



گروه صنایع دریایی High Speed Crafts Engineering

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

سال ۲۳ ، شماره ۶۵
پاییز و زمستان ۱۴۰۳

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

صاحب امتیاز:

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

مدیر مسؤول:

کاووس بورکی

سر دبیر:

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

مشاور سردبیر:

دکتر امین نجفی

ویراستار ادبی:

ابوذر حاجی زاده

هیئت تحریریه:

دکتر حسن قاسمی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دکتر محمدرضا خدمتی؛ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دکتر علیرضا بیات؛ استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
دکتر یوسف ترابی گلسفید؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)
دکتر عباسعلی سلمانی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)
دکتر محمدجواد کتابداری؛ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دکتر عباس وفایی صفت؛ دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)
دکتر محسن شاهرضایی؛ استادیار دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)
دکتر عباس دشتی منش؛ استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس

مدیر اجرایی:

محمد مرادی

طراحی و صفحه آرایی:

سید محمدباقر موسوی

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

معاونت پژوهش

تلفن: ۳۳۱۴۹۱۷۴ - ۳۳۱۴۹۱۶۳ - ۰۱۳ و ۰۹۱۰۵۹۱۶۰۹

کد پستی: ۴۳۴۹۱۶۳۴۳۹

پست الکترونیک: daryainfo@gmail.com

فهرست:

- ۳ فناوری های کلیدی و پیش بینی روندهای آینده در شناورهای تندرو / فرهاد کیانی فلاورجانی
- ۳۰ استخراج ضرایب کنترلر PID برای زیرسطحی AUV با بینه سازی فراجهش و زمان فراجهش / امین محمدزاده ثانی، سیدرضا عبداللهی، کاظم گیلک
- ۴۰ استفاده از الگوریتم IMMPPDA در ردگیری اهداف دریایی در سیستم های راداری / مهران دهقانی، روح الله سامانی
- ۴۹ اصلاح پروانه سطحی شناور تندرو جهت رفع حالت فرابار در موتور / مجتبی پاکیان بوشهری، جواد عباسی، سید جواد هاشمی
- ۵۶ مطالعه عددی تأثیر پله های عرضی هفتی و هشتی شکل بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور تندرو پروازی در آب آرام / دلارام پاکنیت جهرمی، سعید جامعی
- ۷۱ افزایش مقدار JSRmin در اخلال گرهای فریبنده با استفاده از کاهش تعداد نمونه های سیگنال LFM ورودی / کاظم غفاری، یاسر نوروزی، پوریا اعتضادی فر
- ۸۲ بررسی تاثیر نحوه قرارگیری اسپری ریل ها بر روی رفتار هیدرودینامیکی یک شناور تندرو / ابوذر حاجی زاده، مفید گرچی، امین نجفی
- ۱۰۴ نیازسنجی ساخت شناور درمانی با رویکرد امدادی و بشردوستانه / محمد بینازاده، سعید جامعی
- ۱۱۰ الگوی نگارش مقاله /

فناوری‌های کلیدی و پیش‌بینی روندهای آینده در شناورهای تندرو

فرهاد کیانی فلاورجانی

دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر؛ aerospace1362@gmail.com

چکیده:

هدف از این پژوهش، ترسیم، تحلیل و شناسایی فناوری‌های کلیدی در حوزه شناورهای تندرو است. این پژوهش با استفاده از داده‌های استخراج شده از پایگاه‌های علمی وب‌آف‌ساینس در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴، یک شبکه هم‌رخدادی کلمات کلیدی مرتبط با حوزه شناورهای تندرو را بصری‌سازی و تحلیل نموده است. تحلیل عمیق این نقشه‌ها بر اساس مجموعه‌ای از سوالات هدفمند انجام پذیرفت. این سوالات با هدف رمزگشایی از اطلاعات غنی نهفته در عناصر بصری شکل‌ها طراحی شدند؛ نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که حوزه پژوهشی مرتبط با شناورهای تندرو چندوجهی بوده و حول مفاهیم کلیدی نظیر هیدرودینامیک (که برای کاهش مقاومت و دستیابی به سرعت بالا حیاتی است)، عملکرد (تأثیر ضربه ناشی از حرکت در سرعت بالا)، مدیریت و طراحی متمرکز است. ساختار حوزه شامل زیرشاخه‌های اصلی مرتبط با هیدرودینامیک و شبیه‌سازی‌های CFD، عملکرد سازه‌ای و مقابله با پدیده‌هایی مانند کوبش و خستگی و جنبه‌های عملیاتی و مدیریتی، علاوه بر جنبه‌های فنی محوری تحلیل نشان داد که جنبه‌های مدیریتی شامل مدیریت عملیات و ناوگان، مدیریت ریسک و ایمنی (ناشی از الزامات سرعت بالا)، ملاحظات زیست‌محیطی (به ویژه آلودگی صوتی) نیز از موضوعات مهم و مرتبط با شناورهای تندرو هستند که نشان‌دهنده گستردگی پژوهش‌ها در این حوزه فراتر از طراحی صرف است. تحلیل زمانی نشان‌دهنده تحولاتی در تمرکز پژوهش‌ها بوده، به طوری که در کنار موضوعات با سابقه بیشتر در حوزه هیدرودینامیک، مفاهیم جدیدتر و در حال ظهور مانند هوش مصنوعی (در کنترل یا بهینه‌سازی)، ردیابی هدف نیز در حال کسب اهمیت در ارتباط با این حوزه هستند. نقشه‌های چگالی نیز به وضوح کانون‌های اصلی فعالیت پژوهشی را در زمینه‌های هیدرودینامیک CFD و عملکرد و ضربه، به عنوان متمرکزترین بخش‌های این حوزه، تأیید کردند.

واژه‌های کلیدی:

تحلیل هم‌رخدادی، نقش دانش، فناوری داغ پژوهش، شناور تندرو، هیدرودینامیک، CFD، عملکرد، ضربه

Key technologies and forecasting future trends in high-speed vessels

Frahad Kiani Falavarjani

Malek Ashtar University of Technology; aerospace1362@gmail.com

Abstract

The links revealed the nature and strength of the relationships between the keywords, the colored clusters in the network map identified the thematic structure and main subfields of the field, and finally, the technology density map highlighted the focus of research activity in the field of high-speed vessels. The results of the analysis showed that the research area related to high-speed vessels is multifaceted and focuses on key concepts such as hydrodynamics (which is crucial for reducing resistance and achieving high speed), performance (impact of high-speed movement), management, and design. The structure of the field includes the main subfields related to hydrodynamics and CFD simulations, structural performance and dealing with phenomena such as pounding and fatigue, and operational and management aspects (in addition to the core technical aspects, the analysis showed that management aspects including operations and fleet management, risk and safety management (arising from high speed requirements), and environmental considerations (especially noise pollution) are also important and relevant topics for high-speed vessels, indicating the breadth of research in this field beyond mere design. The temporal analysis shows changes in the focus of research, so that alongside more established topics in the field of hydrodynamics, newer and emerging concepts such as artificial intelligence (in control or optimization), target tracking are also gaining importance in relation to this field. The density maps also clearly confirmed the main foci of research activity in the fields of hydrodynamics/CFD and performance/impact, as the most concentrated parts of this field.

Keywords:

Co-occurrence analysis, role of knowledge, hot research technology, high-speed vessel, hydrodynamics, CFD, performance, impact,

۱. مقدمه

شناورهای تندرو^۱ به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای جنگ دریایی، به دلیل سرعت بالا، چابکی و توانایی حمل تسلیحات پیشرفته، نقش کلیدی در عملیات‌های دریایی ایفا می‌کنند. شناورهای تندرو، کشتی‌های کوچک و سریعی هستند که برای عملیات در مناطق ساحلی^۲ طراحی شده‌اند [1]. این شناورها با توانایی حمله به کشتی‌های بزرگ‌تر و دفاع از مرزهای آبی، در جنگ‌های غیرقراردادی و دفاع ساحلی اهمیت ویژه‌ای دارند. پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های مرزدانشی، مانند سیستم‌های خودمختار و مواد ترکیبی، این شناورها را به ابزارهای پیشرفته‌تری تبدیل کرده است. این مقاله مروری جامع بر وضعیت فناوری‌ها، نوآوری‌های اخیر، چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده در حوزه شناورهای تندرو ارائه می‌دهد. افزایش سرعت عملیاتی، نیاز به کاهش مصرف سوخت و بهبود امنیت ناوبری، از جمله عواملی هستند که موجبات ورود فناوری‌های نوین به بستر سیستم‌های دریایی را فراهم نموده‌اند [2]. در این میان، مطالعات متعددی از جنبه‌های مختلف فناوری‌های ناوبری خودران، پیشرانش، طراحی‌های آیرودینامیکی و بکارگیری فناوری‌های نوین (ارتباطات و اینترنت اشیا) در شناورهای تندرو صورت گرفته است [3]. در این مقاله، به شیوه‌ای نظام‌مند به مرور ادبیات پژوهشی و تحلیل این فناوری‌ها پرداخته می‌شود تا بتوان چشم‌اندازی جامع از روندهای آینده در این حوزه ارائه نمود.

۲. تاریخچه توسعه شناورهای تندرو

توسعه شناورهای تندرو به اوایل قرن نوزدهم میلادی بازمی‌گردد؛ زمانی که نخستین قایق‌های اژدر افکن^۳ با هدف ایجاد برتری تاکتیکی از طریق حملات سریع به کشتی‌های سنگین، طراحی و به کار گرفته شدند. این شناورها که با بهره‌گیری از ابعاد کوچک، سرعت بالا و قدرت مانور مناسب به سمت اهداف خود حرکت می‌کردند؛ در مراحل اولیه موفقیت‌های قابل توجهی کسب کردند [4]. با این وجود، ورود ناوشکن‌های اژدر افکن^۴ در اواخر قرن نوزدهم، که به طور خاص برای شکار

این قایق‌ها طراحی شده بودند، منجر به کاهش اهمیت عملیاتی آن‌ها شد. در دهه ۱۹۳۰، با پیشرفت فناوری موتورهای احتراق داخلی، قایق‌های اژدر افکن موتوری توسعه یافتند [5]. این شناورها، که عمدتاً به موتورهای بنزینی با توان بالا مجهز بودند، با سرعت بیشتر و قدرت آتش مؤثرتر در جنگ جهانی دوم نقش برجسته‌ای ایفاء کردند. کشورهای مختلف نظیر بریتانیا با قایق‌های کلاس واسپر^۵ و آلمان نازی با قایق‌های سریع اسچنل بوت^۶ این فناوری را به کار گرفتند [6]. مأموریت‌های این قایق‌ها شامل گشت‌زنی، حمله به کاروان‌های دریایی دشمن، مین‌ریزی و عملیات‌های ویژه بود.

با پایان جنگ جهانی دوم و تحول در ماهیت نبردهای دریایی، به ویژه با ظهور موشک‌های هدایت‌شونده ضدکشتی، قایق‌های موشک‌انداز به عنوان جایگزین قایق‌های اژدر افکن وارد عرصه شدند [6,7]. اتحاد جماهیر شوروی در دهه ۱۹۵۰ میلادی، با توسعه شناورهای کلاس کومار (پروژه R۱۸۳ در شوروی) و اوسا نقش پیشگامی در این زمینه ایفاء کرد.

این شناورها که به اثربخشی موشک‌های ضد کشتی P-15 ترمیت (SS-N-2 Styx) مجهز شده بودند، در نبرد لاتف (۱۹۶۷) اثربخشی خود را با غرق کردن ناو اسرائیلی ایلات^۷ به اثبات رساندند (در این نبرد، چهار قایق موشک‌انداز کلاس کومار نیروی دریایی مصر، مستقر در بندر پورت سعید، به ناو اسرائیلی ایلات که در حال گشت‌زنی در نزدیکی سواحل شمال سینا بود، حمله کردند). این واقعه نقطه عطفی در تاریخ نبردهای دریایی به شمار می‌رود، زیرا برای نخستین بار از یک شناور کوچک موشک‌انداز جهت نابودی یک کشتی جنگی بزرگ استفاده شد. در دهه‌های بعدی، تحولات فناورانه قابل توجهی در زمینه شناورهای تندرو به وقوع پیوست. استفاده از موتورهای توربین گازی به جای موتورهای دیزلی یا بنزینی، موجب دستیابی به سرعت‌های بالاتر و افزایش تحرک عملیاتی شد [4]. همچنین، بکارگیری بدنه‌های سبک‌وزن از جنس آلیاژهای آلومینیومی و کامپوزیت‌های پلیمری، به بهبود کارایی هیدرودینامیکی و کاهش مصرف سوخت انجامید [8]. توسعه سامانه‌های

¹ Fast Attack Craft - FAC

² Littoral Zones

³ Torpedo Boats

⁴ Torpedo Boat Destroyers

⁵ Vosper

⁶ Schnellboot

⁷ Eilat

پیشرفته راداری، سیستم‌های مدیریت نبرد، جنگ الکترونیک، و پدافند موشکی کوتاه‌برد موجب افزایش بقاءپذیری و اثربخشی رزمی این شناورها شد. در عصر معاصر، شناورهای تندرو با ویژگی‌هایی نظیر طراحی پنهانکارانه، سامانه‌های خودکار فرماندهی و کنترل، موشک‌های هدایت‌شونده دوربرد، و قابلیت‌های ارتباطی شبکه‌محور تجهیز شده‌اند [6-8]. این ویژگی‌ها به شناورهای تندرو امکان داده است تا نقش‌های متنوعی از جمله دفاع ساحلی، عملیات‌های ضربتی سریع، مقابله با تهدیدات غیرمستقر، حفاظت از منابع انرژی دریایی و مشارکت در عملیات‌های ویژه نیروی دریایی را بر عهده گیرند. [6] بدین ترتیب، شناورهای تندرو از یک ابزار تهاجمی ساده به سامانه‌های پیچیده‌ای با قابلیت‌های چندمنظوره ارتقاء یافته‌اند که در استراتژی‌های دفاعی و تهاجمی بسیاری از کشورهای جهان جایگاه ویژه‌ای دارند.

۳. فناوری نوین و موثر در شناورهای تندرو

با توجه به رشد روزافزون فناوری‌های هوشمند، سیستم‌های ناوبری خودران به عنوان یک جزء ضروری در بهبود کارایی شناورهای تندرو مطرح شده‌اند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد [9] که استفاده از ترکیبی از فناوری‌های مبتنی بر جی‌پی‌اس و الگوریتم‌های هوش مصنوعی منجر به دستیابی به قابلیت‌های تصمیم‌گیری بلادرنگ و افزایش دقت عملکرد سیستم‌های ناوبری شده است. علاوه بر آن، پژوهشگران به بررسی تأثیر موتورهای هیبرید و برقی در کاهش میزان آلاینده‌های محیطی و بهبود بهره‌وری سوخت پرداخته‌اند [10]؛ به طوری که هر دو دسته موتور، با وجود ویژگی‌های متفاوت، شرایط مطلوبی جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش سرعت شناور فراهم می‌آورند. از سوی دیگر، برخی از مطالعات اخیر به بررسی نوآوری‌های موجود در طراحی‌های هیدروفویل و بهبود ویژگی‌های آیرودینامیکی شناورها پرداخته است. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که استفاده از مواد نوین و طراحی‌های بهینه باعث کاهش مقاومت آب و افزایش پایداری شناورها می‌شود [11]. در همین راستا، کاربرد فناوری‌های اینترنت اشیا که امکان پایش و کنترل بهتر سیستم‌ها را فراهم می‌کنند، به عنوان یک حوزه استراتژیک مورد توجه قرار گرفته است [12]. این فناوری با فراهم آوردن اطلاعات دقیق و لحظه‌ای از وضعیت شناور، می‌تواند زمینه را برای

توسعه سیستم‌های هوشمند ناوبری و بهبود تصمیم‌گیری‌های عملیاتی فراهم کند [12], [10], [8]. در این بخش به بررسی فناوری‌های کلیدی که در توسعه شناورهای تندرو نقش بسزایی دارند پرداخته می‌شود.

الف - سیستم‌های ناوبری خودران

سیستم‌های ناوبری خودران مبتنی بر ادغام فناوری‌های جی‌پی‌اس و هوش مصنوعی، در بهبود عملکرد شناورها تأثیرات قابل توجهی داشته‌اند [13]. [14]. این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های بلادرنگ، شرایط محیطی متغیر را تحلیل می‌کنند و می‌توانند به صورت خودکار مسیر بهینه را برای شناور انتخاب نمایند. از مزیت‌های اصلی این فناوری می‌توان به کاهش نیاز به مداخله انسانی، افزایش سطح ایمنی و بهبود سرعت واکنش به شرایط بحرانی اشاره کرد [15]. با این حال، وابستگی به زیرساخت‌های ارتباطی پیشرفته و چالش‌های مربوط به تداخل‌های محیطی از جمله معایب مطرح شده در این حوزه هستند [15], [6].

ب - موتورهای برقی و هیبرید

تحولات اخیر در زمینه موتورهای الکتریکی و هیبرید منجر به ظهور گزینه‌هایی شده است که قادر به کاهش هزینه‌های سوخت و آلاینده‌ها می‌باشند [16]. موتورهای هیبرید به دلیل قابلیت بهره‌گیری از هر دو منبع انرژی فسیلی و برقی، در شرایط مختلف عملکرد بهینه‌تری دارند؛ در حالی که موتورهای برقی دچار صدای کم، نوسانات کمی در عملکرد و آلاینده‌گی صفر می‌شوند. از معایب احتمالی موتورهای برقی می‌توان به محدودیت‌های مربوط به زمان شارژ و برد اشاره نمود که همچنان نیازمند پیشرفت‌های فناوری محسوب می‌شوند [17].

پ - طراحی‌های هیدروفویل و بهینه‌سازی

آیرودینامیکی

در طراحی شناورهای تندرو، کاهش مقاومت آب اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از مواد کم وزن و طراحی‌های بهینه هیدروفویل می‌تواند به کاهش نیروهای ضد حرکات و افزایش پایداری شناور کمک نماید [18]. به علاوه، نمونه‌های موفق از طراحی‌های نوین، ترکیبی از مطالعات فیزیکی و تحلیلی عددی هستند که به بهبود ویژگی‌های دنیای واقعی منجر شده‌اند [18], [8], [6].

ت- کاربرد فناوری‌های اینترنت اشیا

فناوری اینترنت اشیا در حوزه ناوبری و مدیریت سیستم‌های شناور، اجازه می‌دهد تا داده‌های زیستی و عملکردی دستگاه‌ها به صورت لحظه‌ای نظارت و کنترل شوند [19]. به کمک این فناوری، می‌توان اشتباهات عملیاتی را سریعاً شناسایی و اقدامات اصلاحی لازم را انجام داد. راهکارهای مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا شامل پایش دما، فشار، وضعیت موتور و سایر پارامترهای حیاتی شناورها می‌شود که به بهبود ایمنی و کارایی کلی سیستم کمک می‌کند [20], [21].

۴. روش تحقیق

گام ۱: انتخاب پایگاه داده و تعریف کلیدواژه

پایگاه استنادی وب‌آف‌ساینس به منظور مقالات نمایه شده در حوزه شناورهای تندرو انتخاب شده است، که یک منبع معتبر برای دسترسی به مقالات علمی در حوزه‌های مختلف از جمله مهندسی دریایی است.

کلیدواژه high speed boats (شناورهای تندرو) انتخاب شده و در بخش Topic جستجو شده است. این بخش شامل عنوان، چکیده و کلیدواژه‌های مقالات می‌شود. جستجوی اولیه ۷۷۷ مقاله را شناسایی کرده است، که نشان‌دهنده گستردگی موضوع در این پایگاه داده است.

گام ۲: محدود کردن بازه زمانی

برای تمرکز بر فناوری‌های جدید و به‌روز، بازه زمانی سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ میلادی انتخاب شده است. این فیلتر تعداد مقالات را کاهش داده و مقالات مرتبط با این بازه زمانی را معرفی کرده است.

گام ۳: پاک‌سازی و حذف مقالات غیرمرتبط

مقالات غیرمرتبط با موضوع شناورهای تندرو (مانند مقالاتی که ممکن است به قایق‌های تفریحی ساده یا موضوعات غیرفناوری اشاره داشته باشند) حذف شده‌اند. پس از پاک‌سازی، تعداد مقالات به ۴۶۲ مورد کاهش یافته است.

گام ۴: استخراج داده‌ها برای تجسم‌سازی

داده‌های ۴۶۲ مقاله از پایگاه استنادی وب‌آف‌ساینس استخراج شده‌اند. این داده‌ها معمولاً شامل اطلاعاتی مانند عنوان، چکیده، کلیدواژه‌ها، نویسندگان، سال انتشار و استنادها هستند. داده به نرم افزار مصورسازی وس‌ویور

ارسال و خروجی از دیدگاه روند فناوری تحلیل و ارزیابی شده‌اند. داده‌های استخراج شده از پایگاه وب‌آف‌ساینس به نرم‌افزار وس‌ویور ارسال و از دیدگاه روند فناوری مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌اند. وس‌ویور یک نرم‌افزار مبتنی بر جاوا است که به طور خاص برای ساخت و بصری‌سازی شبکه‌های علمی طراحی شده است. این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، امکان ایجاد نقشه‌های مختلف از داده‌های کتاب‌سنجی مانند هم‌رخدادی کلمات کلیدی، هم‌نویسندگی و استناد را فراهم می‌کند. در این پژوهش، از قابلیت‌های وس‌ویور برای تحلیل هم‌رخدادی کلمات کلیدی استفاده شده است. در این روش، نرم‌افزار ماتریس هم‌رخدادی کلمات کلیدی را بر اساس تعداد دفعات ظاهر شدن آن‌ها در کنار یکدیگر در مقالات ایجاد کرده و سپس با استفاده از تکنیک‌های کاهش ابعاد و خوشه‌بندی، این ماتریس را به یک نقشه بصری تبدیل می‌کند. عناصر این نقشه (گره‌ها و پیوندها) بر اساس میزان تکرار و ارتباط کلمات کلیدی با یکدیگر جانمایی می‌شوند. تحلیل این نقشه‌ها بر اساس اندازه گره‌ها (نشان‌دهنده فراوانی)، رنگ گره‌ها (نشان‌دهنده زمان وقوع یا خوشه)، پیوندها (نشان‌دهنده ارتباط و قوت آن) و چگالی گره‌ها (نشان‌دهنده تمرکز موضوعی) انجام می‌پذیرد و امکان شناسایی موضوعات کلیدی، ساختار حوزه و روند تحولات آن را فراهم می‌سازد.

۵. یافته‌ها

شکل ۱ نقشه شبکه کلمات کلیدی در حوزه های مرتبط با شناورهای تندرو را نشان می‌دهد. رنگ نقاط نشان‌دهنده خوشه‌ها یا گروه‌هایی از کلمات کلیدی مرتبط است. نقاطی که در یک خوشه رنگی قرار دارند، ارتباط قوی‌تری با یکدیگر دارند تا با نقاطی که در خوشه‌های رنگی دیگر هستند. این خوشه‌ها معمولاً نمایانگر زیرشاخه‌ها، موضوعات اصلی یا حوزه‌های تحقیقاتی متمایز در دامنه گسترده‌تر مورد تحلیل هستند. در این تصویر، چندین خوشه رنگی مشخص دیده می‌شود:

گره‌های بزرگ مانند performance, hydrodynamics impact, management نشان می‌دهند که این مفاهیم از اهمیت بالایی در پژوهش‌های این حوزه برخوردارند.

خوشه سبز در شبکه هم‌واژگانی نشان‌دهنده تمرکز قابل توجهی بر جنبه‌های کلیدی عملکرد تأثیر، طراحی، استحکام و خستگی در پژوهش‌های مرتبط با شناورهای تندرو است. این خوشه مفاهیم بنیادینی را در بر می‌گیرد که به طور سنتی در مهندسی دریایی و طراحی شناورهای پرسرعت مورد توجه بوده‌اند. بررسی رنگ‌بندی گره‌های درون خوشه سبز نشان می‌دهد که این مفاهیم از دیرباز (رنگ‌های آبی و سبز) مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند و همچنان در سال‌های اخیر (رنگ‌های زرد و روشن‌تر) نیز اهمیت خود را حفظ کرده‌اند. این امر حاکی از آن است که عملکرد، طراحی سازه‌ای و مسائل مربوط به ضربه و خستگی، چالش‌های مستمر و بنیادین در توسعه شناورهای تندرو به شمار می‌روند. دستیابی به سرعت‌های بالا مستلزم طراحی بدنه‌های بهینه، در نظر گرفتن نیروهای هیدرودینامیکی پیچیده، تضمین استحکام سازه‌ای در برابر بارهای دینامیکی شدید (ناشی از ضربه و کوبش در امواج) و مدیریت مسئله خستگی مواد در طول عمر بهره‌برداری است. اگرچه خوشه سبز بر مفاهیم سنتی تمرکز دارد، اما فناوری‌های نوظهوری که در خوشه‌های دیگر با رنگ روشن‌تر مشخص شده‌اند، تأثیر قابل توجهی بر نحوه پرداختن به این جنبه‌ها در شناورهای تندرو دارند:

➤ هوش مصنوعی و مدل‌سازی پیشرفته این فناوری‌ها امکان ایجاد مدل‌های دقیق‌تر برای پیش‌بینی عملکرد هیدرودینامیکی، بارهای ناشی از ضربه و خستگی سازه را فراهم می‌کنند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی بدنه و سیستم‌های میرایی ضربه به منظور بهبود عملکرد و کاهش تنش‌های وارده به سازه نقش داشته باشند. آینده این فناوری‌ها در ارائه ابزارهای قدرتمند برای طراحی مجازی، شبیه‌سازی دقیق و تصمیم‌گیری هوشمندانه در مراحل توسعه شناورهای تندرو نهفته است.

➤ مواد نوین توسعه و کاربرد مواد سبک‌وزن با استحکام بالا و مقاومت در برابر خستگی (مانند

کامپوزیت‌های پیشرفته) نقش کلیدی در بهبود عملکرد (افزایش سرعت و کاهش مصرف سوخت) و افزایش طول عمر سازه‌ای شناورهای تندرو ایفا می‌کند. آینده این حوزه در توسعه مواد هوشمند با قابلیت خودترمیمی و مواد با خواص مکانیکی سفارشی‌سازی شده است.

➤ روش‌های ساخت پیشرفته فناوری‌هایی مانند چاپ سه‌بعدی امکان ساخت قطعات پیچیده با هندسه‌های بهینه و کاهش وزن را فراهم می‌کنند. این امر می‌تواند در طراحی بدنه‌های هیدرودینامیک‌تر و اجزای سازه‌ای با استحکام و مقاومت بهینه در برابر خستگی مؤثر باشد. آینده این فناوری‌ها در تولید سفارشی‌سازی شده و کاهش زمان و هزینه ساخت نهفته است.

➤ سیستم‌های کنترل فعال استفاده از هیدروفویل‌های فعال، باله‌های تثبیت‌کننده و سایر سیستم‌های کنترلی که با استفاده از حسگرها و الگوریتم‌های کنترلی در زمان واقعی تنظیم می‌شوند، می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد هیدرودینامیکی را بهبود بخشد، ضربه و کوبش را کاهش داده و در نتیجه تنش‌های وارده به سازه و خستگی مواد را به حداقل برساند. آینده این سیستم‌ها در ادغام با هوش مصنوعی برای دستیابی به کنترل تطبیقی و خودکار است.

فناوری‌های مرتبط با خوشه سبز به سمت موارد زیر پیش می‌روند:

➤ طراحی مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده گسترده از شبیه‌سازی‌های چندفیزیکی دقیق برای پیش‌بینی عملکرد، بارهای سازه‌ای و خستگی در مراحل اولیه طراحی.

➤ بهینه‌سازی چندهدفه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای یافتن طرح‌هایی که به طور همزمان عملکرد هیدرودینامیکی بالا، استحکام سازه‌ای مناسب و مقاومت در برابر خستگی را تضمین کنند.

➤ پایش وضعیت سازه ادغام حسگرها و سیستم‌های هوشمند برای پایش مستمر وضعیت سازه در طول

عمر بهره‌برداری و تشخیص زودهنگام آسیب‌های ناشی از ضربه و خستگی.

➤ رویکردهای طراحی مقاوم در برابر آسیب طراحی سازه‌ها به گونه‌ای که در صورت بروز آسیب (مانند ترک ناشی از خستگی یا ضربه)، همچنان قادر به تحمل بار باشند و از خرابی فاجعه‌بار جلوگیری شود.

خوشه زرد و سبز روشن متمرکز بر واژگان هیدرودینامیک، CFD (دینامیک سیالات محاسباتی)، نیروی پسا و مقاومت، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی، نشان‌دهنده تمرکز قابل توجه پژوهش‌های جدیدتر بر تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد هیدرودینامیکی شناورهای تندرو با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پیشرفته است. رنگ روشن این خوشه حاکی از افزایش توجه به این حوزه در سال‌های اخیر (نزدیک به ۲۰۲۲) می‌باشد. در گذشته، طراحی و تحلیل هیدرودینامیکی شناورهای تندرو عمدتاً بر پایه آزمایش‌های مدل در حوضچه کشش و روابط تجربی استوار بود. با پیشرفت دینامیک سیالات محاسباتی و افزایش توان پردازشی کامپیوترها، شاهد تغییر رویکرد به سمت استفاده گسترده از شبیه‌سازی‌های عددی برای درک دقیق‌تر جریان سیال حول بدنه شناور، پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی (مانند پسا و مقاومت) و ارزیابی عملکرد در شرایط مختلف عملیاتی هستیم. ظهور رنگ‌های زرد و سبز روشن در این خوشه نشان می‌دهد که دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های شبیه‌سازی به ابزارهای کلیدی در پژوهش و توسعه شناورهای تندرو در سال‌های اخیر تبدیل شده‌اند. این امر امکان طراحی‌های بهینه‌تر، کاهش مصرف سوخت، افزایش سرعت و بهبود پایداری را فراهم آورده است. همچنین، واژه validation در این خوشه اهمیت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی را برجسته می‌سازد که برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی ضروری است. چندین فناوری نوظهور در این خوشه قابل شناسایی هستند و انتظار می‌رود در آینده نقش مهم‌تری ایفاء کنند:

➤ دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته و چندفیزیکی:

توسعه الگوریتم‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیچیده‌تر که قادر به مدل‌سازی دقیق‌تر جریان‌های

چندفازی (مانند پدیده کاپیتاسیون و پاشش آب)، اثرات امواج نامنظم (irregular waves) و تعامل سیال-سازه‌ای (coupled heave) هستند. آینده شامل ادغام دینامیک سیالات محاسباتی با روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود دقت و سرعت شبیه‌سازی‌ها خواهد بود.

➤ شبیه‌سازی در زمان واقعی

با افزایش قدرت محاسباتی، امکان انجام شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی در زمان واقعی برای سیستم‌های کنترل فعال شناور (مانند هیدروفویل‌ها و اینترسپتورها) و آموزش خدمه فراهم خواهد شد.

➤ بهینه‌سازی توپولوژی و شکل بدنه مبتنی بر

دینامیک سیالات محاسباتی

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی و هوش مصنوعی در کنار دینامیک سیالات محاسباتی برای یافتن شکل‌های بدنه با کمترین مقاومت و بهترین عملکرد هیدرودینامیکی به صورت خودکار.

➤ واقعیت مجازی و افزوده برای تجسم نتایج

شبیه‌سازی

استفاده از واقعیت مجازی و افزوده برای تجسم بصری جریان‌های پیچیده و نیروهای هیدرودینامیکی به منظور درک بهتر نتایج شبیه‌سازی و تسهیل فرآیند طراحی.

فناوری‌های مرتبط با هیدرودینامیک و شبیه‌سازی در شناورهای تندرو به سمت موارد زیر پیش خواهند رفت:

➤ افزایش دقت و قابلیت اطمینان شبیه‌سازی‌ها از طریق توسعه مدل‌های فیزیکی پیشرفته‌تر و روش‌های اعتبارسنجی قوی‌تر.

➤ ادغام شبیه‌سازی با ابزارهای طراحی و بهینه‌سازی برای دستیابی به شناورهایی با عملکرد هیدرودینامیکی بی‌نظیر.

➤ کاربرد گسترده‌تر شبیه‌سازی در مراحل مختلف طراحی، ساخت و بهره‌برداری شناورهای تندرو، از جمله آموزش و سیستم‌های کنترل فعال.

➤ توسعه ابزارهای شبیه‌سازی کاربرپسند و قابل دسترس برای طیف وسیع‌تری از مهندسان و طراحان.

تحلیل خوشه هم‌واژگانی نشان می‌دهد که پژوهش‌های اخیر در حوزه شناورهای تندرو تمرکز فزاینده‌ای بر جنبه‌های هیدرودینامیکی و استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پیشرفته، به ویژه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، داشته است (شکل ۲). رنگ روشن گره‌های *simulation resistance, drag, CFD, hydrodynamics* و *validation* بیانگر اهمیت روزافزون این حوزه در سال‌های اخیر (نزدیک به ۲۰۲۲) در مقایسه با رویکردهای سنتی مبتنی بر آزمایش‌های حوضچه کشش و روابط تجربی است (در مقایسه با رویکردهای سنتی مبتنی بر آزمایش‌های حوضچه کشش و روابط تجربی، ظهور و برجستگی خوشه هیدرودینامیک و شبیه‌سازی منعکس‌کننده توسعه الگوریتم‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته و افزایش توان محاسباتی است که امکان تحلیل دقیق‌تر جریان‌های پیچیده حول بدنه شناور و پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی را فراهم آورده است. لازم به ذکر است که روش‌های سنتی مبتنی بر آزمایش‌های حوضچه کشش و روابط تجربی کماکان به عنوان ابزاری ارزشمند و قابل اطمینان در اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و درک پدیده‌های فیزیکی به شمار می‌روند و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرند). ظهور و برجستگی خوشه هیدرودینامیک و شبیه‌سازی منعکس‌کننده توسعه الگوریتم‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیشرفته و افزایش توان محاسباتی است که امکان تحلیل دقیق‌تر جریان‌های پیچیده حول بدنه شناور و پیش‌بینی نیروهای هیدرودینامیکی را فراهم آورده است. اعتبارسنجی *validation* نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی نیز به عنوان یک گام ضروری در افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد توجه قرار گرفته است. فناوری‌های نوظهور در این حوزه شامل توسعه دینامیک سیالات محاسباتی چندفیزیکی برای مدل‌سازی دقیق‌تر پدیده کویتناسیون و تعامل سیال-سازه‌ای، پیشرفت به سوی شبیه‌سازی در زمان واقعی برای سیستم‌های کنترل فعال و آموزش، و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی برای طراحی بدنه‌های بهینه با کمترین مقاومت می‌باشد. انتظار می‌رود که آینده پژوهش در این حوزه به سمت ادغام عمیق‌تر شبیه‌سازی با فرآیندهای طراحی و بهینه‌سازی، کاربرد گسترده‌تر آن

در مراحل مختلف چرخه عمر شناور و توسعه ابزارهای کاربرپسندتر پیش رود. این تحولات نویدبخش طراحی و ساخت نسل جدیدی از شناورهای تندرو با عملکرد هیدرودینامیکی برتر، مصرف سوخت بهینه و پایداری بهبود یافته می‌باشد. تحلیل شبکه هم‌واژگانی (شکل ۲) نشان می‌دهد که خوشه‌ای از مفاهیم زرد و سبز کم‌رنگ، نمایانگر حوزه‌های فعال پژوهشی و فناوری‌های نوظهور در زمینه شناورهای تندرو در سال‌های اخیر (تقریباً ۲۰۲۰-۲۰۲۲) است. این گره‌ها شامل انرژی تجدیدپذیر (*renewable energy*) با تمرکز بر کاهش وابستگی به سوخت فسیلی، ردیابی هدف (*target tracking*) و GPS با تأکید بر ناوبری پیشرفته و خودکارسازی، و هوش مصنوعی (*artificial intelligence*) به عنوان ابزاری کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد و کنترل سیستم‌ها می‌باشند. علاوه بر این، توجه قابل ملاحظه‌ای به هیدرودینامیک پیشرفته با مطالعه امواج نامنظم و استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی طراحی بدنه و کاهش مقاومت و پسا دیده می‌شود. مفاهیم مرتبط با پایداری و کنترل حرکت نیز با رنگ‌های روشن، نشان‌دهنده اهمیت آن‌ها در عملکرد ایمن و کارآمد شناورهای تندرو در سرعت‌های بالا هستند. در زمینه جنبه‌های عملیاتی و مدیریتی، گره‌های مدیریت و ریسک با رنگ‌های روشن، بر ضرورت رویکردهای سیستماتیک در بهره‌برداری از این شناورها تأکید دارند. همچنین، توجه به اثرات عملکرد شناور بر محیط زیست، به ویژه در زمینه الگوهای نویز و پاسخ رفتاری رو به افزایش است. به طور خلاصه، بررسی گره‌های زرد و سبز کم‌رنگ در این شبکه نشان می‌دهد که پژوهش‌های مرزاندازی و جدید در حوزه شناورهای تندرو به سمت توسعه فناوری‌های پایدارتر، سیستم‌های ناوبری هوشمندتر، طراحی‌های هیدرودینامیکی بهینه‌تر و رویکردهای مدیریتی ایمن‌تر و مسئولانه‌تر در حال حرکت است.

شکل ۳ شکل حاضر یک نقشه چگالی است و توزیع و تمرکز مفاهیم کلیدی مرتبط با حوزه شناورهای تندرو را نشان می‌دهد.

درگ آن‌ها و بررسی عملکردشان در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف است.

اعتبارسنجی: نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های CFD باید با داده‌های تجربی (مانند نتایج آزمایش مدل در حوضچه کشش یا آزمایش در مقیاس کامل) یا در موارد ساده‌تر، با راه‌حل‌های تحلیلی اعتبارسنجی شوند. این فرآیند برای اطمینان از دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های عددی و نتایج آن‌ها ضروری است و واژه validation اهمیت آن را نشان می‌دهد.

منطقه پرچگال شامل Performance و Impact که با کلماتی مانند strength, design, fatigue و slamming مرتبط است، بر جنبه‌های سازه‌ای و تأثیرات فیزیکی ناشی از عملکرد هیدرودینامیکی در شناورهای تندرو تمرکز دارد. این بخش ارتباط حیاتی بین رفتار سیالاتی و یکپارچگی سازه‌ای این شناورها را نشان می‌دهد.

تحلیل ارتباط Performance و Impact با شناورهای تندرو در زمینه سازه‌ای: عملکرد (Performance) یک شناور تندرو تنها به سرعت و بازدهی هیدرودینامیکی آن محدود نمی‌شود، بلکه شامل قابلیت آن در تحمل بارهای وارده و حفظ یکپارچگی سازه‌ای در شرایط مختلف عملیاتی نیز می‌گردد. در شناورهای تندرو، به دلیل سرعت بالا و شکل خاص بدنه (مخصوصاً در شناورهای پلنینگ)، بارهای هیدرودینامیکی دینامیکی و ضربه‌ای بسیار قابل توجهی به سازه وارد می‌شوند. پدیده‌های کلیدی در این زمینه عبارتند از:

کوبش کوبش ضربه شدید و ناگهانی آب به بخش‌هایی از بدنه شناور (معمولاً قسمت‌های تخت کف یا پانتون‌ها در کاتاماران‌ها) است که در نتیجه برخورد مجدد بدنه با سطح آب پس از جدا شدن در اثر حرکت در امواج رخ می‌دهد. این پدیده در شناورهای تندرو، به ویژه در سرعت‌های بالا و شرایط دریایی نامساعد، بسیار شایع است و باعث ایجاد فشارهای موضعی بسیار بالا و بارهای کلی قابل توجهی بر سازه می‌شود. Slamming در نقشه واژگان مستقیماً با این منطقه مرتبط است.

بارهای ناشی از حرکت در امواج: علاوه بر کوبش، حرکت‌های شش درجه آزادی شناور در امواج (Heave, Pitch, Roll, Surge, Sway, Yaw) باعث ایجاد بارهای هیدرودینامیکی نوسانی و دینامیکی بر کل سازه می‌شوند.

این حال، حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان‌های سیالاتی پیچیده در اطراف شناورهای تندرو عموماً امکان‌پذیر نیست. اینجاست که CFD وارد عمل می‌شود. CFD (Computational Fluid Dynamics) با استفاده از روش‌های عددی مانند روش المان محدود، روش حجم محدود یا روش تفاضل محدود، معادلات ناویر-استوکس و معادلات پیوستگی را در یک دامنه گسسته‌سازی شده (مش‌بندی شده) حل می‌کند. این روش امکان شبیه‌سازی دقیق جریان سیال حول بدنه شناور را فراهم کرده و به پیش‌بینی کمی نیروهای هیدرودینامیکی (مانند مقاومت و نیروهای لیفت)، توزیع فشار، الگوی جریان، و رفتار دینامیکی شناور در حالات مختلف عملیاتی (سرعت‌ها و تریم‌های مختلف، در حضور امواج) می‌پردازد. واژگان simulation و numerical simulation بر این ابزار تأکید دارند.

نقش CFD در طراحی و تحلیل شناورهای تندرو:

پیش‌بینی و کاهش مقاومت: مهم‌ترین کاربرد CFD در زمینه شناورهای تندرو، پیش‌بینی دقیق مقاومت کل و اجزای آن در سرعت‌های مختلف است. این امر به مهندسان اجازه می‌دهد تا با تغییر شکل بدنه، استفاده از تجهیزات کاهش مقاومت (مانند پدهای پلنینگ، استراکات، یا پره‌های هیدروفویل) و بهینه‌سازی تریم، مقاومت را به حداقل رسانده و بازدهی شناور را افزایش دهند. واژگان drag reduction و optimization در این زمینه مرتبط هستند.

تحلیل رفتار دریایی^{۱۲}: CFD قابلیت شبیه‌سازی حرکت شناور در امواج را فراهم می‌کند. این شبیه‌سازی‌ها امکان پیش‌بینی پاسخ‌های حرکتی (مانند Heave, Pitch, Roll)، شتاب‌ها و احتمال رخداد پدیده‌های نامطلوب مانند Slamming را می‌دهد. این اطلاعات برای بهبود طراحی بدنه و افزایش آسایش سرنشین و ایمنی حیاتی هستند. واژه coupled heave نیز به شبیه‌سازی حرکت عمودی کوپل شده اشاره دارد.

طراحی و تحلیل هیدروفویل‌ها و سطوح کنترلی: برای شناورهای پرنده و یا شناورهایی که از هیدروفویل برای کاهش مقاومت استفاده می‌کنند، CFD ابزار اصلی برای طراحی ایرفویل‌ها/هیدروفویل‌ها، پیش‌بینی نیروی لیفت و

¹² Seakeeping Analysis

این بارها، به ویژه در سرعت‌های بالا، می‌توانند آمپلیتود قابل توجهی داشته باشند.

بارهای ایستایی و شبه‌ایستایی: این بارها شامل وزن سازه، تجهیزات، محموله، نیروهای هیدرواستاتیک (شناوری) و بارهای ناشی از مانور (مانند نیروهای گریز از مرکز در چرخش‌ها) هستند. هرچند دینامیک کمتری دارند، اما مبنای طراحی سازه برای تحمل بارهای اصلی را فراهم می‌کنند. این بارهای هیدرودینامیکی و ضربه‌ای مستقیماً بر جنبه‌های سازه‌ای شناور تأثیر می‌گذارند:

استحکام: سازه شناور باید دارای استحکام کافی برای تحمل حداکثر بارهای پیش‌بینی شده، به خصوص بارهای ضربه‌ای ناشی از کوبش، باشد. طراحی سازه‌ای باید اطمینان حاصل کند که تنش‌های ایجاد شده در اجزای سازه از مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی ماده فراتر نمی‌رود و از شکست سازه‌ای جلوگیری شود Strength به این جنبه اشاره دارد.

خستگی: شناورهای تندرو در طول عمر عملیاتی خود در معرض سیکل‌های بارگذاری مکرر ناشی از حرکت در امواج و پدیده‌هایی مانند کوبش قرار دارند. این بارهای سیکلی، حتی اگر به تنهایی باعث شکست آنی نشوند، می‌توانند به مرور زمان منجر به تجمع آسیب خستگی در سازه شده و در نهایت باعث رشد ترک و شکست خستگی گردند. تحلیل خستگی یک جنبه حیاتی در طراحی سازه‌های دریایی تندرو برای تضمین عمر مفید آن‌هاست. Fatigue در نقشه‌ها و جزئیات مستقیماً به این موضوع اشاره دارد.

طراحی سازه‌ای: فرآیند طراحی سازه یک شناور تندرو به شدت تحت تأثیر پیش‌بینی و تحلیل بارهای هیدرودینامیکی و ضربه‌ای است. مهندسان با استفاده از اصول مکانیک سازه و ابزارهای تحلیلی/عددی (مانند روش المان محدود) ابعاد و مشخصات اعضای سازه‌ای (مانند تیرها، ستون‌ها، صفحات و اتصالات) را تعیین می‌کنند تا سازه بتواند بارهای وارده را با حاشیه ایمنی مناسب تحمل کند و در برابر خستگی مقاوم باشد Design در این منطقه پرتراکم، مفهوم طراحی سازه‌ای متأثر از بارهای هیدرودینامیکی را در بر می‌گیرد.

ارتباط این مفاهیم با هیدرودینامیک و CFD بسیار نزدیک است. شبیه‌سازی‌های هیدرودینامیکی و CFD، بارهای

ورودی برای تحلیل سازه‌ای را فراهم می‌کنند. به عنوان مثال:

CFD می‌تواند برای پیش‌بینی فشارهای موضعی و بارهای کلی ناشی از کوبش در سرعت‌ها و شرایط دریایی مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

این بارهای پیش‌بینی شده سپس در مدل‌های سازه‌ای (مانند مدل‌های FEA) اعمال می‌شوند تا تحلیل تنش، تغییر شکل، تحلیل مودال و تحلیل خستگی سازه انجام گیرد. بنابراین، یک چرخه طراحی تکراری بین تحلیل هیدرودینامیکی/CFD و تحلیل سازه‌ای وجود دارد تا از Performance کلی (هم هیدرودینامیکی و هم سازه‌ای) اطمینان حاصل شود.

منطقه پرچگال که شامل کلماتی مانند Boats ، Sound disturbance و Management است، تمرکز پژوهش را بر جنبه‌های گسترده‌تری فراتر از صرف هیدرودینامیک محض نشان می‌دهد. در حالی که بخش قبلی به چالش‌های سیالاتی و ابزارهای محاسباتی برای تحلیل آن‌ها می‌پرداخت، این بخش بیشتر به پیامدهای عملیاتی، زیست‌محیطی و فیزیکی مرتبط با استفاده از شناورها اشاره دارد. ارتباط این منطقه با شناورهای تندرو به دلیل ویژگی‌های خاص این نوع شناورها اهمیت پیدا می‌کند.

تحلیل ارتباط با شناورهای تندرو: شناورهای تندرو، به واسطه سرعت بالا و غالباً سیستم‌های رانش پر قدرت، پیامدها و چالش‌های خاصی در زمینه‌های مورد اشاره در این منطقه از نقشه ایجاد می‌کنند که آن‌ها را از شناورهای متعارف متمایز می‌سازد:

اختلال صوتی و نویز

نویز زیر آب شناورهای تندرو معمولاً از پیش‌رانه‌های پر قدرت‌تری استفاده می‌کنند و شکل بدنه و پدیده‌های هیدرودینامیکی مرتبط با سرعت بالا (مانند کاویتاسیون در پروانه‌ها، پاشش آب و جدایش جریان) می‌توانند منابع قابل توجهی از نویز زیر آب باشند.

مقررات و مدیریت نویز با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، مدیریت انتشار نویز از شناورها اهمیت فزاینده‌ای یافته و نیازمند پژوهش برای درک بهتر منابع نویز، پیش‌بینی انتشار آن و توسعه راهکارهای کاهش نویز است.

ایمنی در سرعت بالا: عملیات شناورهای تندرو نیازمند مدیریت دقیق سرعت، مسیر حرکت و شرایط محیطی مانند irregular waves برای کاهش ریسک سوانح است.

بهینه‌سازی مسیر و زمان‌بندی برای سرویس‌های حمل و نقل سریع با شناورهای تندرو، بهینه‌سازی مسیرها، زمان‌بندی حرکت و تعیین نرخ خدمات با در نظر گرفتن عواملی مانند مصرف سوخت، شرایط دریا و محدودیت‌های زیست‌محیطی اهمیت دارد. این موضوعات تحت عنوان مدیریت کلی قرار می‌گیرند.

جنبه‌های سازه‌ای و فیزیکی

کوبش همانطور که در تحلیل قبلی اشاره شد، Slamming یک پدیده کلیدی در شناورهای تندرو است که در سرعت‌های بالا و در امواج رخ می‌دهد و بارهای ضربه‌ای شدید به سازه وارد می‌کند. این موضوع مستقیماً با strength و fatigue سازه شناور مرتبط است. مقاومت سازه‌ای در برابر بارهای کوبش و بررسی عمر خستگی سازه تحت سیکل‌های بارگذاری ناشی از حرکت در امواج و کوبش، از مسائل حیاتی در طراحی شناورهای تندرو است.

دینامیک حرکتی و پایداری: کنترل حرکت شناور و حفظ پایداری آن در سرعت‌های بالا و در مواجهه با اغتشاشات محیطی از چالش‌های مهم طراحی است. این جنبه نیز بر طراحی استحکام سازه و ایمنی کلی عملیات تأثیر می‌گذارد.

بنابراین، این منطقه از نقشه نشان‌دهنده این است که پژوهش در زمینه شناورهای تندرو تنها به هیدرودینامیک محدود نمی‌شود، بلکه شامل جنبه‌های مهمی مانند تأثیر زیست‌محیطی ناشی از نویز، چالش‌های مدیریت عملیاتی در سرعت بالا و ملاحظات حیاتی سازه‌ای مانند مقاومت در برابر کوبش و خستگی نیز می‌شود. قایق به عنوان موجودیت مورد مطالعه در مرکز این تحلیل قرار دارد.

نقشه چگالی نشان می‌دهد که حوزه پژوهشی مورد نظر دارای چندین کانون اصلی تمرکز (نقاط پرچگالی) است که نسبتاً از هم فاصله دارند اما با مناطق با چگالی متوسط (رنگ سببز زرد روشن) به هم متصل شده‌اند. این نشان می‌دهد که حوزه نه کاملاً متمرکز بر یک موضوع واحد است و نه کاملاً پراکنده، بلکه شامل چند زیرشاخه اصلی با ارتباطات مشخص است.

به طور خلاصه، نقاط داغ پژوهش در این حوزه، به طور مستقیم بر روی جنبه‌های کلیدی فنی (هیدرودینامیک، سازه، عملکرد) و عملیاتی (مدیریت، ایمنی، محیط زیست) متمرکز شده‌اند که همگی برای طراحی، ساخت و بهره‌برداری موفق از شناورهای تندرو حیاتی هستند. نقشه چگالی به خوبی نشان می‌دهد که این موضوعات پرتکرارترین و مرتبط‌ترین مباحث در ادبیات پژوهشی این حوزه محسوب می‌شوند.

۶. تحلیل نتایج

مبانی و منطق انتخاب سؤالات پژوهشی در مورد شکل ۱- نقشه شبکه‌ای کلمات کلیدی مرتبط با شناورهای تندرو: انتخاب و طراحی سؤالات پژوهشی ارائه‌شده در این قسمت بر مبنای تحلیل خوشه‌ای موضوعات پژوهشی استخراج‌شده از منابع علمی مرتبط با شناورهای تندرو صورت گرفته است. بر این اساس، سؤالات پژوهشی طراحی‌شده بر پایه پنج اصل کلیدی تدوین شده‌اند:

۱. پوشش جامع حوزه‌های چندرشته‌ای مرتبط با شناورهای تندرو

هریک از سؤالات تدوین‌شده در راستای یکی از خوشه‌های تخصصی تحلیل‌شده قرار دارد که به‌طور مستقیم به ابعاد مختلف طراحی، عملکرد، پیش‌بینی‌پذیری و فناوری‌های نوین مرتبط با شناورهای تندرو می‌پردازد. این تنوع موضوعی تضمین می‌کند که مسیرهای مختلف تحقیقاتی - اعم از هیدرودینامیک، صوت‌شناسی، هوش مصنوعی، انرژی و طراحی بدنه - به‌صورت منسجم دربر گرفته شوند.

۲. هم‌راستایی با چالش‌های کاربردی و صنعتی

شناورهای تندرو در حوزه‌های نظامی، امنیتی، جستجو و نجات، و حمل‌ونقل سریع کاربرد دارند و با چالش‌هایی نظیر کاهش مصرف انرژی، عملکرد در شرایط نامنظم دریایی، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و ارتقاء پایداری مواجه‌اند. سؤالات منتخب با هدف تحلیل و حل این چالش‌ها، به‌ویژه در بستر فناوری‌های نوین، طراحی شده‌اند.

۳. قابلیت توسعه به پروژه‌های پژوهشی مستقل
سؤالات مطرح‌شده، ساختاری مسئله‌محور و پژوهش‌پذیر دارند و می‌توانند مبنای تدوین پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری، طرح‌های پژوهشی دانشگاهی و مقالات علمی-پژوهشی قرار گیرند. هر پرسش قابلیت تبدیل به یک مطالعه عددی، آزمایشگاهی یا ترکیبی را دارد و از منظر روش‌شناسی، قابل توسعه با مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل داده است.

۴. ادغام فناوری‌های نوین با مبانی سنتی مهندسی دریایی
یکی از ویژگی‌های کلیدی سؤالات، تمرکز بر ادغام فناوری‌های روز مانند مدل‌سازی هوشمند، یادگیری ماشین، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، و الگوریتم‌های تکاملی با مباحث کلاسیکی چون تحلیل هیدرودینامیکی، طراحی بدنه و کنترل نویز است. این رویکرد بین‌رشته‌ای، بستری مناسب برای پژوهش‌های نوآورانه فراهم می‌سازد.

۵. امکان ارزیابی علمی با داده‌های عددی و آزمایشگاهی
هریک از سؤالات طراحی‌شده به‌گونه‌ای فرموله شده‌اند که قابلیت پاسخ‌گویی به‌وسیله روش‌های کمی را دارا باشند. استفاده از روش‌های عددی مانند دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌سازی ساختاری، آزمون‌های تجربی یا روش‌های داده‌کاوی، مسیر علمی مشخصی برای پاسخ به هر پرسش فراهم می‌آورد.

با توجه به موارد فوق، می‌توان ادعا کرد که این سؤالات پژوهشی نه‌تنها برآمده از تحلیل ساختاری علم‌سنجی هستند، بلکه هم‌راستا با چالش‌ها و نیازهای روز حوزه شناورهای تندرو و صنعت دریایی طراحی شده‌اند و ظرفیت بالایی برای تولید دانش جدید و ارتقاء فناوری در این زمینه دارند.

سؤال ۱: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های نوین دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مصرف انرژی و مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای تندرو را کاهش داد؟

کاربرد روش‌های پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی، مانند مدل‌های آشفتگی LES و RANS، در کنار الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات، امکان تحلیل دقیق الگوهای جریان پیرامون شناورها و شناسایی نواحی مؤثر بر پسا را فراهم می‌سازد. با تعریف تابع هدف بر مبنای کاهش نیروی کشش هیدرودینامیکی و مصرف سوخت، فرآیند بهینه‌سازی می‌تواند منجر به طراحی بهینه بدنه، موقعیت هیدروفویل و تنظیم مناسب المان‌هایی نظیر interceptor گردد. یافته‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که این رویکرد می‌تواند کاهش پسا تا حدود ۲۵٪ و بهبود راندمان پیشران را به دنبال داشته باشد.

سؤال ۲: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) چه تأثیری استفاده از interceptors و hydrofoil بر کاهش نیروی کشش و بهبود عملکرد شناورها در شرایط موج‌دار دارد؟

استفاده از interceptor ها در انتهای عقب بدنه، با ایجاد نیروی بالابر بدون افزایش قابل توجه سطح تر شده، موجب کاهش trim زاویه‌ای و کاهش مقاومت موجی می‌شود. از سوی دیگر، به‌کارگیری hydrofoil در نواحی جلویی یا میانی، به شناور اجازه می‌دهد تا در سرعت‌های مشخصی از سطح آب جدا شده و نیروی برای حاصل از آب را جایگزین نیروی شناوری کند، که منجر به کاهش drag می‌گردد. در شرایط موج‌دار، این ترکیب ضمن بهبود عملکرد هیدرودینامیکی، پایداری حرکتی و مقاومت در برابر slamming را نیز بهبود می‌بخشد.

سؤال ۳: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) چگونه می‌توان عملکرد شناورهای تندرو را در شرایط دریای متلاطم با استفاده از مدل‌های عددی و الگوریتم‌های پیش‌بینی عملکرد، ارزیابی کرد؟

ترکیب مدل‌سازی عددی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌های دینامیکی شش درجه آزادی (6-DOF)، امکان شبیه‌سازی دقیق حرکت شناور در شرایط دریای متلاطم را فراهم می‌آورد. با وارد کردن طیف موج‌های تصادفی مطابق با مدل‌های تجربی نظیر Pierson-Moskowitz، و استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل خروجی‌های شبیه‌سازی شتاب، زاویه pitch و heave، می‌توان سامانه‌ای هوشمند برای

پیش‌بینی عملکرد شناور طراحی نمود. این رویکرد نه تنها باعث افزایش دقت پیش‌بینی می‌شود، بلکه امکان تصمیم‌گیری در زمان واقعی برای کنترل حرکت و پایداری را نیز فراهم می‌سازد.

