J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (59-69)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Investigating the amount of vertical acceleration of the ship in two forms of transom and canoe stern design in the form of node analysis using the simulation method

Hamid Eslami [1*], Hassan Ghassemi [2,5], Majid Askari Sayar [3], Abbas Zarenezhad Ashkezari [4]

[1] *Master of Mechanical Engineering Department, Imam Khomeini Naval University, Noshahr, Iran; Hamidislami1372@Gmail.com*
[2] *Professor of Sea Engineering Department, Amirkabir University, Tehran, Iran; Gasemi@aut.ac.ir*
[3] *PhD in mechanical engineering Department, Shahrood University, Shahrood, Iran; Majidaskary1363@Gmail.com*
[4] *Associate Professor of Sea Engineering Department, Imam Khomeini Naval University, Noshahr, Iran; Azarenezhad.a@Gmail.com*
[5] *School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, China*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 30 Nov 2025
Last modification: 24 Aug 2026
Accepted: 26 Aug 2026
Available online: 26 Aug 2026

Article type:
Research paper

Keywords:
Transom Curved
Dynamic Motions
Simulation
Rhino
Maxsurf

ABSTRACT

The design of vessels and any structures used in water must be based on standard calculations in ship architecture and marine engineering, as the hull shape and geometry play a significant role in resisting the forces and moments acting on a vessel. In the present study, the vertical acceleration of two different stern forms of an oil tanker is investigated and compared by defining several similar nodes at the stern region. Since the dynamic motions of ships directly affect their behavior at sea, they can influence the safety of passengers and crew, cargo integrity, comfort levels, ship speed, and propulsion system fuel consumption. Therefore, reducing dynamic motions has always been a primary objective of ship designers. In this research, the canoa stern of an oil tanker was modified into a new curved transom stern, and the performance of both stern forms was evaluated using a simulation-based approach. First, the curved transom stern was designed using the Rhino commercial software. Subsequently, the vertical acceleration of each stern form was analyzed using Maxsurf marine software by defining several similar nodes in the modified stern regions. To ensure the validity of the modeling and analysis process, the results were compared with findings from previous studies. The results indicate that the curved transom stern exhibits superior performance compared to the canoa stern when subjected to dynamic hull loads and sea waves. In addition to reducing design and construction costs by approximately 13%, this stern form also leads to a reduction in vertical acceleration. Furthermore, the findings enable the identification of various desirable transom stern configurations or appropriate curvature angle ranges in the lower part of the hull, contributing to improved dynamic behavior of marine vessels.

ISSN: 2645-8136

DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۲، شماره ۴۹، ۱۴۰۵، (۶۹-۵۹)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

بررسی میزان تغییرات شتاب عمودی شناور در دو فرم پاشنه منحنی و صاف به صورت تحلیل نقطه‌ای با استفاده از روش شبیه‌سازی

حمید اسلامی [۱*]، حسن قاسمی [۲و۵]، مجید عسکری سیار [۳]، عباس زارع‌نژاد اشکذری [۴]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، نوشهر، ایران، Hamidislami1372@Gmail.com

[۲] استاد دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران، Gasemi@aut.ac.ir

[۳] دکتری مهندسی مکانیک-گرایش جامدات، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود،ایران، Majidaskary1363@gmail.com

[۴] دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)، نوشهر، ایران، Azarenezhad.a@Gmail.com

[۵] دانشکده مهندسی اقیانوس، دانشگاه فناوری هاربین، ویهای، چین

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

ترانسوم منحنی

حرکات دینامیکی

شبیه‌سازی

راینو

مکسرف

چکیده

طراحی شناورها و هر سازه‌ای که در آب به‌کار می‌رود باید بر پایه محاسبات استاندارد در معماری کشتی و مهندسی دریایی انجام شود، زیرا شکل و هندسه بدنه نقش مهمی در مقاومت در برابر نیروها و گشتاورهای وارد بر شناور دارد. در پژوهش حاضر، شتاب عمودی دو فرم پاشنه متفاوت با تعریف چند نقطه مشابه در انتهای پاشنه یک نفتکش بررسی و مقایسه شده است. از آنجا که حرکات دینامیکی کشتی‌ها مستقیماً بر رفتار شناور در دریا و همچنین بر ایمنی مسافران، خدمه، محموله، آسایش افراد، سرعت و مصرف سوخت سامانه رانش اثر می‌گذارد، کاهش این حرکات همواره از اهداف اصلی طراحان بوده است. در این مطالعه، پاشنه صاف یک نفتکش به فرم جدید ترانسوم منحنی تغییر داده شد و عملکرد هر دو فرم با روش شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا فرم ترانسوم منحنی با استفاده از نرم‌افزار راینو طراحی شد و سپس تحلیل شتاب عمودی هر دو فرم پاشنه با نرم‌افزار مکسرف و بر اساس نقاط مشابه در بخش‌های تغییر یافته انجام گرفت. برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین مقایسه و اعتبارسنجی شد. بر اساس نتایج، پاشنه ترانسوم منحنی در مواجهه با بارهای دینامیکی بدنه و امواج دریا عملکرد بهتری نسبت به پاشنه صاف نشان داد. این فرم علاوه بر کاهش حدود ۱۳ درصدی هزینه‌های طراحی و ساخت، موجب کاهش شتاب عمودی نیز می‌شود. همچنین، یافته‌های تحقیق امکان تعیین فرم‌های مختلف پاشنه منحنی مطلوب یا بازه مناسب زاویه انحنا در بخش زیرین بدنه را فراهم می‌کند و می‌تواند در بهبود رفتار دینامیکی شناورها مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

