J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 47, 2025. (1-13)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Technical Note

Development of a CFD-Based Numerical Method for Estimating the Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of the High-Speed Rescue Vessel Naji-7 in the Absence of Experimental Data

Fatemeh zolfagharnasab[*1], Mohammad Saeed seif[2]

[1] *PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology,* fzolfagharnasab@yahoo.com
[2] *Professor, Center of Excellence in Hydrodynamics & Dynamics of Marine Vehicle, Sharif University of Technology,* seif@sharif.edu

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 8 Jul 2025
Last modification: 19 Aug 2025
Accepted: 23 Aug 2025
Available online: 25 Aug 2025

Article type:
Technical note

Keywords:
Ship Maneuverability
Hydrodynamic Coefficients
Static and Dynamic Tests
High-Speed Vessel
Constrained Model Simulation

ABSTRACT

In the absence of reliable experimental data for the high-speed search and rescue vessel Naji-7, this study aims to develop a numerical method based on Computational Fluid Dynamics (CFD) to accurately estimate the vessel's hydrodynamic maneuvering coefficients. The core innovation lies in employing a mesh sensitivity analysis to determine the optimal mesh configuration at a Froude number of 1.19. This Froude number was selected as it corresponds to the vessel's typical operational speed during rescue missions, making it representative of real-world maneuvering conditions. Initially, the two-dimensional hull lines were generated using AutoCAD, and a 3D model was constructed in SolidWorks. The model was then transferred to Maxsurf to extract hydrostatic properties and subsequently imported into STAR-CCM+ for CFD simulations. The mesh sensitivity analysis was performed across various mesh densities, and the optimal mesh was chosen based on resistance force convergence.Two categories of numerical tests were conducted: static and dynamic. The static tests included evaluation of lateral forces, yaw moments, trim, heel, wetted surface, pressure distribution, and wave pattern. In the dynamic tests, sway and yaw oscillations were simulated at five excitation frequencies (ranging from 0.05 to 0.4 Hz), and the corresponding forces and moments at peak velocity and acceleration were extracted. The speed- and acceleration-dependent hydrodynamic coefficients were then obtained through inverse solution of the governing equations of motion.Comparison with published experimental data on similar vessels demonstrated acceptable accuracy of the proposed method, with a mean error of less than 8% for forces and less than 12% for moments. The total computational time for all simulations was approximately 32 CPU Time on an 8-core system. This study provides a reliable and practical alternative for maneuverability analysis of high-speed vessels in the absence of experimental data and can effectively contribute to the safe and optimized design of search and rescue craft.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.1

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/]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۷، ۱۴۰۴، (۱۳-۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

یادداشت فنی

توسعه یک روش عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای برآورد ضرایب هیدرودینامیکی مانورپذیری شناور تندروی ناجی ۷ در غیاب داده‌های تجربی

فاطمه ذوالفقارنسب[۱] *، محمد سعید سیف[۲]

[۱] دانشجوی دکتری رشته مهندسی دریا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، fzolfagharnasab@yahoo.com

[۲] استاد، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک های دریایی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، seif@sharif.edu

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

نوع مقاله:

یادداشت فنی

کلمات کلیدی:

مانورپذیری شناور

ضرایب هیدرودینامیکی

تست های استاتیکی و دینامیکی

شناور تندرو

شبیه سازی مدل مقید

چکیده

در شرایطی که داده‌های تجربی معتبر برای شناور تندروی جستجو و نجات ناجی ۷ در دسترس نیست، این پژوهش با هدف توسعه یک روش عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای برآورد دقیق ضرایب هیدرودینامیکی مانورپذیری این شناور انجام شده است. نوآوری اصلی مطالعه، بهره‌گیری از تحلیل حساسیت مش‌بندی برای تعیین شبکه بهینه در عدد فرود ۱/۱۹ است. این عدد فرود به‌عنوان نماینده‌ای از سرعت عملیاتی واقعی شناور در شرایط مأموریتی انتخاب شده و تحلیل در این رژیم، تصویری واقعی از عملکرد مانوری شناور در میدان عملیات ارائه می‌دهد. در ابتدا، نقشه‌های دوبعدی شناور با استفاده از داده‌های واقعی در AutoCAD ترسیم و مدل سه‌بعدی در SolidWorks ساخته شد. سپس مدل جهت استخراج مشخصات هیدرواستاتیکی به Maxsurf منتقل و در نهایت برای انجام شبیه‌سازی‌های CFD وارد محیط STAR-CCM+ شد. تحلیل حساسیت شبکه با مش‌بندی‌های مختلف انجام و شبکه بهینه بر مبنای همگرایی نیروی مقاومت انتخاب گردید.جهت استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، دو نوع آزمایش عددی شامل تست‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شد. در تست‌های استاتیکی، نیروها و ممان‌ها، تریم، هیل، توزیع فشار و الگوی موج ارزیابی شدند. در تست‌های دینامیکی، نوسانات سوی و یاو در پنج فرکانس تحریک (۰/۰۵ تا ۰/۴ هرتز) مدل‌سازی و مقادیر نیرو و ممان در لحظات اوج سرعت و شتاب استخراج گردید. ضرایب وابسته به سرعت و شتاب نیز با استفاده از حل معکوس معادلات حرکت محاسبه شد. مقایسه با نتایج تجربی منتشرشده برای شناورهای مشابه، میانگین خطایی کمتر از ۸٪ در نیروها و کمتر از ۱۲٪ در ممان‌ها را نشان داد. کل زمان محاسباتی برای اجرای شبیه‌سازی‌ها حدود ۳۲ ساعت بر روی یک سیستم با ۸ هسته پردازشی بود. این روش می‌تواند به‌عنوان رویکردی جایگزین و قابل اعتماد برای تحلیل مانورپذیری شناورهای تندرو در شرایط فقدان داده‌های تجربی به‌کار گرفته شود و در طراحی ایمن و بهینه آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.66224/marineeng.21.47.1

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

۱ - مقدمه

شناورهای تندروی جستجو و نجات[1] به دلیل نقش حیاتی در ایمنی و کارایی عملیات دریایی، نیازمند مانورپذیری بالا در شرایط بحرانی هستند. سازمان بین‌المللی دریانوردی با تدوین استانداردهایی در زمینه ارزیابی عملکرد مانورپذیری شناورها، بر اهمیت این موضوع تأکید کرده است [۱].

اگرچه آزمون‌های تجربی نقش کلیدی در استخراج ضرایب هیدرودینامیکی دارند، اما به‌دلیل هزینه‌های بالا، محدودیت تجهیزات و پیچیدگی اجرا، استفاده از روش‌های عددی مانند دینامیک سیالات محاسباتی[2]، به‌عنوان جایگزینی دقیق و قابل‌اتکا در مراحل طراحی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲]. در این میان، مدل‌های آشفتگی پیشرفته مانند انتقال تنش برشی[3] و روش‌های وابسته به زمان نظیر معادلات ناویر–استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز در حالت ناپایا [4]توانایی بازسازی جریان‌های جدایش‌یافته و رفتار غیرخطی مانورها را با دقت بالایی فراهم کرده‌اند[۳و۴].

یکی از رویکردهای مهم در این زمینه، استفاده از آزمون‌های مدل مقید مجازی است که به‌عنوان جایگزین روش‌های فیزیکی نظیر آزمون بازوی چرخان و تست مدل مقید[5]، در مطالعات متعددی کارایی خود را نشان داده‌اند [۵]. پژوهش‌هایی که با استفاده از معادلات ناویر–استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز در حالت ناپایا، به شبیه‌سازی حرکات یاو و سوی پرداخته‌اند، نشان داده‌اند که نتایج عددی با داده‌های تجربی تطابق قابل قبولی دارد [۶، ۷]. در مطالعاتی نیز عملکرد مانوری شناورهای تندرو و تریماران با بهره‌گیری از مش‌بندی پیشرفته و مدل‌سازی دقیق دینامیک، با موفقیت بازسازی شده است [۸].