سؤال ۴: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) رابطه بین طراحی بدنه و پدیده‌هایی مثل *fatigue*، *slamming* و پایداری شناورها چیست و چگونه می‌توان آن را بهینه‌سازی کرد؟

طراحی بدنه تأثیر مستقیم بر انتقال نیروهای هیدرودینامیکی به سازه و رفتار دینامیکی شناور دارد. فرم‌های پله‌دار^{۱۳} یا V شکل می‌توانند انرژی برخورد با موج را کاهش دهند و *slamming* را محدود نمایند. با تحلیل تنش‌های سیکلی ناشی از حرکات نوسانی، می‌توان عمر خستگی اجزا را تخمین زد. بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کاهش *slamming*، افزایش پایداری عرضی و بهینه‌سازی نسبت طول به عرض (*L/B ratio*)، از طریق شبیه‌سازی‌های ترکیبی *CFD-FEM* و الگوریتم‌های هوشمند، امکان‌پذیر است.

سؤال ۵: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک برای بهینه‌سازی شکل بدنه شناور تا چه میزان می‌تواند موجب کاهش نیروی کشش شود؟

الگوریتم‌های ژنتیک به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای چندمتغیره، قادرند با جستجوی فضای طراحی گسترده، فرم‌های بدنه‌ای با کمترین نیروی کشش را شناسایی کنند. در آزمایش‌های شبیه‌سازی‌شده، کاهش پسا در حدود ۱۸ تا ۳۰ درصد بسته به شرایط جریان و طراحی اولیه گزارش شده است. انتخاب پارامترهای کلیدی مانند زاویه *dead-rise*، نسبت طول به عرض، و منحنی خطوط بدنه، در موفقیت این روش نقش حیاتی دارند.

سؤال ۶: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) چه فناوری‌هایی می‌توانند جایگزین موتورهای دیزلی در شناورهای تندرو شوند تا بازده انرژی افزایش و آلاینده‌گی کاهش یابد؟

فناوری‌های جایگزین شامل پیش‌ران‌های هیبریدی (الکتریکی-دیزلی)، موتورهای پیل سوختی (*Fuel Cell*)، و سیستم‌های پیش‌ران‌شان کاملاً الکتریکی مبتنی بر باتری‌های لیتیوم-یونی یا لیتیوم-گوگرد هستند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از مدیریت انرژی هوشمند و کاهش تلفات گرمایی، بازده کلی را تا ۳۰٪ نسبت به سامانه‌های دیزلی افزایش می‌دهند. همچنین، کاهش چشمگیر آلاینده‌هایی نظیر *NOx* و *CO2* آن‌ها را برای استفاده در مناطق حفاظت‌شده دریایی مناسب ساخته است.

پیشرفت‌های اخیر در حوزه پیل‌های سوختی *PEM* و پیل‌های با دمای بالا نویدبخش جایگزینی کامل سوخت‌های فسیلی در آینده‌ای نزدیک می‌باشد.

سؤال ۷: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) استفاده از پیش‌ران‌های الکتریکی یا هیبریدی در شناورهای تندرو از نظر عملیاتی، اقتصادی و محیط‌زیستی چه مزایا و چالش‌هایی دارد؟

از منظر عملیاتی، پیش‌ران‌های الکتریکی عملکرد نرم‌تر، کاهش نویز و پاسخ دینامیکی بهتری نسبت به موتورهای احتراقی دارند. از جنبه اقتصادی، هرچند هزینه اولیه سرمایه‌گذاری بالاتر است. در بُعد زیست‌محیطی، کاهش قابل توجه آلاینده‌گی هوا و آلودگی صوتی مهم‌ترین مزیت است. با این حال، چالش‌هایی همچون وزن و حجم زیاد باتری‌ها، نیاز به زیرساخت‌های شارژ و محدودیت برد عملیاتی، همچنان موانعی در مسیر تجاری‌سازی گسترده به شمار می‌روند.

سؤال ۸: با توجه به نقشه علمی (شکل ۱) چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی، مسیرهای محتمل توسعه فناوری شناورهای تندرو را در افق ۲۰۳۵ شناسایی کرد؟

استفاده از رویکردهای آینده‌پژوهی نظیر تحلیل روند، روش دلفی، سناریوپردازی و نقشه راه فناوری از روش‌های مؤثر در پیش‌بینی مسیرهای توسعه است. این روش‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی، مصاحبه با خبرگان و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها، چشم‌اندازهایی از وضعیت‌های محتمل آینده ارائه می‌دهند. در حوزه شناورهای تندرو، سناریوهایی شامل تحول کامل به پیش‌ران‌های الکتریکی، ادغام سامانه‌های کنترل خودکار و هوشمند، قابل پیش‌بینی‌اند. این سناریوها، راهنمایی مؤثر در تدوین

سیاست‌ها، سرمایه‌گذاری تحقیقاتی و طراحی سیستم‌های آینده فراهم می‌سازند.

مبانی و منطق انتخاب سؤالات پژوهشی در مورد شکل ۲-۲ نقشه شبکه‌ای کلمات کلیدی مرتبط با شناورهای تندرو در بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۴:

۱- شناخت موضوعات اصلی: سؤالاتی که درباره اندازه‌گره‌ها پرسیده می‌شوند، برای شناسایی مفاهیم پرتکرار و محوری حوزه هستند. دانستن این مفاهیم اولین گام برای فهمیدن این است که پژوهش‌ها در این زمینه عمدتاً روی چه موضوعاتی تمرکز دارند.

۲- درک ساختار حوزه (اهمیت خوشه‌های رنگی): سؤالات مربوط به خوشه‌ها و رنگ‌ها کمک می‌کنند تا زیرشاخه‌ها و موضوعات مرتبط در حوزه علمی مرتبط با شناورهای تندرو را کشف کنیم. این نشان می‌دهد که حوزه پژوهشی به چند بخش اصلی تقسیم می‌شود و هر بخش چه مفاهیم خاص خود را دارد. این مانند دیدن سرفصل‌های اصلی یک کتاب بزرگ برای درک محتوای آن است.

۳- ردیابی تحولات در طول زمان (اهمیت طیف رنگی زمان): سؤالات مربوط به رنگ‌گره‌ها و طیف زمانی، حیاتی‌ترین بخش تحلیل فناوری‌های جدید و مرز دانشی در حوزه شناورهای تندرو است. این سؤالات مشخص می‌کنند کدام موضوعات در گذشته مورد توجه بوده‌اند و کدام موضوعات در حال حاضر داغ هستند یا در حال ظهورند. این درک زمانی برای شناسایی روندهای پژوهشی و پیش‌بینی مسیر آینده حوزه بسیار مهم است.

کشف جزئیات و نقاط کمتر دیده شده (اهمیت گره‌های کوچکتر و حاشیه‌ای): سؤالاتی که به گره‌های کوچکتر یا موقعیت آن‌ها در نمودار می‌پردازند کمک می‌کنند تا از تمرکز بر کلیات فراتر رفته و موضوعات تخصصی‌تر، کمتر بررسی شده، یا در حال شکل‌گیری را مشخص نمود.

سوال اول: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) چگونه می‌توان با توسعه مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی عمیق، فرآیندهای بهینه‌سازی چندهدفه طراحی بدنه (Multi-objective Hull Design Optimization) و پیش‌بینی

آنی عملکرد (Real-time Performance Prediction) شناورهای تندرو را در شرایط عملیاتی مختلف (مانند امواج نامنظم) بهبود بخشید؟

پاسخ به این سؤال مستلزم توسعه چارچوب‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی برای غلبه بر چالش‌های محاسباتی و پیچیدگی‌های ذاتی طراحی و پیش‌بینی عملکرد شناورهای تندرو است. پژوهش می‌تواند بر محورهای زیر متمرکز شود:

الف) توسعه مدل‌های جایگزین (Surrogate Models) استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق یا سایر مدل‌های یادگیری ماشین برای ساخت مدل‌های جایگزین دقیق و سریع برای شبیه‌سازی‌های زمان‌بر CFD یا روش‌های عددی پیچیده. این مدل‌های جایگزین قابلیت ارزیابی سریع عملکرد هندسه‌های مختلف بدنه را در فرآیندهای بهینه‌سازی فراهم می‌کنند.

ب) الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر هوش مصنوعی: ترکیب مدل‌های جایگزین با الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی (نظیر NSGA-III یا روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری تقویتی Reinforcement Learning) برای کاوش فضای طراحی و یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو (Pareto Optimal Solutions) با در نظر گرفتن اهداف متضاد طراحی (مانند حداقل کردن درگ، حداکثر کردن پایداری، بهینه کردن قابلیت دریانوردی).

ج) مدل‌های پیش‌بینی آنی عملکرد: آموزش مدل‌های سری‌های زمانی (مانند LSTM یا GRU) یا مدل‌های رگرسیون پیشرفته با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایشات میدانی یا شبیه‌سازی‌های دینامیکی شناور در شرایط امواج نامنظم برای پیش‌بینی آنی پارامترهایی نظیر شتاب‌ها، نیروها و مصرف انرژی. اعتبارسنجی این مدل‌ها با داده‌های مستقل جهت اطمینان از قابلیت تعمیم‌پذیری آن‌ها در شرایط عملیاتی پیش‌بینی نشده حیاتی است.

سوال دوم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) چگونه نسل بعدی الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین عمیق، قابلیت‌های تصمیم‌گیری مستقل، ناوبری تطبیقی و مدیریت ریسک را در شناورهای تندرو تماماً خودکار در محیط‌های دریایی پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی متحول خواهند کرد؟

پیشبرد هوش مصنوعی برای دستیابی به سطوح بالاتر استقلال در شناورهای تندرو متمرکز است. تحقیقات می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق برای ترکیب و تفسیر داده‌های آبی از طیف وسیعی از حسگرها (رادار، لیدار، دوربین‌های مرئی و حرارتی، سونار) برای ایجاد یک مدل سه‌بعدی دقیق و جامع از محیط اطراف شناور، شناسایی و ردیابی اهداف و موانع در شرایط مختلف محیطی (مه، باران، امواج بلند) و توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق یا منطق فازی تطبیقی که به شناور خودکار اجازه می‌دهد تا در مواجهه با شرایط پیش‌بینی نشده (تغییرات ناگهانی آب و هوا، ظهور موانع متحرک) به صورت ایمن و کارآمد واکنش نشان داده، مسیر خود را در لحظه بازنگری کرده و قواعد پیچیده دریانوردی را رعایت نماید. همچنین توسعه مدل‌های پیش‌بینی ریسک که با استفاده از داده‌های عملیاتی و محیطی، احتمال وقوع حوادث (تصادف، برخورد، واژگونی) را در سناریوهای مختلف ارزیابی کرده و سیستم کنترل را برای اتخاذ اقدامات پیشگیرانه هدایت نمایند. این شامل یادگیری از تجربیات گذشته و تطبیق با شرایط جدید است. توسعه روش‌ها و استانداردهایی برای اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان الگوریتم‌های هوش مصنوعی در محیط‌های عملیاتی واقعی، که یک چالش بزرگ در مسیر توسعه شناورهای کاملاً خودکار است.

سوال سوم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) چگونه پیشرفت‌ها در مواد پیشرفته (مانند کامپوزیت‌های سبک‌وزن با استحکام بالا، مواد هوشمند) و روش‌های ساخت نوین (مانند پرینت سه‌بعدی) می‌توانند به طراحی سازه‌های شناورهای تندرو با نسبت استحکام به وزن بی‌سابقه، مقاومت بالا در برابر خستگی و ضربه، و قابلیت‌های تطبیقی در مواجهه با بارهای دینامیکی شدید منجر شوند؟

مطالعات در حوزه مواد و سازه‌های نسل جدید برای شناورهای تندرو، به‌ویژه با تمرکز بر افزایش نسبت استحکام به وزن و بهبود عملکرد دینامیکی، یکی از مرزهای کلیدی دانش در مهندسی دریا محسوب می‌شود. این خط مقدم پژوهش بر نوآوری در مبانی سازه‌ای این شناورها استوار است و رویکردی چندوجهی را طلب

می‌کند. در گام نخست، پژوهش بر مدل‌سازی و مشخصه‌یابی مواد کامپوزیت پیشرفته متمرکز می‌شود. این حوزه شامل تحقیقات عمیق بر روی رفتار مکانیکی مواد کامپوزیت نوین، از جمله کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانولوله‌ها یا الیاف پیشرفته با ماتریس‌های پلیمری با خواص بهبودیافته، تحت شرایط بارگذاری دینامیکی بالا، سیکل‌های خستگی دریایی و محیط خوردنده دریا است. هدف این است که با توسعه مدل‌های تخریب پیشرفته، قابلیت اطمینان در پیش‌بینی عمر باقیمانده سازه تحت این شرایط پیچیده افزایش یابد. در ادامه، طراحی سازه‌های سبک‌وزن با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی توپولوژی اهمیت می‌یابد. در این راستا، تکنیک‌های بهینه‌سازی توپولوژی و شکل‌دهی برای دستیابی به طرح‌های بدنه و روبنا با حداقل وزن ممکن در عین حفظ یا افزایش حداکثر استحکام و سختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اعمال محدودیت‌های فرآیندهای ساخت واقعی در این فرآیند بهینه‌سازی، جهت اطمینان از قابلیت تولید طرح‌های پیشنهادی، حیاتی است. یکی دیگر از جنبه‌های نوآورانه، بررسی کاربرد مواد هوشمند و توسعه سازه‌های تطبیقی است. تحقیق در خصوص امکان استفاده از موادی با قابلیت‌های پاسخگویی فعال (مانند پیزوالکتریک‌ها یا آلیاژهای حافظه‌دار شکلی) یا طراحی سازه‌هایی با قابلیت تغییر شکل یا سختی کنترل‌شده (نظیر فلپ‌های فعال سازه‌ای یا پنل‌هایی با سختی قابل تنظیم) برای میرایی ارتعاشات، جذب مؤثر انرژی ضربه ناشی از Slamming و بهبود کلی پاسخ سازه‌ای به بارهای دینامیکی متغیر، در این بخش قرار می‌گیرد. همچنین، روش‌های ساخت افزایشی (پرینت سه‌بعدی) برای تولید قطعات سازه‌ای پیچیده به عنوان یک فناوری نوظهور مورد بررسی قرار می‌گیرد. قابلیت‌ها و محدودیت‌های استفاده از پرینت سه‌بعدی فلزات یا پلیمرهای با کارایی بالا برای ساخت قطعات سازه‌ای با هندسه‌های پیچیده و سبک‌وزن که با روش‌های سنتی قابل تولید نیستند، همراه با چالش‌های مربوط به کنترل کیفیت، خواص مکانیکی قطعات در مقیاس بزرگ و استانداردسازی فرآیند، محور تحقیق در این حوزه است. نهایتاً، تحلیل سازه‌ای پیشرفته برای بارهای غیرمتعارف بخش جدایی‌ناپذیر این پژوهش است. این شامل توسعه مدل‌های المان محدود پیشرفته برای تحلیل دقیق پاسخ دینامیکی سازه به بارهای ضربه‌ای

بسیار شدید ناشی از Slamming، بارهای ناشی از انفجار (در کاربردهای دفاعی)، و تحلیل دقیق رفتار سازه تحت بارگذاری خستگی درازمدت در محیط خورنده دریایی با در نظر گرفتن اثرات کوپلینگ سیال-سازه و هوا است. در مجموع، پژوهش در این حوزه با تلفیق دانش مواد پیشرفته، روش‌های طراحی بهینه، فناوری‌های ساخت نوین و تکنیک‌های تحلیل سازه‌ای پیشرفته، به دنبال پیشبرد قابلیت‌های سازه‌ای شناورهای تندرو برای پاسخگویی به نیازهای عملکردی و ایمنی در سرعت‌های بالا و شرایط عملیاتی چالش‌برانگیز آینده است.

سوال چهارم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) مرزهای فعلی دانش در مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی (در صورت وجود بخش‌هایی بالای آب) شناورهای تندرو در سرعت‌های فراصوتی روی آب کدامند و چه روش‌های عددی یا تجربی نوینی برای بررسی پدیده‌های پیچیده مانند کاویتاسیون، اثرات سطح آزاد غیرخطی و تداخل بدنه/هوا در این رژیم‌های سرعت بالا مورد نیاز است؟

مدل‌سازی و پیش‌بینی دقیق رفتار هیدرودینامیکی و آیرودینامیکی شناورهای تندرو در رژیم‌های سرعت بسیار بالا، که ممکن است به سرعت‌های فراصوتی نسبت به آب نیز نزدیک شوند، یکی از چالش‌برانگیزترین مرزهای فعلی دانش در مهندسی دریا و سیالات است. در این سرعت‌ها، پدیده‌های فیزیکی پیچیده و غالباً غیرخطی به صورت برجسته ظاهر می‌شوند که مدل‌های تحلیلی و عددی سنتی برای بررسی آن‌ها با محدودیت‌های جدی مواجه‌اند. از جمله این پدیده‌ها می‌توان به توسعه گسترده کاویتاسیون بر روی پروانه‌ها، هیدروفویل‌ها و بخش‌هایی از بدنه، رفتار بسیار دینامیک و غیرخطی سطح آزاد همراه با پاشش شدید و هواگرفتگی، و همچنین تأثیر قابل توجه نیروهای آیرودینامیکی و تداخل پیچیده بین جریان آب و هوا در اطراف بدنه اشاره کرد. در حال حاضر، مرزهای دانش در این حوزه بر توسعه و اعتبارسنجی روش‌های نوین عددی و تجربی متمرکز است. از منظر عددی، نیاز مبرمی به پیشبرد قابلیت‌های شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی دقیق پدیده‌های چندفازی (آب، هوا، بخار کاویتاسیون) با قابلیت حل

آشفته‌گی در سرعت‌های بالا وجود دارد. این امر مستلزم توسعه مدل‌های آشفته‌گی پیشرفته و الگوریتم‌های حل‌کننده با وضوح بالا برای پدیده‌های سطح آزاد و کاویتاسیون گذرا است. علاوه بر این، مدل‌سازی کوپل شده هیدرودینامیک و آیرودینامیک برای ثبت دقیق نیروهای وارد بر شناور از هر دو محیط و تداخل آن‌ها در سرعت‌های بالا حیاتی است. از بعد تجربی، نیاز به توسعه تکنیک‌های اندازه‌گیری نوین در تأسیسات آزمایشگاهی تخصصی (مانند حوضچه‌های کشتش پرسرعت یا تونل‌های کاویتاسیون) وجود دارد تا امکان اندازه‌گیری دقیق نیروها، فشارها، و ساختارهای جریان پیچیده (نظیر الگوهای کاویتاسیون و شکل سطح آزاد) در سرعت‌های بسیار بالا فراهم شود. اعتبارسنجی مدل‌های عددی توسعه‌یافته با استفاده از این داده‌های تجربی دقیق، به همراه تحلیل عدم قطعیت سیستماتیک، برای اطمینان از قابلیت اطمینان ابزارهای پیش‌بینی‌کننده ضروری است. پیشبرد این مرزهای دانشی برای طراحی بهینه بدنه‌ها، سیستم‌های پیشران‌ش، و سطوح کنترلی شناورهای تندرو نسل آینده، و همچنین پیش‌بینی دقیق عملکرد و بارهای وارد بر سازه در رژیم‌های عملیاتی حدی آن‌ها اهمیت بنیادین دارد.

سوال پنجم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) چگونه ادغام داده‌های آبی از آرایه‌های حسگر چندوجهی (شامل حسگرهای بصری، حرارتی، راداری، لیداری و صوتی) با تکنیک‌های پیشرفته همجوشی داده و هوش مصنوعی می‌تواند درک محیطی شناورهای تندرو را در شرایط چالش‌برانگیز (مانند دید محدود، ترافیک سنگین، تشخیص اهداف کوچک) به طور قابل توجهی ارتقا دهد؟

افزایش سرعت عملیاتی شناورهای تندرو، همراه با حرکت به سمت سطوح بالاتر خودکارسازی و عملیات در محیط‌های دریایی پیچیده و پرترافیک، نیاز به درک محیطی بی‌سابقه‌ای را ایجاد کرده است. درک دقیق و قابل اعتماد از محیط اطراف برای ناوبری ایمن، اجتناب از برخورد مؤثر و انجام مأموریت‌های موفق حیاتی است. با این حال، محیط دریایی ذاتاً چالش‌برانگیز است؛ شرایط متغیر آب و هوایی، دید محدود ناشی از مه، باران یا شب، وجود امواج و پاشش آب، و حضور همزمان تعداد زیادی از

اهداف ایستا و متحرک با ابعاد و ویژگی‌های مختلف، قابلیت‌های حسگرهای منفرد را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. حسگرهای سنتی نظیر رادار و سیستم‌های ناوبری مبتنی بر GNSS، اطلاعات ارزشمندی در خصوص موقعیت و حرکت اجسام ارائه می‌دهند، اما محدودیت‌هایی در تشخیص اهداف کوچک، عملکرد در دید محدود، و درک جزئیات محیط دارند. حسگرهای بصری (دوربین‌های مرئی و حرارتی) اطلاعات غنی تصویری فراهم می‌کنند اما به شدت به شرایط نوری و جوی وابسته هستند. لیدار اطلاعات دقیق فاصله‌سنجی ارائه می‌دهد اما ممکن است تحت تأثیر باران شدید یا مه غلیظ قرار گیرد، و حسگرهای صوتی (سونار) برای درک محیط زیر آب مناسب هستند اما محدودیت‌هایی در فضای بالای آب دارند. برای غلبه بر محدودیت‌های حسگرهای منفرد و دستیابی به یک درک محیطی جامع، مقاوم و قابل اعتماد، ادغام داده‌های حاصل از آرایه‌های حسگر چندوجهی ضروری است. این رویکرد با ترکیب داده‌های مکملی از حسگرهای مختلف (نظیر بصری، حرارتی، رادار، لیدار، و صوتی)، امکان دریافت اطلاعات کامل‌تر و دقیق‌تر از محیط را در طیف وسیعی از شرایط فراهم می‌آورد. تکنیک‌های پیشرفته همجوشی داده در سطوح مختلف (از همجوشی داده‌های خام حسگرها تا همجوشی ویژگی‌ها و اشیاء شناسایی شده) برای ترکیب مؤثر این جریان‌های داده ناهمگن مورد نیاز است. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی عمیق، پتانسیل عظیمی برای ارتقاء قابلیت‌های درک محیطی مبتنی بر همجوشی داده نشان داده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق قادر به یادگیری خودکار ویژگی‌های پیچیده از داده‌های حجیم و چندوجهی هستند و می‌توانند برای وظایفی نظیر تشخیص و طبقه‌بندی دقیق اشیاء، ردیابی همزمان اهداف متعدد، بازسازی سه‌بعدی محیط، و حتی پیش‌بینی رفتار اهداف متحرک به کار روند. با استفاده از این تکنیک‌ها، می‌توان از داده‌های همجوشی شده برای ایجاد یک مدل ادراکی غنی و با جزئیات بالا از محیط اطراف شناور بهره برد که بسیار مقاوم‌تر از سیستم‌های مبتنی بر حسگرهای منفرد یا تکنیک‌های همجوشی سنتی است. بنابراین، پژوهش در این حوزه بر توسعه و ارزیابی چارچوب‌های نوین

همجوشی داده‌های چندوجهی مبتنی بر هوش مصنوعی متمرکز است. هدف، طراحی الگوریتم‌ها و معماری‌هایی است که بتوانند داده‌های آنی از آرایه‌های حسگر پیشرفته را به صورت هوشمندانه ترکیب کرده و درک محیطی شناورهای تندرو را در شرایط چالش‌برانگیز عملیاتی به طور قابل توجهی ارتقا دهند. دستیابی به این هدف، سنگ بنای حیاتی برای توسعه موفقیت‌آمیز شناورهای تندرو تماماً خودکار و افزایش ایمنی و کارایی عملیات دریایی در آینده خواهد بود.

سوال ششم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) با افزایش سطح خودکارسازی در شناورهای تندرو، نقش خدمه انسانی چگونه تغییر خواهد کرد و بهترین رویکردها برای طراحی رابط‌های انسان و ماشین و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری برای اطمینان از ایمنی، کارایی و اعتماد متقابل در این سیستم‌های پیچیده کدامند؟

روندهای کنونی در توسعه شناورهای تندرو به سمت افزایش قابل توجه سطوح خودکارسازی پیش می‌رود؛ امری که پیامدهای عمیقی بر نقش سنتی خدمه انسانی در عرشه دارد. با واگذاری وظایف کنترلی و نظارتی روتین به سیستم‌های خودکار، نقش خدمه از اپراتورهای فعال به ناظران، تصمیم‌گیرندگان سطح بالا و مدیران سیستم‌های پیچیده تغییر می‌یابد. این تحول، چالش‌های جدیدی را در حوزه تعامل انسان و ماشین^{۱۴} و طراحی سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری مطرح می‌سازد. در این راستا، پژوهش‌های آتی می‌بایست بر طراحی رابط‌های انسان و ماشینی متمرکز شوند که ضمن ارائه تصویری واضح و جامع از وضعیت لحظه‌ای شناور و محیط اطراف (حتی در شرایط چالش‌برانگیز و پویا)، قابلیت درک وضعیت عملکرد سیستم‌های خودکار و دلایل تصمیم‌گیری آن‌ها را برای خدمه فراهم آورند. رابط‌های کاربری نسل جدید باید به گونه‌ای طراحی شوند که از خارج شدن از حلقه کنترل و کاهش هوشیاری خدمه در طول دوره‌های طولانی خودکارسازی جلوگیری کرده و امکان مداخله دستی سریع، ایمن و شهودی را در مواقع ضروری فراهم آورند. علاوه بر این، توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری

¹⁴ Human-Machine Interaction - HMI

هوشمند امری حیاتی است. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل داده و هوش مصنوعی، می‌بایست قادر به پردازش اطلاعات پیچیده از حسگرهای مختلف، ارزیابی سناریوهای محتمل و ارائه پیشنهاد‌های راهبردی به خدمه برای اتخاذ تصمیمات بهینه در شرایط عملیاتی دشوار یا اضطراری باشند. هدف، تقویت توانمندی‌های شناختی خدمه و نه جایگزینی کامل قضاوت انسانی است. حفظ اعتماد متقابل میان خدمه و سیستم‌های خودکار یکی از ارکان اصلی دستیابی به ایمنی و کارایی عملیاتی در سیستم‌های با خودکارسازی بالاست. پژوهش در این زمینه نیازمند بررسی عوامل روان‌شناختی و طراحی سیستم‌هایی است که شفافیت در عملکرد، قابلیت پیش‌بینی‌پذیری و رفتاری قابل اتکا را به نمایش بگذارند. نهایتاً، تطبیق برنامه‌های آموزشی و توسعه شایستگی‌های خدمه برای ایفای نقش‌های جدید خود در محیط‌های عملیاتی دگرگون شده، امری ضروری است که می‌بایست همگام با پیشرفت فناوری‌های خودکارسازی مورد توجه قرار گیرد. بررسی این جنبه‌ها در کنار توسعه فناوری‌های خودکارسازی، برای اطمینان از گذار موفق به نسل آینده شناورهای تندرو کاملاً خودکار، حیاتی خواهد بود.

سوال هفتم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) چگونه استفاده از مدل‌های دوقلوی دیجیتال پیشرفته، که به صورت آنی با داده‌های عملیاتی همگام‌سازی می‌شوند، می‌تواند فرآیندهای طراحی، تست مجازی، آموزش خدمه، نگهداری پیش‌بینانه و بهینه‌سازی عملیاتی شناورهای تندرو را در طول چرخه حیات آن‌ها متحول سازد؟

با توجه به پیچیدگی فزاینده شناورهای تندرو و نیاز به مدیریت بهینه در سراسر چرخه حیات آن‌ها، مدل‌های دوقلوی دیجیتال به عنوان یک فناوری مرز دانشی، پتانسیل تحول‌آفرینی در فرآیندهای مهندسی و عملیاتی را ارائه می‌دهند. دوقلوی دیجیتال، یک نمونه مجازی پویا از شناور فیزیکی است که با استفاده از داده‌های حسگر آنی، مدل‌های شبیه‌سازی دقیق و الگوریتم‌های تحلیل پیشرفته، وضعیت لحظه‌ای و رفتار آتی شناور را منعکس و پیش‌بینی می‌کند. استفاده از دوقلوهای دیجیتال پیشرفته می‌تواند فرآیندهای طراحی را با امکان نمونه‌سازی مجازی

سریع، ارزیابی عملکرد در شرایط مختلف عملیاتی و بهینه‌سازی تکرارشونده طرح پیش از ساخت فیزیکی تسریع و بهبود بخشد. در مرحله تست مجازی، دوقلوی دیجیتال محیطی واقع‌گرایانه برای شبیه‌سازی سناریوهای پیچیده و حدی فراهم می‌آورد که تکرار آن‌ها در دنیای واقعی پرهزینه یا خطرناک است؛ بدین ترتیب، قابلیت‌های شناور تحت شرایط مختلف قبل از بهره‌برداری نهایی قابل ارزیابی دقیق خواهد بود. در حوزه آموزش خدمه، دوقلوی دیجیتال یک پلتفرم شبیه‌سازی همه‌جانبه و واقع‌گرایانه ایجاد می‌کند. خدمه می‌توانند با سیستم‌های شناور در محیطی امن تمرین کرده، با پاسخ شناور به فرمان‌ها و شرایط محیطی آشنا شوند و رویه‌های اضطراری را در سناریوهای شبیه‌سازی شده که با وضعیت واقعی شناور منطبق است، تجربه نمایند؛ این امر آمادگی و شایستگی خدمه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. اثرگذارترین کاربرد دوقلوی دیجیتال در نگهداری پیش‌بینانه و بهینه‌سازی عملیاتی در طول فاز بهره‌برداری شناور است. با همگام‌سازی آنی دوقلوی دیجیتال با داده‌های عملیاتی (شامل داده‌های عملکرد، وضعیت اجزاء، شرایط محیطی)، الگوریتم‌های تحلیل پیشرفته (مانند یادگیری ماشین) می‌توانند وضعیت سلامت اجزاء حیاتی را پیش‌فرو سودگی یا خرابی‌های احتمالی را پیش‌بینی و زمان‌بندی فعالیت‌های نگهداری را بهینه کنند. این امر نه تنها از بروز خرابی‌های پرهزینه و توقف‌های ناخواسته جلوگیری می‌کند، بلکه قابلیت اطمینان عملیاتی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، دوقلوی دیجیتال امکان پایش آنی عملکرد شناور را فراهم کرده و با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف (مانند تغییر سرعت، مسیر، یا تنظیمات سیستم)، به اپراتورها در اتخاذ تصمیمات بهینه برای حداکثر کردن بازدهی سوخت، کاهش آلایندگی یا بهبود قابلیت دریانوردی در شرایط متغیر یاری می‌رساند. این توانایی در پیش‌بینی پیامدهای تصمیمات عملیاتی، مدیریت شناورهای تندرو را به سطحی نوین ارتقا می‌دهد. به طور خلاصه، دوقلوی دیجیتال با ایجاد پیوندی پویا بین دنیای فیزیکی و مجازی، فرآیندهای کلیدی در چرخه حیات شناورهای تندرو را متحول ساخته و منجر به طراحی بهتر، تست کارآمدتر، آموزش مؤثرتر و عملیات بهینه‌تر و قابل اطمینان‌تر می‌شود.

سوال هشتم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۲) تمرکزهای پژوهشی اصلی و موضوعات فعال کنونی در حوزه شناورهای تندرو، بر اساس فراوانی و مرکزیت کلمات کلیدی در نقشه، کدامند؟

اندازه گره‌ها در نقشه که نمایانگر بسامد کلمات کلیدی در مجموعه داده است، نشان‌دهنده موضوعات کنونی و فعال‌ترین حوزه‌های پژوهشی است. کلماتی نظیر performance, hydrodynamics, CFD, design و simulation به دلیل اندازه بزرگ گره‌هایشان و تراکم بالا در خوشه‌های مربوطه، به عنوان تمرکزهای اصلی و مستمر پژوهش در این حوزه مشخص می‌شوند. این نشان می‌دهد که مباحث بنیادی مربوط به فهم رفتار شناور و ابزارهای اصلی تحلیل مهندسی همچنان از اهمیت بالایی برخوردارند. با این حال، رشد و برجستگی کلمات کلیدی مرتبط با فناوری‌های نوظهور و خوشه‌های جدیدتر، تأکید می‌کند که تمرکز پژوهشی به طور فزاینده‌ای به سمت ادغام این فناوری‌ها برای بهبود عملکرد، افزایش پایداری و توسعه قابلیت‌های جدید در شناورهای تندرو معطوف شده است، که این حوزه‌ها را به کانون‌های فعالیت پژوهشی در حال حاضر و آینده نزدیک تبدیل می‌سازد.

مبانی و منطق انتخاب سؤالات پژوهشی در مورد شکل ۳-
نقشه چگالی و تمرکز فناوری مرتبط با شناورهای تندرو

منطق نهفته در طرح سؤالات کلیدی حول این شکل، با هدف استخراج حداکثر اطلاعات معنادار از بصری‌سازی تراکم موضوعی صورت می‌پذیرد. تحلیل نقشه چگالی گامی حیاتی در فهم منظر پژوهشی یک حوزه است، چرا که این نقشه توزیع فضایی کلمات کلیدی و شدت هم‌وقوعی آن‌ها را نشان می‌دهد. پرسش‌های مطرح‌شده در این زمینه، بر مبنای تفسیر لایه‌های اطلاعاتی نهفته در این بصری‌سازی بنا نهاده شده‌اند:

شناسایی کانون‌های اصلی پژوهش از طریق تحلیل مناطق با چگالی بالا: منطق در این بخش بر این اصل استوار است که مناطق با چگالی بالا، که با رنگ‌های گرم‌تر (اغلب قرمز یا نارنجی) نمایش داده می‌شوند، نمایانگر موضوعات یا خوشه‌های کلمات کلیدی هستند که بیشترین هم‌وقوعی و تکرار را در مجموعه مقالات تحلیل‌شده داشته‌اند. این تراکم بالا به منزله شاخصی از شدت فعالیت پژوهشی و

تمرکز جامعه علمی بر روی این مباحث است. بنابراین، سوال در مورد این مناطق به ما امکان می‌دهد تا هسته‌های اصلی دانش موجود و پرتعدادترین و فعال‌ترین زمینه‌های تحقیق در حوزه مورد بررسی (در اینجا، شناورهای تندرو) را شناسایی کنیم. این کانون‌ها غالباً شامل مفاهیم بنیادی، چالش‌های مهم یا روش‌شناسی‌هایی هستند که به طور گسترده‌ای در پژوهش‌های فعلی به کار گرفته می‌شوند.

تشخیص حوزه‌های کمتر فعال و شکاف‌های بالقوه دانش از طریق بررسی مناطق با چگالی پایین: در مقابل، مناطقی با چگالی پایین‌تر که با رنگ‌های سردتر (سبز یا آبی) مشخص شده‌اند، نشان‌دهنده نواحی هستند که کلمات کلیدی در آن‌ها هم‌وقوعی و تکرار کمتری دارند. منطق در اینجا این است که این کمبود تراکم می‌تواند دلالت بر حوزه‌های کمتر مورد توجه پژوهشگران، شکاف‌های موجود در دانش، یا موضوعاتی که هنوز در مراحل اولیه توسعه هستند، داشته باشد. پرسش در مورد این مناطق به ما کمک می‌کند تا مرزهای دانش فعلی را شناسایی کرده و فرصت‌های پژوهشی جدیدی را که کمتر مورد کاوش قرار گرفته‌اند، کشف کنیم. این مناطق می‌توانند بستر مناسبی برای طرح سؤالات تحقیقاتی نوآورانه و پیش‌برنده باشند.

درک روابط و هم‌پوشانی‌های ضمنی از طریق تحلیل نزدیکی فضایی خوشه‌ها با چگالی بالا: حتی بدون خطوط ارتباطی صریح نقشه شبکه‌ای، نحوه قرارگیری فضایی خوشه‌ها یا مناطق با چگالی بالا نسبت به یکدیگر در نقشه چگالی حاوی اطلاعات ارزشمندی است. نزدیکی فیزیکی یا هم‌پوشانی این مناطق نشان‌دهنده هم‌وقوعی معنادار کلمات کلیدی در مرزهای دو یا چند خوشه است که مؤید وجود ارتباطات موضوعی قوی و فعالیت‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای میان آن حوزه‌ها است. منطق در اینجا این است که تحلیل این نزدیکی‌ها به ما امکان می‌دهد تا درک کنیم چگونه مفاهیم و روش‌ها از یک زیرحوزه به زیرحوزه دیگر نفوذ کرده و پژوهش‌های بین‌رشته‌ای در کجای حوزه مورد نظر فعال‌تر هستند. این به ترسیم تصویر پویاتری از تعامل اجزاء مختلف حوزه کمک می‌کند.

رصد نشانه‌های ظهور موضوعات جدید از طریق شناسایی مناطق کوچک‌تر با چگالی در حال رشد: اگرچه شناسایی

مستقیم موضوعات نوظهور عمدتاً از طریق تحلیل زمانی (مانند رنگ‌بندی در نقشه شبکه‌ای) صورت می‌گیرد، نقشه چگالی نیز می‌تواند نشانه‌هایی اولیه از ظهور را آشکار سازد. منطق در این بخش بر رصد تشکیل نقاط کوچک‌تر اما با چگالی قابل مشاهده در مناطق پیرامونی یا خارج از خوشه‌های اصلی استوار است. این نقاط می‌توانند نمایانگر حوزه‌های جدیدی باشند که فعالیت پژوهشی در آن‌ها به تازگی آغاز شده و در حال رشد است، حتی اگر هنوز به حجم و مرکزیت خوشه‌های قدیمی نرسیده باشند. تحلیل این نقاط به شناسایی روندهای آتی و مباحثی که پتانسیل تبدیل شدن به کانون‌های اصلی پژوهش در آینده را دارند، یاری می‌رساند.

سوال اول: با توجه به نقشه علمی (شکل ۳) کدام حوزه‌ها یا موضوعات در نقشه دارای بالاترین چگالی پژوهشی هستند و نشان‌دهنده فعال‌ترین زمینه‌های تحقیق می‌باشند؟

با مشاهده نقشه چگالی، مناطق با رنگ‌های قرمز و نارنجی که بالاترین شدت را نشان می‌دهند، معرف پرچگال‌ترین حوزه‌های پژوهشی هستند. این مناطق به وضوح حول خوشه‌های کلمات کلیدی زیر متمرکز شده‌اند. هیدرودینامیک و شبیه‌سازی: شامل کلماتی مانند هیدرودینامیک، دینامیک سیالات محاسباتی، مقاومت، درگ، شبیه‌سازی عددی، بدنه و هیدروفویل. این خوشه یک مرکز چگالی بسیار قوی را تشکیل می‌دهد. عملکرد و پدیده‌های مرتبط شامل کلماتی مانند عملکرد، پیش‌بینی، ضربه/تأثیر، کوبش/برخورد شدید با آب، خستگی و استحکام این حوزه نیز یک مرکز چگالی بالا را نشان می‌دهد که با خوشه هیدرودینامیک هم‌پوشانی قابل توجهی دارد. طراحی و شبیه‌سازی کلی شامل کلماتی مانند طراحی و شبیه‌سازی این منطقه نیز دارای چگالی بالایی است و به طور نزدیکی با خوشه‌های عملکرد و هیدرودینامیک/CFD مرتبط است. این مناطق پرچگال نشان می‌دهند که هسته اصلی و فعال‌ترین زمینه‌های پژوهش در حوزه شناورهای تندرو در حال حاضر بر روی درک و پیش‌بینی دقیق رفتار هیدرودینامیکی، تحلیل عملکرد و پدیده‌های دینامیکی شدید، و استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و طراحی متمرکز است.

سوال دوم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۳) کدام مناطق در نقشه چگالی پژوهشی کمتری دارند؟ آیا این نواحی معرف موضوعات کمتر کاوش شده، شکاف‌های دانشی یا زمینه‌هایی با پتانسیل بالا برای تحقیقات آینده هستند؟

مناطق با رنگ‌های سبز و آبی، نشان‌دهنده چگالی پژوهشی پایین‌تر هستند. این مناطق شامل حوزه‌های زیر می‌باشند. فناوری‌های نوظهور مانند renewable energy (انرژی تجدیدپذیر)، artificial intelligence (هوش مصنوعی)، target tracking (ردیابی هدف)، GPS (جی‌پی‌اس)، optimization (بهینه‌سازی)، systems (سیستم‌ها). ملاحظات زیست‌محیطی و رفتاری مانند (noise patterns (آلودگی صوتی)، (الگوهای نویز). مدیریت و ریسک مانند مدیریت و ریسک. این نواحی با چگالی کمتر می‌توانند معرف موضوعاتی باشند که یا نسبتاً جدید هستند و هنوز حجم انتشارات بالایی ندارند (موضوعات نوظهور)، یا کمتر از حوزه‌های اصلی مورد توجه قرار گرفته‌اند (شکاف‌های دانشی)، یا به دلیل چالش‌های خاص خود (نظیر نیاز به داده‌های میدانی گسترده یا پیچیدگی ذاتی) کمتر کار شده‌اند. این مناطق اغلب پتانسیل بالایی برای تحقیقات آتی و نوآوری در مرزهای دانش دارند. به عنوان مثال، خوشه‌های هوش مصنوعی و انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان موضوعات جدیدتر مشخص شده بودند، و چگالی کمتر آن‌ها در این نقشه تأییدی بر این است که حجم کلی پژوهش در آن‌ها هنوز به اندازه هسته اصلی حوزه نیست، اما در حال رشد است.

سوال سوم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۳) آیا نزدیکی یا هم‌پوشانی فضایی میان خوشه‌های مختلف با چگالی بالا نشان‌دهنده ارتباطات قوی یا پژوهش‌های میان‌رشته‌ای فعال میان این حوزه‌ها است؟

بله، نزدیکی فضایی و به ویژه هم‌پوشانی مناطق با چگالی بالا در نقشه، به وضوح نشان‌دهنده ارتباطات قوی و فعالیت‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای میان آن حوزه‌ها است. در این نقشه، هم‌پوشانی قابل توجهی میان مرکز چگالی Hydrodynamics/CFD/Resistance و مرکز چگالی Performance/Prediction/Impact و همچنین هم‌پوشانی

این دو با منطقه چگالی Design/Simulation دیده می‌شود. این امر نشان می‌دهد که پژوهش‌ها به طور فعال، هیدرودینامیک را برای پیش‌بینی و تحلیل عملکرد و پدیده‌های ضربه به کار می‌برند و نتایج شبیه‌سازی‌ها مبنای فرآیندهای طراحی قرار می‌گیرند. نزدیکی منطقه چگالی Slamming/Fatigue/Strength به این خوشه‌ها نیز ارتباط نزدیک میان تحلیل پدیده‌های دینامیکی شدید و طراحی سازه‌ای را تأیید می‌کند.

سوال چهارم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۳) آیا می‌توان نشانه‌هایی از ظهور موضوعات جدید را به صورت نقاط کوچک‌تر اما با چگالی قابل مشاهده در لبه‌های نقشه یا خارج از خوشه‌های اصلی تشخیص داد؟

بله، می‌توان نشانه‌هایی از حوزه‌های در حال ظهور را به صورت نقاط کوچک‌تر اما با چگالی قابل مشاهده در خارج از کانون‌های اصلی دید. به عنوان مثال خوشه بهینه‌سازی و سیستم‌ها در قسمت بالا و سمت راست نقشه، یک منطقه با چگالی مشخص، هرچند کمتر از هسته اصلی، تشکیل داده‌اند که نشان‌دهنده تمرکز پژوهشی در این زمینه است. خوشه Sound Disturbance, Noise Patterns در سمت راست نقشه نیز یک منطقه با چگالی قابل توجه، اما جدا از خوشه‌های مهندسی اصلی، تشکیل داده که نشان‌دهنده رشد پژوهش در این حوزه زیست‌محیطی مرتبط است. این نقاط کوچک‌تر با چگالی مشخص، به ویژه زمانی که با اطلاعات زمانی نقشه اول ترکیب شوند، به ما در شناسایی موضوعات نوظهوری که در حال جذب فعالیت پژوهشی هستند، کمک می‌کنند.

سوال پنجم: با توجه به نقشه علمی (شکل ۳) مقایسه الگوی چگالی با الگوی ارتباطات در نقشه شبکه‌ای قبلی چه بینش‌های تکمیلی در مورد ساختار و پویایی حوزه پژوهش ارائه می‌دهد؟ مقایسه این دو نقشه بینش‌های ارزشمندی ارائه می‌دهد:

نقشه شبکه‌ای شکل ۱ ساختار گسسته‌تر حوزه را در قالب گره‌های مجزا و خطوط ارتباطی نشان می‌دهد. این نقشه برای دیدن ارتباطات مستقیم میان کلمات کلیدی خاص (مانند ارتباط بین prediction و artificial intelligence) و همچنین قدمت نسبی موضوعات (از طریق رنگ) بسیار

مفید است. این نقشه ساختار دقیق‌تر ارتباطات میان موضوعات را نشان می‌دهد.

نقشه چگالی (شکل ۳) تمرکز و شدت فعالیت پژوهشی را به صورت پیوسته و با هایلایت کردن مناطق پربسامد نشان می‌دهد. این نقشه برای دیدن موضوعاتی که بیشترین حجم پژوهش روی آن‌ها انجام شده (کانون‌های اصلی)، میزان پراکندگی یا تمرکز فعالیت‌ها، و نواحی با فعالیت کم (شکاف‌های احتمالی) بسیار مؤثر است. نقشه چگالی به ما نشان می‌دهد که وزن و حجم پژوهش کجاست، در حالی که نقشه شبکه‌ای نشان می‌دهد که چگونه این وزن بین موضوعات مختلف توزیع و مرتبط شده است و کدام موضوعات جدیدتر هستند. برای مثال، نقشه شبکه‌ای ممکن است نشان دهد که هوش مصنوعی به پیش‌بینی متصل است (نشان‌دهنده ارتباط). نقشه چگالی نشان می‌دهد که حجم پژوهش در پیش‌بینی بسیار بالا است، در حالی که حجم پژوهش در هوش مصنوعی کمتر است اما به صورت یک نقطه در حال ظهور دیده می‌شود. ترکیب این دو نشان می‌دهد که حوزه پیش‌بینی عملکرد یک حوزه تثبیت شده و پرجمع است که فناوری نوظهور هوش مصنوعی در حال ورود و تأثیرگذاری بر آن است. به عبارت دیگر، نقشه چگالی نقاط داغ را نشان می‌دهد و نقشه شبکه‌ای چگونه به این نقاط داغ رسیده‌ایم یا از آن‌ها به کجا می‌رویم را تا حدی روشن می‌سازد.

۷. آینده فناوری در شناورهای تندرو

شناورهای تندرو به دلیل نیاز به سرعت بالا و کارایی بهینه در محیط‌های آبی، از طراحی‌های هیدرودینامیکی خاصی بهره می‌برند که هدف اصلی آن‌ها کاهش مقاومت در برابر آب و افزایش پایداری و سرعت است [22].

۷/۱. تحلیل شکل‌های متداول در شناورهای تندرو

➤ بدنه‌های پلنینگ^{۱۵}

بدنه‌های پلنینگ با کف تخت یا نزدیک به تخت طراحی می‌شوند تا در سرعت‌های بالا، شناور را از سطح آب بلند کرده و به حالت پلنینگ برسانند. این شکل باعث کاهش سطح تماس با آب و در نتیجه کاهش مقاومت هیدرودینامیکی می‌شود. مزیت اصلی این طراحی، کارایی

¹⁵ Planing Hulls

بالا در سرعت‌های زیاد است، اما در سرعت‌های پایین‌تر، مقاومت بیشتری نسبت به بدنه‌های جابجایی نشان می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهند که بهینه‌سازی زاویه کف و استفاده از interceptors می‌تواند عملکرد این بدنه‌ها را بهبود بخشد.

➤ کاتاماران

کاتاماران‌ها با دو بدنه موازی که توسط یک ساختار مرکزی به هم متصل شده‌اند، پایداری جانبی بیشتری نسبت به بدنه‌های تک بدنه ارائه می‌دهند. این طراحی مقاومت هیدرودینامیکی را کاهش داده و فضای داخلی بیشتری فراهم می‌کند، که برای شناورهای مسافربری و باری ایده‌آل است. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی نشان داده‌اند که فاصله بهینه بین بدنه‌ها و شکل مقطع آن‌ها تأثیر قابل توجهی بر کاهش پسا دارد.

➤ هیدروفویل‌ها

هیدروفویل‌ها از باله‌های زیرآبی بهره می‌برند که نیروی بالابر ایجاد کرده و بدنه شناور را از آب جدا می‌کنند، به طوری که مقاومت در برابر آب به حداقل می‌رسد. این طراحی امکان دستیابی به سرعت‌های بسیار بالا با مصرف سوخت کمتر را فراهم می‌کند، اما پیچیدگی طراحی و هزینه‌های نگهداری آن چالش‌هایی را به همراه دارد. تحقیقات اخیر بر روی مواد کامپوزیتی سبک برای بهبود استحکام و کاهش وزن این باله‌ها متمرکز شده است.

۷/۲. مواد پیشرفته و بهینه‌سازی ساختاری

استفاده از مواد سبک و مقاوم مانند کامپوزیت‌های فیبر کربن و آلیاژهای تیتانیوم، وزن شناورها را کاهش داده و استحکام ساختاری را افزایش می‌دهد. این مواد، همراه با تحلیل‌های پیشرفته نظیر slamming و fatigue که در شبکه‌های پژوهشی برجسته هستند، امکان طراحی شناورهایی با دوام بیشتر در برابر شرایط سخت دریایی را فراهم می‌کنند. آینده این حوزه ممکن است به سمت مواد هوشمند خودترمیم‌شونده حرکت کند که هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهند.

۷/۳. سیستم‌های رانش نوین

ظهور renewable energy در پژوهش‌های اخیر نشان‌دهنده تمایل به استفاده از سیستم‌های رانش الکتریکی و هیبریدی است. این سیستم‌ها، که می‌توانند با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند سلول‌های خورشیدی یا

پیل‌های سوختی هیدروژنی ادغام شوند، نه تنها کارایی را افزایش می‌دهند بلکه انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند. توسعه پروانه‌های پیشرفته و جت‌های آبی نیز می‌تواند به کاهش مقاومت و بهبود عملکرد کمک کند.

۷/۴. بهینه‌سازی طراحی با CFD و هوش مصنوعی

پیشرفت در دینامیک سیالات محاسباتی و هوش مصنوعی که در گره‌های پررنگ مانند optimization و algorithm در نقشه‌های علمی مشهود است، امکان طراحی دقیق‌تر و بهینه‌تر شکل‌های بدنه را فراهم می‌کند. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به طراحی شناورهایی با کمترین پسا و بهترین seakeeping performance منجر شود. این رویکرد در آینده ممکن است به سیستم‌های تطبیقی real-time گسترش یابد که شکل بدنه را بر اساس شرایط لحظه‌ای دریا تنظیم می‌کنند.

۷/۵. شناورهای خودران

گره‌های مرتبط با target tracking، GPS، و systems در شبکه‌های پژوهشی نشان‌دهنده حرکت به سمت شناورهای خودران است. این شناورها با استفاده از سنسورهای پیشرفته و هوش مصنوعی می‌توانند در مناطق پرترافیک آبی با ایمنی و کارایی بالا عمل کنند. این فناوری پتانسیل تغییر در حمل‌ونقل دریایی و لجستیک را دارد، به‌ویژه در صورتی که با سیستم‌های رانش پایدار ترکیب شود.

۷/۶. پایداری محیطی

توجه به sound disturbance noise در پژوهش‌ها نشان‌دهنده اهمیت کاهش اثرات زیست‌محیطی شناورهای تندرو است. فناوری‌های آینده ممکن است شامل پوشش‌های بدنه کاهش‌دهنده نویز، سیستم‌های رانش کم‌صدا، و پروتکل‌های مدیریت ریسک برای حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی باشد. این موضوع با افزایش فشارهای قانونی و اجتماعی برای پایداری محیطی اهمیت بیشتری خواهد یافت.

شکل‌های کنونی شناورهای تندرو، از جمله بدنه‌های پلنینگ، کاتاماران‌ها، و هیدروفویل‌ها، هر یک مزایای خاصی در کاهش مقاومت و افزایش کارایی ارائه می‌دهند. با این حال، آینده این فناوری‌ها به سمت طراحی‌های

سبک‌تر، کارآمدتر و پایدارتر حرکت می‌کند که از پیشرفت‌های مواد، سیستم‌های رانش نوین، بهینه‌سازی مبتنی بر CFD و هوش مصنوعی، و خودمختاری بهره می‌برند. تحلیل شبکه‌های پژوهشی تأیید می‌کند که این روندها در حال شکل‌گیری هستند و نیازمند همکاری میان‌رشته‌ای بین مهندسان، دانشمندان مواد، و متخصصان هوش مصنوعی است. تحقیقات آتی باید بر اعتبارسنجی این فناوری‌ها از طریق آزمایش‌های میدانی و مطالعات طولی تمرکز کند تا پتانسیل آن‌ها به طور کامل محقق شود.

۸. جمع‌بندی نتیجه‌گیری

در نهایت، تحلیل جامع نقشه‌های علمی حوزه شناورهای تندرو، تصویری شفاف از ساختار، پویایی و جهت‌گیری‌های کلیدی این زمینه پژوهشی ارائه می‌دهد. این تحلیل نشان داد که در حالی که مباحث بنیادی نظیر هیدرودینامیک، عملکرد، طراحی و شبیه‌سازی همچنان کانون‌های اصلی و فعال تحقیق را تشکیل می‌دهند، حوزه به سرعت در حال جذب و ادغام فناوری‌های نوظهور است. ظهور و رشد چشمگیر خوشه‌های مرتبط با هوش مصنوعی، انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های خودکار و ملاحظات زیست‌محیطی، نشان‌دهنده تغییر پارادایم به سمت راهکارهای پایدارتر، هوشمندتر و خودمختارتر در طراحی و عملیات شناورهای تندرو در آینده است. ساختار شبکه‌ای و هم‌پوشانی میان خوشه‌ها نیز بر ماهیت میان‌رشته‌ای این حوزه و لزوم پژوهش‌های یکپارچه تأکید دارد. شناسایی مناطق با چگالی پژوهشی کمتر نیز فرصت‌های بالقوه برای کاوش‌های جدید و پر کردن شکاف‌های دانشی را برجسته می‌سازد. بنابراین، یافته‌های این مطالعه نه تنها وضعیت فعلی مرز دانش در شناورهای تندرو را روشن می‌سازد، بلکه با ترسیم مسیرهای رشد و شناسایی اولویت‌های نوظهور، می‌تواند راهنمای ارزشمندی برای جهت‌دهی استراتژیک تحقیقات آتی در این حوزه حیاتی باشد. برخی از موارد کلیدی شامل حوزه‌های زیر است:

❖ سازگاری و یکپارچگی سیستم‌های نوبری

خودران: ادغام فناوری‌های مبتنی بر GPS با الگوریتم‌های هوش مصنوعی مزیت‌های فراوانی از جمله افزایش دقت و کاهش خطای انسانی دارد. اما

چالش‌های مربوط به تأمین زیرساخت‌های فنی (مانند شبکه‌های ارتباطی پرسرعت) همچنان نیازمند توجه ویژه هستند. بررسی اخیر نشان می‌دهد که فناوری‌های ترکیبی، علی‌رغم پیچیدگی فنی، به دلیل بهره‌گیری از مزایای مشترک هر فناوری، می‌توانند پاسخگوی نیازهای آینده در شناورهای تندرو باشند.

❖ تغییرات در سیستم‌های انتقال قدرت:

زمینه انتقال قدرت، تغییر از موتورهای سنتی به موتورهای هیبرید و برقی یک روند چشمگیر در سال‌های اخیر بوده است. موتورهای هیبرید، با ترکیب مزایای دو سیستم متفاوت، می‌توانند تعادل بهتری بین عملکرد و مصرف سوخت به ارمغان آورند. از سوی دیگر، موتورهای برقی به دلیل عدم مصرف سوخت فسیلی، در عرصه کاهش آلودگی محیطی پیشتاز هستند؛ اما محدودیت‌های مربوط به برد عملیاتی و زمان شارژ همچنان به عنوان چالش‌های اصلی باقی مانده است.

❖ چالش‌های طراحی هیدروفویل و بهره‌وری

آبرودینامیکی: بهبود طراحی هیدروفویل با استفاده از مواد نوین و تکنیک‌های طراحی پیشرفته، به کاهش مقاومت شناور در برابر اصطکاک کمک شایانی کرده است. با این حال، بهبودهای بیشتر در بخش دینامیک سیالات و مطالعات تجربی مورد نیاز است تا عملکرد شناور در سرعت‌های بالا به حداکثر برسد.

❖ نقش فناوری‌های اینترنت اشیا: بهره‌گیری

از اینترنت اشیا در شناورهای تندرو، امکان نظارت لحظه‌ای بر پارامترهای سیستم‌های مختلف را فراهم آورده و موجب افزایش ایمنی و بهبود پاسخگویی سیستم‌های نوبری و موتوری شده است. این فناوری، با فراهم کردن داده‌های دقیق، زمینه را برای تحلیل‌های پیشرفته و تصمیم‌گیری‌های به موقع فراهم می‌کند؛ اما پیاده‌سازی گسترده آن مستلزم سرمایه‌گذاری‌های کلان در زیرساخت‌های ارتباطی و امنیت سایبری می‌باشد.

❖ چالش‌های میان‌رشته‌ای و آینده نوآوری:

فناوری‌های نوین مرز دانشی در حوزه شناورهای تندرو، نیازمند همکاری میان رشته‌ای بین مهندسی نرم‌افزار، مکانیک، علم داده و علم مواد می‌باشند. چالش‌های موجود در ادغام سیستم‌های مختلف، نیازمند تحقیقات

oat_developments_from_the_past_into_the_future.htm

[6] L. Yun and A. Bliault, "Introduction: High-Performance Marine Vessels," in *High Performance Marine Vessels*, L. Yun and A. Bliault, Eds., Boston, MA: Springer US, 2012, pp. 1–22. doi: 10.1007/978-1-4614-0869-7_1.

[7] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge university press, 2005. Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available:

[8] J. N. Newman, *Marine hydrodynamics*. The MIT press, 2018. Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available:

<https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/26039>

[9] J. Li, G. Zhang, C. Jiang, and W. Zhang, "A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions," *Ocean Eng.*, vol. 285, p. 115359, 2023.

