از این طراحی ها بر اساس دو پاس لوله (نوع BEU) و دو مورد دیگر بر اساس یک پاس لوله (نوع BEM) تحلیل و طراحی شده اند.

$$N_{cw} = 0.8L_c/P_p, \quad N_b \quad (19)$$

$$= L/B - 1, \quad N_c = d_i(1 - 2L_c/D_s)/P_p \quad (20)$$

$$\Delta P_c = \Delta P_{bi}(N_b - 1)R_l R_b \quad (21)$$

$$\Delta P_w = \Delta P_{wi}N_b R_l \quad (22)$$

$$\Delta P_e = 2\Delta P_{bi} \left(\frac{N_c + N_{cw}}{N_c} \right) R_s R_b \quad (23)$$

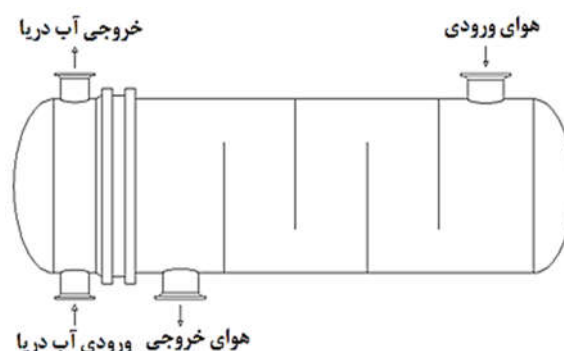
اُفت فشار دسته لوله در فاصله بین دو دیوارک داخلی (بجز دو انتهای مبدل) می باشد. R_l ضریب تصحیح برای اثرات ناشی بافل (جریان های A و E) است و معمولاً در محدوده مقادیر ۰/۵ تا ۰/۴ قرار دارد، R_b ضریب تصحیح برای جریان های کنارگذر (جریان های C و F) می باشد و عموماً ۰/۸ تا ۰/۵ R_b است و این پارامتر بستگی به ساختار مبدل حرارتی و تعداد باریکه های آب بندی دارد. N_b تعداد بافل ها و $(N_b - 1)$ تعداد فواصل بین بافل های داخلی (بجز دو انتها) است. در رابطه بالا ΔP_{wi} اُفت فشار عبور جریان از یک دسته لوله ایده آل معادل، در مقطع پنجره می باشد.

N_c تعداد ردیف های لوله های قطع شده در دسته لوله توسط جریان متقاطع (تعداد ردیف لوله های قطع شده توسط هر دو بافل مجاور) و N_{cw} تعداد ردیف های لوله های قطع شده توسط جریان متقاطع، در هر پنجره بافل است. R_s ضریب تصحیح برای نواحی ورودی و خروجی است که به دلیل وجود نازل های ورودی و خروجی، این قسمت ها دارای فاصله بافل های متفاوت با فواصل بافل های میانی هستند.

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به طراحی مبدل های حرارتی مورد نیاز برای سیکل باز (آب دریا) مدار خنک کاری موتور زمینی ارتقاء یافته بوسیله نرم افزار HTRI ارائه می گردد. در طراحی هر مبدل سعی شده است تا طراحی های مختلف بر اساس ابعاد و سایر مشخصات فیزیکی مبدل مورد نیاز انجام گردد تا تعداد انتخاب های کاربر برای انتخاب مبدل بر اساس محدودیت ناشی از مکان قرارگیری مبدل درون موتور دریایی سازی شده باز باشد.

مقادیر ورودی دماها و دبی های در نظر گرفته شده برای طراحی مبدل های حرارتی موتور ارتقاء یافته دریایی سازی-



شکل ۱۵: شماتیکی از نوع مبدل اینترکولر طراحی شده با دو پاس لوله (BEU)، مکان قرارگیری نازل‌های ورودی و خروجی دو سیال و آرایش بافل‌ها

جدول ۴: مشخصات هندسی اینترکولر شماره ۱

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEU
قطر داخلی پوسته (mm)	۲۳۵
تعداد لوله‌ها	۲۵۶
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۹/۵۲۵
طول لوله‌ها (mm)	۴۸۰
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۲
جنس لوله‌ها	مس/نیکل
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۵۸۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۴
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۸۰

جدول ۵: مشخصات عملکردی اینترکولر شماره ۱

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۴۰۲
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۴۸۱۸
بار حرارتی (kW)	۶۸/۸
سطح انتقال حرارت (m ²)	۴/۰۹
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۳۳۰
آفت فشار پوسته (kPa)	۳۰
آفت فشار لوله (kPa)	۸

جدول ۶: مشخصات هندسی اینترکولر شماره ۲

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEU
قطر داخلی پوسته (mm)	۱۹۵
تعداد لوله‌ها	۳۹۰
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۶/۳۵
طول لوله‌ها (mm)	۳۷۰
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۲
جنس لوله‌ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۴۵۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۴
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۷۵

جدول ۷: مشخصات عملکردی اینترکولر شماره ۲

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۵۴۲
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۱۰۷۲۸
بار حرارتی (kW)	۶۸/۸
سطح انتقال حرارت (m ²)	۳/۲
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۴۳۳
آفت فشار پوسته (kPa)	۴۳
آفت فشار لوله (kPa)	۹

با مقایسه طراحی‌های شماره ۱ و ۲ می‌توان پی برد که مبدل شماره ۲ با توجه به ابعاد پوسته و قطر لوله‌های کوچکتر وزنی در حدود ۷ درصد کمتر از مبدل شماره ۱ دارد. ضمن اینکه ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۲، حدوداً ۳۱ درصد بیشتر از مبدل شماره ۱ بدست می‌آید. شایان ذکر است که بدلیل کوچکتر بودن قطر پوسته و لوله‌ها در طراحی شماره ۲ در مقایسه با طراحی شماره ۱، آفت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۱ بیشتر بدست می‌آید. بنابراین می‌توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۲

۱	تعداد پاس لوله‌ها
مس/نیکل ۹۰/۱۰	جنس لوله‌ها
آلومینیوم	جنس پوسته
۵۴۰	طول کل مبدل (mm)
۳۰ درجه	آرایش لوله‌ها
۳	تعداد بافل
۳۸	وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)

جدول ۹: مشخصات عملکردی اینترکولر شماره ۳

مقدار	پارامتر
۵۲۸	ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)
۳۹۸۳	ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)
۶۸/۸	بار حرارتی (kW)
۳/۴۵	سطح انتقال حرارت (m ²)
۳۸۲	ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)
۴۷/۵	افت فشار پوسته (kPa)
۶/۲	افت فشار لوله (kPa)

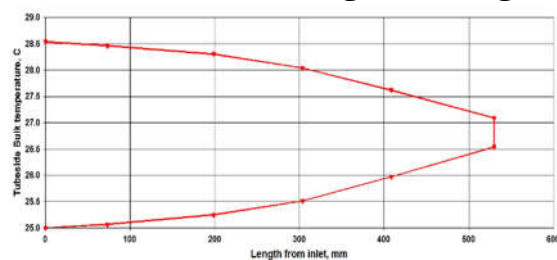
جدول ۱۰: مشخصات عملکردی اینترکولر شماره ۴

مقدار	پارامتر
۴۱۰	ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)
۱۹۰۳	ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)
۶۸/۸	بار حرارتی (kW)
۴/۵۷	سطح انتقال حرارت (m ²)
۲۹۳	ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)
۳۶/۴	افت فشار پوسته (kPa)
۵	افت فشار لوله (kPa)

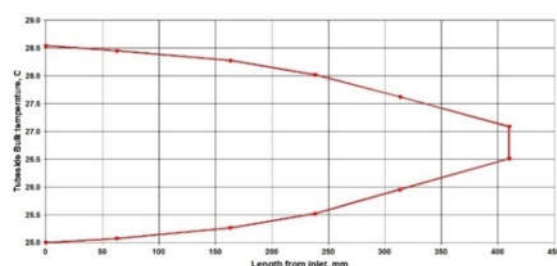
جدول ۱۱: مشخصات هندسی اینترکولر شماره ۴

مقدار	پارامتر
BEM	نوع مبدل
۲۲۸	قطر پوسته (mm)
۲۷۲	تعداد لوله‌ها
۹/۵۲۵	قطر خارجی لوله‌ها (mm)
۶۰۰	طول لوله‌ها (mm)
۱/۲۴۵	ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)
۱	تعداد پاس لوله‌ها
مس/نیکل ۹۰/۱۰	جنس لوله‌ها
آلومینیوم	جنس پوسته

می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. همچنین شکل ۲۰ و ۲۱ برترتیب توزیع دمای سیال درون لوله در طول مبدل حرارتی را به نمایش می‌گذارند.

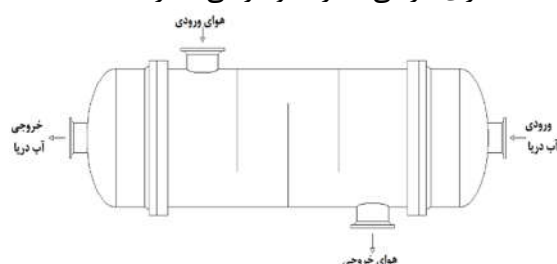


شکل ۱۶: توزیع دمای سیال درون لوله طی عبور از مبدل در طراحی شماره یک



شکل ۱۷: توزیع دمای سیال درون لوله طی عبور از مبدل در طراحی شماره ۲

جدول ۸ تا ۱۱ مشخصات مبدل اینترکولر با یک پاس لوله (BEM) برای طراحی شماره ۳ و طراحی شماره ۴ است.



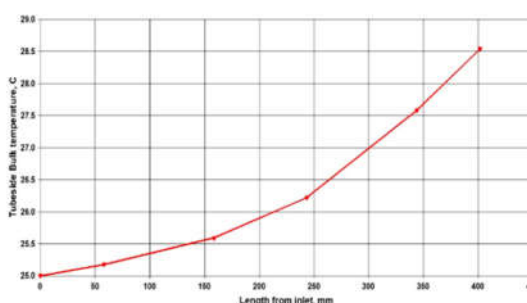
شکل ۱۸: شماتیکی از نوع مبدل اینترکولر طراحی شده با یک پاس لوله، مکان قرارگیری نازل‌های ورودی و خروجی دو سیال و آرایش بافل‌ها

جدول ۸: مشخصات هندسی اینترکولر شماره ۳

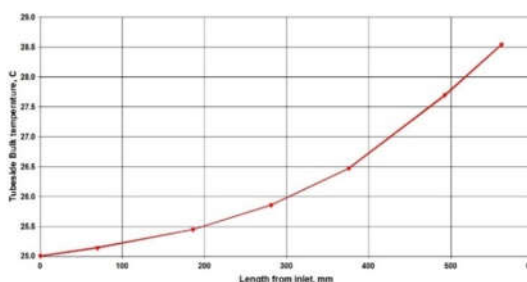
مقدار	پارامتر
BEM	نوع مبدل
۱۹۳	قطر پوسته (mm)
۴۳۰	تعداد لوله‌ها
۶/۳۵	قطر خارجی لوله‌ها (mm)
۴۴۰	طول لوله‌ها (mm)
۱/۲۴۵	ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)

طول کل مبدل (mm)	۷۳۰
آرایش لوله ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۴
وزن تقریبی پوسته و لوله ها (kg)	۵۱

با مقایسه طراحی های شماره ۳ و ۴ می توان پی برد که مبدل شماره ۳ با توجه به ابعاد پوسته و قطر لوله های کوچکتر وزنی در حدود ۲۵ درصد کمتر از مبدل شماره ۴ دارد. ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۳، حدوداً ۳۰ درصد بیشتر از مبدل شماره ۴ بدست می آید. شایان ذکر است که بدلیل کوچکتر بودن قطر پوسته و لوله ها در طراحی شماره ۳ در مقایسه با طراحی شماره ۴، افت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۴ بیشتر بدست می آید. بنابراین می توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۳ می تواند انتخاب مناسبتری باشد. همچنین شکل ۱۹ و ۲۰ و بترتیب توزیع دمای سیال درون لوله را نشان می دهد.



شکل ۱۹: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل در طراحی شماره ۳



شکل ۲۰: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل در طراحی شماره ۴

۵-۲- طراحی مبدل خنک ساز روغن

با توجه به کاتالوگ موتورهای دریایی مختلف نوع این مبدل حرارتی پوسته و لوله در نظر گرفته شده است. این

مبدل به منظور خنک سازی روغن داغ برگشتی از روانکاری قسمت های مختلف موتور، که حداکثر دمای 120°C را دارد به دمای مطلوب 85°C استفاده می گردد. روغن داغ بعنوان سیال گرم در سمت پوسته و بصورت جریان مخالف با آب دریا بعنوان سیال سرد که در سمت لوله جریان دارد در تماس است. ضریب رسوب برای سمت پوسته (روغن) نیز مقدار 0.001 در نظر گرفته شده است. جدول ۱۲ تا ۱۵ مشخصات مبدل خنک کن روغن با دو پاس لوله (BEU) برای طراحی شماره ۱ و طراحی شماره ۲ و شکل ۲۱ نیز شماتیک این طراحی است.

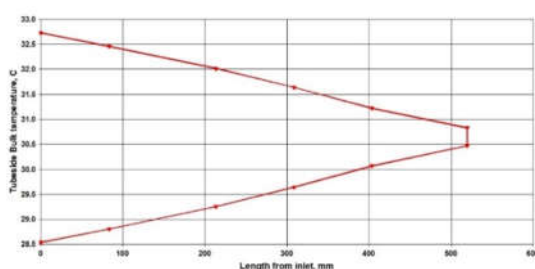
جدول ۱۲: مشخصات هندسی خنک کن روغن شماره ۱

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEU
قطر داخلی پوسته (mm)	۲۳۴
تعداد لوله ها	۱۳۶
قطر خارجی لوله ها (mm)	۱۲/۷
طول لوله ها (mm)	۴۷۰
ضخامت دیواره لوله ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله ها	۲
جنس لوله ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۵۷۰
آرایش لوله ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۴
وزن تقریبی پوسته و لوله ها (kg)	۳۰

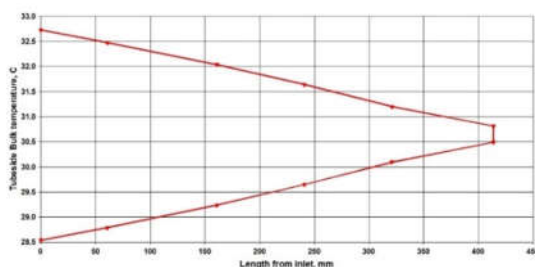
جدول ۱۳: مشخصات عملکردی خنک کن روغن شماره ۱

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت سمت پوسته (W/mK)	۱۱۶۶
ضریب انتقال حرارت سمت لوله (W/mK)	۴۸۷۵
بار حرارتی (kW)	۸۵/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۲/۹۳
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۴۲۵
افت فشار سمت پوسته (kPa)	۰/۸۵
افت فشار سمت لوله (kPa)	۷/۵

دارد. ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۲، حدوداً ۲۲ درصد بیشتر از مبدل شماره ۱ بدست می‌آید. شایان ذکر است که بدلیل کوچک‌تر بودن قطر پوسته و لوله‌ها در طراحی شماره ۲ در مقایسه با طراحی شماره ۱، افت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۱ بیشتر بدست می‌آید. بنابراین می‌توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۲ می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. شکل ۲۶ و ۲۷ بترتیب توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) در طول مبدل حرارتی را در طراحی‌های شماره ۱ و شماره ۲ به نمایش می‌گذارند.

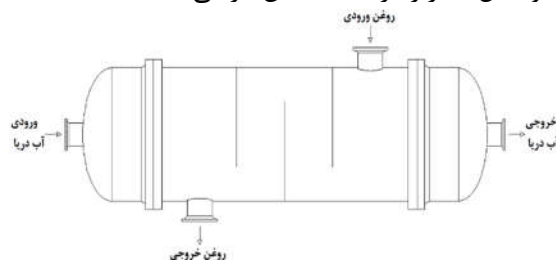


شکل ۲۲: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل در طراحی شماره ۱



شکل ۲۳: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل در طراحی شماره ۲

جدول ۱۶ تا ۱۹ مشخصات مبدل خنک‌کن روغن با یک پاس لوله (BEU) برای طراحی شماره ۳ و طراحی شماره ۴ و شکل ۲۴ زیر نیز شماتیک این طراحی است.



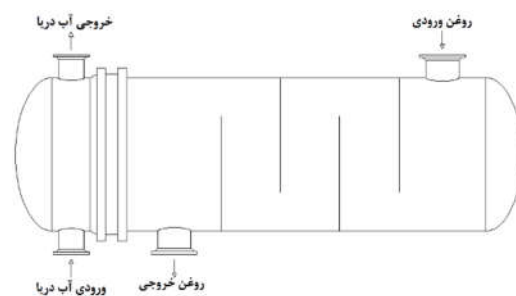
شکل ۲۴: شماتیک از نوع مبدل خنک‌کن روغن طراحی شده با یک پاس لوله (BEM)

جدول ۱۴: مشخصات هندسی خنک‌کن روغن شماره ۲

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEU
قطر داخلی پوسته (mm)	۱۷۱
تعداد لوله‌ها	۲۹۰
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۶/۳۵
طول لوله‌ها (mm)	۳۸۰
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۲
جنس لوله‌ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۵۰۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۴
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۲۳

جدول ۱۵: مشخصات عملکردی خنک‌کن روغن شماره ۲

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۱۹۷۵
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۱۵۵۱۰
بار حرارتی (kW)	۸۵/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۲/۳۹
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۵۱۹
افت فشار پوسته (kPa)	۱/۹
افت فشار لوله (kPa)	۸/۶



شکل ۲۵: شماتیک از نوع مبدل خنک‌کن روغن طراحی شده با یک پاس لوله (BEM)

با مقایسه طراحی‌های شماره ۱ و ۲ می‌توان پی برد که مبدل شماره ۲ با توجه به ابعاد پوسته و قطر لوله‌های کوچک‌تر وزنی در حدود ۲۵ درصد کمتر از مبدل شماره ۱

جدول ۱: مشخصات هندسی خنک کن روغن شماره ۳

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEM
قطر داخلی پوسته (mm)	۲۴۲
تعداد لوله‌ها	۱۶۶
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۱۲/۷
طول لوله‌ها (mm)	۵۵۰
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۱
جنس لوله‌ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۶۷۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۳
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۴۱

جدول ۱۷: مشخصات عملکردی خنک کن روغن شماره ۳

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۱۱۲۳
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۲۰۱۹
بار حرارتی (kW)	۸۵/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۳/۳۹
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۳۶۴
آفت فشار پوسته (kPa)	۰/۸
آفت فشار لوله (kPa)	۵/۱

جدول ۱۸: مشخصات هندسی خنک کن روغن شماره ۴

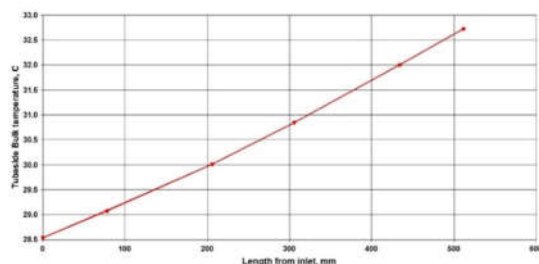
پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEM
قطر داخلی پوسته (mm)	۱۸۱
تعداد لوله‌ها	۳۷۵
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۶/۳۵
طول لوله‌ها (mm)	۳۹۰
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۱
جنس لوله‌ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰

جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۵۰۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۳
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۲۹

جدول ۱۹: مشخصات عملکردی خنک کن روغن شماره ۴

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت سمت پوسته (W/mK)	۱۸۸۳
ضریب انتقال حرارت سمت لوله (W/mK)	۵۸۷۶
بار حرارتی (kW)	۸۵/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۲/۶۳
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۴۷۱
آفت فشار سمت پوسته (kPa)	۱/۵
آفت فشار سمت لوله (kPa)	۸

با مقایسه می‌توان پی برد که مبدل شماره ۴ وزنی در حدود ۴۱ درصد کمتر از مبدل شماره ۳ دارد. ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۴، حدوداً ۲۹ درصد بیشتر است. در طراحی شماره ۴ در مقایسه با طراحی شماره ۳، آفت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۳ بیشتر بدست می‌آید. بنابراین می‌توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۴ می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. همچنین شکل ۲۹ و ۳۰ بترتیب توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) در طول مبدل خنک کن روغن را در طراحی‌های شماره ۳ و شماره ۴ به نمایش می‌گذارند.



شکل ۲۹: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل روغن شماره ۳

۴۵۰	طول لوله‌ها (mm)
۱/۲۴۵	ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)
۲	تعداد پاس لوله‌ها
مس/نیکل ۹۰/۱۰	جنس لوله‌ها
آلومینیوم	جنس پوسته
۵۷۰	طول کل مبدل (mm)
۳۰ درجه	آرایش لوله‌ها
۴	تعداد بافل
۳۲	وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)

جدول ۲۱: مشخصات عملکردی خنک‌کن آب شیرین شماره ۱

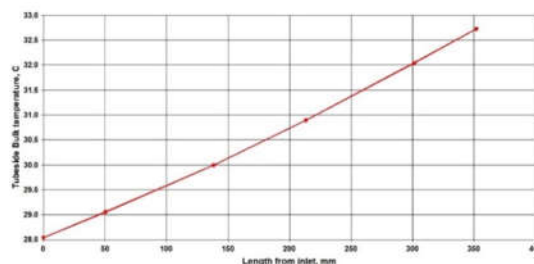
مقدار	پارامتر
۱۲۳۷۰	ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)
۶۹۶۶	ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)
۲۹۸/۶	بار حرارتی (kW)
۳/۲۸	سطح انتقال حرارت (m ²)
۱۸۷۰	ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)
۸/۲	آفت فشار پوسته (kPa)
۶/۷	آفت فشار لوله (kPa)

جدول ۲۲: مشخصات عملکردی خنک‌کن آب شیرین شماره ۲

مقدار	پارامتر
۱۵۳۱۵	ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)
۱۳۰۶۶	ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)
۲۹۸/۶	بار حرارتی (kW)
۳/۱۳	سطح انتقال حرارت (m ²)
۱۹۸۴	ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)
۱۷/۶	آفت فشار پوسته (kPa)
۸/۷	آفت فشار لوله (kPa)

جدول ۲۳: مشخصات هندسی خنک‌کن آب شیرین شماره ۲

مقدار	پارامتر
BEU	نوع مبدل
۱۹۳	قطر داخلی پوسته (mm)
۳۸۲	تعداد لوله‌ها
۶/۳۵	قطر خارجی لوله‌ها (mm)

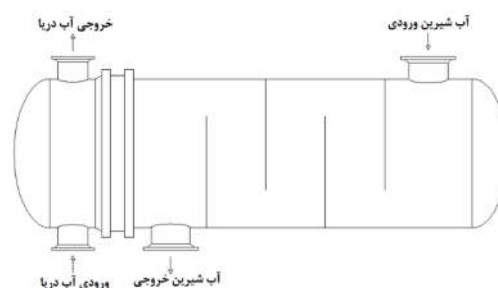


شکل ۲۶: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل روغن شماره ۴

۵-۳- طراحی مبدل خنک‌کن آب شیرین

با توجه به کاتالوگ موتورهای دریایی مختلف نوع این مبدل حرارتی، پوسته و لوله در نظر گرفته شده است. این مبدل به منظور خنک‌سازی آب شیرین برگشتی از موتور، که حداکثر دمای 95°C را دارد به دمای مطلوب 85°C استفاده می‌گردد. آب شیرین بعنوان سیال گرم در سمت پوسته و بصورت جریان مخالف با آب دریا بعنوان سیال سرد که در سمت لوله جریان دارد؛ در تماس است. با توجه به تمیز فرض کردن سیال سمت پوسته (آب شیرین برگشتی از موتور)، ضریب رسوب برای این سیال در نظر گرفته نمی‌شود.

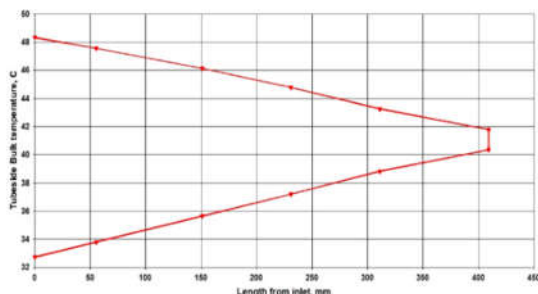
جدول ۲۰ تا ۲۳ مشخصات مبدل خنک‌کن آب شیرین با دو پاس لوله (BEU) برای طراحی شماره ۱ و طراحی شماره ۲ و شکل ۲۷ نیز شماتیک این طراحی است.



شکل ۲۷: شماتیک از نوع مبدل خنک‌کن آب شیرین طراحی شده با دو پاس لوله (BEU)

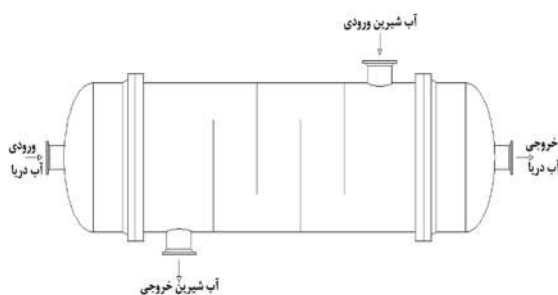
جدول ۲۰: مشخصات هندسی خنک‌کن آب شیرین شماره ۱

مقدار	پارامتر
BEU	نوع مبدل
۲۱۷	قطر داخلی پوسته (mm)
۲۲۰	تعداد لوله‌ها
۹/۵۲۵	قطر خارجی لوله‌ها (mm)



شکل ۲۹: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل آب شیرین شماره ۲

جدول ۲۴ تا ۲۷ نیز مشخصات مبدل خنک کن آب شیرین با یک پاس لوله (BEU) برای طراحی شماره ۳ و طراحی شماره ۴ و شکل زیر شماتیک این طراحی است.



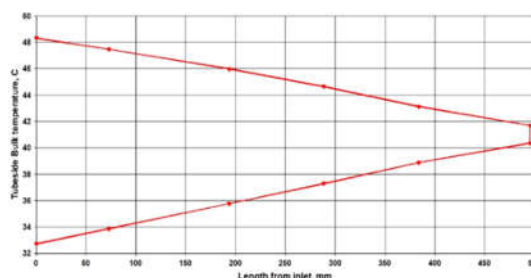
شکل ۲۸: شماتیکی از نوع خنک کن آب شیرین طراحی شده با یک پاس لوله (BEM)

جدول ۲۴: مشخصات هندسی خنک کن آب شیرین شماره ۳

مقدار	پارامتر
BEM	نوع مبدل
۲۵۵	قطر داخلی پوسته (mm)
۳۴۵	تعداد لوله‌ها
۹/۵۲۵	قطر خارجی لوله‌ها (mm)
۶۳۰	طول لوله‌ها (mm)
۱/۲۴۵	ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)
۱	تعداد پاس لوله‌ها
مس/نیکل ۹۰/۱۰	جنس لوله‌ها
آلومینیوم	جنس پوسته
۷۵۰	طول کل مبدل (mm)
۳۰ درجه	آرایش لوله‌ها
۴	تعداد بافل
۶۸	وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)

۳۷۰	طول لوله‌ها (mm)
۱/۲۴۵	ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)
۲	تعداد پاس لوله‌ها
مس/نیکل ۹۰/۱۰	جنس لوله‌ها
آلومینیوم	جنس پوسته
۴۹۰	طول کل مبدل (mm)
۳۰ درجه	آرایش لوله‌ها
۴	تعداد بافل
۲۹	وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)

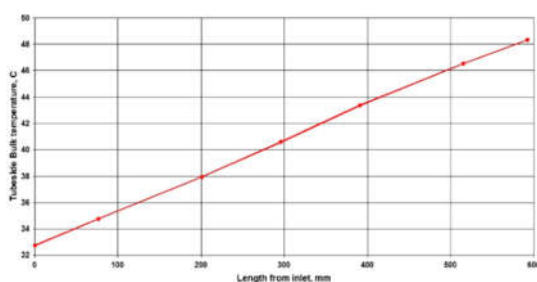
با مقایسه طراحی‌های شماره ۱ و ۲ می‌توان پی برد که مبدل شماره ۲ با توجه به ابعاد پوسته و قطر لوله‌های کوچکتر وزنی در حدود ۱۰ درصد کمتر از مبدل شماره ۱ دارد. ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۲، حدوداً ۶ درصد بیشتر از مبدل شماره ۱ بدست می‌آید. شایان ذکر است که بدلیل کوچکتر بودن قطر پوسته و لوله‌ها در طراحی شماره ۲ در مقایسه با طراحی شماره ۱، افت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۱ بیشتر بدست می‌آید. بنابراین می‌توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۲ می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. همچنین شکل ۲۸ و ۲۹ بترتیب توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) در طول مبدل حرارتی را در طراحی‌های شماره ۱ و شماره ۲ به نمایش می‌گذارند.



