

Investigating the Dynamic Performance of a Modified High-Speed Craft in the Caspian Sea using the Strip Theory Method

Abdolkarim Mohammadi, Mahdi Yousefifard* , Fattaneh Morshedsolouk

Marine Technology Group, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: January 06, 2025
Revised: July 14, 2025
Accepted: July 15, 2025
ePublished: July 28, 2025

ABSTRACT

In this paper, the strip theory method based on the close-fit technique is used to simulate the dynamics of a high-speed craft. Dynamic simulation of ship motions in regular waves was performed for two bodies, and the results obtained from the current method were in good agreement with the experimental data. Accordingly, the dynamic behavior of the standard high-speed craft (ESC) and the modified bow craft (AXE) in rough sea conditions was analyzed, and the effects of bow changes were examined in several fields. To analyze the dynamic behavior of these two vessels, three significant wave heights of 1.5, 3.5, and 5.5 meters were considered. The vertical acceleration at the Fore perpendicular (FP) was evaluated at different ship speeds and different wave angles. Also, the absolute movement in the Fore perpendicular, the probability of slamming occurrence in different conditions, and some other factors affecting the dynamics of the ship were analyzed. The addition of an axe-bow shape to the original body has increased acceleration and range of motion in the head sea condition. In contrast, the axe-bow hull form behaves more appropriately at other angles of incident waves. Also, the change in bow shape has significantly reduced the probability of slamming at all speeds, angles, and wave heights. In addition, the use of the new form has been able to reduce added resistance by 14.7 percent compared to the original vessel in severe sea conditions at speeds of 35 knots.

Keywords: Strip Theory Method, Seakeeping, High-Speed Craft, Axe-Bow

How to cite this article

Mohammadi A, Yousefifard M, Morshedsolouk F, Investigating the dynamic performance of a modified high-speed craft in the Caspian Sea using the strip theory method. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(04):215-226.

*Corresponding author's email: yousefifard@nit.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-5653-7171



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



شاپا: ۲۹۰۹-۲۴۷۷؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۲۲۷-۲۱۵: ۲۵(۰۴): ۱۴۰۴.

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/MME.25.4.215
صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



بررسی عملکرد دینامیکی شناور تندرو با هندسه‌ی اصلاح شده در دریای خزر با استفاده از روش تئوری نواری

عبدالکریم محمدی، مهدی یوسفی فرد* , فتانه مرشدسلوک

گروه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

در این مقاله از روش تئوری نواری مبتنی بر تکنیک کلوز-فیت برای شبیه‌سازی دینامیک شناور تندرو استفاده شده است. شبیه‌سازی دینامیکی حرکات کشتی در موج منظم برای دو شناور پروازی که نتایج دقیقی از آنها در دسترس بود انجام گرفت و نتایج بدست آمده از روش ارائه شده در این پژوهش از تطابق مناسبی با داده‌های موجود برخوردار بود. بر همین اساس، رفتار دینامیکی شناور تندرو مبنا (ESC) و شناور با دماغه‌ی اصلاح شده (AXE) در شرایط دریای نامنظم تحلیل شده و اثرات تغییرات دماغه در چندین حوزه مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل رفتار دینامیکی این دو شناور، سه ارتفاع موج مؤثر $1/5$ ، $3/5$ و $5/5$ متر در نظر گرفته شد. شتاب عمودی در محل عمود سینه در سرعت‌های مختلف کشتی و زوایای متفاوت امواج مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین حرکت مطلق در عمود سینه، احتمال وقوع کوبش کف در شرایط مختلف و برخی دیگر از عوامل مؤثر در دینامیک کشتی تحلیل شد. اضافه شدن فرم دماغه‌ی تبری شکل به این بدنه‌ی پروازی باعث افزایش شتاب‌ها و دامنه‌ی حرکات در حالت موج از مقابل شده است. در مقابل، شناور دماغه‌ی تبری شکل رفتار مناسب‌تری در زوایای دیگر برخورد با امواج دارد. همچنین، تغییر فرم دماغه باعث کاهش چشمگیر احتمال وقوع کوبش کف در همه‌ی سرعت‌ها، زوایا و ارتفاع‌های موج شده است. علاوه بر آن، استفاده از فرم جدید توانسته است در شرایط شدید دریا، در سرعت 35 گره‌ی دریایی، مقدار مقاومت افزوده را $14/7$ درصد نسبت به شناور اصلی کاهش دهد.

کلیدواژه‌ها: روش تئوری نواری، دریامانی، شناور تندرو، دماغه‌ی تبری شکل

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

نحوه ارجاع به این مقاله

محمدی عبدالکریم، یوسفی فرد مهدی، مرشدسلوک فتانه، بررسی عملکرد دینامیکی شناور تندرو با هندسه‌ی اصلاح شده در دریای خزر با استفاده از روش تئوری نواری، مهندسی مکانیک مدرس. ۲۲۷-۲۱۵: ۲۵(۰۴): ۱۴۰۴.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: yousefifard@nit.ac.ir

*شناسه ارجید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۷۱۷۱-۵۶۵۳-۰۰۰۱-۰۰۰۰



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

استفاده از شناورهای تندرو کاربردهای فراوانی در صنایع دریایی و بخصوص برای شناورهای نظامی و تجاری در آب‌های ساحلی دارد. اما در بسیاری از موارد، نظیر دریای خزر، در همین نواحی آب‌های ساحلی نیز امواج با ارتفاع زیاد ممکن است ثبت گردند. به همین علت، کاربری شناورهای تندرو با ابعاد کم ممکن است تمامی مزایای خود را به همراه نداشته باشد. عملاً در چنین شرایطی انجام عملیات و همچنین بقا در دریا بسیار سخت خواهد بود. بر همین اساس، یک طرح نوآورانه بعنوان دماغه‌ی تبری شکل (Axe bow) برای شناورهای با ابعاد کوچک مطرح شده است. این فرم بدنه توانسته است تا حد زیادی حرکات دینامیکی شناورهای کوچک را در شرایط شدید دریا کنترل کرده و استفاده از آنها در چنین شرایطی را فراهم آورد. استفاده از این فرم بدنه می‌تواند عملکرد دینامیکی شناورهای با طول کم را بهبود دهد. چرا که امروزه به دلیل کاهش هزینه‌های ساخت، مالکان کشتی‌ها تمایل بیشتری به ساخت شناورهایی با طول کمتر دارند. همین عامل باعث می‌گردد تا عملکرد این شناورها در امواج با مشکل مواجه شود. بنابراین، ارائه‌ی راهکاری که بتوان حرکات و شتاب‌های یک شناور تندرو با طول کم را در امواج کاهش داد، می‌تواند برای بسیاری از طراحان کشتی جذاب باشد.

در این مقاله، ابتدا یک طرح بدنه‌ی شناور تندرو با عنوان ESC (Enlarged Ship Concept) مدل‌سازی شده و رفتار دینامیکی آن با استفاده از روش تئوری نواری (Strip Theory) و نرم‌افزار تریبون (Tribon) مورد ارزیابی قرار گرفته است. پس از اطمینان از صحت نتایج، شبیه‌سازی برای مدل شناور با دماغه‌ی تبری (Axe Bow Concept) نیز انجام شده و نتایج آن با مدل شناور پایه مقایسه گردیده است. سپس، حرکات دینامیکی شناور در شرایط مختلف در امواجی مشابه دریای خزر بررسی شده و اثرات تغییر فرم دماغه‌ی شناور تحلیل گردیده است. در انتها نیز اثرات این تغییرات با مقایسه با نتایج مدل مرجع ارائه شده است. در ادامه مروری بر منابع ارائه شده در این حوزه ارائه شده است.

تا پایان دهه‌ی ۱۹۶۰، تحقیق و بهینه‌سازی طراحی برای شناورهای تک‌بدنه‌ی (monohull) تندرو عمدتاً به تحلیل مقاومت (resistance) و پایداری در آب‌های آرام محدود بود [1]. تا قبل از سال ۱۹۶۰، تحقیقات گسترده‌ای در مورد ویژگی‌های شناورهایی با بدنه‌ی منشوری و سری‌های استاندارد فرم بدنه منتشر شد [2-4]. با این حال، تا آن زمان هیچ تحقیق سیستماتیک کاملی برای درک ویژگی‌های دریامانی (seakeeping) شناورهای تندرو انجام نشد. بر همین اساس، تحقیقات قابل توجهی توسط وان‌دن‌بوش در سال ۱۹۸۰ [5]، فریدزما در سال ۱۹۶۹ و ۱۹۷۱ [6,7]، مارتین ۱۹۷۸ [8] و سایر محققان ارائه شد. وان‌دن‌بوش به اهمیت زاویه‌ی دِدرایز (deadrise angle) برای رفتار دریامانی یک شناور تندرو اشاره

کرد. فریدزما نیز برای اولین بار آزمایش‌های مدل گسترده‌ای را در امواج منظم و نامنظم بر روی شناورهای تندرو تک‌بدنه انجام داد و اشاره کرد که واکنش‌ها و شتاب‌های حرکتی به شدت غیرخطی و با ارتفاع موج مرتبط هستند. مارتین نیز به این نتیجه رسید که اثرات غیر خطی در پاسخ‌های حرکتی در سرعت‌های بالا قابل توجه می‌باشند.