[10] J. Sun *et al.*, "The future and technique challenges of high-speed ground effect vehicle enrolled in maritime transportation," *Aerosp. Traffic Saf.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–54, 2024.

[11] N. Arish, M. J. Kamper, and R. J. Wang, "Advancements in electrical marine propulsion technologies: A comprehensive overview," *SAIEE Afr. Res. J.*, vol. 116, no. 1, pp. 14–29, 2024.

[12] I. Bae and J. Hong, "Survey on the developments of unmanned marine vehicles: Intelligence and cooperation," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4643, 2023.

[13] J. Sun *et al.*, "The future and technique challenges of high-speed ground effect vehicle enrolled in maritime transportation," *Aerosp. Traffic Saf.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–54, 2024.

[14] J. Zhuang *et al.*, "Navigating high-speed unmanned surface vehicles: System approach and validations," *J. Field Robot.*, vol. 38, no. 4, pp. 619–652, Jun. 2021, doi: 10.1002/rob.22003.

[15] B. Singh, K. A. Dastgerdi, N. Athanasopoulos, W. Naeem, and B. Lecallard, "Provably Safe Finite-Time Guidance for Marine Vehicles," Feb. 09, 2024, *arXiv: arXiv:2402.06291*. doi: 10.48550/arXiv.2402.06291.

[16] S. Ding, J. Jin, D. Liu, H. Li, Y. Ma, and J. Zhang, "Nonparametric modeling of a high-speed USV at three speed regions based on Gaussian process regression with a hybrid kernel function," *Ocean Eng.*, vol. 300, p. 117528, 2024.

[17] E. Miller, M. Lammert, and C. Kemp, "Energy Modeling for Fishing Boat Hybridization," *Authorea Prepr.*, 2024, Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.171561285.50225545>

بین‌رشته‌ای بیشتری است تا بتوان از تمامی ظرفیت‌های فناوری‌های نوین بهره‌مند شد. در این راستا، پژوهش‌های آینده باید به بررسی راهکارهایی جهت بهبود یکپارچگی و کاهش پیچیدگی سیستم‌های ترکیبی بپردازند.

در مجموع، روند گذار به سمت استفاده از فناوری‌های نوین مرز دانشی در شناورهای تندرو نه تنها موجب افزایش کارایی و ایمنی سیستم‌های دریایی می‌شود، بلکه ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی نیز در بهره‌برداری از این فناوری‌ها نقش بسزایی دارند. با توجه به تحلیل انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که فناوری‌های نوین مرز دانشی از جمله سیستم‌های ناوبری هوشمند، موتورهای برقی و هیبرید، طراحی‌های بهینه هیدروفویل و فناوری‌های اینترنت اشیا، در بهبود عملکرد شناورهای تندرو نقش حیاتی دارند. این فناوری‌ها با ارائه مزایای منحصر به فرد نظیر کاهش وابستگی به مداخله انسانی، بهبود بهره‌وری سوخت، افزایش کارایی و ایمنی، توانسته‌اند چشم‌اندازهای جدیدی را در صنعت دریایی رقم بزنند. با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به زیرساخت‌های پیشرفته، پیچیدگی فنی در ادغام سیستم‌های مختلف و سرمایه‌گذاری‌های کلان در زمینه‌های نگهداری و به‌روزرسانی فناوری‌ها همچنان به‌عنوان مسائلی حیاتی باقی مانده‌اند.

مراجع

[1] E. Gatete, H. M. Ndiritu, and R. Kiplimo, "A Review on Marine Propeller Performance of High Speed Boat Running on an Outboard Engine," *Proc. Sustain. Res. Innov. Conf.*, pp. 213–220, Mar. 2022.

[2] O. B. Inal, J.-F. Charpentier, and C. Deniz, "Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 156, p. 111965, 2022.

[3] X. Liu, L. Zhao, B. Rao, and Y. Bai, "Model predictive control for autonomous marine vehicles: a review," *Ships Offshore Struct.*, pp. 1–21, Mar. 2025, doi: 10.1080/17445302.2025.2477926.

[4] G. Neşer, "Polymer based composites in marine use: history and future trends," *Procedia Eng.*, vol. 194, pp. 19–24, 2017.

[5] "Speed Boat Developments From The Past Into The Future." Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available:

http://www.lesliefield.com/other_history/speed_b

- [18] Z.-S. Dong, *High-Speed Monohull and Hydrofoil Craft*. Springer Nature, 2024. Accessed: Apr. 25, 2025.
- [19] H. Cao *et al.*, “Sustainable Sea of Internet of Things: Wind Energy Harvesting System for Unmanned Surface Vehicles,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 16, no. 22, pp. 28694–28708, Jun. 2024, doi: 10.1021/acsami.4c05142.
- [20] A. Kabanov and V. Kramar, “Marine internet of things platforms for interoperability of marine robotic agents: An overview of concepts and architectures,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 9, p. 1279, 2022.
- [21] M. Jahanbakht, W. Xiang, L. Hanzo, and M. R. Azghadi, “Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 23, no. 2, pp. 904–956, 2021.
- [22] J. Sun *et al.*, “The future and technique challenges of high-speed ground effect vehicle enrolled in maritime transportation,” *Aerosp. Traffic Saf.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–54, 2024.

استخراج ضرایب کنترلر PID برای زیرسطحی AUV با بهینه‌سازی

فراجش و زمان فراجش

امین محمدزاده ثانی^۱، سیدرضا عبداللهی^۲، کاظم گیلک^۳

۱- مربی گروه زیرسطحی دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمانهی (مدظله‌العالی)، amin.mohammadzade2013@gmail.com

۲- مربی گروه زیرسطحی دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمانهی (مدظله‌العالی)

۳- مربی گروه برق، دانشگاه علوم و فنون دریایی امام خمانهی (مدظله‌العالی)

چکیده:

در حرکت زیگزاگ سامانه‌های زیرسطحی که یکی از مهمترین حرکات مانور نیز به حساب می‌آید از کوپل حرکات سوای و یاو بهره می‌گیرند. طراحی یک سیستم کنترلی تعقیب^۱ که در آن فرکانس سوای بتواند فرکانس یاو را دنبال نماید می‌تواند یک کاندیدای مناسب جهت برآوردن مطلوب مساله باشد. در پژوهش حاضر، یک زیرسطحی هوشمند که در مراحل اولیه طراحی و ساخت بصورت رادیوکنترلی و صرفاً با سکان حرکات صفحه XY را انجام می‌داده مورد مطالعه قرار گرفته است. فاز ارتقای سامانه شامل طراحی یک سامانه کنترلی است که عملگرهای آن متشکل هستند از تراسترهای جلو و عقب^۲ جهت پیاده‌سازی حرکت سوای و دو سکان بالا و پایین جهت پیاده‌سازی حرکت یاو. مسیر طی شده در راستای طراحی سامانه کنترلی عبارتست از استخراج معادلات حرکت، استخراج توابع تبدیل مدار باز و مدار بسته، بررسی و تعیین معیارها و کران‌های پایداری. پس از تعیین اولیه کران‌های پایداری، جاگذاری این مقادیر در حلقه کنترلی منجر به آن گردید که در برخی محدوده‌ها، فراجش کم و زمان رسیدن به فراجش زیاد می‌شود و در برخی دیگر از محدوده‌ها عکس این حالت اتفاق می‌افتد. با سعی و خطا و اعمال نسبت مناسب دو فراجش متوالی، یک مصالحه مناسب بین فراجش و زمان رسیدن به فراجش ایجاد شده و کران‌های بهینه‌ی پایداری مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی:

زیرسطحی AUV، کنترلر PID، مانور زیگزاگ، تعقیب و تنظیم، فراجش، زمان فراجش

Derivation of PID Controller Coefficients for an AUV System Using Overshoot and Peak Time Optimization

Amin Mohammadzadeh Sani¹, Seyed Reza Abdullahi², Kazem Gilak³

1- Imam Khamenei University of Marine Science and Technology, Faculty of Sub-Surface Group, amin.mohammadzade2013@gmail.com

2- Assistant Professor, Faculty of Sub-Surface Group, Imam Khamenei University of Marine Science and Technology

3- Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Imam Khamenei University of Marine Science and Technology

Abstract

In the zigzag maneuver of underwater vehicles – which is considered one of the most critical maneuvering motions – the coupling between sway and yaw motions is utilized. Designing a pursuit control system where the sway frequency can track the yaw frequency may present a suitable candidate to optimally address the problem. In the present research, an intelligent underwater vehicle in its initial design and construction phases – which was initially radio-controlled and relied solely on rudders for XY-plane motions – has been studied. The system upgrade phase involves designing a control system whose actuators consist of forward and aft thrusters (to implement sway motion) and upper and lower rudders (to implement yaw motion). The developed approach for the control system design includes: Deriving motion equations, Extracting open-loop and closed-loop transfer functions, Evaluating and determining stability criteria and boundaries, after preliminary determination of stability boundaries, implementing these values in the control loop revealed that: In some ranges, low overshoot was achieved but with long settling time in other ranges, the opposite behavior occurred. Through trial and error and applying an appropriate ratio between two consecutive overshoots, an optimal compromise between overshoot and settling time was established, leading to the determination of optimized stability boundaries.

Keywords

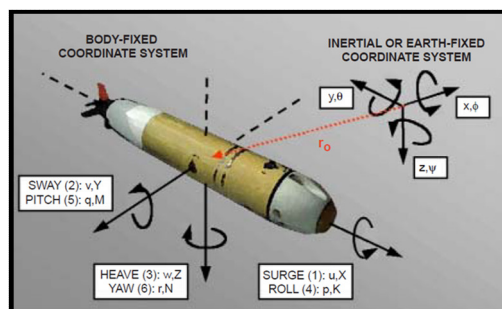
Autonomous Underwater Vehicle, PID Controller, Zigzag Maneuvering, Track and regulation, Overshoot and peak time.

¹ Track

² Bow and Aft Thruster

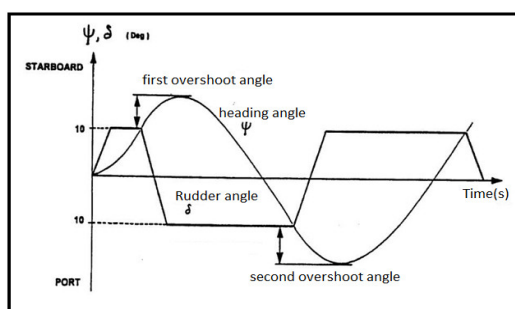
۱- مقدمه

تعدد درجات آزادی در زیرسطحی‌ها منجر شده تا کنترل آنها جزو پیچیده ترین سامانه های دریایی به حساب آید. سه درجه آزادی خطی و سه درجه آزادی دورانی هر یک دارای عملگری خاص جهت پیدایش می باشند. درجات آزادی زیرسطحی در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱ - معرفی درجات آزادی زیرسطحی

هر سامانه به کمک این درجات آزادی می تواند تعدادی حرکت مانور داشته باشد. یکی از مانورهای مهم سامانه های زیرسطحی، حرکت زیگزاگ می باشد. در حرکت زیگزاگ زیرسطحی‌ها، همواره بین زاویه چرخش سکان و زاویه پیشروی زیرسطحی یک اختلاف فاز وجود دارد که به زاویه اورشوت^۴ معروف است. زاویه اورشوت کمتر به معنی پاسخ سریع سامانه به تغییرات سکان می باشد که مطلوب است [1]. شماتیک زوایای اورشوت اول و دوم در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۲- معرفی زوایای اورشوت اول و دوم

در زیرسطحی‌های بزرگ و با سرنشین، اختلاف زیاد زاویه اورشوت نمی تواند به عنوان یک چالش اساسی به شمار آید زیرا ناپور می تواند با مهارت خود تا حدودی از اختلاف زاویه چرخش سکان و زاویه پیشروی بکاهد اما این اختلاف در زیرسطحی‌های هوشمند و بدون سرنشین

چالش آفرین خواهد بود. به همین دلیل طراحان در سامانه های کوچک زیرسطحی، درجات آزادی را زیاد نموده و بر تعداد عملگرها می افزایند. به عنوان مثال در صفحه XY زیرسطحی‌های بزرگ صرفا سکان ها نقش آفرین بوده و حرکت یاو ایجاد می کنند اما در زیرسطحی‌های هوشمند، عملگرهای تراستر افقی نیز در دم و دماغه زیرسطحی اضافه شده و درجه آزادی سوای نیز به سایر درجات آزادی اضافه می گردد. در صفحه XZ نیز مشابه همین وضعیت وجود دارد به طوری که در زیرسطحی‌های بزرگ صرفا بالک ها درجه آزادی پیچ را تامین می کنند در حالی که در زیرسطحی‌های کوچک تراسترهای عمودی در دماغه و دم اضافه گشته و به سامانه، درجه آزادی هیو را می افزایند [2]. در کنترل زیرسطحی‌ها، دو مقوله تعقیب و تنظیم^۵ همواره در دستور کار قرار دارد. به عنوان مثال، ثابت کردن عمق روی یک مقدار مشخص در مقوله تنظیم گنجانده می شود و دنبال نمودن فرکانس حرکت یاو توسط حرکت سوای در مانور زیگزاگ جزو مقوله تعقیب به شمار می آید [3]. با این تعاریف، در ادامه تاریخچه مختصری در حوزه کنترل زیرسطحی ارائه می گردد.

وانگ و همکاران [4] در مقاله ای با عنوان تعیین کنترلر تطبیقی جهت دنبال نمودن مسیر وسیله نقلیه زیرآبی خودکار بر اساس روش آنتروپی بیشینه با بکار گیری الگوی یادگیری عمیق که از شاخه های یادگیری ماشین می باشد توانستند ضرایب k_D , k_I , k_P را به صورت لحظه ای تغییر و منطبق با شرایط کار سامانه نمایند و به یک تیونینگ موفق دست یابند. در این روش از هوش مصنوعی تقویتی بهره گرفته شد. در روش تقویتی بر خلاف روش های نظارتی که داده به اندازه کافی به کنترلر دستگاه خورانده میشود دیتا اولیه بسیار محدود است و در برخی مواقع سامانه در بدو حرکت فاقد دیتا میباشد و با شروع کار، لحظه به لحظه خود را با شرایط جدید وفق داده و داده های خود را تقویت می سازد. مک لین و همکاران [1] در مقالی با عنوان مدلسازی، شبیه سازی کنترلر مانور پذیری به دنبال کردن دو سناریو پرداختند. سناریو اول شامل: پیاده سازی یک الگوریتم حرکتی در یک لوپ بسته کنترلی بود. و سناریو دوم شامل: تعقیب خط اثر به وجود آمده در اثر الگوریتم حرکتی سناریو اول می باشد.

⁵ Regulation

³ Heading Angle

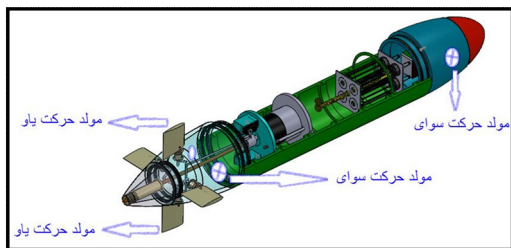
⁴ Overshoot Angle

پژوهشگران در این تحقیق، به کمک کنترلر PID تطبیقی به این هدف نایل آمدند. این کنترلر شرایطی را مهیا می‌سازد که زیرسطحی بتواند خط اثرهای دو بعد و سه‌بعدی را به خوبی تعقیب نماید. در این پژوهش از دینامیک سیالات محاسباتی جهت صحت‌سنجی وابستگی کنترلر به عمق و بررسی تأثیر امواج بر کنترلر نیز بهره گرفته شد تا میزان موفقیت این کنترلر در شرایط حساس نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. بینگل و همکاران [3] درمقالی با عنوان کنترل وسایل خودکار زیر آبی به کمک کنترلر تعقیبی مسیر با بهره‌گیری از روش‌های پیشخور و PID هوشمند به تلفیق و ادغام روش‌های کنترل پیشخور و کنترل PID هوشمند پرداختند. این تلفیق منجر به بالابردن دقت در تعقیب مسیر و حذف نویزها و تشخیص صحیح کنترلر در تفکیک اغتشاشات از نویزها گردید که منجر میشد تا عملگرها بتوانند در مواقع ضروری (و نه در هر زمانی) اقدام متناسب جهت خنثی‌سازی اغتشاشات را اجرا نمایند. سیانگ و همکاران [5] درمقالی با عنوان کنترل حرکت بهینه‌سازی مسیر AUV هوشمند با استفاده از کنترلر PID تطبیقی و الگوریتم ژنتیک ارتقا یافته به بررسی کنترل حرکات کوپل در زیردریایی پرداختند. در این تحقیق پایداری سیستم هنگام دور زدن، غوص و صعود و مغروق‌سازی در حضور و عدم حضور کنترلر بررسی گردید. نتایج حاکی از همگرایی سامانه به سمت دستورات از پیش تعریف شده در حضور کنترلر و پاس نمودن مسیرهای از قبل تعیین شده داشته‌است. جهت بالا بردن دقت نتایج و صحت‌سنجی شبیه‌سازی کنترلی، تست‌های تجربی نیز تأثیر کنترلر بر انتخاب بهینه‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. جرارد و همکاران [6] درمقالی به طراحی، خطی‌سازی معادلات حرکت زیردریایی و سپس کنترل آن پرداختند. معادلات غیر خطی در ابتدا وارد نرم‌افزار متلب شده و به کمک جعبه ابزار خطی‌سازی، این مهم صورت پذیرفت. معادلات حرکت زیردریایی و سپس کنترل آن پرداختند. سپس دیگرام بلوکی سیستم توسط سیمولینک، رسم و تابع تبدیل سیستم استخراج گردید. با بهره‌گیری از جعبه ابزار تیونینگ، تنظیمات کنترلر PID انجام شده و پاسخ گذرا و دائم سیستم در حضور کنترلر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که ROV در حضور کنترلر و با اعمال محدودیت‌های مناسب ضرایب PID به خوبی

می‌تواند یک مسیر مارپیچ سه‌بعدی را طی نماید. فوشن رن و کوئینگ هو [7] درمقالی با عنوان طراحی و شبیه‌سازی کنترلر لغزشی برای ROV به آنالیز سینماتیک و دینامیک ROV و مقایسه کنترلر لغزشی با کنترلرهای PID سنتی و کنترلر با منطق فازی پرداختند. پودو فادوا [8] درمقالی با عنوان طراحی کنترلر عمق زیردریایی با استفاده از PID و روش جابجایی قطب به بررسی تغییرات ضرایب PID و قطب‌ها در تابع تبدیل حلقه بسته روی پاسخ گذرا و حالت دائم سیستم پرداختند. نوع کنترل تنظیم بوده و ورودی و خروجی‌ها و اثرات اغتشاش در قالب یک بلوک دیگرام به کمک سیمونیک مطلب ارائه گردید. پس از تعیین محدوده ضرایب PID به کمک کنترل کلاسیک، محدوده ضرایب به کمک سعی و خطا باریکتر گردید به طوری که در میان فراجش و زمان فراجش یک بالانس برقرار شد.

۲- طرح مسأله

در قسمت مقدمه بیان شد که در کنترل زیرسطحی‌ها، دو مقوله تعقیب و تنظیم همواره در دستور کار قرار دارد و تأکید شد دنبال نمودن فرکانس حرکت یا توسط حرکت سوای در مانور زیگزآگ جزو مقوله تعقیب به شمار می‌آید و این مهم، مستلزم کنترل می‌باشد [9]. مولد حرکات سوای و یاو در زیرسطحی مطالعه حاضر در شکل زیر نمایش داده شده‌است.



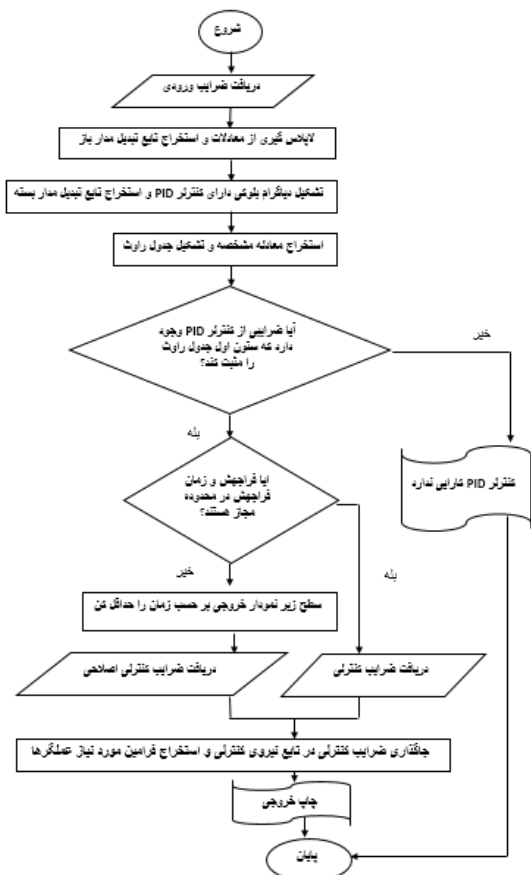
شکل ۳- معرفی عملگرهای مولد حرکات سوای و یاو در پژوهش حاضر

در هر لحظه که وضعیت کنترل نامطلوب باشد، این کوپل حرکات سوای و یاو از بین رفته و زیرسطحی حرکات خالص را بصورت مجزا خواهد داشت که منجر به وارد آمدن نیروهای غیر قابل پیشبینی به سامانه و پاس نکردن نقاط خواهد شد [10]. جهت روشن شدن موضوع، تمایز حرکات دی کوپله در شکل زیر نمایش داده شده‌است.

۳- حل مسأله

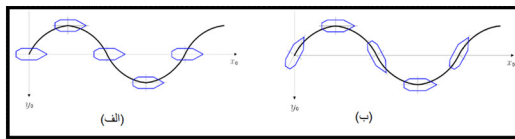
در مسائل کنترلی تعقیب و تنظیم، یک مسیر جهت رسیدن به کنترلر مناسب طی می‌شود که عبارتند از: استخراج معادلات حاکم بر مسأله، اعمال ضرایب ورودی، لاپلاس‌گیری از معادلات حاکم و استخراج تابع تبدیل مدار باز سیستم، تشکیل دیاگرام بلوکی با اعمال کنترلر و استخراج تابع تبدیل مدار بسته سیستم، استخراج معادله مشخصه و بررسی پایداری، استخراج محدوده پایداری ضرایب کنترلی، بهینه‌سازی ضرایب، جاگذاری ضرایب در تابع نیروی کنترلی و استخراج فرامین مورد نیاز عملگرها. تقدم و تاخر این مراحل در فلوجارت زیر نمایش داده شده‌است. این فلوجارت فضای کلی مسیر پیموده شده را ترسیم می‌نماید. با توجه به نقشه راه تعریف شده، گام به گام به هریک از مراحل می‌پردازیم.

جاگذاری ضرایب در تابع نیروی کنترلی و استخراج فرامین مورد نیاز عملگرها.



شکل ۷- فلوجارت کنترل AUV در پژوهش حاضر

رفتار دینامیکی یک وسیله زیرسطحی بوسیله معادلات حرکت خطی و زاوی بر اساس قانون دوم نیوتون و به روش نیوتون-اولر بیان می‌شوند. این قانون در



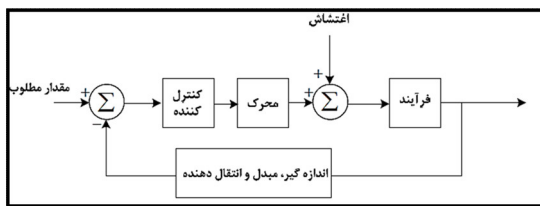
شکل ۴- (الف) سوای خالص (ب) یاو خالص

سامانه، حرکت سوای را با معادله ۱ و حرکت یاو را با معادله ۲ انجام می‌دهد.

$$y = y_0 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

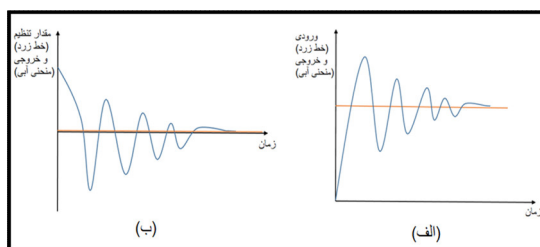
$$\psi = \psi_0 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

حرکت کوپل زمانی حاصل می‌شود که $\omega_1 = \omega_2$ باشد [11]. بنابراین در باب تعقیب در مطالعه حاضر، می‌توان فرکانس یاو را ورودی و فرکانس سوای را خروجی مسأله فرض نمود. کنترلر نهایی باید بتواند در هر لحظه فرکانس سوای را با فرکانس یاو کوپل کرده و در صورت ورود عوامل مزاحم به سیستم، آنها را دمپ نماید. حلقه یک سیستم کنترلی را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:



شکل ۵- حلقه یک سیستم کنترلی

ورودی در مقوله تعقیب را می‌توان با تابع پله و ورودی در بحث اغتشاش را می‌توان با تابع ضربه شبیه‌سازی نمود. کنترلر با طراحی صحیح می‌تواند تعقیب مطلوب و تنظیم مناسب ایجاد نماید [12]. در شکل‌های زیر شکل اول تعقیب مناسب فرکانس یاو توسط سوای (با فرض ورودی تابع پله) را نشان می‌دهد و شکل بعدی دمپ دامنه حرکات اضافی یاو در ورود اغتشاشات (با فرض ورودی ضربه) که معادل تنظیم حرکات مزاحم روی صفر می‌باشد را نمایش می‌دهد.



شکل ۶- (الف) تعقیب (ب) تنظیم

هیدرودینامیکی (شامل ضرایب جرم افزوده و دمپینگ به ترتیب متاثر از اندیس های شتاب و سرعت) [16]. فرضیات ساده کننده معادلات عبارتند از: انطباق محورهای مختصات محلی بر محورهای اصلی اینرسی، خنثی شدن نیروی تراست با نیروی مقاومت در راستای طولی، در نظر گرفتن نیروها و گشتاورها بصورت تابعی از پارامترهای سرعت و شتاب و خطی سازی آنها به کمک بسط تیلور، صرفنظر از ضرایب جرم افزوده متقاطع (ضرایب کریولیس با اندیس های دوتایی ناهمسان) به دلیل مقادیر بسیار ناچیز آنها، و صفر در نظر گرفتن ضرایب متاثر از تقارن بدنه [17,18,19,20]. از آنجا که کنترل حرکت زیگزاگ مدنظر است، معادلات سوای و یاو پس از ساده سازی به شکل زیر در می آیند:

$$\text{Sway: } (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_r)\dot{r} + \left(\frac{Y_{\delta r}}{U_0} - Y_v\right)v + (mU_0 - Y_r)r = 0 \quad (6)$$

$$\text{Yaw: } (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (Iz - N_r)\dot{r} + \left(\frac{N_{\delta r}}{U_0} - N_v\right)v + (mx_GU_0 - N_r)r = \quad (7)$$

بازنویسی معادلات حرکت زیرسطحی بصورت زیر را انجام می دهیم:

$$\text{Sway: } a_1\dot{v} + a_0v = -b_1\dot{r} - b_0r \quad (8)$$

$$\text{yaw: } c_1\dot{v} + c_0v = -d_1\dot{r} - d_0r \quad (9)$$

جدول ۲- مقادیر ضرایب معادلات بازنویسی شده

d1	d0	c1	c0	b1	b0	a1	a0
-4.7 Kg m ²	-5.8 $\frac{Kgm^2}{s}$	1.2 Kg m	3 $\frac{Kgm}{s}$	-2.5 Kg m	-6 $\frac{Kgm}{s}$	1Kg	2 $\frac{Kg}{s}$

تابع تبدیل منتج از معادله سوای

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{\psi(s)} = \frac{\frac{-d_1s^2 - d_0s}{c_1} - \frac{a_0}{c_1}}{s^2 + \frac{c_0}{c_1}} \quad (11)$$

در بحث تعقیب و تنظیم، لوپ های کنترلی در شکل زیر نمایش داده شدند:

دستگاه مختصات چسبیده به جسم بیان می شوند [13]. با معرفی نمادهای اصلی معادلات صفحه XY [14] جدول زیر به بیان اصلی ترین معادلات بکار رفته در حرکت زیرسطحی می پردازیم:

جدول ۱- معرفی موقعیت ها، سرعت ها، شتاب ها، نیروها و گشتاورها در صفحه XY

نام حرکت	موقعیت و زوایای اوایلر	سرعت های خطی و دورانی	شتاب های خطی و دورانی	نیروها و گشتاورها
سرج (Surge)	x	u	\ddot{x}	X
سوای (Sway)	y	v	\ddot{y}	Y
یاو (Yaw)	ψ	r	$\ddot{\psi}$	N

با نوشتن معادلات نیوتون اوایلر و و تانسورهای انتقالی بین محورهای مختصات متصل به زمین و محورهای مختصات متصل به بدنه [15] روابط در صفحه XY عبارتند از:

$$m[\dot{u} - vr - x_G r^2 - y_G \dot{r}] = X \quad (3)$$

$$m[\dot{v} + ur - y_G r^2 + x_G \dot{r}] = Y \quad (4)$$

$$I_z \dot{r} + m[x_G(\dot{v} + ur) - y_G(\dot{u} - vr)] = N \quad (5)$$

نیروها و گشتاورهایی که به زیرسطحی وارد می شوند عبارتند از: وزن و هیدرواستاتیک، مقاومت و تراست، نیروهای سیستم کنترلی و نیروهای ناشی از ضرایب

با لاپلاس گیری از معادلات سوای و یاو به ترتیب توابع

تبدیل مدار باز $G_1(s)$ و $G_2(s)$ بدست می آیند:

تابع تبدیل منتج از معادله سوای

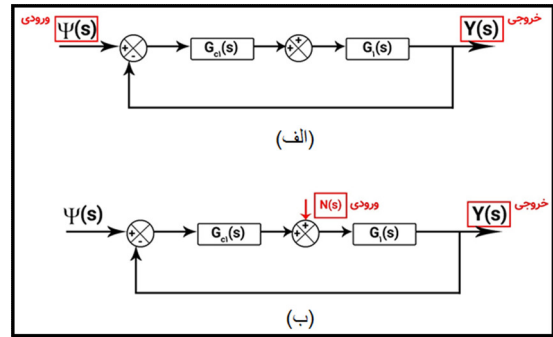
$$G_1(s) = \frac{Y(s)}{\psi(s)} = \frac{\frac{-b_1s^2 - b_0s}{a_1} - \frac{a_0}{a_1}}{s^2 + \frac{a_0}{a_1}} \quad (10)$$

با توجه به مشترک بودن مخرج توابع تبدیل بالا، بنابراین معادله مشخصه تعقیب و تنظیم را می‌توان یکسان در نظر گرفت. بنابراین می‌توان معادله مشخصه را به شکل زیر نوشت:

$$1 + G_c(s)G(s) = 0 \quad (15)$$

تابع تبدیل کنترلی متشکل از فرم‌های تناسبی (k_p)، مشتقی ($k_D s$) یا انتگرالی ($\frac{k_I}{s}$) می‌تواند باشد.

با تشکیل جدول راوت و اعمال شرط پایداری (ستون اول جدول راوت همواره بزرگتر از صفر) داریم:



شکل ۸- الف) لوپ کنترلی تعقیب (ب) لوپ کنترلی تنظیم

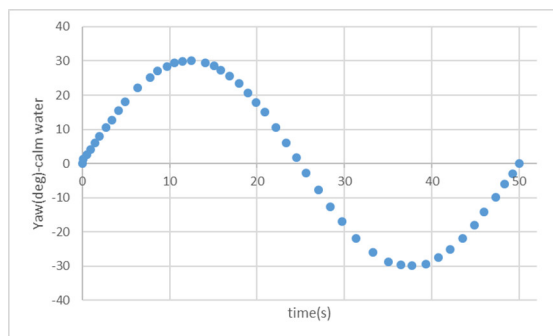
$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{\text{حاصلضرب المان‌های بین ورودی و خروجی}}{1 - \sum (\text{حاصلضرب المان‌های روی هر حلقه بسته})} \quad (12)$$

$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (13) \quad \text{تعقیب}$$

$$\frac{\text{خروجی}}{\text{ورودی}} = \frac{G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (14) \quad \text{تنظیم}$$

جدول ۳- تعیین محدوده ضرایب PID به کمک معیار راوت

محدوده پایداری ضرایب کنترلر PID			
k_I	k_D	k_p	
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.16$	$0 < k_p < 0.33$	معادله سوای
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.2$	$0 < k_p < 0.25$	معادله یاو
$k_I > 0$	$0 < k_D < 0.16$	$0 < k_p < 0.25$	محدوده اشتراکی

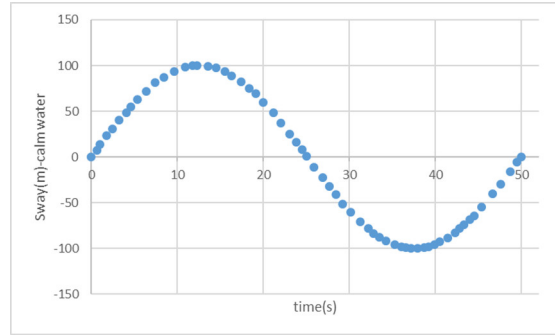


شکل ۹ - نمودار حرکت نوسانی یاو با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب آرام

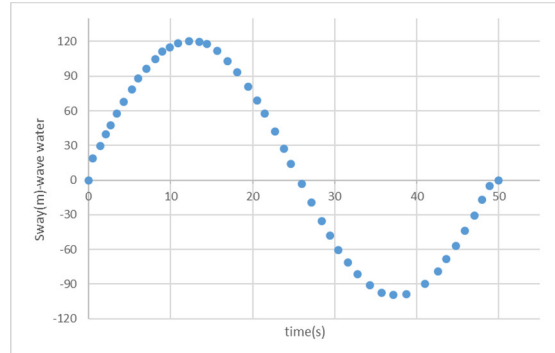
۴- نتایج

نتایج شامل دو قسمت می‌باشد. قسمت اول نمودارهای مربوط به مقادیر حدی ضرایب PID که در آنها فراجش و زمان فراجش در تضاد با یکدیگر عمل می‌کنند، یعنی یا فراجش در محدوده مجاز و زمان فراجش زیاد است و یا بالعکس (یعنی زمان فراجش معقول است و فراجش خارج از رنج می‌باشد. رنج مجاز بر اساس خواسته‌های عملیاتی تعریف می‌گردد. در شکل ۹ نمودار نوسانی تغییرات دامنه یاو بر حسب زمان (و به عنوان ورودی) در آب آرام و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمودارهای تغییرات دامنه حرکت سوای در آب آرام و موج نمایش داده شده است.

از آنجا که ضریب انتگرال گیر بزرگتر مساوی صر تعریف شده و انتهای دیگر کران آن باز است باید محدوده را با سعی و خطا مقید تر کنیم تا بتوانیم مقادیر دقیقی را در نهایت به آن تخصیص دهیم. برای این کار سه محدوده برای K_I در نظر گرفته شد که در جدول زیر نمایش داده شده است. برای هر یک از این محدوده ها رفتار سیستم نسبت به مقادیر این ضریب نیز ذکر شده است.



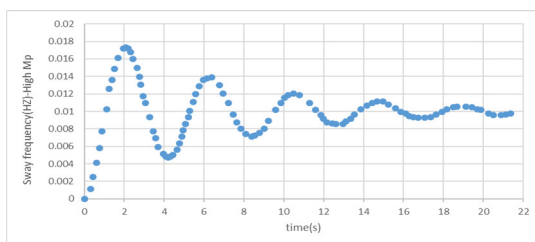
شکل ۱۰- نمودار حرکت نوسانی سوای با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب آرام



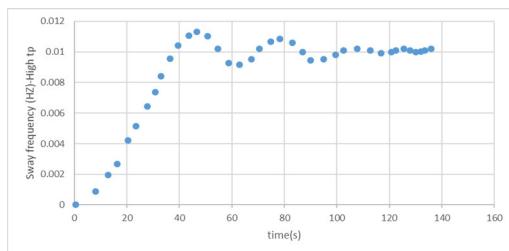
شکل ۱۱- نمودار حرکت نوسانی سوای با فرکانس ۰.۰۲ هرتز در آب موج با فورس ۴

جدول ۴ - محدوده‌های ضریب انتگرال‌گیر و رفتار سیستم

محدوده k_I	مقدار متوسط بازه	رفتار سیستم
$0 < k_I < 0.4$	$k_I = 0.2$	دمپ شونده با زمان فراجاهش زیاد
$0.4 < k_I < 0.9$	$k_I = 0.65$	دمپ شونده با فراجاهش زیاد
$0.9 < k_I$	---	همگرا به مقداری غیر از مطلوب مسئله



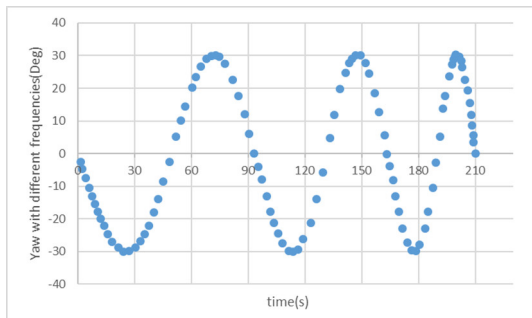
شکل ۱۲- تعقیب فرکانس یاو ($f=0.01\text{Hz}$) توسط فرکانس سوای همراه با فراجاهش بالا با ضرایب $K_p=0.15$ و $K_d=0.08$ و $K_i=0.65$



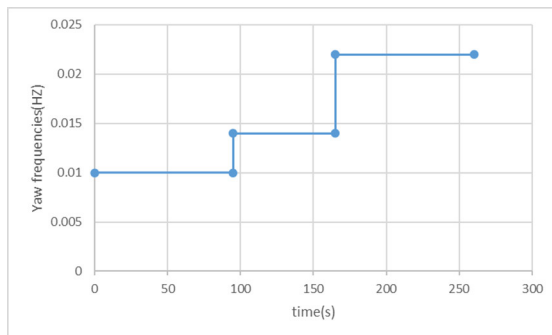
شکل ۱۳- تعقیب فرکانس یاو ($f=0.01\text{Hz}$) توسط فرکانس سوای همراه با زمان فراجاهش بالا با ضرایب $K_p=0.15$ و $K_d=0.08$ و $K_i=0.2$

نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ بر اساس مقادیر متوسط بازه های ضرایب PID رسم شده‌اند. در جدول ۴ مقدار ۰.۴ برای ضریب انتگرال گیر می‌تواند یک مصالحه مناسب بین زمان فراجاهش و خود فراجاهش مهیا سازد. نمودار شکل ۱ بر اساس این مقدار مرزی رسم شده است. ضرایب قید شده در این شکل، ایضا سطح زیر نمودار منحنی تعقیبی فرکانس سوای بر حسب زمان و سطح زیر نمودار قدر مطلق دامنه سوای اضافی ناشی از اغتشاشات بر حسب زمان را حداقل می نمایند. نمودار های نمایش داده شده در شکل های ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ بر اساس همین ضرایب بهینه رسم شده اند.

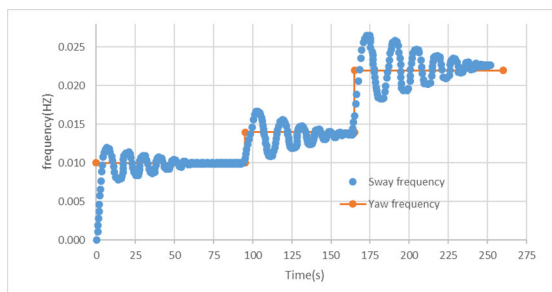
جهت بررسی استقلال ضرایب از فرکانس، سه فرکانس یاو بصورت متوالی تولید و نحوه عملکرد کنترلر مورد ارزیابی قرار گرفت. دامنه و فرکانس های یاو در شکل های ۱۸ و ۱۹ و نمودار تعقیب فرکانس یاو توسط فرکانس سوای در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸- نمودار یاو (بر حسب درجه) در سه فرکانس ۰.۰۱، ۰.۰۱۴ و ۰.۰۲۲ هرتز



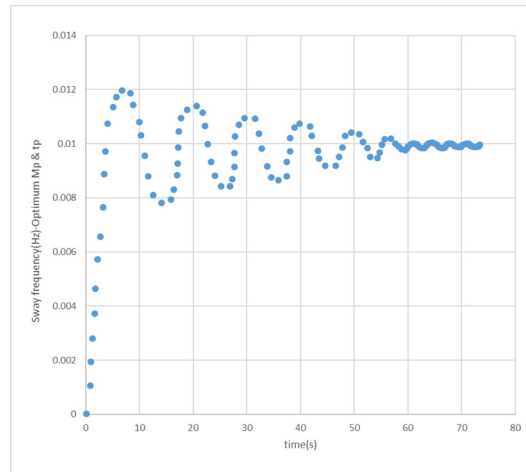
شکل ۱۹- نمودار پلهای فرکانس یاو (دنبال شونده)



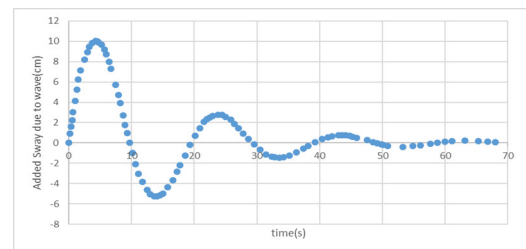
شکل ۲۰- نمودار تعقیب فرکانس یاو توسط فرکانس سوای

۵- جمع بندی

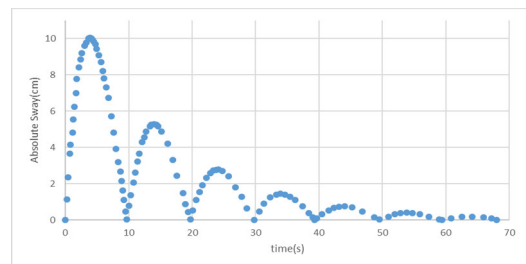
در بررسی معیار پایداری ادوات مکترونیک و تعیین کران های ضرایب PID، شرط لازم جهت برقراری پایداری را می توان معیار راوث دانست اما این معیار شرط کافی نیست. در برخی موارد مانند پژوهش حاضر، آنقدر کران یکی از ضرایب باز است که طراح را در انتخاب مقدار دقیق ضریب دچار سردرگمی فراوان می کند. در این موارد باید معیار های دیگر را نیز در انتخاب ضرایب دخیل



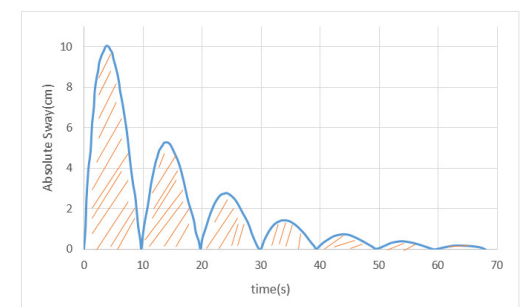
شکل ۱۴- تعقیب فرکانس یاو ($f=0.01\text{Hz}$) توسط فرکانس سوای همراه با مقادیر بهینه فراجهش و زمان فراجهش با ضرایب $Ki=0.4$ و $Kd=0.08$ و $Kp=0.15$



شکل ۱۵- تنظیم دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتشاش) روی مقدار صفر با ضرایب $Ki=0.4$ و $Kd=0.08$ و $Kp=0.15$



شکل ۱۶- نمودار قدمطلق دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتشاش) با حداقل سطح زیر نمودار با ضرایب $Kp=0.15$ و $Ki=0.4$ و $Kd=0.08$



شکل ۱۷- سطح زیر نمودار قدمطلق دامنه اضافه سوای ناشی از امواج (اغتشاش) با ضرایب $Kp=0.15$ و $Kd=0.08$ و $Ki=0.4$

نمود. از جمله مواردی که بسیار حائز اهمیت می باشد معیار محدوده مناسب فراجش و زمان فراجش می باشد. عمدتاً این دو پارامتر با یکدیگر در تضاد هستند. طراح زمانی که بتواند بین این دو یک مصالحه برقرار نماید به مطلوب مساله دست پیدا خواهد کرد. این امر زمانی

محقق می شود که بتوان سطح زیر نمودار پاسخ زمانی را کمینه نمود. در این حالت پاسخ اپتیمم در مقوله کنترل حاصل خواهد شد.

۶- نمادها

نماد	معرفی نماد	نماد	معرفی نماد
y	موقعیت عرضی	x_G	موقعیت طولی مرکز ثقل از مبدا مختصات
y_0	دامنه موقعیت عرضی	y_G	موقعیت عرضی مرکز ثقل از مبدا مختصات
ω	سرعت زاویه ای	I_z	ممان اینرسی جرمی حول محور Z
φ	فاز حرکت	$Y_{\dot{v}}$	مقاومت عرضی بدنه در برابر شتاب گیری عرضی
ψ	موقعیت دورانی حول محور (موقعیت حرکت یاو) Z	$Y_{\dot{r}}$	مقاومت عرضی بدنه در برابر شتاب گیری زاویه ای
ψ_0	دامنه حرکت یاو	$N_{\dot{v}}$	مقاومت دورانی بدنه در برابر شتاب گیری عرضی
m	جرم	$N_{\dot{r}}$	مقاومت دورانی بدنه در برابر شتاب گیری زاویه ای
U_0	سرعت	Y_v	مقاومت عرضی در برابر سرعت گیری عرضی
Y_{δ_r}	ضریب نیروی عرضی سکان	Y_r	مقاومت عرضی در برابر سرعت گیری دورانی
N_{δ_r}	ضریب گشتاور سکان	N_v	مقاومت دورانی در برابر سرعت گیری عرضی
G	تابع تبدیل مدار باز	N_r	مقاومت دورانی در برابر سرعت گیری زاویه ای
s	متغیر فضای لاپلاس	k_p	ضریب کنترلی تناسبی
G_c	تابع تبدیل کنترلر	k_I	ضریب کنترلی انتگرال گیر
Mp	فراجش	k_D	ضریب کنترلی مشتق گیر
tp	زمان فراجش		

[12] Du, Yan, et al. "An Autonomous Control System for AUV Acoustic Target Tracking." *International Conference on Autonomous Unmanned Systems*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024.

[13] Remmas, Mohamed Walid. *Contributions to the Modeling and Control of Fin-Actuated Autonomous Underwater Vehicles*. Diss. Université de Montpellier; Tallinna Tehnikaülikool, 2023.

[14] Aiassa, Anastasia Costanza. *Motion Control of an Autonomous Underwater Vehicle for Maritime Surveillance*. Diss. Politecnico di Torino, 2025.

[15] Hermawan, Yuda Apri, Muhammad Ikhsan Suryadarma, and Totok Yulianto. "Design Configuration of Horizontal Motion Control System for Unmanned Underwater Vehicle." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 1461. No. 1. IOP Publishing, 2025.

[16] Lin, Lunyang, et al. "Hydrodynamics Model Identification and Model-Based Control Application of a New Type of AUV." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.2 (2025): 310.

[17] Fan, Gang, et al. "Optimized Hydrodynamic Design for Autonomous Underwater Vehicles." *Machines* 13.3 (2025): 194.

[18] Mohanty, Prases K., Vishnu Chaudhary, and Rahul Prajapati. "Review on path planning methods for autonomous underwater vehicle." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 239.1 (2025): 3-37.

[19] Hammad, Mohanad M., Ahmed K. Elshenawy, and M. I. El Singaby. "Position control and stabilization of fully actuated AUV using PID controller." *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[20] Nazir, Kinza, Yong-Woon Kim, and Yung-Cheol Byun. "Predictive PID Control for Automated Guided Vehicles Using Genetic Algorithm and Machine Learning." *IEEE Access* (2025).

[1] MacLin, Gage, et al. "Modeling, simulation and maneuvering control of a generic submarine." *Control Engineering Practice* 144 (2024): 105792.

[2] Sha, Zeyu, et al. "A Portable Autonomous Underwater Vehicle with Multi-Thruster Propulsion: Design, Development, and Vision-Based Tracking Control." *IEEE Robotics and Automation Letters* (2025).

[3] Bingul, Zafer, and Kursad Gul. "Intelligent-PID with PD feedforward trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle." *Machines* 11.2 (2023): 300.

[4] Wang, Yuxuan, et al. "An adaptive PID controller for path following of autonomous underwater vehicle based on Soft Actor-Critic." *Ocean Engineering* 307 (2024): 118171. _2024.

[5] Xiong, Yong, et al. "Motion control and path optimization of intelligent AUV using fuzzy adaptive PID and improved genetic algorithm." *Mathematical biosciences and engineering* 20.5 (2023): 9208-9245.

[6] Sangalang, Ralph Gerard B., et al. "Design of a control architecture for an underwater remotely operated vehicle (ROV) used for search and rescue operations." *Kybernetika* 58.2 (2022): 237-253.

[7] Ren, Fushen, and Qing Hu. "ROV sliding mode controller design and simulation." *Processes* 11.8 (2023): 2359.

[8] Rachmawan, I. Putu Fadya, Dian Tri Utami, and Muhammad Ahza Hafizh Fahrezi. "Submarine Depth Control Design using Proportional Integral Derivative (PID) and Pole Placement Methods."

[9] Liu, Xin, et al. "Model predictive control for autonomous marine vehicles: a review." *Ships and Offshore Structures* (2025): 1-21.

[10] Zhilenkov, Anton. "The study of the process of the development of marine robotics." *Vibroengineering Procedia* 8 (2016): 17-21.

[11] He, Long, Mengting Xie, and Ya Zhang. "A Review of Path Following, Trajectory Tracking, and Formation Control for Autonomous Underwater Vehicles." *Drones* 9.4 (2025): 286.

استفاده از الگوریتم IMM-PDA در ردگیری اهداف دریایی در سیستم‌های راداری

مهران دهقانی^۱، روح الله سامانی^۲

۱ و ۲ پژوهشگر و مدرس دانشگاه دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)

چکیده:

در رادارهای پیشرفته روشهای مختلفی جهت ردگیری اهداف وجود دارد. امروزه استفاده از تئوری تخمین در سیستم‌های ناوبری باعث افزایش قابلیت تصمیم‌گیری و اطمینان شده‌است. روشهای مختلفی در این راستا وجود دارد که با توجه به شرایط می‌توان از هر یک استفاده کرد اما در سیستم‌های راداری بایستی به وجود نویز و تداخل در انتخاب روش مورد نظر توجه کرد. به عنوان مثال اگر قرار باشد ردیابی با فیلترهای متداول کالمن ادامه یابد؛ با وجود مشکل نویز و کلاتر و تداخل در محیط، احتمال انتخاب نویز به جای هدف و زمان پردازش بالا، میزان خطا بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه اهداف دریایی در شرایط نویز و کلاتر و همچنین تداخل بیشتری هستند بایستی از الگوریتم‌های بهینه در این راستا استفاده شود. در این مقاله نشان داده می‌شود الگوریتم IMM-PDA^۱ هم از نظر زمان پردازش و هم میزان خطای RMSE پارامترهای مطلوبی برای سیستم‌های راداری فعال خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی:

ردگیری تک هدفه، احتمال تخصیص داده مشترک، IMM^۲

Using the IMM-PDA Algorithm for Marine Target Tracking in Radar Systems

Mehran Dehqani¹, Rohollah Samani²

1, 2 Research Fellow and Lecturer, Imam Khomeini (PBUH) Maritime University

Abstract:

Advanced radar systems employ various methods for target tracking. The utilization of estimation theory in navigation systems has enhanced decision-making capabilities and confidence. Several approaches exist in this regard, each suitable for specific conditions. However, in radar systems, noise and interference should be considered when selecting an appropriate method. For instance, if conventional Kalman filters are used for tracking, the presence of noise, clutter, and interference in the environment can lead to higher error rates due to the filter's tendency to select noise instead of the target and increased processing time. Given that marine targets face more noise, clutter, and interference, optimal algorithms should be employed. This paper demonstrates that the IMM-PDA algorithm offers excellent performance for radar systems in terms of both processing time and Root Mean Square Error (RMSE) tracking accuracy.

Keywords:

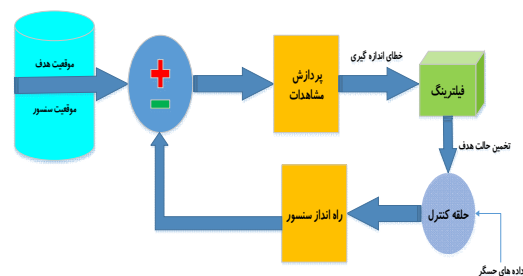
Single-target tracking, Shared Data Assignment Probability, IMM

¹Interacting Multiple Model Probabilistic Data Association

² Interacting Multiple Model

۱- مقدمه

سامانه‌های ردگیری تک‌هدفه^۳ (STT) به منظور تشکیل ردگیری حلقه بسته روی یک تک هدف طراحی شده‌است. یک تفاوت اساسی بین سامانه‌های ردگیری تک هدف (STT) که به منظور تشکیل ردگیری حلقه بسته روی یک تک هدف طراحی شده با سامانه‌های ردگیری چندهدفه^۴ (MTT) وجود دارد. سیستم STT خط دید رادار ردگیری را روی یک هدف مطلوب متمرکز می‌کند. به عبارت دیگر سیستم رادار STT تلاش می‌کند تا آنتن را مستقیماً روی هدف متمرکز نگه دارد (شکل ۱). حلقه‌ی ردیابی تک‌هدفه، روی خطای اندازه‌گیری عمل می‌کند. این خطای اندازه‌گیری اختلاف بین زاویه‌ی حسگر و هدف است. الگوریتم ردیابی تک هدف روی حداقل کردن این اختلاف عمل می‌کند، مخصوصاً در سامانه‌ی ردیابی راداری تلاش بر این است که هدف به‌طور مستقیم در دید آنتن باشد.



شکل ۱- نمای عمومی سامانه‌ی STT

با اشاره به شکل ۱ برای یک سامانه‌ی STT، اختلاف یا مقدار خطای اندازه‌گیری شده، به‌طور مستقیم به فیلتر ردیابی وارد می‌شود، زیرا فرض می‌شود که حسگر تک هدف را آشکار می‌کند، بنابراین لزومی برای اجرای توابع پیچیده‌ی تخصیص داده (مورد استفاده در MTT) نمی‌باشد؛ اما آزمایش‌های سازگاری باید انجام شود تا اطمینان حاصل شود که حسگرهدف را دنبال می‌کند یا خیر [1].

۲- دروازه‌بندی

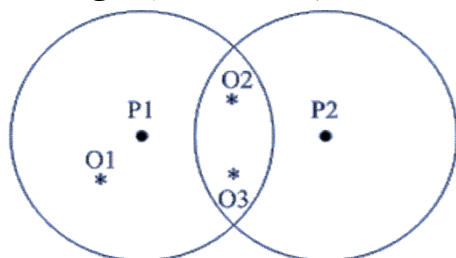
برای کاهش پیچیدگی محاسباتی تخصیص داده و برای کاهش اندازه‌گیری‌های احتمالی ترکیبات رد با فرض

³ Single Target Tracking

⁴ Multi Target Tracking

اینکه تخصیص اندازه‌گیری‌های دور بسیار بعید هستند از روش دروازه‌بندی استفاده می‌شود. دروازه‌ی یک رد ناحیه‌ای است حول موقعیت پیش‌بینی‌شده برای آن رد که مشاهده‌ی مربوطه با احتمال بالایی درون این ناحیه قرار می‌گیرد. تنها مشاهداتی که درون دروازه‌ی رد قرار می‌گیرند به رد موجود اختصاص پیدا می‌کند [2]. دروازه‌بندی در ابتدا شکل می‌گیرد، تا از محاسبات غیرضروری به‌وسیله‌ی توابع حفظ رد و تخصیص مشاهده به رد که در ادامه‌ی این تابع می‌آیند، کاسته شود. در واقع دروازه‌بندی به‌عنوان روش گزینشی به کار می‌رود تا تعیین کند که کدام یک از مشاهدات گزینه‌ی معتبر و صحیحی برای به‌روزرسانی ردهای موجود است. اغلب از دروازه به نام ناحیه‌ی اعتبار و از دروازه‌بندی به‌عنوان مشاهدات معتبری که برای به‌روزرسانی رد به کار می‌روند یاد می‌شود. روش نهایی که در آن مشاهده به رد اختصاص پیدا می‌کند تخصیص داده نام دارد که در مراحل بعد بدان اشاره خواهد شد، اما اغلب روش‌های تخصیص داده دروازه‌بندی برای کاهش بار محاسباتی استفاده می‌کنند.

شکل ۲ دروازه‌بندی را برای دو هدف نزدیک به هم نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت که دروازه‌های دو هدف نزدیک به هم ممکن است همپوشانی داشته باشند.



شکل ۲- دروازه‌بندی برای دو رد P1 و P2 به همراه مشاهدات O1، O2، O3 [31]

به‌طور کلی دروازه‌بندی طی مراحل زیر انجام می‌شود.

۱- تخمین موقعیت بعدی هدف

۲- تشکیل دروازه‌ها به مرکز نقاط تخمینی برای موقعیت بعدی اهداف. اندازه‌ی دروازه متناسب با برآیند خطای اندازه‌گیری و خطای تخمین است. هر قدر خطاها بزرگ‌تر باشند، دروازه‌ها نیز بزرگ‌تر انتخاب می‌شوند و بالعکس. شکل هندسی دروازه‌ها نیز مهم است؛ چرا که از یک طرف باید مشاهده‌ی مربوطه به رد مورد نظر با احتمال بالایی درون دروازه بیفتد و از طرف دیگر حجم دروازه کمترین مقدار باشد تا با داشتن کمترین تعداد ممکن از

هشدارهای غلط در داخل دروازه، از پردازش‌های کاذب ممانعت به عمل آید.

۳- بررسی اینکه آیا داده‌های دریافتی در داخل دروازه هست یا نه [1].