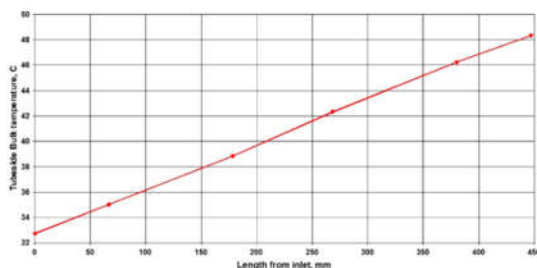
شکل ۲۸: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل آب شیرین شماره ۱

اُفت فشار لوله (kPa) ۵/۸

مبدل شماره ۴، وزنی در حدود ۳۳ درصد کمتر از مبدل شماره ۳ دارد. ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل شماره ۴، حدوداً ۳۱ درصد بیشتر از مبدل شماره ۳ بدست می‌آید. اُفت فشار در هر دو سمت پوسته و لوله در این طراحی در مقایسه با طراحی شماره ۳ بیشتر بدست می‌آید. بنابراین می‌توان گفت که مبدل با طراحی شماره ۴ می‌تواند انتخاب مناسب‌تری باشد. شکل ۲۹ و ۳۰ بترتیب توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) در طول مبدل خنک‌کن آب شیرین را در طراحی‌های شماره ۳ و شماره ۴ به نمایش می‌گذارند.



شکل ۲۹: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل آب شیرین شماره ۳



شکل ۳۰: توزیع دمای سیال درون لوله (آب دریا) طی عبور از مبدل آب شیرین شماره ۴

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب گفته شده در بخش نتایج و بحث هر سه مبدل حرارتی مورد نیاز در سامانه خنک‌کاری مدار باز موتور، از نوع پوسته و لوله در نظر گرفته شده و بدلیل جلوگیری از خوردگی تجهیزات و رسوب‌زا بودن آب دریا (سیال سرد)، این سیال در هر سه مبدل درون لوله جریان دارد و سیال گرم (هوا، روغن و آب شیرین) در سمت پوسته جریان دارند.

جدول ۲۵: مشخصات عملکردی خنک‌کن آب شیرین شماره ۳

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۱۰۷۸۶
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۲۰۷۲
بار حرارتی (kW)	۲۹۸/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۶/۱۱
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۹۹۴
اُفت فشار پوسته (kPa)	۱۳/۸
اُفت فشار لوله (kPa)	۵/۱

جدول ۲۶: مشخصات هندسی خنک‌کن آب شیرین شماره ۴

پارامتر	مقدار
نوع مبدل	BEM
قطر داخلی پوسته (mm)	۲۱۰
تعداد لوله‌ها	۵۲۴
قطر خارجی لوله‌ها (mm)	۶/۳۵
طول لوله‌ها (mm)	۴۸۵
ضخامت دیواره لوله‌ها (mm)	۱/۲۴۵
تعداد پاس لوله‌ها	۱
جنس لوله‌ها	مس/نیکل ۹۰/۱۰
جنس پوسته	آلومینیوم
طول کل مبدل (mm)	۶۰۰
آرایش لوله‌ها	۳۰ درجه
تعداد بافل	۳
وزن تقریبی پوسته و لوله‌ها (kg)	۵۱

جدول ۲۷: مشخصات عملکردی مبدل خنک‌کن آب شیرین شماره ۴

پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت پوسته (W/mK)	۱۳۴۱۵
ضریب انتقال حرارت لوله (W/mK)	۴۳۱۴
بار حرارتی (kW)	۲۹۸/۶
سطح انتقال حرارت (m ²)	۴/۶۷
ضریب انتقال حرارت کلی (W/mK)	۱۳۰۱
اُفت فشار پوسته (kPa)	۱۸/۴

[۱۰] باری، م.، شبگرد، ح.، خوشبخت، ح.، "دریایی سازی مدار خنک کاری یک موتور خودرویی با الگوبرداری از موتورهای برون نصب دریایی"، پنجمین همایش ملی شناورهای تندرو، تهران، ۱۳۹۶.

[۱۱] خوشبخت، ح.، باری، م.، غلامی، م.ر.، "بررسی اثر شرایط محیطی در دریایی سازی یک موتور خودرویی"، پنجمین همایش ملی شناورهای تندرو، تهران، ۱۳۹۶.

[۱۲] باری، م.، روشنفکر، م.، خواجهزاده، م.، "الزامات بازطراحی مدار خنک کاری یک موتور خودرویی جهت تغییر کاربری دریایی"، اولین همایش پیشراانه های دریایی، تهران، زمستان ۱۳۹۵.

[۱۳] زمانی، م.ا.، تقی پور، م.، حسینی و.، "تحلیل و شبیه سازی سامانه خنک کاری یک نمونه موتور بنزینی ارتقاء یافته برای کاربری دریایی"، یازدهمین همایش بین المللی موتورهای درونسوز و نفت، تهران، زمستان ۱۳۹۸.

[14] Standards of Tubular Exchanger Manufacturers' Association, Sixth edition, TEMA Incorporation, New York.

[15] Sadik, K., Hongton, L. and Anchasa, P., "Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design", Third edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.

همچنین برای هر سه مبدل ۴ طراحی مختلف ارائه گردید که در مبدل اینترکولر طراحی های شماره ۲ و ۳ به دلیل وزن کمتر و ضریب انتقال حرارت بالاتر برگزیده شدند (با توجه به تعداد پاس های لوله آنان).

در مبدل خنک کن روغن طراحی های شماره ۲ و ۴ مزایای بهتری داشته و انتظارات را برآورده می کند. لذا این دو طرح پیشنهاد شد. همچنین در مبدل خنک کن آب شیرین طراحی های شماره ۲ و ۴ برتر شناخته شد.

۷- مراجع و منابع

[۱] کشاورز ولیان، ع.، قاسمیان مقدم، ع.، "انتقال حرارت در موتورهای احتراق داخلی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

[2] Ferguson, C. R. and Kirkpatrick, A. T., "Internal Combustion Engine: Applied Thermo sciences", John Wiley & Sons, 2001.

[3] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGrawHill, 1988.

[4] Witek, L., "Failure and thermo-mechanical stress analysis of the exhaust valve of diesel engine", Engineering Failure Analysis, Vol. 66, pp. 154-165, 2016.

[5] Pulkrabek, W. W., "Engineering Fundamentals of Internal Combustion Engines", Second edition, Pearson Prentice-Hall, 2004.

[6] Basshuysen, R. V. and Schafer, R., "Internal Combustion Engine Handbook", SAE International, 2002.

[۷] مهدی پور، ر.، بنی عامریان، ز.، جعفری، ع.ا.، "طراحی و الگوسازی سامانه خنک سازی خودروی سمند برقی"، مجله تحقیقات موتور، شماره ۱۳، زمستان ۱۳۸۷.

[8] Priede, T. and Anderton, D., "Likely advances in mechanics cooling vibration and noise of automotive engines", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 198D, No. 7, 1984.

[۹] نازک تبار، م.، محبی، م.، "طراحی و بهینه سازی سامانه خنک کاری در توسعه موتورهای دیزل زمینی به دریایی"، مجله مهندسی شناورهای تندرو، شماره ۴۰، پاییز ۱۳۹۰.

مروری بر نانو کامپوزیت‌ها

اشکان عباسی نیکو^۱، سعید جامعی^۲، رامین صالح پور^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی (طراحی سازه)، دانشگاه خلیج فارس؛ ashkanabbasinikoo@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس؛ jammeisa@pgu.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی (طراحی سازه)، دانشگاه خلیج فارس؛ salehpour.ramin@mehr.pgu.ac.ir

چکیده:

گذشت زمان و پیشرفت علم و نیاز به مواد با کارایی خاص در صنعت، منجر به ساخت موادی با خواص مشخص شده که در آن عیوب و نقاط ضعف یک ماده توسط ماده‌ای دیگر بهبود پیدا می‌کند. در واقع این مواد مرکب که تحت عنوان کامپوزیت شناخته می‌شوند از یک جزء به نام زمینه یا ماتریکس و جزئی دیگر به نام تقویت‌کننده تشکیل شده است. حال اگر ابعاد یکی از اجزای تشکیل‌دهنده کامپوزیت در مقیاس نانو باشد؛ به این مواد نانو کامپوزیت گفته می‌شود. در این مقاله در ابتدا به تعریف کامپوزیت‌ها و نانو کامپوزیت‌ها پرداخته شده و چگونگی پیدایش آن‌ها بازگو و در ادامه به دسته‌بندی کامپوزیت‌ها از جنبه طبیعی یا مصنوعی بودن پرداخته می‌شود؛ سپس نانو کامپوزیت‌ها بر اساس پایه یا زمینه آن‌ها تقسیم‌بندی خواهد شد. در بخش بعدی در مورد مواد نانو کامپوزیت پلیمری و نوع خاص آن یعنی نانو لوله‌های کربنی توضیحاتی ارائه می‌شود و به انواع نانو لوله‌های کربنی و نقاط قوت و ضعف آن‌ها پرداخته شده و در پایان به چالش‌های پیش رو در ساخت مواد نانو کامپوزیت پلیمری اشاره خواهد شد.

واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، نانو کامپوزیت، نانو کامپوزیت پلیمری، نانو لوله کربنی

An overview of nanocomposites

Ashkan Abbasi Nikoo¹, Saeed Jamei², Ramin Salehpour³

1- MSc, Naval architecture Engineering-Ship Structure, Persian Gulf University

2-Assistant Professor, Department of Marine Engineering, Persian Gulf University

3- MSc, Naval architecture Engineering-Ship Structure, Persian Gulf University

Abstract:

The passage of time and the progress of science and the need for materials with special efficiency in the industry have led to the creation of materials with specified properties in which the defects and weaknesses of one material are improved by another material. In fact, these composite materials, which are known as composites, consist of one component called the matrix or another component called the reinforcement. Now, if the dimensions of one of the constituent components of the composite are on the nanoscale, these materials are called nanocomposite. In this article, firstly, the definition of composites and nanocomposites is discussed and how they appear, and then the classification of composites is discussed in terms of whether they are natural or artificial; Then nanocomposites will be divided based on their base or context. In the next section, explanations are provided about polymer nanocomposite materials and its special type, i.e. carbon nanotubes, and the types of carbon nanotubes and their strengths and weaknesses are discussed, and at the end, the challenges ahead in the manufacture of polymer nanocomposite materials will be mentioned.

Keywords:

Composite, nanocomposite, polymer nanocomposite, carbon nanotube

۱- مقدمه

مواد و توسعه آن‌ها از پایه‌های تمدن بشر به شمار می‌آیند؛ به طوری که دوره‌های تاریخی را با مواد نام گذاری کرده‌اند مانند: عصر سنگ، عصر برنز، عصر آهن، عصر فولاد، عصر سیلیکون و عصر کربن. ما اکنون در عصر کربن به سر می‌بریم. عصر جدید با شناخت یک ماده جدید به وجود نمی‌آید، بلکه با بهینه‌کردن و ترکیب چند ماده می‌توان پا در عصر نوین گذاشت. استفاده از کامپوزیت‌های مدرن در حقیقت از اوایل سال ۱۹۴۰ شروع شد که برای اولین بار از الیاف شیشه جهت تقویت پالستیک‌های مصرفی در ساخت پوشش پالستیکی آنتن رادار هواپیما استفاده شد [1]. در پی آن اولین کامپوزیت فایبرگالس-پالستیک در سال ۱۹۴۱ ساخته شد و طی جنگ جهانی دوم و بلافاصله پس از کاربرد پالستیک‌های تقویت شده با الیاف در هواپیماسازی، کامپوزیت‌ها موارد استفاده بیشتری یافتند و از سال ۱۹۵۶ صنایع فضایی نیز استفاده وسیع از آنها را آغاز کردند.

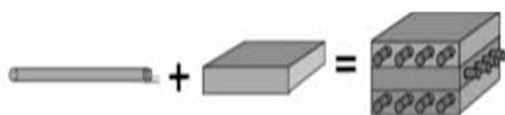
۱-۱ تعریف کامپوزیت

قبل از تعریف نانو کامپوزیت ابتدا باید کامپوزیت را تعریف کرد. کامپوزیت به ماده‌ای اطلاق می‌شود که از دو یا چند جزء تشکیل شده است؛ به طوری که این اجزا در مقیاس ماکروسکوپی با هم خصوصیتی را ایجاد کنند که به تنهایی در هیچ یک از آن اجزا موجود نباشد (شکل ۱). در ابتدای امر می‌توان بصورت یک مثال ساده به بیان این موضوع پرداخت. کاه‌گل یکی از اولین و مرسوم‌ترین کامپوزیت‌های مورد استفاده بشر می‌باشد. برای مثال اگر برای ساخت یک دیوار، از گل به تنهایی استفاده می‌شد ما دیواری شکننده داشتیم که این نتیجه مطلوبی را حاصل نمی‌کرد پس برای بهبود خاصیت مکانیکی گل و استحکام دیوار؛ کاه را به عنوان تقویت کننده، به زمینه که گل باشد اضافه نمودند و با این کار نقص موجود در زمینه (گل) را بر طرف کردند [1].

۲-۱ تعریف نانو کامپوزیت

این دسته از کامپوزیت‌ها به عنوان مواد راهگشا برای غلبه بر محدودیت‌های میکروکامپوزیت‌ها و مواد یکپارچه پدیدار گشتند. درک عمومی از خصوصیات آنها هنوز هم

ادامه دارد؛ اما اولین تولید کاربردی از آنها در اوایل ۱۹۹۲ گزارش شد [2,3]. در صورتی که حداقل ابعاد یکی از اجزا تشکیل‌دهنده در مقیاس نانو متری قرار گیرد به چنین ماده‌ای نانو کامپوزیت گفته می‌شود، یعنی حداقل یکی از اجزا تشکیل‌دهنده آن در ابعادی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. فاز اول یک ساختار بلوری است که در واقع پایه یا ماتریس نانو کامپوزیت محسوب می‌شود و فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر می‌باشند که به عنوان تقویت کننده به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و... درون فاز اول توزیع می‌شوند.



شکل ۱: کامپوزیت از اضافه کردن جزء تقویت‌کننده به زمینه به منظور بهبود خواص به دست می‌آید [1]

۲- مزایای کلی نانو کامپوزیت‌ها

یکی از مشکلاتی که در ساخت کامپوزیت‌ها مطرح است؛ نیاز به افزودن مقادیر زیادی از جزء تقویت‌کننده به زمینه است که باعث می‌شود خاصیت قطعه کامپوزیت حاصله تفاوت قابل توجهی با خواص زمینه داشته باشد که این تفاوت در بسیاری از موارد یک عیب به شمار می‌رود. برای مثال فرض کنید که با افزودن پودر فلزی مثل مس به زمینه پلیمری به دنبال ایجاد رسانایی الکتریکی در کامپوزیت حاصله هستیم. ایجاد رسانایی الکتریکی با مقادیر بالا در این کامپوزیت نیازمند مقادیر بالایی از پودر مس است. در این صورت قطعه کامپوزیتی به‌دست آمده به ناچار وزن بسیار بالاتری نسبت به پلیمر زمینه خواهد داشت که این مورد در مکان‌هایی که از پلیمرها استفاده می‌شود بسیار غیر مطلوب است. هم‌چنین در این حالت خواص مکانیکی کامپوزیت حاصله نسبت به زمینه پلیمری افت خواهد کرد؛ برای مثال ازدیاد طول و ضربه پذیری در این قطعه کامپوزیتی به‌طور قابل توجهی کمتر از زمینه پلیمری آن می‌باشد.

حال در صورتی که به جای تقویت‌کننده عادی با ابعاد بزرگ، از نانو ساختارهای رسانای الکتریکی مثل نانولوله کربنی استفاده شود این اشکال پیش نمی‌آید. در این

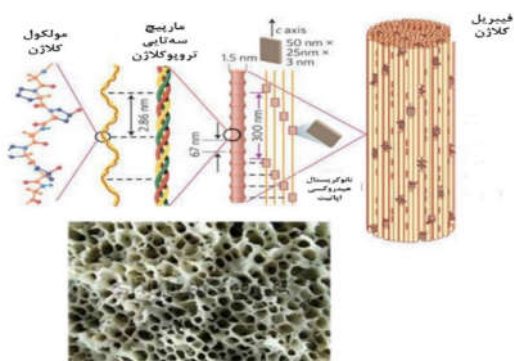
ترازهای انرژی اتفاق می‌افتد نیز باعث ایجاد کاربردهای ویژه‌ای از نانومواد در نانوکامپوزیت‌سازی شده‌است.

۳- دسته بندی نانو کامپوزیت‌ها

نانو کامپوزیت‌ها را از چندین جنبه می‌توان دسته بندی نمود:

۳-۱ نانو کامپوزیت طبیعی و مصنوعی

از معروف‌ترین نانوکامپوزیت‌های طبیعی می‌توان به چوب و استخوان اشاره کرد. استخوان را می‌توان مجموعه‌ای از فیبریل‌های کلاژنی در نظر گرفت. خود این فیبریل‌های کلاژنی از مارپیچ‌هایی از مولکول‌های کلاژن تشکیل شده‌اند که بر روی آنها نانوکریستال‌های هیدروکسی آپاتیت به عنوان اجزای تقویت‌کننده خواص مکانیکی قرار دارند. این ساختار ویژه استخوان است که مجموعه‌ای از خواص مکانیکی عالی را مثل استحکام مکانیکی بالا و مقاومت به ضربه بالا را حاصل کرده‌است. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار استخوان و همین‌طور تصویر شماتیک واحدهای تشکیل‌دهنده استخوان آورده شده است.



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از استخوان و تصویر شماتیک از اجزای تشکیل‌دهنده استخوان

هم‌چنین از چوب نیز می‌توان به عنوان یک نانوکامپوزیت طبیعی دیگر نام برد. در چوب زمینه‌ای از سلولز آمورف و چسب طبیعی وجود دارد که توسط نانوکریستال‌های سلولزی تقویت شده است. این نانوکریستال‌های سلولزی بر خلاف سلولز آمورف، استحکام مکانیکی بالایی دارند و به زمینه که دارای ضربه‌پذیری بالاست، مدول الاستیک و استحکام مکانیکی بالایی نیز می‌بخشند. در شکل ۳ تصویر شماتیک اجزا تشکیل‌دهنده چوب آورده شده است. قابل ذکر است که مطابق این شکل، در صورت هیدرولیز

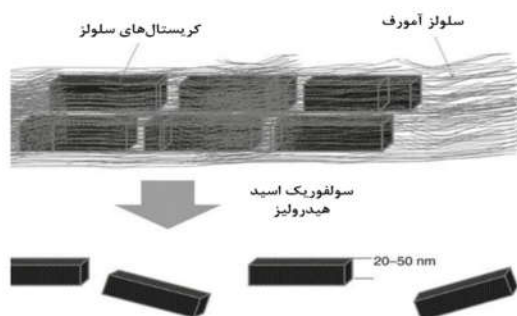
حالت با مقادیر بسیار کمتری از جزء تقویت‌کننده (مثلاً حدود ۲ درصد وزنی در مقایسه با ۲۰ درصد وزنی پودر فلزی) رسانایی الکتریکی بالا حاصل می‌شود. در نتیجه این امر، به علت کمتر بودن مقدار جزء تقویت‌کننده در حالت نانوکامپوزیت عملاً خواص ذاتی مطلوب زمینه نیز حفظ می‌شود و صرفاً خاصیت رسانایی الکتریکی که مدنظر بود به آن اضافه می‌شود. در نتیجه در این حالت علاوه بر افزایش رسانایی الکتریکی، از یاد طول و ضربه‌پذیری به مقدار کمتری افت می‌کند و هم‌چنین وزن نانوکامپوزیت نیز افزایش نمی‌یابد که در کاربردهای صنعتی بسیار مورد نیاز است. در واقع در این حالت با مقادیری بسیار کمتر از جزء نانومتری می‌توان به خاصیت مورد نظر دست یافت. هم‌چنین با استفاده از مقادیر کمتری از جزء تقویت‌کننده قیمت تمام شده نیز در اکثر موارد کاهش می‌یابد؛ چراکه معمولاً جزء تقویت‌کننده قیمت بالاتری را نسبت به جزء زمینه دارد و کم کردن مقدار آن از لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه است.

به صورت کلی می‌توان گفت نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌ها خواص ویژه بالاتری دارند. منظور از خواص ویژه، میزان یک خاصیت تقسیم بر چگالی آن ماده است. در واقع خاصیت ویژه بیان می‌کند که با در نظر گرفتن وزن یکسان بین دو یا چند ماده کدام یک خاصیت مورد نظر بالاتری دارد. برای مثال منظور از استحکام کششی ویژه بین دو ماده این است که در وزن یکسان از آن دو ماده کدام یک استحکام کششی بالاتری دارد. همان‌طور که بیان شد در نانوکامپوزیت‌ها به دلیل استفاده از مقادیر بسیار کمتری از جزء تقویت‌کننده، معمولاً وزن سبک‌تر است.

به دلیل مزایای مذکور یکی از اصلی‌ترین حوزه‌هایی که فناوری نانو در آن ورود پیدا کرده و بازار نیز روی خوشی به آن نشان داده است؛ در حوزه نانوکامپوزیت‌ها می‌باشد.

اما دلیل استفاده از مقادیر کمتری از جزء تقویت‌کننده در حالت نانو چیست؟ علت این امر نسبت سطح به حجم بالای نانومواد است. در این حالت به علت نسبت سطح به حجم بسیار بالا، برهم کنش بین جز تقویت‌کننده و زمینه بسیار بالاست و با مقادیر بسیار کم نیز برهم کنش کافی بین تقویت‌کننده و زمینه اتفاق می‌افتد (البته به شرط پخش یکنواخت). هم‌چنین خواص ویژه در نانومواد مثل انتقال بالستیک الکترون یا فوتون، خواص نوری و مغناطیسی ویژه نیز که در اثر افزایش سطح به حجم و یا تبدیل نوارهای انرژی به

چوب با اسید، قسمت‌های آمورف که مقاومت کمتری دارند از بین می‌روند و جزء تقویت‌کننده نانویی که نانوکریستال‌های سلولز است باقی می‌ماند.

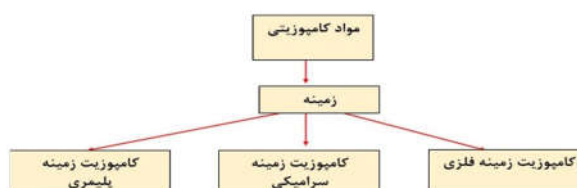


شکل ۳: تصویر شماتیک اجزا تشکیل‌دهنده چوب و هیدرولیز اسیدی چوب

۲-۳ بر اساس زمینه

جنبه دیگر تقسیم‌بندی نانوکامپوزیت‌ها (و کامپوزیت‌ها) که بسیار مرسوم است؛ تقسیم‌بندی آنها بر اساس نوع زمینه است. بر طبق این دسته‌بندی، نانوکامپوزیت‌ها به سه دسته نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، زمینه پلیمری و زمینه سرامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۴). اضافه کردن جزء تقویت‌کننده نانویی به هریک از این زمینه‌ها به دلیل رفع نقوص اصلی آنهاست. در پلیمرها این نقوص می‌توانند استحکام مکانیکی کم، مقاومت حرارتی پایین، رسانایی الکتریکی و حرارتی بسیار پایین و تخریب در برابر نور فرابنفش خورشید باشد که بدین منظور می‌توان از تقویت‌کننده‌های نانویی مختلفی استفاده نمود. [۵،۴]

در فلزات، این نقوص می‌توانند مدول الاستیک یا استحکام مکانیکی پایین، مقاومت کم در برابر خزش یا استحکام شکست پایین باشد که معمولاً برای فلزات سبکی مثل آلومینیوم، تیتانیوم یا منیزیم صدق می‌کند. در سرامیک‌ها نیز نقص اصلی مرتبط با چقرمگی یا تافنس پایین زمینه سرامیکی است که سعی می‌شود با افزودن نانومواد، آن را بهبود بخشید.



شکل ۴: دسته‌بندی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها بر حسب فاز زمینه (فلز، پلیمر یا سرامیک)

۳-۲-۱ بررسی نانوکامپوزیت‌های مختلف بر طبق زمینه

در اینجا به بررسی مباحث مهم در هریک از نانوکامپوزیت‌ها پرداخته می‌شود:

در نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری هدف استفاده از جزء نانو همان‌طور که در بالا اشاره شد رفع نقوص ذاتی پلیمرها مثل استحکام مکانیکی کم، مقاومت حرارتی پایین، رسانایی الکتریکی و حرارتی کم و نهایتاً تخریب در برابر امواج فرابنفش می‌باشد. از نانومواد در هر دو نوع پلیمر گرما نرم و گرما سخت استفاده می‌شود که از زمینه‌های متداول گرما نرم می‌توان به پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی آمید، پلی کربنات و پلی استایرن نام برد و از گرما سخت‌ها نیز می‌توان از اپوکسی، پلی استر، وینیل استرها نام برد. از نانومواد که اکثراً در این زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود می‌توان به نانو لوله کربنی، گرافن، کربن بلک، تیتانیا، کربنات کلسیم و نانورس اشاره کرد. برای مثال با نانو لوله کربنی و گرافن می‌توان به زمینه پلیمری رسانایی الکتریکی، رسانایی حرارتی، خاصیت کند سوزی و در مواردی بهبود خواص مکانیکی بخشید. هم چنین از نانو تیتانیا به عنوان جاذب فرابنفش نور خورشید و سفید کننده در زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود. هم چنین از نانوذرات کربنات کلسیم نیز می‌توان به عنوان پرکننده (جهت کاهش استفاده از پلیمر) استفاده نمود که در مواردی بهبود خواص مکانیکی مثل استحکام مکانیکی را منجر می‌شود. هم چنین نانورس نیز در بهبود خواص مکانیکی زمینه‌های پلیمری و همچنین کند سوز کردن آنها در اثر خاصیت سد گری (برای مثال جلوگیری از ورود اکسیژن به بسته بندی مواد غذایی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از نانو ساختارها است که می‌توان قطعات پلیمری با کاربردهای مهندسی و خواص ویژه تولید کرد.

در بسیاری از کاربردها که نیاز به وزن کم و یک خاصیت ویژه هست؛ این نانوکامپوزیت‌ها بهترین گزینه هستند چرا که به خاطر زمینه پلیمری؛ وزن بسیار کمی دارند و از طرف دیگر نیز میزان تقویت کننده کمی در آنها به کار رفته است و بهبود خواص نیز به علت نانوساختار بودن آن قابل توجه است.

پلیمری عموماً دارای استحکام بالا، وزن کم، پایداری حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت شیمیایی بالایی هستند [۷].

برخلاف تقویت‌کننده‌های مرسوم که در مقیاس میکرون می‌باشند، در کامپوزیت‌های نانو ساختاری، فاز تقویت‌کننده در مقیاس نانومتر می‌باشد. توزیع یکنواخت این نانوذرات در فاز زمینه پلیمری باعث می‌شود فصل مشترک فاز زمینه و فاز تقویت‌کننده در واحد حجم، مساحت بسیار بالایی داشته باشد. برای مثال مساحت فصل مشترک ایجاد شده با توزیع سیلیکات لایه‌ای در پلیمر بیشتر از ۷۰۰ خواهد بود. علاوه بر این؛ فاصله بین ذرات فاز نانومتری تقویت‌کننده با اندازه ذرات قابل مقایسه خواهد بود. برای مثال برای یک صفحه با ضخامت ۱ نانومتر فاصله بین صفحات در حدود ۱۰ نانومتر در فقط ۷ درصد حجمی از فاز تقویت‌کننده می‌باشد. این مورفولوژی از ویژگی‌های ابعاد نانومتری می‌باشد.

در کامپوزیت‌ها کارایی مورد نیاز، خواص مکانیکی، هزینه و قابلیت فرآوری از موضوعات بسیار مهم می‌باشد. نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر این محدودیت‌ها غلبه کرده است. برای مثال پیشرفت سریع نانوکامپوزیت‌های پلیمر-سیلیکات لایه‌ای را در نظر بگیرید. تلاش‌های ده سال اخیر باعث شده است که مدول کششی و استحکام این کامپوزیت‌ها دو برابر شود؛ بدون اینکه مقاومت به ضربه آنها کاهش یابد. مثلاً برای تعداد زیادی از رزین‌های ترموپلاستیک مثل نایلون و اولفین و همچنین رزین‌های ترموست مثل اورتان، اپوکسی و سیلوگزان با افزایش مقدار کمی مثلاً ۲٪ حجمی از سیلیکات لایه‌ای می‌توان به این خواص رسید.