۱ - مقدمه

همواره در سال‌های متمادی توجه بسیاری از مهندسین و شرکت-های کشتی‌سازی به استفاده از طراحی بهینه و کم‌هزینه در صنایع دریایی جهت شناورهای مختلف تجاری، مسافربری و نظامی معطوف بوده‌است. در دهه‌های اخیر، روش‌های مختلفی جهت بهبود طراحی بدنه شناورها ارائه شده که به کاهش این هزینه‌ها انجامیده است. در بسیاری از کشورهای صنعتی و نیز کشورهای درحال توسعه، نقش طراحی بهینه در همه صنایع تولیدی حائز اهمیت بوده و همیشه جز مهم‌ترین اولویت مهندسین طراح می-باشد. در طی دهه‌های گذشته طراحی و ساخت بهینه بدنه شناور بطور گسترده‌ای افزایش یافته و همچنین در طول این دوره روش و ایده‌های گوناگون در این حوزه افزایش چشمگیری داشته است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی بدنه شناور تغییر در فرم پاشنه شناور (زیر خط آبخور) جهت کاهش حرکات دینامیکی در مواجهه با امواج دریا می‌باشد. از آنجایی که حرکات دینامیکی کشتی‌ها تاثیر مستقیم بر رفتار شناور در دریا دارد، می‌تواند بر ایمنی مسافرین، خدمه، محموله‌ها و متعلقات مربوط به آن‌ها، راحتی و آسایش مسافرین و خدمه و همچنین سرعت شناور و در نهایت مصرف سوخت سیستم رانش تاثیرگذار باشد. در این پژوهش، با تغییر در فرم پاشنه یک شناور تک‌بدنه U شکل که دارای پاشنه‌ای از نوع کانو(صاف) می‌باشد به پاشنه ترانسوم منحنی در نرم‌افزار تجاری راینو و همچنین شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار مکسرف، میزان عملکرد شتاب عمودی به صورت نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. پرکیوال و همکاران با استفاده از روش CFD به مقایسه کشش فرم بدنه اصلی شناور با حالت بهینه آن در آب آرام پرداخته‌اند که برای حالت بهینه، کشش کل (اصطکاک و موج) در آب آرام به حداقل می‌رسد [۱]. فان‌چن و همکاران با استفاده از یک فرم بدنه جدید با ویژگی ترکیبی از فرم های بدنه بهینه برای آب های عمیق و آب کم عمق، در شرایط مختلف مورد بررسی قرار دادند. شبیه سازی عددی نشان می‌دهد که فرم بدنه طراحی شده به روش طراحی معکوس بدنه می‌تواند موج تولیدشده توسط کشتی را به میزان قابل توجهی در مقایسه با فرم بدنه اصلی کاهش دهد [۲]. گیاتران و همکاران با استفاده از روش ساویتسکی از طریق بهینه‌سازی فرم بدنه یک شناور تندرو به نام K88 که مدل آزمایش‌شده بود اما به عملکرد مورد انتظار دست پیدا نکرد به میزان ۱۱.۳ درصد مقاومت را کاهش داد. این کار بر اساس مدل جایگزین کریجینگ و الگوریتم بهینه‌سازی نلدل‌مید، یک نوع فرم بدنه بهینه با حداقل مقاومت تعیین شد [۳]. یک گروه کشتی‌سازی چند ملیتی با ۶۰۰۰ کارمند در سراسر جهان، تحقیقات گسترده ای در زمینه توسعه طراحی بدنه در طول مدت بیست سال برای کشتی های تک بدنه انجام داده است. در دهه ۱۹۹۰، مفهوم کشتی‌های بزرگ توسعه یافت، که منجر به بهبود قابلیت‌های دریامانی و رفتار کشتی در امواج با سرعت بالا شد این مفهوم طراحی بدنه در کشتی دامن به-کار گرفته شد که بسیار موفق بوده و شتاب‌های عمودی را تا ۵۰ درصد کاهش داده و در نتیجه به کشتی‌ها اجازه می‌دهد با سرعت بالا در امواج به کار خود ادامه دهند [۴]. کاکیسی کار تحقیقاتی مهمی را با هدف تخمین حالت حرکت عمودی (هیو، رول و پیچ) با شبیه‌سازی کنترل رویکرد LQG انجام داد. در این پژوهش یک کشتی مسافربری در امواج نامنظم از روبرو با عدد فرود ۰.۴۵ در نظرگرفت. دو جفت فویل که به عنوان باله در قسمت سینه کشتی قرار دارند به عنوان محرک استفاده گردید. نتایج نشان داد که رویکرد LQG اجراشده، حرکات و شتاب‌های عمودی را تا حدود ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۵]. راتویل و همکاران با تغییر در فرم پاشنه یک شناور در راستای بهینه‌سازی بدنه علاوه بر کاهش شتاب عمودی شاهد عملکرد بهتر شناور در آب‌های کم‌عمق همراه با کاهش اثرات اسکوآت و تغییر در الگوی موج تولیدشده توسط کشتی بوده‌اند[۶].

جین‌وان‌یو و همکاران با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی بدنه شناور در قسمت سینه و پاشنه علاوه بر کاهش مقاومت موج‌سازی، عملکرد دریامانی و عملیاتی شناور را بهبود بخشیدند[۷].

۲ - مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت بررسی رفتار دینامیکی شناور در دریا (شتاب عمودی)، از نرم‌افزار تجاری راینو Rhinoceros 5 ورژن 2017 جهت طراحی پاشنه جدید استفاده شد؛ و برای صحه‌سنجی روش مدلسازی با نتایج پژوهش تجربی دیگر در این زمینه مقایسه شد. نوع طراحی بر اساس تغییر مختصات نقاط کنترلی پاشنه شناور یعنی حذف نقاط کنترلی اصلی و ایجاد نقاط کنترلی جدید به صورت تجربی و درقالب استانداردهای موسسات رده‌بندی بوده است. همچنین تحلیل حرکات شناور توسط نرم‌افزار دریایی مکسرف Maxsurf Advanced ورژن V23 Update 05 جهت بررسی دقیق شتاب عمودی صورت پذیرفت. تقسیم‌بندی صفحات بدنه در سه قسمت جهت انجام مش و نحوه مش‌بندی بدنه به صورت بهینه و برای هر سه قسمت به صورت یکنواخت از نوع پوسته‌ای در قالب S4R و سایز المان مش زده‌شده ۰.۵ درنظر گرفته شد.

۲ – ۱- صحه سنجی روش تحقیق

والن تاد ایی رفتار دینامیکی یک شناور پروازی متعلق به نیروی دریایی ایالت متحده را مورد ارزیابی قرار داده‌است. کارکرد این شناورها در شرایط عادی و نامطلوب به دلیل شتاب عمودی زیاد، خدمه را در معرض شوک ناگهانی شدید قرار می‌دهد. شواهد و

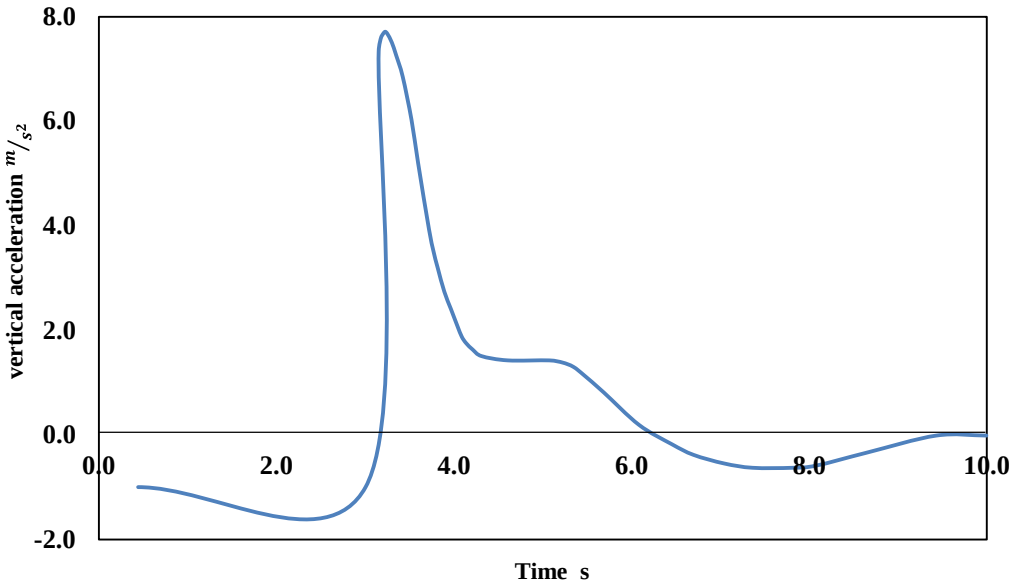
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