اندازه‌ی آستانه برای دروازه و شکل دروازه به طرق مختلفی تعریف می‌شود که تعریف دقیق آن در معادله‌ی (۱) آمده‌است [2].

$$D = \tilde{z}_k^T S_k^{-1} \tilde{z}_k \leq G \quad (1)$$

در این معادله D نرم باقیمانده نامیده می‌شود. بردار باقیمانده^۵ \tilde{z}_k (مانده)، بردار اختلاف بین مقادیر مشاهدات و مقدار پیش‌بینی شده برای موقعیت آینده‌ی هدف است. کوواریانس نوآوری^۶ S_k که از ماتریس کوواریانس پیش‌بینی حاصل می‌شود، در بردارنده‌ی کوواریانس کمیت‌های بردار مشاهدات است و G آستانه‌ای است که اطمینان می‌دهد مشاهده‌ای که از حسگر دریافت شده‌است با احتمال P_G درون دروازه قرار می‌گیرد. رابطه‌ی (۱) به این معنی است که مقادیری از D که به ازای هر مشاهده محاسبه می‌شود، اگر از مقدار آستانه‌ی G کمتر باشد، آن مشاهده درون دروازه‌ی رد قرار می‌گیرد. مقادیر آستانه‌ی G برحسب احتمالات متفاوت P_G را می‌توان از جدول χ^2_{M, P_G} (Chi-square) به دست آورد که در آن M ابعاد اندازه‌گیری است. جدول (۱) برخی از مقادیری که در χ^2_{M, P_G} آمده‌است را نشان می‌دهد.

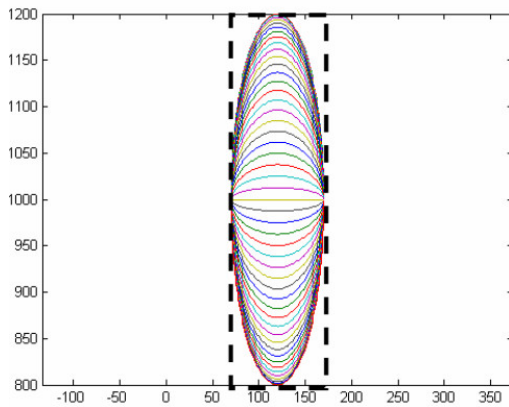
جدول ۱: مقادیر آستانه‌ی G بر حسب احتمالات

متفاوت P_G [34]

G	۱	۴	۹	۱۶
۱	۰/۶۸۳	۰/۹۵۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹۹۴
۲	۰/۳۹۳	۰/۸۶۵	۰/۹۸۹	۰/۹۹۹۷
۳	۰/۱۹۹	۰/۷۳۹	۰/۹۷۱	۰/۹۹۸۹

رابطه (۱) رایج‌ترین نوع دروازه‌بندی است که به دروازه‌بندی بیضوی مشهور است. شکل دقیق بیضی به کوواریانس ابعاد مشاهدات بستگی دارد. اگر خطا در راستای همه‌ی محورها برابر باشد، بیضی به شکل یک کره درخواهد آمد.

یکی دیگر از انواع دروازه‌بندی‌ها که ساده‌ترین نوع آن‌هاست دروازه‌بندی مستطیلی است که پیاده‌سازی آن ساده‌تر بوده و بار محاسباتی آن نسبت به دروازه‌بندی بیضوی کمتر است، اما دروازه‌بندی بیضوی به ازای یک احتمال معلوم P_G که مشاهده‌ی صحیح درون دروازه قرار بگیرد نیاز به حجم دروازه‌ی کمتری دارد. شکل ۳ از این واقعیت سخن می‌گوید که برای یک آستانه‌ی مشخص، دروازه‌بندی بیضوی حجم کمتری را اشغال کرده و در نتیجه در بردارنده‌ی مشاهدات نویزی کمتری خواهد بود.



شکل ۳- دروازه‌بندی بیضوی در مقایسه با دروازه‌بندی مستطیلی

حجم دروازه V_k با توجه به آستانه‌ی G برابر است با

$$V_k = c_{n_{z_1}} G^{1/2} |S_k(\mathbf{r})|^{1/2} \quad (2)$$

n_{z_1} ابعاد مشاهدات است. اگر مشاهده یک‌بعدی

باشد $c_1 = 2$ ، اگر مشاهده دو‌بعدی باشد $c_1 = \pi$ و

اگر مشاهده سه‌بعدی باشد $c_1 = 4\pi/3$ است [3].

در این مقاله یک شمارنده بعد از دروازه‌بندی و محاسبه احتمال وجود اهداف داخل دروازه‌بندی قرار داده شده‌است که در هر اسکن تعداد مشاهدات داخل دروازه-بندی را محاسبه می‌نماید. اگر خروجی مقدار شمارنده صفر باشد به این معنی است که هیچ مشاهده‌ای درون دروازه رد قرار نگرفته و در واقع بیانگر عدم وجود اندازه-گیری مربوط به هدف است. ولی در صورتی که تعدادی مشاهده درون دروازه رد قرار بگیرند، شمارنده مذکور تعداد مشاهده را مشخص می‌نماید. اگر تعداد مشاهده خیلی زیاد باشد مقادیر آستانه گذاری کوچک‌تر شده و

⁵ residual

⁶ Innovation

k درون دروازه قرار می‌گیرند با مجموعه $Y_k = \{y_k^1, y_k^2, \dots, y_k^m\}$ مشخص می‌شوند [4].

۳-۱- مراحل اجرای الگوریتم IMMPDA

در این بخش مراحل فیلتر IMMPDA در یک اسکن توضیح داده خواهد شد. بردار حالت و ماتریس کوواریانس مربوط به آن و احتمال مدل شرطی برای هدف در مدل j و در اسکن k-1 به ترتیب $\hat{X}_{k-1|k-1}^j$ ، $P_{k-1|k-1}^j$ و μ_{k-1}^j است.

مرحله ۱. محاسبه‌ی احتمال برهم‌کنش بین مدل‌ها و ترکیب تخمینی^v از اطلاعات اسکن قبل. در ابتدای هر اسکن، احتمال برهم‌کنش $\mu_k^{i|j}$ بین مدل‌ها از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید.

$$\mu_k^{i|j} = P\{M_{k-1}^i | M_k^j\} = \frac{1}{\mu_k^{j-}} p_{ij} \mu_{k-1}^i \quad (5)$$

احتمال مدل پیش‌بینی شده‌است و از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود.

$$\mu_k^{j-} = P\{M_{k-1}^i\} = \sum_{i=1}^n p_{ij} \mu_{k-1}^i \quad (6)$$

ترکیب تخمینی $\hat{x}_{k-1|k-1}^{0j}$ و کوواریانس $P_{k-1|k-1}^{0j}$ مربوط به آن نیز از روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند [۹].

$$\hat{x}_{k-1|k-1}^{0j} = E\{x_{k-1} | M_k^j\} = \sum_{i=1}^n \hat{x}_{k-1|k-1}^i \mu_k^{i|j} \quad (7)$$

$$P_{k-1|k-1}^{0j} = E\{[x_{k-1} - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0j}][x_{k-1} - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0j}]^T | M_k^j\} = \sum_{i=1}^n \mu_k^{i|j} \{P_{k-1|k-1}^i + [\hat{x}_{k-1|k-1}^i - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0j}][\hat{x}_{k-1|k-1}^i - \hat{x}_{k-1|k-1}^{0j}]^T\} \quad (8)$$

مرحله ۲. پیش‌بینی بردار حالت $\hat{x}_{k|k-1}^j$ و کوواریانس $P_{k|k-1}^j$ مربوط به آن که از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$\hat{x}_{k|k-1}^j = F_{k-1}^j \hat{x}_{k-1|k-1}^{0j} \quad (9)$$

$$P_{k|k-1}^j = F_{k-1}^j P_{k-1|k-1}^{0j} F_{k-1}^{j'} + G_{k-1}^j Q_{k-1}^j G_{k-1}^{j'} \quad (10)$$

اگر تعداد مشاهده کم باشد، با همان مقدار آستانه‌گذاری، احتمال فرضیه‌های تخصیص تمام مشاهدات به رده‌های تعریف شده را بررسی کرده و محتمل‌ترین مشاهده را به رد اختصاص می‌دهد. بدین ترتیب در شرایط نویز و کلاتر شدید که تعداد مشاهدات افزایش می‌یابد، علاوه بر تغییر مقادیر آستانه‌گذاری در هر اسکن که باعث کاهش تعداد مشاهدات درون دروازه رد می‌شود، تمام فرضیه‌های تخصیص مشاهدات به رد بررسی شده و محتمل‌ترین فرضیه برای اختصاص‌دهی انتخاب می‌شود.

۳- الگوریتم IMMPDA

فرض کنید $M_n = \{1, 2, \dots, n\}$ معرف مجموعه مدل‌های حرکتی هدف باشد که این مدل‌ها در اسکن k به صورت M_k^j نمایش داده شود و معادلات دینامیکی و مشاهدات هدف به صورت زیر باشد.

(Error!)

No text of specified style in document.

$$\dot{x}_k = F_{k-1}^j x_{k-1} + G_{k-1}^j v_{k-1}^j$$

$$z_k = H_k^j(r) x_k + w_k^j \quad (4)$$

در روابط فوق x_k بردار حالت هدف، z_k بردار مشاهده‌ی هدف، F_{k-1}^j و G_{k-1}^j ماتریس‌های سامانه، منطبق با مدل j که $(j \in M_n)$ می‌باشند. ماتریس مشاهدات، w_k^j و v_{k-1}^j به ترتیب نویزهای دینامیکی و مشاهده، سفید، گوسی و مستقل از یکدیگر با ماتریس‌های کوواریانس Q_{k-1}^j و R_k^j در نظر گرفته می‌شوند.

بردار حالت اولیه برای هر یک از مدل‌ها یک فرآیند گوسی با میانگین x_0^j و ماتریس کوواریانس P_0^j در نظر گرفته می‌شود. احتمال اولیه‌ی مدل‌ها μ_0^j است. برای همه‌ی اهداف احتمال گذر از مدل i-ام به مدل j-

ام توسط یک زنجیره‌ی مارکوف مرتبه اول (P_{ij}^j) مدیریت می‌شود. $Z_k = \{z_k^1, z_k^2, \dots, z_k^m\}$ نمایش مجموعه‌ی مشاهدات در اسکن k می‌باشد و مشاهداتی که در اسکن

⁷ Mixing Of The Estimate

مدل z و $N[V_k^{j,i}; 0; S_k^{j,i}]$ که بیانگر احتمال گوسی اختصاص دهی مشاهده i -ام است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$N[V_k^{j,i}; 0; S_k^{j,i}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_k^{j,i}}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{V_k^{j,i}}{S_k^{j,i}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

پس از محاسبه‌ی احتمال فرضیه‌ها معادلات به روزرسانی فیلتر کالمن برای هر مدل از رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) محاسبه می شوند.

$$\hat{x}_{k|k}^j = E\{x_k | M_k, Y_k\} = \hat{x}_{k|k-1}^j + W_k^j v_k^j \quad (16)$$

$$P_{k|k}^j = P_{k|k-1}^j - \left(\sum_{i=1}^{\bar{m}_j} \beta_k^{j,i} \right) W_k^j S_k^j (r) W_k^{j'} + \quad (17)$$

$$W_k^j \left(\sum_{i=1}^{\bar{m}_j} \beta_k^{j,i} v_k^{j,i} v_k^{j,i'} - v_k^j v_k^{j'} \right) W_k^{j'}$$

در روابط فوق W_k^j بهره‌ی فیلتر کالمن در اسکن k و مدل z و V_k^j مانده‌ی ترکیبی در مدل z هستند که به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند.

$$W_k^j = P_{k|k-1}^j H_k^j S_k^j \quad (18)$$

$$V_k^j = \sum_{i=1}^{\bar{m}_j} \beta_k^{j,i} v_k^{j,i} \quad (19)$$

در انتهای این مرحله تابع احتمال Λ_k^j برای به روزرسانی احتمال مدل‌ها از روابط (۱۸) و (۱۹) به دست می آیند و احتمال مدل‌ها μ_k^j طبق رابطه‌ی (۲۰) به روزرسانی می شود.

$$\Lambda_k^j = [V_k^j]^{\bar{m}_j} \gamma_0(\bar{m}_j) + [V_k^j]^{\bar{m}_j-1} \times \sum_{i=1}^{\bar{m}_j} P_G^i N[V_k^j; 0; S_k^j] \gamma_i(\bar{m}_j) \quad (20)$$

$$\gamma_i(\bar{m}_j) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{m}_j} P_D P_G & i=1, \dots, \bar{m}_j \\ (1-P_D P_G) & i=0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\mu_k^j = \frac{1}{c} \mu_k^{j-1} \Lambda_k^j \quad (22)$$

$\sum_{j=1}^n \mu_k^j = 1$ ثابت نرمالیزاسیون می باشد به طوری که [۱۸].

مرحله ۵. ترکیب تخمین مدل‌ها

در این مرحله پس از دریافت مشاهدات، بردار نوآوری $z_k^{j,i}$ برای مدل j و کوواریانس S_k^j مربوط به آن به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می آید.

$$z_k^{j,i} = z_k^i - H_k^j \hat{x}_{k|k-1}^j \quad (11)$$

$$S_k^j = H_k^j P_{k|k-1}^j H_k^{j'} + R_k^j \quad (12)$$

مرحله ۳. دروازه بندی

ناحیه‌ی دروازه بندی برای همه‌ی مدل‌ها یکسان در نظر گرفته می شود؛ یعنی از بین ماتریس کوواریانس‌های بردار نوآوری در همه‌ی مدل‌ها بیشترین آن انتخاب می شود. اگر $\bar{j} = \arg\{\max |S_k^j|, j \in M_n\}$ ، از میان همه‌ی مشاهداتی که در اسکن k دریافت شده اند، به شرطی درون دروازه قرار می گیرند که در رابطه‌ی (۱۳) صدق کنند. [5].

$$[z_k^{(i)} - \hat{z}_k^{\bar{j},(i)}] [S_k^{\bar{j}}]^{-1} [z_k^{(i)} - \hat{z}_k^{\bar{j},(i)}] < G \quad (13)$$

مرحله ۴. به روزرسانی بردار حالت و ماتریس کوواریانس مربوط به آن با استفاده از مشاهدات درون دروازه

با استفاده از مشاهدات درون دروازه ابتدا فرضیه‌ی صحت تعلق هر مشاهده به رد (θ_k) برای هر مدل به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$\theta_k^i =$ اگر مشاهده از هدف تحت ردیابی تولید شده باشد $(i = 1, \dots, \bar{m})$

$\theta_k^0 =$ هیچ یک از مشاهدات درون دروازه به رد تعلق نگیرند $(i = 0)$

سپس احتمال مربوط به هر فرضیه از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می شود [4].

$$\beta_k^j = \begin{cases} \frac{1}{c'} (P_G)^{-1} N[V_k^j; 0; S_k^j] & i=1, \dots, \bar{m} \\ \frac{1}{c'} \{ \bar{m} (1-P_D P_G) (P_D P_B P_D)^{-1} \} & i=0 \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه‌ی فوق P_D احتمال آشکارسازی، P_G احتمال این که مشاهده‌ی تولید شده توسط حسگر درون دروازه واقع شود، c' فاکتور نرمالیزاسیون بوده که به ازای آن

$$v_k^{j,i} = y_k^i - z_k^j \sum_{i=0}^{\bar{m}} \beta_k^{j,i} = 1$$

مانده مشاهده‌ی i -ام در

به صورت $X = [\dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}]^T$ بوده و توسط رابطه‌ی (۲۵) بیان می‌شود که در آن F ماتریس انتقال حالت سامانه بوده و به شکل زیر است [7].

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

بردار G در این مدل به صورت زیر است.

$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (26)$$

همچنین ماتریس کوواریانس Q که در معادلات فیلتر کالمن استفاده می‌شود به شکل زیر است [8].

$$Q = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & 0 & 0 \\ T^3/2 & T^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^4/4 & T^3/2 \\ 0 & 0 & T^3/2 & T^2 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \quad (27)$$

برای این مدل، جهت تنظیم فیلتر، σ_v باید در حدود حداکثر مقدار ممکن سرعت هدف باشد. ماتریس H نیز در معادلات اندازه‌گیری از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

۴-۲- مدل شتاب ثابت (CA)

در این مدل که از فرآیند مارکوف مرتبه‌ی سوم است بردار حالت X علاوه بر موقعیت و سرعت هدف، شامل شتاب هدف نیز بوده و به شکل $X = [\dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}]^T$

است. در مدل شتاب ثابت، σ_v موجود در رابطه (۲۷) معرف آهنگ تغییرات شتاب هدف است. ماتریس انتقال حالت و بردار بهره‌ی نویز به ترتیب از روابط (۲۹) و (۳۰) به دست می‌آید [9].

در این مرحله بردار حالت به‌روز شده $\hat{x}_{k|k}$ و ماتریس کوواریانس $P_{k|k}$ مربوط به آن با توجه به احتمال هر مدل ترکیب می‌شوند و تخمین نهایی در اسکن k به دست می‌آید. به این ترتیب یک اسکن از الگوریتم IMM-PDA به پایان می‌رسد.

$$\hat{x}_{k|k} = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{k|k}^j \mu_k^j \quad (22)$$

$$P_{k|k} = \sum_{j=1}^n \left\{ P_{k|k}^j + [\hat{x}_{k|k}^j - \hat{x}_{k|k}] [\hat{x}_{k|k}^j - \hat{x}_{k|k}]^T \right\} \mu_k^j \quad (24)$$

۴- شبیه سازی الگوریتم

برای ردیابی اهداف نیاز به مشاهدات یا اندازه‌گیری‌هایی از آن اهداف است که توسط حسگر یا حسگرهایی نظیر رادار، دوربین‌های اپتیکی و... به دست آمده باشد. این مشاهدات پس از عبور از قسمت پردازش به صورت نقاط یا داده‌هایی به قسمت ردیابی تحویل داده می‌شود. در این مقاله داده‌ها در محیط دوبعدی که شامل اطلاعات مسیر حرکت یک جستجوگر فعال و نویز و کلاتر محیط و نویز با توزیع گوسی و کلاتر با توزیع پواسون می‌باشد تولید شده و در ادامه با اجرای پردازش مناسب بر روی این داده‌ها و استفاده از الگوریتم‌های بیان شده، ردیابی اهداف انجام می‌شود.

چنانچه محیط ردگیری هدف نویزی باشد می‌بایست از الگوریتم‌های تخصیص داده برای اختصاص‌دهی مشاهدات به ردها استفاده کرد. همچنین با فرض اینکه جستجوگر فعال توسط یک سامانه پر سرعت مانند یک جنگنده حمل می‌شود و ممکن است حرکات مانوری از خود نشان دهند فیلتر IMM می‌تواند به دقت رفتار هدف را دنبال کند.

برای ردگیری هدف در حضور نویز محیط، ابتدا مدل‌های حرکتی را بررسی و با توجه به مدل انتخابی از الگوریتم KF و UKF شروع می‌کنیم و با توجه به نتایج این دو الگوریتم در نهایت از الگوریتم IMM-PDA در حالت ردیابی تک‌هدفه استفاده خواهیم کرد [6].

۴-۱- مدل سرعت ثابت (CV)

این مدل از فرآیند مارکوف مرتبه‌ی دوم برای مدل کردن حرکت هدف استفاده می‌کند. بردار حالت آن

بردار حالت اسکن‌های بعد تولید و در یک متغیر ذخیره‌شده تا در گام‌های بعد مورد استفاده قرار گیرد. پس از ساخت مسیر واقعی، نوبت به ساخت مشاهدات (اعم از مشاهدات حسگر و مشاهدات نویزی محیط) می‌رسد. برای ساخت مشاهدات حسگر، نویز اندازه‌گیری به مسیر واقعی ساخته‌شده برای هدف اضافه می‌شود.

پس از تولید مشاهدات نویزی محیط، همه‌ی مشاهدات را در یک متغیر ذخیره کرده و به‌عنوان داده به واحد ردیابی ارسال می‌شود تا عمل دروازه‌بندی و بقیه‌ی مراحل پردازش بر روی آن‌ها صورت پذیرد. بعد از انجام ردیابی، خطای تخمین فیلترها در هر اسکن با استفاده از معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE)^۸ مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M ((x_k^i - \hat{x}_k^i)^2 + (y_k^i - \hat{y}_k^i)^2)} \quad (33)$$

که در آن، M تعداد مرتبه تکرار مونت‌کارلو^۹، x_k^i, y_k^i مسیر واقعی سیکر برای زمان K در i-امین مرتبه‌ی تکرار مونت‌کارلو و \hat{x}_k^i, \hat{y}_k^i موقعیت تخمینی سیکر در هر لحظه می‌باشد. خطای RMSE مشاهده‌ی حسگر نیز همانند رابطه‌ی بالا می‌باشد که در آن به‌جای x_k^i, y_k^i از مختصات مشاهده‌ی حسگر استفاده می‌شود. همچنین برای مقایسه‌ی عددی خطای فیلترها، میانگین خطای RMSE در کل اسکن‌ها از رابطه‌ی (۳۴) به دست می‌آید که N نشان‌دهنده‌ی تعداد کل اسکن‌هاست.

$$RMSE_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N RMSE \quad (34)$$

۵-۱- مقایسه میزان خطای RMSE

فرض می‌کنیم در فضای دوبعدی، در یک سناریوی مشترک حرکت یک وسیله مجهز به یک رادار فعال در نظر گرفته شده و میزان خطای RMSE در تخمینگرهای KF و UKF با روش IMMLDA مقایسه گردیده‌است. در ادامه در شکل ۵ عملکرد تخمینگرهای KF و UKF مشاهده می‌شود.

^۸ Root Mean Square Error

^۹ Monte Carlo

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$G = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

همچنین ماتریس کوواریانس Q در این مدل به‌صورت زیر است.

$$Q = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^2/2 & T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ T^2/2 & T^2 & T & 0 & 0 & 0 \\ T^2/2 & T & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T^4/4 & T^2/2 & T^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & T^2/2 & T^2 & T \\ 0 & 0 & 0 & T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \quad (31)$$

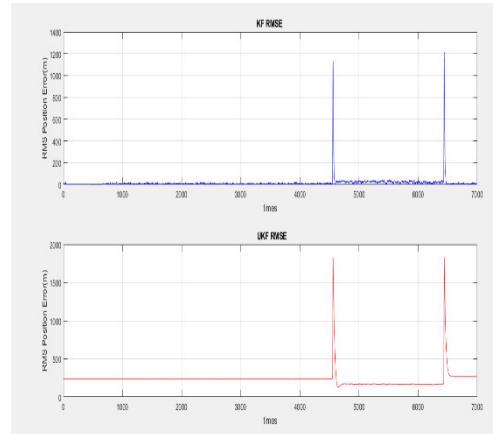
برای تنظیم فیلتر در مدل شتاب ثابت، σ_v در حدود حداکثر تغییرات ممکن برای شتاب هدف انتخاب می‌شود [8].
ماتریس H نیز در معادلات اندازه‌گیری از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

۵- تولید داده

داده‌ها شامل مشاهداتی هستند که از رادار تولید شده و یا نویزهایی هستند که در محیط ردیابی وجود دارند. جهت تولید داده پس از مقداردهی اولیه‌ی پارامترها که باید مسیر واقعی حرکت وسیله مورد نظر بر اساس مدل‌های دینامیکی مختلف مانند سرعت ثابت، شتاب ثابت و مدل چرخان ساخته شود. برای این امر ابتدا بردار حالت اولیه‌ی حرکت (X_0) در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از معادله‌ای که معادله‌ی دینامیکی هدف است،

در شکل ۴ میزان RMSE این دو تخمینگر محاسبه شده و آورده شده است.



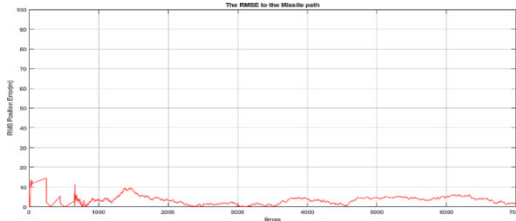
[۱] شکل ۴- مقایسه خطای RMSE در تخمینگر های UKF و KF

در شکل ۴ مشاهده میزان خطا در تخمینگر ها در یک سناریوی مشترک مشخص شده است که در تخمینگر KF میزان خطا $15/0483$ متر و در تخمینگر UKF این خطا به میزان $234/8312$ متر افزایش یافته است.

مسئله مهم تر در بررسی این دو تخمین گر زمان پردازش است و همچنین فیلتر کالمن به طور بازگشتی بر اساس مشاهدات اسکن قبلی اقدام به انجام به روزرسانی اندازه گیری برای اسکن فعلی می کند و موضوع مهم تر اینکه با توجه به وجود نویز و کلاتر محیط، برای ردیابی هدف نیاز به دروازه بندی داریم تا در هر اسکن وجود هدف را تضمین کند. لذا برای این موضوع، از الگوریتم IMMPDA استفاده شده است.

یکی از موضوعات مهم در استفاده از الگوریتم بهینه در این مقاله، کاهش میزان خطا می باشد. لذا در این الگوریتم نیز میزان خطای RMSE مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه نویز شبیه سازی شده دارای خاصیت رندوم و یا تصادفی می باشد در هر بار اجرای الگوریتم مقادیر کمی متفاوت هستند. همچنین مسئله مهم تر اینکه در این الگوریتم زمان پردازش برای یک اسکن به مقدار مطلوبی جهت پردازش رسید که این مقدار برای استفاده عملی مقدار مناسبی می باشد.

در شکل ۵ خطای RMSE در اجرای این الگوریتم با استفاده از تکرار ۱۰۰ مرتبه مونت کارلو مشاهده می شود.



[۲] شکل ۵- خطای RMSE در الگوریتم IMMPDA

۶- نتیجه گیری

در این مقاله برای هر سه الگوریتم KF, UKF, IMMPDA، یک سناریو مشترک ارائه گردید. همان طور که در این مقاله بیان شد الگوریتم KF دارای زمان پردازش کمی است اما علی رغم وجود مزایای فیلتر کالمن، این فیلتر محدودیت هایی را به ویژه در خصوص برخورد با مسئله خطای مدل و نویز دارد. خطاها در مدل فیلتر کالمن معمولاً به صورت نویز گوسی با متوسط صفر و کوواریانس معلوم فرض می شوند. اما در میدان عمل، کوواریانس نویز معمولاً توسط روش های تجربی یا ابتکاری تعیین شده که در نتیجه آن فیلتر یک عملکرد کمتر بهینه را نمایش خواهد داد. حتی در برخی روش ها مستقیماً یک بهره یکنواخت و ثابت به عنوان کوواریانس نویز تعیین و معرفی می شود که چه بسا می تواند باعث واگرایی فیلتر گردد. همچنین با توجه به اینکه KF عملکرد خطی دارد لذا در مواردی نظیر سامانه های غیر خطی یا فرآیندهای غیر یکنواخت، فرض مدل گوسی برای خطای فرآیند می تواند به طور بسیار مؤثری سبب کاهش عملکرد تخمین شود. [10] همچنین KF با توجه به موقعیت قبلی، نقاط بعدی را تخمین می زند لیکن با وجود نویز و کلاتر و تداخل در محیط احتمال انتخاب نویز به جای هدف در محاسبات در این الگوریتم زیاد است و حتماً دروازه بندی لازم است. در الگوریتم UKF به جز زمان پردازش بالا خطای الگوریتم نیز قبول نبود. درست است که الگوریتم UKF برای رفتارهای غیر خطی مناسب است اما تصمیم گیری در این الگوریتم بر اساس رفتار رگرسیونی است و نسبت به خطای موجود شروع به بررسی خطاهای اطراف کرده که این باعث افزایش زمان پردازش و همچنین حجم پردازش می شود. همچنین باعث افزایش خطای RMSE نیز در این الگوریتم خواهد شد. لیکن در نهایت الگوریتم IMMPDA که هم از نظر زمان پردازش و هم میزان خطای RMSE پارامترهای مطلوبی برای رادار فعال داشت.

- [1] Yuan.Z, Falin.Wu, Yushuang.L, Zhidong.Zh and Yachong.Zh, "IMM-UKF based airborne radar and ESM data fusion for target tracking," in 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, BIRMINGHAM., 2019.
- [2] Y. Bar-Shalom, Multitarget-multisensor tracking Applications and Advances, 2000.
- [3] D. Mao, D. P. A. Xue and a. Y. Guo, "An Improved IMMJPDA Algorithm for Tracking Multiple Maneuvering Targets in Clutter," in *The Sixth World Congress on, 2006*, 2006.
- [4] S., G. G. Sukhatme and M. L, "The iterated sigma point Kalman filter with applications to long range stereo," in *Robotics: Science and Systems*, Philadelphia, Pennsylvania, 2006.
- [5] A. sebbagh and s. kechida, "Nonlinear IMM-SUKF Algorithm for Maneuvering Target Tracking with Bearings-Only Measurement," p. 8, 2019.
- [6] C. Shi, J. Zhou and F. Wang, "Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept," in *Multidim Syst Sign Process*, 2018.
- [7] X. Li, P. Wu and X. Zhang, "An interacting multiple models probabilistic data association algorithm for maneuvering target tracking in clutter," 2015.
- [8] Y. Bar-Shalom, X.-R. Li and T. Kirubarajan, Estimation with Applications To Tracking and Navigation, New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 2001.
- [9] S. Veeraraghavan, A. Rathi, M. J. Sagayaraj and C. V. R. Nagar, "Turn rate estimation techniques in IMM estimators for ESA radar tracking," in Aerospace Conference 2008 IEEE, 2008.

[۱۰] ۱. هادی نژاد، "ارائه یک الگوریتم بهینه برای حذف اثرات مشاهدات نویزی در سیستم‌های ردیابی چند هدف مبتنی بر تخصیص داده احتمالی توأم in "، هفتمین کنفرانس ملی جنگ الکترونیک، تهران، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ۱۳۹۳.

اصلاح پروانه سطحی شناور تندرو جهت رفع حالت فرابار در موتور

مجتبی پاکیان بوشه‌ری^۱، جواد عباسی^۲، سیدجواد هاشمی^۳

۱- دکترای مهندسی مکانیک، کشتی‌سازی شهید محلاتی، Pakianm@chmail.ir

۲- دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، کشتی‌سازی شهید محلاتی، JMZ114@gmail.com

۳- کارشناس ارشد مهندسی دریا، کشتی‌سازی شهید محلاتی، hashemi2488@yahoo.com

چکیده:

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

واژه‌های کلیدی:

اصلاح پروانه، پروانه سطحی، حالت فرابار، حالت فرادور

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

Mojtaba Pakian Bushehri¹, Javad Abbasi², Seyed Javad Hashemi³

1- PhD in Mechanical Engineering, Pakianm@chmail.ir

2- PhD candidate in Industrial Management, JMZ114@gmail.com

3- Master of Marine Engineering, hashemi2488@yahoo.com

Abstract

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

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

۱- مقدمه

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

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

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

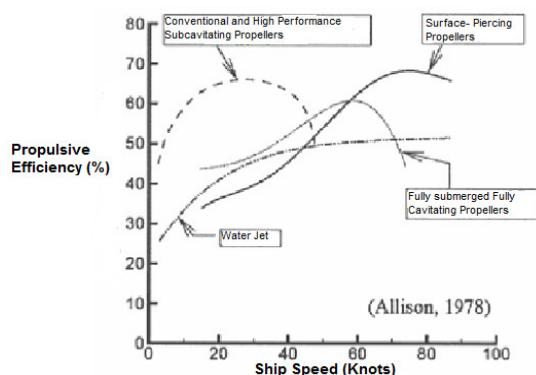
در روش کاهش قطر، از نوک پره‌های پروانه برش داده می‌شود و قطر کاهش می‌یابد و در نتیجه نسبت گام و نسبت سطح گسترش یافته افزایش می‌یابد.

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

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

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

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



شکل ۱- نمودار راندمان انواع پروانه‌ها

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

² Overspeed

¹ Overload

۲- شرح مسئله و روش حل

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

جدول ۱- مشخصات شناور

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

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



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

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

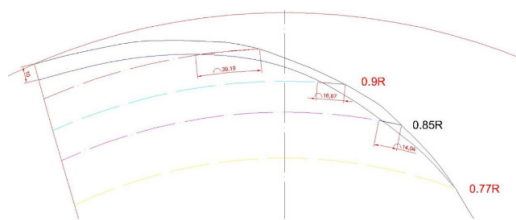
پس از تهیه شابلن، سطح گسترش یافته پروانه در نرم افزار اتوکد مدل گردید. با توجه به دور ۲۵۵۰ rpm که موتور دچار فرابار شده است می توان درصد فرابار را از رابطه ۱ محاسبه کرد [1].

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

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

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

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



شکل ۵- منحنی برش روی سطح مکش یک پره

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



شکل ۶- اعمال الگوی برش روی پره ها



شکل ۷- نحوه برش کاری پروانه

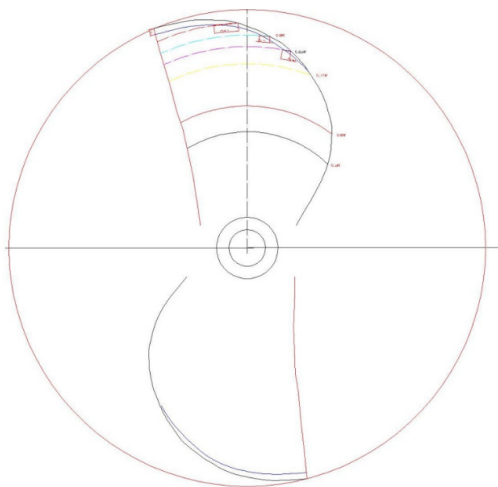
با توجه به نبود نمودار K_q و K_t ، برای بدست آوردن میزان K_q می توان از روش زیر استفاده کرد.

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



شکل ۳- نمای تهیه شابلن از پره ها

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



شکل ۴- مدل سطح گسترش یافته پروانه

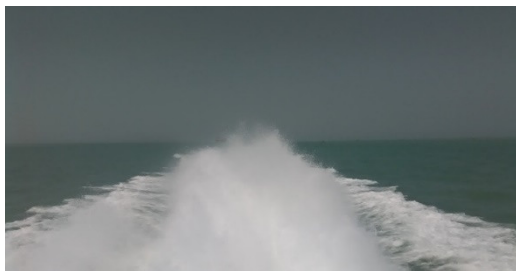
در این برش، 3 درصد از قطر پروانه و حدود 3.2 درصد از سطح پره کاهش یافته است. در شکل ۶ شابلن برش پره ها مشاهده می شود که روی پره جهت علامت زدن خط برش قرار گرفته است.

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

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

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

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



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

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

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

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

تراست پروانه نیز از رابطه ۳ محاسبه می گردد.

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

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

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

۳- نتایج

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

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

با استفاده از رابطه ۲ میزان K_q پروانه در این دور با توجه به چگالی 1025 kg/m^3 و قطر 770 mm پروانه برابر 0.016 می باشد.

حال با توجه به کاهش 20 mm قطر و با فرض تغییرات ناچیز مقدار K_q بدلیل تغییرات بسیار کم در پروانه، میزان گشتاور پروانه در دور rpm ۲۵۵۰ موتور با استفاده از رابطه ۲ برابر 3119.46 N.m می باشد که حدود 502.67 N.m کاهش یافته است.

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

^۳ Full load

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

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

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

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

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

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

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

۴- نتیجه گیری

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

مراجع

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

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

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

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

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

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

مطالعه عددی تأثیر پله‌های عرضی هفتی و هشتی شکل بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور تندرو پروازی در آب آرام

دلارام پاکنیات جهرمی^۱، سعید جامعی^{۲*}

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی دریا، گرایش هیدرودینامیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
۲ استادیار گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده:

بهبود عملکرد دینامیکی شناورهای تندرو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ یکی از مؤثرترین روش‌ها در افزایش سرعت و بهبود پایداری در شناورهای تندرو استفاده از پله عرضی است. بر همین مبنا در پژوهش حاضر نحوه اثرگذاری پله عرضی با و بدون زاویه در آب آرام مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا با استفاده از روش عددی تأثیر ایجاد زاویه در دو حالت پله عرضی زاویه‌دار هفتی و هشتی شکل در سه زاویه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه بر رفتار دینامیکی شناور ارزیابی گردیده است؛ این محاسبات در اعداد فرود طولی ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ (که شناور در حالت پروازی قرار دارد) صورت گرفته است و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و اعتبارسنجی شده است. در مدل‌سازی عددی جریان دوفازی از مدل VOF و برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل SST k- ω استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پله عرضی هفتی شکل در مقایسه با پله‌های عرضی بدون زاویه و هشتی شکل عملکرد بهتری در کاهش میزان مقاومت و تریم شناور داشته است به طوری که شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه نسبت به شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه، به طور میانگین مقاومت و تریم شناور را به ترتیب ۲٪ و ۴/۸۷٪ کاهش داده است. همچنین پله عرضی هفتی شکل نسبت به دو حالت پله عرضی دیگر موجب کاهش تریم و بهبود پایداری طولی شناور گردیده است.

واژه‌های کلیدی:

شناور تندرو، پله عرضی زاویه‌دار، پایداری طولی، مؤلفه‌های هیدرودینامیکی، روش آزمایشگاهی و عددی

Numerical study of the effect of aft-wise and fore-wise transverse steps on the hydrodynamic performance of a high speed planing vessel in calm water

Delaram Pakniyat jahromi¹, Saeed Jamei²

1,2 Department of Marine Engineering, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract:

Improving the dynamic performance of high-speed vessels is of particular importance. One of the most effective ways to increase speed and improve stability in high-speed vessels is the use of a transverse step. Based on this, in the present research, the manner of the effect of the transverse step with and without angles in calm water has been investigated. In this regard, using a numerical method, the effect of creating an angle in two angular transverse steps of seven and eight shapes at three angles of 20, 40, and 60 on the dynamic behavior of the high-speed vessel has been evaluated. These calculations have been made for longitudinal Froude numbers of 1.4, 1.62, and 2 when the vessel is in planning mode and have been compared and validated with existing experimental results. VOF model is used for numerical modeling of two-phase flow and SST k- ω model is used for turbulence modeling. The results show that the use of an aft-wise transverse step compared to non-angled and fore-wise transverse steps has a better performance in reducing the resistance and trim of the vessel so that the vessel equipped with the aft-wise transverse step at an angle of 40 degrees compared to the vessel equipped with transverse step without angle has reduced the vessel of the resistance and trim by 2% and 4.87%, respectively. Also, the aft-wise transverse step reduced the trim and improved the longitudinal stability of the vessel as compared with other models.

key words:

high speed vessel, Angular transverse step, Longitudinal stability, Hydrodynamic components, Experimental and numerical method.

امروزه با توجه به نیاز بشر به داشتن شناورهایی با سرعت بالاتر، شناورهای تندرو مختلفی برای اهداف نظامی، تفریحی و مسافری طراحی و ساخته شده است. شناورهای تندرو برای حرکت در سرعت‌های بالا طراحی می‌شوند از این رو بهینه‌سازی این شناورها در راستای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی و پایداری از اهمیت بالایی در طراحی آن‌ها برخوردار می‌باشد [۱]. برای نیل به اهداف مذکور در طراحی شناور تندرو از دو راهبرد کلی تغییر فرم بدنه شناور و اضافه نمودن زائده‌های مختلف به بدنه شناور استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های موثر در بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری، ایجاد پله عرضی در کف شناور است [۲]. در زمینه تاثیر مشخصه‌های هندسی پله عرضی شامل ارتفاع، موقعیت طولی، شکل و تعداد پله‌ها بر بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری شناور پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است. یکی از اولین تحقیقات در زمینه تاثیر پله عرضی بر عملکرد شناور توسط دوسون و همکاران [۳] در ۱۹۶۴ صورت گرفته است. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از پله عرضی موجب کاهش مقاومت شناور در حالت پروازی شده است.

جدول ۱- حروف و علائم اختصاری

علائم	توضیحات
LOA	طول کل
B	عرض
T_{AP}	آبخور در پاشنه
β	زاویه خیز کف
Δ	جابه‌جایی
LCG	موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه
VCG	موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل
L_K	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در کیل
L_C	فاصله پله عرضی تا پاشنه شناور در چابین
∇	حجم زیر آب شناور
ρ	چگالی سیال
μ	لزجت سیال
α	کسر حجمی
σ_K	یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله K)
σ_ω	یکی از ضرایب مدل SST (ثابت معادله ω)
β	یکی از ضرایب مدل SST
Fr_L	عدد فرود طولی
g	شتاب گرانش

ساویستکی و مورابیتو [۴] در ۲۰۰۹ کانتورهای ویک در بدنه جلویی شناور تندرو پله‌دار را به صورت نمودارهایی بی‌بعد ارائه نمودند. تانتون و همکاران [۵ و ۶] با استفاده از روش آزمایشگاهی اثر افزودن پله عرضی را بر میزان مولفه‌های هیدرودینامیکی چهار شناور تندرو با نسبت طول به عرض‌های مختلف در آب آرام و موج بررسی کردند. ویلیام گارلند و کیوین [۷] در ۲۰۱۲ با استفاده از روش عددی در یک شبیه‌سازی دو بعدی، ارتفاع بهینه پله عرضی را در شناور پروازی بر مبنای بیشترین مقدار نیروی برا تعیین نمودند و تاثیر تغییر ارتفاع پله را بر میزان کاهش تریم و افزایش هوادهی بررسی کردند. ویسی و همکاران [۸] در ۲۰۱۴ با استفاده از روش عددی مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور تندرو را با و بدون پله عرضی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از پله عرضی موجب کاهش مقاومت شناور در حالت حرکتی پروازی و همچنین بهبود زاویه تریم شناور می‌گردد. نورقاسمی و همکاران [۹] با استفاده از روش عددی اثر تغییر زاویه پله عرضی به سمت سینه شناور (هفتی‌شکل) را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور تندرو بررسی کردند. نتایج نشان داد که با تغییر زاویه پله به سمت سینه شناور، تریم و بالآمدگی افزایش و مقدار مقاومت کاهش یافته است. کاظمی و همکاران [۱۰] در ۲۰۱۹ رفتار هیدرودینامیکی شناور تندرو را با و بدون پله عرضی در شرایط بارگذاری مختلف مورد بررسی قرار دادند و بر مبنای نتایج حاصل رابطه‌ای برای تخمین پروفیل ویک ایجاد شده در پشت شناور ارائه نمودند. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان [۱۱] با بکارگیری روش عددی و شبکه عصبی مصنوعی رابطه‌ای به منظور تعیین نسبت مقاومت به وزن شناور پله‌دار تعیین کردند. کاسینوتا و همکاران [۱۲] در ۲۰۱۹ اثر ایجاد هوادهی مصنوعی در محل پله عرضی را در کاهش میزان مقاومت اصطکاکی شناور بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که ایجاد هوادهی مصنوعی می‌تواند موجب کاهش قابل توجه مقاومت اصطکاکی در شناور گردد. در ادامه بررسی اثر پله عرضی بر رفتار شناور نجفی و همکاران [۱۳] در یک مطالعه آزمایشگاهی مولفه‌های مختلف هیدرودینامیکی را برای شناور تندرو پله‌دار محاسبه نمودند. سپس بر مبنای نتایج حاصل روابطی برای محاسبه الگوی سطح خیس کف شناور پله‌دار ارائه کردند. قدیمی و همکاران [۱۴] در ۲۰۱۹ با بررسی رفتار یک شناور تندرو در حالت با و بدون پله‌ی

عرضی نشان دادند که با افزودن پله عرضی به شناور در حالت پروازی مقاومت اصطکاکی کاهش و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. نجفی و نوروزی [۱۵] در ۲۰۱۹ تاثیر شکل‌های مختلف پله عرضی را در رفتار شناور تندرو مورد بررسی قرار دادند و میزان تغییر مولفه‌های هیدرودینامیکی را در حالت‌های مختلف تعیین کردند. ساجدی و قدیمی [۱۶] در ۲۰۲۰ با استفاده از روش آزمایشگاهی تاثیر اضافه نمودن پله عرضی را بر افزایش پایداری طولی و کاهش مقاومت یک شناور تندرو بررسی نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از پله عرضی در ارتفاع و مکان بهینه موجب بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور می‌گردد. آن‌ها در ادامه تحقیقاتشان [۱۷] با استفاده از روش آزمایشگاهی تاثیر تغییر زاویه پله عرضی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ایجاد زاویه در پله به سمت سینه موجب کاهش بیشتر مقاومت نسبت به پله‌های بدون زاویه گردیده‌است. ویتلو و همکاران [۱۸] در ۲۰۲۲ تاثیر مولفه‌های هندسی مختلف شامل ارتفاع، مکان و تعداد پله‌های عرضی را بر مولفه‌های هیدرودینامیکی یک سری شناور با نسبت طول به عرض‌های مختلف با بکارگیری روش آزمایشگاهی بررسی نمودند. در جدول ۲ مشخصات هندسی پله عرضی (ارتفاع، موقعیت طولی، شکل و تعداد پله‌های عرضی) که در پژوهش‌های مذکور بررسی شده تعیین گردیده‌است. مشاهده می‌شود که در اکثر پژوهش‌ها مشخصه‌های هندسی ارتفاع و مکان پله عرضی در کف شناور مورد بررسی قرار گرفته‌است و کمتر به تاثیر شکل قرار گیری پله عرضی در کف شناور (پله‌های هفتی و هشتی شکل) بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی با استفاده از روش عددی پرداخته شده‌است. بر این اساس در پژوهش حاضر تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار دینامیکی شناور با استفاده از روش عددی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌است. در این راستا در گام اول مولفه‌های هیدرودینامیکی یک شناور پروازی با و بدون پله عرضی با استفاده از روش عددی محاسبه شده‌است و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و اعتبار سنجی گردیده‌است. سپس با بکارگیری روش عددی تاثیر تغییر

۲- تعریف مسئله

کاهش مقاومت و بهبود پایداری طولی همواره از چالش‌های اصلی در طراحی شناورهای تندرو به حساب می‌آیند. یکی

زاویه پله به سمت سینه و پاشنه شناور بر مولفه‌های هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

جدول ۲- مشخصات هندسی بررسی شده مربوط به پله عرضی در پژوهش‌های مورد مطالعه

محققین	روش مطالعه	مشخصات هندسی پله عرضی		
		ارتفاع	موقعیت طولی	نوع پله
تعداد				
داوسون و همکاران [۳]	آزمایشگاهی			
تانتون و همکاران [۵][۶]	آزمایشگاهی			
ویلیام گارلند و کیوین [۷]	عددی			
نور قاسمی و همکاران [۹]	عددی			
کاظمی و همکاران [۱۱]	عددی			
نجفی و همکاران [۱۳]	آزمایشگاهی			
ساجدی و قدیمی [۱۶]	آزمایشگاهی			
ساجدی و قدیمی [۱۷]	آزمایشگاهی			
ویتلو و همکاران [۱۸]	آزمایشگاهی			

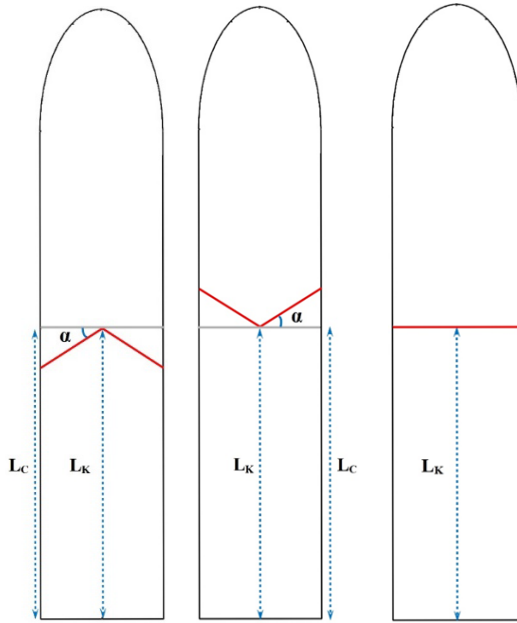
از موثرترین و رایج‌ترین روش‌ها در طراحی شناورهای تندرو به منظور دست‌یابی به اهداف مذکور تغییر فرم بدنه با اضافه نمودن پله عرضی به کف شناور می‌باشد. در این پژوهش شناور تندرو فریزما [۱۹] با زاویه خیز کف ۲۰

درجه به عنوان شناور پایه به منظور بررسی تاثیر زاویه پله عرضی بر میزان بر رفتار دینامیکی شناور انتخاب گردیده است. مشخصات شناور مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۳ ذکر گردیده است.

شناور تندرو مذکور با و بدون پله عرضی از نقطه نظر هیدرودینامیکی و پایداری بررسی و تحلیل گردیده است. که پله عرضی در کف شناور برای سه حالت پله عرضی بدون زاویه و پله عرضی با زاویه به سمت سینه (هشتی شکل) و به سمت پاشنه (هفتی شکل) در نظر گرفته شده است (شکل ۱). پله های عرضی زاویه دار هر کدام در سه زاویه ۲۰، ۴۰ و ۶۰ مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین بر مبنای نتایج کسب شده در پژوهش نجفی و همکاران [۱۳] و همچنین عامری و همکاران [۲۰] ارتفاع و مکان پله در طول شناور به ترتیب برابر ۰/۲ و ۱/۱ متر تعیین گردیده اند که در آن شناور مورد مطالعه از لحاظ مقاومت و پایداری طولی عملکرد قابل قبولی داشته است. مشخصات مربوط به پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور شامل زاویه پله و فاصله پله از پاشنه در جدول ۴ ذکر گردیده است. در این تحقیق در ابتدا با استفاده از روش عددی مولفه های هیدرودینامیکی مقاومت و تریب شناور با و بدون پله عرضی سه عدد فرود طولی ($Fr_L = \frac{V}{\sqrt{L \times g}}$) ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ محاسبه شده است و با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط نجفی و همکاران [۱۳] مقایسه و اعتبار سنجی گردیده است. سپس با استفاده از روش عددی تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- مشخصات پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور

مقدار	نماد	مشخصه
۲/۵	LOA	طول کل (متر)
۰/۵	B	عرض (متر)
۰/۹	TAP	آبخور در پاشنه (متر)
۲۰	β	زاویه خیز کف (درجه)
۴۸/۸۳	Δ	جابه جایی (کیلوگرم)
۰/۹	LCG	موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه (متر)
۰/۱۸	VCG	موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل (متر)
۰/۲	-	ارتفاع پله (متر)
۱/۱	L _K & L _C	موقعیت طولی پله از پاشنه (متر)
پله عرضی بدون زاویه	-	نوع پله



الف: پله عرضی بدون زاویه
ب: پله عرضی با زاویه به سمت سینه (هفتی شکل)
ج: پله عرضی با زاویه به سمت پاشنه (هشتی شکل)

شکل ۱- حالت های مختلف قرار گیری پله عرضی در کف شناور

جدول ۴- مشخصات پله های عرضی در نظر گرفته شده برای شناور

ارتفاع پله عرضی (متر)	مشخصات پله عرضی			شناور مجهز به پله عرضی
	فاصله پله عرضی تا پاشنه (L _C) (متر)	فاصله پله عرضی تا شناور در کیل (L _K) (متر)	زاویه پله عرضی تا شناور در افق (α)	
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱	صفر	پله عرضی بدون زاویه
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱۹	۲۰ درجه	پله عرضی هفتی شکل
			۴۰ درجه	
			۶۰ درجه	
۰/۲ متر	۱/۱	۱/۱	۲۰ درجه	پله عرضی هشتی شکل
			۴۰ درجه	
			۶۰ درجه	

۳- مطالعه عددی

در این پژوهش مطالعه عددی به منظور بررسی میزان و نحوه اثرگذاری پله‌های هفتی و هشتی شکل بر رفتار دینامیکی و پایداری طولی شناور انجام شده است که در این راستا از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی STAR-CCM+ استفاده گردیده است. در ادامه مراحل مربوط به مطالعه عددی به طور کامل تشریح گردیده است.

۳-۱- معادلات حاکم

در شبیه‌سازی عددی رفتار شناور، جریان به صورت کاملاً آشفته در دو فاز آب و هوا در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نیوتونی و تراکم ناپذیر در نظر گرفتن دو سیال آب و هوا معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر جریان سیال اطراف شناور مطابق روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند.

در رابطه (۲)، v بردار سرعت، ρ چگالی و μ لزجت دینامیکی می‌باشد. برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی SST k- ω استفاده شده است. نخستین با توسط منتر [۲۱] به منظور استفاده همزمان از توانایی‌های مدل آشفتگی k- ϵ و k- ω بکار گرفته شده است. این مدل در نواحی با عدد رینولدز پایین (نواحی نزدیک به دیواره) از مدل آشفتگی k- ω استفاده می‌نماید و در نواحی با عدد رینولدز بالا (نواحی دور از دیواره) از مدل k- ϵ استفاده می‌کند. به همین دلیل این مدل یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی هیدرو دینامیکی شناورهای تندرو به حساب می‌آید [۲۲]. معادلات مربوط به مدل آشفتگی SST k- ω مطابق معادلات (۳) تا (۵) می‌باشد [۲۳].

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v v) \right) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla v + (\nabla v)^T)] - gK \nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (3)$$

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (4)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (6)$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y'} ; \frac{500 v}{y^2 \omega} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (V \alpha) = 0 \quad (8)$$

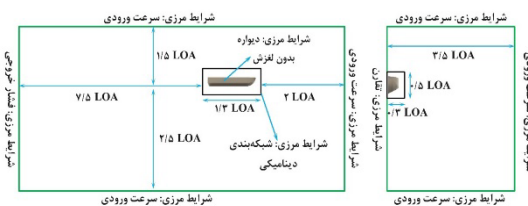
$$\Delta t = 0.01 \sim 0.005 \frac{1}{V} \quad (9)$$

$$Y^+ = \frac{y}{v} \sqrt{\frac{1}{2} V^2 \frac{0.074}{Re_L^{1/5}}} \quad (10)$$

در رابطه (۳)، Ω بیانگر سرعت مطلق جریان سیال است. در رابطه (۷)، y نشان دهنده فاصله از دیواره می‌باشد. همچنین در معادلات ذکر شده ضرایب ثابت σ_ω ، σ_k و β نتیجه‌ی ترکیب ضرایب ثابت دو مدل آشفتگی k- ϵ و k- ω هستند. به منظور توصیف مرز مشترک بین دو فاز سیال از روش کسیر حجمی سیال استفاده شده است که رابطه آن مطابق معادله (۸) است. در رابطه (۸)، α بیانگر مقدار کسر حجمی است که برای دو سیال آب و هوا به ترتیب برابر صفر و یک در نظر گرفته شده است.

۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ابعاد فضای محاسباتی در پژوهش حاضر مطابق با معیارهای ارائه شده توسط ITTC و در نظر گرفتن حداقل‌های توصیه شده در نرم افزار STAR-CCM+ تعیین شده است [۲۴] [۲۵]. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا سینه شناور، ۲ برابر طول شناور تعیین گردیده است و فاصله مرز خروجی جریان تا پاشنه شناور به منظور جلوگیری از جریان بازگشتی و تعیین مشخصات ویک شناور ۷/۵ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است. فاصله مرز کناری فضای محاسباتی تا بدنه شناور حدود ۳/۵ برابر طول شناور تعیین شده است. همچنین به دلیل تقارن فرم بدنه شناور و جریان سیال، شبیه‌سازی به صورت متقارن انجام شده است. سایر ابعاد و شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای فضای محاسباتی در شکل ۲ ارائه نشان داده شده است.



شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزهای فضای محاسباتی

در این شبیه‌سازی گام زمانی مطابق با رابطه تعیین شده است [۲۶] که در آن V و l به ترتیب بیانگر سرعت و طول خیس شده‌ی شناور می‌باشند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر به صورت ناپایا در حالت سه بعدی

انجام شده است و عدم وابستگی نتایج حاصل از شبیه‌سازی به زمان با توجه به تغییر مولفه‌های هیدرودینامیکی در روند حل مشخص گردیده است [۲۷]. همچنین تنظیمات در نظر گرفته شده در فرایند شبیه‌سازی عددی رفتار شناور در جدول ۵ ارائه شده است.