سیلیکات‌های لایه‌ای تا به امروز بیشترین کاربرد را در ساخت نانوکامپوزیت‌ها داشته‌اند اخیراً به شدت از نانولوله‌های کربنی نیز در ساخت این نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. از انواع رزین‌های مورد استفاده به عنوان زمینه نانوکامپوزیت‌ها، رزین‌های ترموپلاستیک و ترموست می‌باشد.

۴-۱ نانو لوله کربنی

برخلاف تحقیقات ۲۵ ساله بر روی توزیع سیلیکات‌های لایه‌ای در پلیمرها، تحقیقات در زمینه توزیع نانولوله‌های کربنی در پلیمرها بسیار جدید می‌باشد.

در استفاده از نانو ساختارها در زمینه‌های فلزی اکثراً منظور فلزات سبک؛ یعنی آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم است. این فلزات به علت وزن سبکی که دارند گزینه بسیار مناسبی در حوزه‌هایی که حرکت وجود دارد مثل هوافضا و خودروسازی هستند؛ که در این بین اصلی‌ترین گزینه مطرح؛ آلومینیوم است که قیمت مناسب‌تری هم دارد. اما مشکلی که این فلزات دارند این است که خواص مکانیکی مطلوبی برای این کاربردها مثل فولاد ندارند و استحکام تسلیم، مدول و استحکام کششی پایینی دارند. با استفاده از نانومواد مثل نانولوله کربنی، کاربید سیلیسیوم، آلومینا و گرافن می‌توان خواص مکانیکی این فلزات را بهبود بخشید. هم‌چنین در مواردی نیز از این نانومواد به دلیل جلوگیری از خزش (در یک تنش ثابت و در دمای بالا) در زمینه فلزی استفاده می‌شود.

در زمینه‌های سرامیکی نیز مهم‌ترین مشکل چقرمگی یا تافنس پایین آن است. به همین دلیل سرامیک‌ها بسیار شکننده هستند و قابلیت تغییر شکل پلاستیک پایینی دارند. یکی از راهکارهای بهبود چقرمگی سرامیک‌ها استفاده از نانومواد در آنهاست. این نانو مواد با جلوگیری از رشد ترک به افزایش تافنس زمینه سرامیکی و به تعویق انداختن شکست در آن کمک می‌کنند. از جمله این موارد می‌توان به استفاده از نانوذرات آلومینا یا سیلیکا در زمینه سرامیکی زیرکونیا یا سرامیک دوجزئی زیرکونیا-آلومینا اشاره کرد.

حتی در صورتی که این افزایش تافنس قابل توجه باشد می‌توان نانوکامپوزیت زمینه سرامیکی با قابلیت سوپرپلاستیسیته ساخت؛ در این صورت می‌توان آن قطعه نانوکامپوزیتی را به اشکال دلخواه تغییر شکل داد. با استفاده از این راهکار بوده است که در حال حاضر می‌توان چاقوهای سرامیکی تولید کرد. در صورتی که تا قبل از این امکان تغییر شکل و ماشینکاری سرامیک‌ها برای ایجاد شکل تیغه چاقو به علت شکنندگی بالای آنها فراهم نبود [۶].

۴-۲ نانو کامپوزیت پلیمری

در بین نانوکامپوزیت‌ها بیشترین توجه به نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری معطوف است. یکی از دلایل گسترش نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص بی‌نظیر مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی آن است. نانوکامپوزیت‌های

توسعه نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری و افزایش تحقیقات در این زمینه، کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ میلادی است. استحکام و خواص الکتریکی نانولوله‌های کربنی به طور قابل ملاحظه‌ای با نانولوله‌های گرافیت و دیگر مواد پرکننده تفاوت دارد. نانولوله‌های کربنی در حین افزایش و بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی پلیمرها، باعث می‌شوند که خواص الکتریکی و گرمایی رزین‌ها نیز بهبود یابد. قطر این نانولوله‌ها می‌تواند از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد و نسبت وجهی (طول به قطر) بیشتر از ۱۰۰ یا حتی ۱۰۰۰ باشد. مانند سیلیکات‌های لایه‌ای ماهیت غیرهمسانگردی این لوله‌ها باعث می‌شود که در کسر حجمی کمی از نانولوله‌ها رفتار جالبی در این نانوکامپوزیت‌ها پیدا شود [۸،۷].

۴-۱-۱ نانولوله کربنی تک دیواره و چند دیواره

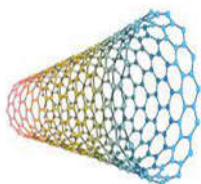
نانولوله‌های کربنی در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند. نانولوله‌های تک‌دیواره (شکل ۵) و نانولوله‌های چنددیواره (شکل ۶). علت علاقه به نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و تلاش برای جایگزین کردن آن‌ها در صنعت براساس محاسبات تئوری و تأییدات آزمایشگاهی بر خصوصیات عالی مکانیکی و رسانایی الکتریکی آنها مانند فلزات می‌باشد.

رقابت بر روی توسعه روش‌های ساخت با هزینه کم، فرآوری نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و همچنین پایداری خصوصیات این نانولوله‌ها در حین فرآوری پلیمر- نانولوله، از موانعی هستند که سرعت پیشرفت در تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری پر شده با نانولوله‌های کربنی را محدود کرده‌اند.

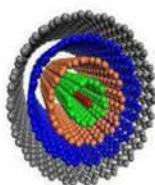
برعکس در دسترس بودن و تجاری بودن نانولوله‌های کربنی چنددیواره باعث شده است که پیشرفت‌های بیشتری در این زمینه داشته باشیم. تا حدی که محصولاتی در آستانه تجاری شدن تولید شده است. به عنوان مثال از نانولوله‌های کربنی چند دیواره جایگزین Carbon-black در پودرهای رنگ استفاده شده است. استفاده از این نانولوله‌ها باعث می‌شود که رسانایی الکتریکی در مقدار کمی از فاز تقویت کننده حاصل شود و کاربرد آنها در پوشش دادن قطعات اتومبیل می‌باشد. یکی از معایب نانولوله‌های چند دیواره نسبت به تک دیواره این است که استحکام دهی آنها کمتر می‌باشد زیرا پیوندهای صفحات داخلی ضعیف می‌باشند. در هر حال، در حال حاضر

کاربردهایی که باعث استفاده از نانولوله‌ها در تقویت دادن پلیمرها می‌شود، بهبود خواص گرمایی و الکتریکی می‌باشد تا بهبود خواص مکانیکی. بنابراین کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره بسیار زیاد می‌باشد.

از نظر نظامی نیز فراهم کردن هدایت الکتریکی و یا الکتریکی در فیلم‌ها و فایبرهای پلیمری فرصت‌های انقلابی بوجود خواهد آورد. به عنوان مثال از پوسته‌های الکتریکی-مغناطیسی گرفته تا کامپوزیت‌های رسانای گرما و لباس سربازان.



شکل ۵: نانولوله کربنی تک دیواره



شکل ۶: نانولوله کربنی چند دیواره

۵- چالش‌های پیش رو

در نانوکامپوزیت‌های پلیمری هدف نهایی، توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده نانومتری می‌باشد [۸]. اساساً ۴ روش برای تولید نانوکامپوزیت‌های یکنواخت وجود دارد: فرآوری محلولی، پلیمریزاسیون درجا، فرآوری مزوفازا و فرآوری مذاب. تحقیقات بسیاری در مورد این فرآیندها برای بررسی پارامترهای کنترل کننده مورفولوژی نانوکامپوزیت حاصله با این روش‌ها وجود دارد.

عملگری سطحی و عناصر نانویی به کاررفته در پلیمرها باید به گونه‌ای باشد که نرخ پلیمریزاسیون و محل شروع پلیمریزاسیون قابل کنترل باشد. زیرا درحین پلیمریزاسیون ممکن است عناصر نانویی تقویت کننده آگلومره شوند.

نقطه کلیدی در تمام این فرآیندها مهندسی فصل مشترک بین پلیمر و نانوذره می‌باشد. برای این فرآیندها عموماً از سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود. برای مثال از مولکول‌هایی که بصورت یونی با سطح نانوذرات پیوند

[4] Ajayan, Pulickel M., Linda S. Schadler, and Paul V. Braun. Nanocomposite science and technology. John Wiley & Sons, 2006.

[5] Venkatesan, Jayachandran, and Se-Kwon Kim. "Nano-hydroxyapatite composite biomaterials for bone tissue engineering—a review." *Journal of biomedical nanotechnology* 10.10 (2014): 3124-3140.

[6] Oksman, Kristiina, et al. "Review of the recent developments in cellulose nanocomposite processing." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 83 (2016): 2-18.

[7] Astrom, B. Tomas. *Manufacturing of polymer composites*. Routledge, 2018.

[8] <https://paper.nano.ir/print/1/987>

داشته باشند (در سیلیکات‌های لایه‌ای) استفاده می‌شود و درمورد نانولوله‌های کربنی از پلیمرهایی که بصورت فیزیکی به آنها متصل می‌شوند استفاده می‌شود. این بهسازی‌های سطحی باعث می‌شوند که عکس‌العمل بین فصل مشترک‌ها بهبود یابد. بیشترین تلاش‌ها در حال حاضر بر روی بهسازی‌هایی شده است که باعث می‌شود توزیع نانوذرات تسهیل یافته و بصورت یکنواخت توزیع شوند.

در حال حاضر موضوعات با درجه بالای اهمیت در تحقیقات عبارتند از: درک دقیق و عمیق از منطقه فصل مشترک فاز تقویت‌کننده و پلیمر، وابستگی خصوصیات فصل مشترک به شیمی سطح نانوذره، آرایش اجزاء و ارتباط بین منطقه فصل مشترک و خصوصیات نانوکامپوزیت‌ها. همچنین درک کلی از ارتباط مورفولوژی و خصوصیات حاصله در رفتار مکانیکی، گرمایی و مقاومتی بسیار کم می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

مطابق توضیحاتی که گفته شده مشاهده می‌شود که با استفاده از نانو مواد در زمینه‌های مختلف پلیمری، سرامیکی و فلزی می‌توان به خواص ویژه بالایی رسید. در این حالت می‌توان نانوکامپوزیت‌هایی با وزن کم و خواص مکانیکی یا الکتریکی و یا حرارتی بالا بدست آورد. این امر ناشی از نسبت سطح به حجم بالای نانومواد و برهمکنش زیاد آنها با زمینه و همین طور خواص ذاتی ویژه نانومواد است. در هر کدام از زمینه‌ها به دلیل نقوص ذاتی آن زمینه با توجه به کاربرد مورد نظر نانو ساختارهای مختلفی می‌توان استفاده نمود. در بعضی از کاربردها باید دقت کرد که درصد وزنی نانوساختار مورد استفاده کافی باشد و اصطلاحاً بیشتر از آستانه تراوش آن در زمینه مورد انتخاب باشد.

۷- مراجع

[۱] رحیمی ا، (۱۳۹۸) "آشنایی با پلیمرها و کاربرد آنها" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ص ۵۲.

[2] Callister W.D. (2003), "Materials science and engineering, an introduction", Vol. 1, Wiley, New York, pp. 124.

[3] Lubin, George. *Handbook of composites*. Springer Science & Business Media, 2013.

بررسی اجزاء دنباله شناورها از دیدگاه اپتیکی

محمودرضا عباسی کاریزبالا

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

phys.ocean.abbasi@gmail.com

چکیده:

دنباله تولیدشده توسط شناورهای در حال حرکت را که می‌توان با چشم انسان مشاهده کرد؛ ممکن است تا ده‌ها کیلومتر در اقیانوس باز ادامه یابد و از راه دور قابل تشخیص باشد. این دنباله دارای اجزا و قسمت‌های مختلفی است که کاملاً تابع شرایط حرکتی و هندسی شناورها است و مطالعات بسیار زیادی بر روی شناخت آنها انجام گرفته است. اهمیت اصلی این مطالعات را شاید بتوان برای آشکار سازی و شناسایی خودکار و از راه دور این شناورها براساس الگوهای دنباله‌های تولید شده توسط آنها توسط سنجنده‌های مختلفی مانند عکاسی مرئی، سنجش مادون قرمز و رادارهای میکروویو نصب‌شده بر روی ماهواره‌ها، رادارها و پهپادها دانست. در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های این پدیده از دیدگاه پهپادی و یا به عبارت دیگر از دیدگاه اپتیکی پرداخته و نشان داده شده‌است که این دنبال اگرچه پیچیده و دارای ۵ مؤلفه کلی است اما از دیدگاه اپتیکی سه مؤلفه آن کاملاً مشهود است: دنباله کلوین، دنباله آشفته و امواج داخلی تولید شده توسط شناور.

واژه‌های کلیدی:

دنباله، کلوین، اپتیکی، آشفته، امواج داخلی.

Investigating the components of the wake of ships from an optical point of view

Mahmud reza Abbasi Karizbala

Imam Hossein University, Science College, Basic Science Department, phys.ocean.abbasi@gmail.com

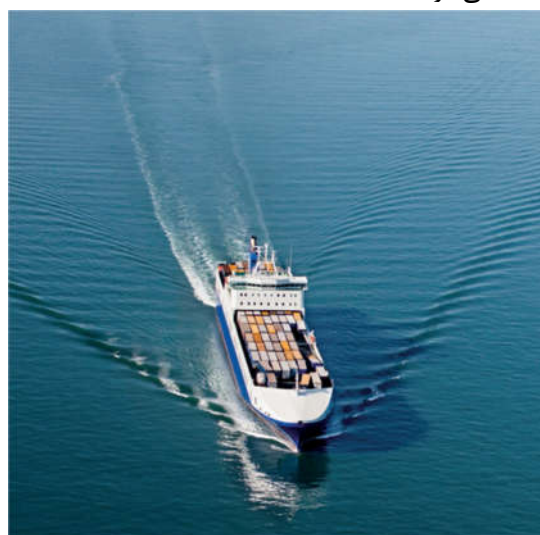
Abstract

The wake produced by moving ships, which can be seen with the human eye, may extend for tens of kilometers in the open ocean and be detectable from a distance. This wake has different components and parts that are completely subject to the movement and geometric conditions of the ships and many studies have been done on their recognition. The main importance of these studies may be for the automatic and remote identification of these ships based on the patterns of wakes produced by them by various sensors such as visible photography, infrared measurement and microwave radars installed on satellites, radars and drones. In this article, the components of this phenomenon have been studied from the point of view of a drone, or in other words, from the optical point of view, and it has been shown that although this wake is complex and has 5 general components, three of its components are clearly visible from the optical point of view: Kelvin wake, turbulent wake, and internal waves generated by the ship.

Key words:

wake, Kelvin, optical, turbulent, internal waves.

هنگامی که یک جسم نسبت به یک سیال (چه مایع یا گاز) حرکت می‌کند؛ سیال را مختل می‌کند و آن را مجبور می‌کند تا جایی برای عبور جسم ایجاد کند. این اختلال می‌تواند منجر به ایجاد یک دنباله^۱ V شکل در پشت جسم شود که خود یک پدیده موجی جذاب است که حتی با چشم غیر مسلح نیز قابل دیدن است (شکل ۱). امواج سطح آزاد تولید شده، به عنوان "امواج کلون" نامیده می‌شوند [۱].



شکل (۱): دنباله یک شناور

یک شناور را در نظر بگیرید که در آب آرام دریا در حال حرکت است. اغتشاشات^۲ وارد شده از شناور به آب باعث ایجاد فشارهایی می‌شود که سطح آب را به صورت موج کمائی V شکل و یک خمیدگی ملایم دنباله دار شکل می‌دهد.

فشار کمان جلوتر از شناور است و آب را به طرفین پراکنده می‌کند. این فشار، مجموعه‌ای از امواج را تشکیل می‌دهد که به شکل V در دو طرف شناور پراکنده می‌شوند. میزان وضوح و شکل‌گیری V، به سرعت شناور در مقایسه با سرعت امواج آب بستگی دارد.

هرچه دنباله کلون تولید شده توسط یک شناور بزرگتر باشد؛ نیروی پسای بزرگ‌تری روی شناور خواهد بود [۲]. در همین حال، امواج کلون حاوی انرژی است که بر خط ساحلی و ساحل رودخانه تأثیر می‌گذارد.

¹ Wake

² Disturbances

محاسبه میزان کشش موج و دانستن اینکه چگونه توزیع انرژی یک موج کلون با توجه به ویژگی‌های خاص (مانند سرعت شناور، اندازه شناور و شکل شناور) تغییر می‌کند؛ می‌تواند به طراحی بدنه شناور کمک کند. استنتاج ویژگی‌های شکل موج دنباله می‌تواند به شناسایی شناورهایی که توسط ابزارهای نظارتی شناسایی شده‌اند کمک کند [۳].

در ابتدا، کلون مجذوب پیک V شکلی بود که توسط یک شناور در حال حرکت در آب ایجاد شد. یکی از قابل توجه‌ترین نتایج او مربوط به زاویه دنباله ثابت بود که در حدود ۱۹,۴۷° بود که از آن پس به عنوان زاویه کلون شناخته می‌شود. البته در پژوهش‌های بعد نشان داده شد که برای شناورهایی که به اندازه کافی سریع حرکت می‌کنند برخلاف دیدگاه‌های معمول، زاویه دنباله که در پشت یک شناور در حال حرکت ثابت مشاهده می‌شود؛ طبق نتایج شبیه‌سازی، کمتر از زاویه کلون شناخته شده است. در واقع، هم سرعت شناور و هم اندازه شناور تأثیراتی بر شکل موج دنباله دارند. با این حال، اکثر دانشگاهیان ابتدا به بررسی اعداد فرود مختلف متأثر از سرعت شناور بر زاویه دنباله استفاده می‌کردند و در پژوهش‌های بعدی توجه کمی به تأثیر اندازه شناور صورت گرفت [۴].

۲- مؤلفه‌های دنباله یک شناور

شکل ۱ عکسی از یک دنباله شناور را نشان می‌دهد. این دنباله از آب سفید، دنباله خط مرکزی، دنباله پروانه و دنباله کلون تشکیل شده‌است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود؛ آب سفید که عموماً از شکستن موج در کمان ناشی می‌شود؛ اغلب در قسمت عقب تقویت می‌شود و در عقب شناور برای دو یا سه طول شناور امتداد می‌یابد. خط مرکزی مسافت زیادی از شناور و در پشت شناور امتداد دارد. خروجی پروانه یا واک پروانه درون خط مرکزی تعبیه شده است. بر روی این الگوی کلاسیک موج کلون یا دنباله کلون قرار گرفته است.

خطوط دنباله که از کمان سرچشمه می‌گیرند به وضوح در هر دو طرف دنباله قابل مشاهده هستند. در امتداد خط مرکزی، یک ناحیه صاف و تقریباً شیشه‌ای را می‌توان دید که به سمت عقب امتداد می‌یابد، در ناحیه‌ای که معمولاً موج آشفته در آن قرار دارد.

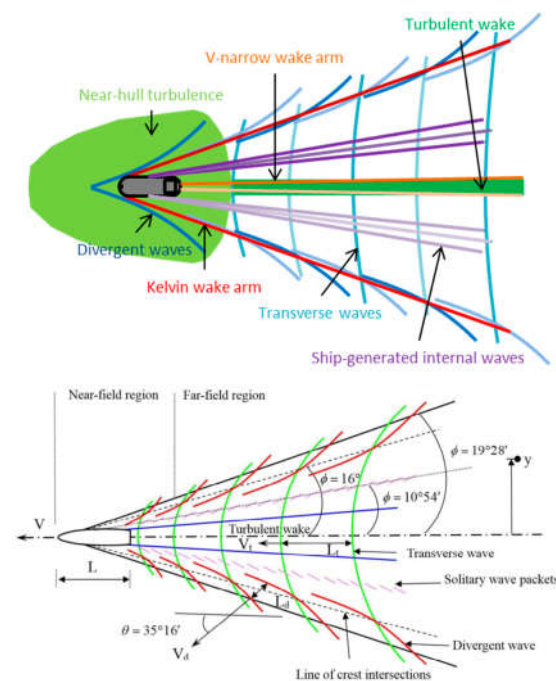
دنباله باریک V شکل، امواج منفرد و امواج داخلی تولیدشده توسط شناور تشکیل شده است [۵] اما از دیدگاه اپتیکی و آنچه در تصاویر پهنادی دیده می شود تنها ۳ مؤلفه اصلی دنباله کلون، دنباله آشفته و امواج داخلی تولید شده توسط شناور مشهودتر هستند [۶] که در ادامه به توضیح این دنباله ها می پردازیم.

۲-۱- دنباله آشفته

متداول ترین مؤلفه دنباله، دنباله آشفته است. سطح اقیانوس پشت شناور تحت تأثیر حرکت شناور است. در داده های سنجش از راه دور، علامت دنباله آشفته القایی می تواند به طول ده ها کیلومتر در پشت مسیر شناور برسد.

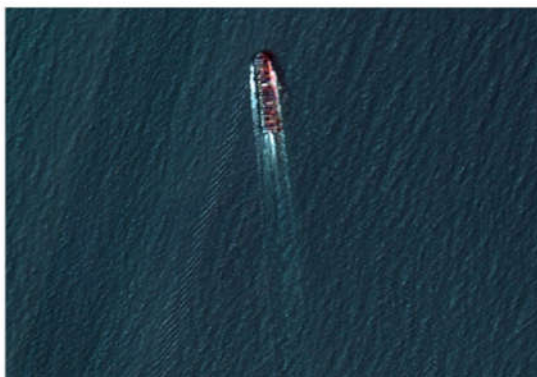
یک دنباله آشفته شامل یک منطقه آشفته با تعداد زیادی حباب در جلو و یک منطقه صاف با امواج سطحی کمتر در پشت است. حباب ها در ناحیه آشفته عمدتاً توسط حفره شدن پروانه ایجاد می شوند. عرض یک دنباله آشفته همان مرتبه بزرگی عرض کشتی است و به تدریج با افزایش فاصله از سمت عقب افزایش می یابد [۷]. با این حال، ویژگی های نوری لبه یک دنباله آشفته همیشه به اندازه کافی واضح نیست که در تصاویر شناسایی شود. طول یک دنباله آشفته که می تواند به ده ها برابر طول یک کشتی برسد؛ مهم ترین ویژگی آن است. کشتی ها به طور مداوم در حین حرکت دنباله تولید می کنند. طول مسیرها متناسب با مدت زمان حرکت و سرعت کشتی است. حباب های فراوان در ناحیه آشفته عمدتاً به دلیل کاویتاسیون ناشی از چرخش پرسرعت پروانه ها است. حباب ها در اثر شناوری و تلاطم به سطح آب می آیند و ناحیه آشفته را تشکیل می دهند. منبع دیگر حباب ها، هوایی است که در نتیجه اصطکاک بین بدنه و آب وارد آب می شود. بنابراین مقدار حباب ها در ناحیه آشفته به قدرت، سرعت دورانی و قطر پروانه بستگی دارد.

بین خطوط دنباله کلون و ناحیه خط مرکزی صاف، امواج مختلف واگرا به صورت پره های شعاعی که از شناور بیرون می زند دیده می شود. آب سفید را می توان دید که از کمان شناور سرچشمه می گیرد. نواحی سفید آب در کمان و پشت در نتیجه شکستن امواج شیب دار ایجاد شده در نزدیکی بدنه است. مشاهدات بازگشت خط مرکزی تاریک در بسیاری از تصاویر پیکسی نشان می دهد که این منطقه به طور کلی به طور قابل توجهی گسترده تر از سیگنال خود شناور است. پهنای خط مرکزی تیره به خوبی با پهنای ناحیه ای که روی آن امواج شکسته کمان و جناغ وجود دارد؛ مطابقت دارد. شماتیک کامل یک دنباله در شکل ۲ نشان داده شده است.



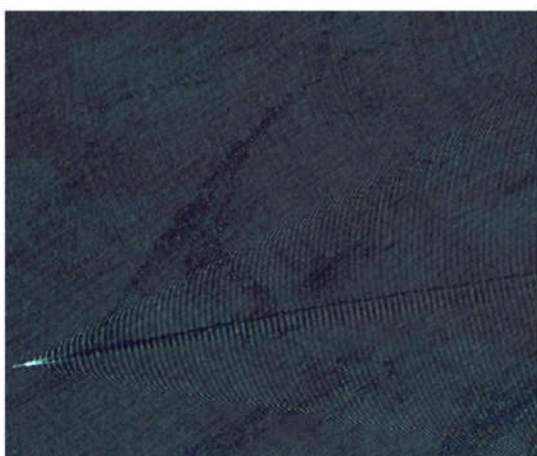
شکل (۲): نمایی از مؤلفه های اصلی دنباله یک شناور

مؤلفه های دنباله مطابق شکل ۲، به صورت زیر نشان داده شده و رنگ می شوند: دو بازوی دنباله کلون (قرمز)، دنباله باریک V شکل (نارنجی روشن) دربرگیرنده دنباله آشفته و موج داخلی تولیدشده توسط شناور (بنفش). امواج عرضی دنباله کلون به رنگ فیروزه ای و امواج واگرا به رنگ آبی ترسیم شده اند. گرچه مؤلفه های اصلی یک دنباله از ۵ جزء دنباله کلون، دنباله آشفته،



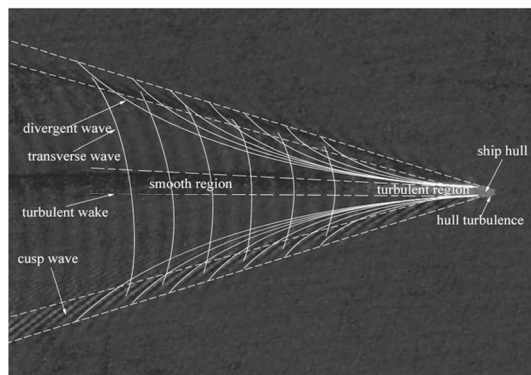
شکل (۴): تصویر دنباله آشفته یک کشتی بزرگ

کشتی‌های جنگی که از نظر اندازه شبیه کشتی‌های باری هستند به ملخ‌های قوی‌تری مجهز شده و حباب‌های بیشتری تولید می‌کنند. کشتی‌های جنگی در میان کشتی‌های بزرگ سریع‌ترین هستند و ویژگی‌های متمایزی دارند. تلاطم کمی در دو طرف بدنه باریک وجود دارد. طول دنباله آشفته تا دو برابر طول بدنه گسترش می‌یابد.



شکل (۵): تصویر دنباله آشفته و کلونین کشتی جنگی

میدان جریان و مکانیسم‌های تشکیل ناحیه صاف کاملاً مشخص نیست. تحقیقات موجود نشان می‌دهد که دو گرداب متقارن با مسیر کشتی وجود دارد. آب از مرکز بالا می‌رود و در لبه‌ها فرو می‌رود و یک جریان افقی بر روی سطح ایجاد می‌کند که امواج گرانشی کوتاه و امواج مویرگی را سرکوب می‌کند و با آب محیط تعامل می‌کند. ناحیه صاف به صورت مسیرهای تاریک به آرامی گسترش می‌یابد [۱۰]. ناحیه صاف در تصاویر نوری تیره‌تر از آب محیط است؛ زیرا درخشندگی ندارد. اگر سرعت باد کم باشد آب محیط نیز آرام است. هنگامی که سرعت باد



شکل (۳): جانمایی مؤلفه‌های دنباله آشفته و کلونین شناور

رید و همکاران [۸] از اصطلاح "میدان نزدیک" برای توصیف منطقه‌ای در اطراف شناورهای متحرک استفاده می‌کنند که در مقایسه با پراکندگی پستی بدون تأثیر سطح اقیانوس اطراف، پراکندگی راداری بالاتری را تولید می‌کنند. میدان نزدیک نه تنها شامل تلاطم‌های ناشی از پروانه پشت شناور است؛ بلکه تلاطم‌های ایجاد شده در اثر بدنه شناور در جلو و کنار شناور را شامل می‌شود.

پراکندگی نور مرئی و نزدیک به فروسرخ توسط حباب‌های موجود در آب دریا را می‌توان با استفاده از نظریه Mie محاسبه کرد. یک دنباله آشفته، بسیار روشن‌تر از آب‌های اطراف است؛ زیرا حباب‌ها به طور قابل توجهی بازتاب آب را افزایش می‌دهند [۹].