علاوه بر این، رویکردهای ترکیبی نظیر معادلات ناویر–استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز[6] و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[7] در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در زوایای انحراف بالا، دقت نتایج در مانورهای غیرخطی را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده‌اند[۹و۱۰].

در این تحقیق، به‌دلیل عدم دسترسی به مدل فیزیکی شناور ناجی ۷، چارچوبی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار STAR-CCM+ توسعه داده شده است. در این چارچوب، آزمون‌های مدل مقید شامل دریفت استاتیکی، سوی خالص و یاو خالص به‌صورت مجازی پیاده‌سازی و اجرا شده‌اند. داده‌های نیرو و ممان استخراج‌شده در طول این آزمون‌ها برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی در صفحه افق استفاده می‌شوند. این روش عددی، به‌ویژه در شرایط فقدان داده‌های آزمایشگاهی، روشی دقیق و قابل‌اعتماد برای تحلیل عملکرد مانوری شناورهای تندرو ارائه می‌دهد.

۲ - معادلات اساسی حاکم

برای ارزیابی عملکرد مانوری کشتی‌ها در مقیاس مدل، دو رویکرد اصلی وجود دارد: تست مدل آزاد و تست مدل مهارشده.

در روش مدل آزاد، تمامی اجزای شناور شامل بدنه، پروانه، سکان و سیستم رانش مدل‌سازی شده و مدل به‌صورت خودران، مانورهای موردنظر را اجرا می‌کند. این روش به‌دلیل عدم وابستگی به تجهیزات مکانیکی هزینه کمتری دارد، اما تنها برای مانورهایی قابل اجراست که به‌صورت فیزیکی پیاده‌سازی می‌شوند.

در روش تست مدل مهارشده، بدنه و سکان کشتی تحت حرکات تحمیلی مانند سرج، سوی، یاو یا ترکیب آن‌ها قرار می‌گیرند. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی حاصل از این حرکات توسط دینامومتر اندازه‌گیری می‌شود و ضرایب متناظر برای شبیه‌سازی مانور پذیری استخراج می‌گردد. این تست‌ها معمولاً با مدل‌هایی به طول ۲ تا ۶ متر انجام می‌شوند.

سه روش رایج برای اجرای تست مدل مهارشده عبارت‌اند از:

۱. تست[8]مدل مقید
۲. بازوی چرخان[9]
۳. ارابه X-Y

در تست مدل مقید، حرکات عرضی و زاویه‌ای توسط دو بازوی مکانیکی یا دو سروموتور مستقل اعمال می‌شود. مدل به یک ارابه متحرک با سرعت ثابت متصل شده و حرکات سینوسی به آن تحمیل می‌شود. نیروهای وارد بر بدنه توسط دینامومترها ثبت می‌گردند.مزیت اصلی این روش در کنترل دقیق متغیرها و امکان تفکیک اثر هر پارامتر بر ضرایب هیدرودینامیکی است.

تست های قابل اجرا در تست مدل مقید عبارتند از:

- تست‌های استاتیکی با زاویه دریفت ثابت
- تست استاتیکی سکان
- تست اثر متقابل سکان و بدنه
- تست دینامیکی سوی خالص
- تست دینامیکی یاو خالص
- تست ترکیبی سوی و یاو

شکل ۱، شماتیک حرکت سوی خالص را نشان می‌دهد .در این حرکت روابط حاکم بر جابجایی، سرعت و شتاب مبدأ مختصات

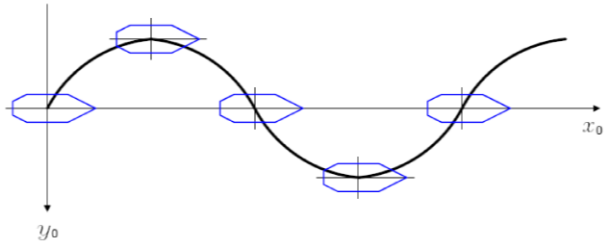
---

[1] SAR
[2] CFD
[3] SST k-ω
[4] URANS
[5] PMM
[6] RANS
[7] LES
[8] Planar Motion Mechanism
[9] Rotating Arm