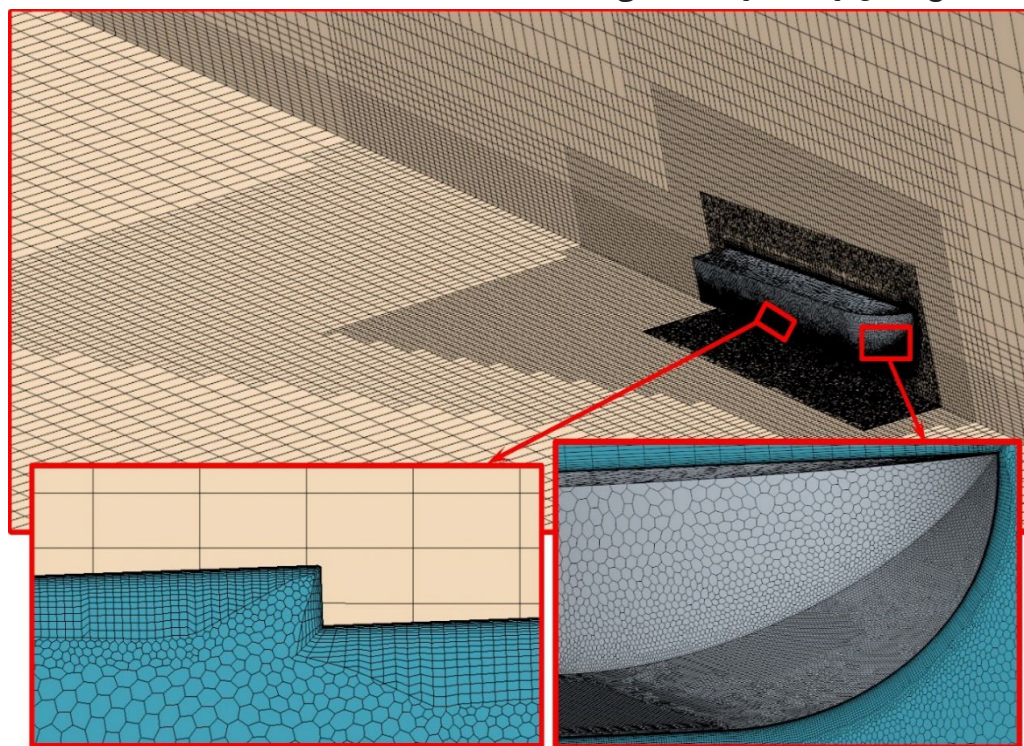
جدول ۵- تنظیمات حلگر در شبیه‌سازی عددی

مشخصات	تنظیمات تعیین شده
نوع حلگر	ناپایا
روش دوفازی	حجم سیال
روش کوپل سرعت و فشار	الگوریتم SIMPLE
روش گسسته‌سازی زمان	بالادست مرتبه اول
تعداد تکرار حل در هر گام زمانی	۵
روش درون‌یابی در ناحیه Overset	خطی (Linear)

۳-۲- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

نوع و کیفیت شبکه‌بندی فضای محاسباتی مهم‌ترین عامل در میزان دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

بر این اساس در شبیه‌سازی عددی حاضر بر اساس نتایج حاصل از پژوهش کاریکا و همکاران [۲۸] و ماکرو و همکاران [۲۹] در راستای محاسبه دقیق حرکات شناور از شبکه‌بندی دینامیکی استفاده شده است. بر این اساس شبکه‌بندی فضای محاسباتی در دو بخش Overset و Background صورت گرفته است که به‌منظور کاهش تعداد شبکه‌بندی و همچنین کاهش زمان محاسبات، ناحیه Overset با شبکه بندی شش ضلعی بی‌سازمان و ناحیه Background با استفاده از شبکه‌بندی Trimmed با سازمان شبکه‌بندی شده است [۳۰] [۳۱]. فضای محاسباتی با توجه به الگوی رفتار شناور تندرو به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است که هر کدام با توجه به میزان اثرگذاری بر دقت نتایج شبکه‌بندی گردیده است. در شکل ۳ شبکه‌بندی بخش‌های مختلف فضای محاسباتی نشان داده شده است.



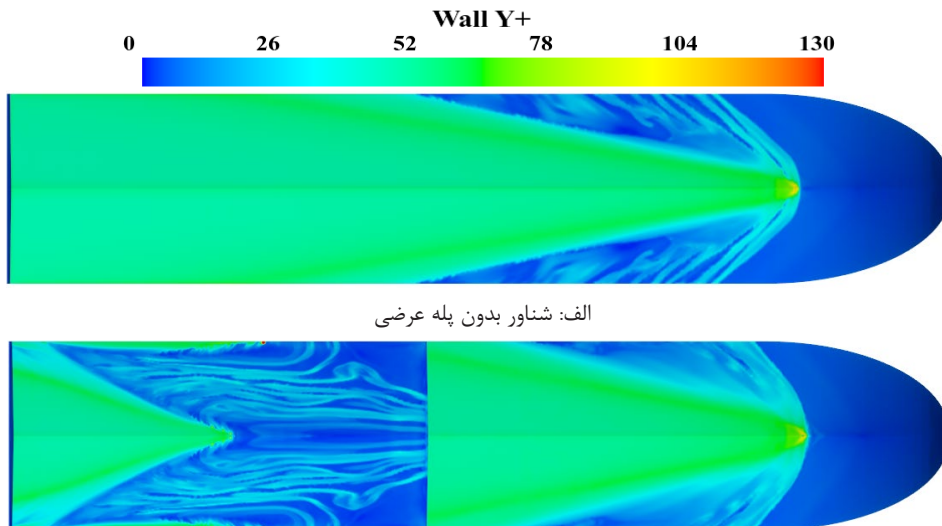
ب: شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری در محل پله عرضی

الف: شبکه‌بندی شش ضلعی بر روی بدنه شناور

شکل ۳- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

پارامترهای y, V, v و Re در رابطه (۱۰) به ترتیب بیانگر فاصله‌ی دیواره از شبکه‌بندی لایه مرزی، سرعت شناور، ضریب ویسکوزیته سیال و عدد رینولدز می‌باشد [۲۳]. در شکل ۴ کانتور تغییرات Y^+ کف شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی به‌منظور محاسبه دقیق میزان تنش و فشار جریان سیال، در اطراف شناور از شبکه‌بندی لایه‌ای منشوری استفاده شده است که مقدار مولفه‌های وابسته به مقدار بی‌بعد Y^+ تعیین می‌گردد [۱] که مقدار آن مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.



الف: شناور بدون پله عرضی

ب: شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه

شکل ۴- مقادیر Y^+ در نقاط مختلف کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۴-۳- مطالعه شبکه‌بندی

با توجه به اهمیت شبکه‌بندی بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در این پژوهش به منظور اطمینان از عدم وابستگی نتایج به تعداد شبکه، چهار حالت شبکه‌بندی مختلف از نقطه نظر تعداد شبکه در نظر گرفته شده‌است و میزان مؤلفه‌های مقاومت، تریم و سطح خیس کف شناور برای چهار حالت مذکور محاسبه شده‌است. بررسی عدم وابستگی نتایج در حالت‌های ذکر شده برای شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ ارزیابی گردیده‌است. نتایج مقدار مقاومت، تریم و سطح خیس کف شناور مربوط به حالت‌های مختلف شبکه‌بندی در جدول ۶ نشان داده شده‌است.

نتایج مؤلفه‌های هیدرودینامیکی در تعداد شبکه‌بندی مختلف نشان می‌دهد که از حالت سوم به بعد ($10^3 \times 1940$)

تعداد شبکه (تعداد شبکه تاثیر قابل توجهی بر رفتار شناور ندارد و حل از تعداد شبکه مستقل گردیده‌است. در شبیه‌سازی حاضر با توجه به نتایج مذکور حالت سوم به عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده‌است. پس از استقلال حل از شبکه‌بندی نتایج حلگر و کیفیت شبکه‌بندی فضای محاسباتی با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه یا GCI که توسط کلیک و همکاران [۳۲] ارائه گردیده، ارزیابی شده‌است. این روش با استفاده از برون‌یابی رچارد داوسون [۳۳] خطای گسسته سازی را تخمین می‌زند. در پژوهش حاضر عدم قطعیت نتایج عددی با استفاده از روش مذکور برای شبکه‌بندی‌های ذکر شده در جدول ۶ ارزیابی گردیده‌است. نتایج حاصل از ارزیابی عدم قطعیت برای حالت ذکر شده در جدول ۷ ارائه شده‌است.

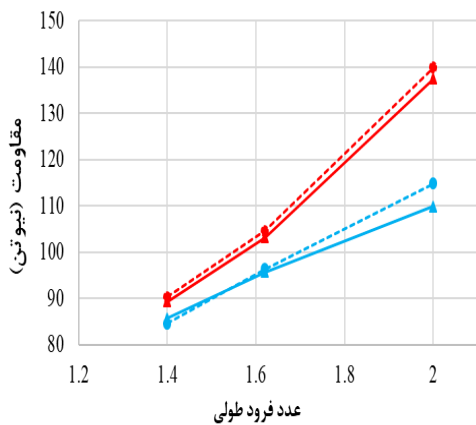
جدول ۶- تغییر مؤلفه‌های هیدرودینامیکی شناور با و بدون پله عرضی در تعداد مختلف شبکه برای عدد فرود طولی ۲

شناور مجهز به پله عرضی			شناور بدون پله عرضی			تعداد شبکه ($\times 10^3$)
سطح خیس (مترمربع)	تریم (درجه)	مقاومت (نیوتن)	سطح خیس (مترمربع)	تریم (درجه)	مقاومت (نیوتن)	
۰/۸۲۴	۲/۴	۱۰۲/۸۶	۰/۹۱	۲/۲۳	۱۳۵/۱	۵۴۰
۰/۸۵۶	۲/۴۹	۱۰۴/۳۹	۰/۹۳۹	۲/۳۷۶	۱۳۶/۹	۷۳۰
۰/۸۹۲	۲/۵۷	۱۰۴/۹۲	۰/۹۷۹	۲/۴۵	۱۳۷/۵	۱۹۴۰
۰/۸۹۵	۲/۵۸	۱۰۵/۱۱	۰/۹۸۲	۲/۴۶	۱۳۷/۷۱	۲۹۰۰

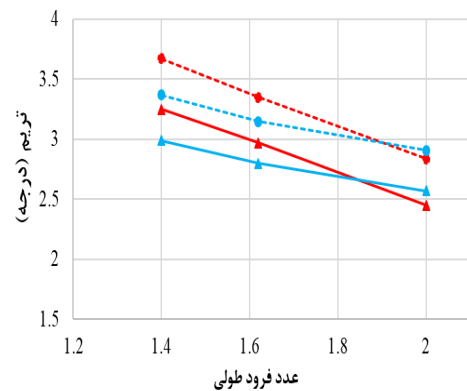
جدول ۷- خطای گسسته سازی مؤلفه‌های هیدرودینامیکی بر مبنای روش GCI

شناور مجهز به پله عرضی			شناور بدون پله عرضی			مشخصات	ردیف
سطح خیس	تریم	مقاومت	سطح خیس	تریم	مقاومت		
۰/۸۵۶	۲/۴۹	۱۰۵/۱۱	۰/۹۳۹	۲/۴۶	۱۳۷/۵	ϕ_1	۱

۰/۷۸۶	۲/۵۵	۱۰۴/۹۲	۰/۹۴۸	۲/۴۵	۱۳۶/۹	φ_2	۲
۰/۷۹۲	۲/۵۸	۱۰۴/۳۹	۰/۹۵۳	۲/۳۷۶	۱۳۵/۱	φ_3	۳
۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	F_{21}	۴
۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	۱/۴۱	F_{32}	۵
۰/۰۷	-۰/۰۶	-۰/۵۳	-۰/۰۰۹	-۰/۰۷۴	-۰/۰۶	ε_{21}	۶
-۰/۰۳۲	-۰/۰۹	-۱/۵۳	-۰/۰۲۹	-۰/۱۴۶	-۱/۸	ε_{32}	۷
۰/۶۹	۲/۵۵	۱۰۴/۹۲	۰/۹۴۸	۲/۴۵	۱۳۷/۵	φ_{21ext}	۸
۳/۵۸	۰/۱۴۶	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۹	۰/۱	۰/۰۰۵	ε_{21ext}	۹
۱/۹۵	۰/۱۸۳	۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۱	۰/۱۲۵	۰/۰۰۶۵	$GCI_{21medium}$	۱۰



الف: تغییرات مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف



ب: تغییرات تیریم شناور در اعداد فرود طولی مختلف

شکل ۵- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی

۵- بررسی و تحلیل نتایج

۵-۱- بررسی اثر تغییر زاویه پله بر مؤلفه‌های مقاومت

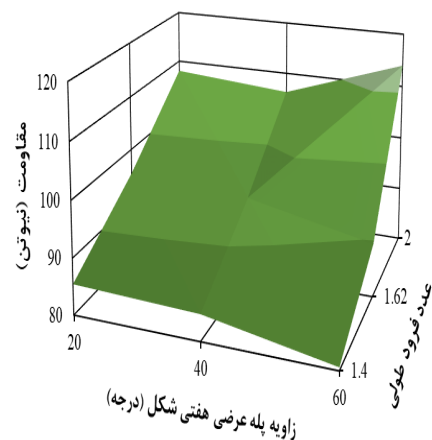
در این بخش تأثیر ایجاد زاویه در پله عرضی بر مقاومت شناور بررسی و تحلیل گردیده‌است که زاویه ایجاد شده در پله عرضی در دو حالت هفتی و هشتی شکل برای سه زاویه

پارامترها و روابط مربوط به روش شاخص همگرایی شبکه به طور کامل در مرجع [۳۲] ذکر گردیده‌است. نتایج مربوط به بررسی عدم قطعیت برای شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که مقدار GCI به دست آمده برای مولفه‌های مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی کمتر از ۱٪ است که بیانگر دقت قابل قبول شبکه‌بندی انجام شده در محاسبه مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور می‌باشد.

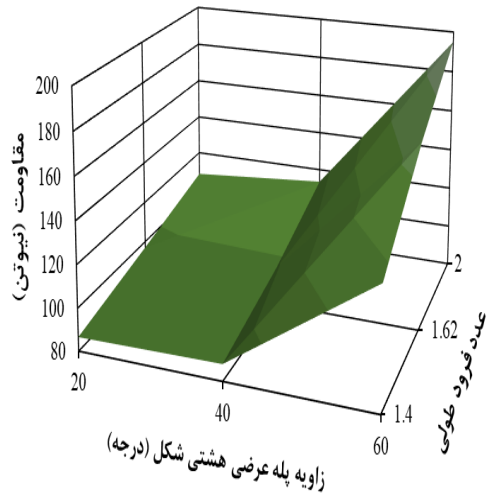
۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر نتایج حاصل از روش عددی و با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۳] برای شناور با و بدون پله عرضی به منظور اعتبار سنجی شبیه‌سازی عددی مقایسه شده‌است. در این راستا نتایج مربوط به مولفه‌های مقاومت و تیریم شناور با و بدون پله عرضی ارزیابی گردیده‌است. در شکل ۵ نتایج عددی و آزمایشگاهی در حالت‌های مذکور مورد مقایسه قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطای ایجاد شده در میزان مقاومت شناور با و بدون پله عرضی به ترتیب برابر ۱/۴٪ و ۱/۲٪ می‌باشد همچنین میزان تیریم شناور نسبت به نتایج آزمایشگاهی دقت مناسبی داشته‌است در نتیجه شبیه‌سازی حاضر به خوبی می‌تواند رفتار شناور را محاسبه و پیش‌بینی نماید و از دقت لازم برخوردار می‌باشد.

۲۰، ۴۰ و ۶۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی هفتی و هشتی شکل بر میزان مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در پله‌های هفتی شکل افزایش زاویه از ۲۰ به ۴۰ درجه موجب کاهش میزان مقاومت شناور در کلیه اعداد فرود طولی مورد بررسی گردیده است که علت آن افزایش میزان هوادهی ایجاد شده در کف شناور می‌باشد. میزان کاهش مقاومت شناور در دو زاویه مذکور نسبت به شناور با پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین در اعداد فرود مورد بررسی به ترتیب ۰٫۷۶٪ و ۲٪ کاهش یافته است. افزایش میزان زاویه ایجاد شده در پله عرضی به ۶۰ درجه، موجب افزایش ۳٫۲٪ میزان مقاومت شناور در عدد فرود طولی ۲ نسبت به شناور با پله عرضی بدون زاویه گردیده است که عامل آن کاهش قابل توجه میزان هوادهی در حالت مذکور می‌باشد. در پله‌های عرضی هشتی شکل میزان مقاومت شناور نسبت به پله‌های عرضی بدون زاویه افزایش یافته است به طوری که در زوایای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه میزان مقاومت به ترتیب ۱٫۱۵٪، ۲٫۷۵٪ و ۲۰٪ افزایش یافته است که عامل آن کاهش میزان هوادهی ایجاد شده در محل پله عرضی هشتی شکل می‌باشد. بر این مبنا پله عرضی هشتی شکل عملکرد مناسبی از لحاظ کاهش میزان مقاومت نداشته است. در نتیجه در حالت کلی از نقطه نظر کاهش میزان مقاومت، شناور با پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه عملکرد مناسبی نسبت به سایر موارد بررسی شده در کاهش میزان مقاومت شناور داشته است.



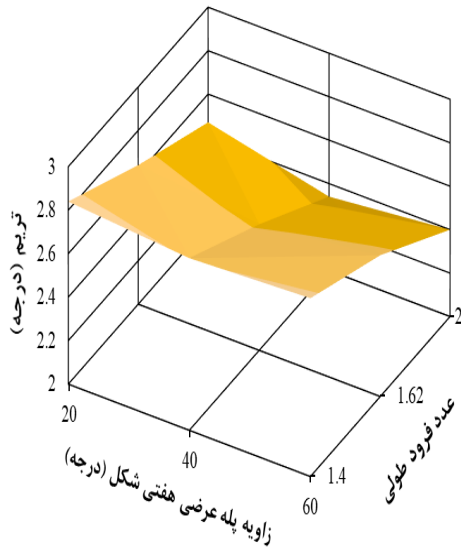
الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)



ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

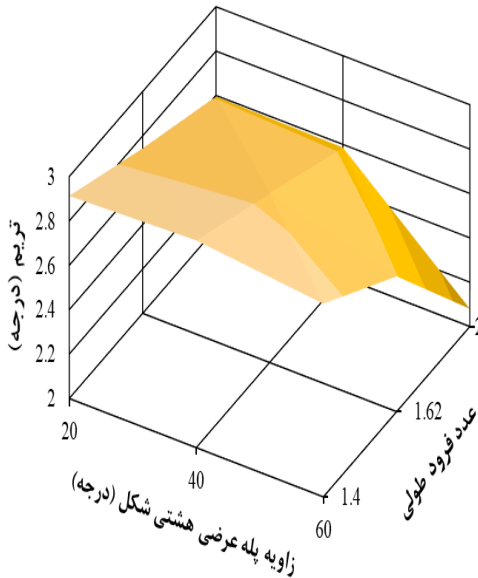
شکل ۶- تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان مقاومت شناور در اعداد فرود طولی مختلف

مقاومت کل وارد بر بدنه شناور شامل دو مؤلفه مقاومت فشاری (اختلاف فشار در سینه و پاشنه) و مقاومت اصطکاکی است. در شکل ۷ مولفه‌های مقاومت برای سه حالت شناور بدون پله، شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه و شناور با پله عرضی هفتی شکل در زاویه ۴۰ درجه (حالت بهینه پله عرضی زاویه‌دار) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن پله عرضی به شناور موجب افزایش میزان مقاومت فشاری وارد بر شناور گردیده است که عامل آن خط فشار ایجاد شده در پشت پله عرضی می‌باشد همچنین افزودن پله به بدنه شناور با ایجاد هوادهی و کاهش سطح خیس باعث کاهش میزان مقاومت اصطکاکی گردیده است. مقایسه مولفه‌های مقاومت برای شناور مجهز به پله عرضی با و بدون زاویه نشان می‌دهد که اضافه نمودن زاویه به پله عرضی تاثیر قابل توجهی بر میزان مقاومت فشاری نداشته است اما با کاهش بیشتر سطح خیس موجب کاهش مقاومت اصطکاکی گردیده است به طوری که مقاومت اصطکاکی در شناور با پله هفتی شکل (در زاویه بهینه ۴۰ درجه) نسبت به شناور با پله بدون زاویه به طور میانگین ۲٫۹۵٪ کاهش یافته است. بر این اساس پله عرضی هفتی شکل در ارتفاع، طول و زاویه بهینه با کاهش میزان سطح خیس شناور و افزایش هوادهی قادر به کاهش مقاومت اصطکاکی و به تبع آن مقاومت کل شناور می‌باشد.



2-2.2 ■ 2-2.4 ■ 2.4-2.6 ■ 2.6-2.8 ■ 2.8-3

الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)

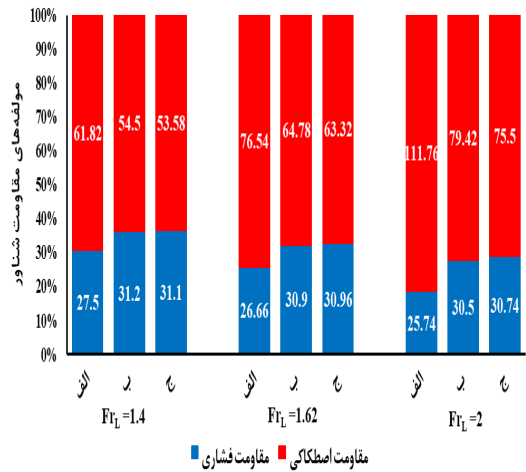


2-2.2 ■ 2.2-2.4 ■ 2.4-2.6 ■ 2.6-2.8 ■ 2.8-3

ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

شکل ۸- تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان تریم شناور در اعداد فرود طولی مختلف

مقاومت اصطکاکی در شناورهای تندرو سهم بیشتری در میزان مقاومت کل شناور دارد (شکل ۷). مهم‌ترین عامل در میزان مقاومت اصطکاکی شناور چگالی و لزجت بالای سیال آب می‌باشد که موثرترین راهبرد در کاهش آن، بیرون آوردن بدنه شناور از آب یا به عبارتی کاهش سطح خیس شناور است. در شکل ۹ میزان اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر تغییر سطح خیس وارد بر شناور نشان داده

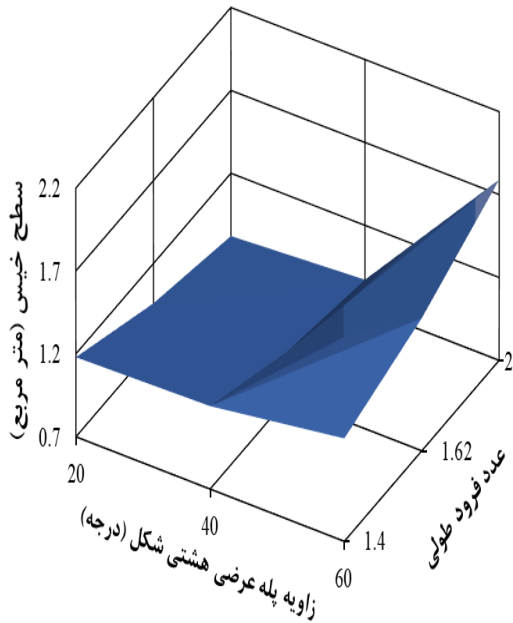


الف: شناور بدون پله عرضی ب: شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه ج: شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل
شکل ۷- سهم مقاومت فشاری و اصطکاکی در مقاومت کل شناور

۲-۵- تریم و سطح خیس شناور

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی شناور، تأثیر اضافه نمودن پله عرضی و بر غلتش شناور حول محور عرضی و همچنین تغییر سطح خیس کف شناور سنجیده شده است. در شکل ۸ تاثیر ایجاد زاویه در پله عرضی در اعداد فرود مختلف برای دو حالت پله عرضی هفتی و هشتی شکل بر میزان زاویه تریم شناور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت میزان زاویه تریم در هر دو حالت پله عرضی کاهش یافته است. در پله عرضی هفتی شکل با زاویه ۴۰ درجه میزان تریم از دو زاویه دیگر کمتر شده است و پله عرضی در این حالت عملکرد بهتری در کاهش حرکات شناور داشته است. همچنین با افزایش زاویه پله به ۶۰ درجه میزان اثرگذاری پله عرضی در ایجاد فشار در پاشنه شناور کمتر و تریم شناور نسبت به زاویه ۴۰ درجه افزایش یافته است. با افزایش زاویه در پله‌های عرضی هشتی شکل تریم شناور کاهش یافته است به طوری که در زاویه ۶۰ درجه تریم شناور نسبت به حالت بدون زاویه ۱۹٫۴٪ کاهش یافته است که این امر موجب افزایش قابل توجه میزان مقاومت گردیده است (شکل ۶ ب) لذا بکارگیری پله عرضی هشتی شکل عملکرد مناسبی بر بهبود رفتار هیدرو دینامیکی شناور نداشته است. همچنین با در نظر گرفتن تأثیر پله عرضی هفتی شکل بر کاهش میزان مقاومت و تریم شناور، زاویه ۴۰ درجه عملکرد مناسبی در بهبود حرکات شناور داشته است و میزان تریم شناور را نسبت به شناور بدون پله و شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین به ترتیب ۱۰٫۶٪ و ۴٫۸۷٪ کاهش داده است.

الف: پله‌های عرضی هفتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت پاشنه)

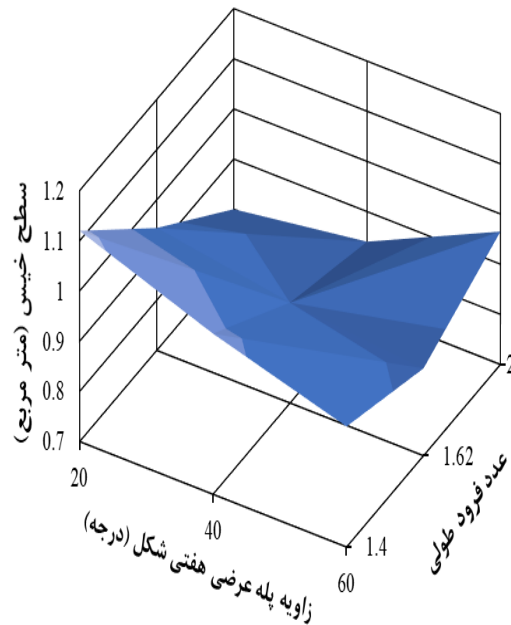


■ 1.7-2.2 ■ 1.2-1.7 ■ 0.7-1.2

ب: پله‌های عرضی هشتی شکل (زاویه پله‌های عرضی به سمت سینه)

شکل ۹- تاثیر تغییر زاویه پله‌های عرضی بر میزان سطح خیس شناور در اعداد فرود طولی مختلف

شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در پله‌های هفتی شکل کم‌ترین میزان سطح خیس مربوط به پله عرضی با زاویه ۴۰ درجه می‌باشد که در آن هوادهی بیشتری در محل پله ایجاد گردیده‌است و موجب کاهش میزان سطح خیس (شکل ۹ الف) و در پی آن کاهش مقاومت شناور در این حالت شده‌است (شکل ۶ الف). میزان کاهش سطح خیس شناور با پله عرضی هفتی شکل نسبت به پله عرضی بدون زاویه به‌طور میانگین معادل ۶/۹٪ است. در پله‌های عرضی با زاویه هشتی شکل هوادهی در محل پله عرضی ایجاد نشده‌است به همین علت سطح خیس شناور نسبت به سطح خیس کف شناور در حالت بدون زاویه افزایش یافته‌است (شکل ۹ ب). در نتیجه پله‌های عرضی با زاویه هشتی شکل تاثیری منفی بر کاهش سطح خیس شناور دارند و عملکرد مناسبی در بهبود مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور نداشته‌اند.

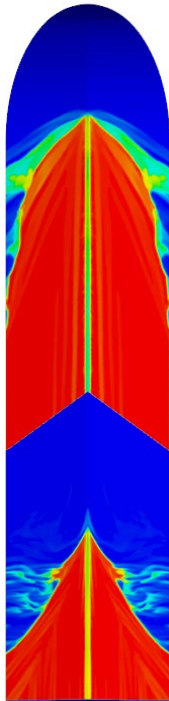


■ 1.1-1.2 ■ 1-1.1 ■ 0.9-1 ■ 0.8-0.9 ■ 0.7-0.8

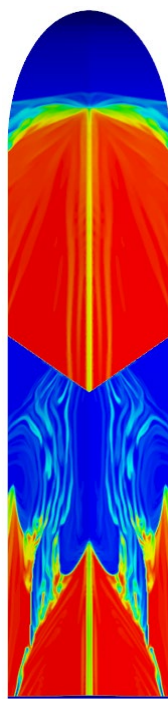
ایجاد نموده‌است که کاهش بیشتر مقاومت را در پی دارد. پله عرضی بدون زاویه نسبت به پله عرضی هشتی شکل مساحت هوادهی بیشتری در کف شناور ایجاد نموده‌است و سطح خیس شناور را کاهش داده‌است.

در شکل ۱۰ سطح خیس کف شناور بدون پله عرضی و شناور مجهز به پله عرضی با و بدون زاویه در عددی فرود طولی ۲ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که ایجاد پله به طور کلی با ایجاد هوادهی موجب کاهش سطح خیس کف شناور گردیده‌است. همچنین پله عرضی هفتی شکل هوادهی گسترده‌تری در کف شناور نسبت به دو حالت دیگر

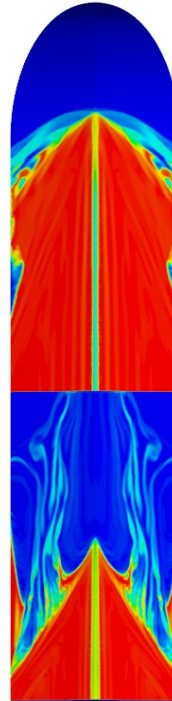
Volume Fraction of water



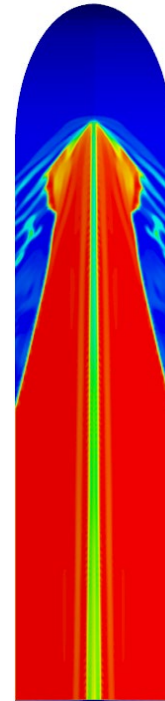
د: شناور با پله عرضی هشتی شکل با زاویه ۴۰ درجه



ج: شناور با پله عرضی هفتی شکل با زاویه ۴۰ درجه

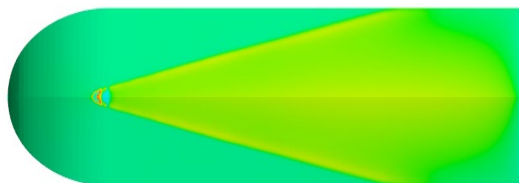


ب: شناور با پله عرضی بدون زاویه



الف: شناور بدون پله عرضی

شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل (شکل ۱۱ ج) فشاری بیشتری در انتهای شناور نسبت به سایر حالت‌های بررسی شده ایجاد نموده است که موجب کاهش بیشتر تریم در این حالت شده است که این عمل موجب افزایش پایداری طولی شناور و جلوگیری از ایجاد ناپایداری طولی پورپویزینگ در شناور گردیده است.



الف: شناور بدون پله عرضی

شکل ۱۰- سطح خیس کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۳-۵- توزیع فشار وارد بر کف شناور

جریان سیال در محل برخورد به بدنه شناور یک خط فشار ایجاد می‌نماید که موجب ایجاد تریم در شناور می‌گردد. با ایجاد پله عرضی در کف شناور جریان در محل پله عرضی از بدنه شناور جدا می‌گردد و پس از طی مسیری دوباره به بدنه شناور برخورد می‌کند و خط فشاری در پاشنه شناور ایجاد می‌نماید که این امر موجب ایجاد نیروی برا در پاشنه شناور و کاهش میزان تریم و افزایش پایداری طولی در شناور تندرو می‌گردد. در شکل ۱۱ کانتور توزیع فشار وارد بر کف شناور با و بدون پله عرضی در عدد فرود طولی ۲ نشان داده شده است. کانتور فشار مربوط به پله عرضی با زاویه ۴۰ درجه می‌باشد که نسبت به سایر زوایا از نقطه نظر میزان مقاومت، تریم و سطح خیس عملکرد بهتری داشته است. مشاهده می‌شود که ایجاد پله در بدنه شناور موجب ایجاد خط فشار در انتهای شناور شده است که این عمل موجب کاهش تریم شناور مجهز به پله عرضی گردیده است (شکل ۸). همچنین ایجاد پله عرضی در کف

• شناور مجهز به پله هفتی شکل نسبت به شناور با پله های بدون زاویه و پله هشتی شکل عملکرد بهتری در میزان کاهش مقاومت داشته است. به طوری که شناور مجهز به پله هفتی شکل در حالت بهینه (زاویه ۴۰ درجه پله عرضی) نسبت به شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه به طور میانگین در اعداد فرود مورد بررسی ۲ درصد مقاومت شناور را کاهش داده است.

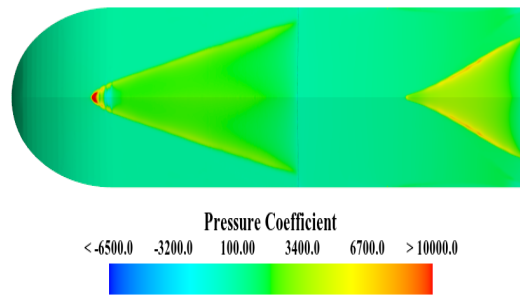
• شناور مجهز به پله عرضی هشتی شکل به نسبت پله های بدون زاویه و هفتی شکل عملکرد بهتری در کاهش میزان تریم شناور در زاویه ۶۰ درجه داشته است که این عمل موجب افزایش قابل توجه مقاومت شناور گردیده است و عملکرد هیدرودینامیکی شناور را کاهش داده است.

• شناور مجهز به پله عرضی هفتی شکل در حالت بهینه هوادهی گسترده تری به نسبت شناور با پله عرضی بدون زاویه و هشتی شکل در کف شناور ایجاد نموده است و عملکرد بهتری در کاهش میزان سطح خیس شناور داشته است.

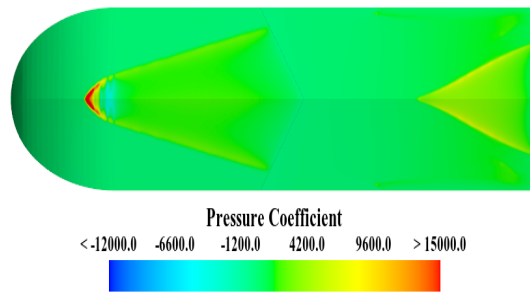
• خط فشار ایجاد شده در پاشنه شناور به واسطه ایجاد پله عرضی هفتی شکل نسبت به سایر حالت های پله عرضی (پله عرضی بدون زاویه و هشتی شکل) مقدار بیشتری داشته است که این عمل موجب کاهش میزان تریم شناور و بهبود پایداری طولی گردیده است.

۷- مراجع

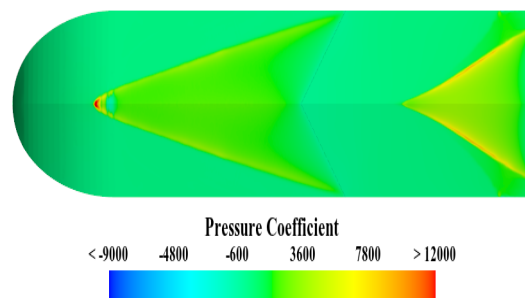
- [1] A. Ebrahimi, R. Shafaghat, A. Hajiabadi, and M. Yousefifard, "Numerical and Experimental Investigation of the Aero-Hydrodynamic Effect on the Behavior of a High-Speed Catamaran in Calm Water," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 21, no. 3, pp. 56–70, 2022, doi: 10.1007/s11804-022-00295-6.
- [2] S. Park *et al.*, "Single- and two-phase CFD V&V for high-speed stepped planing hulls," *Ocean Eng.*, vol. 261, p. 112047, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112047.
- [3] and E. S. H. John R. Dawson RM, "Effect of varying depth of step, angle of after body kell, length of after body



ب: شناور با پله عرضی بدون زاویه



ج: شناور با پله عرضی هفتی شکل



د: شناور با پله عرضی هشتی شکل

شکل ۱۱- کانتور فشار وارد بر کف شناور در عدد فرود طولی ۲

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش میزان اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار دینامیکی شناور تندرو مورد ارزیابی قرار گرفته است که برای نیل به این هدف در گام اول با استفاده از روش عددی میزان مقاومت و تریم شناور بدون پله عرضی و شناور مجهز به پله عرضی بدون زاویه محاسبه شده است. با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی گردیده است. سپس با توسعه روش عددی میزان و نحوه اثرگذاری ایجاد زاویه در پله عرضی بر رفتار هیدرودینامیکی و پایداری طولی شناور ارزیابی گردیده است. در این راستا دو حالت پله عرضی زاویه دار به سمت سینه یا هشتی شکل و پله عرضی زاویه دار به سمت پاشنه یا هفتی شکل در نظر گرفته شده است که در سه عدد فرود طولی ۱/۴، ۱/۶۲ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته اند. مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- doi: 10.1007/s11804-020-00182-y.
- [12] F. Cucinotta, E. Guglielmino, and F. Sfravara, "A critical CAE analysis of the bottom shape of a multi stepped air cavity planing hull," *Appl. Ocean Res.*, vol. 82, pp. 130–142, 2019, doi: 10.1016/j.apor.2018.11.003.
- [13] A. Najafi, H. Nowruzi, M. J. Ameri, and M. Karami, "An experimental study of the wetted surfaces of two- stepped planing hulls," *Ocean Eng.*, vol. 222, p. 106164, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108589.
- [14] P. Ghadimi, S. Panahi, and S. Tavakoli, "Hydrodynamic study of a double-stepped planing craft through numerical simulations," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1007/s40430-018-1501-1.
- [15] A. Najafi and H. Nowruzi, "On hydrodynamic analysis of stepped planing crafts," *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 238–251, 2019, doi: 10.1016/j.joes.2019.04.007.
- [16] S. M. Sajedi and P. Ghadimi, "Experimental investigation of the effect of two steps on the performance and longitudinal stability of a mono-hull high-speed craft," *Cogent Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 1790980, 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1790980.
- [17] S. M. Sajedi and P. Ghadimi, "Experimental and Numerical Investigation of Stepped Planing Hulls in Finding an Optimized Step Location and Analysis of Its Porpoising Phenomenon," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/3580491.
- [18] L. Vitiello, S. Mancini, R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, F. De Luca, and V. Nappo, "A comprehensive stepped planing hull systematic series: Part 1 - Resistance test," *Ocean Eng.*, vol. 266, p. 112242, 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112242.
- [19] G. Fridsma, "A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats," Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Davidson Lab, 1969. [Online]. Available: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0708694>
- [20] A. M. Javad, A. D. A. Hossein, N. Amin, chine, and Gross," *load. Lagley Meml. Aeronaut. Lab. Langley Field, VA.*
- [4] D. Savitsky and M. Morabito, "Surface wave contours associated with the forebody wake of stepped planing hulls," *Mar. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–16, 2010, doi: 10.5957/mtsn.2010.47.1.1.
- [5] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Shenoi, "Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls-part 1: performance in calm water," *Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 152, pp. 55–75, 2010.
- [6] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Shenoi, "Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls - part II: Performance in waves," *Trans. R. Inst. Nav. Archit. Part B Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 153, no. 1, pp. 55–75, 2011, doi: 10.3940/rina.ijset.2011.b1.97.
- [7] W. R. Garland and K. J. Maki, "A numerical study of a two-dimensional stepped planing surface," *Trans. - Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.*, vol. 120, no. 02, pp. 545–557, 2013, doi: 10.5957/jspd.2012.28.2.60.
- [8] S. T. G. Veysi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, and M. Ghiasi, "Toward numerical modeling of the stepped and non-stepped planing hull," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 37, no. 6, pp. 1635–1645, 2015, doi: 10.1007/s40430-014-0266-4.
- [9] H. Nourghasemi, M. Bakhtiari, and H. Ghassemi, "Numerical study of step forward swept angle effects on the hydrodynamic performance of a planing hull," *Sci. Journals Marit. Univ. Szczecin*, vol. 51, no. 123, pp. 35–42, 2017.
- [10] H. Kazemi, M. Salari, H. Nowruzi, and A. Najafi, "Hydrodynamics analysis of stepped planing hull under different physical and geometrical conditions," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 9, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1866-9.
- [11] H. Kazemi, M. M. Doustdar, A. Najafi, H. Nowruzi, and M. J. Ameri, "Hydrodynamic Performance Prediction of Stepped Planing Craft Using CFD and ANNs," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 67–84, 2021,

- tehnike. 2015;66(4):1-22.”
- [31] F. De Luca, S. Mancini, S. Miranda, and C. Pensa, “An extended verification and validation study of CFD simulations for planing hulls,” *J. Sh. Res.*, vol. 60, no. 2, pp. 101–118, 2016, doi: 10.5957/JOSR.60.2.160010.
- [32] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 7, pp. 0780011–0780014, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.
- [33] L. F. Richardson, “IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam,” *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character*, vol. 210, no. 459–470, pp. 307–357, 1911, doi: 10.1098/rsta.1911.0009.
- and K. Hamid, “Effect of Angle Change in the Aft-Wise Transverse Step on the Hydrodynamic Performance of Planing Hulls,” *J. Mar. Sci. Appl.*, pp. 1–11, 2025, doi: 10.1007/s11804-025-00642-3.
- [21] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [22] F. Stern, J. Yang, Z. Wang, H. Sadat-Hosseini, and M. Mousaviraad, “Computational ship hydrodynamics: Nowadays and way forward,” *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 60, no. 1–4, pp. 3–105, 2013, doi: 10.3233/ISP-130090.
- [23] X. Bi, J. Zhuang, and Y. Su, “Seakeeping analysis of planing craft under large wave height,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, p. 1020, 2020, doi: 10.3390/W12041020.
- [24] ITTC, “9.1.0 Practical Guidelines for Ship CFD Applications,” 2011.
- [25] Siemens, “PLM STAR-CCM+ software user’s guide version 16.04, Siemens CD-adapco.”
- [26] “ITTC, Practical guidelines for ship CFD applications, in (7.5-03-02-03). Revision-01. 2011”.
- [27] J. Suneela, P. Krishnankutty, and V. A. Subramanian, “Hydrodynamic performance of planing craft with interceptor-flap hybrid combination,” *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 421–438, 2021, doi: 10.1007/s40722-021-00211-0.
- [28] P. M. Carrica, R. V. Wilson, R. W. Noack, and F. Stern, “Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids,” *Comput. Fluids*, vol. 36, no. 9, pp. 1415–1433, 2007, doi: 10.1016/j.compfluid.2007.01.007.
- [29] A. De Marco, S. Mancini, S. Miranda, R. Scognamiglio, and L. Vitiello, “Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull,” *Appl. Ocean Res.*, vol. 64, pp. 135–154, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.02.004.
- [30] “Begovic E, Bertorello C, Mancini S. Hydrodynamic performances of small size swath craft. Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske

افزایش مقدار JSRmin در اخلاص گره‌های فریبنده با استفاده از

کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال LFM ورودی

کاظم غفاری^۱، یاسر نوروزی^۲، پوریا اعتضادی فر^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، petezadifar@ihu.ac.ir

چکیده:

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون فن‌آوری راداری و پیچیدگی الگوریتم‌های آشکارسازی، طراحی سیگنال‌های فریب برای اختلال در رادارهای مدرن، اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این مقاله، ابتدا سیگنال‌های راداری موجود تحلیل شده و ویژگی‌های کلیدی آنها استخراج می‌شود سپس تکنیک‌های شیفت فرکانسی و شیفت زمانی به عنوان روش‌های اصلی در تولید سیگنال فریب، معرفی می‌گردند. در ادامه، تاثیر کاهش تعداد نمونه‌های ورودی سیگنال LFM بر روی مقادیر JSRmin و نسبت توان حداکثر به توان متوسط (PAPR) بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش تعداد نمونه‌ها تا نصف، منجر به افزایش چشم‌گیر مقدار JSRmin می‌شود. این امر می‌تواند به عنوان یک رویکرد نوآورانه در طراحی سیگنال‌های فریب مورد استفاده قرار گیرد. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بیانگر آن است که سیگنال‌های فریب طراحی شده توانایی بالایی در ایجاد اختلال در رادارهای دشمن و کاهش دقت شناسایی اهداف دارند. در پایان، ضمن بررسی چالش‌ها، ضرورت توسعه روش‌های نوین برای مقابله با رادارهای پیشرفته آینده مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

اختلال، سیگنال فریب، LFM، اخلاص گر، JSRmin، PAPR، شیفت فرکانسی، شیفت زمانی، فیلتر منطبق

Increasing the value of JSRmin in deceptive disruptors by reducing the number of samples of the input LFM signal

Kazem Ghaffari¹, Yaser Norouzi², *Pouria Etezadifar³

1-PhD student, Faculty of Electrical Engineering, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

2-Assistant professor, faculty of electrical engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

3-Assistant professor, faculty of electrical and computer engineering, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

Abstract:

Given the rapid advances in radar technology and the growing complexity of detection algorithms, the design of deceptive signals to interfere with modern radars has become especially important. In this paper, existing radar signals are first analyzed and their key characteristics extracted; then frequency-shift and time-shift techniques are introduced as the primary methods for generating deceptive signals. Next, the effect of reducing the number of input samples of an LFM signal on the values of JSRmin and the peak-to-average power ratio (PAPR) is examined. Simulation results show that halving the number of samples leads to a significant increase in JSRmin. This effect can be employed as an innovative approach in the design of deceptive signals. Laboratory and simulation results indicate that the designed deceptive signals are highly capable of jamming adversary radars and degrading target detection accuracy. Finally, while discussing the challenges, the paper confirms the necessity of developing novel methods to counter future advanced radars.

Keywords:

Disruption, deception signal, LFM, disruptor, JSRmin, PAPR, frequency shift, time shift, matched filter.

*Responsible Author's E-mail: petezadifar@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

با گذشت زمان و پیشرفت فن آوری، رادارهای مدرن قادر به شناسایی و مقابله با سیگنال‌های فریب به صورت هوشمندانه‌تری هستند. بنابراین، تکنیک‌های جدید برای تولید سیگنال فریب نیز باید توسعه یابند. تکنیک‌های طراحی سیگنال فریب مجموعه‌ای از روش‌های پیچیده و دقیق را در برمی‌گیرد که نیاز به دانش عمیق در حوزه الکترونیک، پردازش سیگنال و سیستم‌های راداری دارد. این فن‌آوری‌ها نقش مهمی در استراتژی‌های نظامی و امنیتی ایفا می‌کنند و به کاهش توانایی‌های راداری دشمن کمک می‌کنند.

در طراحی سیگنال فریب راداری با استفاده از تکنیک DRFM¹، سیگنال رادار دشمن توسط سیستم اخلاص‌گر نیروهای خودی دریافت می‌گردد و بعد از تبدیل شدن به سیگنال دیجیتال توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال، (ADC²)، در حافظه سیستم ذخیره می‌گردد و در زمان مناسب به سمت گیرنده دشمن تابانده می‌شود [۱]. به صورت کلی در ابتدا، سیگنال راداری که از طرف دشمن دریافت می‌شود، باید شناسایی و تحلیل گردد. این شامل شناسایی فرکانس‌های اصلی، نرخ تکرار پالس، الگوی مدولاسیون و سایر ویژگی‌های سیگنال است. فهمیدن زمان‌بندی و الگوی ارسال سیگنال‌های دشمن دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا می‌تواند به طراحی سیگنال فریب کمک کند. بعد از تحلیل سیگنال راداری، می‌توان آن را با استفاده از تکنیک‌های مختلف دچار شیفت فرکانسی نمود. این بدین معنا است که فرکانس سیگنال به طور مصنوعی تغییر یابد تا رادار دشمن نتواند آن را به عنوان سیگنال خاصی شناسایی کند. علاوه بر شیفت فرکانسی، نگاشت زمانی سیگنال نیز می‌تواند در طراحی سیگنال فریب به کار رود [۱]. این روش می‌تواند با تأخیر یا پیشرفت در سیگنال، باعث شود که سیگنال فریب به طور غیرمترقبه‌ای رفتار کند. سیگنال فریب شکل گرفته باید به نحوی طراحی شود که به نظر برسد یک سیگنال واقعی است و می‌تواند رادار دشمن را به اشتباه بیندازد. پس از تشکیل، سیگنال فریب به سمت رادار دشمن ارسال می‌شود. این مرحله ممکن است به کاهش سطح

سیگنال و یا استفاده از تکنیک‌های پوشش‌دهی وابسته باشد تا احتمال شناسایی سیگنال فریب توسط سیستم‌های راداری دشمن را کاهش دهد. پس از ارسال سیگنال فریب، باید اثر آن بر روی رادار دشمن دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد تا وضعیت و شرایط تغییر یافته شناسایی شود [۲].

سیگنال رادار دشمن می‌تواند دارای شکل‌های مختلفی مانند کد شده فازی، LFM و ... باشد. در این تحقیق سیگنال رادار دشمن از نوع LFM در نظر گرفته شده است [۲].

در یک DRFM سیگنال رادار دشمن نخست وارد آنتن گیرنده می‌شود و پس از کاهش فرکانس³ جهت ساده‌تر شدن اعمال پردازشی و نمونه‌برداری، وارد یک مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شود. علت این امر در ماهیت دیجیتالی بودن واحد حافظه است. سیگنال دیجیتال سپس وارد حافظه می‌شود و پس از اعمال تأخیر زمانی دلخواه، به واحد مبدل دیجیتال به آنالوگ انتقال داده می‌شود تا به ماهیت آنالوگ خود بازگردانده شود. سیگنال آنالوگ فرکانس پایین پس از این مرحله وارد یک ضرب‌کننده شده و فرکانس آن افزایش می‌یابد و مجدداً فرکانس اولیه خود را بدست می‌آورد. پس از این مرحله سیگنال وارد یک تقویت‌کننده شده و از طریق یک فرستنده به سمت رادار قربانی ارسال می‌شود. با توجه به اینکه رادار، فاصله و سرعت هدف را از اختلاف فاز موج برگشتی نسبت به موج اصلی بدست می‌آورد، لذا با ذخیره موج رادار و اعمال شیفت زمانی و فرکانسی به اندازه دلخواه به آن و ارسال مجدد آن به سمت رادار، می‌توان رادار را در شناسایی دقیق فاصله و سرعت هدف دچار فریب و اختلال نمود. همچنین می‌توان با استفاده از اعمال سیگنال فریب از طریق گلبرگ⁴های فرعی رادار، در زاویه واقعی هدف نیز اختلال ایجاد کرد. همان‌گونه که می‌دانیم آنتن رادار دارای گلبرگ اصلی و فرعی می‌باشد و در جهت گلبرگ اصلی دارای بیشترین توان ارسال و متعاقباً دریافت سیگنال است. در یک رادار مناسب و ایده‌آل گلبرگ‌های فرعی باید از بین بروند. اصولاً وقتی رادار سیگنالی را دریافت می‌کند فرض را بر این قرار

³ Down Convert

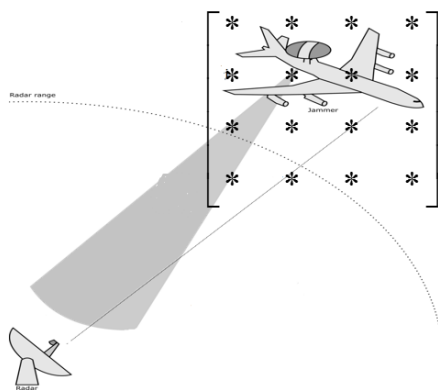
⁴ Lobe

¹ Digital Radio Frequency Memory

² Analog to Digital Convertor

جعلی از طرف اخلاص گر، مقدار نسبت توان حداکثر لحظه‌ای به توان میانگین ($PAPR^2$) در تقویت‌کننده سیگنال نیز افزایش خواهد یافت [۳].

که این موضوع باعث اتلاف هر چه بیشتر توان و اعوجاج غیرخطی در تقویت‌کننده توان اخلاص گر خواهد شد و این حالت مد نظر ما نمی‌باشد. از طرفی با کاهش تعداد اهداف جعلی، هدف واقعی خودی نخواهد توانست به راحتی خود را در بین اهداف جعلی پنهان نموده و از دید رادار دشمن محو نماید. لذا باید در تولید اهداف جعلی در بخش اخلاص گر یک حالت بهینه بدست آورده شود.



شکل ۱- پنهان شدن هدف واقعی در بین اهداف جعلی [۷]

بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت با گسترش روزافزون فن‌آوری‌های راداری و افزایش پیچیدگی الگوریتم‌های پردازش سیگنال، نیاز به روش‌های نوین اختلال و فریب، بیش از پیش احساس می‌شود. سیستم‌های راداری مدرن قادرند با استفاده از پردازش‌های پیچیده و الگوریتم‌های هوشمند، سیگنال‌های دریافتی را تحلیل کرده و اهداف واقعی را از سیگنال‌های جعلی تفکیک نمایند. در چنین شرایطی، طراحی سیگنال‌های فریب که توانایی تغییر ویژگی‌های اصلی سیگنال نظیر فرکانس، زمان و دامنه را داشته باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

می‌دهد که در خط دید خود یعنی گلبرگ اصلی سیگنال بازتابی را دریافت کرده است نه در گلبرگ فرعی، چرا که تقویت از طرف گلبرگ فرعی بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر کردن است [۱]. حال اگر سیستم اخلاص گر خودی بعد از رد شدن بیم اصلی رادار از روی خود با سیگنال قوی تولیدی توسط DRFM، رادار دشمن را از سمت گلبرگ فرعی نشانه رود چه اتفاقی خواهد افتاد؟ رادار فرض را بر این می‌گذارد که این سیگنال قوی از سمت بیم اصلی وارد شده است و هدف را در خط دید خود آشکار می‌کند. یک رادار معمولی اساساً قادر به تشخیص ورود سیگنال از گلبرگ فرعی نخواهد بود؛ پس با کوچک‌تر کردن و از بین بردن گلبرگ فرعی در آنتن رادار می‌توان مزایای زیر را به رادار اضافه نمود:

- ۱- از اتلاف توان جلوگیری می‌شود.
 - ۲- شانس یک موشک ضدتشنع ARM برای یافتن رادار کم می‌شود زیرا فقط باید یک بیم باریک مثلاً دو درجه‌ای را پیدا کند و موقعیت رادار را تشخیص دهد نه آنکه به علت وجود گلبرگ فرعی از هر جهت دلخواه موقعیت رادار را استخراج کند.
 - ۳- سیگنال فریب زاویه توسط رادار دریافت نخواهد شد.
 - ۴- سیگنال اخلاص از مسیری امن و خارج از خط دید بیم اصلی نمی‌تواند وارد رادار شود.
- با استفاده از روش‌های زیر می‌توان گلبرگ فرعی آنتن رادار را حذف نمود.

- ۱- استفاده از حذف‌کننده گلبرگ فرعی (SLC^1).
- ۲- بکارگیری آنتن‌های چندآرایه‌ای (به جای آنتن تک جهته) جهت تشخیص دقیق جهت ورود سیگنال به رادار.
- ۳- تلاش هرچه بیشتر برای طراحی آنتن دقیق و بدون گلبرگ فرعی [۱].

در این تحقیق، برای افزایش کارایی اخلاص گر در فریب رادار دشمن، از چندین سیگنال جعلی استفاده شده است [۲]. با افزایش ارسال چندین هدف جعلی از سمت اخلاص گر به سمت رادار، هواپیمای خودی به راحتی می‌تواند خود را در بین اهداف جعلی پنهان نموده و در نتیجه از دید رادار دشمن محو شود اما نکته‌ای که در اینجا مطرح است این است که تا چه اندازه می‌توان تعداد اهداف جعلی را افزایش داد؟ زیرا با افزایش تعداد اهداف

² Peak to Average Power Ratio

¹ Side Lobe Canceler

۲- اختلال فریبنده با شیفت فرکانسی در رادارهای

LFM

برای بررسی اختلال‌گری فریبنده با شیفت فرکانسی در رادارهای فشرده‌سازی پالس مدوله‌شده با فرکانس خطی، می‌توان از سه نوع سیگنال اختلال‌گر بهره برد [۴]:

- ۱- اختلال‌گری تک هدف جعلی.
- ۲- اختلال‌گری چند هدف جعلی.
- ۳- اختلال‌گری پوششی چندگانه.

تکنولوژی فشرده‌سازی پالس به‌طور وسیعی در رادارهای مدرن امروزی مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوع سیگنال‌ها، عرض پالس می‌تواند به چند صد یا چند هزار میکروثانیه کاهش یابد. این تکنولوژی نسبت فشرده‌سازی بالایی را تحقق می‌بخشد که می‌تواند نسبت سیگنال به نویز را افزایش دهد و تقریباً به‌طور هم‌زمان اختلال را محدود کند. بنابراین، ایجاد اختلال در رادارهای فشرده‌سازی پالس دشوار است. روش‌های اصلی برای ایجاد اختلال در رادارهای LFM شامل اختلال‌گری با پوشش نویز، اختلال‌گری فریبنده بر اساس فاصله و اختلال‌گری فریبنده بر اساس سرعت هستند. این نوع اختلال‌گری‌ها عمدتاً مبتنی بر حافظه فرکانس رادیویی دیجیتال (DRFM) می‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی DRFM، روش‌های اختلال‌گری مبتنی بر DRFM به‌طور فزاینده‌ای متنوع شده‌اند؛ مانند اختلال‌گری با تأخیر زمانی و اختلال‌گری با هدف‌های جعلی چندگانه بر اساس فاصله-داپلر، و اختلال‌گری ترکیبی.

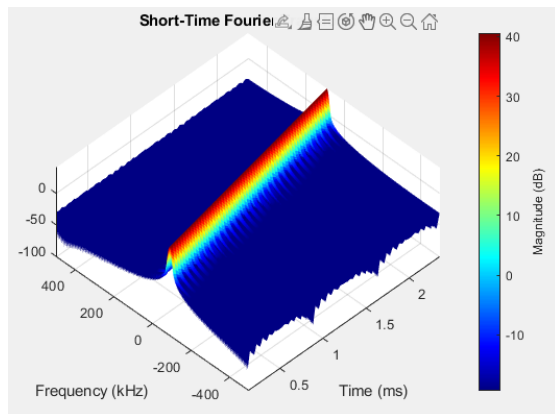
سیگنال‌های LFM رادار که توسط سیستم اختلال‌گر فریبنده دریافت می‌گردند، پس از اینکه توسط سیستم DRFM موجود در اختلال‌گر، شیفت فرکانسی و شیفت زمانی مناسب به آنها اعمال گردید، به سمت رادار دشمن باز فرستاده می‌شوند. با توجه به اینکه سیگنال فریبنده دریافت شده توسط رادار، از جنس خود سیگنال رادار می‌باشد لذا این سیگنال از داخل فیلتر منطبق^۱ رادار عبور نموده و هیچ‌گونه ممانعتی جهت عبور آن به وجود نخواهد آمد [۱].

۳- خروجی برگشتی هدف پس از فیلتر تطبیقی

سیگنال فرستنده رادار LFM را می‌توان با معادله (۱) توصیف نمود [۵].

$$u(t) = e^{j\pi\mu t^2} \quad |t| < \frac{T}{2} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، T عرض پالس و $\mu = \frac{B}{T}$ شیب مدولاسیون فرکانس و B پهنای باند سیگنال است.