طول ناحیه آشفته با طول مدت زمان وجود حباب‌ها و سرعت کشتی متناسب است. سرعت و به دنبال آن قدرت موتور عامل تعیین کننده طول ناحیه آشفته است. کشتی‌های کوچک با ملخ‌های کوچک پرسرعت و کشش‌های کم عمق، تعداد زیادی حباب در نزدیکی سطح آب تولید می‌کنند که به زودی ناپدید می‌شوند. دنباله آشفته شناورهای ماهیگیری همراه با سرعت کم آنها بسیار کوتاه است. برعکس، قایق‌های موتوری که به راحتی می‌توانند به سرعت بیش از ۳۰ نات برسند؛ طولانی‌ترین مناطق آشفته را در بین انواع کشتی‌ها دارند که می‌تواند به ۱ کیلومتر برسد.

کشتی‌های باری مجهز به ملخ‌های بزرگ با سرعت کم، حباب‌های زیادی به عمق ۲۰ متر تولید می‌کنند و طول دنباله آشفته آنها به بیش از ده‌ها تا صدها متر می‌رسد که به همان اندازه طول بدنه است.

بسیار زیاد است؛ منطقه صاف به سرعت توسط امواج اطراف شکسته می‌شود.

بنابراین، طول مناطق صاف ایجادشده توسط انواع مختلف کشتی در تصاویر عمدتاً به مدت زمان جریان افقی بستگی دارد. طول ناحیه صاف با لبه‌های روشن در یک یا هر دو طرف در جلو که ناشی از جریان افقی است توسط سرعت کشتی تعیین می‌شود.

جریان‌های افقی ایجادشده توسط کشتی‌های ماهیگیری و قایق‌های موتوری با ملخ‌های کوچک و کشش‌های کم عمق به قدری ضعیف هستند که به راحتی تحت تأثیر امواج اطراف قرار می‌گیرند و به سرعت ناپدید می‌شوند.

بنابراین، مناطق صاف شناورهای ماهیگیری کوتاه و نامشخص است. قایق‌های موتوری که به طور مداوم جریان افقی تولید می‌کنند؛ هنگام عبور از سطوح آب با درخشش گسترده، مناطق صاف طولانی‌تری با لبه‌های روشن در دو طرف خواهند داشت. جریان افقی کشتی‌های باری به دلیل سرعت‌های نسبتاً کم و عمق پروانه‌های عمیق مشهود نیستند. منطقه آرام می‌تواند گاهی تا ده‌ها هزار متر گسترش یابد.

کشتی‌های جنگی دارای جریان‌های افقی قوی هستند که با آب محیط در تعامل بوده و کف فراوان ایجاد می‌کند. به دلیل سرعت‌های بسیار سریع، مسیرهای تاریک با خطوط روشن که در یک یا هر دو طرف ظاهر می‌شوند بسیار طولانی هستند.

چگالی حباب عمدتاً با تشخیص آکوستیک تخمین زده می‌شود. پراکندگی گروه حباب در باندهای مرئی و مادون قرمز را می‌توان با استفاده از نظریه پراکندگی Mie محاسبه کرد [۹]. منطقه آشفته به عنوان یک دنباله روشن در تصاویر نوری ظاهر می‌شود؛ زیرا حباب‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی بازتاب هر نور را افزایش دهند.

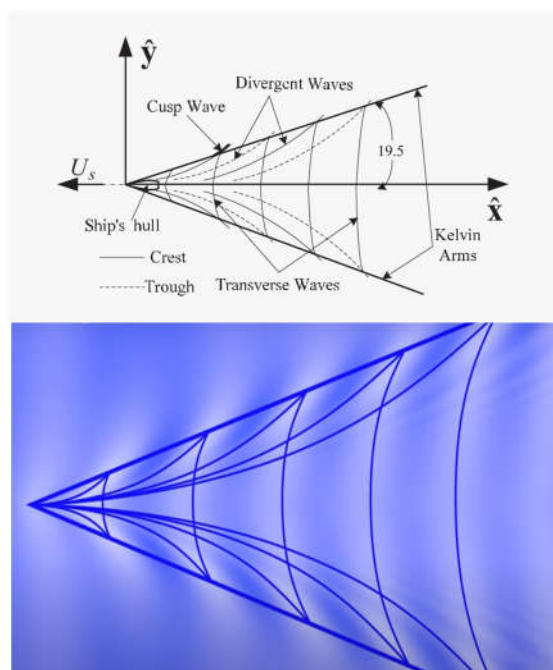
تحقیقات بر روی مناطق آشفته عمدتاً برای هدایت اژدر مورد استفاده قرار گرفته است و در کاربرد سنجش از دور نسبتاً کم است.

براساس تحقیقات میدانی انجام شده دنباله‌های آشفته همه شناورها را می‌توان در تصاویر با وضوح ۲ متر مشاهده کرد. احتمال وقوع دنباله‌های آشفته ایجادشده توسط کشتی‌های ماهیگیری و کشتی‌های باری به سرعت

کاهش می‌یابد. دنباله آشفته قایق‌های موتوری همیشه بدون توجه به وضوح دوربین فیلم برداری، ظاهر می‌شوند. احتمال تشخیص فقط دنباله آشفته در تصاویر اپتیکی بسیار زیاد است که نشان می‌دهد مناطق آشفته قایق‌های موتوری بسیار قابل توجه هستند در حالی که مناطق صاف کمتر متمایز هستند.

۲-۲- دنباله کلونین

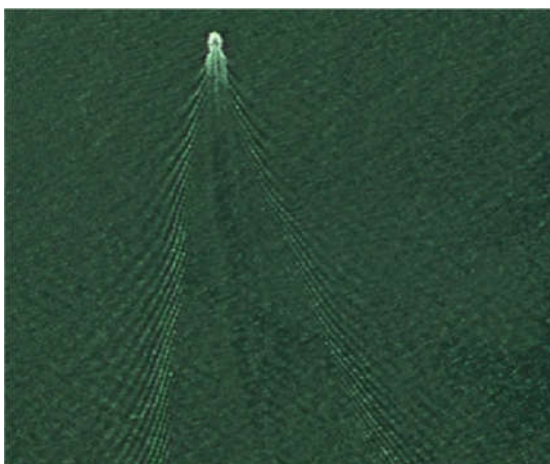
امواج کلونین از امواج عرضی و امواج واگرا تشکیل شده‌اند که بسیار بزرگتر از کشتی هستند. برجسته‌ترین امواج، امواج کاسپ هستند که از برهم نهی امواج عرضی و امواج واگرا در لبه ایجاد می‌شوند (شکل ۳ و ۶).



شکل (۶): نمایی از تشکیل دنباله کلونین

امواج کاسپ با شیب موج بزرگ به صورت خطوط روشن یا تیره به نام بازوهای کلونین در تصاویر با وضوح پایین ظاهر می‌شوند. بر اساس نظریه اولیه کلونین، زاویه بین دو بازوی کلونین تقریباً ۳۸,۹۴۸ است و مستقل از شکل و سرعت کشتی است. امواج کلونین نوسانات سطح دریا را تغییر می‌دهد و بنابراین، پیک‌های کلونین به دلیل بازتاب‌های مختلف از آب محیط متمایز خواهند شد. بنابراین، امواج عرضی و واگرا باید به اندازه کافی شارپ باشند تا در تصاویر شناسایی شوند.

احتمال وقوع دنباله کلوین برای اکثر کشتی‌ها کم است اما برای قایق‌های موتوری زیاد است شکل (۸).



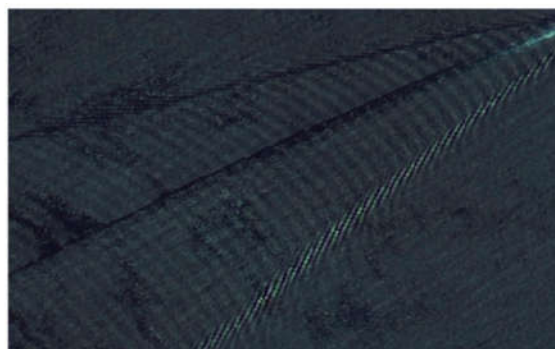
شکل (۸): امواج کلوین و کاسپ یک شناور موتوری سریع ویژگی‌های بارز دنباله کلوین، بازوهای کلوین و امواج عرضی است. با کاهش وضوح تصویر، احتمال وقوع هر دو بازو کاهش می‌یابد. بازوهای کلوین که توسط قایق‌های موتوری که معمولاً در مناطق آرام ساحلی حرکت می‌کنند تشکیل می‌شوند؛ قابل توجه‌تر هستند. بنابراین احتمال وقوع هر دو بازو همچنان زیاد است. امواج عرضی توسط کشتی‌های باری تولید می‌شوند و با کاهش قدرت تفکیک به ۸ متر تقریباً نامرئی می‌شوند که نشان می‌دهد بیشتر امواج عرضی دارای طول موج کوتاه هستند و تشخیص در تصاویر با وضوح پایین دشوار است [۱۰].

زاویه بین دو بازوی یک دنباله کلوین که به آن زاویه کلوین نیز می‌گویند یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه دنباله‌ها است. زاویه کلوین ارتباط نزدیکی با عدد فرود بدنه دارد، $Fr = U/gL$ ، که در آن U سرعت کشتی، g شتاب گرانشی و L طول کشتی است. زوایای کلوین زمانی که Fr کوچک است به پیش‌بینی کلوین ۳۸،۷۴۸ نزدیک می‌شود و با افزایش Fr از یک آستانه خاص کاهش می‌یابد. بازوهای کلوین ممکن است به دلیل تأثیر امواج اطراف دیگر متقارن با مسیر کشتی نباشند [۷].

در واقع، امواج کلوین به شکل، سرعت و امواج پس زمینه محیطی بستگی دارد که برخلاف نظریه اولیه کلوین است. بنابراین، یک راه حل تحلیلی به دست نیامده است. تئوری خطی امواج آب را می‌توان برای توصیف الگوهای کلوین استفاده کرد اگر تنها واضح‌ترین امواج میدان دور در نظر گرفته شود.

بخش اصلی دنباله کلوین، موج گرانشی است که آزادانه منتشر می‌شود. امواج کاسپ در دو طرف بارزترین ویژگی‌ها هستند و عمدتاً از بدنه شناور شروع می‌شوند و این امواج به صورت خطوط V شکل روشن یا خطوط تیره در تصاویر با وضوح پایین نشان داده می‌شوند. برخی از قایق‌های موتوری بزرگتر نیز می‌توانند امواج کلوین تولید کنند که فقط حاوی امواج واگرا با خطوط تاج باریک و طول موج‌های کوتاه هستند که تنها در تصاویر با وضوح بالا قابل تشخیص هستند.

برخلاف دنباله‌های معمولی کلوین، امواج واگرا با قله‌های بسیار روشن در لبه داخلی خطوط روشن V شکل باریکی را هنگامی که وضوح تصویر پایین است تشکیل می‌دهند (شکل ۶). سرعت کشتی‌های باری بزرگ معمولاً ۱۰ تا ۱۵ نات است. سرعت کشتی‌های کانتینری گاهی از ۲۰ نات تجاوز می‌کند تا رقابت پذیری را افزایش دهد. یک پیک مشخصه کامل می‌تواند تحت شرایط مناسب دریا تشکیل شود. امواج کاسپ که بازوهای کلوین روشن یا تیره را در یک تصویر با وضوح پایین تشکیل می‌دهند، در فواصل انتشار زیاد قابل توجه هستند. تشخیص امواج واگرا دشوار است، به جز امواج نزدیک به امواج کاسپ. به طور مشابه، امواج عرضی در نزدیکی امواج کاسپ آشکارتر هستند و می‌توانند در نواحی آشفته دنباله پنهان شوند شکل (۷).



شکل (۷): تصویری از امواج کاسپ در دنباله یک شناور

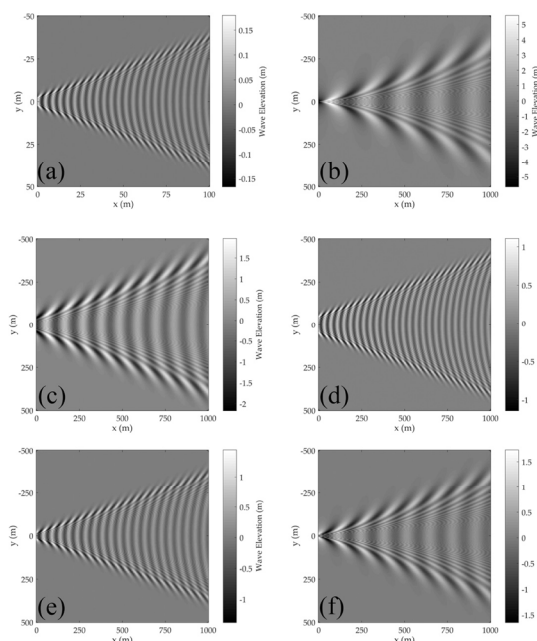
پایین تر باشد؛ کشتی یک آشفتگی ایجاد می‌کند. سپس یک موج داخلی دور از عقب کشتی ظاهر می‌شود. دامنه موج داخلی با شدت پیکنوکلین و کشش همبستگی مثبت دارد؛ در حالی که همبستگی ضعیفی با سرعت کشتی دارد (واتسون و همکاران ۱۹۹۲). کشتی‌های باری با کشش‌های عمیق و نیروی ملخ قوی، هنگامی که کف کشتی با پیکنوکلین تماس می‌گیرد یا پایین‌تر از آن قرار می‌گیرد؛ اختلال ایجاد می‌کند و در نتیجه امواج داخلی ایجاد می‌شود. امواج داخلی به آرامی به صورت گروه موجی با خطوط تاج پیوسته به بیرون منتشر می‌شوند. دیدن امواج داخلی که فقط توسط کشتی‌های باری ایجاد می‌شود به دلیل شرایط سخت شکل‌گیری بسیار کم است (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): امواج داخلی تولید شده توسط یک کشتی کارگو

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های عمومی دنباله شناورها از منظر اپتیکی پرداخته و نشان دادیم که هر دنباله در حالت کلی از ۳ مؤلفه تشکیل شده‌است: دنباله آشفته، دنباله کلون و امواج داخلی. دنباله آشفته متداول‌ترین مؤلفه دنباله است که می‌تواند به طول ده‌ها کیلومتر در پشت مسیر شناور برسد که از دو بخش آب سفید و یک منطقه آرام سطح اقیانوس متصل به این منطقه، که در نتیجه تضعیف امواج کوتاه سطح اقیانوس محیط توسط حباب‌های صعودی است؛ تشکیل می‌شود. دنباله کلون که از اندرکنش بین دو مؤلفه دنباله سرچشمه می‌گیرد:



شکل (۹): مدل‌سازی عددی امواج کلون براساس اعداد فرود متفاوت a: قایق ماهیگیری، b: قایق موتوری، c: کشتی کانتینر، d: نفتکش، e: باربر بزرگ، f: کشتی جنگی

بازوهای کلون قایق‌های موتوری باریک و V شکل با زوایای بسیار کوچک هستند. زوایای کلون کشتی‌های باری دامنه وسیعی دارند اما در اطراف زاویه کلون کلاسیک قرار دارند. زوایای کلون که توسط کشتی‌های جنگی شکل می‌گیرد، با دامنه تغییرات کمتری پایدارتر هستند (شکل ۹).

۲-۳- امواج داخلی تولید شده توسط شناور

امواج داخلی تولید شده توسط شناور به صورت الگوهای V شکل مکرر و متناوب بین مناطق روشن و تاریک ظاهر می‌شوند. البته این جزء دنباله به ندرت ظاهر می‌شود؛ زیرا ظاهر آن به شرایط آب به شدت طبقه‌بندی‌شده نزدیک سطح نیاز دارد [۱۰].

امواج داخلی ممکن است در جایی که پیکنوکلاين^۱ کم عمق و قوی وجود دارد ظاهر شود. امواج داخلی تولید شده توسط یک کشتی در حال حرکت بیشتر در آب‌های ساحلی رخ می‌دهد که در آن طبقه بندی آب به دلیل اختلاط آب شیرین و آب دریا قوی است. هنگامی که کف کشتی از سطح مشترک بین آب شیرین و آب دریا

^۱ پیکنوکلاين: محیط آبی با تغییرات شدید چگالی نسبت به عمق

امواج عرضی و امواج واگرا. نیم زاویه بین مسیر شناور و بازوهای دنباله کلون برابر با 19.47° درجه است؛ اما با ویژگی‌های شناور خاص، زاویه می‌تواند کوچکتر نیز باشد. امواج داخلی تولیدشده توسط شناور که این جزء دنباله به ندرت ظاهر می‌شود؛ زیرا ظاهر آن به شرایط آب به شدت طبقه‌بندی شده نزدیک سطح نیاز دارد. شکل و ابعاد این دنباله‌ها به ابعاد، سرعت و شرایط محیطی دریا بستگی دارد که تا حدودی متناسب با عدد فرود هر شناور است.

۴- مراجع

- [1] Ermakov, S., I. Kapustin, and T. Lazareva, 2014: Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: Observations and physical mechanisms. Proc. SPIE, 9240, 92400N.
- [2] Gilman, M., A. Soloviev, and H. Graber, 2011: Study of the far wake of a large ship. J. Atmos. Oceanic Technol. 28, 720–733.
- [3] Watson, G., R. D. Chapman, and J. R. Apel, 1992: Measurements of the internal wave wake of a ship in a highly stratified sea loch. J. Geophys. Res., 97, 9689–9703.
- [4] CHUNG, Y. K. & LIM, J. S. 1991 A review of the Kelvin ship wave pattern. J. Ship Res. 35, 191–197.
- [5] SOOMERE, T. 2007 Nonlinear components of ship wake waves. Appl. Mech. Rev. 60, 120–138.
- [6] DIAS, F. 2014 Ship waves and Kelvin. J. Fluid Mech. 746, 1–4.
- [7] DARMON, A., BENZAQUEN, M. & RAPHAËL, E. 2014. Kelvin wake pattern at large Froude numbers. J. Fluid Mech. 738, R3.
- [8] Reed, A. M., and J. H. Milgram, 2002: Ship wakes and their radar images. Annu. Rev. Fluid Mech., 34, 469–502.
- [9] Stramski, D., 1994: Gas microbubbles: An assessment of their significance to light scattering in quiescent seas. Proc. SPIE, 2258, 704–710.
- [10] Liu, Y., Deng, R., 2018. Ship wakes in optical images. J. Atmos. Ocean. Technol. 35, 1633–1648.

موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با استفاده همزمان از ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن

محمودرضا رضوی زاده^{۱*}، میثم رئیس دانایی^۲

۱- مربی سازمانی گروه مخابرات و جنگال، دانشکده شناوری، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)

۲- استادیار دانشکده و پژوهشکده برق، جنگ الکترونیک و سایبری، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)

چکیده:

موقعیت‌یابی هدف‌ها، دارای کاربردهای فراوانی است و انجام آن روش‌های مختلف دارد. این پژوهش، به موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با تأکید بر استفاده همزمان از ماهواره‌های مدار GEO و فیلتر کالمن پرداخته است. برای موقعیت‌یابی با استفاده از ماهواره‌های GEO تکنیک استفاده‌ی همزمان از TDOA و FDOA استفاده شده است. به علت تحرک هدف، روابط مورد استفاده در معادلات موقعیت‌یابی توسط ماهواره GEO کارایی خود را از دست می‌دهند و تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات می‌شود. به همین منظور، از فیلتر کالمن برای پیش‌بینی سرعت هدف استفاده شده تا مجهولات را کاهش داده و بتوان موقعیت‌یابی را توسط معادلات ماهواره GEO انجام داد. به علاوه، فیلتر کالمن نیز از موقعیت لحظه‌ای به دست آمده توسط معادلات GEO استفاده می‌کند آنها را هموارتر می‌کند. روش پیشنهادی در کار حاضر، توانسته است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی:

ماهواره‌های GEO، فیلتر کالمن خطی، TDOA، FDOA، موقعیت‌یابی، هدف متحرک.

Localization of a Moving Marine Target by Using Simultaneously GEO Satellites and Kalman Filter

Mahmoud Reza Razavi Zade^{1,*}, Meysam Raees Danaee²

1. Imam Hossein University, Tehran, Iran

2. Faculty of Electrical, Electronic Warfare and cyber, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract:

Localization has many applications and there are different methods to do it. This research has focused on the Geolocation of the moving marine target with emphasis on the simultaneous use of GEO satellites and the Kalman filter. For Geolocation using GEO satellites, the technique of simultaneous use of TDOA and FDOA was used. Due to the presence of motion and non-zero velocity for the target, the relationships used in the localization equations by GEO satellite lose their effectiveness and the number of unknowns becomes more than the number of equations. For this purpose, we use the Kalman filter to reduce these unknowns by using the predicted speed given by the Kalman filter and to be able to do the localization by the GEO satellite equations. Additionally, the Kalman filter uses the position obtained by the GEO equations and makes them smoother. According to the findings of this research, the Kalman filter was able to accurately estimate the location and speed of the moving sea target.

Keywords:

Geo Satellites, Linear Kalman Filter, TDOA, FDOA, Geolocation, Moving Target.

* Corresponding author: bijdono@gmail.com

۱- مقدمه

در بسیاری از کاربردها لازم می‌شود تا موقعیت هدف‌ها که عمدتاً هدف‌ها غیرخودی (ثابت یا متحرک) هستند، توسط سامانه‌های موقعیت‌یابی مشخص شوند. متأسفانه به علت این که این هدف‌ها در خارج از قلمرو کنترل نیروهای خودی قرار دارند، نیازمندیم تا از مجموعه‌ای از سامانه‌های مخابراتی استفاده کنیم که در اختیار مردم سراسر دنیا وجود دارد و عموماً برای هدف اختصاصی موقعیت‌یابی طراحی نشده‌اند. یکی از این ابزارها استفاده از سیگنال‌ها و اطلاعات ارسالی توسط ماهواره‌های قرار گرفته در مدار ^۱ GEO است. این ماهواره‌ها نقش رله کردن اطلاعات را بر عهده دارند و اطلاعات را از فرستنده زمینی دریافت و در مناطق تحت پوشش خود به صورت آیین‌های بازتاب می‌کنند. از این اطلاعات می‌توان استفاده نمود و موقعیت فرستنده را استخراج کرد. البته این امر دارای چالش‌های فراوانی است که از جمله آن‌ها به سه مورد اشاره می‌شود:

۱) آشکارسازی سیگنال‌های خیلی ضعیف در کانال ماهواره مجاور (به شرط دسترسی به ماهواره مجاور)، ۲) اندازه‌گیری شیفت تأخیر زمانی و فرکانس، ۳) تبدیل این اندازه‌گیری‌ها به یک موقعیت مکانی دقیق.

برای یافتن موقعیت فرستنده می‌توان از حداقل دو ماهواره استفاده کرد؛ به نحوی که ماهواره دوم که ماهواره‌ی ثانویه نامیده می‌شود (و برای دریافت اطلاعات فرستنده نیست) به طور اتفاقی اطلاعات فرستنده را در لوب اصلی خود دریافت می‌کند و می‌توان از بازارسال اطلاعات فرستنده از طریق ماهواره دوم در کنار ماهواره اصلی موقعیت فرستنده را به دست آورد. متأسفانه در بسیاری از مواقع سیگنال دریافتی از فرستنده در ماهواره ثانویه به علت موقعیتی که ماهواره قرار گرفته است و یا نوع و زاویه لوب اصلی فرستنده، بسیار ضعیف است. وقتی هدف ثابت است اما ماهواره دارای حرکت محدودی است با استفاده از دو ماهواره و با اندازه‌گیری اختلاف زمان ورود ^۲ (TDOA) و اندازه‌گیری اختلاف فرکانس ورود ^۳ (FDOA) می‌توان موقعیت فرستنده را استخراج نمود. هدف این پژوهش

ردگیری هدف متحرک دریافتی توسط ماهواره GEO است. متأسفانه وقتی هدف متحرک است؛ تعداد مجهولات بیشتر از معادلات می‌گردد و موقعیت‌یابی ناممکن می‌گردد. برای حل این مشکل، در این کار، در کنار معادلات به دست آمده از ماهواره‌های GEO، از فیلتر کالمن نیز بهره گرفته می‌شود تا با پیش‌بینی موقعیت و سرعت هدف، تعداد مجهولات را کاهش داده و موقعیت‌یابی را ممکن سازد.

۲- مرور کارهای انجام شده

در زمینه موقعیت‌یابی ماهواره‌ای (البته با استفاده از ماهواره‌های مدار GEO) تاکنون تحقیقات اندکی انجام شده است. تعداد معدودی مقاله در این زمینه وجود دارد که به صورت مختصر به آنها اشاره می‌شود.

هو^۴ و چان^۵ دو مجموعه راه حل (یکی TDOA، دیگری ترکیب اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA) برای موقعیت‌یابی یک فرستنده با ارتفاع مشخص ارائه داده‌اند. راه حل پیشنهادی، معادلات اندازه‌گیری را تبدیل می‌کند؛ متغیرهای نامطلوب را معرفی می‌کند و محل فرستنده را با حداقل مربعات محدود حل می‌کند. بایاس^۶ موقعیت (به دلیل دانش نادرست از ارتفاع فرستنده) مستقیماً با خطای ارتفاع متناسب است. بایاس به هندسه موقعیت‌یابی وابسته است؛ اما تحت تأثیر نویز اندازه‌گیری قرار نمی‌گیرد. هرچه راه حل نامحدود دقیق‌تر باشد، خطای ارتفاع مورد نیاز برای بهبود دقت کوچک‌تر خواهد بود. برای یافتن موقعیت فرستنده‌ای روی زمین، به وسیله اندازه‌گیری‌هایی از M ماهواره که موقعیت و سرعت آنها معلوم و مشخص است، لازم است که یک ایستگاه زمینی باشد تا بتوان M-1 مجموعه از TDOA ها را بین فرستنده (ماهواره) اول و i ام به دست آورد. اگر ماهواره‌ها در مدار GEO یا مدارهای پایین‌تر باشند، یک دسته از FDOA ها نیز قابل محاسبه خواهد بود؛ بنابراین مسئله عبارت است از تعیین موقعیت فرستنده با استفاده از اندازه‌گیری TDOA به تنهایی یا ترکیبی از اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA که در نتیجه ارتفاع فرستنده را خواهد داد [1].

⁴ Ho⁵ Chan⁶ bias¹ Geosynchronous satellite² Time Difference of Arrival³ Frequency Difference of Arrival

تکنیک مورد استفاده در مقاله هاوورث^۱ و همکاران متکی به اندازه‌گیری TDOA و (یا) FDOA سیگنال‌های تداخل است که از طریق ماهواره‌های ارتباطی ارسال می‌شوند (ماهواره تداخل‌یافته و ماهواره‌های مجاور، در قوس زمین ثابت هستند). اختلاف مسیر بین دو ماهواره، TDOA و حرکات نسبی ماهواره‌ها نسبت به زمین، FDOA را در ایستگاه نظارت تولید می‌کند. برای به‌دست‌آوردن موقعیت فرستنده از طریق مشاهدات TDOA و FDOA، تعیین موقعیت و سرعت ماهواره‌ها در زمان مشاهده و از نظر هندسی، تعیین LOP^2 ‌ها در روی زمین، متناظر با TDOA و FDOA مشاهده‌شده، ضروری است. تقاطع LOP ‌ها، موقعیت فرستنده را مشخص می‌کند [2].

در مقاله یان^۳ و همکاران، بحث از یک سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای است که محل منبع ساکن را با استفاده از اندازه‌گیری‌های DTO^4 و DFO^5 یک سیگنال که توسط دو ماهواره زمین ثابت^۶ اصلی و مجاور بازرسان و توسط دو ایستگاه زمینی واقع در ناحیه دید هر دو ماهواره دریافت می‌شود، تخمین می‌زند. صحت و دقت این سیستم به دقت تخمین پارامترها و افریس^۷ دو ماهواره بستگی دارد. با تجزیه و تحلیل اصول موقعیت و اندازه‌گیری پارامترها، $CRLB^8$ محدود به دقت مکان در این مقاله استخراج شده است. پارامترهای DTO و DFO به ترتیب ناشی از اختلاف سرعت و اختلاف برد هستند. به‌منظور بهره‌برداری دقیق از مشاهده پارامترهای سیگنال هدف، تعیین موقعیت و سرعت دو ماهواره (به‌عنوان مثال افریس) در زمان مشاهده و از لحاظ هندسی، تعیین خطوط موقعیت ضروری است. در این مقاله، دقت مکان سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای در سناریوهایی با و بدون خطاهای افریس به‌طور سیستماتیک استخراج شده است. نتایج آماری ده هزار آزمایش مستقل توافق

خوبی با نتایج نظری هم از نظر صحت مکان و هم احتمال بیضی خطای مکان نشان می‌دهد [3].