مطالعات پزشکی اخیر که توسط مرکز تحقیقات سلامت نیروی دریایی انجام شد، حاکی از آسیب مزمن و حاد خدمه را نشان می‌دهد. بیشتر تحقیقات کنونی بر راه حل‌های کوتاه مدتی تمرکز دارد که شوک وارده به رابط بدنه با عرشه و صندلی عرشه را کاهش می‌دهد (مثلاً صندلی‌های تعلیق و بالشتک عرشه). هدف این تحقیق توسعه یک بدنه بهینه ODH است که شوک ناگهانی را در جایی که برای اولین بار به قایق وارد می‌شود، کاهش دهد. تجزیه و تحلیل ODH بر روی شناور انجام می‌شود تا تأثیرات ریزش بدنه بر شتاب عمودی مشخص شود. در نهایت، نتایج تجزیه و تحلیل ODH بر فضای مطالعه طراحی بدنه‌ها، برنامه‌ریزی و به منظور بهینه‌سازی طراحی کلی برای کاهش شتاب عمودی بر اساس فرم بدنه، سرعت کروز و وزن محموله استفاده می‌شود. شکل موج نشان داده‌شده در شکل (۱) نقطه حداکثر شتاب عمودی برای رویداد شوک لحظه‌ای که بیشترین مقدار است را نشان می‌دهد. به طور کلی، مدت زمان رویداد شوک بسته به سرعت شناور، وضعیت دریا و غیره از ۳۰-۷۵ میلی ثانیه است[۸].

تحقیق و توسعه فرم‌های بدنه پیشرفته یک فرآیند مداوم است. به منظور تعیین اثرات بهینه بر شتاب عمودی، تعداد بیست و شش بدنه در شرایط دریایی مشابهی که در جدول (۱) شرح داده شده است در آب آرام و مغشوش برای ارزیابی مقاومت بدنه شبیه‌سازی شدند. شکل (۲) بیشترین میزان بهینه شتاب عمودی شناور را نشان می‌دهد.

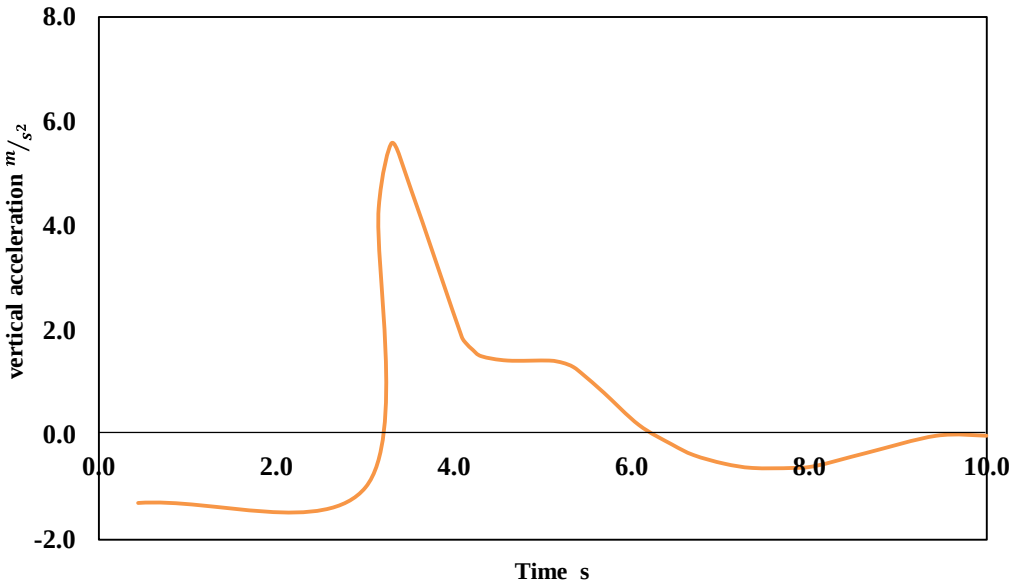
جدول ۱- شرایط شبیه‌سازی آب مغشوش

مشخصه	مقدار
سرعت شناور	۳۵ گره دریایی
طیف موج	طیف ITTC
ارتفاع موج	۰.۹۵ متر
پریود	۵.۵ ثانیه
عمق آب	آب عمیق
جهت موج	موج از روبرو
موقعیت	کوآکس‌وین



شکل ۱- نمودار شتاب عمودی مرکز ثقل شناور معمولی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]



شکل ۲- نمودار شتاب عمودی مرکز ثقل شناور بهینه

۲-۲- مدل‌سازی شناور

ابتدا با استفاده از آفست یک مدل نفتکش با CB=0.72 در نرم-افزار طراحی (راینو) کلیه نقاط بدنه شناور به صورت TXT وارد شد و با ترسیم مقاطع عرضی و سپس اتصال صفحات هر مقطع شکل شناور اصلی طراحی شد. مشخصات اولیه شناور در جدول (۲) قید گردید.

جدول ۲- مشخصات شناور اصلی

کمیت	مشخصات
طول $[m]$	۸۰
عرض $[m]$	۱۴
آبخور $[m]$	۴.۵
عمق بدنه $[m]$	۶.۷
جابجایی حجمی $[m^3]$	۳۶۰۰
سرعت طراحی $[Kn]$	۱۵
ضریب منشوری	۰.۷۳۳
ضریب بلوکی	۰.۷۲۲
ضریب خط آبخور	۰.۸۸۵
$[m]$GMt	۱.۸۵۷
$[m]GM_L$	۱۱۱.۶۲۱

شکل (۳) شناور اصلی با پاشنه کانو را نشان می‌دهد. پاشنه معمولی طرح اولیه از پاشنه ترانسوم که به‌طور متفاوتی نسبت به پاشنه منحنی شناخته می‌شود که به پیشرفت برجسته در طراحی پاشنه کشتی به ویژه در کشتی‌های جنگی نیمه اولیه قرن بیستم تبدیل شد. تغییرات در قسمت پاشنه با تمرکز در تغییر شکل پاشنه کانو به پاشنه منحنی انجام شد که در حالت‌ها و زوایای مختلف بدون تغییر در خط آبخور این تغییرات اعمال گردید. ابتدا یک خط فرضی مطابق شکل (۴) از پایین‌ترین قسمت شناور هم-راستا با خط پایه رسم گردید. اولین فاکتور در جهت ترسیم فرم پاشنه منحنی یا ترانسوم نقطه شروع انحنا می‌باشد که مطابق استاندارد دریایی DNV به میزان 0.04L از عمود پاشنه به سمت سینه شناور فاصله گرفته و این نقطه بدست‌آمده اولین گام در طراحی پاشنه ترانسوم است. محدوده اطراف پروانه دارای فواصل معینی است که کاهش یا افزایش حساب نشده آن باعث ایجاد معایبی می‌گردد. فواصل اطراف پروانه بر پارامترهای زیر موثر است [۹]:

۱) بازدهی پروانه و در نتیجه توان مورد نیاز

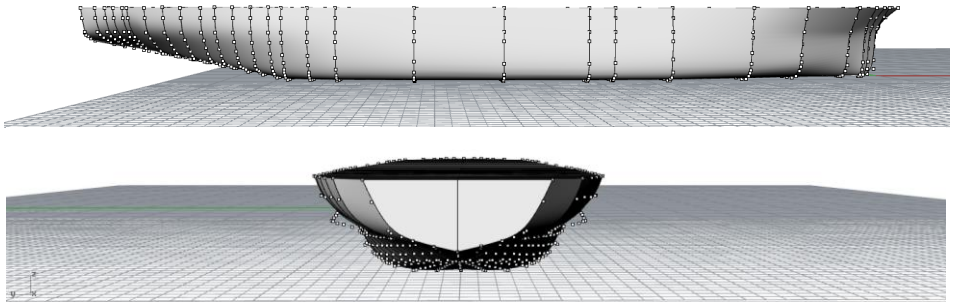
۲) اثرات ارتعاشی پروانه بر بدنه قسمت پاشنه که ممکن است باعث شکست حاصل از خستگی شود. هرچه فواصل بیشتر باشد، ارتعاشات کمتر می‌شود.

۳) قطر پروانه و سرعت بهینه پروانه

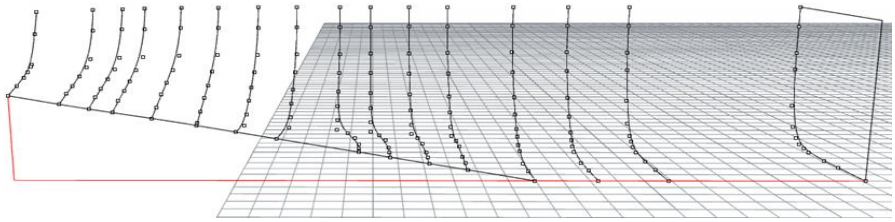
۴) تاثیر بر گشتاور مورد نیاز برای گردش پروانه

با محاسبه قطر پروانه از طریق سری‌های استاندارد، روش B-wageningen که از جامع‌ترین حالت‌ها می‌باشد و در آن ۱۲۰ مدل پروانه مختلف آزمایش شده‌است. فاصله استاندارد خط پایه (کیل) تا کف بدنه جهت طراحی پاشنه منحنی بدست آمد. شکل نهایی فرم پاشنه جدید در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

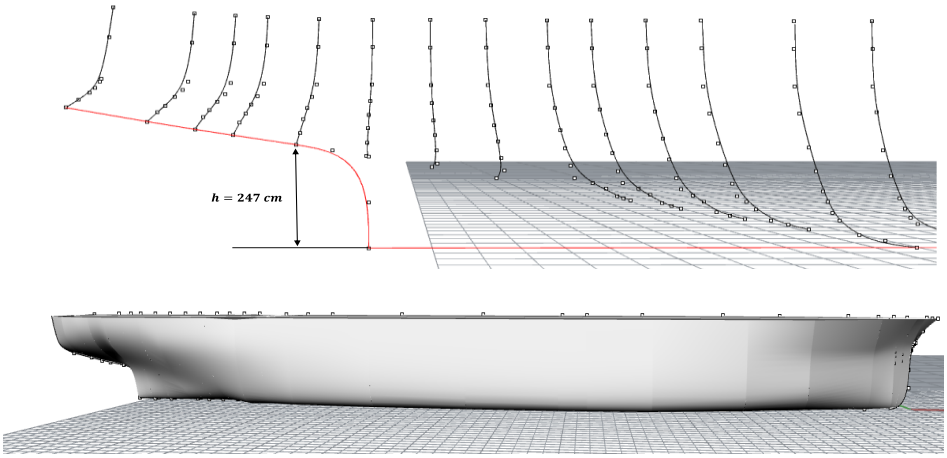
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]



شکل ۳ - شناور با فرم پاشنه کانو



شکل ۴- تعریف محدوده تغییر فرم پاشنه



شکل ۵- شناور با فرم پاشنه جدید

پاشنه جدید از نوع پاشنه منحنی بوده و طراحی جدیدتری نسبت به پاشنه کانو دارد. باتوجه به موارد زیر این نوع پاشنه در طراحی-های جدید شناور مورد استقبال قرار گرفته‌است[۱۰]. از نظر کاهش پدیده اسکوآت عملکرد بهتری از خود نشان داده‌است. محسن قدرت توانست با تلفیق تحلیل دقیق عددی، بررسی پارامترهای متنوع هیدرودینامیکی(از جمله فرکانس برخورد) و ارائه ارزیابی کمی دقیق از پاسخ دینامیکی شناور در شرایط مختلف دریایی نسبت به بهینه‌سازی طراحی بدنه شناورهای تندر، کاهش شتاب عمودی و افزایش ایمنی و راحتی خدمه نقش مؤثری ایفا کند[۱۱]. پاشنه منحنی یک شکل عالی و مناسب برای شناورها در دریا است. زیرا سطح پهن و گسترده‌ای را در زیر شناور ایجاد کرده که امواج دریا را به سمت پروانه هدایت می‌کند که این امر باعث شکست موج و حرکت شناور به سمت جلو می-شود. ساختار ساده‌تری دارد و همچنین می‌تواند جریان بهتری را در اطراف پاشنه ایجاد کند. مقاومت در عملکرد با سرعت آهسته در یک پاشنه ترانسوم به طور قابل توجهی بیشتر از کشتی با پاشنه صاف (کانو) به دلیل تشکیل گرداب است. مدل هندسی شناور ابتدا در نرم‌افزار راینو طراحی و پس از کنترل پیوستگی سطوح، بسته بودن بدنه و صحت هندسی، با فرمت IGES به نرم‌افزار مکسرف منتقل شد. در فرآیند انتقال، مقیاس هندسی و سیستم مختصات بررسی و در صورت نیاز اصلاحات جزئی انجام گرفت. در نهایت، با مقایسه پارامترهای هیدروستاتیکی اصلی با مقادیر طراحی اولیه، صحت انتقال مدل و قابلیت آن برای تحلیل شتاب عمودی تأیید شد.

روش تحلیل از نوع تئوری نواری بوده که از سینه تا پاشنه به تعداد ۴۱ سکشن تقسیم بندی گردید و به تعداد ۱۵ جمله دقت محاسبات نرم‌افزار انتخاب شد. شکل (۶) میزان انطباق نگاشت هر سکشن با مقاطع عرضی را نشان می‌دهد.