در آن زمان، دستیابی به دریامانی قابل قبول برای طراحی شناورهای تک‌بدنه‌ی تندرو کار دشواری بود، چرا که بدنه‌هایی با دِدرایز کم دارای مقادیر بسیار زیاد شتاب در امواج بودند. در سال ۱۹۷۶، ساویتسکی و براون [9] تحقیقات آزمایشگاهی را که در سال‌های گذشته بر روی بدنه‌های تندرو انجام شده بود، جمع‌بندی و ارائه کردند. آنها روابط تجربی برای استفاده‌ی طراحان در حوزه‌ی شناورهای تندرو را برای اولین بار منتشر کردند و در این زمینه پیشرو بودند.

در سال ۱۹۸۴، بلوک و بیگلن [10] در مقاله‌ای خاطرنشان کردند که تحلیل‌های دریامانی شناورهای تندرو در دهه ۱۹۸۰ سرانجام به مرحله‌ای رسیده است که به طراح این امکان را می‌دهد تا علاوه بر شبیه‌سازی رفتار حرکت کشتی‌های تندرو در دریا، در راستای بهبود آن نیز گام بردارد. چنین تحلیل‌هایی در شرایط واقعی دریا تا آن زمان عملاً غیر ممکن و عمدتاً بر روی کاهش مقاومت در آب آرام متمرکز بود [11]. بنابراین، نتایج آنها کامل نبوده و انطباقی با شرایط سخت دریا نداشته است. چرا که در واقعیت، شناور در امواج نامنظم حرکت کرده و رفتار دینامیکی آن به شدت بر روی عملکرد کارکنان و تجهیزات اثرگذار می‌باشد.

با این وجود، تحقیقات در مورد رفتار شناورهای تندرو در شرایط آب آرام در دهه‌ی ۱۹۸۰ نیز ادامه یافت [12,13]. در آن سال‌ها راحتی، عملکرد و ایمنی در شرایط واقعی نیز به موضوعات مهم تحقیق و بهینه‌سازی برای عملیات در سرعت بالا در محیط‌های شدید دریایی تبدیل شد. به عنوان مثال، بلوک و رولوفس در سال ۱۹۸۹ [14] در مورد تأثیر شکل مقطع عرضی نزدیک دماغه‌ی کشتی بر عملکرد آب آرام و پاسخ حرکت و شتاب در امواج تحقیقاتی را ارائه کردند.

علاوه بر شناورهای تندرو جابجائی (displacement) و پروازی (planing)، اولین پیشرفت در زمینه‌ی این شناورها توسط تریلو در سال ۱۹۹۱ بعنوان شناورهای هیدروفویلی ارائه شد [15]. در سال ۱۹۹۲ نیز لویس یک نمای کلی از توسعه‌ی شناورهای هاورکرافت و اثر سطحی (SES) ارائه داد [16].

طی سال‌های گذشته، همواره هدف تحقیقات انجام شده بر روی به حداقل رساندن مقاومت با به کم کردن حجم جابجایی و سطح خیس شده یا هر دو متمرکز شده‌اند [17]. دومین گام در پیشرفت شناورهای تندرو، تلاش برای به حداقل رساندن حرکات دینامیکی آنها و کاهش نیروی تحریک ناشی از امواج با استفاده از تجهیزات کنترل حرکت بود. تمام مزایایی که این تجهیزات کنترلی و

فریم‌های جلویی بدنه به کلی تغییر شکل پیدا کردند و به فرم کاملاً عمودی ارائه شدند. در مقابل، بویانسی ناحیه‌ی دماغه با افزایش ارتفاع بدنه در آن منطقه جبران شد. چنین فرمی در مقابل فرم ESC متداول توانست ۴۰ تا ۵۰ درصد دریامانی شناور را بهبود بخشد.

در سال‌های اخیر توجه به استفاده از فرم دماغه‌ی تبری شکل در شناورهای بزرگتر نیز افزایش چشمگیری داشته است. بعنوان مثال، رومادونی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) عملکرد دینامیکی یک شناور تندرو مجهز به فرم دماغه‌ی تبری شکل را بهبود دادند [23]. همچنین مطالعات تجربی و عددی زیادی بر روی کاربرد دماغه‌ی تبری شکل بر روی شناورهای مختلف انجام گردید [24]. ریچکنز و میکلیچ نیز در سال ۲۰۲۲ مشخصات هیدرودینامیکی یک شناور نظامی از نوع فریگیت را که از دماغه‌ی تبری شکل بهره برده است را با شناورهای متداول از همین نوع مقایسه نمودند [25]. آنها توانستند در سرعت طراحی برای شناور با دماغه‌ی تبری شکل، به ترتیب برای حرکات جابجائی عمودی (heave) و غلتش عرضی (pitch) در مقایسه با فرم متداول مقدار ۱۰ و ۵ درصد کاهش را ثبت کنند.

در سال ۲۰۲۳ ویندیانداری و همکاران عملکرد دریامانی یک شناور گشت‌زنی تک‌بدنه به فرم دماغه‌ی تبری شکل را در شرایط استفاده از هندسه‌های دماغه‌ی مختلف بررسی نمودند [26]. آنها هندسه‌های مختلف را با استفاده از تکنیک منحنی‌های اسپلاین تولید کرده و بدنه را در شرایط دریایی که با طیف موج جانسوپ شبیه‌سازی شده بود، با استفاده از روش تئوری نواری تحلیل نمودند.

در سال ۲۰۲۴ توکلی و همکاران پژوهشی را بر روی هیدرودینامیک شناورهای تندرو ارائه نمودند [27]. آنها شناورهای با فرم دماغه‌ی تبری شکل را بعنوان یک شناور تندرو بر شمرده و بر لزوم تحلیل دینامیکی آن تأکید کردند. تران و همکاران در سال ۲۰۲۵ روشی مبتنی بر تئوری نواری را گسترش دادند تا بتوان با استفاده از آن دینامیک شناورهای با بدنه‌ی پروازی را در امواج تحلیل نمود [28].

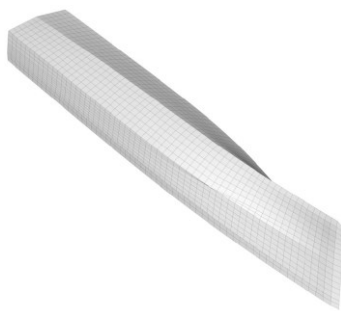
همچنان مطالعات زیادی بر روی عملکرد شناورهای با فرم دماغه‌ی تبری شکل در حال انجام است [29,30]. همانطور که ملاحظه گردید، معمولاً تحلیل دینامیکی شناورهای تندرو نیازمند استفاده از روش‌های تجربی یا عددی پیچیده می‌باشد. در سال‌های اخیر تمرکز محققان برای استفاده از روش‌های سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر برای تحلیل چنین شناورهایی می‌باشد. در این پژوهش نیز از یک روش مبتنی بر تئوری نواری که می‌تواند پاسخ‌های دینامیکی شناور را با استفاده از منابع کمتری ارائه دهد استفاده شده است. استفاده از این تکنیک برای شبیه‌سازی دینامیکی شناورهای مشابه می‌تواند هزینه‌های محاسباتی را تا

همچنین طرح‌های نوآورانه‌ای نظیر شناورهای چندبدنه تنها زمانی مؤثر بود که شرایط دریا آرام باشد [10]. در شرایط دریای موج، همچنان شناورهای تک‌بدنه تندرو اولین و بهترین گزینه‌ی طراحان می‌باشند. به همین دلیل بسیاری از مالکان کشتی، به ویژه در کاربردهای نظامی و گشت‌زنی و همچنین در صنعت فراساحل، تمایل به طراحی بسیار ساده‌تر و اثبات شده‌ی یک کشتی سریع دارند [18]، در حالی که به نظر می‌رسد بازار کشتی‌های پرسرعت همچنان به سمت شناورهای چند بدنه بزرگ با سرعت بالا تمایل دارد [19].