متحرک با حرکت سینوسی تحمیلی توسط دستگاه مدل مقید به شرح معادله ۱ است:

$$y = y_0 \sin(\omega t) \quad (۱)$$
$$\dot{y} = v = \omega y_0 \cos(\omega t)$$
$$\ddot{y} = -\omega^2 y_0 \sin(\omega t)$$

که y_0 دامنه حرکت سوی و ω فرکانس حرکت سوی است.



شکل ۱-حرکت سوی خالص[۱۵]

نیروهای هیدرودینامیکی اندازه‌گیری‌شده در راستای عرضی (y) و گشتاور حول محور z (ممان یاو) با استفاده از سری تیلور و به‌صورت زیر مدل می‌شوند:

$$x_H = x_{vv}v^2 + x(u) \quad (۲)$$
$$y_H = y_{\dot{v}}\dot{v} + y_v v + y_{vvv}v^3$$
$$N_H = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_v v + N_{vvv}v^3$$

که x_H, y_H, N_H به ترتیب نیروهای در راستای x,y و ممان حول محور z است. فرض بر آن است که جرم اضافی سوی و یاو در رابطه بالا منفی در نظر گرفته‌شده است .از طرفی دیگر نیروهای وارده به بدنه در حالت سوی خالص که اندازه‌گیری شده‌اند، شامل نیروی عرضی y_m و گشتاور N_m را می‌توان بر اساس سری تیلور و به‌صورت ترم‌های سینوسی و کسینوسی به شرح معادله ۳ نوشت:

$$y_m = y_{m1} sin\ \omega t + y_{m2} \cos \omega t \quad (۳)$$
$$N_m = N_{m1} sin\ \omega t + N_{m2} \cos \omega t$$

که y_{m1}, N_{m1} نیرو و گشتاور هم‌فاز با حرکت سوی و y_{m2}, N_{m2} نیرو و گشتاور غیر هم‌فاز با حرکت سوی می‌باشند .

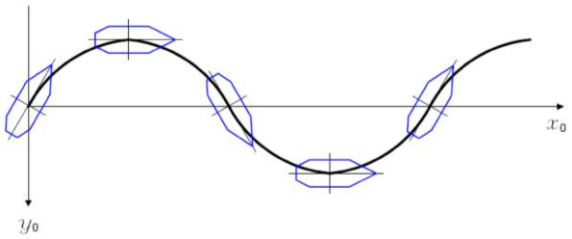
نیروی وارده به مدل درحرکت سوی خالص باعث ایجاد شتاب و سرعت سوی می‌گردد که به‌صورت لحظه‌ای می‌توان نوشت:

$$y_m = y_H + \Delta . \dot{v} = \Delta . \dot{v} - y_{\dot{v}}\dot{v} + y_v v + y_{vvv}v^3 \quad (۴)$$
$$N_m = N_H = -N_{\dot{v}}\dot{v} + N_v v + N_{vvv}v^3$$

با در نظر گرفتن صرفاً عبارت خطی ضریب هیدرودینامیکی مرتبط با سرعت سوی می‌توان نوشت:

$$(\Delta - y_{\dot{v}})(-\omega^2 y_0) sin\omega t - y_v \omega y_0 cos\omega t = y_{m1} sin\omega t + y_{m2} cos\omega t \quad (۵)$$
$$(-N_{\dot{v}})(-\omega^2 y_0) sin\omega t - N_v \omega y_0 cos\omega t = N_{m1} sin\omega t + N_{m2} cos\omega t$$