نحوه محاسبه نتایج شبیه‌سازی که برای کاهش شتاب‌های عمودی کشتی در امواج منظم از روبرو انجام شده است با کمک چندین

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

نمودار ارائه شده است. در این مطالعه، $(M+A)$ ضریب اینرسی، B ضریب میرایی، C ضرایب بازگرداننده و همچنین F نیروی تحریک در نظر گرفته شده است. معادلات کوپل حرکات هیو و پیچ به صورت ذیل هستند [۱۲]:

$$(M+A_{33})\ddot{z}_3 + B_{33}\dot{z}_3 + C_{33}z_3 + A_{35}\ddot{\theta}_5 + B_{35}\dot{\theta}_5 + C_{35}\theta_5 = F_3 e^{i\omega_e t} \quad (۱)$$

$$A_{53}\ddot{z}_3 + B_{53}\dot{z}_3 + C_{53}z_3 + (A_{55}+I_5)\ddot{\theta}_5 + B_{55}\dot{\theta}_5 + C_{55}\theta_5 = F_5 e^{i\omega_e t} \quad (۲)$$

در روابط فوق، نمادها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

Z جابجایی هیو شناور در راستای قائم (m)، θ زاویه پیچ شناور حول محور عرضی (rad)، M جرم شناور (kg)، I_{uu} ممان اینرسی جرم شناور حول محور پیچ و نسبت به مرکز جرم ($kg.m^2$)، A_{ij} ضرایب جرم افزوده هیدرودینامیکی، B_{ij} ضرایب میرایی هیدرودینامیکی، C_{ij} ضرایب بازگرداننده هیدرواستاتیکی، $F_3(t)$ نیروی تحریک موج در راستای هیو، $F_5(t)$ گشتاور تحریک موج در حرکت پیچ که اندیس های ۳ و ۵ به‌ترتیب معرف حرکات هیو و پیچ بوده و ضرایب کوپل C_{35} ، B_{35} ، A_{35} بیانگر اندرکنش متقابل این دو حرکت هستند.

رابطه بین جرم افزوده و ضرایب میرایی به تفصیل توسط Salvesen و همکاران در سال ۱۹۷۰ ارائه شده است. پارامترهای هیدرودینامیکی شامل ضرایب جرم افزوده، میرایی و بازگرداننده از تحلیل جریان پتانسیل در نرم‌افزار Maxsurf Motions استخراج شده‌اند. جرم شناور و ممان اینرسی پیچ بر اساس مشخصات هندسی و توزیع جرم مدل محاسبه شده و مرکز جرم در موقعیت طراحی اولیه در نظر گرفته شده است. تحریک موج به‌صورت موج منظم سینوسی با دامنه واحد اعمال گردید تا امکان استخراج ضرایب پاسخ فرکانسی فراهم شود.

ضرایب میرایی بی‌بعد با استفاده از روش تئوری نواری به صورت تجربی محاسبه شد. نحوه محاسبه بدین صورت می‌باشد که از سینه تا پاشنه شناور به فاصله ۱ متر به تعداد هشتاد مقطع تقسیم‌بندی شد و پس از محاسبه میزان جرم افزوده و نیروی بویانسی هر مقطع و اعمال ضرایب سیمپسون و انتگرال‌گیری ضرایب جرم افزوده و نیروی میرایی کل بدست آمد. نسبت نیروی میرایی به جرم افزوده مقدار υ و از نسبت υ به فرکانس حرکت هیو و پیچ مقدار ضریب میرایی بی‌بعد محاسبه گردید. در جدول (۳) مشخصات طیف موج و شرایط شبیه‌سازی دریای خلیج‌فارس و دریای عمان با توجه به گزارش سالیانه پژوهشکده ملی اقیانوس‌شناسی ایران جهت تحلیل در نرم‌افزار ثبت شد. لازم بذکر است سرعت انتخابی جهت تست، میانگین سرعت شناور در شرایط واقعی می‌باشد. برای مقایسه بهتر دو فرم پاشنه منحنی و صاف از انتهای شناور تا شروع تغییرات کف بدنه نقاطی را بر روی کیل شناور به صورت مشابه در هر دو فرم پاشنه تعریف گردید. میزان شتاب عمودی در هر نقطه مطابق سرعت و فرکانس مورد ارزیابی در نرم‌افزار، استخراج گردید که از مقایسه نمودارهای بدست‌آمده تفاوت عملکرد دو فرم پاشنه منحنی و صاف مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی و مقایسه شتاب بین دو فرم پاشنه ابتدا مختصات نقاط یک تا شش در نرم‌افزار تعریف گردید. شرایط شبیه‌سازی موج در این پژوهش به‌صورت امواج منظم و در بازه‌ای از فرکانس‌ها انتخاب شد تا امکان تحلیل دقیق پاسخ‌های دینامیکی و مقایسه اثر هندسه پاشنه فراهم شود. عمق آب به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که شرایط آب عمیق شبیه‌سازی شده و اثرات کم‌عمقی بر نتایج ناچیز باشد. اگرچه نتایج در امواج منظم به‌دست آمده‌اند، اما تفاوت‌های مشاهده‌شده میان دو فرم پاشنه عمدتاً ناشی از ویژگی‌های هندسی بدنه بوده و انتظار می‌رود روند کلی نتایج در امواج نامنظم نیز حفظ شود.

شکل (۷) مکان قرارگیری هر نقطه بر روی پاشنه شناور را نشان می‌دهد.

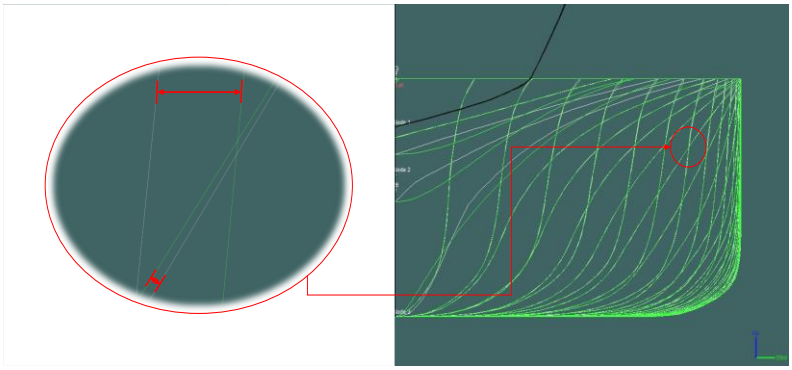
جدول ۳- شرایط شبیه‌سازی در امواج منظم

مشخصه	مقدار
سرعت شناور $[Kn]$	۱۰
طیف موج	طیف جانسوآپ
ارتفاع موج $[m]$	۱.۱
پریود $[s]$	۵.۵
عمق آب	آب کم‌عمق
جهت موج	موج از روبرو
موقعیت	دریای خلیج‌فارس