لیو^۹ و همکاران نیز به بررسی خطای موقعیت‌یابی و آفست زمان و فرکانس با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای پرداختند. یافتن یک منبع استاتیک در روی زمین با استفاده از اندازه‌گیری (TDOA) و (FDOA) که توسط یک سیستم موقعیت‌یابی دو ماهواره‌ای به‌دست آمده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. TDOA و FDOA مربوط به منبع در معرض آفست زمان و فرکانس نامشخص هستند؛ زیرا این دو ماهواره به‌طور ناقص از نظر زمان هماهنگ‌شده یا قفل‌شده با فرکانس هستند. مکان‌های ماهواره نیز به‌طور دقیق مشخص نیستند. برای شناسایی موقعیت منبع و کاهش اثر خطاهای موقعیت ماهواره، از ایستگاه‌های کالیبراسیون در موقعیت‌های شناخته‌شده استفاده می‌شود. در این مقاله، یک الگوریتم جدید موقعیت جغرافیایی به فرم بسته ارائه شده است. ابتدا اندازه‌گیری‌های TDOA و FDOA را از ایستگاه‌های منبع و کالیبراسیون با هم ترکیب می‌کند تا یک جفت واحد TDOA و FDOA برای موقعیت جغرافیایی منبع تولید کند. این مرحله ترکیب اندازه‌گیری با در نظر گرفتن وجود خطاهای موقعیت ماهواره، آفست زمان و فرکانس را از بین می‌برد. موقعیت منبع از طریق موقعیت جغرافیایی استاندارد TDOA-FDOA پیدا می‌شود. الگوریتم توسعه‌یافته از پیچیدگی کمی برخوردار است و تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که تحت نویزهای گوسی و شرایط خفیف به $CRLB$ می‌رسد [4].

۳- طرح مسأله

یکی از مسائلی که در نبردهای اطلاعاتی حائز اهمیت فراوان است مسئله اشراف اطلاعاتی است؛ بدین معنی که اطلاعات کامل و با جزئیات دقیق از آنچه در صحنه نبرد وجود دارد، در دسترس باشد. مبحث موقعیت‌یابی یکی از این جزئیات است و دارای کاربردهای فراوان است. امروزه یافتن مکان دقیق اشیاء با استفاده از امواج الکترومغناطیس در بسیاری از پژوهش‌های علمی یافت می‌شود. یکی از این موارد که البته کمتر به آن پرداخته شده است، استفاده از لینک‌های ارتباطی ماهواره‌های مدار

⁹ Liu

¹ Haworth

² Line of Position

³ Yan

⁴ Differential Time Offset

⁵ Differential Frequency Offset

⁶ Geostationary

⁷ Ephemeris

⁸ Cramer-Rao Lower Bound

GEO است. در پژوهش حاضر تمرکز بر روی یافتن مکان هدف متحرک دریایی با استفاده همزمان از ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن است. مسأله موقعیت‌یابی با استفاده از ماهواره‌های GEO عمدتاً به دو روش انجام می‌شود:

- 1) TDOA-TDOA
- 2) TDOA-FDOA

در روش اول با استفاده از یک ماهواره اصلی و یک ماهواره در مجاورت ماهواره اصلی، اختلاف زمان ورود سیگنال از هدف موردنظر به ماهواره‌ها و از ماهواره‌ها تا ایستگاه‌های گیرنده زمینی از مسیر این دو ماهواره محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از روابط موجود، می‌توان مجموعه نقاطی را که در معادله مکان موقعیت هدف صدق می‌کند، رسم نمود. این نقاط تشکیل یک بیضی را می‌دهند. در مرحله بعد از تلاقی این دو بیضی دو نقطه به دست می‌آید که با توجه به شرایط مسأله، یکی از آنها موقعیت اصلی هدف موردنظر خواهد بود.

معمولاً این اندازه‌گیری به دلایل مختلف همراه با خطاهایی است که برای رفع این خطاها بایستی از ایستگاه مرجع استفاده نمود [4].

در روش دوم باید از یک ماهواره اصلی و دو ماهواره در مجاورت ماهواره اصلی استفاده نمود و ضمن محاسبه اختلاف زمان ورود سیگنال به گیرنده‌های زمینی، اختلاف فرکانس سیگنال ورودی به گیرنده‌های زمینی را نیز محاسبه کرد. در این مرحله نیز علاوه بر بردار موقعیت مکانی مربوط به TDOA، مجموعه نقاط مربوط به معادلات FDOA محاسبه و تشکیل یک خط را می‌دهند. در این روش نیز با تلاقی یان دو بردار می‌توان موقعیت فرستنده را مشخص کرد.

۳-۱- مقایسه دو روش

هرکدام از دو روش TDOA/TDOA و TDOA/FDOA دارای معایب و مزایایی هستند که به آنها اشاره می‌شود.

معایب و مزایای روش TDOA/TDOA

مزایا:

- دقت خوب حتی بدون داشتن افمریس
- دقت خوب در همه زمان‌ها
- قابل استفاده بدون مرجع (دقت متوسط)
- قابل استفاده برای هدف‌های متحرک

قابل استفاده برای زمان رکورد کم

معایب:

نیازمند دو ماهواره ثانویه

نیازمند ۳ آنتن گیرنده

معایب و مزایای روش TDOA/FDOA

مزایا:

نیازمند فقط یک ماهواره ثانویه

نیازمند دو آنتن گیرنده

معایب:

نیازمند افمریس برای رسیدن به دقت خوب

بدون مرجع قابل استفاده نیست

برای هدف‌های متحرک مناسب نیست

سه ساعت در روز، خطا بالای ۱۰۰۰ کیلومتر است.

نیاز به حداقل ۳۰ ثانیه زمان برای رکوردگیری

با توجه به مزایا و معایب هرکدام از دو روش و با در

نظر گرفتن محدودیت‌های موجود، روش TDOA-FDOA انتخاب شد.

۳-۲- بررسی تئوری موقعیت‌یابی

هدف از مطالعه تئوری، بررسی تکنیک‌های مختلف و موجود موقعیت‌یابی فرستنده، به منظور شناسایی آن دسته از گزینه‌هایی است که از نظر هزینه بهترین مزایا را دارند. همچنین بررسی حساسیت تکنیک به پارامترهای مختلف درگیر و ارزیابی دوام و عملکرد آن هنگام اعمال به ماهواره‌ها بوده است. در ادامه بررسی تئوری مربوط به روش انتخاب شده، ارائه شده است.

۳-۳- اصول اندازه‌گیری و هندسه موقعیت‌یابی

تکنیک انتخاب شده بر اساس اصل مربوط به تعیین همزمان DSR^1 (دامنه شیب تفاضلی) و $DSRR^2$ (نرخ دامنه شیب تفاضلی) مرتبط با یک سایت فرستنده ناشناس و دو ماهواره زمین‌ثابت است که یکی از آنها ماهواره اصلی و دیگری ماهواره‌ای در نزدیک‌ترین فاصله از ماهواره اصلی است.

DSR و $DSRR$ با اطلاع از موقعیت و سرعت ماهواره و با اندازه‌گیری TDOA و FDOA مربوط به سیگنال تداخل که توسط ماهواره تداخل‌شده و ماهواره مجاور مجدداً ارسال شده و دریافت آن توسط دو ایستگاه زمینی

¹ Differential Slant Range

² Differential Slant Range Rate

توضیح و تشریح متغیرها در رابطه (۳) عبارت است از:

σ_ℓ = خطای $c \times \text{TDOA}$ خطای RMS مربوط به DSR

σ_v = فرکانس / خطای $c \times \text{TDOA}$ خطای RMS مربوط به DSRR

L_t = اندازه مؤلفه گرادیان DSR در صفحه آزیموث در نقطه r روی زمین

V_t = اندازه مؤلفه گرادیان DSRR در صفحه آزیموث

زاویه بین اجزای گرادیان DSR و DSRR در صفحه آزیموث = زاویه بین LOPها در سطح زمین در نقطه $r = \varphi$

با توجه به شکل (۲) گرادیان DSR و DSRR به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \ell_{21}(\mathbf{r}) = -(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) \quad (4)$$

$$\nabla v_{21}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\ell_2} [\mathbf{v}_{s2} - (\mathbf{v}_{s2} \cdot \mathbf{u}_2) \mathbf{u}_2] - \frac{1}{\ell_1} [\mathbf{v}_{s1} - (\mathbf{v}_{s1} \cdot \mathbf{u}_1) \mathbf{u}_1] \quad (5)$$

$$\nabla = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z}. \quad (6)$$

که در اینجا $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ بردارهای واحد در امتداد بردارهای متعامد x, y و z هستند. [5]

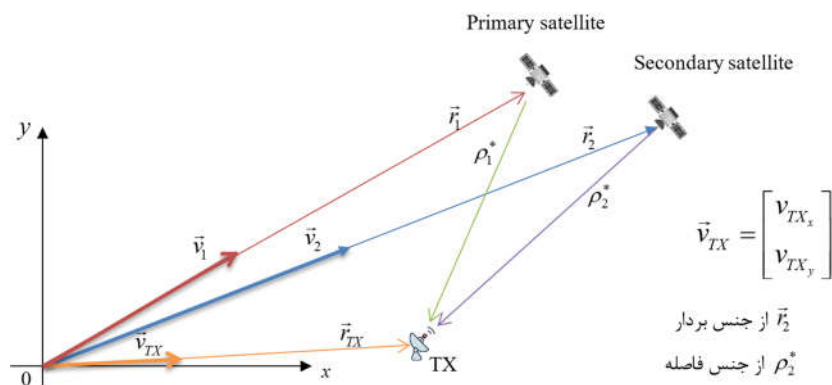
هدف است و در صورتی که هدف متحرک باشد؛ به علت اینکه در دستگاه معادلاتی که از معادلات TDOA و FDOA شکل می‌گیرد؛ تعداد مجهولات بیشتر از معلومات می‌شود؛ این دستگاه معادلات دارای جواب نخواهند بود.

البته در حالت متحرک بودن هدف، در صورتی که سرعت متحرک معلوم باشد، معادلات قابل حل بوده و جواب خواهند داشت؛ اما با توجه به اینکه خواسته مدنظر در این پژوهش محاسبه موقعیت، سرعت و مسیر حرکت هدف متحرک است؛ لذا سرعت هدف جزو مجهولات بوده و در حقیقت چالش اصلی نیز همین موضوع است.

۴- روش پیشنهادی

همانطور که در بخش قبلی اشاره شد؛ روش پیشنهادی کار حاضر برای موقعیت‌یابی، روش TDOA-FDOA خواهد بود؛ اما با دقت به معایب این روش متوجه محدودیت‌های آن می‌شویم. در این روش، هدف نباید متحرک باشد و از سوی دیگر به تعداد دو ماهواره جانبی نیاز خواهیم داشت. راه حل پیشنهادی برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها استفاده از فیلتر کالمن است. به بیان دیگر، بصورت همزمان از روش TDOA-FDOA و فیلتر کالمن استفاده خواهیم کرد.

شرط اینکه در روش مورد استفاده در این پژوهش، یعنی TDOA-FDOA جواب مطلوب باشد، ثابت بودن



شکل ۳: نمای موقعیت فرستنده، ماهواره اولیه و ماهواره ثانویه در صفحه مختصات

در شکل (۳) نمای موقعیت فرستنده، ماهواره اولیه^۱ و ماهواره ثانویه^۲ در صفحه مختصات نشان داده شده است. بردارهای $\vec{V}_1$ و $\vec{V}_2$ به ترتیب بردارهای سرعت ماهواره‌های اولیه و ثانویه، بردار $\vec{V}_{TX}$ بردار سرعت ایستگاه گیرنده زمینی است که این بردار خود دارای دو مؤلفه در راستای x و y است. بردار $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ بردارهای مکان دو ماهواره اولیه و ثانویه و ρ_1^* و ρ_2^* فاصله بین ماهواره‌های اولیه و ثانویه تا ایستگاه گیرنده زمینی هستند.

نکته‌ای که باید در نظر داشت این که شکل (۳) فقط برای یکی از گیرنده‌ها رسم شده است و بردارهای مشابه تصویر فوق برای گیرنده دوم نیز باید در نظر گرفته شود. حال با توجه به شکل و فرض وجود گیرنده دوم، اختلاف زمان ورود سیگنال از فرستنده (هدف) به گیرنده‌های اول و دوم از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$DTO = \frac{1}{c} [(\rho_2^* + \rho_2) - (\rho_1^* + \rho_1)] \quad (۷)$$

حال با جای‌گذاری مقادیر، رابطه (۸) به صورت رابطه زیر قابل بازنویسی خواهد بود. اندیس k به معنای لحظه k ام است.

$$DTO_k = \frac{1}{c} [(\|\mathbf{r}_{Tx} - \mathbf{r}_2\| + \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_{Rx_2}\|) - (\|\mathbf{r}_{Tx} - \mathbf{r}_1\| + \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_{Rx_1}\|)] \quad (۸)$$

همان‌طور که در رابطه (۸) مشاهده می‌شود، محاسبه DTO نیازی به خروجی‌های فیلتر کالمن ندارد. گرچه در حالت ایده‌آل، ماهواره‌های مدار GEO باید ثابت و کاملاً بی‌حرکت باشند؛ اما در عمل دارای حرکت جزئی و در نتیجه نسبت به زمین و هدف‌ها واقع روی آن دارای سرعت نسبی هستند، لذا این امر باعث ایجاد شیفت داپلر شده و فرکانسی که به گیرنده‌های زمینی می‌رسد، متفاوت خواهد بود. با توجه به این نکته، اختلاف فرکانس ورودی به گیرنده‌ها از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$DFO = \frac{1}{c} [f_{Tx}^* \dot{\rho}_1^* + (f_{Tx}^* - f_{tr_1}) \dot{\rho}_1 - f_{Tx}^* \dot{\rho}_2^* + (f_{Tx}^* - f_{tr_2}) \dot{\rho}_2] \quad (۹)$$

که در آن، f_{Tx}^* فرکانس حامل هدف، $\dot{\rho}_1^*$ سرعت نسبی بین ماهواره اولیه و هدف، $f_{Tx}^* - f_{tr_1}$ فرکانس *downlink* مربوط به ماهواره اولیه، $f_{Tx}^* - f_{tr_2}$ فرکانس *downlink* مربوط به ماهواره ثانویه، $\dot{\rho}_1$ سرعت نسبی گیرنده ۱ و ماهواره اولیه، $\dot{\rho}_2^*$ سرعت نسبی ماهواره ثانویه و هدف و $\dot{\rho}_1$ سرعت نسبی گیرنده ۲ و ماهواره ثانویه است.

$$\dot{\rho}_1^*(k) = \left(\left[\mathbf{v}_1 - \begin{bmatrix} v_{Tx_x}(k) \\ v_{Tx_y}(k) \\ v_{Tx_z}(k) \end{bmatrix} \right] \cdot \left[\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix} \right] \right) / \sqrt{(PS_x - Tx_x(k))^2 + (PS_y - Tx_y(k))^2 + (PS_z - Tx_z(k))^2} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، $\mathbf{v}_1$ بردار سرعت ماهواره اولیه (PS) است. در پرانتز اول، چون دو بردار سرعت هم‌جهت هستند، از علامت تفریق استفاده شده است. با اینکه هدف سطحی و روی سطح آب است، اما در جهت Z جابجایی داریم، بنابراین مقدار متناظر آن در بردار سرعت هدف در جهت Z، غیرصفر در نظر گرفته شده است.

$$\dot{\rho}_1(k) = \left(PS \text{ Satellite velocity vector} - \vec{0}_{3 \times 1} \right) \cdot \left(\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rx_{1x} \\ Rx_{1y} \\ Rx_{1z} \end{bmatrix} \right) / \left\| \begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Rx_{1x} \\ Rx_{1y} \\ Rx_{1z} \end{bmatrix} \right\| \quad (۱۱)$$

¹ Primary

² Secondary

یعنی متغیرهای $\mathbf{v}_{Tx_x}(k)$ و $\mathbf{v}_{Tx_y}(k)$ از پیش‌بینی سرعت‌های به‌دست‌آمده از طریق فیلتر کالمن یعنی $\hat{\mathbf{v}}_{Tx_x}(k|k-1)$ و $\hat{\mathbf{v}}_{Tx_y}(k|k-1)$ استفاده می‌کنیم؛ یعنی معادله (۷) دست‌نخورده باقی می‌ماند؛ اما در معادله (۸) به جای $\dot{\rho}_1^*$ و $\dot{\rho}_2^*$ از تخمین‌های آنها که توسط فیلتر کالمن به‌دست‌آمده، یعنی $\hat{\rho}_1^*$ و $\hat{\rho}_2^*$ استفاده می‌کنیم، لذا معادلات (۱۲) و (۱۳) را به فرم زیر خواهیم داشت:

$$\hat{\rho}_1^*(k) = \left[\mathbf{v}_1 - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_{Tx_x}(k|k-1) \\ \hat{\mathbf{v}}_{Tx_y}(k|k-1) \\ \hat{\mathbf{v}}_{Tx_z}(k|k-1) \end{bmatrix} \right] \frac{\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix}}{\sqrt{(PS_x - Tx_x(k))^2 + (PS_y - Tx_y(k))^2 + (PS_z - Tx_z(k))^2}} \quad (12)$$

$$\hat{\rho}_2^*(k) = \left[\mathbf{v}_2 - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_{Tx_x}(k|k-1) \\ \hat{\mathbf{v}}_{Tx_y}(k|k-1) \\ \hat{\mathbf{v}}_{Tx_z}(k|k-1) \end{bmatrix} \right] \frac{\begin{bmatrix} SS_x \\ SS_y \\ SS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix}}{\sqrt{(SS_x - Tx_x(k))^2 + (SS_y - Tx_y(k))^2 + (SS_z - Tx_z(k))^2}} \quad (13)$$

و آخر، یک عدد به گام زمانی^۱ فعلی اضافه شده و مشاهدات جدید از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره که همان $DTO(k+1)$ و $DFO(k+1)$ هستند، دریافت می‌شود. حال تمام مراحل فوق که برای لحظه k بیان شده بود برای لحظه $k+1$ تکرار می‌شود.

۵- مدل شبیه‌سازی

در این بخش خروجی شبیه‌سازی کد در حالت‌های مختلف نمایش داده می‌شود؛ اما لازم است در ابتدا توضیحاتی در مورد مسیر و موقعیت واقعی هدف ارائه دهیم.

برای طراحی مسیر حرکت از کارشناسان ناوبری دریایی استفاده شد. مسیری که برای حرکت در نظر گرفته شد؛ مطابق با یک سناریوی واقعی بود. هدف طوری انتخاب شد که دارای سرعت متوسط بوده و حدود ده ساعت از حرکت شناور مشاهده می‌شود. در طی این ده

رابطه (۱۱)، مربوط به محاسبه سرعت شعاعی مابین ماهواره PS و گیرنده اول (Rx_1) است. چون گیرنده ثابت فرض می‌شود، به جای آن از بردار صفر ($\vec{0}_{3 \times 1}$) استفاده شده است.

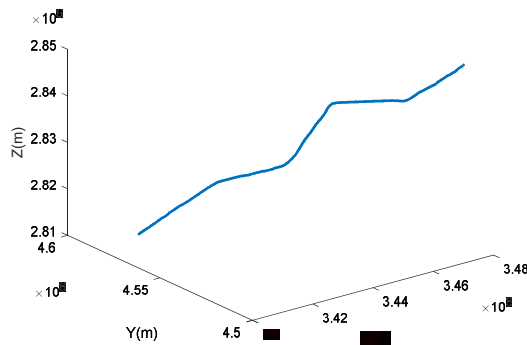
اگر سرعت هدف صفر و یا معلوم باشد، دو معادله فوق (DFO, DTO) با تابع fsolve قابل حل هستند و متغیر مجهول فقط موقعیت هدف یعنی $\mathbf{r}_{Tx}$ خواهد بود. پس برای حذف مجهول سرعت هدف، از فیلتر کالمن کمک می‌گیریم و در فرمول (۱۰) به جای سرعت در زمان k ام،

$$\begin{bmatrix} PS_x \\ PS_y \\ PS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} SS_x \\ SS_y \\ SS_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Tx_x(k) \\ Tx_y(k) \\ Tx_z(k) \end{bmatrix}$$

با توجه به آنچه گفتیم، حال می‌توانیم فرایند انجام کار را بنویسیم. کد متلب اصلی برنامه نیز مطابق با همین فرایند نوشته شده است. این فرایند دارای ۶ مرحله است. در مرحله اول اطلاعات DTO و DFO در لحظه k از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره دریافت می‌شود. در مرحله دوم تخمین موقعیت هدف که توسط فیلتر کالمن به‌دست‌آمده، دریافت می‌شود. در مرحله سوم مقادیر حاصل از تخمین فیلتر کالمن، جایگزین مقادیر حاصل از اطلاعات دریافتی از گیرنده‌های ایستگاه زمینی ماهواره در فرمول‌های مربوط به محاسبه DTO و DFO می‌شود. در مرحله چهارم خروجی fsolve به صورت $GEO r_{Tx}(k)$ و $GEO r_{Tx_y}(k)$ در دسترس است. در مرحله پنجم، فیلتر کالمن با توجه به بردار مشاهدات حاصل از اطلاعات مرحله چهارم، دو خروجی مربوط به موقعیت و سرعت هدف را که یکی از آنها مربوط به فیلترینگ و دیگری مربوط به پیش‌بینی است را ارائه می‌دهد. در مرحله ششم

¹ Time Step

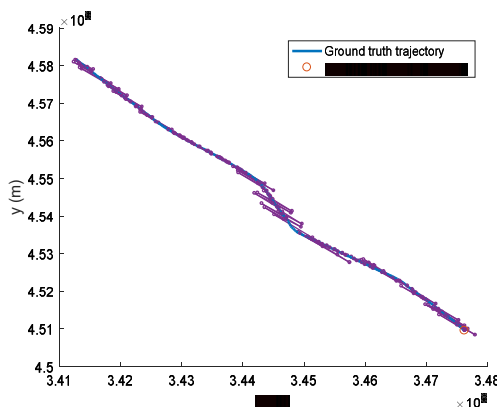


شکل ۴: ترسیم سه‌بعدی مسیر واقعی هدف

اطلاعات این نمونه‌ها در دسترس سیستم موقعیت‌یاب که بر مبنای تلفیق ماهواره GEO و فیلتر کالمن کار می‌کند، نیست. این نمونه‌ها را به کد متلب می‌دهیم تا بر مبنای آن TDOA و FDOA محاسبه و در دسترس سیستم موقعیت‌یاب قرار گیرد.

در کد متلب، تابع geolocation برای اینکه معادله fsolve را حل کند؛ یکی از پارامترهای ورودی که به آن نیاز دارد پیش‌بینی سرعت اولیه هدف است. در این پژوهش، حالت‌های مختلفی برای این پیش‌بینی در نظر گرفته شد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

در حالت اول که خروجی آن در شکل (۵) نشان داده شده است، پیش‌بینی اولیه سرعت هدف، همان پیش‌بینی سرعت توسط فیلتر کالمن است؛ در واقع این خروجی مربوط به کد اصلی برنامه است.



شکل ۵: خروجی کد اصلی برنامه به ازای سرعت

پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن

در کد اصلی برنامه، از سرعت پیش‌بینی شده توسط فیلتر کالمن استفاده شده و همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است فیلتر کالمن توانسته است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند.

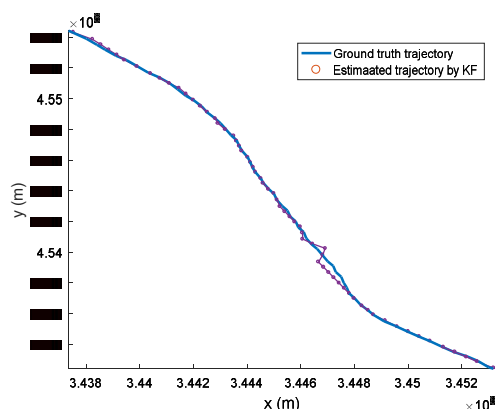
ساعت، از ۲۰۰ نقطه از مسیر حرکت این شناور نمونه‌برداری می‌کنیم.

موقعیت اولیه هدف یک نقطه در خلیج فارس با طول و عرض جغرافیایی (52.3741, 26.5893) در نظر گرفته شد. ابتدا فرض شد هدف با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۲۰ از موقعیت اولیه حرکت و بعد از مدت دو ساعت به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (52.5380, 26.5062) می‌رسد. در مرحله بعد با سرعت ۱۲ مایل دریایی و با راه ۹۰ از موقعیت نقطه دوم حرکت نموده و به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (52.7591, 26.5074) می‌رسد. سپس با سرعت ۱۲ مایل دریایی و با راه ۱۴۰ از موقعیت نقطه سوم حرکت نموده و به نقطه چهارم با طول و عرض جغرافیایی (52.8992, 26.3550) می‌رسد. در گام بعدی با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۰۰ از موقعیت نقطه چهارم حرکت نموده و به نقطه‌ای با طول و عرض جغرافیایی (53.0846, 26.3267) می‌رسد. در آخرین مرحله با سرعت ۱۰ مایل دریایی و با راه ۱۲۰ از موقعیت نقطه پنجم حرکت نموده و به نقطه پایانی مسیر حرکت خود با طول و عرض جغرافیایی (53.2452, 26.2442) می‌رسد.

سپس با استفاده از نرم‌افزار، این نقاط بر روی نقشه مشخص گردیده و با دادن اطلاعات مربوط به سرعت و موقعیت‌های شش‌گانه مشخص شده، سایر نقاط یعنی ۲۰۰ نقطه استخراج گردید. در قسمت بعد از طراحی مسیر حرکت شناور، محاسبات لازم برای تبدیل طول و عرض جغرافیایی موقعیت‌های موردنظر انجام و موقعیت این ۲۰۰ نقطه در دستگاه مختصات دکارتی به صورت X ، Y و Z مشخص گردید.

در مرحله بعد با معلوم بودن نقاط و سرعت هدف متحرک، در بازه‌های تعیین شده، سرعت هدف در سه راستای X ، Y و Z تعیین گردید. بعد از تکمیل شدن بانک اطلاعات مسیر و سرعت هدف، این اطلاعات به‌عنوان موقعیت و سرعت واقعی هدف در قالب یک mat-file به کد اصلی برنامه اعمال شد.

شکل (۴) مربوط به ترسیم مسیر حرکت واقعی هدف با توجه با اطلاعات اعمال شده به کد متلب برنامه است که موقعیت هدف را در سه راستای X ، Y و Z نشان می‌دهد.



شکل ۸: خروجی به ازای سرعت واقعی هدف با تمرکز بر بخش میانی نمودار

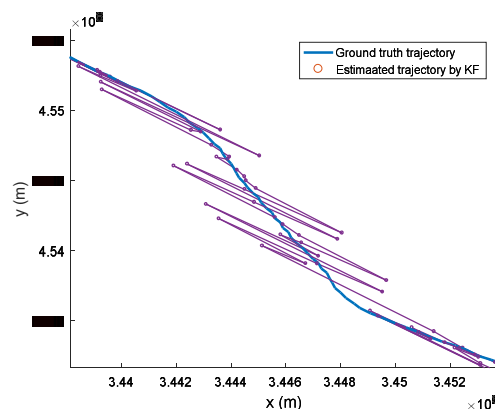
۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، موقعیت‌یابی یک هدف متحرک با استفاده همزمان از ماهواره‌های GEO و فیلتر کالمن انجام شد. موقعیت‌یابی هدف متحرک دریایی با تأکید بر استفاده از ماهواره‌های GEO در دستورکار قرار گرفت. موقعیت‌یابی با ماهواره‌های GEO را با روش‌های متعددی می‌توان انجام داد. روش پیشنهادی ما استفاده همزمان از تکنیک TDOA و FDOA است. استفاده همزمان این دو تکنیک چالش‌هایی را به همراه دارد؛ از جمله اینکه نباید هدف متحرک باشد و به جز ماهواره اصلی نیاز به دو ماهواره فرعی است. برای فائق آمدن بر این محدودیت‌ها، روش پیشنهادی ما استفاده از فیلتر کالمن است.