اصولاً ضرایب هیدرودینامیکی ناشی از سرعت سوی را هم می‌توان با تست استاتیکی اندازه‌گیری نمود و هم می‌توان با تست دینامیکی به شرح فرمول بالا محاسبه نمود .تجربه نشان داده است که تست استاتیکی نسبت به تست دینامیکی از دقت بهتری برخوردار است. برای ایجاد شرایط تست یاو خالص لازم است، مدل به‌گونه‌ای حرکت کند که بر منحنی مسیر مماس باشد .این شرایط بدون جابجایی عرضی امکان‌پذیر نیست. شکل ۲، تست یاو خالص را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۲-حرکت یاو خالص[۱۵]

رابطه بین جابجایی، سرعت و شتاب یاو را می‌توان به‌صورت معادله ۶، نوشت:

$$\Psi = \Psi_0 \sin(\omega t + \varepsilon_\psi) \quad (۶)$$
$$\dot{\Psi} = \omega \Psi_0 \cos(\omega t + \varepsilon_\psi)$$
$$\ddot{\Psi} = -\omega^2 \Psi_0 \sin(\omega t + \varepsilon_\psi)$$

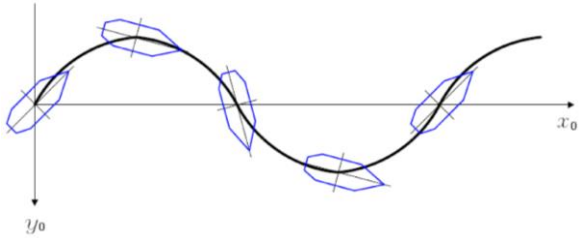
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، در سیستم مختصات ثابت لازم است هر دو بازوی پی‌ام ام حرکت کنند تا یاو خالص ایجاد شود. در این قسمت، مدل بر مسیر مماس گردیده و صرفاً سرعت و شتاب یاو شکل خواهد گرفت و سرعت و شتاب سوی صفر خواهند شد .در این صورت نیروهای وارد به بدنه ناشی از سرعت و شتاب یاو خالص را می‌توان به‌صورت معادله ۷، نوشت:

$$x_H = x_{\dot{u}}\dot{u} + x_{rr}r^2 x(u) \quad (۷)$$
$$y_H = y_{\dot{r}}\dot{r} + y_r r + y_{rrr}r^3$$
$$N_H = -N_{\dot{r}}\dot{r} + N_r r + N_{rrr}r^3$$

که x_H,y_H,N_H نیروها و گشتاور اندازه‌گیری شده توسط دینامومترها در راستای x,y,z هستند. همانند آنچه برای ضرایب هیدرودینامیکی سوی خالص نوشته شد، برای یاو خالص مطابق معادله ۸ و ۹، می‌توان نوشت:

$$y_H - \Delta . V . r = y_m = y_{m1} sin\omega t + y_{m2} cos\omega t \quad (۸)$$
$$N_H + I_z = N_m = N_{m1} sin\omega t + N_{m2} cos\omega t$$
$$y_{\dot{r}} = \frac{y_{m1}}{-\omega^2 \Psi_0}$$

شکل ۳، حرکت ترکیبی یاو و سوی را نشان می‌دهد .از این حرکت می‌توان ضرایب هیدرودینامیکی شامل x_{vr}, y_{vvr}, y_{vrr}, را محاسبه نمود[۱۱-۱۵] $y_{|v|r}$, $y_{v|r|}$, N_{vrr}, N_{vrr}, $N_{|v|r}$, $N_{v|r|}$



شکل ۳-حرکت ترکیبی سوی و یاو[۱۵]

۳- مشخصات شناور تندرو نمونه

شناور مورد بررسی در این مطالعه، ناجی ۷ است که یک شناور استراتژیک تندرو جستجو و نجات فعال در کانال خور موسی نزدیک بندر امام خمینی، ایران می‌باشد. این شناور به دلیل توانایی‌های استقرار سریع و مانورپذیری بالا، نقش حیاتی در عملیات‌های اضطراری دریایی در این منطقه ایفا می‌کند. آرایش کلی و ویژگی‌های طراحی ناجی ۷ در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴- شناور تندرو ناجی ۷[۱۶]