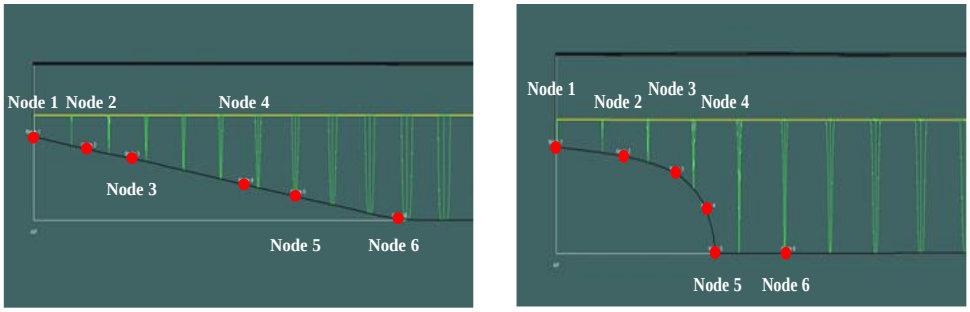
جدول ۴- تعریف مختصات نقاط یک تا شش

نام	طول از عمود سینه AF (متر)	آفست (متر)	ارتفاع (متر)	طول از مرکز ثقل GM (متر)	آفست از مرکز ثقل GM (متر)	ارتفاع از مرکز ثقل GM (متر)
نقطه ۱	-۷۸.۲۵	۰.۰۰	-۰.۹۱	-۴۱.۰۴	۰.۰۰	-۱.۰۱
نقطه ۲	-۷۵.۳۵	۰.۰۰	-۱.۲۳	-۳۸.۱۴	۰.۰۰	-۱.۳۳
نقطه ۳	-۷۳.۰۷	۰.۰۰	-۱.۸۱	-۳۵.۸۶	۰.۰۰	-۱.۹۱
نقطه ۴	-۷۱.۷۲	۰.۰۰	-۳.۰۵	-۳۴.۵۱	۰.۰۰	-۳.۱۵
نقطه ۵	-۷۱.۳۹	۰.۰۰	-۴.۵۰	-۳۴.۱۸	۰.۰۰	-۴.۶۰
نقطه ۶	-۶۸.۲۶	۰.۰۰	-۴.۵۰	-۳۱.۰۵	۰.۰۰	-۴.۶۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]



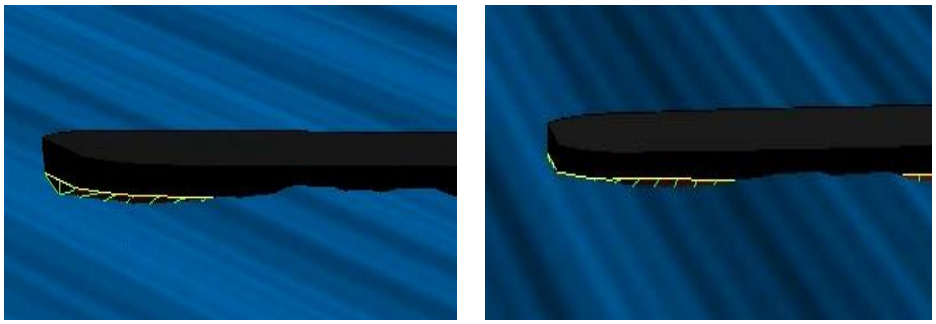
شکل ۶- میزان انطباق مقاطع نگاشت با مقاطع عرضی



شکل ۷- مکان قرار گیری نقاط بر روی پاشنه شناور

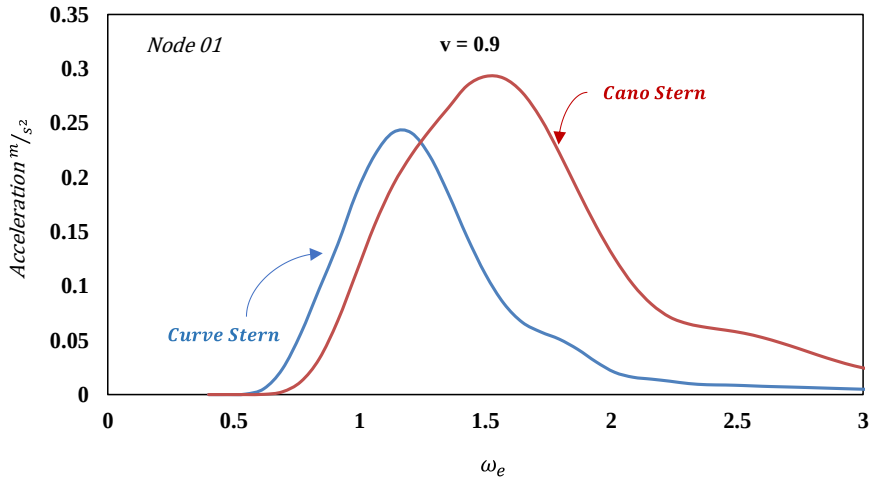
۳ - نتایج وبحث

هدف از این پژوهش بررسی میزان شتاب عمودی دو فرم پاشنه کانو و منحنی جهت یک شناور تک‌بدنه و مقایسه میزان عملکرد شتاب عمودی هرکدام از پاشنه‌ها در شرایط شبیه‌سازی یکسان مطابق جدول (۳) می‌باشد. شکل (۸) نحوه انجام تست توسط نرم-افزار را نشان می‌دهد. ایجاد انحنا در قسمت انتهایی پاشنه یک شکل عالی و مناسب برای این نوع از شناور در دریا است. زیرا سطح پهن و گسترده‌ای را در زیر شناور ایجاد کرده که امواج دریا را به سمت پروانه هدایت می‌کند که این امر باعث شکست موج و حرکت شناور به سمت جلو می‌شود. این نوع پاشنه با کشش اندک چمباتمه نزده و اثر ویک (رد آب) صاف و یکدستی از خود بر جای می‌گذارد. باتوجه به حالت گوه‌ای ایجاد شده در طراحی پاشنه شتاب عمودی کمتری را ایجاد می‌نماید. در آزمایشات شتاب مربوط به سرعت ۱۰ نات، شکل (۹) که برحسب فرکانس برخورد می‌باشد؛ تغییرات قابل توجهی مشاهده گردید. بدین صورت که در ابتدای کار بین بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۱رادیان برثانیه شتاب عمودی فرم پاشنه صاف و فرم پاشنه منحنی به صورت یکنواخت افزایش یافته و پس از فرکانس برخورد ۱ رادیان برثانیه شتاب عمودی فرم پاشنه مقادیر منحنی کاهش یافته و در کمترین مقدار خود قرار می‌گیرد. اما شتاب عمودی در پاشنه صاف به سیر صعودی خود ادامه داده و در فرکانس ۱.۵ رادیان برثانیه به میزان حداکثر خود می‌رسد. سپس سیر نزولی به خود گرفته و به صورت آهسته کاهش می‌یابد. بطور کلی شتاب عمودی فرم پاشنه منحنی از فرم پاشنه صاف به میزان ۱۷٪ کمتر می‌باشد.