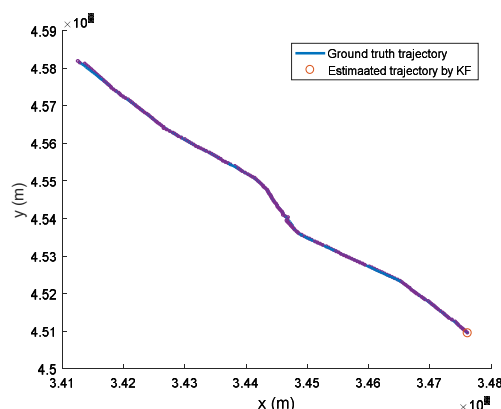
روش کار در این پژوهش، به این صورت بوده‌است که ابتدا فیلتر کالمن یک تخمین اولیه از موقعیت هدف که ممکن است چندان صحیح هم نباشد را به سیستم موقعیت‌یابی می‌دهد. سیستم موقعیت‌یابی برای حل معادلات TDOA-FDOA نیاز به این مقدار اولیه دارد. در این مرحله سیستم موقعیت‌یابی معادلات مربوطه را حل نموده و موقعیت به‌دست‌آمده را به‌منظور به‌روزرسانی اطلاعات، به فیلتر کالمن می‌دهد. این سیکل به همین ترتیب ادامه می‌یابد و در هر مرحله فیلتر کالمن اطلاعات سرعت و موقعیت هدف را به‌روز می‌کند. انجام این مراحل، در ۲۰۰ گام زمانی انجام شد و در نهایت تصویری از تخمین موقعیت و سرعت هدف ارائه شد.

سیستم موقعیت‌یابی به مقدار اولیه سرعت هدف بسیار حساس است؛ بنابراین در این پژوهش دو حالت مختلف برای تعیین این مقدار اولیه در نظر گرفته‌شد. این حالت‌ها

برای اینکه جزییات این نمودار با دقت بیشتری قابل مشاهده باشد؛ بخشی از این نمودار به‌صورت شکل (۶) با تمرکز بر بخش میانی نمودار نمایش داده‌شده‌است.



شکل ۶: خروجی کد اصلی با تمرکز بر بخش میانی نمودار خروجی بعدی مربوط به حالتی است که به‌جای استفاده از سرعت پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن، مقادیر سرعت واقعی را به معادلات DFO و DTO بدهیم. این خروجی در شکل (۷) نشان داده‌شده‌است.



شکل ۷: خروجی به ازای سرعت واقعی هدف

همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است با توجه به اینکه سرعت واقعی هدف به‌عنوان پیش‌بینی از سرعت هدف داده شده، فیلتر کالمن توانسته با دقت بسیار خوبی خروجی را تخمین بزند. برای اینکه جزییات این نمودار با دقت بیشتری قابل مشاهده باشد؛ بخشی از این نمودار به‌صورت شکل (۸) با تمرکز بر بخش میانی نمودار نمایش داده‌شده‌است.

عبارت بودند از: سرعت پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن و سرعت واقعی هدف. در هر دو حالت، مقدار اولیه موقعیت هم همان مقدار پیش‌بینی‌شده توسط فیلتر کالمن در نظر گرفته‌شد.

با استناد به نتایج حاصله از شبیه‌سازی می‌توان گفت که فیلتر کالمن توانسته‌است با دقت مناسبی موقعیت و سرعت هدف متحرک دریایی را تخمین بزند. این تخمین تا حد زیادی به سرعت و موقعیت واقعی هدف مطابقت داشت. همین نتایج نشان داد که اگر به عنوان پیش‌بینی سرعت هدف، سرعت واقعی هدف به کد داده‌شود؛ تخمین موقعیت توسط فیلتر کالمن، تخمین بسیار دقیق و تقریباً منطبق بر مسیر حرکت واقعی هدف متحرک دریایی خواهد بود.

مراجع

- [1] K. C. Ho and Y. T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997.
- [2] D. Haworth, N. G. Smith, R. Bardelli and T. Clement, "Interference localization for EUTELSAT satellites-the first european transmitter location system," *International Journal of satellite communications*, vol. 15, no. 4, pp. 155-183, 1997.
- [3] H. Yan, J. K. Cao and L. Chen, "Study on location accuracy of Dual-Satellite Geolocation system," in *IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings*, IEEE, 2010.
- [4] C. Liu, L. Yang and L. Mihaylova, "Dual-satellite source geolocation with time and frequency offsets and satellite location errors," in *2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, IEEE, 2017.
- [5] R. Bardelli, D. Haworth and N. Smith, "Interference Localization for The Eutelsat Satellite System," *IEEE*, vol. 3, pp. 1641-1651, 1995.

طراحی و ساخت دستگاه تطبیق امپدانس پهن باند برای

سامانه‌های سوناری

محمدحسین قزل‌ایاغ^۱، محمدرضا پالوج^۲، امیرکبیری^۳

۱- دانشیار دانشگاه جامع امام‌حسین (علیه‌السلام)

۲- دانشجوی دکترا، مربی سازمانی گروه برق، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام‌حسین (علیه‌السلام)

۳- مربی، دانشگاه جامع امام‌حسین (علیه‌السلام)

چکیده:

سامانه‌های اولتراسونیک از مبدل‌های کوارتز و سرامیکی برای تولید توان صوتی استفاده می‌کنند. محدودیت اصلی در تولید این توان، ناکافی بودن توان الکتریکی ورودی به دلیل ضریب توان کم و امپدانس بالای مبدل است. در این کار یک روش قاعده‌مند برای طراحی شبکه‌های تطبیق امپدانس الکتریکی باند پهن با ارائه یک روش تلفیقی جدید، با کمک ترکیبی از روش موسوم به محاسبه مستقیم فرکانس واقعی (RFDT) و روش CAD برای مبدل‌های اولتراسوند پیزوالکتریک استفاده شده است. فرآیند طراحی و ساخت شامل پنج مرحله کلی است: ۱) تعیین مدار معادل مبدل پیزوالکتریک بر اساس میزان ادمیتانس اندازه‌گیری شده در بازه فرکانسی مطلوب و تحت شرایط کاری واقعی با کابل ۱۰۰ متری و عمق مناسب در یک استخر بدون انعکاس مناسب ۲) طراحی مجموعه‌ای از شبکه‌های تطبیق امپدانس، با استفاده از نمودار اسمیت کامپیوتری با نرم افزار ADS و SMITHCHART.V.4 ۳) استخراج و اجرای مدل شبیه‌سازی مبدل با تطبیق برای ارزیابی بهره و توان بازگشتی و پهنای باند شبکه‌های تطبیق امپدانس طراحی شده و بررسی اثربخشی رویکرد ارائه‌شده از طریق طراحی، اجرا و مشخصه‌سازی شبکه‌های تطبیق امپدانس برای مبدل انتشار صوتی پهن باند ۴) طراحی مدارات جانبی برای هوشمندسازی و انتخاب IMN مناسب ۵) ساخت EIMN هوشمند مورد نظر و آزمایش نهایی. نتایج حاصله از این تحقیق، در بهترین حالت تطبیق و شرایط ایده‌آل، در شبیه‌سازی با ADS، ۸۵ دسی‌بل بهبود برای S_{11} و ۲۶ دسی‌بل بهبود برای S_{21} ارائه می‌نماید. در شرایط کاری و با استفاده از المان‌های اندازه واقعی فیلترها، ۵۸ دسی‌بل بهبود در S_{11} و ۲۶ دسی‌بل بهبود در S_{21} در حالت واقعی بدست آمد.

کلیدواژه:

شبکه تطبیق امپدانس، مدار معادل پیزوالکتریک، مبدل‌های پیزوالکتریک، سونار، آکوستیک

Design and Manufacture of Broadband Impedance Matching Device for Sonar Systems

Mohammad hosein Ghezel ayagh¹, Mohammadreza Palooj², Amir Kabiri³

^{1,2,3}Imam Hossein University, Tehran, Iran

Abstract

Ultrasonic systems use quartz and ceramic transducers to generate sound power. The main limitation in the production of this power is the insufficiency of the input electrical power due to the low power factor and high impedance of the converter. An impedance matching circuit between the power source and the converter improves power transfer. In this work, a systematic method has been used to design broadband electrical impedance matching networks using a method close to the theory of the real frequency direct calculation (RFDT) technique and CAD for piezoelectric ultrasound transducers. The design and construction process includes five general steps: 1) Determining the equivalent circuit of the piezoelectric transducer based on the amount of admittance measured in the frequency range by an impedance analyzer under real working conditions with a 100-meter cable and

a suitable depth in a swimming pool without proper reflection 2) Designing a set from the impedance matching networks using the computerized Smith chart with ADS and SMITChart.V.4 software 3) extracting and implementing the simulation model of the converter with matching to evaluate the gain and return power and the bandwidth of the designed impedance matching networks and to check the effectiveness of the approach presented through the design, implementation, and characterization of impedance matching networks for the proposed broadband audio propagation converter. 4) Design peripheral circuits for intelligent operation, including frequency meter, maximum voltage measurement by ADC, control system using STM32 and other peripheral circuits. 5) Construction of desired intelligent EIMN and finally final test. In this work, in the best matching mode, in the simulation mode in ADS, 85 dB improvement was achieved in S_{11} and 26 dB improvement in S_{21} . With the actual element sizes of the filters, 58 dB improvement was obtained in S_{11} and 26 dB improvement in S_{21} . The selection speed of the desired matching circuit is also very high.

Keywords:

underwater piezoelectric transducer; broadband matching circuit; real frequency technique; EIMN;

و نظایر آن با توجه به اهمیت وظایفی که به عهده دارند، طراحی می‌شوند [۱-۳].

در صورت عدم تطبیق امپدانس، سیگنال از بار به داخل کابل منعکس می‌شود. نتیجه می‌تواند تداخل داده‌ها، امواج ایستا (SW)، تلفات و اعوجاج باشد. همچنین در سامانه سونار، توان غیرفعال بالایی ایجاد می‌کند که ناشی از ویژگی‌های خازنی داخلی است. بنابراین بازده تقویت کننده توان بسیار کاهش می‌یابد. تطبیق امپدانس خروجی فرستنده، انتقال توان را به حداکثر می‌رساند و منجر به نرخ سیگنال به نویز (SNR) بهتر، تفکیک پذیری فضایی (فاصله) و نرخ کنتراست به نویز (CNR) بهتر می‌شود [۲-۵].

در تطبیق امپدانس، حداکثر انتقال نیرو در مبدل‌های آلتراسونیک، زمانی که امپدانس‌های ورودی و خروجی یک شبکه EIM (Z_{in} و Z_{out}) به ترتیب فقط با مزدوج مختلط امپدانس الکتریکی منبع تحریک (Z_s) و یک مبدل آلتراسونیک پیزوالکتریک (Z_t) در فرکانس تشدید معادل باشند، بدست می‌آید. در شکل (۱) مشخص شده است که امپدانس الکتریکی از اجزای مقاومتی و راکتیو تشکیل شده است. این روابط به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند:

$$Z_s(\omega) = R_s(\omega) + jX_s(\omega) \quad (1)$$

$$Z_t(\omega) = R_t(\omega) + jX_t(\omega) \quad (2)$$

در روابط فوق، j نشان دهنده واحد موهومی است و ω فرکانس کار تناوبی است.

انتقال حداکثر توان در سامانه‌های انتقال، چه آنکه هدف، صرفاً انتقال انرژی باشد یا اینکه انتقال یک سیگنال حاوی اطلاعات، از مهمترین مباحث آن است. مدار تطبیق می‌تواند باعث کاهش اتلاف انرژی تقویت کننده توان، افزایش پهنای باند سامانه و بهبود اعوجاج شکل موج منتقل شده شود. هر خط انتقال الکتریکی که شامل انتقال توان یا سیگنال الکتریکی باشد؛ نیاز به تطبیق پارامترهای الکتریکی بین طبقات مختلف مثل راه‌انداز^۱، منبع، کابل، بخش الکترونیکی فرستنده و گیرنده و المان ورودی-خروجی فرستنده و گیرنده مثل آنتن یا مبدل^۲ سیگنال، دارد؛ چرا که انتقال حداکثر توان و حفظ سیگنال انتقالی به لحاظ دامنه و شکل موج، در بین طبقات یک نیاز اساسی می‌باشد. در طراحی مدار یا شبکه تطبیق امپدانس الکتریکی^۳ (EIMN) برای حسگرهای پیزوالکتریک^۴، عملگرها^۵ و مبدل‌ها نیاز به بررسی دقیق فرکانس‌های کار، امپدانس فرستنده و گیرنده، منبع تغذیه یا امپدانس راه‌انداز و امپدانس الکترونیک گیرنده و نیز تحلیل پارامترهای موثر بر آن‌ها دارد. دستگاه‌های ساخته شده از مواد پیزوالکتریک، در گروه مواد هوشمند^۶ قرار می‌گیرند و ماده اصلی ساخت مبدل‌ها، حسگرها، عملگرها و ساختارهای هوشمند را شامل می‌شوند. برخی دستگاه‌ها با کاربردهایی مانند سونار^۷ دریایی، بعنوان مثال ارتباطات زیرسطحی یا شناسایی اهداف زیر یا روی سطح توسط زیردریایی‌ها، ماهی‌یاب‌ها و فاصله یابی در زیر آب، همچنین سلامت ساختاری^۸ (مثلاً استحکام ساختار بدنه شناورها، هواپیما یا پل‌ها و مانند آن)، نظارت بر وضعیت عملکرد، ارزیابی بدون تخریب^۹ و تصویربرداری پزشکی، تمیز کردن اولتراسونیک، جوشکاری

¹ driver

² transducer

³ electric impedance matching network

⁴ piezoelectric sensor

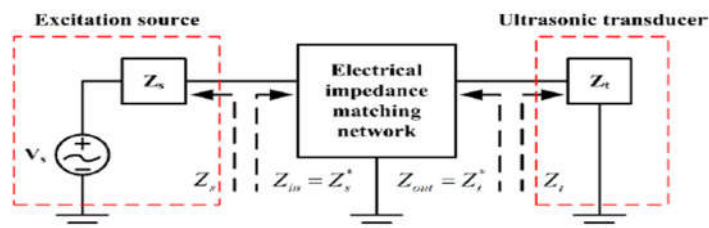
⁵ actuator

⁶ Smart materials

⁷ sonar

⁸ structural health monitoring (SHM)

⁹ nondestructive evaluation (NDE)



شکل (۱) پیگر بندی ساده یک مبدل آلترا سونیک با مدار تطبیق [۲]

در روابط فوق Z_s^* و Z_t^* به ترتیب مزدوج مختلط Z_s و Z_t هستند. انتخاب مناسب پارامترهای مبدل مانند هندسه، طراحی الکتروود و خصوصیات مواد در مرحله طراحی، محل و نحوه نصب، خود منجر به تطبیق امپدانس الکتریکی بسیار بهینه شده با بازده‌های انتقال قدرت زیاد می‌شود [۹-۱]. تاریخچه مختصری از کارهای انجام شده قبلی در جدول (۱) گزارش شده است.

با این حال، همانطور که برای یک شبکه تطبیق امپدانس الکتریکی بهینه، می‌توان امپدانس الکتریکی ورودی و خروجی شبکه EIM را به صورت معادلات (۳) و (۴) نشان داد:

$$Z_{in}(\omega) = Z_s^*(\omega) = R_s(\omega) - jX_s(\omega) \quad (3)$$

$$Z_{out}(\omega) = Z_t^*(\omega) = R_t(\omega) - jX_t(\omega) \quad (4)$$

جدول (۱) مشاهده کارهای انجام شده و اهم دستاوردها

نویسنده اصلی و سال	منبع	اهم کار
ویوک ۲۰۱۹	[۱]	بررسی مدارات تطبیق سوناری- بررسی مدارات معادل پیزو الکتریک- تحلیل چندین نمونه از کارهای انجام شده
جی آر نولد ۲۰۱۴	[۲]	بررسی تطبیق امپدانس و تغییرات امپدانس و رزونانس تحت بار- بهبود K_{eff} - استفاده از مدل میسون و فیزیک
یانگ وانگ ۲۰۱۵	[۳]	استفاده از تکنیک RFDT- افزایش نسبی پهنای باند - ۱۰dB بهبود در توان ارسالی
یان یانگ ۲۰۱۷	[۴]	بررسی کلی بهبودهای بهره الکترو صوتی، K_{eff} ، چگالی طیف توان در دونوع مدار تطبیق سلف سری- خازن موازی و بالعکس- هر کدام برخی مولفه ها را تقویت و برخی را تضعیف می کنند.
جین یانگ ۲۰۱۶	[۵]	بهبود توان راکتیو بوسیله دو سلف موازی که یکی از آنها تحت شرایطی وصل می شود- بهبود در دو سطح کلی انجام می شود- رفتار مبدل خازنی است- نسبتا کم هزینه
پیزن فنگ ۲۰۱۷	[۶]	استفاده از مدل BVD- استفاده از ترانس و سلف و خازن جهت تطبیق، بهبود ۵ dB در توان ارسالی
علی بخشی ۲۰۲۰	[۱۵]	استفاده از فیلترهایی با الگوریتم ژنتیک سریع که در مقایسه با نوع معمولی سریع تر هستند. مبنای کار افزایش سرعت تطبیق است.
ولیم بادجت ۲۰۱۵	[۱۶]	استفاده از سروو موتور برای تغییرات سلف ها و خازن های مدار تطبیق برای تغییرات آنتن و کنترل آنها با میکروکنترلر- به دلیل فرایند مکانیکی سرعت و دقت تطبیق در مقایسه سیستم الکترونیکی کم است.
کار ما ۲۰۲۲	-	استفاده از مدار معادل بوسیله آنالایزر (بسیار دقیق)، تحت بار، تحت شرایط کار واقعی- ۸-۲۶dB در توان ارسالی- تا ۵۸ dB در توان بازگشتی- تطبیق هوشمند با تغییرات فرکانس در+ کمتر از میلی ثانیه

یک تکنیک تلفیقی جدید است که به روش تئوری موسوم به محاسبه مستقیم فرکانس واقعی (RFDT) و روش CAD [۱،۴] نزدیک است. همچنین مشابهت هایی با روش الگوریتم ژنتیک سریع [۸] دارد. شکل (۲) الگوریتم اجرای این کار ارائه شده است.

۲- شبکه تطبیق امپدانس پهن باند هوشمند

در تطبیق امپدانس، یک روش که غالباً برای کار در فرکانس های غیرتشدید استفاده می شود، از یک تک سلف یا سلف سری، خازنی موازی یا بالعکس استفاده می شود [۴،۵]. روش دیگر که برای جاهایی که دقت بیشتر در تطبیق امپدانس لازم است یا تغییرات شدید در امپدانس داریم مثلاً در نقاط تشدید، از شبکه های تطبیق استفاده می شود که به نحوی کنترل می شوند [۶-۸]. روش مورد نظر و انتخابی این کار برای اجرای تطبیق امپدانس،

برای اینکه مدار معادل سوناری انتخاب شده، به واقعیت نزدیک‌تر و دقیق‌تر باشد، باید اثرات کابل و بار و مباحث فیزیکی از جمله محل و نحوه نصب، در مدار معادل لحاظ شود. در چنین شرایطی بهترین روش استفاده از امپدانس آنالایزر است. برای این کار، مبدل در محل مناسب خود بطور صحیح نصب شده و در عمق کاری مناسب موردنظر کاربران، با جنس و طول کابل واقعی، در یک استخر مناسب بدون انعکاس استاندارد، قرار می‌گیرد و امپدانس آن محاسبه می‌شود [۱۰-۱۲].

۲-۲- استخراج مدار تطبیق امپدانس

برای استخراج سریع، ساده و دقیق‌تر مدار تطبیق، می‌توان از نمودار اسمیت و نرم افزارهای متعدد در دسترس آن استفاده کرد. از جمله این نرم‌افزارها، می‌توان به SMITHCHART V.4 و نیز بخشی از نرم افزار ADS استفاده نمود. در هر یک از این روش‌ها، ابتدا نقطه امپدانس منبع و همچنین امپدانس بار، روی صفحه نمودار اسمیت پیدا و در نظر گرفته می‌شود. روی نمودار اسمیت باید بر روی خطوط مشخص شده امپدانس و ادmittانس از بار به سمت منبع حرکت کرده و مدار تطبیق را استخراج نمود. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، اگر المان سری اضافه شود، روی دواير Γ ثابت و اگر المان موازی اضافه شود، روی دواير g ثابت حرکت خواهد کرد. وقتی روی خطوط Γ ثابت از بار به سمت منبع برویم، سلف سری بصورت ساعتگرد و خازن سری بصورت پادساعتگرد حرکت می‌کند و اگر روی دواير g ثابت حرکت کنیم، سلف موازی بصورت پادساعتگرد و خازن موازی بصورت ساعتگرد حرکت می‌کند [۱۲-۱۵].



شکل (۲) نمای بلوکی شبکه تطبیق امپدانس ساخته شده

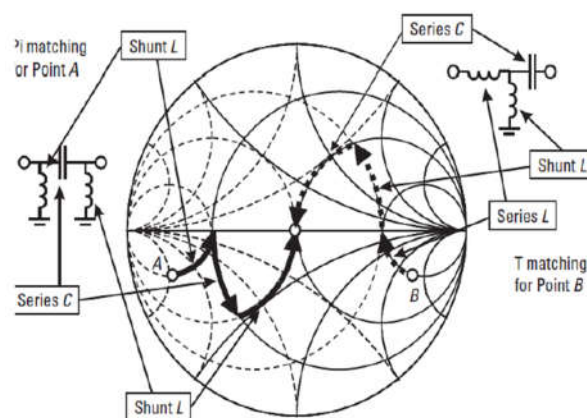
در این روش از یک میکروکنترلر ARM برای کنترل مجموعه شبکه تطبیق که شامل تعدادی مدار تطبیق مجزا می‌باشد، استفاده شد. اجزای اصلی این دستگاه شامل مدارات تطبیق، میکروکنترلر، پیش‌مدار فرکانس متر، پیش‌مدار ولت متر، مجموعه سوئیچ‌ها و LCD می‌باشد. در این روش انتخابی، انتظار می‌رود که سرعت اجرای تطبیق بالاتر از روش الگوریتم ژنتیکی سریع باشد همچنین از نظر تعداد المان‌های مدار تطبیق تفاوتی با روش الگوریتم ژنتیکی سریع نداشته یا کمتر است. همچنین به دلیل انتخاب فیلترهای جداگانه برای هر فرکانس، دقت و بهبود بیشتری نیز در مقایسه با سایر روش‌ها بدست خواهد آمد.

۲-۱- مدار معادل مبدل سوناری

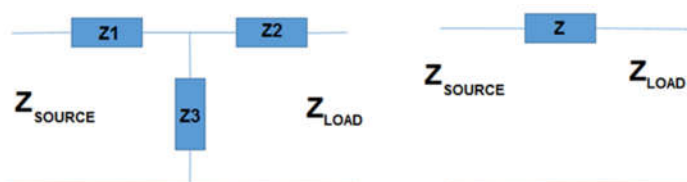
بطور طبیعی برای یک طراحی الکتریکی، اجزای مختلف مدار باید بصورت الکتریکی باشد؛ در صورت وجود یک عنصر غیر الکتریکی، مانند مواد هوشمند از قبیل پیزوالکتریک‌ها، باید مدار معادل آن را در طراحی لحاظ نمود. این یک ضرورت برای اجرای تطبیق امپدانس الکتریکی می‌باشد [۹].

پس از پایان این مرحله با توجه به میزان حرکت روی دواير، اندازه سلف یا خازن‌های مدار تطبیق و توپولوژی آن بدست می‌آید و بدین صورت مدار تطبیق در امپدانس موردنظر استخراج می‌شود.

برای این کار تعداد بیست و دو فیلتر، بررسی شده و بازده فیلتر برای شبکه تطبیق امپدانس طراحی شده، انتخاب شد که بصورت شکل T در سمت چپ شکل (۴) می‌باشد. همچنین، برای بهبود در نقاط نول چهار فیلتر تک المان سری مانند سمت راست شکل (۴) نیز استخراج شد.



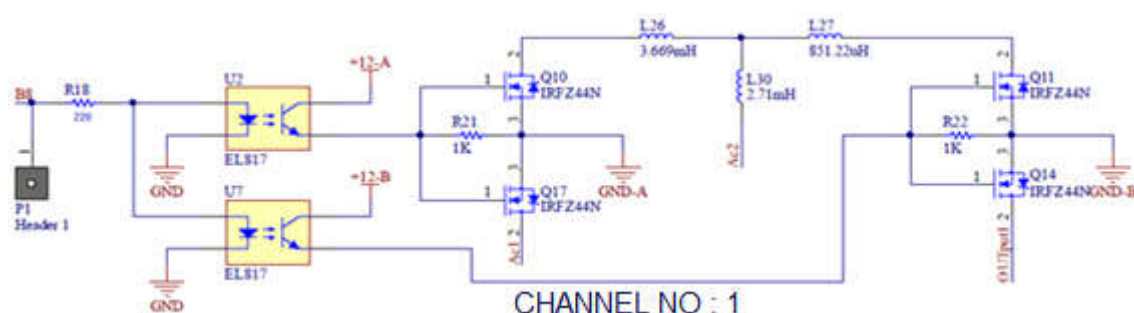
شکل (۳) حرکت و استخراج مدار تطبیق از نمودار اسمیت



شکل (۴) مدار تطبیق امپدانس تک و سه المان T

۲-۳- مدار و دستگاه تطبیق امپدانس هوشمند

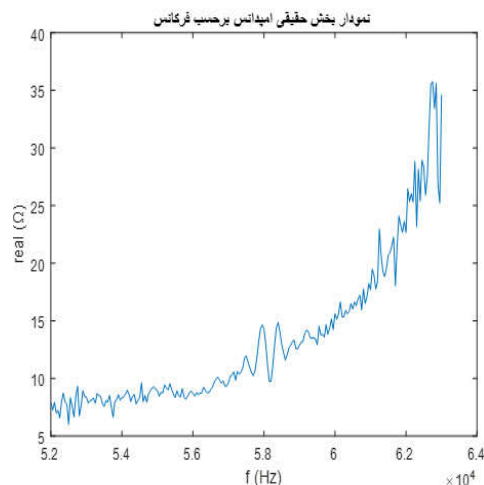
مدارات تطبیق امپدانس که به صورت T طراحی شده‌اند، همانطور که در شکل (۵) مدار کانال شماره ۱ مشاهده می‌شود، هر مدار، دارای دو سویچ AC در دوطرف خود می‌باشد که مدار تطبیق امپدانس بوسیله آن‌ها، در سمت خروجی به مبدل سوناری وصل شده و در سمت ورودی، به خروجی فرستنده یا تقویت‌کننده توان متصل می‌گردند. این سویچ‌ها، بوسیله یک ولتاژ ۱۲ ولت مستقیم که از طریق دو اوپتوکوپلر^{۱۰} مجزا کنترل می‌شوند و با خروجی میکروکنترلر، کنترل می‌گردند.



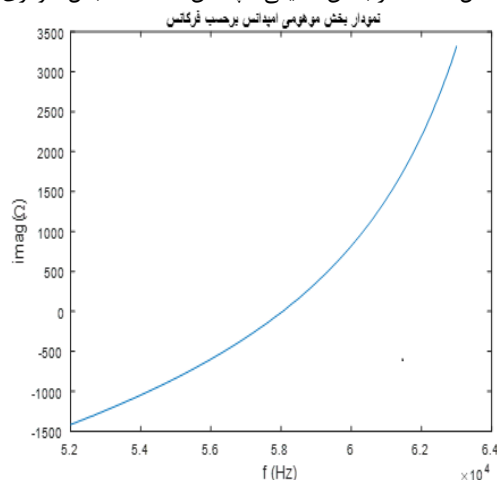
شکل (۵) مدار یک فیلتر تطبیق با فرمان از میکروکنترلر

¹⁰ optocoupler

یعنی در یک استخراج بدون انعکاس با کابل مناسب، استخراج شد. این نمودار، نشان می‌دهد که در مدارات تطبیق نیز، هم مدارات سلفی و هم مدارات خازنی، وجود خواهد داشت.