تمرکز بر دریامانی شناورهای تک‌بدنه‌ی تندرو با افزایش تقاضا برای چنین شناورهایی در کاربردهایی نظیر گشت‌زنی و وظایف فراساحلی بار دیگر مورد توجه قرار گرفت. بر اساس تجربیاتی که طی این سالها بدست آمد، توسعه‌ی شناورهای تک‌بدنه‌ی تندرو سرعت گرفت. در سال ۲۰۰۶ کینینگ ویژگی‌های متمایز رفتار شناورهای تک‌بدنه با سرعت بالا را در امواج به این صورت خلاصه می‌کند [18]:

- توسعه‌ی نیروی هیدرودینامیکی غیرخطی برا (lift) روی بدنه.
- نیروهای تحریک کننده‌ی ناشی از موج غیر خطی، به ویژه در قسمت جلویی بدنه.

از مشاهدات میدانی ثبت شده از شناورها در مقیاس اصلی می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش سرعت در امواج عمدتاً توسط خدمه و در واکنش به حرکت و شتاب‌هایی که کشتی در دریا تجربه می‌کند اعمال می‌شود. معمولاً معیارهای حرکتی بر اساس پاسخ‌های مؤثر و شتاب‌ها تعیین می‌گردند. شناسایی این معیارها نیازمند تحلیل متفاوتی است که رفتار غیرخطی کشتی‌های تندرو در امواج را در نظر می‌گیرد. به کارگیری روش‌های نوین تحلیل عددی در طراحی و عملکرد شناورهای تک‌بدنه‌ی تندرو در سال ۱۹۹۵ منجر به معرفی طرح شناوری به نام (ESC) Enlarged Ship Concept شد [20]. متعاقباً مفهوم جدیدی به نام دماغه‌ی تبری شکل (Axe Bow) در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [21]. فلسفه‌ی طرح این دو نوع از شناور در سال ۲۰۰۶ توسط کیونینگ و ون‌وارلی جمع‌بندی و ارائه شد [22]. آنها مشاهده کردند که با توجه به رابطه‌ی خطی بین هزینه‌ی ساخت یک کشتی و طول آن، مالکان تمایل زیادی به استفاده از شناورهایی با طول کمتر دارند. افزایش ۲۰ تا ۵۰ درصدی طول کشتی با ثابت نگه داشتن سایر ابعاد اصلی نظیر جابجایی تا حد ممکن باعث ایجاد فضای خالی در طرح می‌گردد. با جابجائی توزیع وزن شناور به سمت عقب و اندکی تغییر در فرم هندسه، شناورهای با دماغه‌ی تبری توانستند تا حد زیادی حرکات دینامیکی کشتی‌های با طول کم را در شرایط دشوار دریایی (severe sea condition) کنترل کنند. طرح دماغه‌ی تبری شکل که در سال ۲۰۰۱ توسط کیونینگ ارائه شده بود توانست نیروهای ناشی از موج بر ناحیه‌ی دماغه‌ی یک کشتی تندرو را تا حد زیادی کاهش دهد.



(ب)

شکل ۱ خطوط بدنه‌ی الف) شناور اصلی (ESC) و ب) شناور با دماغه‌ی تبری شکل (AXE)

Fig. 1 Hull lines of a) ESC and b) AXE

همچنین، برای ارزیابی عملکرد دینامیکی کشتی‌ها در بخش تحلیل‌های هیدرودینامیکی، روش کلوز-فیت (Close-Fit) به کار گرفته شده است، که در آن از ۱۵ نقطه در هر مقطع استفاده شده است. این روش در مقایسه با روش‌های معمول فرم لوئیس، نتایج دقیق‌تری را برای مدل‌سازی دینامیک شناورها در اعداد فرود بالا ارائه داده است.

۳- روش حل

در اینجا، کشتی با سرعت ثابت U در امواج به سمت جلو پیشروی می‌کند. موج ورودی دارای دامنه‌ی A (متر)، فرکانس ω (هرتز) و زاویه‌ی β است، که حرکت موج نسبت به جهت پیشروی کشتی را تعیین می‌کند. معادلات حاکم بر این مسئله شامل معادلات شش درجه آزادی حرکت جسم در حضور امواج هستند. در این روش، شناور بصورت یک جسم صلب فرض شده که تحت اثر نیروی امواج، حرکت نوسانی کشتی با استفاده از سیستم جرم و فنر شبیه‌سازی می‌گردد. شناور در راستای طول به چندین فریم عرضی تقسیم شده و رفتار دینامیکی هر کدام از فریم‌ها بصورت دوبعدی مدل‌سازی شده و نتایج با استفاده از انتگرال‌گیری به کل بدنه‌ی شناور تعمیم داده می‌شود. در ادامه، معادلات حاکم بر دینامیک بدنه‌ی صلب و همچنین جزئیات بیشتری از روش تئوری نواری ارائه شده است.

۳-۱- معادلات حرکت

بر اساس معادله‌ی دینامیک جسم صلب حاکم بر بدنه‌ی شناور، معادلات دیفرانسیل خطی شده برای حرکات کشتی را می‌توان به شکل زیر نوشت [31,32]:

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{i\omega t} \quad j = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

که در اینجا j و k اندیس‌های مرتبط با جهات حرکت هستند. ماتریس‌های جرم M_{jk} ، جرم افزوده A_{jk} ، ضریب میرایی B_{jk} ، ضریب بازگردان هیدرواستاتیکی C_{jk} ، ارائه شده است. دامنه‌ی نیروی محرک یا گشتاور نیز F_{jk} است. در اینجا η_k ، $\dot{\eta}_k$ ، $\ddot{\eta}_k$ نیز به ترتیب

حد بسیار زیادی کاهش دهد. علاوه بر آن که صحت نتایج چنین روشی ارزیابی شده است، رفتار دینامیکی یک طرح نوآورانه در شرایط شدید دریایی در دریای خزر نیز بررسی شده است.

۲- شرح مسئله

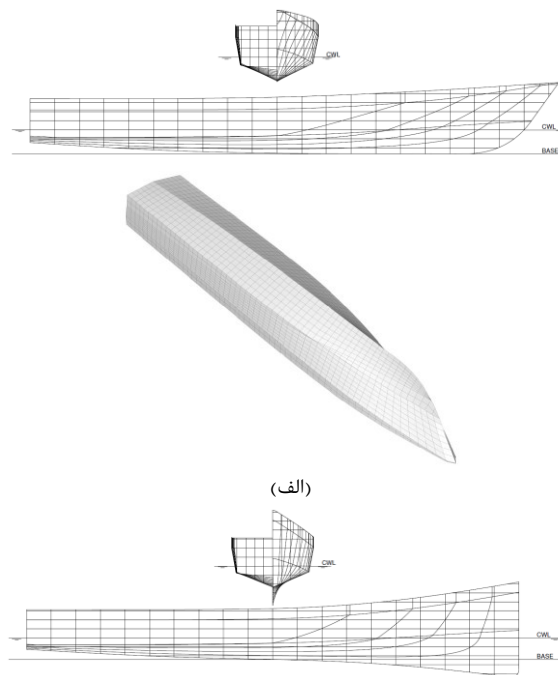
شناورهای مورد بررسی در این مطالعه، از نوع تک‌بدنه‌ی پروازی بوده که می‌بایست به عدد فرود ۰/۸۱ (متناظر با سرعت ۳۵ گره‌ی دریایی) در آب آرام دست یابند. در جدول (۱) مشخصات شناورها با مقیاس اصلی و در شکل (۱) نیز نمایی از هندسه‌ی بدنه‌ی این شناورها ارائه شده است. روش مورد استفاده در این پژوهش، تئوری نواری بوده و به همین دلیل شناورها در مقیاس اصلی شبیه‌سازی شده‌اند. شناور با هندسه‌ی اصلی به اختصار ESC و شناور با دماغه‌ی تبری شکل نیز AXE نامیده می‌گردد.

جدول ۱ مشخصات اصلی شناورها

Table 1 Main particulars of the ships

Quantity	AXE	ESC
Length (m)	55	55
Beam (m)	8.46	8.46
Maximum Draft (m)	4.39	2.66
Initial Draft (m)	2.42	2.66
Displacement (m ³)	517.4	516
Wetted surface (m ²)	512.84	480.58
VCG (m)	3.53	3.85
LCG (m)	24.36	22.49
Metacentric height (m)	1.52	1.52
Radius of gyration (m)	13.75	13.75

خطوط بدنه در فریم‌های اصلی در نرم‌افزار تراییون مدل‌سازی شده است. برای انجام محاسبات دریامانی تعداد ۲۰ فریم از هر کدام از شناورها در نظر گرفته شده است.