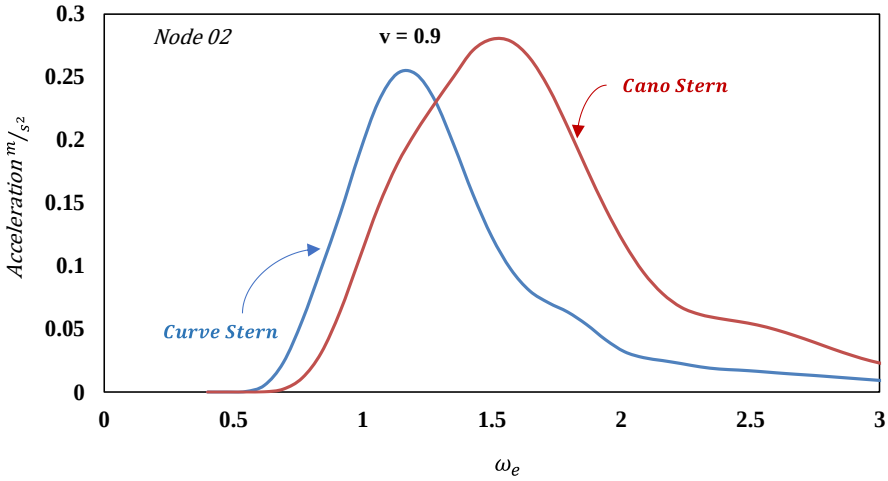
شکل ۸- تست شتاب در امواج منظم و موج از روبرو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

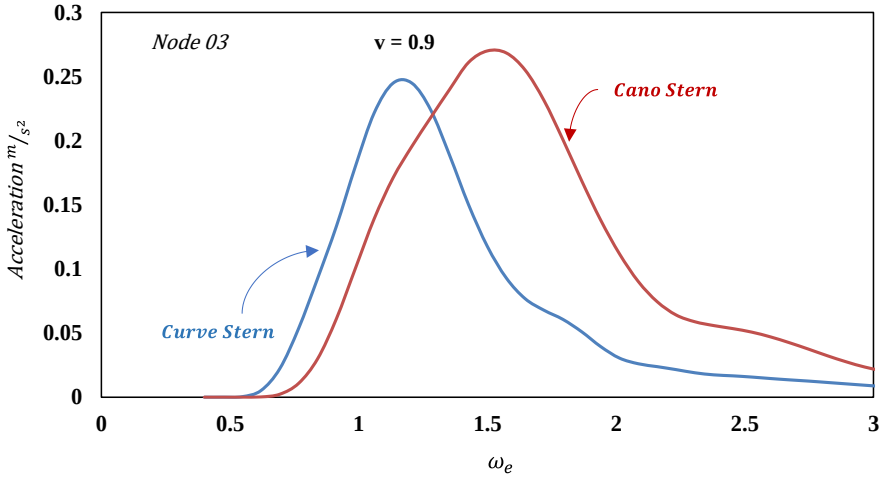


شکل ۹- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۱

شکل‌های۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نمودار شتاب هر دوفرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات برای نقاط ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودارها مشاهده می‌شود، همانند نمودار نقطه ۱ شکل (۹) ابتدا یک سیر صعودی در بازه فرکانسی ۰.۵ تا ۱ رادیان برثانیه داشته و پس از آن فرم پاشنه منحنی سیر نزولی به خود گرفته اما پاشنه صاف به افزایش خود ادامه می‌دهد. در فرکانس ۱.۵ رادیان برثانیه به حداکثر مقدار می‌رسد. لازم بذکر است اختلاف مقدار شتاب بین دو فرم پاشنه از نقطه ۱ تا نقطه ۶ به میزان ۸٪ کمتر می‌شود.