شکل ۲- سیگنال LFM در حوزه فرکانس

هنگامی که $BT \ll 1$ باشد، طیف فرکانسی سیگنال فرستنده LFM به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$U(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} e^{-j\pi\frac{f^2}{\mu} + j\frac{\pi}{4}} \quad -\frac{B}{2} < f < \frac{B}{2} \quad (2)$$

پاسخ فیلتر تطبیقی رادارهای LFM را می‌توان به صورت معادله (۳) بیان کرد.

$$h(t) = c \cdot u(t - t_0)^* \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، t_0 تاخیر زمانی است که قابلیت فیلتر تطبیقی را تضمین می‌کند. از رابطه (۳) پاسخ فرکانسی فیلتر منطبق به صورت رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$H(f) = c \cdot U^*(f) e^{-j2\pi f t_0} = c \cdot e^{-j(2\pi f t_0 - \pi\frac{f^2}{\mu} + \frac{\pi}{4})} \quad -\frac{B}{2} < f < \frac{B}{2} \quad (4)$$

اگر سیگنال برگشتی از هدف را به صورت رابطه (۵) نمایش دهیم خواهیم داشت:

$$r(t) = k u(t - \frac{2R}{c}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)، k ضریب کاهش دامنه سیگنال برگشتی از هدف و R فاصله بین رادار تا هدف و c سرعت نور است. اگر فرض کنیم $r(t) = u(t)$ ، بنابراین خروجی برگشتی هدف بعد از فیلتر منطبق از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

^۱ Matched Filter

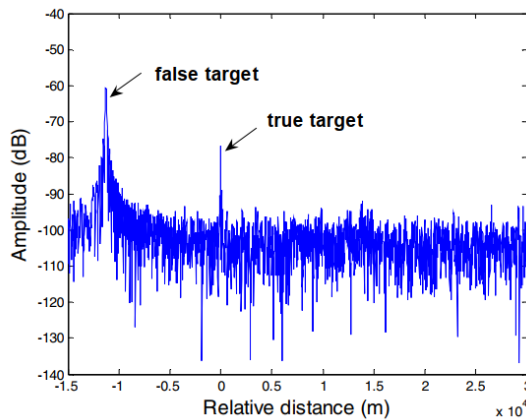
نخواهیم داشت و وقتی که $f_j < B$ باشد، خروجی بعد از فیلتر منطبق برابر خواهد بود با:

$$s_j(t) = \frac{c}{\sqrt{\mu}} (B - f_j) \cdot \text{sinc}[\pi(B - f_j)(t - t_0 + \frac{f_j}{\mu})] \cdot e^{j\pi f_j(t - t_0)} \quad (10)$$

در رابطه بالا هدف جعلی در $t = t_0 + \frac{f_j}{\mu}$ ظاهر می‌شود.

پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس رادار واقعی به شکل زیر تنظیم شده‌اند:

- ۱- توان فرستنده رادار (P_r)، ۶۰ دسیبل معادل یک مگاوات.
 - ۲- طول موج (λ)، ۰.۰۳ متر.
 - ۳- بهره آنتن رادار (G_r)، ۴۰ دسی‌بل.
 - ۴- عرض پالس (τ)، ۴ میکروثانیه.
 - ۵- نرخ تکرار پالس (PRI)، ۳ میکروثانیه.
 - ۶- فرکانس برابر ۱ مگاهرتز.
 - ۷- نسبت سیگنال به نویز در گیرنده رادار ۶ دسی‌بل.
 - ۸- فرکانس اخلاص‌گر برابر ۴ مگاهرتز.
- در سه حالت گفته شده شبیه‌سازی با شرایط بالا انجام شده است.



شکل ۳- اخلاص‌گر از نوع تک هدف جعلی

در شکل شماره (۳) مشاهده می‌شود که هدف جعلی حدود ۱۱/۵ کیلومتر جلوتر از هدف واقعی قرار دارد. و حداکثر توان هدف جعلی ۲۴ دسیبل قوی‌تر از هدف واقعی است.

❖ اگر اخلاص‌گر از نوع چند هدف جعلی^۴ باشد.

$$s_i(t) = u(t) * h(t) = \text{IFFT} \{ \text{FFT}[u(t)] \cdot \text{FFT}[h(t)] \} \quad (6)$$

بعد از حل معادله (۶) خواهیم داشت:

$$s_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(f) H(f) e^{j2\pi f t} df = \quad (7)$$

$$\frac{c}{\sqrt{\mu}} B \cdot \text{sinc}[\pi B(t - t_0)]$$

هدف در زمان مشخص t_0 ظاهر می‌شود. رابطه (۷) نشان می‌دهد که اکوی هدف پس از فیلتر منطبق به چند عامل بستگی دارد.

۱- μ : نشان دهنده این است که فرکانس با چه سرعتی تغییر می‌کند.

۲- B : پهنای باند فرکانسی که سیگنال اشغال می‌کند.

۳- t_0 : زمان تاخیر. تاخیری که به دلیل مسافت بین رادار و هدف به وجود می‌آید.

۴- دامنه فیلتر منطبق. که نشان دهنده میزان تقویت و تضعیف سیگنال توسط فیلتر منطبق است.

این جملات به این معناست که هنگام بررسی اکوی هدف پس از اعمال فیلتر تطبیقی، ویژگی‌های مربوط به مدولاسیون فرکانس، پهنای باند سیگنال، تقویت فیلتر و زمان تأخیری که سیگنال طی کرده، نقش مهمی در کیفیت و دقت اطلاعات حاصل از اکوی هدف ایفا می‌کنند [۵].

❖ اگر اخلاص‌گر از نوع تک هدف جعلی^۱ باشد.

در این حالت معادله سیگنال دریافت شده توسط رادار برابر خواهد بود با:

$$u_j(t) = e^{j2\pi f_j t + j\pi \mu t^2} \quad |t| < \frac{T}{2} \quad (8)$$

که f_j فرکانس اخلاص‌گر فریبنده است. وقتی که $f_j > 0$ باشد، سیستم اخلاص‌گر از نوع شیفت به جلو^۲ و اگر $f_j < 0$ باشد سیستم اخلاص‌گر از نوع شیفت به عقب^۳ محسوب می‌گردد. در این حالت طیف سیگنال اخلاص‌گر برابر خواهد بود با:

$$U_j(f) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} e^{-j\pi \frac{(f - f_j)^2}{\mu} + j\frac{\pi}{4}} \quad f_j - \frac{B}{2} < f < f_j + \frac{B}{2} \quad (9)$$

از رابطه (۹) مشاهده می‌شود که اگر $f_j > B$ باشد، فیلتر منطبق، خروجی نخواهد داشت و بنابراین هدف جعلی نیز

¹ Single False Target Jamming

² Forward Shifting Jamming

³ Backward Shifting Jamming

⁴ Multi False Target Jamming

می‌شود و فاصله‌های مربوطه به جلو ۱/۸۷۵ کیلومتر، ۳/۳۷۵ کیلومتر، ۴/۸۷۵ کیلومتر و ۶/۳۷۵ کیلومتر است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

❖ اگر اخلاخل گر از نوع پوششی چندگانه باشد.

در این حالت پالس به چندین قسمت تقسیم می‌شود و سپس بر روی هر قسمت فرکانس مدوله شده‌ای به صورت خطی اعمال می‌شود. این فرآیند منجر به ایجاد چندین هدف جعلی می‌شود و هر هدف جعلی یک دامنه خاص را در حوزه فرکانس پوشش می‌دهد. این نوع اخلاخل‌گری به دلیل پوشش دامنه‌های مختلف فرکانسی، برای مختل کردن عملکرد رادار بسیار موثرتر است [۴].
 اخلاخل‌گری از نوع پوششی چندگانه با استفاده از رابطه (۱۵) بیان می‌شود.

$$u_{jn}(t) = e^{j2\pi f_{j0}t + j\pi(\mu + \mu_j)t^2} \quad (15)$$

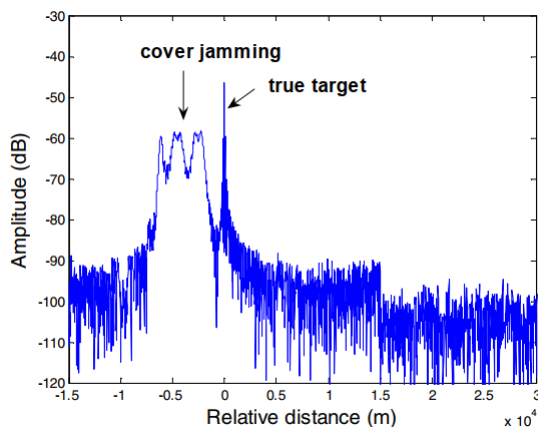
$$t \in \left(-\frac{T}{2} + \frac{n-1}{N}T, -\frac{T}{2} + \frac{n}{N}T\right)$$

در رابطه (۱۵) داریم:

$$f_{j0} = f_{j0} + (n-1)\Delta f_j \quad n=1,2,3,\dots,N$$

در این حالت تعداد سیگنال‌های اخلاخل پوششی برابر است با:

$$N_{ft} = \text{ceil}\left(\frac{B-f_{j0}}{(\mu + \mu_j) \cdot \Delta T + \Delta f_j}\right) \quad (16)$$



شکل ۵- اخلاخل گر از نوع پوششی چندگانه

در شکل (۵)، پالس به ۴ قسمت تقسیم می‌شود. فرکانس اولیه مدوله شده ۰/۸ مگاهرتز و اختلاف فرکانس بین قسمت‌های مجاور ۰/۲ مگاهرتز است. شیب مدولاسیون

اخلاخل گر تک هدف جعلی به راحتی توسط رادار قابل شناسایی است. اما اگر اهداف جعلی زیادی در نزدیکی هدف واقعی وجود داشته باشد، تشخیص هدف واقعی برای رادار دشوار است. برای ایجاد چندین هدف جعلی، ابتدا پالس را به چندین قسمت تقسیم می‌کنیم و سپس فرکانس‌های متفاوتی را بر روی هر قسمت مدوله می‌کنیم. فرض می‌کنیم که پالس به‌طور متوسط به N قسمت تقسیم شده است، فرکانس اولیه مدوله شده f_0 و فرکانس مدوله شده هر قسمت به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f_{j(n)} = f_{j0} + (n-1)\Delta f_j \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱)، Δf_j اختلاف فرکانس مدوله شده بین دو قسمت مجاور است. سیگنال اخلاخل برابر است با:

$$u_{jn}(t) = e^{j2\pi f_{jn}t + j\pi\mu t^2} \quad (12)$$

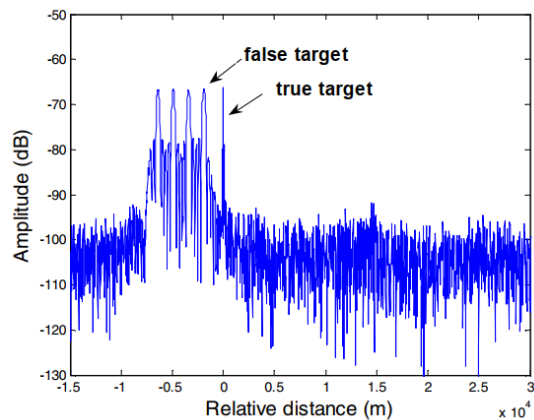
$$t \in \left(-\frac{T}{2} + \frac{n-1}{N}T, -\frac{T}{2} + \frac{n}{N}T\right)$$

در رابطه بالا سیگنال اخلاخل گر تنها وقتی می‌تواند از فیلتر منطبق عبور کند فرکانس مدوله شده آن در محدوده $[f_{j0} - \frac{B}{2}, \frac{B}{2}]$ قرار داشته باشد. تعداد اهداف جعلی از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$N_{ft} = \text{ceil}\left(\frac{B-f_{j0}}{\mu \cdot \Delta T + \Delta f_j}\right) \quad (13)$$

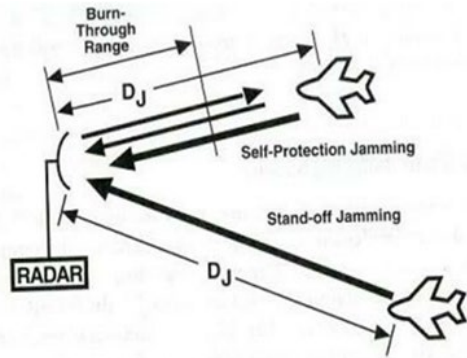
فاصله بین هدف جعلی و هدف واقعی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta R = \frac{c f_{jn}}{2\mu} \quad (14)$$



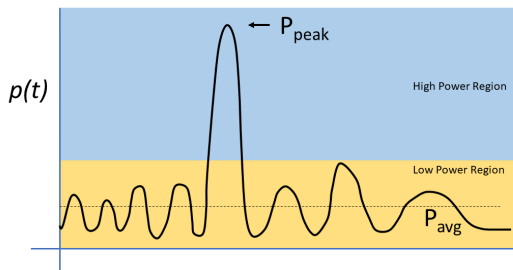
شکل ۴- اخلاخل گر از نوع چند هدف جعلی

از شکل (۴) مشاهده می‌گردد که تعداد نهایی اهداف جعلی ۴ عدد بوده که بر اساس معادله (۱۳) محاسبه



شکل ۶- فاصله سوختن در اخلاص گرها [۷]

همچنین در این تحقیق همان گونه که گفته شد، برای محاسبه حالت بهینه سیگنال اخلاص گر، مقدار PAPR نباید افزایش یابد. زیرا افزایش PAPR باعث اعوجاج و افزایش تلفات در تقویت کننده سیستم اخلاص گر خواهد شد [۲].



شکل ۷- نسبت توان حداکثر به توان متوسط (PAPR) [۷]

فاکتور PAPR از رابطه (۱۸) محاسبه می گردد.

$$PAPR = 10 * \log \frac{P_{Peak}}{P_{Avg}} \quad (18)$$

در این تحقیق از اخلاص گر چند هدف جعلی استفاده شده است و همچنین سیگنال رادار LFM در نظر گرفته شده است. بعد از گذر سیگنال اخلاص گر از فیلتر منطبق رادار شکل شماره (۸) را داریم.

خروجی فیلتر منطبق بعد از نرمالیزه شدن به شکل شماره (۹) تبدیل می شود.

فرکانس ۴ مگاهرتز بر میلی ثانیه است. شکل (۵) نشان دهنده نتیجه اخلاص گری پوششی چندگانه است.

۴- نسبت JSRmin^۱ به PAPR

محاسبه مقدار JSRmin از فاکتورهای مهم در طراحی سیگنال اخلاص گر محسوب می گردد. این عامل نشان دهنده مقدار توان سیگنال اخلاص گر به سیگنال رادار می باشد لذا کاهش مقدار JSRmin به این معنی است که سیستم اخلاص گر از توان کافی جهت فریب رادار دشمن برخوردار نیست. در زمان طراحی سیگنال فریب، باید به این موضوع توجه داشت که در هیچ نقطه ای نباید مقدار JSRmin از مقدار معینی کمتر شود.

در این تحقیق سامانه اخلاص گر از نوع خودمخافظ^۲ در نظر گرفته شده است. در سیستم های خودمخافظ مقدار JSRmin از رابطه (۱۷) محاسبه می گردد [۱].

$$JSR \min_{self \ protection} = \frac{P_j G_j}{P_r G_r} \cdot \frac{4\pi}{\sigma} \cdot R_t^2 \quad (17)$$

در رابطه (۱۷):

۱- G_j, P_j = توان فرستنده اخلاص گر و بهره آنتن اخلاص گر

۲- G_r, P_r = توان فرستنده رادار و بهره آنتن رادار

۳- σ = سطح مقطع هدف

۴- فاصله اخلاص گر تا رادار

وقتی که اخلاص گر به رادار نزدیک می شود، به نقطه ای می رسد که در آن نقطه توان اخلاص گر (J) با توان رادار (S) برابر می گردد، این نقطه، نقطه شروع فاصله سوختن^۳ نامیده می شود. در این نقطه داریم: JSR = 0 dB.

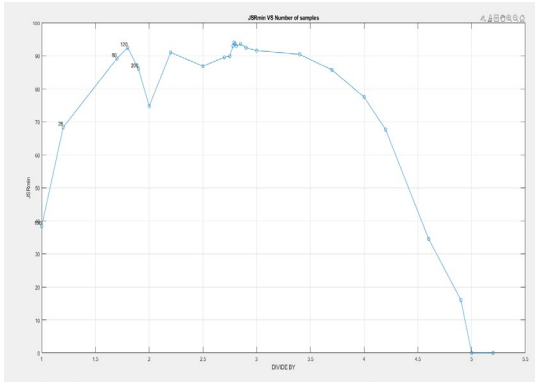
از این نقطه تا به سمت رادار هر چقدر اخلاص گر به رادار نزدیکتر شود دیگر نمی تواند رادار را تحت تاثیر قرار دهد هر چند توان خود را نیز افزایش دهد [۱].

^۱ Jammer to Signal Ratio

^۲ Self-Protection

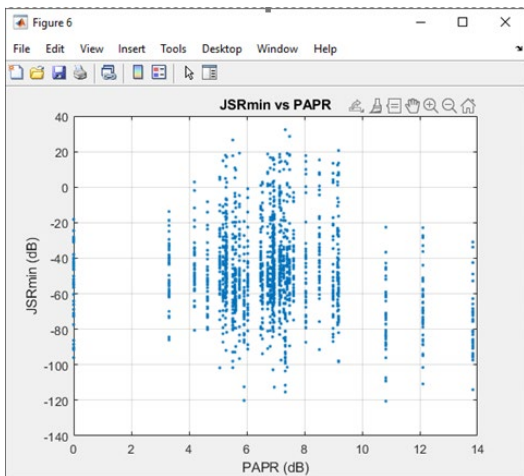
^۳ Burn Through

که در ابتدا یعنی در تقسیمات بر ۲، ۳، تا ۹، مقدار JSRmin افزایش می‌یابد و در تقسیمات بالاتر مقدار JSRmin شروع به کاهش می‌نماید.



شکل ۱۰- JSRmin بر حسب PAPR در نمونه‌های مختلف

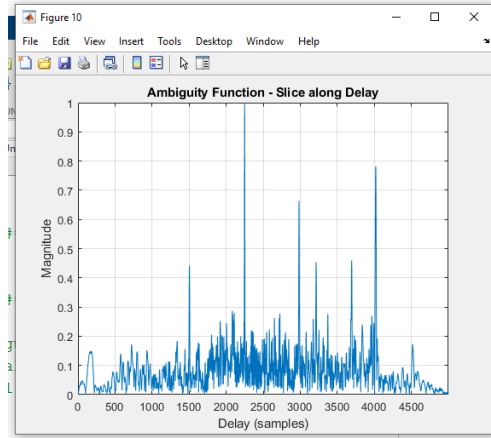
در شکل (۱۱) مقدار JSRmin نسبت به PAPR به ازای ۲۵۰۰ نمونه از سیگنال ورودی LFM رسم شده است. مقدار JSRmin در این تعداد نمونه تقریباً برابر با ۳۸/۴ دسیبل است.



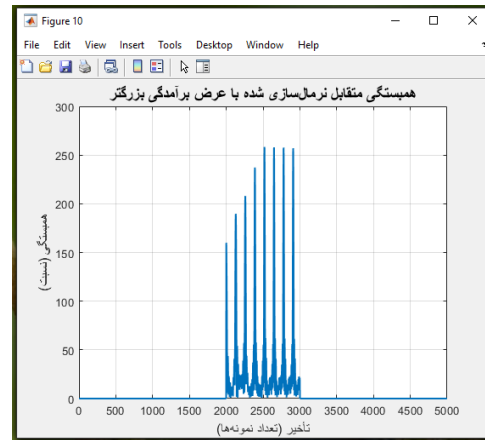
شکل ۱۱- JSRmin بر حسب PAPR در ۲۵۰۰ نمونه LFM

طبق شکل (۱۲)، با کاهش تعداد نمونه‌ها به مقدار حدود ۹۰۰ عدد، مقدار JSRmin تا حدود ۹۴ دسیبل افزایش می‌یابد.

وقتی تعداد نمونه‌ها بیشتر کاهش داده می‌شود، مقدار JSRmin نیز شروع به کاهش می‌نماید به طوری که با کاهش بیشتر تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی، مقدار JSRmin به صفر می‌رسد. موارد ذکر شده در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به وضوح نشان داده شده است.



شکل ۸- خروجی فیلتر منطبق رادار



شکل ۹- خروجی فیلتر منطبق رادار نرم‌الیزه شده

سپس مقدار JSRmin نسبت به PAPR، در تعدادهای مختلف نمونه‌های سیگنال LFM رادار محاسبه گردید. تعداد نمونه‌ها به ترتیب برابر هستند با:

$$\begin{aligned} \frac{2500}{1} &= 2500, & \frac{2500}{1.4} &= 1786, & \frac{2500}{1.8} &= 1389, \\ \frac{2500}{2} &= 1250, & \frac{2500}{2.4} &= 1042, & \frac{2500}{2.6} &= 961, \\ \frac{2500}{2.8} &= 893, & \frac{2500}{3} &= 833, & \frac{2500}{3.2} &= 781, \\ \frac{2500}{3.5} &= 714, & \frac{2500}{4} &= 625, & \frac{2500}{4.5} &= 555. \end{aligned}$$

۵- نتایج

بعد از رسم نمودار JSRmin بر حسب PAPR با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، در نمونه‌های ذکر شده، شکل (۱۰) حاصل شد. در این شکل مقدار JSRmin بر حسب تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی LFM رسم شده است. با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی از مقدار حداکثر یعنی ۲۵۰۰ عدد تا مقادیر کمتر که از تقسیم تعداد حداکثر بر $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{4}$... حاصل می‌شود، مشاهده می‌گردد

و با کاهش بیشتر تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی به حدود ۵۰۰ عدد، مقدار JSRmin باز کمتر شده و مقدار حداقل آن حدود صفر و مقدار حداکثر آن نیز تقریباً برابر صفر است.

بنابراین با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال LFM ورودی به نصف، مقدار JSRmin از حدود ۳۹ دسیبل به مقدار حدود ۹۷ دسیبل رسیده است یعنی حدود ۵۸ دسیبل افزایش یافته است و همچنین مقدار PAPR کاهش داشته است. با توجه به اینکه هر ۳ دسیبل افزایش به مفهوم ۲ برابر شدن است بنابراین در این روش مقدار JSRmin با توجه به محاسبات (۱۹)، حدود ۶۳۰۹۵۷ برابر افزایش داشته که این مقدار بسیار قابل توجه و مهم می‌باشد

$$97(\text{db}) = 10 * \log(\text{JSR min}_{1,9})$$

$$\text{JSR min}_{1,9} = 10^{9.7} = 5011872337$$

$$39(\text{db}) = 10 * \log(\text{JSR min}_1)$$

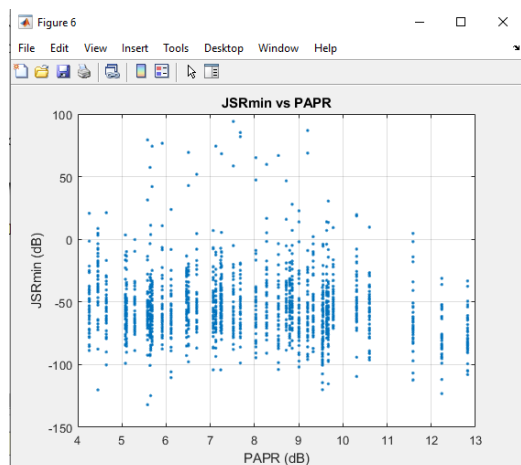
$$\text{JSR min}_1 = 10^{3.9} = 7943 \quad (19)$$

$$\frac{\text{JSR min}_{1,9}}{\text{JSR min}_1} = \frac{5011872337}{7943} = 630957$$

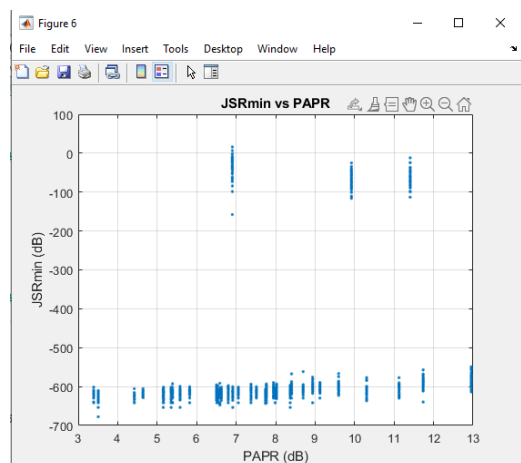
۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به طراحی و پیاده‌سازی سیگنال‌های فریب راداری با هدف ایجاد اختلال در سامانه‌های راداری دشمن پرداخته شد. با توجه به پیچیدگی روزافزون الگوریتم‌های شناسایی و پردازش سیگنال در رادارهای مدرن، استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر شیفت فرکانسی و شیفت زمانی به‌عنوان ابزارهای مؤثر در تولید سیگنال‌های فریب مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کاهش تعداد نمونه‌های ورودی سیگنال LFM به‌طور مستقیم منجر به افزایش چشمگیر مقدار JSRmin می‌شود. به‌طور خاص، کاهش نمونه‌ها تا نصف، افزایش قابل ملاحظه‌ای معادل ۶۳۰۹۵۷ برابر در کارایی سیگنال‌های فریب ایجاد کرد. این موضوع بیانگر آن است که بهینه‌سازی تعداد نمونه‌ها می‌تواند نقش کلیدی در طراحی سیگنال‌های فریب ایفا کرده و بر توانایی سامانه‌های اخلاص‌گر در کاهش دقت شناسایی رادار دشمن تأثیر بسزایی بگذارد.

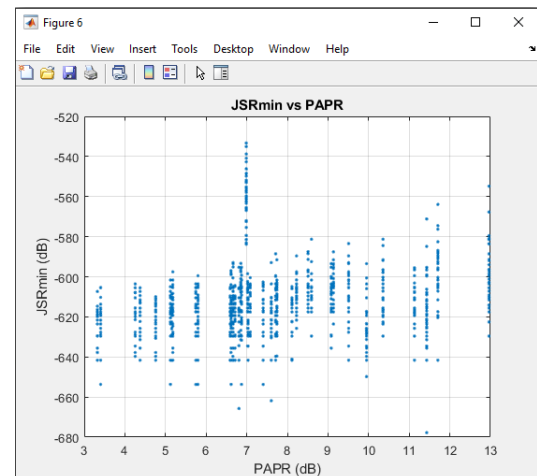


شکل ۱۲- JSRmin بر حسب PAPR در ۹۰۰ نمونه LFM



شکل ۱۳- JSRmin بر حسب PAPR در ۷۰۰ نمونه LFM

در شکل (۱۳)، مشاهده می‌گردد که با کاهش تعداد نمونه‌های سیگنال ورودی از ۲۵۰۰ عدد به حدود ۵۵۰ عدد، مقادیر JSRmin به مقادیر بسیار کوچک میل می‌کند. به طوری‌که کمترین مقدار JSRmin تقریباً برابر صفر و بیشترین مقدار آن برابر ۱۶ دسیبل است.



شکل ۱۴- JSRmin بر حسب PAPR در ۵۰۰ نمونه LFM

[6] Sun, J., Yuan, Y., Sabrina, M. G., Gini, F., "Coordinated Deception Jamming Power Scheduling for Multijammer Systems Against Distributed Radar Systems", *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 2, pp. 1076-1088, 2024.

[۷] نوروزی یاسر، اعتضادی‌فر پوریا، غفاری کاظم، «طراحی سیگنال فریب مجموع چیرپ به منظور اختلال فریبنده در رادار با معیار بهینه نسبت توان حداکثر به توان متوسط»، فصلنامه پژوهش‌های نوین در سامانه‌های دفاع الکترونیکی، دوره ۳، شماره ۹، ایران، تهران، دانشگاه شهید ستاری، ۱۴۰۳

[8] Zhengjie Li, Yang Yang, Ruijun Wang, Cheng Qi, Jieyu Huang; "Joint antenna scheduling and power allocation for multi-target tracking under range deception jamming in distributed MIMO radar system", *Remote Sensing*, N/A, N/A, 2024.

[9] M, Skolnik, "Introduction To Radar Systems", McGraw-Hill, ISBN: 978-0072909807, Third Party, Book, 2008.

[10] David L. Adamy, "EW 105: Space Electronic Warfare", Space Electronic Warfare, Artech House, ISBN: 978-1-63081-834-0, Book, 2021.

[11] Joseph R. Guerci, "Cognitive Radar: The Knowledge-Aided Fully Adaptive Approach", Artech House, ISBN: 978-1-63081-774-9, Book, 2020.

[12] V.N. Bringi, Kumar Vijay Mishra, Merhala Thurai, "Advances in Weather Radar", Institution of Engineering and Technology (IET), ISBN: 978-1-83953-624-3, Book, 2024.

[13] Qun Zhang, Ying Luo, Yong-an Chen, "Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets", Elsevier, ISBN: 978-0-12-821398-8, Book, 2020.

[14] William L. Melvin, James A. Scheer, "Principles of Modern Radar: Volume 3 - Radar Applications", SciTech Publishing (IET), ISBN: 978-1-891121-54-8, Book, 2020.

[15] Fabiola Colone, Pierfrancesco Lombardo, "Passive Radar: Principles and Applications", Artech House, ISBN: 978-1-63081-650-6, Book, 2020.

[16] Thomas Willenberg, "Fighting in the Electromagnetic Spectrum: U.S. Navy and Marine Corps Electronic Warfare Aircraft, Operations, and Equipment", U.S. Naval Institute Press, ISBN: 978-1-68247-849-3, Book, 2023.

[17] Helena Calatrava, Shuo Tang, Pau Closas, "Advances in Anti-Deception Jamming Strategies for Radar Systems: A Survey", arXiv:2503.00285, 2025.

[18] Yihan Xiao, Liang Dai, Xiangzhen Yu, Yinghui Zhou, Zhongkai Zhao, "Generation of a Synthetic Aperture Radar Deception Jamming Signal Based on Deep Echo Inversion Network", IET Radar, Sonar & Navigation, DOI: 10.1049/rsn2.12345, 2023.

همچنین بررسی انواع روش‌های اختلال - شامل تک‌هدف جعلی، چندهدف جعلی و پوششی چندگانه - نشان داد که به‌کارگیری اهداف جعلی متعدد در نزدیکی هدف واقعی می‌تواند توان رادارهای دشمن را در تشخیص صحیح اهداف به میزان چشم‌گیری کاهش دهد.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش بر اهمیت توسعه و بهبود روش‌های تولید سیگنال‌های فریب تأکید دارد. با توجه به روند پیشرفت رادارهای هوشمند و مقاوم در برابر اختلال، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر روی ترکیب تکنیک‌های کلاسیک با روش‌های نوین یادگیری ماشین و هوش مصنوعی متمرکز گردد تا امکان طراحی سامانه‌های اختلال‌گر تطبیقی و کارآمدتر فراهم شود.

۶- تشکر و قدردانی

از اساتید بزرگوار و گرانقدرم جناب آقای دکتر یاسر نوروزی و جناب آقای دکتر پوریا اعتضادی‌فر که وجودشان همیشه قوت قلبی برای اینجانب بوده است و بدون شک انجام این مقاله بدون کمک و راهنمایی‌های ارزنده ایشان امکان‌پذیر نبوده است، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مراجع

[۱] نوروزی یاسر، لطفی میثم، «جنگ الکترونیک راداری»، کتاب، تهران، انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۱۳۹۶.

[۲] جمعی از نویسندگان نیروی پدافند هوایی ارتش، «مقدمه‌ای بر جنگ الکترونیک»، کتاب، معاونت جنگ الکترونیک قرارگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص) آجا، ۱۳۹۲.

[۳] کریمی بشیررضا، «کاهش نسبت توان اوج به توان متوسط (PAPR) در سامانه‌های MIMO-OFDM با استفاده از پردازش فضایی و زمانی»، وزارت علوم و تحقیقات و فن‌آوری، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده برق و کامپیوتر، ۱۳۹۳.

[4] Ye Yang, Kai Da, Yongfeng Zhu, Shengwen Xiang, Qiang Fu; "Consensus based target tracking against deception jamming in distributed radar networks", *IET Radar, Sonar & Navigation*, N/A, 683-700, 2023.

[5] Bassem R. Mahafza; *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, Fourth Edition, Chapman and Hall/CRC, 2022.

power scheduling for multi-jammer systems against distributed radar systems”, *IEEE Transactions on Radar Systems*, N/A, N/A, 2024.

[33] Zhengjie Li, Yang Yang, Ruijun Wang, Cheng Qi, Jieyu Huang; “Joint antenna scheduling and power allocation for multi-target tracking under range deception jamming in distributed MIMO radar system”, *Remote Sensing*, N/A, N/A, 2024.

[34] Yuanhang Wang, Tianxian Zhang, Lingjiang Kong, Zhijie Ma; “Strategy optimization for range gate pull-off track-deception jamming under black-box circumstance”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, N/A, 4262–4273, 2023.

[35] Xinhai Wang, Gong Zhang, Xiangmin Wang, Qingqing Song, Fangqing Wen; “ECCM Schemes against Deception Jamming Using OFDM Radar with Low Global PAPR”, *Sensors*, N/A, 2071, 2020.

[36] Xuegang Lan, Tao Wan, Kaili Jiang, Ying Xiong, Bin Tang; “Intelligent Recognition of Chirp Radar Deceptive Jamming Based on Multi-Pulse Information Fusion”, *Sensors*, Basel, Switzerland, 2693, 2021.

[37] Zhang Shunsheng, Chen Shuang, Chen Xiaoying, Liu Ying, Wang Wenqin; “Active Deception Jamming Recognition Method in Multimodal Radar Based on Small Samples”, *Journal of Radars*, N/A, 882–891, 2023.

[19] Feng Zhou, Xueru Qu, Tian Tian, Bo Zhao, “Deep Learning-Based Deceptive Jamming Against Spaceborne SAR with Limited Samples”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2022.3156789, 2022.

[20] Xinhai Wang, Gong Zhang, Xiangmin Wang, Qingqing Song, Fangqing Wen; “ECCM Schemes against Deception Jamming Using OFDM Radar with Low Global PAPR”, *Sensors*, N/A, 2071, 2020.

[21] Xuegang Lan, Tao Wan, Kaili Jiang, Ying Xiong, Bin Tang; “Intelligent Recognition of Chirp Radar Deceptive Jamming Based on Multi-Pulse Information Fusion”, *Sensors*, Basel, Switzerland, 2693, 2021.

[22] Zhang Shunsheng, Chen Shuang, Chen Xiaoying, Liu Ying, Wang Wenqin; “Active Deception Jamming Recognition Method in Multimodal Radar Based on Small Samples”, *Journal of Radars*, N/A, 882–891, 2023.

[23] Mark A. Richards; *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Third Edition, McGraw Hill, 2022.

[24] Guangfu Tang, Yifeng Cai, Rongbing Gan; *Techniques and System Design of Radar Active Jamming*, 3rd Edition, Springer, 2023.

[25] Mohammad Alae-Kerahroodi, Mojtaba Soltanalian, Prabhu Babu, M. R. Bhavani Shankar; *Signal Design for Modern Radar Systems*, First Edition, Artech House, 2022.

[26] Air Force Doctrine Publication 3-85; *ELECTROMAGNETIC SPECTRUM OPERATIONS*, 1st Edition, 14 December 2023.

[27] Helena Calatrava, Shuo Tang, Pau Closas; “Advances in Anti-Deception Jamming Strategies for Radar Systems: A Survey”, *arXiv:2503.00285*, N/A, N/A, 2025.

[28] Haowei Zhang, Weijian Liu, Qiliang Zhang, Junwei Xie; “Joint resource optimization for a distributed MIMO radar when tracking multiple targets in the presence of deception jamming”, *Signal Processing*, N/A, 108641, 2022.

[29] Shanshan Zhao, Minju Yi, Ziwei Liu; “Cooperative anti-deception jamming in a distributed multiple-radar system under registration errors”, *Sensors*, N/A, 7216, 2022.

[30] Ye Yang, Kai Da, Yongfeng Zhu, Shengwen Xiang, Qiang Fu; “Consensus based target tracking against deception jamming in distributed radar networks”, *IET Radar, Sonar & Navigation*, N/A, 683–700, 2023.

[31] Jun Sun, Ye Yuan, Maria Sabrina Greco, Fulvio Gini, Xiaobo Yang, Wei Yi; “Anti-deception jamming resource scheduling for multi-target tracking in distributed radar networks”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, N/A, N/A, 2024.

[32] Jun Sun, Ye Yuan, Maria Sabrina Greco, Fulvio Gini; “Coordinated deception jamming

بررسی تاثیر نحوه قرارگیری اسپری ریل ها بر روی رفتار

هیدرودینامیکی یک شناور تندرو

ابوذر حاجی زاده^۱، مفید گرجی^۲، امین نجفی^۳

۱- عضو هیات علمی دانشگاه دریایی امام خمینه‌ای (مدظله‌العالی)، دانشکده شناوری، گروه مکانیک دریایی، ab.hajizadeh@chmail.ir

۲- عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، gorji@nit.ac.ir

۳- عضو هیات علمی دانشگاه جامع امام حسین (علیه‌السلام) تهران، دانشکده مهندسی مکانیک، najafi.sharif@yahoo.com

چکیده:

اسپری ریل به عنوان یک المان اضافه شده به بدنه شناورهای تندرو، در صورت طراحی و نصب صحیح، می تواند در بهبود رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو نقش مهمی را ایفا کند. در کار حاضر با استفاده از مدل سازی های عددی برای شرایط مختلف نصب، با بررسی تاثیر برخی از مشخصه های هندسی این المان بر روی پارامترها و رفتار هیدرودینامیکی یک شناور خاص و مقایسه آنها، نحوه بهینه قرارگیری اسپری ریل در یک شناور تندرو از نظر موازی بودن با کیل و یا در راستای چاین بودن مورد توجه قرار گرفته است. مشخصه های هندسی اسپری ریل نظیر شکل مقطع آن، طول، محل نصب، فاصله اسپری ریل ها از یکدیگر و تعداد آنها، بر عملکرد اسپری ریل مؤثر می باشد. در این کار پارامترهای مقاومت، تریم و بالآمدگی یک شناور تندرو با دو زاویه خیزکف ۲۰ و ۲۵ درجه و در دو حالت نیمه جابجایی و پروازی (اعداد فرود ۱/۹۹ و ۳/۳۳) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که قرارگیری اسپری ریل در حالت موازی با کیل در مقایسه با قرارگیری آن در راستای چاین، اثرات بهتری بر روی رفتار هیدرودینامیکی شناورهای تندرو دارد.

واژه های کلیدی:

شناور تندرو، اسپری ریل، کیل، چاین، مقاومت، رفتار هیدرودینامیکی

Investigating the effect of spray rail placement on the hydrodynamic behavior of a high-speed craft

Abouzar Hajizadeh¹, Mostafa Gorji², Amin Najafi³

Scientific Member, Maritime University of Imam Khomeini, Faculty of Maritime Technology, Marine Mechanics Group, ab.hajizadeh@chmail.ir

Scientific Member, Babol Noshirvani Industrial University, Faculty of Mechanical Engineering, Energy Conversion Group, gorji@nit.ac.ir

Scientific Member, Imam Hussein (AS) University, Tehran, Faculty of Mechanical Engineering, najafi.sharif@yahoo.com

Abstract:

Spray rail, as an element added to the hull of high-speed crafts, can play a crucial role in improving the hydrodynamic behavior of these vessels if designed and installed correctly. In the present work, by using numerical modeling for different installation conditions, by examining the effect of some geometric characteristics of this element on the parameters and hydrodynamic behavior of a specific vessel and comparing them, the optimal way to place the spray rail in a high-speed craft in terms of being parallel to the keel or in line with the chine has been considered. The geometric characteristics of the spray rail, such as its cross-sectional shape, length, installation location, distance between the spray rails, and number, significantly impact the performance of the spray rail. In this work, the resistance, trim and heave parameters of a high-speed craft with two deadrise angles of 20 and 25 degrees and in two states of semi-displacement and planing (Froude numbers 1.99 and 3.33) have been studied. The results show that placing the spray rail parallel to the keel has better effects on the hydrodynamic behavior of high-speed crafts compared to placing it along the chine.

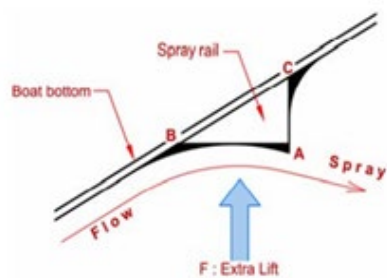
Keywords:

High-speed craft, Spray rail, Keel, Chine, Resistance, Hydrodynamic behavior.

۱- مقدمه

سطح خیس کف شناور به دو بخش کلی سطح خیس در معرض فشار و سطح خیس ناشی از اسپری آب تقسیم می‌شود. سطح خیس ناشی از اسپری آب، با افزایش سطح کل خیس شده شناور، مقاومت^۲ شناور را افزایش می‌دهد. مقاومت ناشی از سطح خیس اسپری را مقاومت اسپری می‌گویند. مقاومت اسپری ۱۵ تا ۲۰ درصد مقاومت کل شناور را شامل می‌شود [1]. بر این مبنا کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب می‌تواند مقدار مقاومت شناور را کاهش دهد. یکی از روش‌های کارآمد و مؤثر در کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب، استفاده از زائده‌ای به نام اسپری ریل است. اسپری ریل‌ها نوارها یا المان‌هایی هستند که در راستای طولی شناور گسترده می‌شوند. انتظار می‌رود این ریل‌ها جریان آب را به دور از بدنه هدایت کنند و موجب کاهش سطح خیس شناور و در نتیجه کاهش مقاومت اصطکاکی شناور شوند. همچنین انتظار می‌رود نصب اسپری ریل‌ها در کف شناور موجب افزایش نیروی لیفت هیدرودینامیکی وارد بر شناور و کاهش غلتش طولی^۳ و بهبود پایداری عرضی شناور گردد. نیروی درگ کل یک شناور تندرو، عبارت است از نیروهای ویسکوز و موج ایجادشده اطراف شناور و نیروی ناشی از هوا که در خلاف جهت حرکت شناور، با سرعتی ثابت و در یک خط مستقیم در آب راکد بر آن وارد می‌شود. مقاومت اصطکاکی بزرگترین مؤلفه از مقاومت کل یا همان نیروی درگ شناور است. ترکیب شرایط محیطی دریا و شکل بدنه کشتی‌ها باعث تغییر مقادیر مقاومت اصطکاکی باعث کاهش سرعت شناور در آب می‌شود. یکی از روش‌های جبران کاهش ناخواسته سرعت شناور، افزایش نیروی موتور و در نتیجه افزایش مصرف سوخت آن است. استفاده از این روش علاوه بر تحمیل هزینه‌های ناشی از قیمت بسیار بالای سوخت شناور، باعث افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد. بنابراین شناسایی روش‌هایی برای کاهش مقاومت اصطکاکی بدنه شناورها با استفاده از روش‌های علمی نقش بسیار مهمی در کاهش هزینه‌ها و آلودگی محیط زیست خواهد داشت.

مطابق دستورالعمل‌های ارائه شده در استاندارد "۱۹۰۳۰" که دائماً در حال توسعه و بروزرسانی است؛ استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین مقاومت کشتی در آب‌خورهای مختلف مورد توجه بوده و قابل قبول می‌باشد [2]. روش‌های عددی که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شود؛ جزئیات بیشتری از نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌کند. در سال‌های اخیر روش شبیه‌سازی عددی به‌عنوان روشی قابل اعتماد از لحاظ علمی برای درک نحوه قرارگیری فیزیک جریان بر روی بدنه کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است؛ البته این روش فقط در مقیاس محدودی از عددهای رینولدز قابلیت اجرا دارد. لارسن [3] در کتاب اصول طراحی شناور، به اصول طراحی اسپری ریل‌ها پرداخته است. شناورهای با مقطع عرضی ۷ برای عملکرد خوب دریامانی در دریا بکار برده می‌شوند ولی این مقطع، نیروی لیفت هیدرودینامیکی مناسبی ایجاد نمی‌کنند. یک روش برای ایجاد نیروی لیفت هیدرودینامیکی شناورهای تندرو، اضافه نمودن اسپری ریل در راستای طولی بدنه است. یک نمونه اسپری ریل در شکل ۱ نشان داده شده است. نقطه A یعنی جایی که آب بدنه را ترک می‌کند تا حد امکان تیز ساخته می‌شود. ولی نقطه B و C باید به‌صورت منحنی باشد تا باعث ازدیاد مقدار مقاومت شناور نشود. برای افزایش مقدار لیفت هیدرودینامیکی، سطح بین نقاط A و B به‌صورت منحنی و رو به پایین ساخته می‌شود. مقدار طول AB برابر $0.06[B/2]$ است که B عرض شناور در همان مقطع است (عرض اسپری ریل در طول شناور متغیر است) [4].



شکل ۱- نمای عرضی اسپری ریل [4]

جیم راسل به‌عنوان یکی از محققین حوزه شناورهای تندروی مسابقه‌ای بخشی از تجربیات خود را در مجله شناورهای مسابقه‌ای بیان نموده است. موقعیت اسپری ریل‌ها به سرعت و بارگذاری (تناژ) بدنه بستگی دارد؛ لذا اسپری ریل‌ها در یک

² Drag

³ Rolling

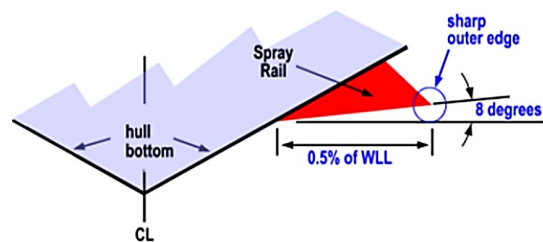
اصلی کاهش مقاومت در این حالت را کاهش قابل ملاحظه سطح خیس شناور در سرعت طراحی دانست. ساموئل و همکاران [8] در سال ۲۰۲۱، تأثیر شکل مقاطع و تعداد اسپیری ریل‌ها را بر مقاومت، تریم و جابه‌جایی عمودی یک شناور تندرو بررسی نمودند. این بررسی‌ها بر روی شناور فریزما^۵ و با استفاده از روش عددی انجام شده است. در این مقاله ابتدا تعداد اسپیری ریل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ همچنین در این پژوهش سه مقطع عرضی مختلف برای شناور در نظر گرفته شده است.

نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مقاومت شناور مجهز به اسپیری ریل تا عدد فرود ۱ تفاوت چندانی با شناور بدون اسپیری ریل ندارد ولی در اعداد فرود بزرگ‌تر از ۱ (حالت حرکتی پروازی)، شناور مجهز به اسپیری ریل مقاومت کمتری نسبت به شناور پایه دارد. همچنین در میان سه حالتی که شناور مجهز به اسپیری ریل است؛ مقاومت شناور نسبت به حالت پایه به ترتیب ۱/۸، ۳/۸ و ۴/۹ درصد برای حالت یک، دو و سه اسپیری ریل کاهش می‌یابد.

میتروفان و همکاران (۲۰۲۳) بررسی کردند که چگونه قرار دادن یک آنتی اسپیری ریل^۶ در ارتفاعات مختلف در امتداد دماغه کشتی می‌تواند بر مقاومت در برابر کشش تأثیر بگذارد. آنها خاطرنشان کردند که آنتی اسپیری ریل‌ها به طور گسترده برای افزایش راندمان کشتی‌های گشتی با کاهش مقاومت کل و ارتفاع موج در سرعت‌های بالاتر استفاده می‌شوند. شبیه‌سازی‌های عددی آنها نشان داد که آنتی اسپیری ریل‌ها، کشش کل را در هر هفت موقعیت ارتفاعی آزمایش شده کاهش می‌دهند [18].

ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۴) مشخصات هندسی ریل اسپیری، شامل زاویه زیرین، عرض و تعداد ریل‌های اسپیری را تغییر دادند تا اثرات آنها را بر رفتار هیدرودینامیکی مخزن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارزیابی کنند [19]. حاجی‌زاده و گرجی در سال ۲۰۲۵ به بررسی چگونگی تأثیر هندسه اسپیری ریل بر مقاومت، تریم، بالآمدگی و سطح خیس شده شناورهای تندرو پرداختند. در این کار روش طراحی آزمایش تاگوچی برای ارزیابی تأثیر هندسه اسپیری ریل به کار گرفته شد. یافته‌ها نشان داد که اسپیری ریل‌های با عرض باریک‌تر و زوایای زیرین کوچک‌تر، باعث کاهش بیشتر مقاومت می‌شوند. همچنین، اسپیری ریل با تغییر توزیع فشار در اطراف

سرعت خاص (سرعت طراحی) بهترین عملکرد را خواهند داشت. تحقیقات راسل نشان می‌دهد که اسپیری ریل‌ها باید نسبتاً کوتاه بوده و تا انتهای بدنه امتداد نداشته باشند؛ چون این طول اضافی تأثیری بر روی اسپیری نداشته و از طرفی باعث افزایش مقاومت نیز می‌شود. تحقیقات نشان داده است که بهترین شکل مقطع اسپیری ریل، مثلثی است. این شکل بهینه شامل یک لبه بیرونی تیز است که برای تسهیل جداسازی اسپیری از بدنه لازم است. از دیگر ویژگی‌های طراحی اسپیری ریل می‌توان به زاویه پایینی ۸ درجه و عرضی برابر با ۰/۵ درصد طول خط آب اشاره کرد. در شکل ۲ نمایی از هندسه اسپیری ریل پیشنهادی جیم راسل نشان داده شده است [5].



شکل ۲- نمایی از اسپیری ریل جیم راسل و ابعاد آن [5]

سئو^۴ و همکاران [7] در سال ۲۰۱۶، اثر موقعیت اسپیری ریل شناور را بر پایداری، مقاومت و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی آن به روش آزمایشگاهی در آب آرام و موج بررسی کردند. در این کار برای بررسی اثر موقعیت اسپیری ریل بهینه، از یک اسپیری ریل مثلثی با عرض ۲۲/۵ درصد ارتفاع آب‌خور معادل ۱۴ میلی‌متر در سه موقعیت ۴۰، ۲۴، ۸ درصد ارتفاع آب‌خور از لبه چاین (معادل ۵، ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر) استفاده شده است. طراحی‌های انجام شده بر اساس عدد فرود ۴/۱۵۸ بوده و پارامترهایی چون تریم، مقاومت، بالآمدگی مرکز ثقل و سطح خیس به‌عنوان پارامترهای خروجی از تست‌های آزمایشگاهی بدنه در آب آرام استخراج شد.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که در سرعت طراحی، بدنه با اسپیری ریل در موقعیت ۲۴ درصد ارتفاع آب‌خور، بهینه‌ترین حالت ممکن را دارا است؛ چون علاوه بر داشتن بیشترین کاهش تریم نسبت به بدنه بدون اسپیری ریل، مقاومت کمتری نیز نسبت به آن دارد. در این حالت، تریم ۲۱ درصد و مقاومت ۶/۲۸ درصد کاهش داشته و همچنین بالآمدگی مرکز ثقل حدود ۴۰ درصد افزایش یافته است. می‌توان علت

⁶ anti-spray rail

⁴ Jeonghwa Seo

⁵ Fridsma

راستای چاین) مورد توجه قرار گرفته و با مقایسه نتایج بدست آمده، نحوه قرارگیری بهینه آن بیان می شود.

۲- شبیه سازی عددی

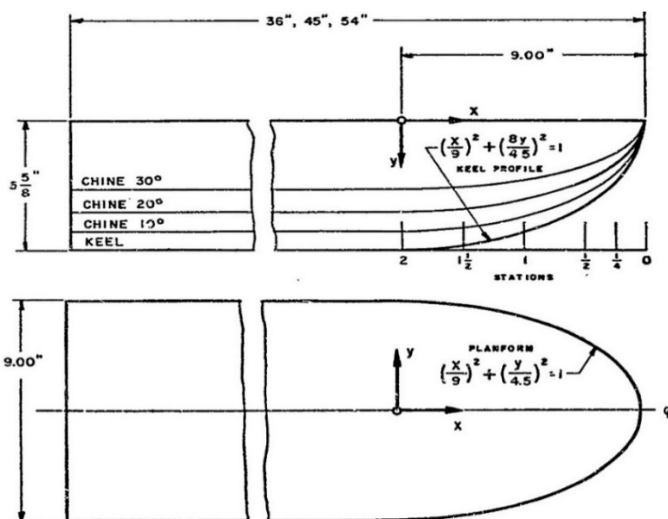
در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر اسپری ریل و انتخاب بهترین نحوه قرارگیری آن، شناور فریزما به عنوان شناور پایه انتخاب گردیده است. هندسه مدل با استفاده از هندسه مدل فریزما [9] با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه استخراج گردیده و مدل ها به طول ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات اصلی این مدل ها در جدول ۱ و همچنین خطوط بدنه آن در شکل ۳ دیده می شود.

دماغه شناور، به کاهش مقاومت فشاری کمک می کند. آنها نشان دادند که نصب اسپری ریل منجر به کاهش حداقل ۴/۷ درصد مقاومت کل در مقایسه با بدنه خالی شده است [20].

در مجموع و با بررسی کارهای انجام شده، نتایج بدست آمده به طور کلی نشان می دهد که وجود اسپری ریل در یک سرعت طراحی و موقعیت مناسب باعث کاهش سطح خیس، افزایش نیروی لیفت و در نتیجه کاهش تریم شناور، کاهش مقاومت و افزایش بالآمدگی در مرکز ثقل شناور می شود؛ اما همانطور که بیان شد تاکنون بر روی نحوه قرارگیری اسپری ریل ها مطالعه زیادی صورت نگرفته است. در کار حاضر به کمک بررسی سطح خیس، تغییرات مقاومت، تریم و بالآمدگی، موضوع نحوه قرارگیری اسپری ریل (موازی با کیل و یا در

جدول ۱- مشخصات مدل شناور فریزما با زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه

مشخصه	نماد	واحد	مقدار
طول کل	LOA	m	۱/۵
عرض	B	m	۰/۳
عرض/طول	L/B	-	۵
آبخور در پاشنه	T _{AP}	m	۰/۰۹۴۲
وزن جابجایی	Δ	N	۱۶۱/۳۷۴
موقعیت مرکز ثقل طولی از سینه	LCG	m	۰/۹۷۴
موقعیت مرکز ثقل عمودی از کیل	VCG	m	۰/۰۸۸۲
تریم	τ	deg	۲/۲
عدد فرود عرضی	F _{FB}	-	۳/۹۹۲ - ۰/۶۶۴
عدد فرود حجمی	F _{TV}	-	۴/۳۳۸ - ۰/۷۲۲
زاویه خیز کف	β	deg	۲۰ و ۲۵ درجه



شکل ۳- خطوط بدنه شناور فریزما [9]

فریزما مجموعه‌ای از تست‌ها را بر روی مدل یک شناور پروازی با زاویه خیز کف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه در سه طول مختلف در آب آرام و موج منظم انجام داد و تأثیر زاویه خیز کف، تریم، وزن، سرعت، نسبت طول به عرض و خصوصیات موج را بر روی عملکرد هیدرودینامیکی شناور بررسی کرد.

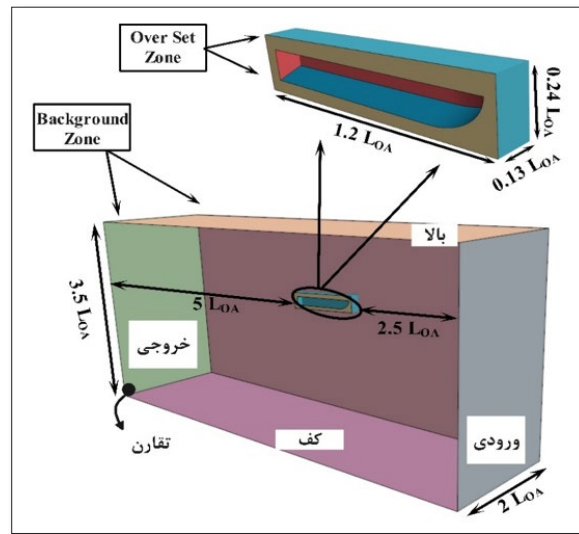
۲-۱- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی راه بسیار کم‌هزینه و کارآمدی را برای حل مسائل در مقایسه با آزمایش‌های تجربی فراهم می‌کند. در این پژوهش برای بررسی تأثیر اسپری ریل بر رفتار هیدرودینامیکی شناور مدل و رسیدن به حالت بهینه قرارگیری اسپری ریل، از نرم‌افزار تجاری - Star CCM+ V.2022.1 استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بهره می‌برد. شبیه‌سازی‌ها در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه و اعداد فرود مختلف بر مبنای حلگر RANS انجام شده است.

۲-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

ابعاد فضای محاسباتی و سطوح در نظر گرفته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی ابعاد فضای محاسباتی

به گونه‌ای تعیین شده است که حداقل معیارهای ITTC برآورده شود [10,11]. بر این اساس فاصله مرز ورودی تا جلوی شناور ۲/۵ برابر طول شناور در نظر گرفته شده است و فاصله‌ی پاشنه شناور تا مرز خروجی به منظور لحاظ کردن جریان برگشتی و تعیین مشخصات ویک ایجاد شده در پشت شناور، ۵ برابر طول شناور تعیین شده است. فاصله‌ی مرزهای بالا و پایین فضای محاسباتی ۳/۵ برابر طول شناور است. همچنین فاصله‌ی دیواره‌ی کناری برای به حداقل رساندن تأثیر مرز جانبی بر روی شناور، ۲ برابر طول شناور تعیین شده است. با توجه به تقارن بدنه‌ی شناور و جریان سیال، شبیه‌سازی به صورت متقارن انجام شده است. شرایط مرزی تعیین شده برای سطوح فضای محاسباتی مطابق جدول ۲ می‌باشد. برای مرزهای بالا، کف، ورودی و جانبی شرط مرزی سرعت ورودی و در مرز خروجی شرط مرزی فشار خروجی تعیین شده است. همچنین در سطح بدنه شرایط مرزی دیواره بدون لغزش اعمال شده است.