شکل (۶) مقدار بخش حقیقی امپدانس مشخصه مبدل سوناری



شکل (۷) مقدار بخش موهومی امپدانس مشخصه مبدل سوناری

۲-۴-۱- نمودار توان ارسالی و بازگشتی فرستنده

مورد نظر بدون تطبیق

با توجه به پهنای باند مورد نظر برای انجام تطبیق امپدانس، (۵۵ تا ۶۰ کیلوهرتز)، می‌توان، به فاصله دلخواه فرکانسی، امپدانس مشخصه را تحلیل نموده و معیارهای توان برگشتی و توان ارسالی به بار را قبل از انجام تطبیق، مورد بررسی قرار داد. در ابتدا ۲۲ مدار تطبیق، در شبیه‌ساز و پس از بررسی بیشتر و لحاظ نمودن هزینه-فایده، تعداد ۱۱ مدار تطبیق با فاصله ۵۰۰ هرتز طراحی شده است؛ رفتار مدار سوناری را بدون تطبیق امپدانس در

در نهایت مدار کامل شبکه تطبیق امپدانس هوشمند، شامل مدارت تطبیق امپدانس، سویچ‌های AC، مدار فرکانس‌متر، مدار ولت‌متر، منابع تغذیه داخلی، LED های نشانگر فیلتر فعال، صفحه نمایش (LCD) و مدارات جانبی آن و نیز میکروکنترلر و مدارات جانبی آن، طراحی و ساخته می‌شود.

۲-۳-۱- اثرات المان‌های مدار تطبیق (فیلترها) و

شبکه تطبیق

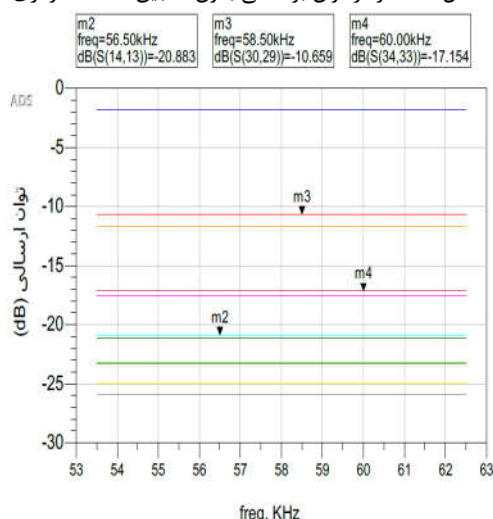
برای انتخاب یک مدار تطبیق با ولتاژ و جریان بالاتر، فقط نیاز به خریدن سلف‌ها و خازن‌های با تحمل توان بالاتر و در نتیجه گران‌قیمت‌تر می‌باشد و مساله فنی دیگری وجود ندارد. المان‌های مدارهای تطبیق، سلف و خازن هستند؛ هرچه مقادیر واقعی سلف و خازن مورد استفاده، با مقادیر بدست آمده در شبیه‌سازی، نزدیکتر باشد؛ مقادیر المان‌های بهبود نظیر S_{11} ، S_{21} به مقدار ایده‌آل نزدیکتر و بهتر است و هر مقدار که از آن منحرف شود، این بهبودها، نیز کاهش می‌یابند.

در شبکه تطبیق امپدانس هوشمند، ماسفت‌های سویچ، که بیشترین تعداد المان‌های شبکه تطبیق را تشکیل می‌دهد؛ دو مولفه مقاومت درین-سورس حالت روشن و سرعت قطع و وصل آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای این کار هستند. در مجموع می‌توان گفت مهم‌ترین عامل برای افزایش کیفیت و سرعت این کار، هزینه آن است و نه آنکه روش یا مبانی علمی آن باشد.

۲-۴-۲- استخراج امپدانس مشخصه مبدل مورد نظر

با توجه به اینکه با تغییر فرکانس، امپدانس مبدل سونار نیز تغییر می‌کند، امپدانس مشخصه مبدل سونار بصورت یک نمودار، بوسیله متلب در شکل (۶)، بخش حقیقی امپدانس و شکل (۷)، بخش موهومی آن در بازه مورد نظر، نمایش داده شده است. این مقادیر بصورت عددی توسط امپدانس‌آنالایزر استخراج شدند. همچنین برای دقت بالای کار، امپدانس آنها، در شرایط مشابه کاری،

شکل (۸) نمودار توان برگشتی بدون تطبیق سامانه سوناری



شکل (۹) نمودار توان ارسالی بدون تطبیق سامانه سوناری

۲-۴-۲- استخراج مدار تطبیق و اندازه المان‌های

تطبیق

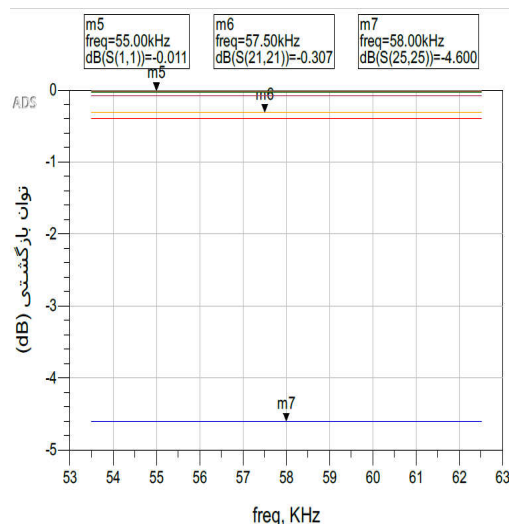
از طریق نمودار اسمیت نرم افزار smithchart v.4 با تفکیک بسیار بالا، المان‌های مدار تطبیق، استخراج شد. مدار تطبیق ایجاد شده بصورت شکل (۴)، مدل T، می‌باشند. تعداد ۱۱ مدار تطبیق، انتخاب شد. اندازه المان‌های مدار تطبیق استخراج شده، مطابق جدول (۲) می‌باشد. در جدول (۲) و (۳) سلف‌ها برحسب میلی‌هانری و خازن‌ها برحسب نانوفاراد هستند.

جدول (۲) مقادیر اندازه المان‌های مدار تطبیق ایده‌آل

فرکانس فیلتر	55 KHz	55.5KHz	56KHz	56.5KHz	57 KHz	57.5KHz
اندازه المان‌های تطبیق	L1=3.699 L2=0.8512 L3=2.71	L1=1.435 L2=1.4771 L3=0.992	L1=3.1 L2=0.405 L3=2.215	L1=0.3026 L2=1.1752 L3=0.23715	L1=0.893 L2=0.5155 L3=0.7055	L1=0.3818 L2=0.293 L3=0.3777
فرکانس فیلتر	58 KHz	58.5KHz	59 KHz	59.5KHz	60 KHz	
اندازه المان‌های تطبیق	L2=0.10452 L3=86.97	C1=40.83 C2=22.4 C3=34.98	C1=15.5 C2=10 C3=15	C1=13.974 C2=5.6 C3=13.331	C1=20.515 C2=3.57 C3=15.7	

بهبود قابل قبول، در شبکه تطبیق هوشمند طراحی شده، در نقاط میانی فیلترها ایجاد کنند. در این بخش، طبق جدول (۳) تعداد معقولی تک المان حسب هزینه-فایده انتخاب شده‌است.

نرم افزار ADS، از نظر پارامترهای تطبیق بررسی شده- است. برای این کار امیدانسی‌های هر فرکانس را در ADS قرار داده و نمودار S_{11} و S_{21} آن را در بازه فرکانسی مشاهده و بررسی می‌کنیم. نقطه توان برگشتی و توان ارسالی مورد نظر در شکل‌های (۸) و (۹) قابل مشاهده- است. در شکل (۸) به ترتیب توان برگشتی با فاصله ۵۰۰ هرتز در بازه کاری هستند. همچنین در شکل (۹) به همان ترتیب توان ارسالی در همان بازه هستند که هر کدام با رنگ خاصی مشخص شده‌است و بعضی از نقاط متفاوت تر از بقیه، روی فرکانس مورد نظر علامت‌گذاری شده و مقدار آنها نمایش داده شده‌است.



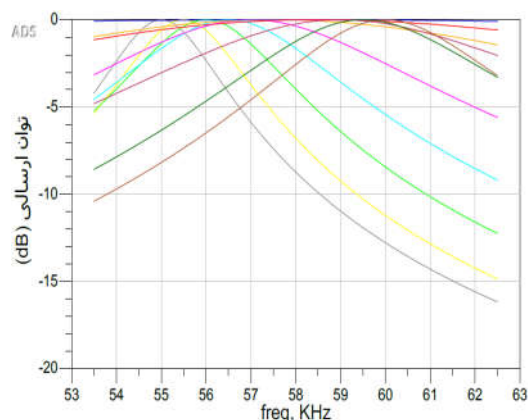
فیلترها یا مدارات تطبیق مشخص شده، برای فرکانس‌های مشخصی با فاصله ۵۰۰ هرتز طراحی شده‌اند؛ برای بهبود در نقاط فرکانسی بین این فرکانس‌های تطبیق شده، می‌توان از تک‌سلف یا تک‌خازن‌هایی استفاده کرد، که یک

جدول (۳) مقادیر تک المان برای تطبیق و بهبود نقاط میانی

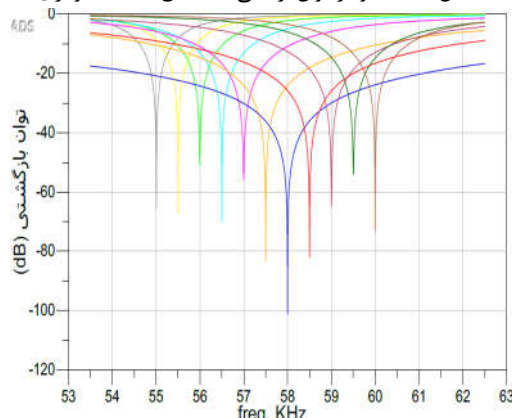
بازه فرکانسی	(55-56.25)Khz	(56.25-57.25)khz	(57.25-58)khz	(58.25-58.75)khz	(58.75-59.25)khz	(59.25-60)khz
اندازه سلف یا خازن	L=2	L=1.1	L=0.5	C=17	C=7.5	C=4.6

۲-۴-۳- نمودار توان ارسالی و بازگشتی فرستنده مورد نظر با اجرای تطبیق

مدار تطبیق استخراج شده، با نرم افزار نمودار اسمیت، در نرم افزار ADS برای همه فرکانس‌ها، پیاده‌سازی می‌شود. سپس مولفه‌های تطبیق شامل توان بازگشتی (S_{11}) و توان ارسالی (S_{21}) در حالت تطبیق ایده‌آل در نرم‌افزار، در نمودارهایی که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌است، بدست می‌آید. مشاهده می‌شود که تطبیق کامل صورت گرفته‌است و در بهترین حالت، ۲۶ دسی‌بل تطبیق در توان ارسالی و ۸۵ دسی‌بل بهبود در توان بازگشتی وجود دارد.



شکل (۱۰) نمودار توان ارسالی با تطبیق سامانه سوناری

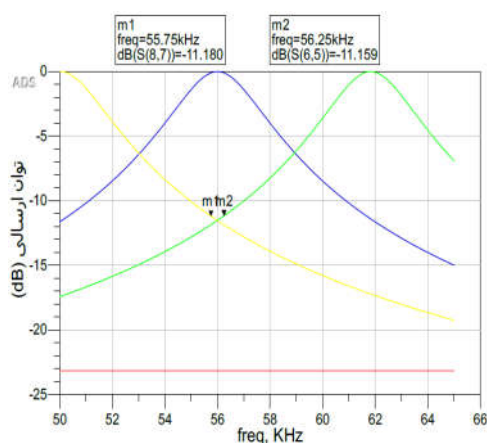


شکل (۱۱) نمودار توان بازگشتی با تطبیق سامانه سوناری

۲-۴-۴- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی

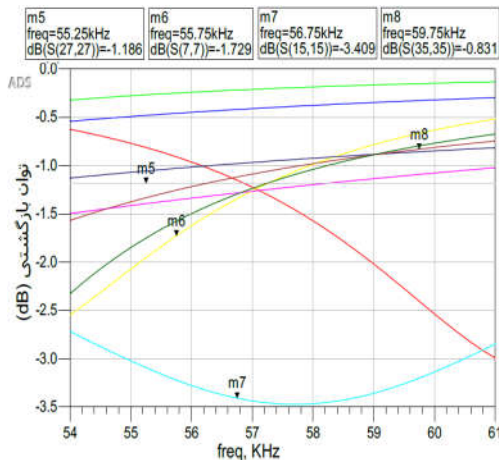
فرستنده، با تطبیق در نقاط بدون فیلتر

برای بررسی تطبیق در بدترین حالت، فیلترها را انتخاب کرده و به فاصله ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از آن را بعنوان نقطه میانی انتخاب نموده و امپدانس آن‌ها را ثبت کرده و پارامترهای تطبیق آن را بررسی می‌کنیم. به عنوان نمونه در حول فرکانس ۵۶ کیلوهرتز نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی بررسی شد. در شکل (۱۲) بهبود حاصل شده در بدترین حالت، روی این نقاط برای توان ارسالی مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که حدود ۱۱،۱۵ دسی‌بل بهبود در توان ارسالی (S_{21}) بدست می‌آید که قابل قبول است. همچنین در شکل (۱۳) نیز توان بازگشتی نمایش داده شده‌است که حدود ۰،۳ دسی‌بل بهبود نیز در توان بازگشتی (S_{11}) مشاهده می‌شود.



شکل (۱۲) بهبودهای توان ارسالی به فاصله ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از مدار تطبیق ۵۶ کیلوهرتز

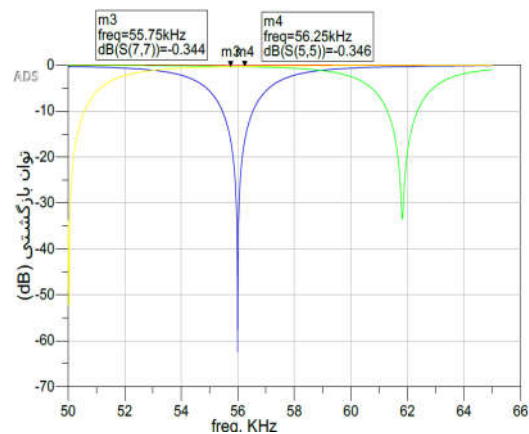
شکل (۱۴) بهبود توان ارسالی با تک المان تطبیق سری



شکل (۱۵) بهبود توان بازگشتی با تک المان تطبیق سری

۲-۴-۶- اندازه‌های واقعی المان‌های تطبیق

در عمل، دستیابی به المان‌های مدارات تطبیق، با اندازه‌های شبیه‌سازی، امکان‌پذیر نیست. برای رسیدن به نزدیک‌ترین مقدار به آن‌ها، می‌توان با توجه به درصد خطای ساخت المان‌ها با اندازه‌گیری توسط LCR متر دقیق، در بین تعداد زیادی المان، اندازه دلخواه را پیدا کرد. همچنین، می‌توان با سیم‌پیچی دستی سلف‌های بشک‌های، مقدار مطلوب را ساخت. سوم آنکه، می‌توان با سری یا موازی کردن المان‌ها، اندازه‌های دلخواه را ایجاد کرد. در نهایت، مقادیر المان‌های تطبیق، طبق جدول (۴) در حالت واقعی بدست آمد.

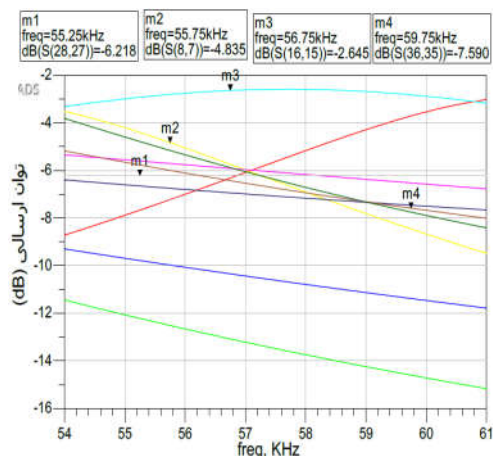


شکل (۱۳) بهبودهای توان بازگشتی در ۲۵۰ هرتز قبل و بعد از فیلتر ۵۶ کیلوهرتز

۲-۴-۵- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی با

اجرای تطبیق تک المان

اگر بهبودهای بدست آمده در نقاط میان فیلترها، کافی نباشد، می‌توان تعداد محدودی المان‌های تکی مطابق جدول (۳) برای دستیابی به بهبودهای قابل قبول در این فرکانس‌ها، استفاده کرد. از نمودار شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که بهبود خوبی در توان‌های ارسالی، تا ۱۸ دسی‌بل بهبود و از نمودار شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که بهبود تا ۳٫۵ دسی‌بل در توان بازگشتی خواهیم داشت. اندازه این پارامترها می‌تواند با افزایش تعداد فیلترها، بهتر شود.



جدول (۴) مقادیر واقعی المان‌های تطبیق

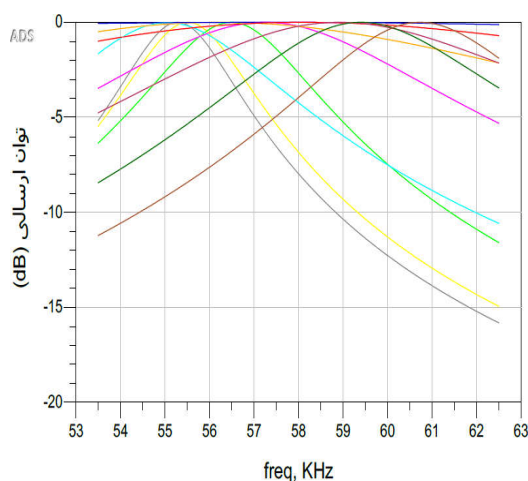
فرکانس فیلتر	55 KHz	55.5KHz	56KHz	56.5KHz	57 KHz	57.5KHz
اندازه	L1=3.674	L1=1.463	L1=3.093	L1=0.3064	L1=0.894	L1=0.3865
المان‌های تطبیق	L2=0.850	L2=1.473	L2=0.3963	L2=1.199	L2=0.5135	L2=0.3006
	L3=2.687	L3=0.988	L3=2.201	L3=0.2681	L3=0.700	L3=0.386
فرکانس فیلتر	58 KHz	58.5KHz	59 KHz	59.5KHz	60 KHz	
اندازه	-	C1=40.75	C1=15.54	C1=14	C1=20.59	
المان‌های تطبیق	L2=0.1061	C2=22.6	C2=10.01	C2=5.6	C2=3.523	
	C3=86.75	C3=34.90	C3=15.01	C3=13.04	C3=15.665	

شکل (۱۷) بهبودهای توان بازگشتی، با المان‌های با اندازه واقعی

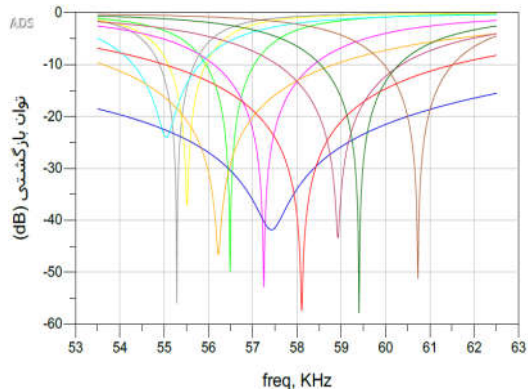
۴-۲-۷- نمودار توان ارسالی و توان بازگشتی

فرستنده با تطبیق المان‌ها با اندازه واقعی

طبق نمودار شکل (۱۶) توان ارسالی فرستنده، با ایجاد تطبیق با اندازه‌های واقعی، اندازه‌ای بسیار نزدیک به ایده‌آل، یعنی همان ۲۶ دسی‌بل دارد؛ اما طبق نمودار شکل (۱۷) توان بازگشتی به بهبود ۵۸ دسی‌بل، یعنی حدود ۲۷ دسی‌بل کمتر از اندازه ایده‌آل دارد.



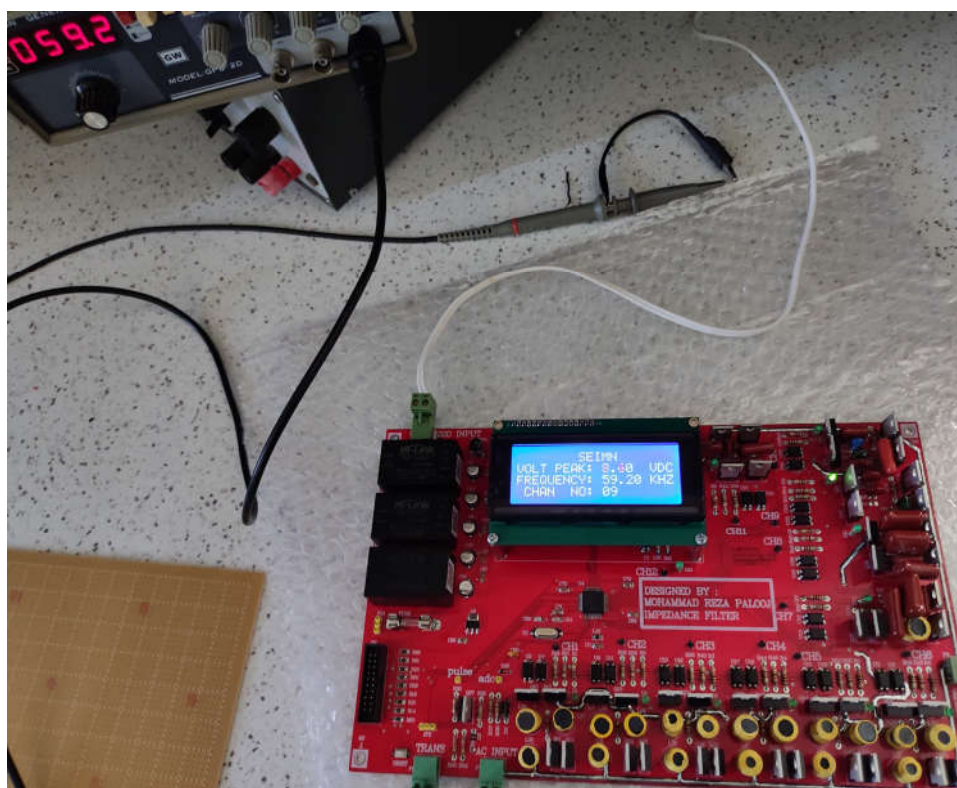
شکل (۱۶) بهبودهای توان ارسالی، با المان‌های با اندازه واقعی



۴-۲-۸- عملکرد شبکه تطبیق امپدانس و الگوریتم

کار آن

هر شبکه تطبیق امپدانس هوشمند برای عملکرد خود، نیاز به یک مبنای عملکرد دارد. شبکه تطبیق هوشمند ساخته شده در این کار، بر مبنای فرکانس و ولتاژ، کار می‌کند. از آنجا که، برای هر فرکانسی در پهنای باند کاری این دستگاه، یک مدار تطبیق، با فاصله هر ۵۰۰ هرتز طراحی شده است؛ لذا هر فرکانس، که دارای مدار طراحی متناظر باشد می‌تواند به سرعت اندازه‌گیری و با بهترین فیلتر ممکن، تطبیق شود. در فرکانس‌های میان دو فیلتر نیز، می‌توان ولتاژ پایانه فرستنده را در حالت تطبیق و تحت بار با دو فیلتر طراحی شده برای فرکانس قبل و بعد از آن مقایسه کرد و هرکدام بیشتر بود به عنوان فیلتر مورد نظر برای آن فرکانس انتخاب نمود. ناگفته نماند که برای انتخاب فیلتر در بین دو فرکانس، بهتر است توان ارسالی اندازه‌گیری شده و هرکدام بزرگ‌تر بود انتخاب شود؛ اما در اینجا به دلیل اینکه تفاوت بسیار ناچیز است و عدم اعوجاج مهم‌تر است؛ از ولتاژ استفاده شده‌است. شکل (۱۸) یک نمونه از این عملکرد را در فرکانس ۵۹,۲۰ کیلوهرتز و انتخاب کانال ۹ نشان می‌دهد.



شکل (۱۸) فرکانس کار بین دو فیلتر طراحی شده

با توجه به شرح فوق الگوریتم پیاده‌سازی طراحی شده بصورت کلی به شکل (۱۹) است:



شکل (۱۹) فرکانس کار بین دو فیلتر طراحی شده

۳- بحث و نتیجه‌گیری

- ۱- مدارات تطبیق، طراحی شده از طریق نرم افزار smithchart.v4 و پیاده‌سازی و شبیه‌سازی آن‌ها در ADS در بهترین حالت خود، در پارامترهای تطبیق، به ۸۵ دسی‌بل بهبود در

در نهایت، این الگوریتم به زبان برنامه‌نویسی C نوشته‌شد و به میکروکنترلر ARM دستگاه ساخته شده کمپایل شد. این دستگاه با سرعت بسیار بالا، عملکرد خود را به دقت انجام می‌دهد.

منابع:

- [۱] Vivek T. Rathod , "A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers" mdp.electronics, 2019
- [۲] J. Arnold, S. Gonçalves, L. Bravo Roger, S. Mühlen, "Electrical Impedance of Piezoelectric Ceramics under Acoustic Loads" TOEE, uploaded by Francisco J. Arnold on 04 March 2017.
- [۳] Y. Wang, D. Sun, J. Yong "Design of Broadband Matching Circuit for Underwater Acoustic Communication Transducer" ISRME 2015
- [۴] Y. Yang, X. Wei , L. Zhang , W. Yao, "The Effect of Electrical Impedance Matching on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Ultrasonic Transducers" MDPI, December 2017
- [۵] F. Peisen, C. Bingyan, Z. Changping, Zhou Yan, Z. Ruigen, X. Xiaohui , G. Yulin, "Characteristics of electrical matching for power piezoelectric transducer" IEEE 2017
- [۶] J-y. Kiml, S. M. Thajeell, S. Choil, D. Kiml, S. Lee, H. Lee, W. Moon , "Design of Adaptive Matching Circuit for Sonar System" (ITEC) Pohang Univ 2016
- [۷] Mohammad Alibakhshikenari^{1*}, Bal S. Virdee², Pancham Shukla², Chan H. See^{3,4}, Raed A. Abd-Alhameed⁵, Francisco Falcone⁶ & Ernesto Limiti¹ "Improved adaptive impedance matching for RF front-end systems of wireless transceivers" nature research 2020.
- [۸] William bodget "3.5 to 30 MHZ automatic antenna impedance matching system" senior project "electrical engineering department california" august 2012
- [۹] Haiying Huang, , and Daniel Paramo "Broadband Electrical Impedance Matching for Piezoelectric Ultrasound Transducers" IEEE 2011.
- [۱۰] S. Lin , J. Xu, "Effect of the Matching Circuit on the Electromechanical Characteristics of Sandwiched Piezoelectric Transducers" MDPI, January 2017

S_{11} و ۲۶ دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.

- ۲- مدارات تطبیق، در بدترین وضعیت تطبیق، در نقاط حداقلی بهبود در فرکانس بین دو مدار تطبیق، به ۰٫۵ دسی بل بهبود در S_{11} و ۱۲ دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.
- ۳- برای رسیدن به بهبود بهتر در نقاط میانی دو مدار تطبیق، از المان‌های تکی سلف یا خازن سری استفاده شد که در این حالت به ۳٫۵ دسی بل بهبود در S_{11} و ۱۸ دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.
- ۴- در حالت واقعی، امکان دستیابی به این مقدار بهبود، بخصوص در S_{11} ممکن نیست. با اندازه‌های واقعی المان‌های تطبیق، که ساخته یا ترکیب شدند، به ۵۸ دسی بل بهبود در S_{11} و بسیار نزدیک به ۲۶ دسی بل بهبود در S_{21} دست یافتند.
- ۵- دقت تطبیق، در روش این کار از بهترین انواع تطبیق‌هاست. سرعت این کار نیز به دلیل استفاده میکروکنترلر و نیز سویچ ماسفتی، بالا است. برای ارتقا سرعت می‌توان از ماسفت‌ها و میکروکنترلر سریع‌تر استفاده کرد.
- ۶- فرایند تطبیق امپدانس با توجه به استفاده از میکروکنترلر و پارامترهای مشخص شده و در نتیجه انتخاب برتر توسط میکرو، بصورت خودکار انجام می‌شود. لذا به نوعی هوشمند است.
- ۷- برای افزایش جریان و ولتاژ کاری، فقط نیاز به تغییرات بسیار جزئی و خرید المان‌های با تحمل توان بیشتر است و تکنولوژی جدیدی نیاز ندارد.
- ۸- این کار قابلیت تعمیم به سامانه‌های تطبیق فرستنده، در سایر کاربردهای پهن‌باند مانند سایر کاربردهای سوناری و آنتن‌های مخابراتی و

- [١١] C. Covaci, A. Gontean, "SPICE Model of a Piezoelectric Transducer" IEEE 2018
- [١٢] V. Matko, M. Milanović, "Detection Principles of Temperature Compensated Oscillators with Reactance Influence on Piezoelectric Resonator" MDPI 2020
- [١٣] Y. CHEN, S. WANG, H. ZHOU, Q. XU, Q. WANG, J. ZHU, "A systematic analysis of the radial resonance frequency spectra of the PZT-based (Zr/Ti = 52/48) piezoceramic thin disks" Journal of Advanced Ceramics 2020
- [١٤] A. Bybi, H. Drissi, M. Garoum, A. Hladky, "One-Dimensional Electromechanical Equivalent Circuit for Piezoelectric Array Elements" Springer Nature Switzerland AG 2019
- [١٥] M. J. Hagmann, "Analysis and equivalent circuit for accurate wideband calculations of the impedance for a piezoelectric transducer having loss" AIP Advances, 2019
- [١٦] R. Queirós, P. S. Girão, A. C. Serra, "Single-Mode Piezoelectric Ultrasonic Transducer Equivalent Circuit Parameter Calculations and Optimization Using Experimental Data" 2004 , uploaded by Ricardo Queirós on 21 April 2015

Simulation of twist extrusion process parameters of AA6061-T6 aluminum alloy by artificial neural network

Mohammad Khosravi^{1*}, Iman Taheridoustabad¹

¹Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology Birjand, P.O. Box: 97175-569235, Iran

*mkhosravi@birjandut.ac.ir

Abstract.