(الف)

شتاب، سرعت و دامنه‌ی پاسخ k ام هستند. دامنه‌ی پاسخ k ام را به صورت زیر می‌توان نوشت [32]:

$$\eta_k(t) = \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} = |\bar{\eta}_k| e^{i\sigma_k} e^{i\omega_e t} = |\bar{\eta}_k| e^{i(\omega_e t + \sigma_k)} \quad (2)$$

فرکانس برخورد ω_e واحد عدد موهومی $i = \sqrt{-1}$ و $\bar{\eta}_k$ دامنه‌ی مختلط پاسخ k ام است:

$$\bar{\eta}_k = \bar{\eta}_{kR} + i\bar{\eta}_{kI} = |\bar{\eta}_k| e^{i\sigma_k} \quad (3)$$

در اینجا $|\bar{\eta}_k|$ و σ_k به ترتیب اندازه (دامنه‌ی مستقل از زمان) و زاویه‌ی تغییر فاز پاسخ هستند. نیروی هیدرواستاتیکی نیز به صورت زیر است [32]:

$$F_{HSj}^* = F_{GI} + F_{HSI} = - \sum_{k=1}^6 C_{jk} + \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \quad (4)$$

$$= - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \eta_k \quad j = 1 \dots 6$$

در اینجا F_{HSI} نیروی هیدرواستاتیکی و F_{GI} نیروی گرانشی است. لذا معادله‌ی حرکت (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_{GI} + F_{HSI} + F_j e^{i\omega_e t} \quad j = 1 \dots 6 \quad (5)$$

در برخورد با موج‌های نامنظم با طول زیاد و در حالتی که این امواج از روبرو به کشتی برخورد می‌کنند، معادلات کوپل شده‌ی حرکت (۱) برای حرکات جابجایی عمودی و غلتش طولی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} (M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 &= F_{G3} + F_{HS3} + F_3 e^{i\omega_e t} \\ A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + (I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 &= F_{G5} + F_{HS5} + F_5 e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (6)$$

در اینجا M جرم کشتی و I_5 ممان اینرسی حرکت غلتشی طولی آن می‌باشد.

۳-۲- تئوری نواری

اولین روش موفق و گسترده‌ای که در این حوزه با استفاده از فرض خطی بودن حرکات توسعه یافت، به اصطلاح نظریه‌ی نوار خطی یا تئوری نواری (Strip Theory) است. در این نظریه، بدنه‌ی کشتی به صورت مجموعه‌ای از مقاطع عرضی دو بُعدی یا نوارهایی نمایش داده می‌شود که در هر یک از آن‌ها نیروهای هیدرودینامیکی به‌طور مستقل محاسبه می‌شوند. این روش بر پایه‌ی فرض باریک بودن کشتی (slender body) مورد نظر بنا شده است. این روش برای اولین بار توسط کروکوفسکی و جاکوبس به‌طور موفقیت‌آمیزی بر روی یک کشتی اعمال شد [33]. آنها روشی برای محاسبه‌ی حرکات عمودی و حرکات پیچشی کشتی در امواج منظم ارائه دادند. کار آنها مبتنی بر مجموعه‌ای از مطالعات بنیادی بود که به اوایل سال ۱۸۹۶ بازمی‌گردد [34]. این مطالعات توسط اورسل [35] در سال ۱۹۵۷ ادامه یافت که روشی برای محاسبه‌ی جرم افزوده و نیروهای میرایی بر روی سیلندرهای در حال نوسان ارائه کرد و سپس گریم این نتایج را به مقاطع

عرضی دلخواه تعمیم داد [36]. در این نظریه، جرم افزوده و میرایی دو بُعدی یا برای یک شکل استوانه‌ای محاسبه شده و سپس به یک شکل مقطعی تعمیم داده می‌شود و یا از طریق اعمال نظریه‌ی انکسار دو بُعدی بر اساس نظریه‌ی جریان پتانسیل به دست می‌آید. در نظریه‌ی تئوری نواری، سرعت پیشروی کشتی با تصحیح توزیع طولی جرم افزوده و میرایی در نظر گرفته می‌شود. این روش با استفاده از تحلیل‌های تک بُعدی، عملکرد کشتی در امواج را ارزیابی می‌کند و برای کشتی‌های با فرم ساده مناسب است. این مدل به تحلیل دینامیکی کشتی‌ها به صورت جداگانه و سپس ترکیب آنها برای ارزیابی کل عملکرد می‌پردازد. در این مطالعه از روش تئوری نواری برای محاسبه‌ی دریامانی استفاده شده است. به این صورت که کشتی در راستای طول به مقاطع دو بُعدی فرضی تقسیم می‌گردد. سپس بر اساس سطح زیر آب هرکدام از این مقاطع، ضرایب جرم اضافی، میرایی و نیروی تحریک موج برای مقطع و در هر زمان محاسبه می‌شود. به همین دلیل، موارد محاسبه شده در هر مرحله‌ی زمانی در معادلات کوپل شده حرکت (۶) را می‌توان با وابستگی زمانی آنها به صورت زیر به دست آورد [37]:

$$\begin{aligned} (M + A_{33}(t))\ddot{\eta}_3 + B_{33}(t)\dot{\eta}_3 + A_{35}(t)\ddot{\eta}_5 + B_{35}(t)\dot{\eta}_5 &= F_{G3} + F_{HS3}(t) + F_3(t)e^{i\omega_e t} \\ A_{53}(t)\ddot{\eta}_3 + B_{53}(t)\dot{\eta}_3 + (I_5 + A_{55}(t))\ddot{\eta}_5 + B_{55}(t)\dot{\eta}_5 &= F_{G5} + F_{HS5}(t) + F_5(t)e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (7)$$

بر اساس مبانی تئوری نواری، جرم افزوده و ضرایب میرایی در معادلات حرکت (۶) توسط انتگرال‌هایی در راستای طول کشتی ارائه می‌شود، که هرکدام شامل مقاطع دو بُعدی جرم افزوده و ضرایب میرایی جابجایی عمودی می‌باشد. مقاطع دو بُعدی جرم افزوده و ضرایب میرایی با روش فرنک کلوز-فیت (Frank Close-Fit) بر روی سطح خیس بدنه محاسبه می‌شود. مؤلفه‌ی نیروی هیدرواستاتیکی که بر روی بدنه در جهت j اثر می‌گذارد به صورت زیر است [38]:

$$F_{HSj} = \rho g \iint_S z n_j dS \quad j = 1 \dots 6 \quad (8)$$

نیروی هیدرواستاتیکی نیز با استفاده از انتگرال‌گیری فشار بر روی سطح خیس بدنه به دست می‌آید. در اینجا n_j بردار واحد عمود بر سطح بدنه به سمت خارج آن است [38]. نیروهای گرانشی برای حرکات جابجایی عمودی و غلتش طولی نیز به صورت زیر می‌باشد [39]:

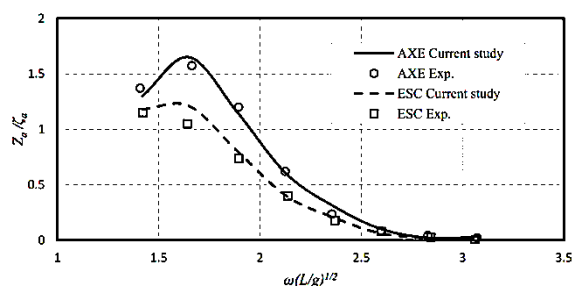
$$\begin{aligned} F_{G3} &= Mg \\ F_{G5} &= -Mg x_c \end{aligned} \quad (9)$$

در معادلات اخیر، M جرم کشتی، g شتاب گرانشی و x_c موقعیت طولی مرکز جرم می‌باشد.

بر اساس تئوری نواری، دامنه‌ی نیروی تحریک و گشتاور در معادلات حرکت (۶) توسط انتگرال‌هایی در راستای طول کشتی که شامل مقطع فرو-کریلوف و نیروی انکسار است به دست

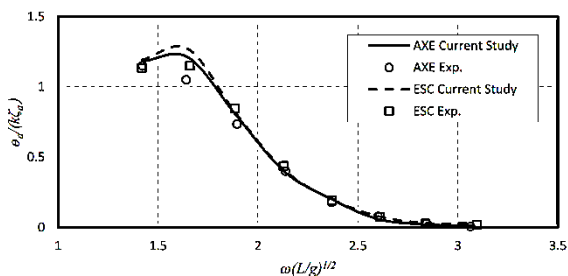
۴- راستی آزمایی نتایج

نتایج تحلیل دینامیکی این شناورها به دو روش تجربی و عددی توسط دی‌یونگ در سال ۲۰۱۱ ارائه شده است [42]. نتایج بدست آمده از روش تئوری نواری مبتنی بر نرم‌افزار تراییون در اینجا در حالت موج از روبرو (head sea) با نتایج دی‌یونگ مقایسه شده است. بر اساس نتایج تجربی موجود، نمودارهای جابجایی عمودی (heave)، غلتش عرضی (pitch) و مقاومت افزوده (added resistance) برای هر دو شناور بدست آمده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. این نتایج بر اساس مقادیر موجود، در سرعت طراحی معادل ۳۵ گره دریایی (knot) مقایسه و در شکل (۲) و (۳) ارائه شده‌اند.