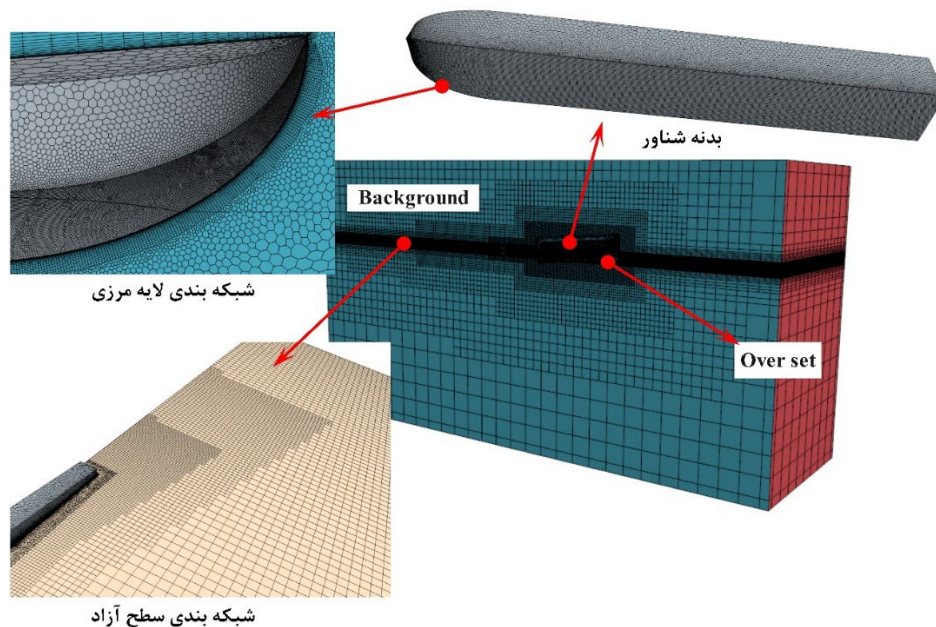


شکل ۴- ابعاد فضای محاسباتی و مرزهای در نظر گرفته شده

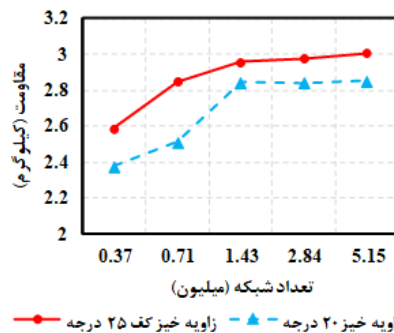
جدول ۲- شرایط مرزی فضای محاسباتی

شرایط مرزی	سطوح	فضای محاسباتی
سرعت ورودی	ورودی، جانبی، بالا و کف	Background
فشار خروجی	خروجی	
سطح متقارن	تقارن	
مش دینامیکی	overset	Overset
سطح تقارن	تقارن	
دیواره بدون لغزش	بدنه شناور	

موجب کاهش تعداد سلول‌ها و زمان محاسبات خواهد شد. بر همین مبنا در این شبیه‌سازی از روش شبکه‌بندی دینامیکی استفاده شده‌است. در این روش فضای محاسباتی به دو بخش Overset و Background تقسیم شده‌است. ناحیه Overset با استفاده از شبکه‌بندی شش‌ضلعی بی‌سازمان و ناحیه Background با استفاده از شبکه‌بندی Trimmed با سازمان شناور و اهمیت قسمت‌های مختلف به ۱۲ بخش با تعداد شبکه‌بندی مختلف تقسیم شده‌است. در شکل ۵ شبکه‌بندی برخی از بخش‌های فضای محاسباتی نشان داده شده‌است.



شکل ۵- شبکه‌بندی بخش‌های مختلف فضای محاسباتی



شکل ۶- بررسی استقلال حل از شبکه

۳- بررسی عددی مؤلفه‌های هندسی اسپری ریل

در پژوهش حاضر به منظور بررسی مؤلفه‌های هندسی اسپری ریل و انتخاب بهترین نحوه قرارگیری آنها بر روی

۲-۳- شبکه‌بندی فضای محاسباتی

دقت نتایج شبیه‌سازی به‌طور مستقیم به کیفیت و نوع شبکه‌بندی وابسته است. کاریکا و همکاران [12] و ماکرو و همکاران [13] در تحقیقات خود نشان دادند که استفاده از شبکه‌بندی دینامیکی در شبیه‌سازی حرکات شناور تندرو دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط بگوویچ و همکاران [14] و همچنین تحقیقات دی‌لوکا و همکاران [15] نشان داد که استفاده از شبکه‌بندی شش‌ضلعی بی‌سازمان در شبکه‌بندی دینامیکی و استفاده از شبکه‌بندی با سازمان در سایر بخش‌های فضای محاسباتی

۲-۴- استقلال حل از شبکه‌بندی و بررسی

حساسیت شبکه‌بندی

به منظور بررسی عدم وابستگی یا استقلال حل از شبکه، پنج حالت شبکه‌بندی برای مدل با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و در شکل ۶ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که از حالت سوم به بعد افزایش تعداد شبکه تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد و حل از تعداد شبکه‌بندی مستقل شده‌است؛ لذا برای داشتن دقت کافی در حل مسئله و کاهش زمان محاسبات، حالت سوم به عنوان شبکه‌بندی پایه در نظر گرفته شده‌است.

شناور، از طرح آزمایش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی^۷ یک رویکرد آماری برای بهبود کیفیت و بهینه‌سازی فرآیندهاست که توسط دکتر گنئیچی تاگوچی، یک مهندس و آماردان ژاپنی، توسعه داده شد. این روش با هدف کاهش واریانس و افزایش کارایی محصولات و فرآیندها طراحی شده است، به گونه‌ای که حتی در شرایط مختلف و متغیر، نتایج بهینه‌تری به دست آید.

یکی از مهم‌ترین اصول و مبانی روش تاگوچی، مبحث طراحی آزمایش‌ها^۸ می‌باشد. در روش تاگوچی، از یک طرح آزمایشی استفاده می‌شود که از آرایه‌های متعامد بهره می‌گیرد. این آرایه‌ها به مهندسان اجازه می‌دهد تا با انجام تعداد محدودی آزمایش، تاثیر چندین پارامتر ورودی را به طور همزمان بررسی کنند. این فرآیند به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها کمک می‌کند [17].

در این کار به منظور تعیین حالت بهینه برای مشخصه‌های در نظر گرفته شده اسپری‌ریل، از نسبت سیگنال به نویز استفاده گردیده است. نسبت سیگنال به نویز در واقع به تبدیل مجموعه‌ای از داده‌ها و مشاهدات به یک عدد گفته می‌شود که در دو مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول میانگین مربعات محاسبه می‌گردد و در مرحله دوم نسبت سیگنال به نویز برای میانگین مربعات وابسته به پارامترهای خروجی و مشخصه‌های کیفی مربوط به آنها به دست می‌آید. نسبت سیگنال به نویزهای استاندارد بر سه نوع می‌باشند: هر چه "کمتر-بهرتر"، هر چه به مقدار اسمی "نزدیک‌تر-بهرتر" و هر چه "بزرگ‌تر-بهرتر".

نتایج این کار، بر مبنای ویژگی هر چه "کوچکتر-بهرتر" در نظر گرفته شده است؛ در این حالت هر چه نرخ سیگنال به نویز خروجی‌ها بیشتر باشد مولفه‌های هیدرودینامیکی مورد بررسی مقدار کمتری دارند. ویژگی هر چه کمتر-بهرتر برای مولفه‌های تریم و بالآمدگی به منظور افزایش دامنه پایداری و همچنین کاهش احتمال ناپایداری طولی (پورپوزینگ^۹) در نظر گرفته شده است؛ لذا مقدار نرخ سیگنال به نویز کمتر

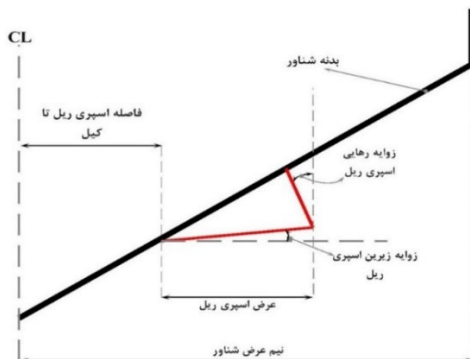
بیانگر تریم و بالآمدگی بیشتر می‌باشد و سیگنال به نویز بیشتر، بیانگر تریم و بالآمدگی کمتر است.

برخی از مؤلفه‌های هندسی مربوط به اسپری‌ریل در شکل ۷ نشان داده شده است. این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از:

زاویه زیرین اسپری‌ریل (δ) (زاویه مقطع عرضی اسپری‌ریل با خط افق)، زاویه رهایی (ζ)، عرض (b_{sr})، شکل مقطع، فاصله اسپری‌ریل تا وسط شناور، طول، نحوه قرارگیری، تعداد و فاصله اسپری‌ریل‌ها از یکدیگر.

در این آزمایش برخی از مولفه‌های ذکر شده ثابت در نظر گرفته شده‌اند. بر این اساس شکل مقطع اسپری‌ریل به صورت مثلثی، فاصله اسپری‌ریل‌ها از یکدیگر برابر و طول اسپری‌ریل‌ها از ابتدا تا انتهای شناور در نظر گرفته شده است و متغیرهای آزمایش عرض اسپری‌ریل، زاویه زیرین اسپری‌ریل و تعداد اسپری‌ریل‌ها در کف شناور می‌باشند.

آزمایش برای شناور فریزما با دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در دو حالت قرارگیری مختلف که یکی مسیر اسپری‌ریل در راستای چاین و دیگری موازی با کیل است؛ انجام شده است.



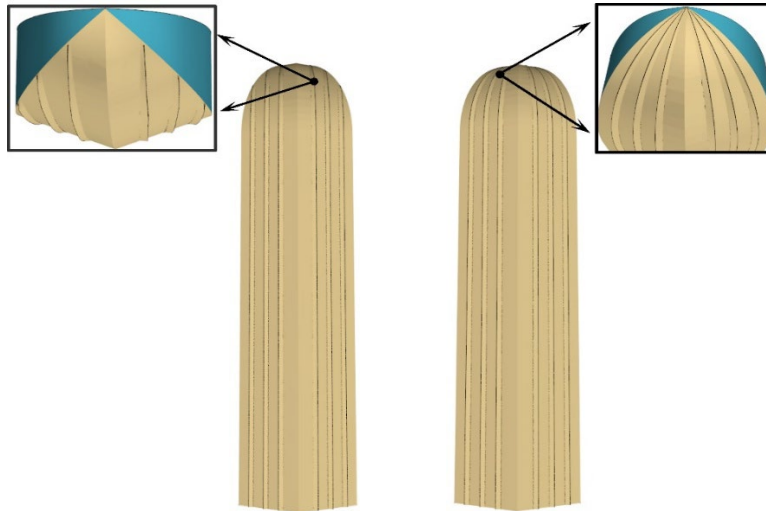
شکل ۷- مولفه‌های هندسی اسپری‌ریل

آزمایش برای دو سرعت ۳/۴۲ m/s (حالت حرکتی نیمه جابجایی) و ۵/۷۱ m/s (حالت حرکتی پروازی) انجام شده است. در شکل ۸ دو حالت قرارگیری اسپری‌ریل (موازی با کیل و در راستای چاین) نشان داده شده است.

⁹ porpoising

⁷ Taguchi Method

⁸ Design of Experiments - DOE

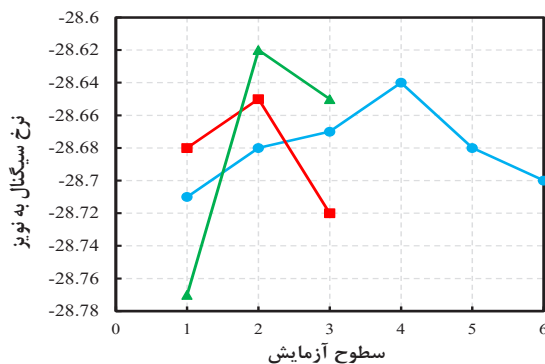


الف) اسپری ریل در راستای چاین ب) اسپری ریل موازی کیل
شکل ۸- دو حالت کلی قرارگیری اسپری ریل‌ها در کف شناور

۴- نتایج

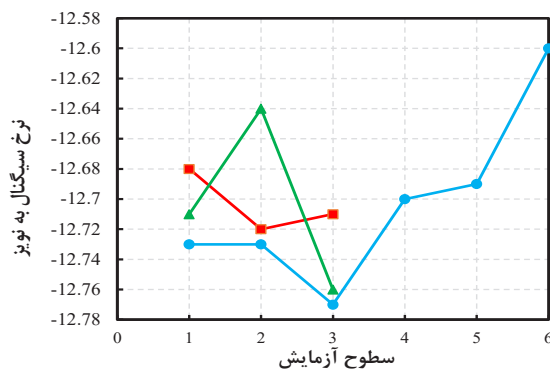
در این بخش نتایج مربوط به تست عددی در دو حالت مختلف قرارگیری در راستای چاین و موازی با کیل آورده شده و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- زاویه خیز کف ۲۰ درجه اسپری ریل در راستای چاین
نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به زاویه خیز کف ۲۰ درجه با اسپری ریل‌های در راستای چاین برای مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی شناور در شکل ۹ ارائه گردیده است.



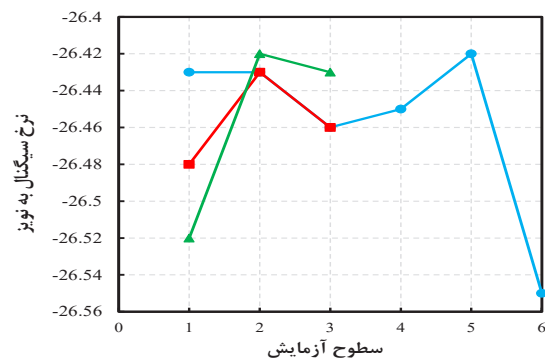
تعداد اسپری ریل (▲) درصد عرض اسپری ریل (■) زاویه زیرین اسپری ریل (●)

ب) مقاومت کل ($F_{TB} = 3/33$)



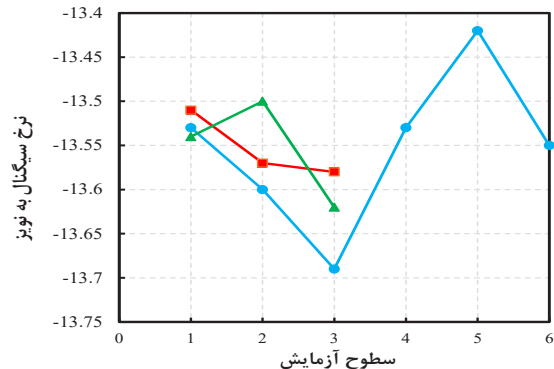
تعداد اسپری ریل (▲) درصد عرض اسپری ریل (■) زاویه زیرین اسپری ریل (●)

د) زاویه تریم ($F_{TB} = 3/33$)



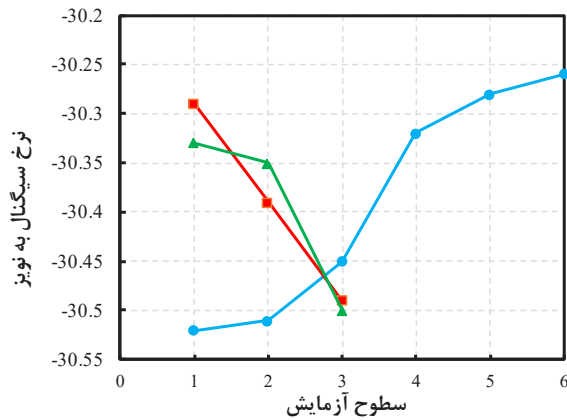
تعداد اسپری ریل (▲) درصد عرض اسپری ریل (■) زاویه زیرین اسپری ریل (●)

الف) مقاومت کل ($F_{TB} = 1/99$)

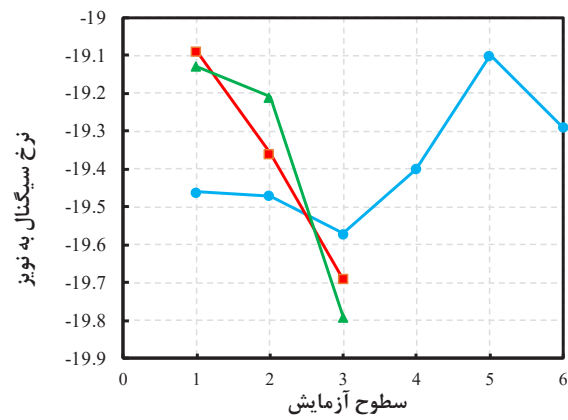


تعداد اسپری ریل (▲) درصد عرض اسپری ریل (■) زاویه زیرین اسپری ریل (●)

ج) زاویه تریم ($F_{TB} = 1/99$)



تعداد اسپری ریل (ت) بالا آمدگی (FRB = ۳/۳۳) زاویه زیرین اسپری ریل درصد عرض اسپری ریل



تعداد اسپری ریل (ت) بالا آمدگی (FRB = ۱/۹۹) زاویه زیرین اسپری ریل درصد عرض اسپری ریل

(ت) بالا آمدگی (FRB = ۳/۳۳)

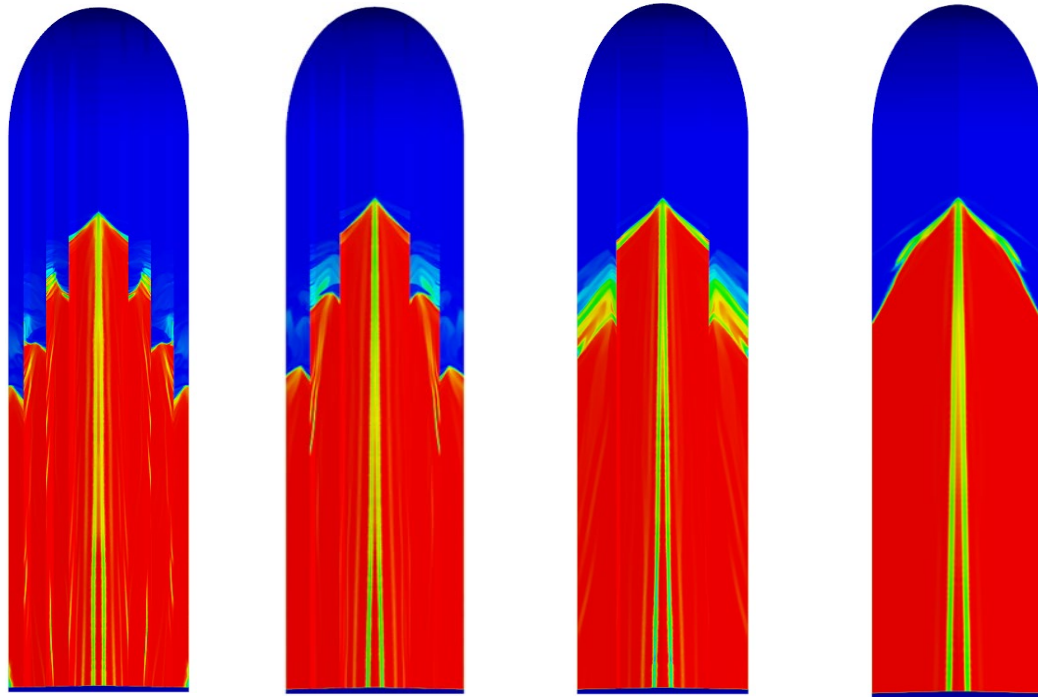
(ت) بالا آمدگی (FRB = ۱/۹۹)

شکل ۹- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوجی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه و اسپری ریل های در راستای چپین

بر اساس نتایج شکل ۹-الف مشاهده می شود که در حالت نیمه پروازی زاویه زیرین اسپری ریل و همچنین در حالت پروازی شکل ۹-ب تعداد اسپری ریل ها دارای بیشترین تغییر نرخ سیگنال به نوز در اندازه پارامترهای مختلف هستند. در نتیجه این دو پارامتر تاثیر بیشتری بر مقاومت شناور در این دو حالت دارند. در حالت حرکتی نیمه جابه جایی، زاویه زیرین ۸ درجه و در حالت پروازی زاویه زیرین ۴ درجه و همچنین در هر دو حالت حرکتی تعداد چهار اسپری ریل در کف شناور عملکرد بهتری در میزان مقاومت شناور دارند. در نتیجه می توان گفت که افزایش زاویه زیرین در حالت حرکتی نیمه جابه جایی موجب افزایش مقاومت و در حالت پروازی موجب کاهش مقاومت شناور می گردد. با بررسی سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه جایی و پروازی، مشاهده می شود که در حالت نیمه جابه جایی افزایش زاویه زیرین موجب افزایش سطح خیس و در نهایت افزایش مقاومت شناور گردیده است. در حالت حرکتی پروازی دو عامل افزایش هوادهی در انتهای پاشنه شناور و کاهش مساحت مقطع اسپری ریل با افزایش زاویه زیرین رخ می دهند و موجب کاهش سطح خیس و در نهایت کاهش مقاومت شناور شده اند. در شکل ۱۰ سطح خیس کف شناور در سه آزمایش مختلف با سطح خیس شناور در حالت بدون اسپری ریل مقایسه شده است. در این سه آزمایش به ترتیب تعداد اسپری ریل ها برابر ۲، ۴ و ۶ و نسبت عرض اسپری ریل به ترتیب ۲، ۳ و ۴ درصد عرض مقطع می باشد. مشاهده می شود که در هر سه آزمایش اضافه نمودن اسپری ریل موجب کاهش سطح خیس ناحیه اسپری گردیده است. در نتیجه می توان گفت که در تمامی حالت ها وجود اسپری ریل باعث کاهش مقاومت شناور نسبت به حالت بدون اسپری ریل شده است که در واقع عامل این کاهش مقاومت، کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب به وسیله زائده اسپری ریل است. همچنین از مقایسه سه حالت ب، ج و د در شکل ۱۰ می توان نتیجه گرفت که در حالت پروازی افزایش تعداد اسپری ریل ها همزمان با افزایش عرض اسپری ریل می تواند موجب کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب در ناحیه سینه شناور گردد.

بر اساس نتایج شکل ۹-الف مشاهده می شود که در حالت نیمه پروازی زاویه زیرین اسپری ریل و همچنین در حالت پروازی شکل ۹-ب تعداد اسپری ریل ها دارای بیشترین تغییر نرخ سیگنال به نوز در اندازه پارامترهای مختلف هستند. در نتیجه این دو پارامتر تاثیر بیشتری بر مقاومت شناور در این دو حالت دارند. در حالت حرکتی نیمه جابه جایی، زاویه زیرین ۸ درجه و در حالت پروازی زاویه زیرین ۴ درجه و همچنین در هر دو حالت حرکتی تعداد چهار اسپری ریل در کف شناور عملکرد بهتری در میزان مقاومت شناور دارند. در نتیجه می توان گفت که افزایش زاویه زیرین در حالت حرکتی نیمه جابه جایی موجب افزایش مقاومت و در حالت پروازی موجب کاهش مقاومت شناور می گردد. با بررسی سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه جایی و پروازی، مشاهده می شود که در حالت نیمه جابه جایی افزایش زاویه زیرین موجب افزایش سطح خیس و در نهایت افزایش مقاومت شناور گردیده است. در حالت حرکتی پروازی دو عامل افزایش هوادهی در انتهای پاشنه شناور و کاهش مساحت مقطع اسپری ریل با افزایش

Volume Fraction of water

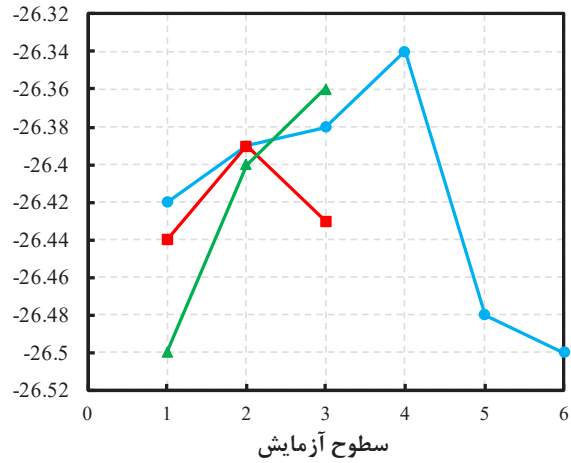
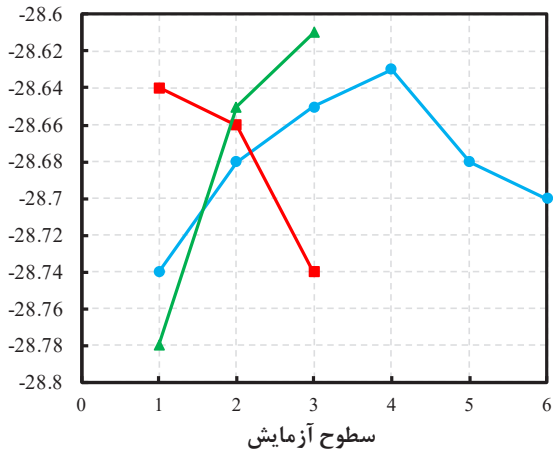


الف) شناور بدون اسپری ب) آزمایش اول ج) آزمایش دوم د) آزمایش سوم
 شکل ۱۰- سطح خیس کف شناور در تعداد مختلف اسپری ریل برای آزمایش ۱، ۲ و ۳ در حالت پروازی (سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه)

که کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب افزایش بالآمدگی گردیده است. به علاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها موجب افزایش نیروی لیفت وارد بر بدنه شناور و در نتیجه افزایش بالآمدگی شناور شده است.

۲-۴- زاویه خیزکف ۲۰ درجه اسپری ریل موازی با کیل
 نتایج طراحی آزمایش تاگوچی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی از قبیل مقاومت، تریم و بالآمدگی در زاویه خیزکف ۲۰ درجه برای اسپری ریل‌های موازی با کیل، بر مبنای نرخ سیگنال به نویز محاسبه گردیده و در شکل ۱۱ ارائه شده است. در ادامه اهمیت تاثیر پارامترهای هندسی زاویه زیرین اسپری ریل، تعداد اسپری ریل‌ها و نسبت عرض اسپری ریل به عرض مقطع بر مولفه‌های هیدرودینامیکی در حالت مذکور بررسی گردیده است؛ در انتها تاثیر دو حالت قرارگیری مختلف اسپری ریل بر میزان مقاومت شناور مقایسه شده است.

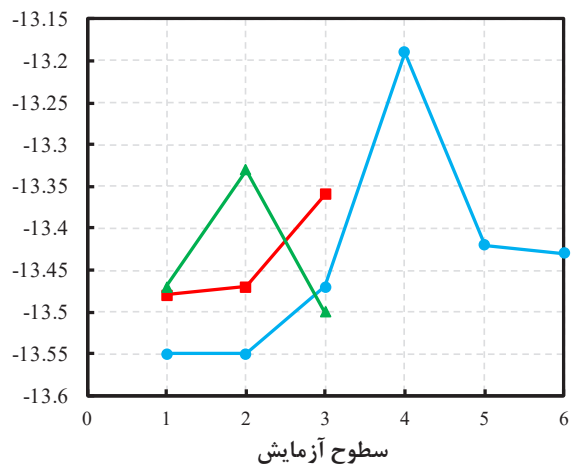
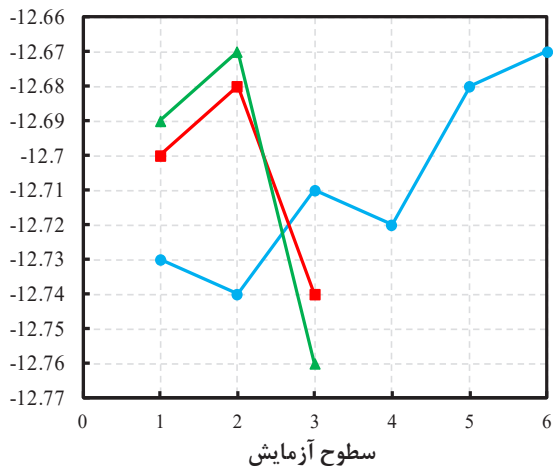
با توجه به نتایج مربوط به تریم شناور در شکل ۹-ج و شکل ۹-د می‌توان نتیجه گرفت که به ترتیب مولفه‌های هندسی زاویه زیرین اسپری ریل، تعداد اسپری ریل‌ها و نسبت عرض اسپری ریل به عرض مقطع، تاثیر بیشتری را در میزان تریم شناور دارند که علت آن تاثیر مولفه‌های هندسی مذکور بر میزان نیروی لیفت تولید شده در ناحیه سینه شناور به واسطه وجود اسپری ریل می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن اسپری ریل به شناور آزمایش مورد بحث نسبت به شناور پایه، موجب افزایش نیروی لیفت وارد بر سینه شناور به واسطه افزایش ضریب فشار وارد بر کف شناور گردیده است. نتایج مربوط به بالآمدگی در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی (شکل ۹-ه نشان می‌دهد که به ترتیب مولفه‌های هندسی عرض، زاویه زیرین و تعداد اسپری ریل‌ها بیشترین تاثیر را بر میزان بالآمدگی شناور دارند که این ترتیب در حالت پروازی شکل ۹-ت زاویه زیرین، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)

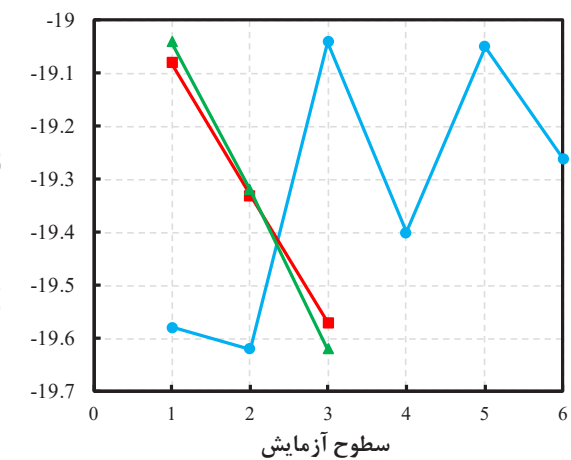
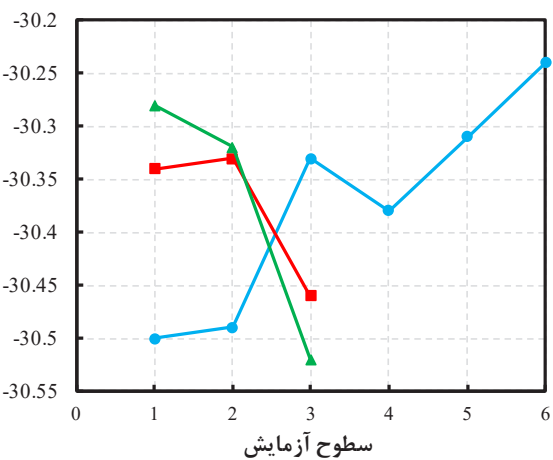
(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(د) زاویه تریم ($Fr_B = 3/33$)

(ج) زاویه تریم ($Fr_B = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل - تعداد اسپیری ریل - درصد عرض اسپیری ریل - زاویه زیرین اسپیری ریل

(ت) بالا آمدگی ($Fr_B = 3/33$)

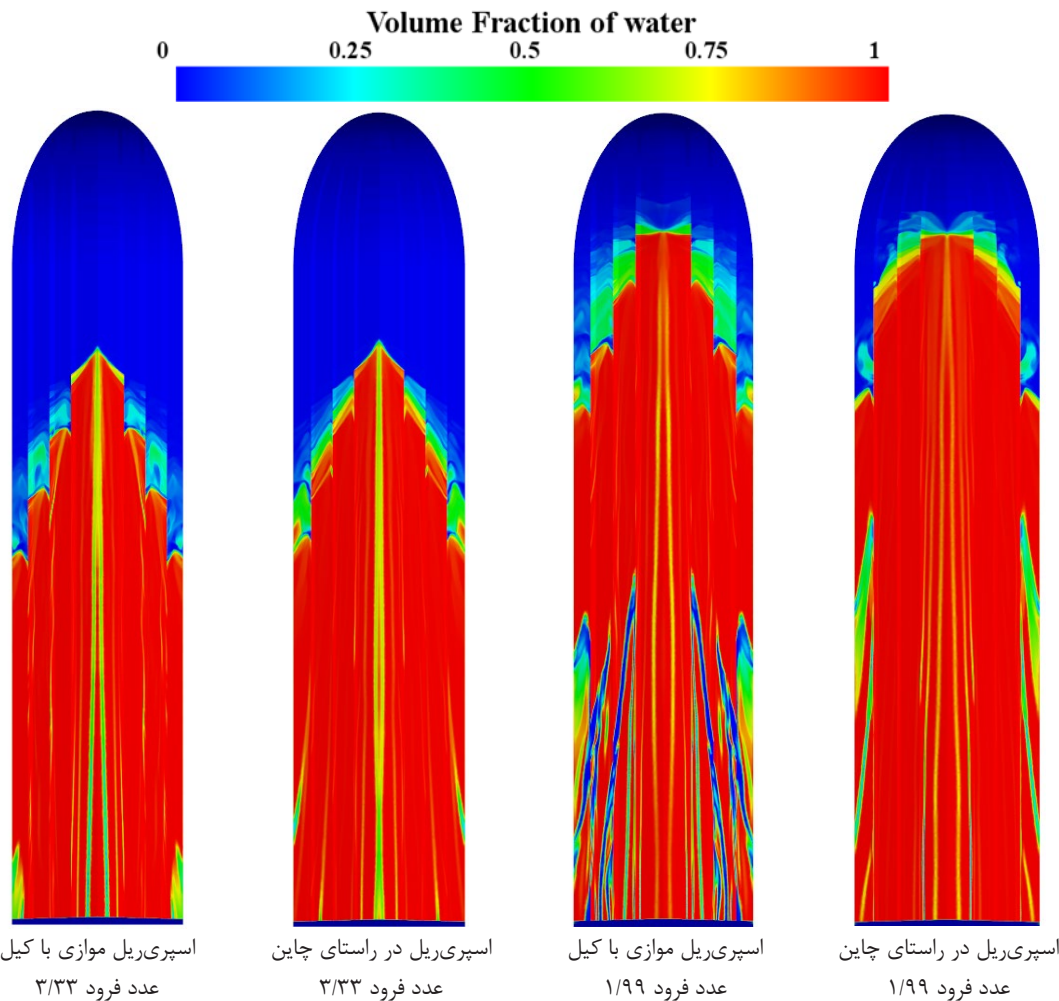
(ه) بالا آمدگی ($Fr_B = 1/99$)

شکل ۱۱- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه و اسپیری ریل‌های موازی با کیل

شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد که اهمیت مولفه‌های هندسی مورد بررسی در هر دو حالت قرارگیری اسپری ریل (موازی با کیل و در راستای چاین) یکسان می‌باشد به طوری که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی مولفه هندسی زاویه زیرین اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری بر میزان مقاومت شناور داشته است در حالی که در حالت حرکتی پروازی تعداد اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری نسبت به زاویه زیرین بر مقدار مقاومت شناور دارد (شکل ۱۱-ب)؛ علت این موضوع افزایش میزان اسپری آب در حالت پروازی است که همین امر موجب تاثیر بیشتر تعداد اسپری ریل‌ها در کاهش اسپری و در نتیجه کاهش مقاومت شناور می‌گردد. همچنین در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی افزایش زاویه

زیرین موجب افزایش مقاومت گردیده است و در حالت پروازی کاهش زاویه زیرین موجب افزایش مقاومت شده‌است.

در شکل ۱۲ سطح خیس کف شناور در یکی از آزمایش‌ها (زاویه زیرین ۴ درجه، نسبت عرض ۲ درصد و تعداد ۶ ریل) برای دو حالت قرارگیری اسپری ریل (در راستای چاین و موازی با کیل) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که قرارگیری اسپری ریل موازی با کیل عملکرد بهتری در کاهش سطح خیس ناشی از اسپری داشته است که این عامل موجب کاهش بیشتر مقاومت در حالت قرارگیری اسپری ریل‌های موازی با کیل نسبت به اسپری ریل‌های در راستای چاین گردیده است.



شکل ۱۲- سطح خیس کف شناور در حالت نیمه جابه‌جایی (سرعت ۳/۴۲ متر بر ثانیه) و پروازی (سرعت ۵/۷۱ متر بر ثانیه) برای دو حالت قرارگیری

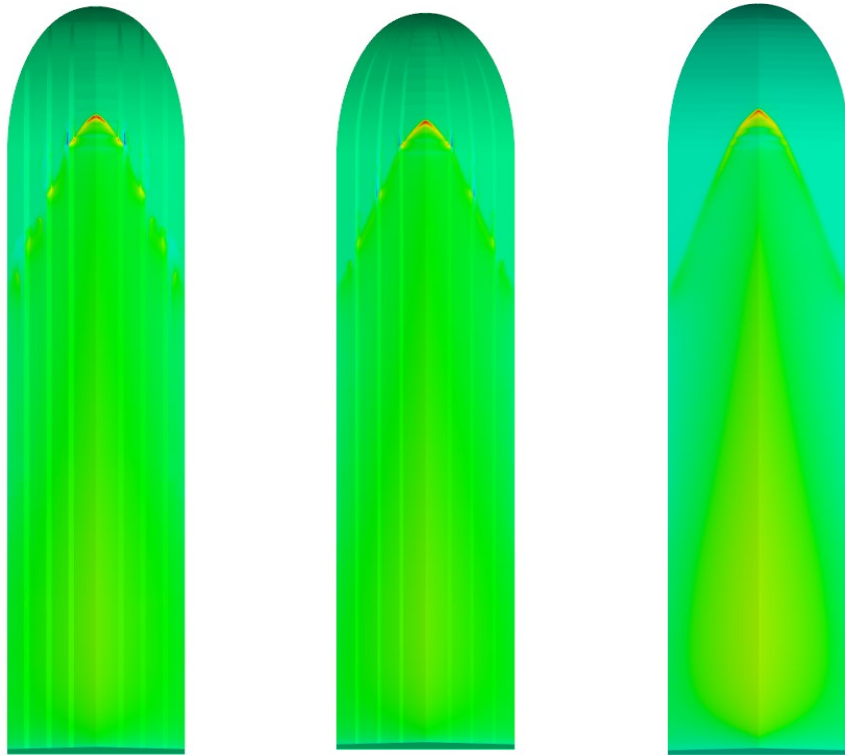
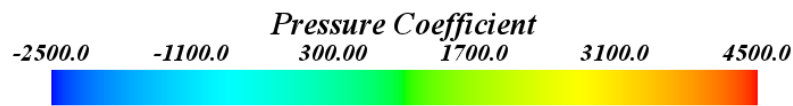
اسپری ریل به ترتیب بیشترین تاثیر را در میزان زاویه تریم شناور دارند. در حالت حرکتی پروازی تعداد اسپری ریل‌ها تاثیر بیشتری بر میزان تریم شناور نسبت به زاویه زیرین

در شکل ۱۱-ج نتایج مربوط به تحلیل زاویه تریم شناور نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی زاویه زیرین، تعداد و عرض

داشته است که علت این موضوع افزایش اسپری آب در حالت پروازی و افزایش نقش تعداد اسپری ریل‌ها بر میزان نیروی لیفت وارد در ناحیه سینه شناور می‌باشد و این امر موجب تاثیر بیشتر آن بر میزان تریم شناور می‌گردد (شکل ۱۱-د).

در شکل ۱۳ کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور در حالت با اسپری ریل (موازی با کیل و در راستای چپین) و بدون آن، برای دو حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی و پروازی نشان داده شده‌است. مشاهده می‌گردد که در حالت پروازی در شناور پایه، طول هشتی شکل خط سکون افزایش یافته است در نتیجه مساحت بیشتری تحت تاثیر اسپری آب نسبت به حالت نیمه جابه‌جایی قرار گرفته‌است به همین دلیل افزایش تعداد اسپری ریل‌ها در حالت پروازی تاثیر بیشتری بر کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب و در

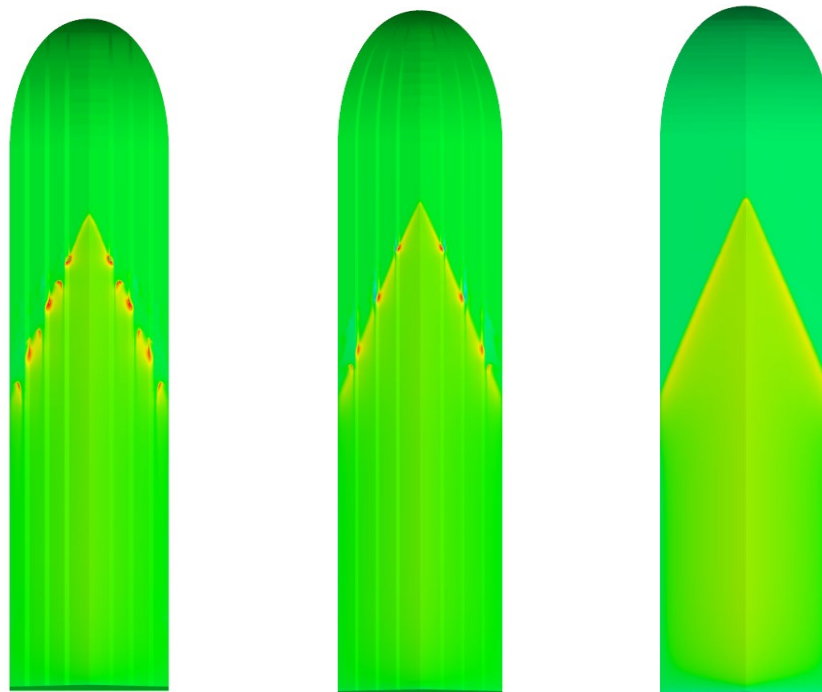
نهایت کاهش مقاومت شناور داشته است. بر همین مبنا بکارگیری اسپری ریل در حالت پروازی موثرتر و استفاده از آن بسیار ضروری می‌باشد. همچنین مقایسه ضریب فشار وارد بر کف شناور در هر دو حالت قرارگیری اسپری ریل نشان می‌دهد که استفاده از اسپری ریل‌های موازی با کیل، افزایش فشار بیشتری در خط سکون ایجاد نموده است که این امر موجب افزایش نیروی لیفت در سینه شناور و در نهایت افزایش تریم شناور گردیده است. افزایش تریم شناور به‌واسطه بکارگیری اسپری ریل‌های در راستای کیل، در محدوده تریم بحرانی قرار نمی‌گیرد؛ لذا استفاده از اسپری ریل‌های در راستای کیل موجب افزایش تریم و کاهش سطح خیس در شناور همراه با حفظ پایداری طولی گردیده است.



شناور پایه
 الف) حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی
 شناور مجهز به اسپری ریل در راستای چپین
 شناور مجهز به اسپری ریل موازی کیل

Pressure Coefficient

-5000.0 -2800.0 -600.00 1600.0 3800.0 6000.0



شناور پایه
شناور مجهز به اسپری ریل در راستای چاین
شناور مجهز به اسپری ریل موازی کیل

(ب) حالت حرکتی پروازی

شکل ۱۳- کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور با و بدون اسپری ریل در آزمایش مدنظر برای دو حالت قرارگیری اسپری ریل

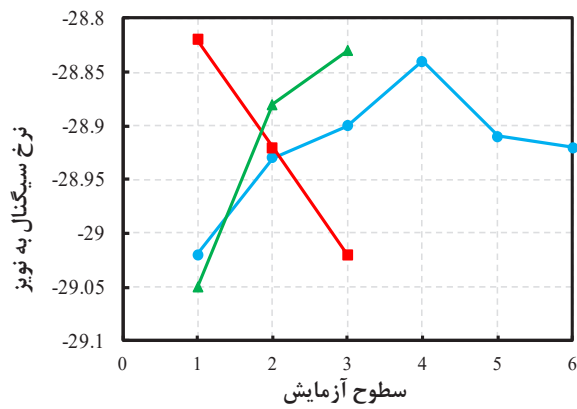
افزایش تریم و بالآمدگی شناور می‌گردد. بعلاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل موجب افزایش نیروی لیفت در شناور و در نتیجه افزایش تریم و بالآمدگی شناور می‌گردد.

۳-۴- زاویه خیزکف ۲۵ درجه با اسپری ریل در راستای چاین

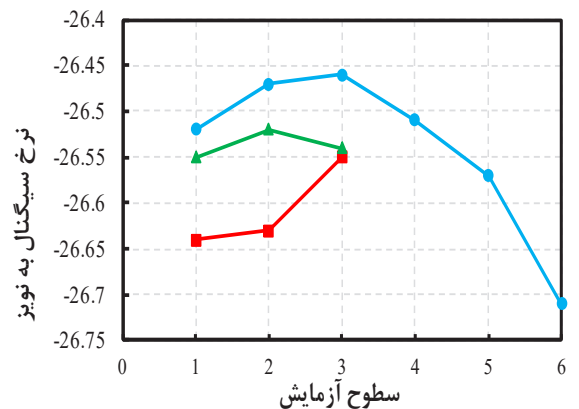
در این بخش نتایج مولفه‌های هیدرودینامیکی حاصل از طرح آزمایش تاگوچی بر مبنای نرخ سیگنال به نویز برای شناور با زاویه خیزکف ۲۵ درجه بررسی و تحلیل شده‌است. در این قسمت جهت اسپری ریل‌ها در راستای چاین شناور در نظر گرفته شده‌است. نتایج تحیل تاگوچی برای مولفه‌های هیدرودینامیکی مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی شناور در شکل ۱۴ ارائه گردیده است.

نتایج مربوط به بالآمدگی شناور در شکل ۱۱-ه و ۱۱-ت نشان داده شده‌است. این نتایج بیان می‌کند که مولفه‌های زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل به ترتیب موثرترین مولفه‌های هندسی بر میزان بالآمدگی شناور می‌باشند. در این حالت مشاهده می‌شود که کاهش زاویه زیرین و همچنین افزایش تعداد و عرض اسپری ریل‌ها در کف شناور موجب افزایش میزان بالآمدگی در شناور شده‌است.

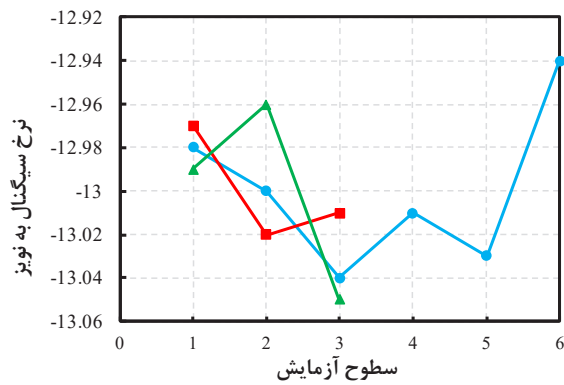
نتایج نشان می‌دهد که در دو حالت قرارگیری اسپری ریل (در راستای چاین و موازی با کیل) اهمیت پارامترهای هندسی مورد بررسی (زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل) در نرخ مولفه‌های هیدرودینامیکی شناور (مقاومت، تریم و بالآمدگی) تغییر نکرده است؛ بطوری‌که در هر دو حالت کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب



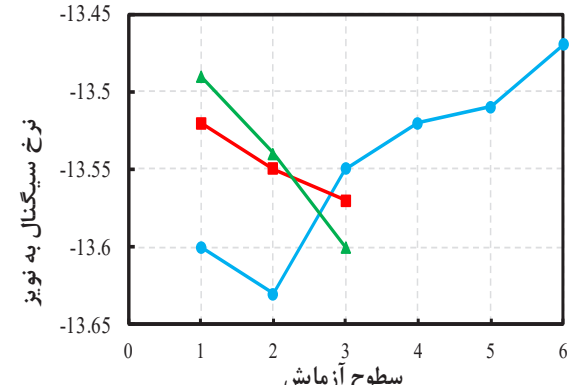
تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)



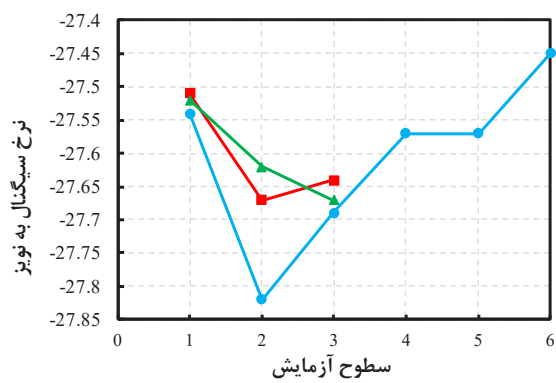
تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)



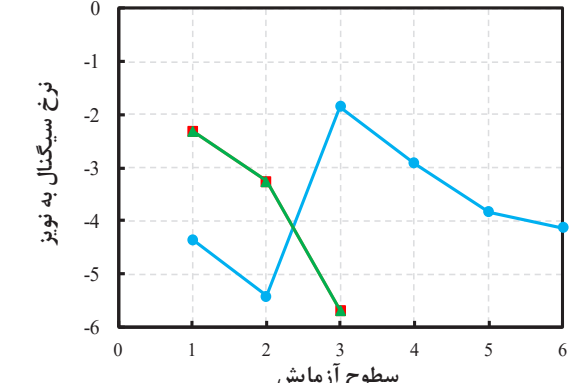
تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(د) زاویه تریم ($Fr_B = 3/33$)



تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(ج) زاویه تریم ($Fr_B = 1/99$)



تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(ت) بالآمدگی ($Fr_B = 3/33$)

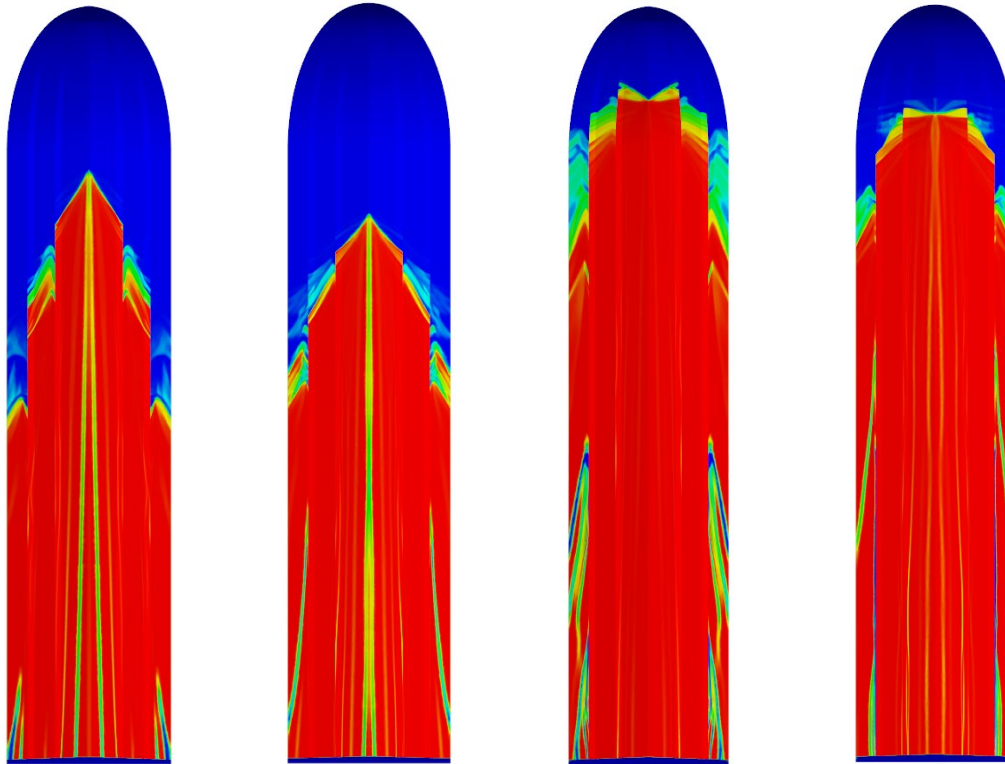
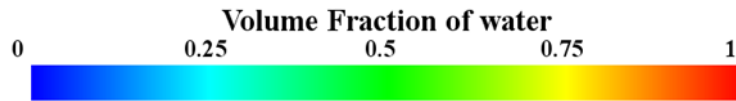


تعداد اسپیری ریل — درصد عرض اسپیری ریل — زاویه زیرین اسپیری ریل
(ه) بالآمدگی ($Fr_B = 1/99$)

شکل ۱۴- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۵ درجه و اسپیری ریل‌های در راستای چپین

شناور مجهز به اسپیری ریل‌های در راستای چپین در دو زاویه خیز ۲۰ و ۲۵ درجه مقایسه شده‌است. افزایش زاویه خیز کف در حالت کلی موجب کاهش نیروی لیفت و کاهش بالآمدگی شناور شده‌است و این موضوع، موجب افزایش سطح خیس و در نهایت باعث افزایش مقاومت شناور گردیده است. همچنین افزایش زاویه خیز کف موجب افزایش میزان اسپیری آب بر روی بدنه شناور شده‌است.

در شکل ۱۴ (الف و ب) نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به مقاومت شناور ارائه شده‌است. اهمیت و نحوه اثرگذاری پارامترهای زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپیری ریل بر میزان مولفه‌های هیدرودینامیکی تغییر نکرده است و مشابه حالت قرارگیری اسپیری در شناور با خیز کف ۲۰ درجه است. در شکل ۱۵ سطح خیس کف شناور در آزمایشی با شرایط زاویه زیرین ۱۲ درجه، درصد عرض ۴ و تعداد ۴ ریل، برای



زاویه خیز کف ۲۵ درجه
عدد فرود ۳/۳۳

زاویه خیز کف ۲۰ درجه
عدد فرود ۳/۳۳

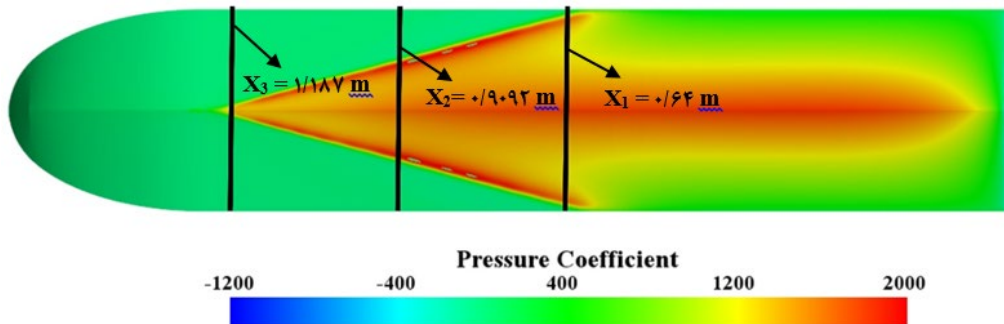
زاویه خیز کف ۲۵ درجه
عدد فرود ۱/۹۹

زاویه خیز کف ۲۰ درجه
عدد فرود ۱/۹۹

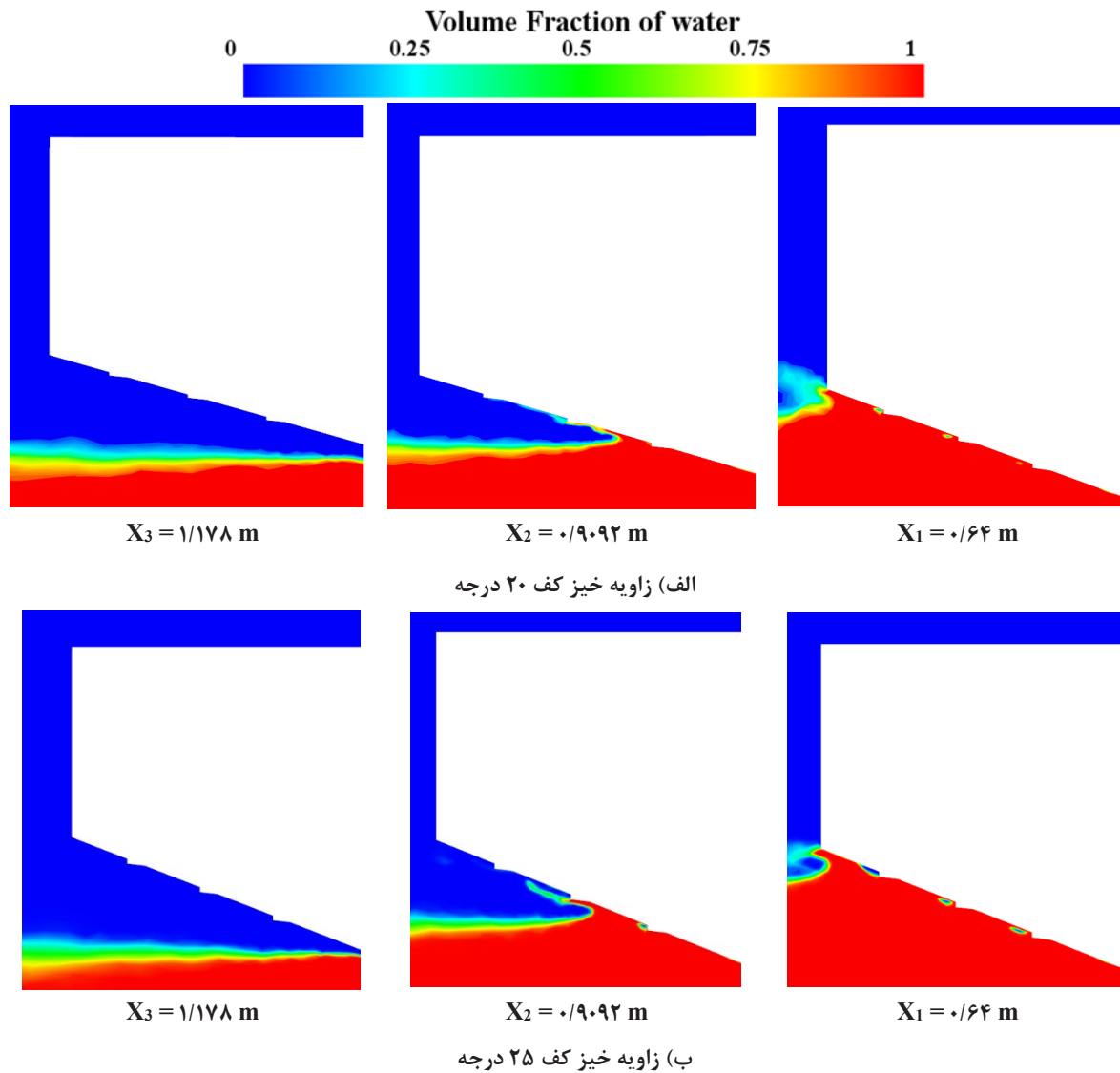
شکل ۱۵- سطح خیس کف شناور با زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه برای دو حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی و پروازی

کف ۲۰ و ۲۵ درجه نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که زائده اسپری‌ریل در زاویه خیز کف ۲۵ درجه عملکرد بهتری داشته و همچنین هوادهی بیشتری در پشت مقطع اسپری‌ریل ایجاد شده‌است. در واقع با افزایش زاویه خیز کف میزان اسپری آب افزایش یافته است که این موضوع باعث انگیزه بیشتری در استفاده از اسپری‌ریل می‌شود؛ در مجموع می‌توان گفت بکارگیری اسپری‌ریل و افزایش تعداد نوارهای اسپری‌ریل در زوایای خیز کف بزرگتر تاثیر بیشتری بر کاهش میزان سطح خیس ناشی از اسپری دارد.