Modern fabrication is to a large extent based on deformation processing. Plastic deformation process is a technique capable of producing metal products with high strength and good ductility. Using the parameters of load, temperature and the number of passes in twist extrusion, it is possible to produce an alloy with good properties and characteristics. Plastic deformation of AA6061-T6 aluminum alloy by twist extrusion is an important issue. In this study, we investigated the effect of load, temperature and the number of passes of twist extrusion on AA6061-T6. Using the input and output data, the process was modeled by the neural network method. In order to train the neural network, Neuro Solution software was used and for reducing the mean square error, the gradient descent momentum algorithm was implemented. Results showed that the effect of the number of passes and the load on tensile strength and hardness were maximum and minimum respectively.

Keywords: Twist extrusion, artificial neural network, the number of passes

1. Introduction

Today, the application of severe plastic deformation (SPD) methods has increased widely. These methods are based upon strain accumulation and microstructure formation in nanoscale [1]. Plastic deformation of metals can improve their strength and ductility. Some of the SPD methods investigated broadly include equal channel angular extrusion, cyclic extrusion compression, accumulative roll bonding, multi axial forging and twist extrusion (TE) [1-2]. Extrusion is one of the metal forming processes that has attracted many interests in recent years. This method can be used for manufacturing aircraft engine components, aircraft parts and vehicles [3-4].

In dry powder extrusion, reinforced grains or plastics are heated and passed through a matrix which is the extrusion mold. TE is one of the common plastic deformation methods [5-6]. This is a new technique used as a hydrostatic pressure to make high amount of tension on metals in order to produce refined particles without any significant change in the overall dimensions of the sample [7].

Aluminum alloys are advantageous with regards to light weight and high performance. Among them, AA6061-T6 has proper ductility, good machinability and weldability, low corrosion rate and light weight [8-9].

Optimization of parameters in plastic deformation processes is important. In TE, the effect of parameters like temperature and the number of passes is the main issue for plastic deformation [10]. Ultrafine grain metals have high strength and good flexibility [11]. These properties are very important for developing advance structures. The most effective way to obtain fine grain materials is the simple shear stress [1]. In TE the shape of the mold is similar to that of the equal channel angular extrusion, but in the former there are two shear planes, one perpendicular to and the other parallel with the extrusion axis [12]. TE is capable of extruding hollow parts. Also, it can lead to more homogeneous strains by 90° rotation of the part in each pass, which is a very important issue in magnetic and electronic materials [4].

Iqbal and Kumar [13] performed experiments on the analysis of mechanical properties and microstructure of AA7075-T6 deformation by TE. They studied TE and deformation of AA7075-T6. Four different temperatures and three passes were used in the experiments. Mechanical properties and microstructure at different temperatures and different number of passes were investigated. Results showed that the TE can change the particles of the structure. With increasing the number of passes, hardness increased and homogeneous structure improved, while tensile strength decreased at high temperatures. It was found that the TE passes reduce particles size and improve mechanical properties. It was reported that the desired temperature range for achieving better mechanical properties of this alloy is 250-350°C. It was also expressed that the microstructure analysis shows that the displacement of particles in three pass TE is less than the one pass, therefore the particles boundary and the particles

refinement for this alloy are suitable at the optimum temperature and the more number of passes. Velmanirajan et al. [14] performed the numerical modeling of aluminum sheets ductility and investigated the surface reactions. In their study, tensile properties, tensile limitations in ductility, and flexibility parameters of commercial aluminum alloy sheets were investigated. Sheets with three different thicknesses were selected and tensile test, forming test and flexibility study were performed. The result of modeling showed that the experimental relations for discovering the ductility capability are fully consistent with the experimental results. Therefore, the aforementioned factors for achieving the effective ductility capability are desirable. Kumar and Iqbal [15] investigated the effect of temperature and the number of passes on deformation of AA6082-T6 homogeneous microstructure by TE. Results of their study showed that the change of AA6082-T6 particles after one pass leads to a heterogeneous microstructure. With increasing the number of extrusion passes, the microstructure heterogeneity disappears and the stress induced in the samples is not the same for all passes. With increasing the temperature and the number of passes, both the stress and the heterogeneity in distribution of tension decrease. Tensile strength and hardness of the sample also increase up to 10% with increasing the temperature and the number of passes. Before extrusion, the microstructure of the sample showed particles with an average size of 42 μm , while with increasing the number of passes and the temperature, the size reduced 20 μm . As a result, with increasing the number of passes, the particles are refined and the strength and hardness increase, so the temperature and the number of passes are considered as input parameters. Results of this study showed that the model was logically in agreement with the experimental values. The factors investigated on TE of AA6082-T6 show that the lower tension at the beginning of the first pass compared to the third pass, in which the heterogeneity in the distribution of tension is low due to the temperature and the number of twists, leads to work hardening. Iqbal et al. [10] performed experiments on TE of AA6061-T6 to investigate the effect of extrusion load, temperature, the number of passes, hardness distribution and tensile properties. Results showed that the predicted values were consistent with the experimental values. It was also found that the two main factors are temperature and the number of passes which affect the tensile strength and hardness. Using high temperature and the more number of passes, tensile strength and hardness increase 8-10%, and extrusion load has the least effect. Also, the optimal value of variables for TE of AA6061-T6 included: load of 1000 KN, temperature of 500 °C and three extrusion passes. These values are useful in high temperature TE experiment of various aluminum alloys. Zendehdel and Hassani [16] investigated the effect of TE on mechanical properties and microstructure of 6063 aluminum alloy. 6063 aluminum alloy was deformed by TE method and its mechanical properties and microstructure were investigated before and after the experiment. They noticed that the more number of TE passes resulted in finer grain microstructure. Also, with increasing the number of TE passes, yield strength, ultimate tensile strength, and hardness increased, while after a relative reduction of elongation by intermediate of passes, they remained unchanged. Finally when deformed by TE, both the strength and the ductility of material improved. Iqbal and Kumar [8] studied the effect of multi pass TE on AA6061. The effect of three pass TE on AA6061 sample at different temperatures was investigated. Results showed that the normal plastic tension at the end part of the workpiece is higher than the beginning part. It was also found that in the corner areas more tension occurs compared to the center zone. This difference in tensile distribution is reduced by increasing the number of TE passes. Experimental results were also studied. The billet volume decreased in the last phase of the deformation and was minimized by all the TE passes. Asghar et al. [7] investigated the effect of three pass extrusion on an aluminum sample. They found that the end part of the sample, unlike the beginning part, was more affected by the plastic tension. It was also found that in the corner areas more tension occurred compared to the center zone, and by increasing the number of TE passes, the heterogeneity in distribution of tension in both longitudinal and transverse pass regions reduced. Mousavi et al. [17] performed an experiment on successive accumulation of three pass TE of an aluminum sample at room temperature with and without subsequent direct extrusion. They found that direct extrusion after three pass TE increased the hardness and the tensile properties, but reduced the mechanical heterogeneity in the pass region. Asghar et al. [7] investigated the effect of implementation of three pass TE on high purity of an aluminum sample and reported that in the corner areas more tension occurred compared to the central zone. With increasing the number of TE passes, the heterogeneity in tensile distribution decreased.

The purpose of all the aforementioned studies is finding a suitable method for achieving good and homogenous mechanical properties. Researches has been carried out on optimization of TE parameters such as twist angle, friction factor and motor speed. Optimization of experiment conditions makes it possible to achieve good mechanical properties in homogeneous areas. In metal forming processes, normally the trial and error method is used for process design, which is expensive and time consuming. Application of modern hybrid methods such as numerical simulation combined with optimization and modeling techniques makes it possible to achieve the best design without making high expenses.

In this study, optimization of input parameters has been investigated using the artificial neural network (ANN) in order to achieve good strength and hardness.

2. Experimental method

AA6061-T6 plates were cut into rectangular sections by dimensions of $20 \times 30 \times 100 \text{ mm}^3$. The chemical composition of AA6061-T6 is presented in Table 1 and the samples were tested from two to four flat

points according to the ASTM standard. Table 2 gives mechanical properties of AA6061-T6. Final specimens were machined in dimensions of $18 \times 28 \times 100 \text{ mm}^3$ by the milling machine [10].

Table 1. Chemical composition of AA6061-T6 (weight percent) [10].

Al	Fe	Mn	Ti	Si	Cr	Cu	Mg	Zn
balance	0.7	0.2	0.1	0.6	0.35	0.4	1.25	0.25

Table 2. Mechanical properties of AA6061-T6 [10].

Materials	Elongation	Shear strength	Ultimate tensile strength	Performance power	Hardness
AA6061-T6	12	207	243	214	84

After cleaning, the samples were placed in a furnace and heated to the required temperature. Figure 1 shows the two parts of the TE mold. The cross section of the two channels has the characteristics of $18 \times 28 \times 100 \text{ mm}^3$ and the angle between them is $\beta = 36^\circ$. TE experiments were performed by a 1500 KN Yukon

hydraulic press, as is shown in Figure 2. The back pressure of the machine press was 200 MPa and the extrusion displacement velocity was 5 mm/s. Figure 3 shows the specimens before and after TE [10].

3. Experiment based ANN

The extrusion process has an effective role in manufacturing of products due to its changeability, efficiency and high production rate. In order to improve the quality of

products or manufacturing of products with new shapes, the process design and analyze



Fig. 1. The two parts of the TE mold [10].



Fig. 2. Experiment set up [10].

through experiments is costly and time consuming. One of the methods that can predict the relations between process parameters and results is the ANN model. This model has attracted many interests in recent

years and has been used to predict the behavior of various forming processes in many cases [18-19].

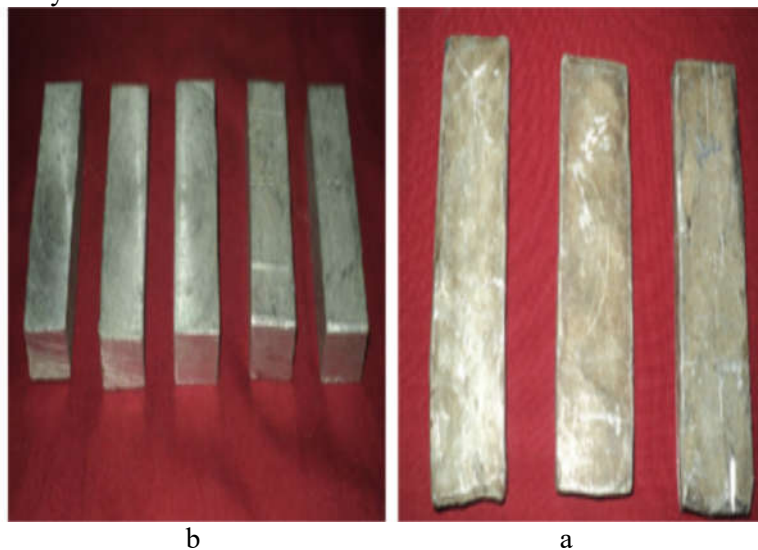


Fig. 3. AA6061-T6 specimens (a) before TE and (b) after TE [10].

The neural network theory is derived from the structure of human brain and can process large amounts of information. ANNs are adaptive models that can learn from the data and can generalize to the trained data. The multilayer neural network consists of input, hidden and output layers. The hidden layer can have one layer or more. The input layer is the first layer of multilayer neural networks. The layers placed between the input and output layers are called hidden. The hidden layer processes the data received from the input layer and sends the response to the output layer. The output layer receives all the responses and generates the output vector [20]. An ANN has been

designed in order to achieve the desired results in TE. For a perfect extrusion operation, the extrusion pressure is a critical factor. The extrusion load difference is mainly due to the temperature of primary specimen which interacts with factors such as engine speed. The quality of extruders is estimated by two factors which limit manufacturing, i.e. the output temperature and the extrusion maximum load. In this study, the initial temperature and the initial load were adjusted by the operators based on experience and parameters like the number of passes. Considering the above factors, experiments were performed on different load ranges, temperatures and the number of passes. In low

levels of parameters (lower than load 1000 KN and 300 °C) the work was difficult because the ductility was impressed and the compounds were faulty due to insufficient load. In high levels of parameters (higher than 500 °C and load 1200 KN), no compound was stored, which is in contrary to the principle of TE. According to the experiments results, the parameters range was selected based on the

macrostructure of electrodes twisting and the defects observable for each specimen. The working limitations of TE parameters selected based on the above criteria are presented in Table 3. In this experiment, the purpose is achieving the maximum tensile strength, hardness and properties like better and larger types

Table 3. Chemical composition of AA6061-T6 (weight percent) [10].

parameters	Levels		
	(-1)	(0)	(+1)
Load (KN)	1000	1100	1200
Temperature (°C)	350	425	500
Number of passes	1	2	3

3.1. Design of experiment matrix

Due to a wide range of factors, the application of three factors, three levels and a complete design of factor matrix was decided in order to establish the desired conditions of experiments. The factorial section is essentially the design of a full factorial with all the factors in two levels (high, +1 and low, 1-) formed from eight star points and six central points (coded with level zero). The full factorial is the midpoint of high and low levels and corresponds to value α . All of coefficients were determined using the full factorial pattern designed by a statistical software. After the coefficients estimation (at the probability level of 95%), all of relationships were extended and only these coefficients were used in them. Thus, the effect of nonlinear, quadratic and two interaction factors on the strength of twist extruders compounds were estimated by twenty experiments. For ease of the experimental data record and process, the factors upper and lower levels were coded +1 and -1, respectively. The design of experiment matrix is shown in Table 4 [10].

3.2. Experimental tests

As shown in the design of experiment in table 4, twenty tests were performed and in each compound the samples were polished with chlorine solution. Then the samples were etched and observed under a microscope, and the microstructures were analyzed using a photo analysis software. Surface scan was

performed by Hitachi S-3400N model electron microscope. AA6061-T6 tensile specimens were prepared by spark cutting according to ASTM B557M-10 standard. Tensile test was performed by a Hansfield machine with capacity of 50 KN. Hardness test was performed using Akashi MVK-E3 hardness tester with 2.5 g material and time of 15 s. Hardness test was performed at the distance of 0.5 mm. In each experiment, three samples were tested and the mean values are given in Table 4.

4. Conclusions

One advantage of using an ANN is that the network model is easily constructed and trained based on the input and output data to accurately predict dynamic processes. Neural networks are capable of approximating a multi-input/output process with any level of complexity based on the accuracy required by the network designer, an if the selected neural network fits with the data and the nature of process, then it will lead to proper learning and accurate prediction [21]. The nonlinear nature of the problem studied here from one side, and the number of parameters affecting the process from the other side, led to the application of an ANN for modeling the process. The mentioned network is capable of processing any kind of data properly and is one of the strongest networks for simulating nonlinear problems. This network is trained through the change of middle layers' weight and these changes are

stored as the network assumptions [22]. The network structure used is designed with three inputs and two outputs. The input parameters include temperature, load and the number of

passes while the outputs include tensile strength and hardness.

Table 4. Design of experiment matrix and reactions of AA6061-T6 [10].

Number	Coded values			Original values			Tensile strength (MPa)	Hardness (HV@0.5)
	A	B	C	Load (KN)	Temperature (°C)	Number of passes		
1	-1	0	0	1000	425	2	295	100
2	+1	-1	-1	1200	500	1	301	107
3	+1	-1	+1	1200	350	3	256	96
4	0	0	0	1100	425	2	290	99
5	+1	0	0	1200	425	2	294	98
6	+1	+1	+1	1200	500	3	309	111
7	-1	+1	+1	1000	500	3	312	110
8	0	+1	0	1100	500	2	301	107
9	0	-1	0	1100	350	2	251	91
10	0	0	0	1100	425	2	294	99
11	0	0	+1	1100	425	3	304	101
12	0	0	0	1100	425	2	293	98
13	0	0	0	1100	425	2	293	94
14	-1	-1	+1	1000	350	3	255	95
15	0	0	-1	1100	425	1	284	93
16	0	0	0	1100	425	2	291	99
17	0	0	0	1100	425	2	294	98
18	-1	-1	-1	1200	350	1	249	90
19	-1	-1	-1	1000	350	1	248	89
20	+1	+1	-1	1000	500	1	299	106

The Tansig transfer function is considered for the hidden layers and the pureline transfer function for the output layer. The method of training and the way of learning include Lunberg-Marquardt and Gradient descent momentum, respectively. In training the simulation of mechanical processes, Lunberg-Marquardt method is often used. In order to optimally design the neural network, by trial and error, the network with different structures has been evaluated based on the mean squared errors criterion. This criterion is equation (1) defined as:

$$MSE = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (T_{ij} - O_{jj})^2$$

where m is the number of neural network output neurons, n is the number of data used

for network training, T is the target data for each output neuron, and O is the predicted value per output neuron.

5. Results and discussion

In order to train the neural network, Neuro Solution software was used while for reducing the root mean square error, the Lunberg-Marquardt algorithm was implemented. Out of the 20 laboratory data, 60% of them were used for training, 15% for validation, and 25% for network testing. Table 5 shows the neural network model characterization used for network training.

(1)

Table 5. The developed neural network characterization.

Network type	Forward with the error propagation algorithm
Network architecture	2 – 1 – 12 – 3
Learning algorithm	Gradient descent momentum
Hidden layers transfer functions	Tansig
Output layer transfer function	Linear
The number of iterations	1000
The number of runs	3

The network with 2-1-12-3 architecture means that in the first layer (the input) there are 3 neurons which are equal to the number of variable parameters investigated. Layers 2 and 3 are hidden layers which have 12 and 1 neurons, respectively. The last layer (the output) has two neurons which are equal to the number of outputs investigated in this network. In order to train the neural network, the gradient descent momentum algorithm, which is one of the fastest network training methods, was implemented. The duty of this algorithm is reduction of root mean square error during network training. Sigmoid transfer function was considered for hidden layers in which case the data outputs were placed inside the range of +1 and -1. For the output layer, a linear function was used. The linear output allows the

Table 6. Neural network mean error.

Total runs	Minimum training	Standard deviation training
Mean errors	0.0538	0.0879
Final mean errors	0.0538	0.0879

network to have outputs outside the range of +1 and -1.

Table 6 shows the mean error obtained after network training with 1000 iterations and a total of three runs. Table 7 gives the best network obtained during training. As is shown in Figure 4, the best network is obtained in the third run and the convergence of the root mean square error is occurred in iteration 1000.

In order to investigate the effect of each parameter, the Neuro Solution method was used. As is shown in Figure 5, the number of passes has the maximum effect and the load has the minimum effect on tensile strength and hardness.

Table 7. Results of the best neural network run.

The best network	Training
Run	3
Iteration	1000
The least error	0.0030
Final error	0.0030

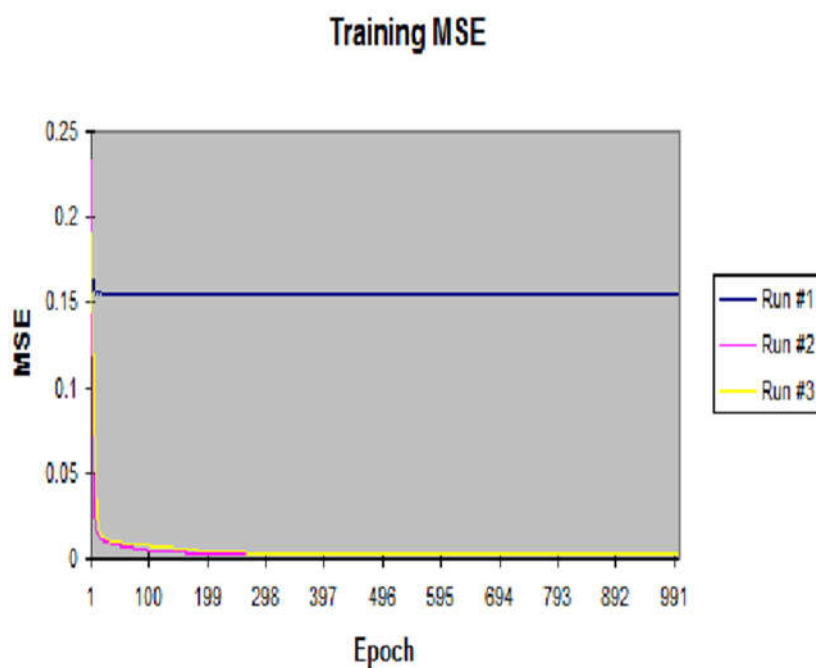


Fig. 4. Convergence plot of the root mean square error based on the number of iterations.

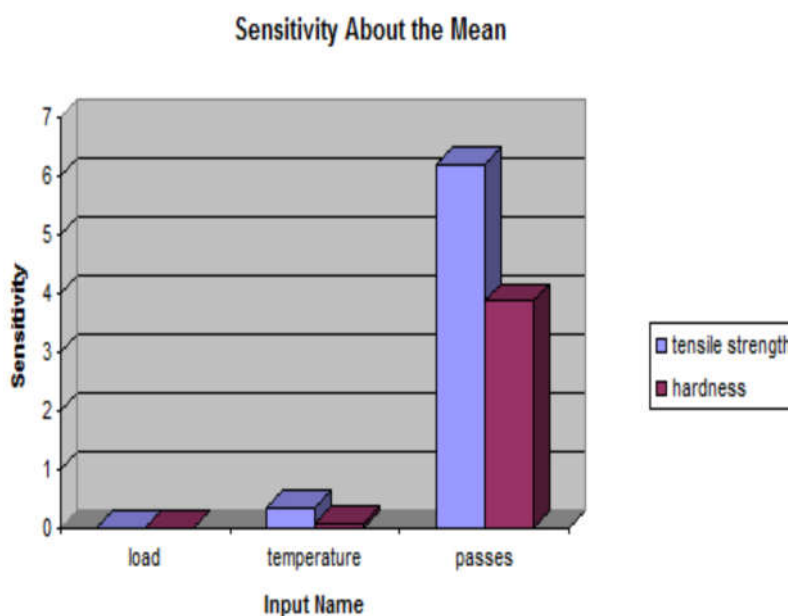


Fig. 5. The effect of the number of passes, temperature and load on tensile strength and hardness.

6. Conclusions

In this study, experimental investigations and optimization of TE of AA6061-T6 were performed in order to explore the effect of extrusion load, temperature, and the number of passes on hardness and tensile strength. The results of neural network showed that the two main effective parameters including temperature and the number of passes had the

maximum effect and the extrusion load had the minimum effect on tensile strength and stiffness.

Acknowledgements. The authors thank the Sustainable Nano-Surface of the East (Iran, payanano.com). No external funding was received for this study.

References

- [1] VALIEV, Ruslan Z.; STRAUMAL, Boris; LANGDON, Terence G. Using Severe Plastic Deformation to Produce Nanostructured Materials with Superior Properties. *Annual Review of Materials Research*, 2022, 52.
- [2] VALIEV, R. Z.; ALEKSANDROV, I. V. *Nanostructured Materials Produced by Intense Plastic Deformation*. Logos, Moscow, 2000.
- [3] EDALATI, Kaveh, et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 2022, 10.4: 163-256.
- [4] WANG, Zhi-Rui, et al. A Review of Ultrafine-Grained Magnetic Materials Prepared by Using High-Pressure Torsion Method. *Materials*, 2022, 15.6: 2129.
- [5] BODKHE, Mohan G., et al. Finite element analysis of copper tube to study the behavior of equivalent strength during the severe plastic deformation process. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 3129-3136.
- [6] FAREGH, Sara Sadat Hosseini; HASSANI, Amir. Stress and strain distribution in twist extrusion of AA6063 aluminum alloy. *International Journal of Material Forming*, 2018, 11.2: 175-184.
- [7] ASGHAR, Seyed Ali; MOUSAVI, Akbari; BAHADOR, Shahab Ranjbar. Investigation and numerical analysis of strain distribution in the twist extrusion of pure aluminum. *JOM*, 2011, 63.2: 69-76.
- [8] IQBAL, U. Mohammed; KUMAR, VS Senthil. An analysis on effect of multipass twist extrusion process of AA6061 alloy. *Materials & Design*, 2013, 50: 946-953.
- [9] OKOKPUJIE, I. P.; TARTIBU, L. K. A mini-review of the behaviour characteristic of machining processes of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [10] MOHAMMED, I. U.; SENTHIL, K. S. Application of Response Surface Methodology in Optimizing Process Parameters of Twist Extrusion Process for Aluminum Aa 6061-T6 Alloy. *Measurement*, 2016, 94.94: 126-138.
- [11] KUMAR, N., et al. The influence of metallurgical factors on low cycle fatigue behavior of ultra-fine grained 6082 Al alloy. *International Journal of Fatigue*, 2018, 110: 130-143.
- [12] HEYDARI, Farnam; SALJOGHI, Hamed; NOURBAKHS, Sayed Hassan. Numerical Investigation of the Cross-section and Twist Extrusion Die Angle on the Distribution of Plastic Strain and Microstructure of Al7050 Alloy. *Journal of Stress Analysis*, 2020, 4.2: 1-8.
- [13] MOHAMMEDIQBAL, U.; SENTHILKUMAR, V. S. Experimental investigation and analysis of microstructure and mechanical properties on twist extrusion forming process of AA7075-T6 aluminium alloy. *Int J Mech Mater Eng (IJMME)*, 2012, 7.1: 24-30.
- [14] VELMANIRAJAN, K., et al. Numerical modelling of aluminium sheets formability using response surface methodology. *Materials & Design*, 2012, 41: 239-254.
- [15] SENTHIL KUMAR, V. S.; MOHAMMED IQBAL, U. Effect of Process Parameters on the Microstructure Homogeneity of AA6082 Aluminum Alloy Deformed by Twist Extrusion. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2013. p. V02AT02A023.
- [16] ZENDEHDEL, H.; HASSANI, A. Influence of twist extrusion process on microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy. *Materials & Design*, 2012, 37: 13-18.
- [17] MOUSAVI, SAA Akbari; BAHADORI, Sh Ranjbar; SHAHAB, A. R. Numerical and experimental studies of the plastic strains distribution using subsequent direct extrusion after three twist extrusion passes. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527.16-17: 3967-3974.
- [18] POURSAFAR, Amin, et al. Experimental and mathematical analysis on spring-back and bowing defects in cold roll forming process. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2022, 1-13.
- [19] PHAM, Cao Hung, et al. Mechanical properties and residual stresses in cold-rolled aluminium channel sections. *Engineering structures*, 2019, 199: 109562.
- [20] DE SANTANA GOMES, Wellison José. Structural reliability analysis using adaptive artificial neural networks. *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*, 2019, 5.4.
- [21] WANG, Linda; LIN, Zhong Qiu; WONG, Alexander. Covid-net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest x-ray images. *Scientific Reports*, 2020, 10.1: 1-12.

[22] IQBAL, U. Mohammed; KUMAR, V. S. Effect of process parameters on microstructure and mechanical properties on severe plastic deformation process of AA7075-T6 aluminum alloy. In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 705-709.

الگوی نگارش مقاله در دوفصلنامه «مهندسی شناورهای تندرو»

نام و نام خانوادگی نویسنده

Author@Email، سازمان متبوع نویسنده،

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:

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

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 2003 یا Word 2007 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.

۲- فرمت مقاله

مقالات باید در اندازه صفحه A4 چاپ شده باشند. مقاله بایستی بین ۱۰ تا ۱۵ صفحه دوستونی 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 PDF تهیه و ارسال شود.

۳- حاشیه‌ها

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.

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.

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

۲۵mm

۱۰mm

[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، $A \quad m^2$

چگالی، $\rho \quad kg/m^3$

۱۱- مراجع

منابع اشاره‌شده 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.