شکل ۲ مقایسه‌ی مقادیر رانو جابجایی عمودی در سرعت ۳۵ گره دریایی با نتایج تجربی

Fig. 2 Comparison of heave RAO values at the speed of 35 knots with experimental results



شکل ۳ مقایسه‌ی مقادیر رانو غلتش طولی در سرعت ۳۵ گره دریایی با نتایج تجربی

Fig. 3 Comparison of pitch RAO values at the speed of 35 knots with experimental results

همانطور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌گردد، روند کلی در نمودارهای جابجایی عمودی و غلتش طولی هر دو شناور مطلوب است. در تمامی نمودارها، نتایج تجربی (Exp) بر اساس مقادیر ارائه شده توسط دی‌یونگ است. در این نمودارها، ω فرکانس موج برخوردی در سرعت مورد نظر، Z_a و θ_a نیز به ترتیب پاسخ حرکت عمودی و دامنه‌ی موج می‌باشد. k و θ_a نیز به ترتیب عدد موج (wave number) و شیب موج (wave steepness) می‌باشند. نسبت مقادیر محورهای افقی و عمودی بر اساس مقاله‌ی مرجع انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌گردد، اختلاف بین نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر و داده‌های تجربی در نقطه‌ای که بیشینه‌ی رانو

می‌آیند. نیروی‌های مقطع فرود-کریلوف و انکسار به صورت زیر است [31]:

$$\begin{aligned} f_3 &= g \\ &\cdot \exp(-ik\bar{x}\cos\chi) \int_{c_0} n_3 \exp(ik\bar{y}\sin\chi) \exp(-kT^*) ds \\ h_3 &= \omega \\ &\cdot \exp(-ik\bar{x}\cos\chi) \int_{c_0} (in_3 \\ &- n_2 \sin\chi) \exp(ik\bar{y}\sin\chi) \exp(-kT^*) \phi^{(3)} ds \end{aligned} \quad (10)$$

۳-۳ روش فرنک کلوز-فیت

برای محاسبه‌ی جرم افزوده و ضریب میرایی برای مقاطع دو بعدی، فرانک [39] مسئله‌ی مقدار مرزی نظریه‌ی پتانسیل را با فرض جریان غیرقابل تراکم، غیر لزج و غیر چرخشی حل کرد. در این روش، که به روش فرنک کلوز-فیت معروف است، اثرات تنش سطحی و شرایط غیرخطی سطح آزاد، شرایط مرزی سینماتیکی و معادلات برنولی نادیده گرفته شده است. در امتداد مقطع دوطبقه تحت حرکت هارمونیک ساده، نیروهای هیدرودینامیکی در ارتباط با جابجایی و سرعت، که به محاسبه‌ی جرم اضافی مقطع و ضرایب میرایی آن ختم می‌شود، از پتانسیل سرعت با استفاده از معادله‌ی برنولی خطی شده به دست می‌آید [40].

۳-۴ تولید سری‌های زمانی

سری‌های زمانی را می‌توان با استفاده از اصل برهم‌نهی تولید کرد. در سیستم مختصات ثابت، سری زمانی برای امواج با طول بلند را می‌توان با معادله‌ی زیر تولید نمود:

$$\xi(x_0, t) = \sum_{n=1}^N \bar{\xi}_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n + k_n x_0) \quad (11)$$

برای هر جزء، $\bar{\xi}_n$ دامنه‌ی موج، ε_n زاویه تغییر فاز تصادفی و k_n نیز عدد موج است. اگر $\delta\omega$ به اندازه‌ی کافی کوچک باشد، مؤلفه‌ی دامنه‌ی موج را می‌توان به صورت زیر نوشت:

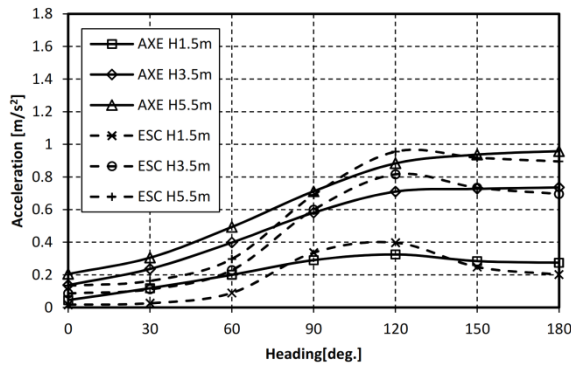
$$\bar{\xi}_n = \sqrt{2S(\omega_n)\delta\omega} \quad (12)$$

در حالی که S طیف موج می‌باشد.

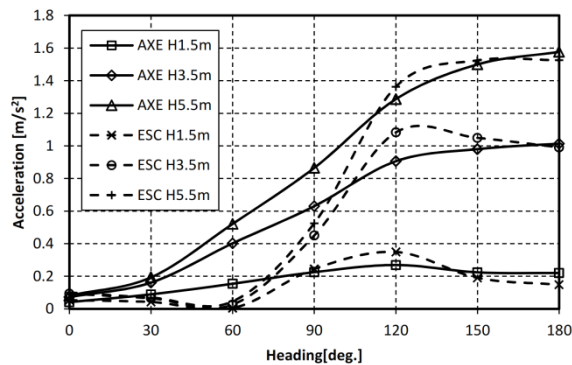
تولید سری زمانی برای پاسخ‌های دینامیکی کشتی در موج‌های با طول زیاد با الگوریتم زیر امکان‌پذیر است:

$$\begin{aligned} \eta_i(t) &= \sum_{n=1}^N \bar{\xi}_n |H_i(\omega_{en})| \cos(\omega_{en} t + \sigma_{i,n} + \varepsilon_n) \text{ for } i \\ &= 1, 2, 3 \\ \eta_i(t) &= \sum_{n=1}^N \bar{\xi}_n |H_i(\omega_{en})| k_n \cos(\omega_{en} t + \sigma_{i,n} + \varepsilon_n) \text{ for } i \\ &= 4, 5, 6 \end{aligned} \quad (13)$$

در اینجا H_i عملگر دامنه پاسخ (Response Amplitude Operator) و $\sigma_{i,n}$ زاویه‌ی تغییر فاز مؤلفه پاسخ مورد نظر است. جزئیات بیشتر در مورد استفاده از این روش توسط آنیل و همکاران ارائه شده است [41].



(الف)

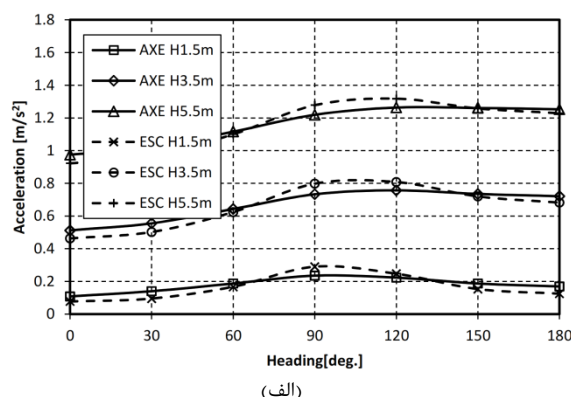


(ب)

شکل ۴ نمودار RMS شتاب عمودی در محل عمود سینه در سرعت‌های (الف) ۱۰ و (ب) ۳۵ گره و زوایا و ارتفاع‌های متفاوت موج

Fig. 4 RMS diagram of vertical acceleration at the fore perpendicular at speeds of a) 10 and b) 35 knots and different wave angles and heights

در ادامه، مقادیر RMS حرکت مطلق عمودی در محل عمود سینه برای هر دو بدنه‌ی شناور و در ارتفاع مؤثر موج‌های متفاوت در شکل (۵) مشاهده می‌گردد. این مقادیر نیز برای دو سرعت ۱۰ و ۳۵ گره‌ی دریایی محاسبه شده‌اند. در حالت امواج از روبرو، تفاوت چندان بین حرکت عمودی سینه بین دو بدنه مشاهده نمی‌گردد، اما به وضوح در سایر زوایای موج برخوردی (به‌خصوص ۱۲۰ درجه) مقدار حرکت مطلق در سینه‌ی شناور دماغه‌ی تبری شکل کمتر از شناور اصلی است.