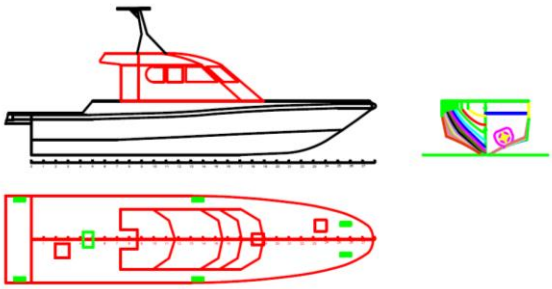
در جدول شماره ۱ به بررسی مشخصات مدل پرداخته می شود. در این جدول طول، عرض، آبخور و سایر مشخصات اصلی شناور مدل ذکر شده اند.

جدول ۱ - مشخصات شناور مدل

طول کلی [m]	۱۹/۶
عرض [m]	۴/۶
آبخور [m]	۱/۰۱
وزن خالص [ton]	۳۵
تعداد موتور اصلی	۲
ماکزیمم سرعت [knot]	۴۴
تناژ نا خالص [ton]	۲۷

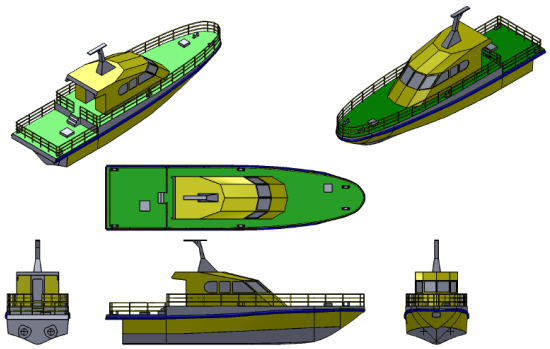
۴- مدلسازی و شبیه سازی در نرم افزار

در مرحله نخست از فرآیند مدلسازی عددی، نقشه‌های دوبعدی خطوط بدنه شناور با بهره‌گیری از داده‌های فیزیکی و پلان‌های مهندسی موجود، در محیط نرم‌افزار AutoCAD با دقت بالا ترسیم شدند. تصویر حاصل از این مرحله در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل۵- نمایی از شناور ناجی در نرم افزار AutoCAD

این نقشه‌ها به‌عنوان پایه‌ای برای ساخت مدل سه‌بعدی دقیق مورد استفاده قرار گرفتند و در گام بعد، به محیط SolidWorks منتقل شدند تا مدل هندسی سه‌بعدی کامل شناور با لحاظ جزئیات ساختاری و فرم بدنه ایجاد گردد(شکل ۶).



شکل۶- نمایی از شناور ناجی در نرم افزار SolidWorks

پس از اتمام مدل‌سازی سه‌بعدی، فایل هندسی به نرم‌افزار Maxsurf انتقال یافت تا پارامترهای هیدرواستاتیکی کلیدی شامل حجم جابجایی، موقعیت مرکز جرم، مرکز شناوری و ارتفاع متاسنتر استخراج شده و صحت هندسه از دیدگاه تراز شناوری و پایداری اولیه بررسی شود. مشخصات پارامترهای مدل به دست آمده در نرم افزار مکسرف با بزرگنمایی ۱۰ به ۱ در Maxsurf در جدول ۲ ارائه شده است.

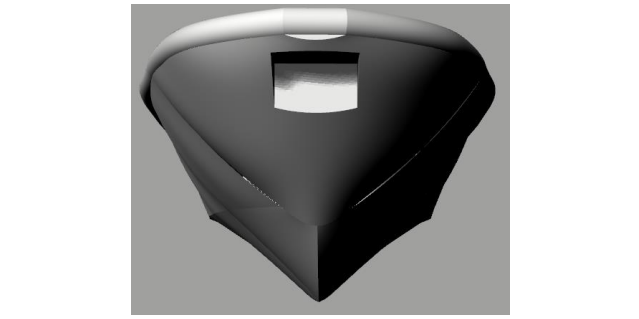
جدول ۲- پارامترهای مدل به دست آمده از نرم افزار Maxsurf