به منظور بررسی تاثیر اسپری‌ریل در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه، سطح خیس شناور در سه مقطع عرضی که به ترتیب در فواصل ۰/۶۴، ۰/۹۲ و ۱/۱۸۷ متر از پاشنه شناور قرار دارند؛ در حالت پروازی مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقاطع عرضی مذکور طوری تعیین شده‌اند که از ابتدا تا انتهای خط سکون را در حالت پروازی که بیشترین مقدار اسپری وجود دارد، پوشش دهند. صفحات عرضی در نظر گرفته شده در کف شناور در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است. در شکل ۱۷ تاثیر زائده اسپری‌ریل بر میزان اسپری آب در صفحات عرضی مختلف برای دو زاویه خیز



شکل ۱۶- صفحات عرضی در نظر گرفته شده در کف شناور



شکل ۱۷- تاثیر اسپری ریل بر تغییر زاویه خیز کف در مقاطع عرضی مختلف برای حالت حرکتی پروازی

این موضوع افزایش زاویه تریم شناور را به همراه داشته است؛ لذا استفاده از اسپری ریل در شناورهایی با زاویه خیز کف بیشتر اثرگذاری بیشتری بر میزان تریم و کاهش سطح خیس ناشی از اسپری آب دارد.

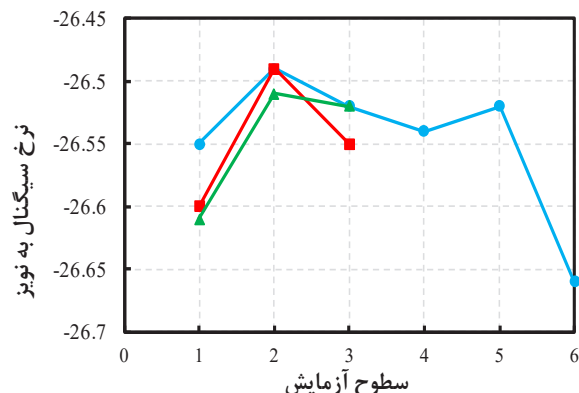
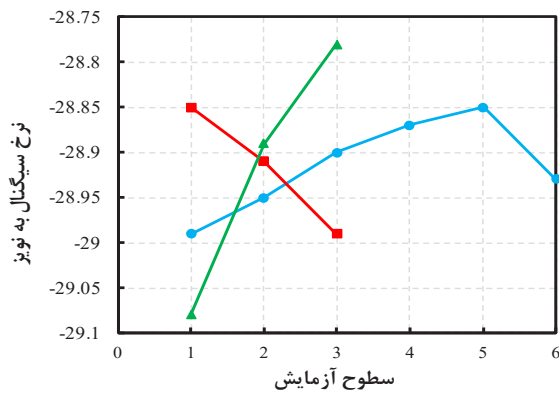
نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به بالآمدگی شناور در شکل ۱۴ (ه و ت) نشان داده شده است. مشاهده می شود که اهمیت مولفه های هندسی اسپری ریل بر بالآمدگی شناور مطابق با نتایج شناور با زاویه خیز کف ۲۰ درجه می باشد. همچنین مقایسه نتایج مربوط به بالآمدگی شناور در زوایای خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه بیان کند که افزایش زاویه خیز کف موجب کاهش نیروی لیفت وارد بر شناور و در نتیجه کاهش میزان بالآمدگی شناور گردیده است.

۴-۴- زاویه خیز کف ۲۵ درجه با اسپری ریل موازی با کیل

در شکل ۱۴ (ج و د) نتایج تحلیل تاگوچی مربوط به زاویه تریم شناور ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که در حالت حرکتی نیمه جابه جایی و پروازی به ترتیب زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل موثرترین مولفه های هندسی در میزان تریم شناور می باشند. با بررسی کانتور ضریب فشار وارد بر کف شناور برای دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه برای حالت نیمه جابه جایی و پروازی، مشاهده می شود که با افزایش زاویه خیز کف، به دلیل کاهش نیروی لیفت، خط سکون به سینه شناور نزدیک تر شده و سطح بیشتری از شناور در داخل آب قرار گرفته است؛ همچنین طول خط سکون با افزایش زاویه خیز کف افزایش یافته است که این امر موجب افزایش سطح در معرض اسپری آب گردیده است. بر این اساس، گشتاور حاصل از خط فشار ایجاد شده توسط اسپری ریل در سینه شناور افزایش یافته است که

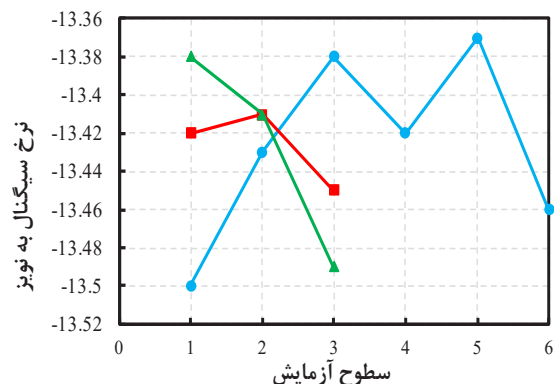
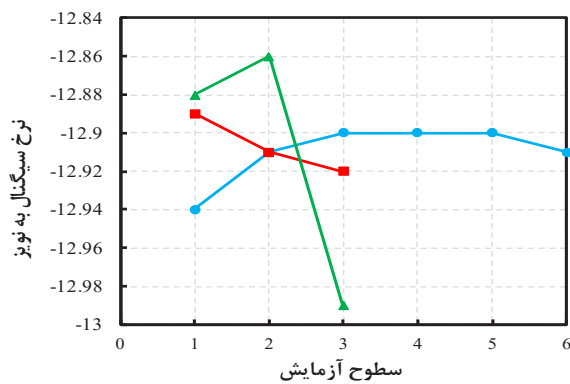
اسپری ریل (زاویه زیرین، تعداد و عرض اسپری ریل) بر میزان مقاومت کل، زاویه تریم و بالآمدگی برای شناور در شکل ۱۸ ارائه گردیده است.

نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی مربوط به زاویه خیز کف ۲۵ درجه با اسپری ریل‌های موازی کیل و نحوه اثرگذاری مولفه‌های هندسی در نظر گرفته شده برای



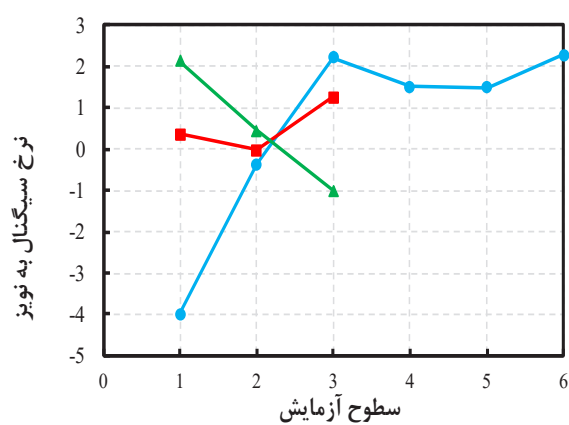
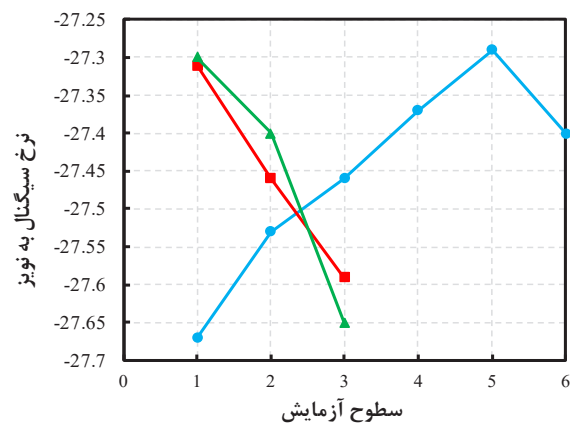
(ب) مقاومت کل ($Fr_B = 3/33$)

(الف) مقاومت کل ($Fr_B = 1/99$)



(د) زاویه تریم ($Fr_B = 3/33$)

(ج) زاویه تریم ($Fr_B = 1/99$)



(ت) بالآمدگی ($Fr_B = 3/33$)

(ه) بالآمدگی ($Fr_B = 1/99$)

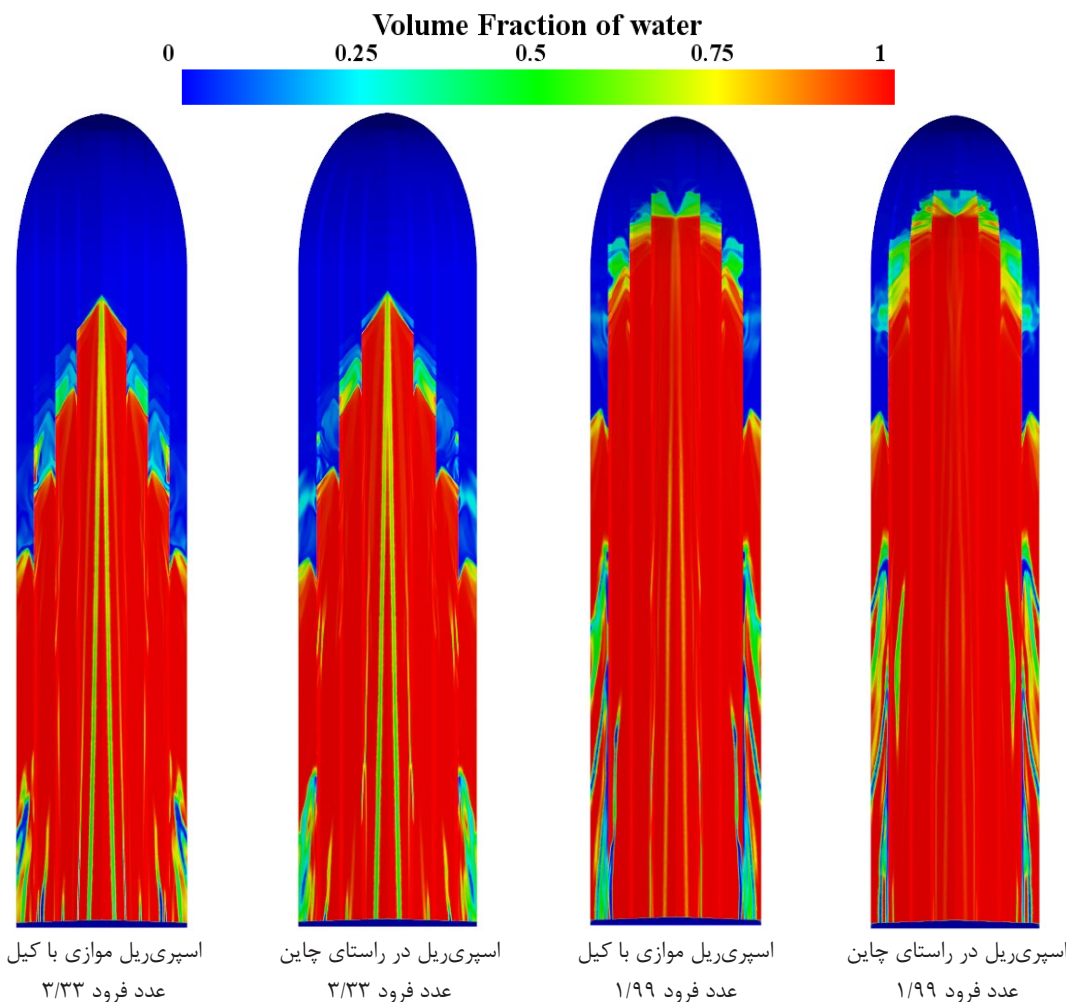
شکل ۱۸- تحلیل نتایج حاصل از طرح آزمایش تاگوچی برای شناور با زاویه خیز کف ۲۵ درجه و اسپری ریل‌های موازی با کیل

شناور مطابق شناور مجهز به اسپری ریل‌های در راستای چپین است. در شکل ۱۹ تاثیر دو راستای قرارگیری اسپری ریل‌ها در زاویه خیز کف ۲۵ درجه بر سطح خیس

نتایج مربوط به تحلیل‌های تاگوچی برای مقاومت شناور در حالت مورد بررسی در شکل ۱۸ (الف و ب) ارائه شده است. میزان حساسیت پارامترهای هندسی بر میزان مقاومت

جابه‌جایی و پروازی و در نهایت کاهش مقاومت شناور گردیده است. در نتیجه در حالت کلی اسپری‌ریل‌های موازی کیل عملکرد بهتری نسبت به اسپری‌ریل‌های در راستای چاین داشته‌اند.

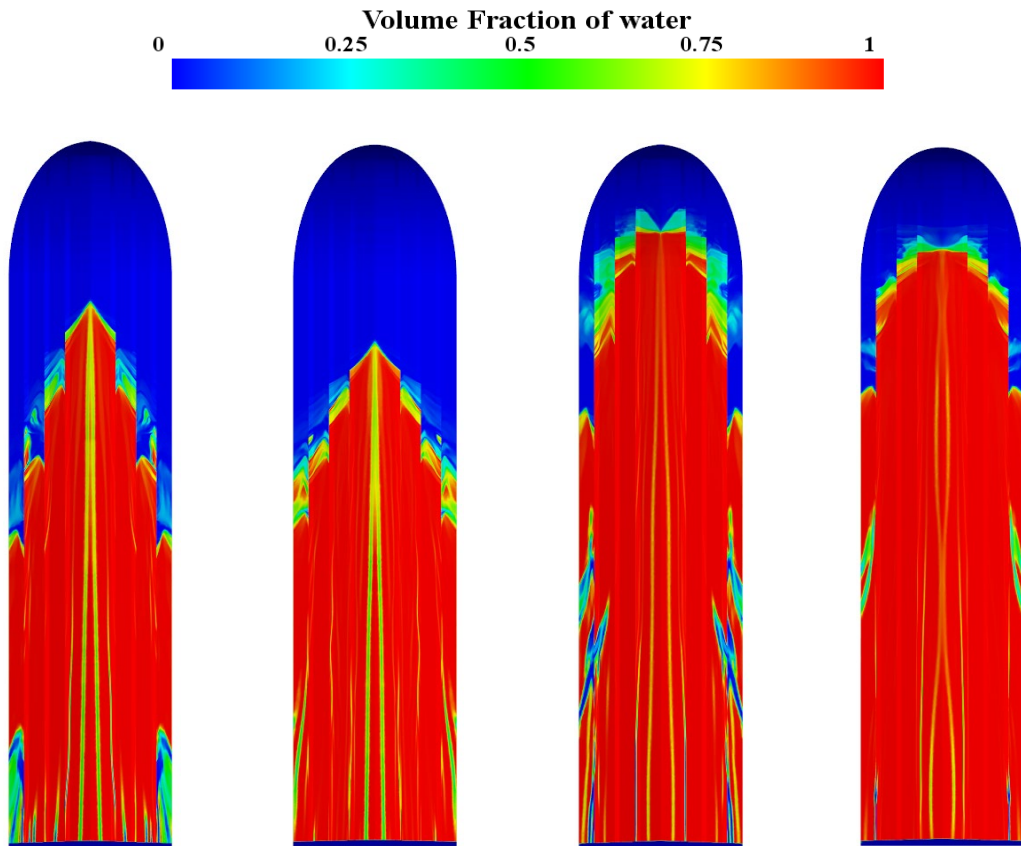
شناور برای آزمایشی با مشخصات زاویه زیرین ۴ درجه، نسبت عرض ۲ درصد و تعداد ۶ اسپری‌ریل نشان شده‌است. مشاهده می‌گردد که بکارگیری اسپری‌ریل‌های موازی با کیل موجب کاهش سطح خیس در هر دو حالت نیمه



شکل ۱۹- سطح خیس کف شناور در دو حالت قرارگیری اسپری‌ریل در زاویه خیز ۲۵ درجه

افزایش میزان اسپری آب در شناور شده‌است. بر این اساس استفاده از اسپری‌ریل در زاویه خیز کف ۲۵ درجه نسبت به زاویه خیز ۲۰ درجه، اثر بیشتری بر کاهش سطح خیس شناور از طریق کاهش سطح در معرض اسپری آب دارد.

در شکل ۲۰ سطح خیس کف شناور مجهز به اسپری‌ریل‌های موازی با کیل در دو زاویه خیز کف ۲۰ و ۲۵ درجه در آزمایشی با مشخصات زاویه زیرین ۸ درجه، نسبت عرض ۳ درصد و تعداد ۶ اسپری‌ریل، نشان داده شده‌است؛ مشاهده می‌شود که افزایش زاویه خیز کف موجب کاهش نیروی لیفت و افزایش سطح خیس در شناور گردیده است. همچنین افزایش زاویه خیز کف موجب



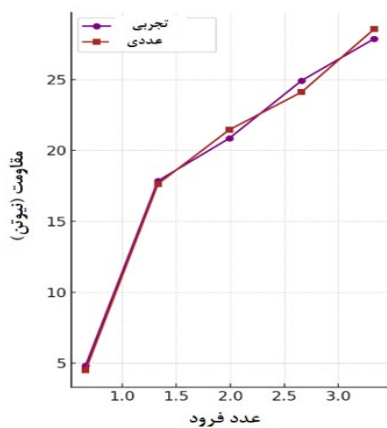
شکل ۲۰- سطح خیس کف شناور مجهز به اسپری ریل در آزمایش بیان شده

زاویه خیز کف ۲۵ درجه / عدد فرود عرضی ۳/۳۳ / زاویه خیز کف ۲۰ درجه

زاویه خیز کف ۲۵ درجه / عدد فرود عرضی ۱/۹۹ / زاویه خیز کف ۲۰ درجه

۵- اعتبارسنجی حل عددی

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، نتایج روش عددی با نتایج تجربی برای بدنه لخت (بدون اسپری ریل)، که در آزمایشگاه دریایی شهدای خلیج فارس توسط ابراهیمی [16] به دست آمده است، مقایسه شده‌اند. در شکل ۲۱، نتایج عددی و تجربی مربوط به مقاومت در محدوده عدد فرود ۰/۶۶ تا ۳/۳۳ مقایسه شده‌اند.



شکل ۲۱- مقایسه نتایج حل عددی و تجربی

نتایج مربوط به تحلیل تریم شناور (شکل ۱۸ ج و د) نشان می‌دهد که در حالت حرکتی نیمه جابه‌جایی زاویه زیرین اسپری ریل تاثیر بیشتری نسبت به تعداد اسپری ریل‌ها بر مقدار تریم شناور داشته است؛ در حالی که در حالت پروازی این نسبت عکس می‌باشد که عامل آن افزایش نیروی لیفت در حالت پروازی به واسطه افزایش تعداد اسپری ریل‌ها می‌باشد. کاهش زاویه زیرین اسپری ریل موجب افزایش تریم شناور گردیده است که عامل آن افزایش نیروی لیفت می‌باشد به علاوه افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها به علت افزایش نیروی لیفت موجب افزایش زاویه تریم شناور گردیده است. در حالت مورد بررسی، زاویه زیرین اسپری ریل موثرترین مولفه هندسی بر میزان بالآمدگی شناور است که کاهش آن موجب افزایش بالآمدگی شناور شده‌است. همچنین افزایش عرض و تعداد اسپری ریل‌ها با افزایش میزان نیروی لیفت وارد بر بدنه، موجب افزایش بالآمدگی در شناور شده‌است.

- In: Bertram V, editor. HullPIC'17. 2nd Hull Performance & Insight Conference; 2017 Mar27- 29; Ulrichshusen.
- [3] L. Larsson and E. Baba, "Ship resistance and flow computations, Adv. Mar. Hydrodyn. vol. 5, pp. 1–75, 1996.
- [4] L. Larsson, R. Eliasson, and M. Orych, Principles of Yacht Design, no. Second Edition. 2000.
- [5] Jimboat, Tunnel Boat Performance News, "Don't Spray! - Spray Rail Design for Performance Boats", aero marine research, 2012.
- [6] E. P. Clement, "Reduction of planing boat resistance by deflection of the whisker spray," 1964.
- [7] J. Seo et al., "Model tests on resistance and seakeeping performance of wave-piercing high-speed vessel with spray rails," Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng., vol. 8, no. 5, pp. 442–455, 2016.
- [8] S. Samuel, A. Trimulyono, P. Manik, and D. Chrismianto, "A Numerical Study of Spray Strips Analysis on Fridsma Hull Form," Fluids, vol. 6, no. 11, p. 420, 2021.
- [9] G. Fridsma, "A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats (Irregular Waves - Part II)," Stevens Inst of Tech Hoboken NJ Davidson Lab, 1971.
- [10] "ITTC. Recommended procedures and guidelines. 75-03-02-03 2014b."
- [11] "ITTC. Practical guidelines for ship CFD applications. (75-03-02-03) Revision-01. 2011."
- [12] P. M. Carrica, R. V Wilson, R. W. Noack, and F. Stern, "Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids," Comput. & fluids, vol. 36, no. 9, pp. 1415–1433, 2007.
- [13] A. De Marco, S. Mancini, S. Miranda, R. Scognamiglio, and L. Vitiello, "Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull," Appl. Ocean Res., vol. 64, pp. 135–154, 2017.
- [14] E. Begovic, "Numerical Modelling of a Planing Craft with a V-Shaped Spray Interceptor Arrangement in Calm Water," in HSMV 2020: Proceedings of the 12th Symposium on High Speed Marine Vehicles, 2020, vol. 5, p. 33.
- [15] F. De Luca, S. Mancini, S. Miranda, and C. Pensa, "An extended verification and validation study of CFD simulations for

نتایج نشان می‌دهد که حداکثر خطای بین مقادیر عددی و تجربی حدود ۶/۵ درصد است. بر این اساس، شبیه‌سازی حاضر می‌تواند رفتار شناور را محاسبه و پیش‌بینی کند.

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نیروی مقاومت همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی این شناورها بوده است. مهم‌ترین عامل در ایجاد نیروی مقاومت، سطح خیس‌شده در معرض سیال آب است که به دو بخش سطح فشار و سطح خیس‌شده ناشی از پاشش آب تقسیم می‌شود. یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌ها برای کاهش سطح خیس‌شده ناشی از پاشش آب، استفاده از زائده طولی اسپری ریل است. در مطالعه حاضر، نقش مشخصات هندسی اسپری ریل بر پارامترهای هیدرودینامیکی مقاومت، تریم و بالابآمدگی با استفاده از روش عددی بررسی گردیده است. مشخصات هندسی مورد بررسی شامل زاویه کف، عرض و تعداد اسپری ریل‌ها است که در دو موقعیت کلی موازی با کیل و در راستای چپین روی کف شناور قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، برای بررسی مشخصات هندسی اسپری ریل، از روش طراحی آزمایش‌ها (Taguchi) استفاده شده است و تأثیر مشخصات هندسی ذکر شده بر تعداد اجزای هیدرودینامیکی بر اساس روش سیگنال به نویز اندازه‌گیری شده است. با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته مشخص گردید که شناور در حالت نصب اسپری ریل نسبت به حالت بدون اسپری ریل، تأثیر بهتری بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی و رفتار شناور دارد؛ همچنین اسپری ریل‌های موازی با کیل، تأثیر قابل توجه‌تری در کاهش سطح خیس‌شده شناور نسبت به اسپری ریل‌های قرار گرفته در راستای چپین دارند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اسپری ریل‌های موازی با کیل، نقش تأثیرگذارتری در کاهش مقاومت شناور نسبت به اسپری ریل‌های در راستای چپین دارند.

منابع

- [1] D. Savitsky, M. F. DeLorme, and R. Datla, "Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls," Mar. Technol. SNAME News, vol. 44, no. 1, pp. 35–56, 2007, doi: 10.5957/mt1.2007.44.1.35.
- [2] Park BJ, Shin MS, Ki MS, Lee GJ, Lee SB Experience in Applying ISO19030 to Field Data.

Shipbuilding 46: 183-188.
doi:10.35219/AnnUgalShipBuilding/2023
.46.23.

- [19] Ebrahimi A, Najafi A, Nadery A, Moghaddas A. 2024. Numerical study of the amount and effect of geometric characteristics of spray rail section on the hydrodynamic parameters of a high-speed planing vessel. *J. Ocean Eng. Mar. Energy*. doi:10.1007/s40722-024-00338-w.
- [20] Hajizadeh A, Gorji-Bandpy M. 2025. Numerical study of the effect of geometric characteristics of spray rail section on the hydrodynamic parameters of a high-speed planing craft. *Ships and Offshore Structures*.
<https://doi.org/10.1080/17445302.2025.2516677>.
- planing hulls,” *J. Sh. Res.*, vol. 60, no. 02, pp. 101–118, 2016.
- [16] Ebrahimi A, Shafaghat R, Hajiabadi A, Yousefifard M. 2022. Numerical and Experimental Investigation of the Aero-Hydrodynamic Effect on the Behavior of a High-Speed Catamaran in Calm Water. *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 21, no. 3, pp. 56–70. doi:10.1007/s11804-022-00295-6.
- [17] Ghadimi P, Sajedi S. M, Sheikholeslami M, Ghadimi A. 2023. Numerical Study of the Effect of Angle and Location of the First and Second Steps on the Performance of Planing Hull and Their Optimization Using the Taguchi Statistical Method. *Math. Probl. Eng.*, vol. 2023, pp. 1–18. doi:10.1155/2023/6881630.
- [18] Mitrofan A, Mandru A, Pacuraru F. 2023. Study on the position of the bow spray rail of a patrol vessel. *Annals of Dunarea de Jos, University of Galati. Fascicle XI*

نیازسنجی ساخت شناور درمانی با رویکرد امدادی و بشردوستانه

محمد بینازاده^۱، سعید جامعی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، معماری کشتی گرایش سازه، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. Milad.binazaeh@gmail.com

۲- استادیار گروه دریا دانشکده مهندسی دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران. jaameisa@pgu.ac.ir

چکیده:

کشتی بیمارستانی به‌عنوان یک واحد درمانی سیار دریایی، نقش مؤثری در ارائه خدمات پزشکی در مناطق ساحلی و دورافتاده ایفا می‌نماید. بهره‌گیری از این ظرفیت در جمهوری اسلامی ایران، به‌ویژه در سواحل جنوبی کشور، می‌تواند موجب ارتقاء سطح سلامت عمومی و افزایش تاب‌آوری در برابر بحران‌های طبیعی و انسانی گردد. این اقدام، زمینه‌ساز توسعه پایدار، رونق اقتصادی و تقویت حضور جمعیتی در مناطق راهبردی کشور خواهد بود. این نوع زیرساخت درمانی، در مواقع اضطراری نظیر زلزله، سیل یا حوادث غیرمترقبه، امکان امدادرسانی سریع و مؤثر را فراهم می‌سازد. همچنین حضور کشتی‌های بیمارستانی در مأموریت‌های بشردوستانه منطقه‌ای، زمینه‌ساز تقویت دیپلماسی سلامت و ارتقاء وجهه بین‌المللی کشور خواهد بود. توسعه چنین ظرفیت‌هایی، گامی راهبردی در جهت تحقق عدالت درمانی و پشتیبانی از مناطق محروم محسوب می‌شود. ساخت شناورهای درمانی از آغاز نبردهای دریایی در ارتش‌های مختلف در دستور کار قرار گرفته است در زمان صلح نیز از این شناورها به منظور اهداف بشردوستانه و افزایش نفوذ فرهنگی استفاده می‌شود. در این پژوهش ساخت شناورهای درمانی در راستای اهداف داخلی و بین‌المللی به عنوان یک نیاز شناسایی شده است؛ با بررسی نحوه استفاده و به‌کارگیری این نوع از کشتی‌ها در سایر کشورها به ارائه توجیهات ساخت شناور درمانی و نحوه استفاده از آن در مواقع بحرانی و غیر بحرانی در حوزه داخلی و بین‌المللی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی:

بیمارستان دریایی، پدافند غیرعامل، کشتی بیمارستانی، جزایر

Needs Assessment for the Construction of a Medical Vessel with a Humanitarian and Relief-Oriented Approach

Mohammad Binazadeh¹, Saeid Jaamei²

Master's student, ship architecture, structural orientation, Persian Gulf University, Bushehr, Iran
Assistant Professor of Marine Department, Faculty of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Abstract

Marine medicine and maritime relief—concepts that have gained significant traction in global medical literature in recent years—constitute a specialized branch of medical science dedicated exclusively to operations in maritime environments. Despite its growing relevance, marine medicine and the treatment of maritime casualties are not new disciplines; historically, coastal communities have long practiced forms of sea-based medical care tailored to their unique needs. Although Iran has a rich legacy in maritime activity and navigation, and possesses extensive coastlines in both the north and south, along with exposure to natural and military threats from the Persian Gulf and the Sea of Oman, marine medicine and its associated industries remain underdeveloped and relatively nascent. The construction of medical vessels has been a strategic priority for naval forces since the earliest maritime conflicts. In peacetime, these vessels are also deployed for humanitarian missions and to enhance cultural influence. Iran, with over 2,000 kilometers of southern coastline and numerous islands and offshore oil platforms in the Persian Gulf and the Sea of Oman, faces a clear need for such capabilities. This study identifies the construction of medical vessels as a national and international necessity. By examining how similar ships are utilized in other countries, we present justifications for building medical vessels and explore their potential applications in both crisis and non-crisis situations within domestic and global contexts.

Keywords

Naval Hospital .Passive Defense .Ship

مفاهیم پزشکی دریایی و امداد رسانی دریایی که چند سال اخیر در ادبیات علوم پزشکی جهان کاربردهای فراوانی یافته است در واقع شاخه‌ای از علوم پزشکی است که منحصر در حوزه دریا به فعالیت می‌پردازد، با این همه پزشکی دریایی و امداد رسانی به حوادث مصدومان دریایی علمی نوپا نیست و از گذشته‌های دور مردمان به خصوص آنانی که در سرزمین‌های ساحلی می‌زیستند به طور اختصاصی به آن می‌پرداختند. علی‌رغم سابقه طولانی ایران در عرصه دریا و دریانوردی و برخورداری از مرز آبی قابل ملاحظه در جنوب و شمال و همچنین تهدیدات طبیعی و نظامی موجود از ناحیه خلیج فارس و دریای عمان، علم پزشکی دریایی و صنایع مربوط به آن گسترش چندانی نیافته و حتی بسیار نوپا هستند [۱].

حضور در دریا و استفاده از امتیازات اقتصادی، نظامی، سیاسی و اجتماعی آن باعث قدرت افزایی کشور می‌شود، کشورهای قدرتمند دنیا با ساخت شناورهای پیشرفته و متعدد حوزه نفوذ خود در جهان را گسترش می‌دهند. قابلیت‌ها و کاربردهای قدرت دریایی به چهار دسته عملیات نظامی، عملیات انتظامی و یا پلیسی، عملیات اقتصادی و عملیات امدادی و صلح جویانه تقسیم می‌شود [۲]. موقعیت ژئوپولتیکی و استراتژیک جزایر و شهرهای ساحلی، ایران را دارای جایگاه ممتازی در خلیج فارس و دریای عمان کرده است [۳]. مقام معظم رهبری بارها بر این موضوع تاکید کرده‌اند که توسعه دریامحور و رسیدگی به جزایر باید در دستور کار قرار گیرد. مسئولان کشور نیز همواره سعی داشته‌اند مردم را تشویق به زندگی در این مناطق کنند، این امر در سال‌های اخیر به دلیل مسائل نظامی، سیاسی و اقلیمی پیش آمده به یکی از اولیوت‌های اصلی سیاست مداران تبدیل شده است.

ساخت و بهره‌مندی از بیمارستان‌های دریایی در چند سال اخیر، مخصوصاً بعد از آغاز همه‌گیری کرونا در جهان اهمیت فراوانی پیدا کرده است. کشورهای قدرتمند دنیا به منظور حفاظت و حمایت بهداشتی و درمانی از مردم و سرزمین خود و همچنین در راستای اهداف بشردوستانه از این شناورها استفاده می‌کنند. با توجه به موقعیت جغرافیایی و سیاسی ایران و تهدیدات طبیعی و انسان‌ساز و همچنین عدم توسعه یافتگی مناسب جنوب کشور در بخش بهداشت و درمان حضور یک کشتی بیمارستانی در

آب‌های جنوب کشور می‌تواند علاوه بر پوشش درمانی و بهداشتی جنوب کشور در بحث جذب گردشگران سلامت نیز به اقتصاد کشور کمک کند.

۲- کشتی بیمارستانی، خصوصیات و تاریخچه

کشتی بیمارستانی در واقع یک شناور با تجهیزات بهداشتی و درمانی است، مأموریت اصلی آن اعزام به مناطق و موقعیت‌هایی است که دسترسی مناسبی به خدمات پزشکی وجود ندارد و یا به صورت اورژانسی نیاز به خدمات درمانی و حمایت فوری از افراد افزایش پیدا می‌کند. این کشتی خدماتی مانند معاینه تخصصی، دندان پزشکی، آزمایشگاه، رادیولوژی، امکانات جراحی و اتاق عمل، امکانات بستری و مراقبت و ... را ارائه می‌دهد.



شکل ۱- کشتی بیمارستانی گلوبال مرسی

برای صرفه جویی در هزینه‌های ساخت و تولید معمولاً کشتی‌های تجاری یا نظامی را تغییر کاربری داده و از آن‌ها به عنوان کشتی بیمارستانی استفاده می‌کنند [۴]. ابعاد و اندازه آن‌ها با توجه به نیاز و مأموریت‌های تعریف شده متغیر هستند. نمای بیرونی این کشتی‌ها با رنگ سفید پوشیده شده و علاوه بر پرچم رده‌بندی خود، علامت و پرچم هلال احمر نیز باید با آن‌ها باشد. نیاز به کشتی‌های بیمارستانی به قرن‌ها قبل بازمی‌گردد اولین گزارش‌ها مربوط به ساخت بیمارستان دریایی یا تجهیز بخشی از فضای کشتی به امکانات درمانی به حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. یک کشتی متعلق به ناوگان نظامی آتن که وظیفه آن ارائه خدمات بیمارستانی به جنگجویان بود. این کشتی‌ها بعدها به پناهگاه‌های شناور معروف شدند، آن‌ها از انجام مأموریت‌های جنگی معاف بودند و فقط در عملیات‌های امداد و نجات رزمندگان شرکت داشتند، فعالیت‌های آنان توسط ارتش کشورهای مختلف به رسمیت و محترم شمرده می‌شدند و برای استفاده از آن‌ها در میدان جنگ قوانینی تدوین شد [۵]. با آغاز همه‌گیری جهانی کرونا

در سال ۲۰۱۹ نیاز به کشتی‌های بیمارستانی به طور بی‌سابقه‌ای افزایش یافت. در اوج همه‌گیری این بیماری و تکمیل شدن ظرفیت بیمارستان‌ها سیستم درمان برخی از کشورها مانند آمریکا، ایتالیا و فرانسه علاوه بر استفاده از کشتی‌های بیمارستانی موجود برخی از کشتی‌های مسافری و تجاری خود را به طور موقت تغییر کاربری داده و از آن‌ها به عنوان بیمارستان دریایی استفاده کردند. پس از آغاز جنگ روسیه و اوکراین و حمله رژیم صهیونیستی به نوار غزه به منظور حمایت از مجروحین جنگی استفاده از کشتی‌های بیمارستانی مجدداً افزایش یافت.

در حال حاضر کشورهای آمریکا، روسیه، چین، انگلیس، فرانسه، ایتالیا و... از کشتی‌های بیمارستانی استفاده می‌کنند. جمعیت هلال احمر جمهوری اسلامی ایران که پیش از انقلاب اسلامی جمعیت خورشید سرخ ایران نام داشت صاحب یک کشتی بزرگ بیمارستانی به نام فارور بود تا به ساکنان جزایر و بنادر در خلیج فارس خدمات رایگان بهداشتی و درمانی ارائه دهد، پیش از انقلاب اسلامی به دلیل عدم توسعه عمرانی بنادر و جزایر جنوب کشور مردم دچار مشکلاتی فراوانی در حوزه‌های مختلف بودند استان‌های جنوبی کشور فاقد امکانات درمانی کافی بودند پزشکان مستقر در این مناطق اغلب هندی بودند، درمانگاه‌ها و خانه‌های بهداشت فقط در مراکز استان‌ها قرار داشتند و فاقد امکانات مناسب درمانی بودند. ساکنین شهرهای کوچک باید از مسیرهای سخت و پس از طی مسافت طولانی خود را به این درمانگاه‌ها می‌رسانند. اغلب شهرهای نوار جنوبی کشور جمعیت کمی داشتند برای همین ساخت درمانگاه با در نظر گرفتن کمبود امکانات و کادر پزشکی نه ممکن بود نه بازدهی لازم را داشت لذا مسئولان وقت رژیم پهلوی برای حل این مشکل یک کشتی بیمارستانی پنج طبقه به قیمت ۱۲ میلیون مارک به وزن پنج هزار تن با ظرفیت ۵۰ تخت و امکاناتی همچون اتاق عمل، چشم‌پزشکی، داخلی، گوش و حلق و بینی، زایمان و... از آلمان خریداری کردند. فارور از آبادان حرکت کرده و پس از سه ماه و عبور از تمامی بنادر و جزایر و مداوای بیماران به چابهار می‌رسیده است طول هر دوره ماموریت این کشتی شش ماه بوده است. پس از پیروزی انقلاب اسلامی در سال ۱۳۵۹ به دستور رهبر انقلاب جمعیت هلال احمر مجدداً شروع به فعالیت

می‌کند اما به دلیل آغاز جنگ تحمیلی کشتی فارور نمی‌تواند ماموریت سابق خود را ادامه دهد. فعالیت کشتی فارور بعد از ۱۳ سال و مداوای ۳۶۰ هزار نفر به اتمام رسید؛ از این کشتی بیمارستانی تصاویر زیادی ثبت نشده است و هم‌اکنون اطلاعاتی از سرنوشت کشتی در دسترس نیست.



شکل ۲- کشتی بیمارستانی فارور

۳- چرا ایران به کشتی بیمارستانی نیاز دارد؟

در ادامه دلایل و توجیهات ساخت یک فروند کشتی بیمارستانی با دو رویکرد داخلی و بین‌المللی بیان می‌شود.

۳-۱- رویکرد داخلی

کشور ایران در جنوب با خلیج فارس و دریای عمان و در شمال با دریای خزر ارتباط دارد. نوار ساحلی کشورمان بین هفت استان گیلان، مازندران، خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان تقسیم شده است؛ ایران دارای بیش از ۳۰ جزیره در خلیج فارس و دریای عمان است که بسیاری از آن‌ها دارای اهمیت ژئوپلیتیکی و استراتژیک می‌باشد برخی از جزایر مانند قشم و کیش از نظر گردشگری و اقتصادی نیز برای کشور بسیار مهم هستند ضمن اینکه بسیاری از جزایر علاوه بر نقش نظامی و سیاسی خود، مسکونی نیز هستند و هموطنانمان در آن جزایر زندگی می‌کنند.

سکوهای نفتی ایران به عنوان قلب اقتصادی کشور در خلیج فارس و دریای عمان مستقر هستند تعداد این سکوها به بیش از ۱۵ عدد میرسد که توسط متخصصین و جوانان ایرانی اداره و کنترل می‌شوند نقش سواحل، جزایر و سکوهای نفتی از منظرهای سیاسی، نظامی و اقتصادی بر هیچ کس پوشیده نیست و مسئولان کشور با تأکید بر حضور و زندگی مردم در این مناطق همواره رشد و توسعه این مناطق را در دستور کار خود قرار داده‌اند. ایجاد زیرساخت‌های بهداشتی و درمانی می‌تواند تأثیر فراوانی در رشد جمعیت و به تبع آن پیشرفت این مناطق داشته باشد.

۳-۱-۱- توسعه و اسکان مردم در جنوب کشور

حضور و اسکان مردم در جنوب کشور مخصوصاً جزایر در ابعاد مختلف همچون حاکمیت ملی، امنیت و دفاع، توسعه اقتصادی و گردشگری و حفاظت از منابع طبیعی برای ایران مهم است. ظرفیت‌ها و موهبت‌های بالقوه و استراتژیک جزایر باعث شده است برخی از کشورهای همسایه با استفاده از فشار سیاسی و ارائه مستندات جعلی ادعای واهی مالکیت بر این جزایر را داشته باشند، بیانیه‌های سیاسی از سوی دولت‌مردان اگر با اقدامات عملی همراه نباشد فاقد حمایت اجتماعی است و بازدارندگی قاطعی در مقابل حکام منطقه ایجاد نمی‌کند. تاکیدات رهبر معظم انقلاب، انجام مانورهای نظامی توسط نیروهای مسلح و تصمیم دولت در خصوص مسکونی کردن جزایر، نشان از جدیت ایران در انجام اقدامات عملی و قاطع دارد. مطمئناً مسکونی کردن جزایر نیازمند تدوین طرح توسعه برای این مناطق است. ایجاد و بروزرسانی زیرساخت‌های پایدار مانند آب، برق، گاز، مخابرات و حمل و نقل نقش مهمی در توسعه جزایر و در نتیجه افزایش جمعیت ساکنان ایفا می‌کند. مهیا کردن شرایط مناسب برای زندگی مانند توسعه خدمات بهداشتی و درمانی، تامین امنیت جانی و روانی با تاکید بر اصول پدافند غیر عامل، ساخت فضاهای تفریحی و ورزشی و توجه به مسائل آموزشی علاوه بر اینکه انگیزه دو چندان در ساکنان ایجاد می‌کند می‌تواند عاملی برای افزایش و تعدد جمعیت شود. متأسفانه به دلیل عقب ماندگی جنوب کشور، نه تنها مردم تمایلی به مهاجرت و زندگی در این مناطق را ندارند، ساکنان بومی نیز به علت وجود مشکلات متعدد، بهره‌مندی از امکانات و رفع نیازهای ضروری چاره‌ای جز مهاجرت به مناطق دیگر را ندارند. در این پژوهش تاثیر کمبود خدمات بهداشتی و درمانی در عدم توسعه جزایر و شهرهای ساحلی بررسی شده است. عمده‌ترین سد مانع ارائه خدمت پزشکی به جزایر و سواحل دور دست خلیج فارس، اعزام میان‌مدت و حتی کوتاه مدت پزشکان متخصص است. پزشکانی که در شهرهای بزرگ و مراکز استان تمرکز یافته و مردم نیازمند به خدمات ایشان، مجبورند کیلومترها راه پیموده و به محضر این اطبا دست پیدا کنند. امری که برای بیش از ۸۰٪ این بیماران غیرممکن بوده و چه بسا جان و سلامتی ایشان را به مخاطره جدی بیندازد. در قانون اساسی و

سایر اسناد مهم مانند سیاست‌های کلی توسعه دریا محور، سند چشم انداز، بیانیه گام دوم انقلاب و ... همگی به توزیع عادلانه امکانات در کشور اشاره شده است؛ همچنین بر عهده نیروهای مسلح است که در صورت توان به کمک دستگاه‌های دولتی آمده و به آن‌ها در راه رسیدن به اهداف بیان شده یاری رسانند. برای رسیدن به وضعیت مطلوب مدنظر در قانون اساسی و ایجاد زیر ساخت‌های لازم در حوزه بهداشت و درمان به منظور توسعه شهرهای ساحلی و مسکونی شدن جزایر لازم است در تمام مناطق اشاره شده یک بیمارستان عمومی احداث و نیروی انسانی و تجهیزات آن فراهم گردد. در این صورت با توجه به جمعیت فعلی جزایر جدا از بلا استفاده بودن بخش زیادی از تجهیزات تامین نیروی انسانی بیمارستان‌ها کار دشواری است. کشورهایی مانند کره جنوبی و اندونزی که به لحاظ جغرافیایی شرایطی مشابه ایران دارند از شناورهایی با کاربری درمانی استفاده می‌کنند.

وجود یک کشتی بیمارستانی که در بازه‌های مشخصی از زمان، به جزایر دور و نزدیک و حتی سکوه‌های نفتی خلیج فارس سر زده و با تیم کلینیکی و پاراکلینیکی خود، به مشکلات سلامتی مردم محروم و کارگران صنعت نفت کشور بپردازد، یک گام نام‌آور برای جمهوری اسلامی ایران خواهد بود؛ امری که سالهاست توسط همسایگان جنوبی ایران پیگیری می‌شود.

۳-۱-۲- پدافند غیرعامل و لزوم آمادگی برای مقابله با شرایط بحرانی

سرزمین ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و سیاسی خود همواره در معرض انواع خطرات طبیعی و تهدیدات انسان‌ساز قرار داشته است و تلفات انسانی و خسارات مالی سنگینی از این ناحیه متحمل شده است. متأسفانه علی‌رغم پشت‌سر گذاشتن هشت سال دفاع مقدس و داشتن تجارب سخت و ارزشمند در برابر بلایای طبیعی اهمیت و توجه به اصول پدافند غیرعامل هنوز به طور جدی مورد توجه قرار نگرفته است. منظور از پدافند غیرعامل حفظ جان و مال انسان در برابر حوادث و تهدیدات و استمرار فعالیت‌های اساسی و ضروری و تضمین نیازهای حیاتی مردم از قبیل آب و نان، پناهگاه، انرژی، ارتباطات، بهداشت و امنیت و سهولت اداره کشور در شرایط بروز تهدید و بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی و تجاوزات خارجی از طریق طراحی و

اجرای طرح‌های دفاع غیرعامل و کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی و ... است [۶]. با بررسی حوادث طبیعی و نظامی رخ داده در منطقه خلیج فارس و دریای عمان متوجه می‌شویم که این مناطق همواره در معرض بروز بلایای طبیعی و نظامی قرار دارند. در صورت بروز بلایای طبیعی مانند وقوع یک زمین لرزه در مقیاس زلزله بم و کرمانشاه با توجه به شرایط جغرافیایی و عدم دسترسی زمینی به جزایر، پرسش ضروری این است که:

الف: دستگاه‌های مسئول چگونه می‌خواهند به مردم امداد رسانی کنند؟

ب: آیا ناوگان هوایی با توجه به عمر بالا و فرسودگی قطعات، توانایی تحمل فشار عملیاتی مانند زلزله کرمانشاه را دارد؟

ج: در صورت از بین رفتن باند فرودگاه، همانند زلزله بم و زلزله ترکیه، راه حل جایگزین برای رسیدن به جزایر چیست؟

د: آیا امکانات دریایی قابلیت جابجایی تجهیزات بیمارستانی را دارند؟

و ده‌ها پرسش دیگر که پاسخ منطقی و کارآمدی که بتوان به آن تکیه کرد وجود ندارد. ساخت بیمارستان دریایی یک راهکار مطمئن برای رسیدگی به جزایر و شهرهای ساحلی در مواقع بحرانی است. این کشتی می‌تواند بلافاصله وضعیت خود را به حالت عملیاتی و اضطراری تغییر داده و به منطقه مورد نظر اعزام گردد. با در نظر گرفتن امکان دسترسی بالگرد به کشتی تجهیزات و نیروی انسانی در کمترین زمان ممکن به کشتی رسیده و مشغول به فعالیت می‌شوند.

۳-۲- رویکرد بین‌المللی

نیروی دریایی در بسیاری از نقاط دنیا و در کشور ما یک نیروی راهبردی است و باید به چشم یک نیروی راهبردی به نیروی دریایی نگریسته شود. کسب توان لازم برای ایفای نقش تاثیرگذار در مسائل و تحولات منطقه‌ای و جهانی نیازمند کسب اقتدار و توانایی خاصی است که در حوزه‌های مختلف علمی، فرهنگی، نظامی، اقتصادی، اجتماعی و ... باید حاصل شود [۷]. قدرت اجتماعی و قدرت علمی تولید قدرت سیاسی می‌کند. باتوجه به محدودیت دامنه مانور نیروهای زمینی و هوایی در خارج از مرزهای کشور نیروی دریایی مهم‌ترین نهادی است که می‌تواند نقش تاثیرگذاری در منطقه و فرا منطقه داشته باشد. دریا به عنوان عرصه‌ای تعیین کننده برای کشورهایی که به آب آزاد دسترسی دارند چنان اهمیت دارد که هیچ ابزار و اهرمی قادر به

جایگزینی آن نیست [۸]. بروز بیماری‌های واگیردار مانند کرونا و وقوع بلایای طبیعی مانند زلزله ترکیه، تایلند و ... نیاز به کمک‌های بشر دوستانه را در چند سال اخیر افزایش داده است. کشتی‌های بیمارستانی با قابلیت‌های کاربردی و ارزشمند خود می‌توانند نقش موثری در این شرایط بازی کنند. حضور در عملیات‌های بین‌المللی انسان‌دوستانه باعث ایجاد دیپلماسی سلامت می‌شود که با این ابزار می‌توان با پروژه ایران حراسی مقابله کرد.

سال ۲۰۰۴ زلزله‌ای به بزرگی ۹/۱۵ ریشتر سواحل جزیره سوماترای اندونزی را به لرزه درآورد. نیروی دریایی آمریکا ناو بیمارستانی USNS Mercy را برای امدادرسانی به منطقه اعزام می‌کند و به بیش از ۹۵۰۰ نفر خدمات درمانی ارائه می‌دهد. حضور ناو مرسی در منطقه‌ای از جهان که بیشترین تمرکز مسلمانان جهان را دارد توانست تاثیر مثبت و شگفت‌انگیزی بر ذهنیت افکار عمومی مردم اندونزی نسبت به سیاست‌های کشور آمریکا بگذارد.



شکل ۳- ناو بیمارستانی مرسی

مطالعات یک مرکز تحقیقاتی نشان داد که پس از حضور آمریکا در منطقه و انجام عملیات بشردوستانه دیدگاه منفی مردم این کشور نسبت به آمریکا از ۷۲٪ در سال ۲۰۰۳ به ۳۶٪ درصد در سال ۲۰۰۵ کاهش یافت [۹]. واقع دولت آمریکا توانست با استفاده از قدرت دریایی و ایجاد بستر برای توسعه قدرت نرم، افکار ۶۵٪ از مردم اندونزی را نسبت به سیاست‌های خود مثبت کند و باب گفتگو برای سایر تعاملات را بگشاید.

جدول ۱- دلایل و توجیهات ساخت شناور درمانی

دلایل ساخت			
خدمات دهی داخلی	خدمات دهی به جزایر	خدمات دهی به جزایر	خدمات دهی به اسکوهای نفتی
کمک به کشورهای مشترک المنافع	ایجاد فرصت برای دیپلماسی سلامت	اعزام به ماموریت های بین المللی	ایجاد فرصت برای دیپلماسی سلامت

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

با استناد به بازدیدهای میدانی، گفتگو با مردم محلی و گزارش‌های متعددی که از سوی رسانه‌ها و خبرگزاری‌های رسمی در مورد کمبود امکانات بهداشتی و درمانی جنوب کشور منتشر می‌شود؛ مشخص می‌شود که امکانات موجود حتی در مواقع غیر بحرانی نیز توانایی برطرف کردن نیازهای مردم را ندارد چه رسد به اینکه این مناطق وارد فاز بحرانی شود. شاهد این ادعا مراجعه پرشمار ساکنان استان‌های ساحلی جنوب کشور به استان فارس برای دسترسی به پزشک متخصص و امکانات درمانی است. در زمان شیوع بیماری کرونا به دلیل نبود امکانات لازم بیماران از استان‌های بوشهر، بندرعباس، خوزستان و ... به استان فارس مراجعه کردند. در حادثه انفجار در گمرک بندرعباس بخش زیادی از مجروحین با هواپیما به استان فارس منتقل شدند. کشتی بیمارستانی می‌تواند در مواقع بحران مانند جنگ، زلزله، سیل یا همه‌گیری‌ها نقش مکمل برای زیرساخت‌های درمانی ایفا کرده و موجب تاب‌آوری نظام سلامت کشور شود. در مناطق دور افتاده و جزایر جنوبی، این شناور می‌تواند به ارتقاء عدالت درمانی، انسجام ملی و اعتماد عمومی کمک کند.

در سطح منطقه‌ای و بین‌المللی، ایران می‌تواند با الگوبرداری از کشورهایی مانند آمریکا و چین، با ساخت شناور درمانی و حضور فعال در مأموریت‌های بشردوستانه، به ویژه در کشورهای اسلامی، آسیایی و آفریقایی موجب تقویت تصویر انسانی کشور، کاهش تنش‌های سیاسی و افزایش نفوذ فرهنگی شود.

با توجه به مطالب بیان شده و بررسی دلایل ساخت شناور درمانی برای کشور، ساخت بیمارستان دریایی اقدامی راهبردی و چند وجهی است که با توجه به شرایط جغرافیایی، و الزامات و نیازهای بهداشتی کشور، توجیه پذیر و ضروری است.

سرمایه گذاری علمی و صنعتی در این حوزه فواید فراوانی دارد. پاسخ‌گویی به نیازهای مناطق ساحلی و دور افتاده، پاسخ سریع به بحران‌ها و بلایای طبیعی، تقویت زیر ساخت‌های توسعه دریامحور، پیشگیری و کنترل بیماری‌ها در محیط‌های دریایی و ...

بیمارستان‌های دریایی نه تنها ابزاری برای ارتقای سلامت عمومی و نظامی هستند، بلکه نمادی از توانمندی صنعتی، پزشکی و راهبردی ایران در عرصه دریایی محسوب

می‌شوند. این پروژه‌ها باعث افزایش تاب‌آوری ملی، گسترش عدالت درمانی و تقویت حضور منطقه‌ای می‌شود و می‌تواند نقش مهمی در آینده و توسعه دریا محور کشور ایفا کند.

۵- مراجع

[۱] حیدرآنلو، اسماعیل، لطفیان، لیلا حبیبی، فاطمه، نوپخت، محمد، نیکنام سرابی، حجت، و رجایی، ناهید. (۱۴۰۰). مقایسه خصوصیات شناورهای امدادی موجود در کشور با توجه به شرایط اقلیمی خلیج فارس و تعیین ویژگی‌های شناورهای امدادی همپای رزم. علوم مراقبتی نظامی، ۸(۱) (مسلسل ۲۷)، ۸۲-۹۵.

[۲] طحانی، غلامرضا، ۱۳۸۸، کاربرد قدرت دریایی.

[۳] هداوند میرزایی، محراب، رجبی، آریتا. (۱۳۹۳). اهمیت ژئوپلیتیکی جزایر ایران در خلیج فارس (مطالعه موردی: جزیره فارسی)، 'فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی

[4] Hospital Ship Design for Public Health Services in in the Foremost, Outermost, and Remote (FOR) Areas in Indonesia (H N Abdillah)

[5] Edilberto M.Salenga, USAWC CLASS OF 2009, U.S Army War College, Carlisle Barracks.

[۶] هوائی، غلامرضا، ۱۳۹۳، ارزیابی ضوابط و الزامات شهرسازی در کشور با دیدگاه پدافند غیرعامل، اولین همایش ملی مهندسی سازه ایران، تهران

[۷] رشیدی، مرتضی و جهان تیغ، فرهاد ۱۳۹۱، واکاوی تدابیر رهبری در خصوص اهمیت دریا، لزوم حضور در دریای آزاد و توسعه دریای محور، اولین همایش ملی توسعه سواحل مکران و اقتدار دریایی جمهوری اسلامی ایران.

[۸] ازغندی، علیرضا (۱۴۰۲) مسائل نظامی و استراتژیک معاصر. تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها.

[9] Edilberto M.Salenga, USAWC CLASS OF 2009, U.S Army War College, Carlisle Barracks.

الگوی نگارش مقاله در دوفصلنامه «مهندسی شناورهای تندرو»

نام و نام خانوادگی نویسنده

سازمان متبوع نویسنده، Author@Email

چکیده:

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

واژه‌های کلیدی:

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

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

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

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 تیتراهای اصلی بایستی با قلم B Nazanin-12 Bold و تیتراهای فرعی (زیربخش‌ها) با قلم B Nazanin-11- Bold متن مقاله، با قلم BNazanin-12 و قلم Times New Roman-11 برای لغات انگلیسی، با نرم‌افزار Word 2007 یا Word 2003 تحت ویندوز XP و با فواصل بین خطوط به صورت (Single) نوشته شود. عنوان بخش‌ها باید با قلم BNazanin-12- Bold و شماره‌گذاری شده با شروع از ۱ و با تورفتگی از ابتدای خط و فضای سفید ۶ نقطه با بخش بالایی نوشته شود.

۲- فرمت مقاله

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

۳- حاشیه‌ها

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

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

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

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

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

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

۶- سیستم واحدها

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

۷- نتایج

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

۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

جمع‌بندی نتایج حاصل از تحقیق در این بخش ذکر شود.

۹- تشکر و قدردانی (در صورت لزوم)

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

۱۰- فهرست علائم (در صورت لزوم)

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

مساحت، $A \text{ m}^2$

چگالی، $\rho \text{ kg/m}^3$

۱۱- مراجع

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

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