(الف)

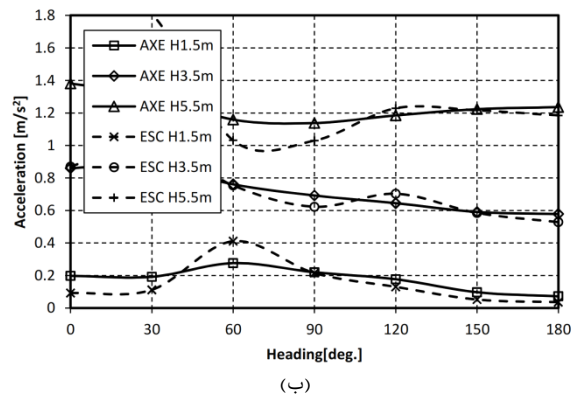
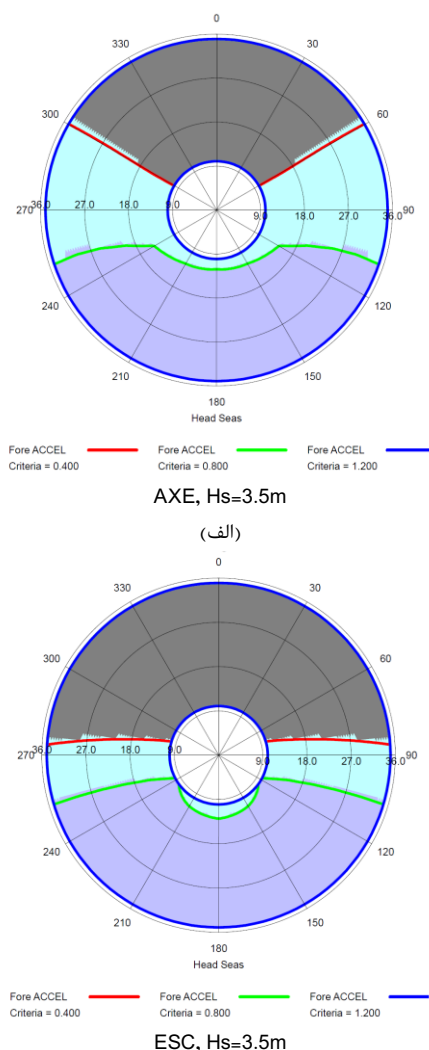
جابجایی عمودی و غلتش طولی ثبت شده است بیشتر از سایر نواحی می‌باشد. علت این امر می‌تواند وقوع پدیده‌ی تشدید در فرکانس‌های متناظر این نقاط باشد، که اندکی خطا در شبیه‌سازی این پدیده توسط روش تئوری نواری بوجود آمده است.

۵- تحلیل نتایج

در بخش پیشین، مقادیر جابجایی عمودی و غلتش طولی برای هر دو شناور اصلی و دماغه‌ی تبری شکل در سرعت طراحی مورد بررسی قرار گرفت و تطابق مناسبی با نتایج تجربی بدست آمد. در این بخش بر اساس نمودارهای راثو (RAO) رفتار دینامیکی شناور در موج نامنظم مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر همین اساس و برای شبیه‌سازی شرایط دریای تصادفی (random sea) از طیف موج ITTC استفاده شده است. سه ارتفاع مؤثر به ترتیب معادل ۱/۵، ۳/۵ و ۵/۵ متر در نظر گرفته شده است. این ارتفاع‌ها بر اساس بیشترین ارتفاع موج ثبت شده در دریای خزر در شرایط طوفانی زمستان انتخاب شده است [43]. در ابتدا، مقادیر شتاب عمودی در محل عمود سینه (Fore perpendicular) بدست آمده است. این شتاب‌ها در سرعت‌های ۱۰ و ۳۵ گره‌ی دریایی و به ازای زوایای مختلف برخورد با امواج محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که حالت موج از روبرو (head sea) معادل زاویه‌ی ۱۸۰ درجه می‌باشد. در شکل (۴) RMS شتاب عمودی در محل عمود سینه در شرایط مختلف ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در تمامی ارتفاع‌های مؤثر امواج، مقدار بیشینه‌ی شتاب ثبت شده برای شناور دماغه‌ی تبری (AXE) کمتر از شناور اصلی (ESC) است. بعنوان مثال، مقدار بیشینه‌ی شتاب عمودی در سینه برای هر دو فرم بدنه در سرعت ۳۵ گره ثبت شده است، که این مقدار برای شناور اصلی ۰/۴۲۳ و برای شناور دماغه‌ی تبری شکل ۰/۳۴۰ می‌باشد. برای هر دو بدنه، این مقدار بیشینه در زاویه‌ی موج ۱۲۰ درجه ثبت شده است. از طرفی می‌توان به وضوح این نکته را مشاهده کرد که حالت موج روبرو، مقادیر شتاب عمودی ثبت شده برای شناور دماغه‌ی تبری شکل ۲۵ درصد بیشتر از شناور اصلی است. در مورد ارتفاع موج مؤثر ۳/۵ متر، شرایط به کلی متفاوت است. علی‌رغم کمتر بودن بیشینه‌ی شتاب عمودی برای شناور دماغه‌ی تبری شکل، این بیشینه‌ی شتاب در تمامی سرعت‌ها برای شناور AXE در حالت موج از مقابل رخ می‌دهد. در حالی که برای شناور اصلی، همچنان بیشینه‌ی شتاب‌ها در زاویه‌ی موج ۱۲۰ درجه ثبت می‌گردد. در حالت موج از روبرو، مقادیر شتاب ثبت شده برای هر دو شناور، در سرعت‌های متناظر بسیار شبیه یکدیگر است. در ارتفاع موج مؤثر ۵/۵ متر، روند نتایج بسیار شبیه به حالت ارتفاع ۳/۵ متر است.

تمامی حالات، بیشترین مقادیر شتاب در هر دو نقطه در شرایط موج از روبرو بدست آمده است. در این زمینه، شرایط شناور دماغه‌ی تبری شکل بهتر است. چرا که مقدار بیشینه‌ی شتاب عمودی در آنها در ناحیه‌ی کوچکتري از زوایای موج برخوردی ثبت شده است.

در شکل (۷) برای درک بهتر اثرات شرایط موج بر رفتار دینامیکی کشتی، مقادیر مقاومت افزوده (added resistance) در سرعت ۳۵ گره‌ی دریایی برای هر دو بدنه در سه ارتفاع موج مؤثر ۱/۵، ۳/۵ و ۵/۵ متر ارائه شده است. در تمامی حالات، بدنه‌ی دماغه‌ی تبری شکل، نسبت به بدنه‌ی اصلی مقاومت افزوده‌ی کمتری داشته است. بعنوان مثال، در ارتفاع موج بیشینه، در سرعت ۳۵ گره‌ی دریایی به مقدار مقاوت افزوده برای شناور دماغه‌ی تبری شکل ۱۴/۷ درصد نسبت به شناور اصلی کمتر بوده است. در سایر ارتفاع موج‌ها نیز شرایط به همین صورت می‌باشد.



شکل ۵ نمودار RMS حرکت مطلق عمودی در محل عمود سینه در سرعت‌های ۱۰ و ۳۵ گره و زوایا و ارتفاع‌های متفاوت موج

Fig. 5 RMS diagram of vertical motion at the fore perpendicular at speeds of a) 10 and b) 35 knots and different wave angles and heights

در جدول (۲)، مقادیر تخمین زده شده برای احتمال وقوع کوبش (slamming) در ارتفاع موج مؤثر ۵/۵ متر برای هر دو بدنه و به ازای سرعت‌های مختلف شناور و زوایای متفاوت موج ارائه شده است. در هیچکدام از حالات، برای ارتفاع مؤثر موج ۱/۵ متر، کوبش کف ثبت نشد. در مورد ارتفاع موج مؤثر ۳/۵ متر نیز برای شناور دماغه‌ی تبری شکل، احتمال وقوع کوبش کف در تمامی حالات معادل صفر بدست آمد. این در حالی است که برای شناور اصلی، برای حالات موج از مقابل احتمال وقوع کوبش کف بیش از ۲ مورد در ساعت پیش‌بینی شده است. در اینجا نیز شرایط شناور دماغه‌ی تبری شکل شرایط مناسب‌تری نسبت به شناور اصلی دارد.