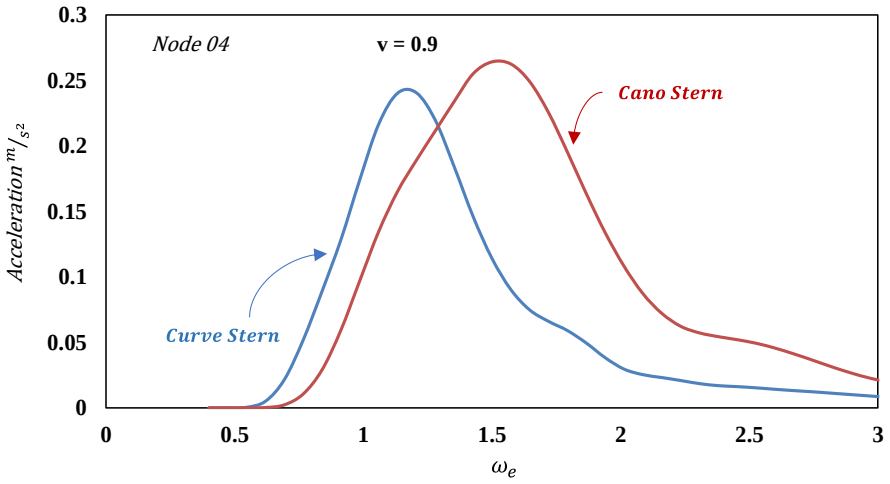


شکل ۱۰- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۲

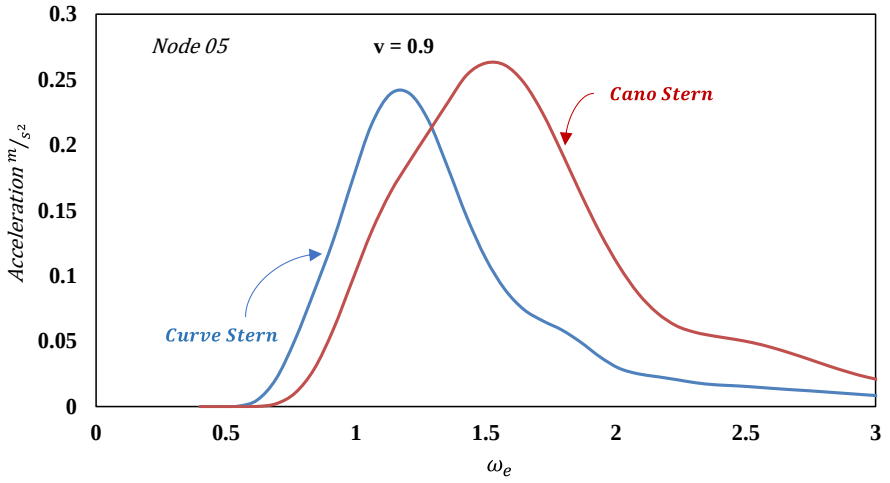


شکل ۱۱- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۳

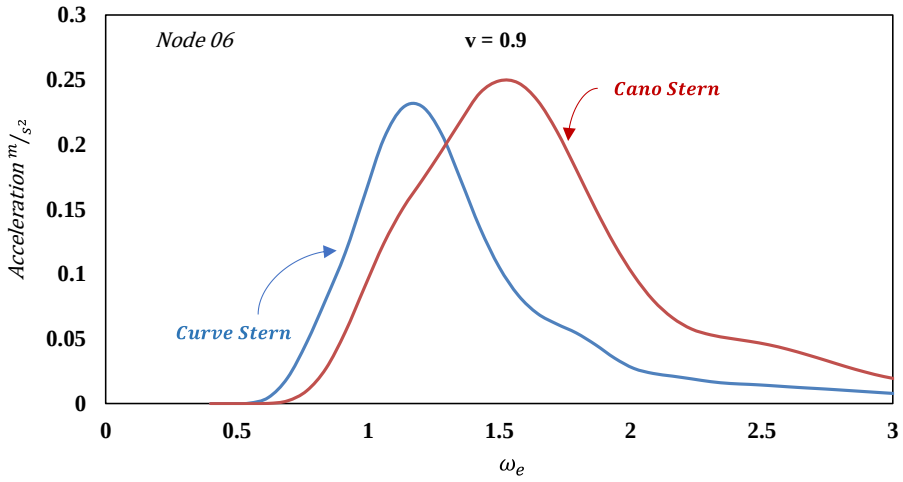
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]



شکل ۱۲- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۴



شکل ۱۳- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۵



شکل ۱۴- نمودار شتاب برای هر دو فرم پاشنه در سرعت ۱۰ نات و نقطه ۶

۴- جمع بندی ونتیجه گیری

آزمایشات مربوط به شتاب عمودی نقاط تعریف‌شده در قسمت پاشنه شناور در هردو فرم پاشنه منحنی و صاف توسط نرم‌افزار مکسرف نشان داد که در فرکانس‌های زاویه‌ای ۰.۵ تا ۱.۵ رادیان برثانیه بیشترین میزان شتاب عمودی برای تست‌های با سرعت ۱۰ نات اتفاق افتاد. همچنین میزان شتاب نقطه شماره ۱ در مقایسه با نقاط دیگر در بیشترین مقدار خود با اختلاف ۰.۵ متربرمجذورثانیه می‌باشد. از طرفی با مقایسه میزان شتاب عمودی دو فرم پاشنه منحنی و صاف می‌توان اختلاف چشمگیر در عملکرد هرکدام

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]

مشاهده کرد. لازم بذکر است این کاهش شتاب بدلیل انحنای مناسب در قسمت زیرین بدنه و ایجاد حالت گوه‌ای زیر خط آبخور شناور رخ داد. با این تفسیر که فرم پاشنه منحنی با توجه به میزان شتاب عمودی ۱۳٪ کمتر عملکرد مطلوب‌تری نسبت به فرم پاشنه صاف داشته است. این نتیجه‌گیری بدین معناست که در ساخت شناورهای تک‌بدنه اهمیت استفاده از پاشنه منحنی نسبت به پاشنه صاف بیشتر بوده مگر در شرایطی که استفاده از این نوع پاشنه‌ها ماهیت شناور جهت انجام ماموریت را توجیه نکند. طراحی شناورهای سنگین و نیمه‌سنگین با الهام از پاشنه منحنی به دلیل وجود حالت گوه‌ای و ایجاد فضای مناسب جهت هدایت جریان به پروانه و همچنین کاهش پدیده اسکوآت علاوه بر کاهش شتاب عمودی می‌تواند بر راندمان پیشرانه و بهینه‌سازی در مصرف سوخت نیز تاثیرگذار باشد. تفاوت رفتار شتاب عمودی دو فرم پاشنه ناشی از نحوه تعامل هندسه پاشنه با جریان و امواج است. پاشنه صاف به دلیل جدایش شدیدتر جریان و نوسانات فشار بالاتر، شتاب عمودی بیشتری را تجربه می‌کند، در حالی‌که پاشنه ترانسوم منحنی با توزیع یکنواخت‌تر فشار و کاهش شدت گردابه‌ها، موجب کاهش تحریکات دینامیکی و شتاب عمودی بدنه می‌شود.

باتوجه به اینکه این آزمایشات در طیف موج جانسوآپ مربوط به آب کم‌عمق برای شرایط دریایی خلیج‌فارس و دریای عمان صورت پذیرفته‌است. پیشنهاد می‌گردد جهت ادامه روند تحقیقات در شرایط دریایی مختلف با ساخت مدل کوچک‌شده شناور و آزمایش تجربی در آزمایشگاه حوضچه میزان شتاب عمودی مورد بررسی قرار گیرد.

۵ - مراجع

1- Percival, S., Hendrix, D. and Noblesse, F., (2001). *Hydrodynamic optimization of ship hull forms.* Applied Ocean Research, 23(6), pp.337-355. https://doi.org/10.1016/S0141-1187(02)00002-0

2- Chen, P.F. and Huang, C.H., (2004). *An inverse hull design approach in minimizing the ship wave.* Ocean engineering, 31(13), pp.1683-1712. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2003.08.010

3- Tran, T.G., Van Huynh, Q. and Kim, H.C., (2022). *Optimization strategy for planing hull design.* International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 14, p.100471. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2022.100471

4- Gelling, J.L. and Keuning, J.A., (2011). *Recent developments in the design of fast ships.* Ship Science and Technology, 5(9), pp.57-68.

5- Cakici, F., (2021). *Vertical acceleration control using LQG approach for a passenger ship.* Ocean Engineering, 241, p.110040. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110040

6- Rotteveel, E., Hekkenberg, R. and Van Der Ploeg, A., (2017). *Inland ship stern optimization in shallow water*. Ocean Engineering, 141, pp.555-569. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.028

7- Yu, J.W., Lee, M.K., Kim, Y.I., Suh, S.B. and Lee, I., (2021). *An optimization study on the hull form and stern appendage for improving resistance performance of a coastal fishing vessel*. Applied Sciences, 11(13), p.6124. https://doi.org/10.3390/app11136124

8- Whalen, T.E., (2002). *Optimal deadrise hull analysis and design space study of naval special warfare high speed planning boats* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). http://hdl.handle.net/1721.1/8132

9- M, Moonesun., (2012). *Handbook Of Naval Architecture Engineering Final Report of M Mohammad, Adviser in Engineering* (Naval Architecture and Aeronautical Engineering) to Shahrood University, Semnan, Iran.(In Persian)

10- Tupper, E.C., (2013). *Introduction to naval architecture*. Butterworth-Heinemann.

11- Ghodrat, M. and Nikseresht, A.H., (2025). *Numerical study on seakeeping performance of a DTMB planing hull craft in regular sea waves.* Journal Of Marine Engineering, 21(46), pp.101-117. http://marine-eng.ir/article-1-1155-en.html

12- Collu, M., (2008). *Dynamics of marine vehicles with aerodynamic surfaces.*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-27]