جدول ۲ احتمال وقوع کوبش کف در ارتفاع موج مؤثر ۵/۵ متر و سرعت‌های مختلف کشتی

Table 1 Probability of slamming at a significant wave height of 5.5 m and different ship speeds

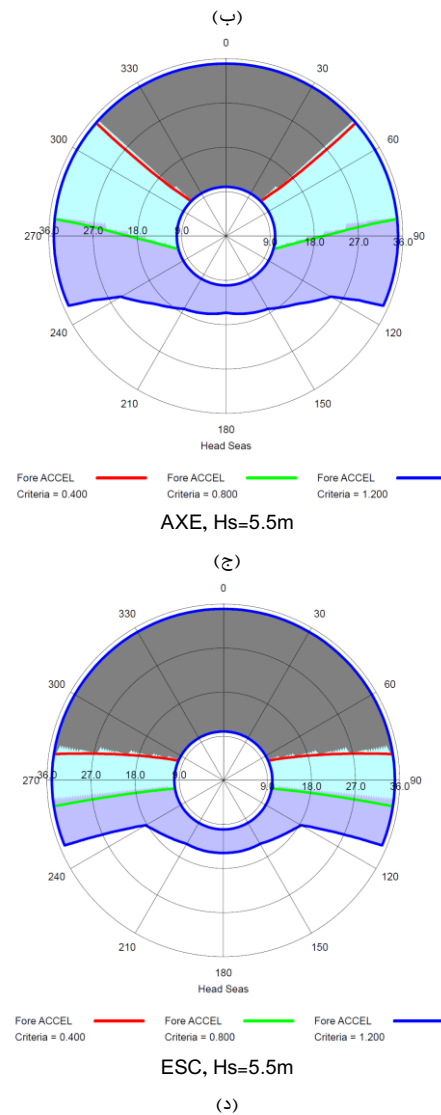
		Headings							
		0	30	60	90	120	150	180	
Slamming	AXE_H5.5_35kn	0	0	0	0	2	14	22	
	ESC_H5.5_35kn	0	0	0	0	7	41	50	
	AXE_H5.5_30kn	0	0	0	0	1	11	18	
	ESC_H5.5_30kn	0	0	0	0	5	35	45	
	AXE_H5.5_25kn	0	0	0	0	1	7	13	
	ESC_H5.5_25kn	0	0	0	0	3	27	36	
	AXE_H5.5_20kn	0	0	0	6	0	4	8	
	ESC_H5.5_20kn	0	0	0	0	1	18	26	
	AXE_H5.5_15kn	0	0	0	0	0	1	3	
	ESC_H5.5_15kn	0	0	0	0	0	9	14	
hour	AXE_H5.5_10kn	0	0	0	0	0	0	1	
	ESC_H5.5_10kn	0	0	0	0	0	3	5	

در شکل (۶) نیز مقادیر RMS شتاب عمودی در محل عمود سینه برای دو ارتفاع موج مؤثر ۳/۵ و ۵/۵ متر و در ازای سرعت‌های مختلف کشتی و زوایای برخورد متفاوت ارائه شده است. ارائه‌ی این مقادیر بصورت نمودارهای قطبی می‌تواند دید بهتری از اثر همزمان سرعت کشتی و زاویه‌ی برخورد موج به طراح ارائه دهد. معیارهایی که در این نمودارهای قطبی مشاهده می‌گردد بر اساس مقدار بیشینه و کمینه شتاب عمودی انتخاب شده است. در

۶- نتیجه‌گیری

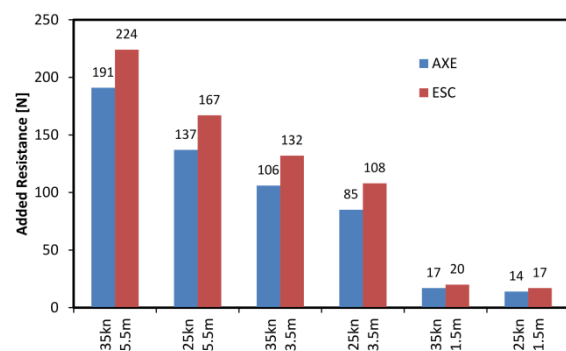
تحلیل دینامیکی شناورهای تندرو همواره بعنوان یک چالش در حوزه مهندسی دریا مطرح می‌باشد. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد دینامیکی شناورهای تندرو مستلزم صرف هزینه‌ی بسیار زیادی می‌باشد. از سوی دیگر، بکارگیری روش‌های عددی نیز برای تحلیل حرکات در شرایط دریایی شدید می‌تواند بسیار دشوار باشد. روش‌های جایگزین مبتنی بر روش تئوری نواری معمول نیز در بسیاری از موارد در شبیه‌سازی شرایط این شناورها همراه با خطای زیاد می‌باشد. در این مقاله از یک روش به‌روز بر اساس تئوری نواری استفاده شده است که می‌تواند پاسخ‌های قابل قبولی را برای تحلیل دینامیکی ارائه دهد. نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش، تریبون (Tribon) می‌باشد که بیشتر به جهت توانمندی در ساخت کشتی شناخته شده است. مازول‌های محاسبات اولیه‌ی این نرم‌افزار برای انجام تحلیل دریامانی استفاده شده است. در ابتدا نمودار راتو جابجائی عمودی، غلتش طولی و مقاومت افزوده در موج منظم بدست آمده و با نتایج تجربی معتبر مقایسه شده‌اند. پس از اطمینان از صحت نتایج روش تئوری نواری، از طیف موج ITTC برای تحلیل حرکات دینامیکی در شرایط دریای تصادفی استفاده شد. تحلیل دینامیکی بر اساس سه ارتفاع موج مؤثر انجام گردیده است. نتایج تحلیل شده در این بخش شامل شتاب عمودی در محل عمود سینه و پاشنه، حرکت مطلق عمودی در عمود سینه، مقاومت افزوده و احتمال وقوع کوبش کف می‌باشد. در هر کدام از این موارد، اثرات سرعت کشتی و زاویه‌ی برخورد امواج بر روی پارامترهای دینامیکی ارزیابی شد. ارائه‌ی نمودارهای قطبی نیز با هدف ارائه‌ی دیدگاه کامل‌تری از اثرات همزمان سرعت و زاویه‌ی موج ارائه شد. نتایج بدست آمده از این تحلیل‌ها را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

- روش تئوری نواری بر مبنای تکنیک کلوز-فیت و نرم‌افزار تریبون توانایی بسیار خوبی در تحلیل دینامیکی شناورهای پروازی دارد. خطای ناشی از تحلیل دینامیکی با این روش در هر دو مورد شناور دماغه‌ی تبری شکل و شناور اصلی در مقایسه با حل عددی و تجربی موجود ناچیز بوده است.
- در حالت موج از روبرو، مقدار شتاب عمودی در عمود سینه برای شناور دماغه‌ی تبری شکل بیشتر از شناور اصلی است.
- در هر دو مورد شتاب و حرکت مطلق عمودی، شناور دماغه‌ی تبری شکل در زوایای مختلف (به غیر از موج از روبرو) توانسته است مقادیر کمتری را ثبت کند.
- استفاده از فرم دماغه‌ی تبری شکل در این شناور منجر به کاهش قابل توجه احتمال وقوع کوبش کف (به‌خصوص در ارتفاع موج مؤثر بالا) شده است.
- مقدار مقاومت افزوده در امواج در سرعت ۳۵ گره دریایی بررسی شد و در تمامی ارتفاع‌ها مقادیر کمتری برای شناور مجهز به



شکل ۶ نمودار قطبی شتاب عمودی در محل عمود سینه در سرعت‌های مختلف کشتی و زوایای متفاوت موج

Fig. 6 Polar diagram of vertical acceleration at the fore perpendicular at different ship speeds and wave angles



شکل ۷ مقدار مقاومت افزوده در حالت موج از مقابل در سرعت‌های مختلف طراحی و ارتفاع مؤثر متفاوت موج

Fig. 7 Added resistance in head sea condition at different design speeds and significant wave heights

- [15] R. L. Trillo, "High speed over water, ideas from the past, the present and the future," in Proc. 1st Int. Conf. Fast Sea Transp., 1991.
- [16] D. R. Lavis, "Hovercraft Development," in Proc. Intersociety High-Perform. Marine Veh. Conf. Exhib., Arlington, VA, USA, Jun. 1992.
- [17] J. A. Keuning and F. van Walree, "The comparison of the hydrodynamic behaviour of three fast patrol boats with special hull geometries," in Proc. 5th Int. Conf. High Perform. Mar. Veh., Launceston, Australia, 2006, pp. 137-152. doi:10.1016/j.oceaneng.2014.03.012
- [18] J. A. Keuning, "Grinding the bow or how to improve the operability of fast monohulls," Int. Shipbuild. Prog., vol. 53, no. 4, pp. 281-310, Jan. 2006. doi:10.3233/SHP-2006-isp014
- [19] T. Armstrong, "The future for commercial fast craft - learning from events since FAST'91," in Proc. 10th Int. Conf. Fast Sea Transp., 2009, pp. 3-12.
- [20] J. A. Keuning and J. Pinkster, "Optimisation of the seakeeping behaviour of a fast monohull," in Proc. 3rd Int. Conf. Fast Sea Transp., 1995.
- [21] J. A. Keuning, S. Toxopeus, and J. Pinkster, "The effect of bow shape on the seakeeping performance of a fast monohull," in Proc. 6th Int. Conf. Fast Sea Transp., 2001, pp. 197-212.
- [22] J. A. Keuning and F. van Walree, "The comparison of the hydrodynamic behavior of three fast patrol boats with special hull geometries," in Proc. 5th Int. Conf. High Perform. Mar. Veh., Launceston, Australia, 2006, pp. 137-152.
- [23] R. Romadhoni, I. K. A. P. Utama, and B. Li, "Computational fluid dynamics analysis into the improvement of seakeeping characteristics of a fast craft using axe-bow," in IPTEK J. Proc. Ser., vol. 2, no. 1, Jan. 2016.
- [24] J. Seo, H. K. Choi, U. C. Jeong, D. K. Lee, S. H. Rhee, C. M. Jung, and J. Yoo, "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, Sep. 2016. doi:10.1016/j.ijnaoe.2016.07.005.
- [25] A. A. Rijkens and A. Mikelic, "The hydrodynamic comparison between a conventional and an Axe Bow frigate hull," in Proc. Int. Nav. Eng. Conf., vol. 16, 2022, p. 31. doi:10.24868/10651
- [26] A. Windyandari, A. K. Yusim, R. Ilham, and A. F. Zakki, "Seakeeping behavior of axe bow patrol boat with the variation of waterline spline type and submerged bow depth," Int. J. Eng. Appl., vol. 11, no. 1, Jan. 2023. doi:10.0000/ijeap.2023.123456. doi:10.15866/irea.v11i1.21741
- [27] S. Tavakoli, M. Zhang, A. A. Kondratenko, and S. Hirdaris, "A review on the hydrodynamics of planing hulls," Ocean Eng., vol. 303, p. 117046, 2024. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.117046.
- [28] T. G. Tran, V. T. Doan, and H. Tran, "A new approach to improving the accuracy of seakeeping predictions using strip theory for high-speed vessels," Ocean Eng., vol. 327, p. 120995, 2025. doi:10.1016/j.oceaneng.2025.120995.
- [29] F. M. Azimoh, Validation of a strip theory approach to estimating ship motion from sea state, M.S. thesis, Dept. Mar. Eng., Cape Peninsula Univ. Technol., Cape Town, South Africa, 2023.
- [30] A. A. K. Rijkens and A. Mikelic, "The hydrodynamic comparison between a conventional and an Axe Bow

دماغه‌ی تبری شکل ثبت شده است. در ارتفاع موج بیشینه (۵/۵ متر)، در سرعت طراحی مقدار مقاومت افزوده برای شناور دماغه‌ی تبری شکل ۱۴/۷ درصد نسبت به شناور اصلی کمتر بوده است.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد نویسنده‌ی اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] D. Savitsky, "On the seakeeping of planing hulls," Mar. Technol. SNAME News, vol. 5, no. 2, pp. 164-174, Apr. 1968. doi:10.5957/mt1.1968.5.2.164
- [2] W. Sottorf, Experiments with planing surfaces, German Aviation Research Association, Mar. 1934.
- [3] D. Savitsky, "Hydrodynamic design of planing hulls," Mar. Technol. SNAME News, vol. 1, no. 4, pp. 71-95, Oct. 1964. doi:10.5957/mt1.1964.1.4.71
- [4] E. P. Clement and D. L. Blount, "Resistance tests of a systematic series of planing hull forms," Trans. SNAME, vol. 71, no. 3, pp. 491-579, Nov. 1963.
- [5] J. M. Vanden-Broeck, "Nonlinear stern waves," J. Fluid Mech., vol. 96, no. 3, pp. 603-611, Feb. 1980. doi:10.1017/S00222112080002273
- [6] G. Fridsma, A systematic study of the rough-water performance of planing boats, Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology, Hoboken, NJ, Tech. Rep., Nov. 1969.
- [7] G. Fridsma, A systematic study of the rough water performance of planing boats. Part II: Irregular waves, Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory, Castle Point Station, Hoboken, NJ, USA, Tech. Rep. SIT-DL-71-1495, 1969.
- [8] M. Martin, "Theoretical prediction of motions of high-speed planing boats in waves," J. Ship Res., vol. 22, no. 3, pp. 140-169, Sep. 1978. doi:10.5957/jsr.1978.22.3.140
- [9] D. Savitsky and P. W. Brown, "Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water," Mar. Technol. SNAME News, vol. 13, no. 4, pp. 381-400, Oct. 1976. doi:10.5957/mt1.1976.13.4.381
- [10] J. J. Blok and W. Beukelman, "The high-speed displacement ship systematic series hull forms—seakeeping characteristics," Trans. SNAME, vol. 92, 1984.
- [11] J. A. Keuning, Nonlinear behaviour of fast monohulls in head waves, Delft University of Technology, 1964.
- [12] J. A. Keuning, J. Gerritsma, and P. F. van Terwisga, "Resistance tests of a series of planing hull forms with 30 degrees deadrise angle," Int. Shipbuild. Prog., vol. 40, pp. 333-385, 1993. doi:10.3233/ISP-1982-2933701
- [13] J. A. Keuning and J. Gerritsma, "Resistance tests of a series of planing hull forms with 25 degrees deadrise angle," Int. Shipbuild. Prog., vol. 29, no. 337, pp. 222-249, Sep. 1982. doi:10.3233/ISP-1982-2933701
- [14] J. J. Blok and H. W. Roeloffs, The influence of the forebody deadrise on the performance in a seaway, MARIN, Tech. Rep. 49207-1-HT, 1989.

- [38] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture: Vol. 3 - Motions in Waves and Controllability*, 2nd rev. ed. Jersey City, NJ, USA: SNAME, 1989, pp. 1–190.
- [39] W. Frank, Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids, Naval Ship Res. Develop. Center, Washington, DC, USA, Rep. No. 2375, Oct. 1967.
- [40] C. M. Lee, H. Jones, and J. W. Bedel, Added mass and damping coefficients of heaving twin cylinders in a free surface, Naval Ship Res. Develop. Center, Washington, DC, USA, Tech. Rep. NSRDC-3695, Dec. 1971.
- [41] K. L. Anil, D. B. Danışman, and K. Sariöz, "Simulation based calculation of ship motions in extreme seas with a body-exact strip theory approach," *Sci. J. Mar. Res.*, vol. 35, pp. 36–48, 2021. doi:10.31217/p.35.1.5
- [42] P. de Jong, Seakeeping behaviour of high speed ships, M.S. thesis, Dept. Mar. Technol., Delft Univ. Technol., Delft, Netherlands, 2011.
- [43] A. Golshani and M. Rezaei, "Modeling the waves induced by the January 2019 storm in the Caspian Sea in order to investigate the reasons of partial damage of western arm of Caspian Port breakwater," *J. Oceanogr.*, vol. 11, no. 42, pp. 49–59, 2020.
- frigate hull," in *Proc. Int. Nav. Eng. Conf.*, vol. 16, Art. no. 31, 2022. doi:10.24868/10651
- [31] N. Salvesen, E. O. Tuck, and O. Faltinsen, "Ship motions and sea loads," *Trans. SNAME*, vol. 78, pp. 250–279, 1970.
- [32] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture*, vol. 3, no. 2, New York, NY, USA: SNAME, 1989, pp. 1–190.
- [33] B. V. Korvin-Kroukovski and W. R. Jacobs, "Pitching and heaving motions of a ship in regular waves," *Trans. SNAME*, vol. 65, pp. 590–632, 1957.
- [34] A. N. Krylov, "A general theory of the oscillations of a ship on waves," *Trans. R. Inst. Nav. Archit.*, vol. 40, 1896.
- [35] F. Ursell, "On the vertical added mass and damping of floating bodies at zero speed ahead," in *Proc. Symp. Ships Seaway*, 1957.
- [36] O. Grim, "Berechnung der durch Schwingungen eines Schiffskörpers erzeugten hydrodynamischen Kräfte" (Calculation of hydrodynamic forces generated by ship hull vibrations), *Jahrb. Schiffbautech. Ges.*, vol. 47, pp. 277–299, 1953.
- [37] Y. T. Fan and P. A. Wilson, "Time domain non-linear strip theory for ship motions," *Int. J. Marit. Eng.*, vol. 146, pp. 33–47, 2004. doi: 10.3940/rina.ijme.2004.a3.