پارامتر	مقدار
آبخور در وسط [mm]	۱۷۶/۸
جابجایی [kg]	۱۲۷
زاویه Heel [deg]	۰
آبخور در FP [mm]	۱۶۹/۶
آبخور در AP [mm]	۱۸۳/۹
آبخور در LCF [mm]	۱۷۷/۹
تریم در پاشنه [mm]	۱۴/۴
طول سطح آبخور [mm]	۲۲۵۹/۶
حداکثر عرض شناور در سطح آب [mm]	۶۲۱/۸

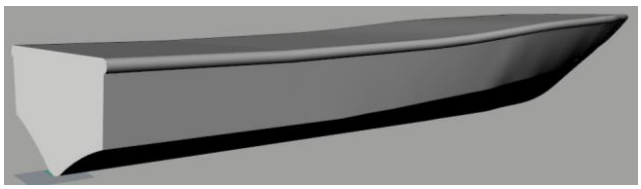
سطح خیس $[mm^2]$	۱۵۳۰۶۱۹/۱
مساحت سطح آبخور $[mm^2]$	۱۱۵۱۸۵۷/۲
ضریب منشوری (Cp)	۰/۷۱۳
ضریب بلوکی (Cb)	۰/۴۸۱
ضریب بیشینه مساحت مقطع عرضی(Cm)	۰/۶۷۵
ضریب سطح آبخور(Cwp)	۰/۸۲۰
مرکز شناوری طولی از نقطه صفر(LCB)	۸۷۴/۵
مرکز طولی شناوری روی سطح آزاد آب (LCF)	۹۶۱/۶
فاصله کیل تا مرکز شناوری (KB) $[mm]$	۱۱۵/۳
ارتفاع مرکز ثقل شناور نسبت به کف کشتی $[mm]$	۱۸۰/۶
فاصله عمودی بین مرکز ثقل شناور و مرکز متاسنتریک عرضی (BMt) $[mm]$	۲۴۸/۱
فاصله عمودی بین مرکز ثقل شناور و مرکز متاسنتریک طولی (BML) $[mm]$	۳۱۷۵/۶
ارتفاع متانسنتریک عرضی تصحیح شده (GMt) $[mm]$	۱۸۲/۸
ارتفاع متانسنتریک طولی (GML) $[mm]$	۳۱۱۰/۳
فاصله عمودی از کیل تا مرکز متاسنتریک عرضی (KMt) $[mm]$	۳۶۳/۴
فاصله عمودی از کیل تا مرکز متاسنتریک طولی (KML) $[mm]$	۳۲۹۰/۸
تناژ به ازای هر سانتی‌متر فرو رفتن در آب (TPc) $[ton/cm]$	۰/۰۱۲
گشتاور لازم برای تغییر ترم کشتی به اندازه ۱ سانتی‌متر (MTc) $[ton.m]$	۰/۰۰۲
گشتاور بازگرداننده کشتی در زاویه ۱ درجه انحراف عرضی RM at 1° = GMt × Disp × sin(1°) $[kg.mm]$	۴۰۵/۲
حداکثر زاویه شیب عرشه $[deg]$	۰/۳۶۱۷
زاویه تریم کشتی (تریم پاشنه) $[deg]$	۰/۳۶۱۷

در نهایت، مدل کامل‌شده به نرم‌افزار STAR-CCM+ منتقل گردید تا فرآیند مش‌بندی و تحلیل‌های عددی بر پایه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی انجام پذیرد. تصویر مدل نهایی وارد شده درنرم افزار STAR-CCM+در شکل ۷ قابل مشاهده است.

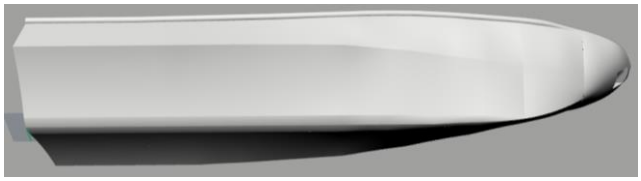
این زنجیره‌ی نرم‌افزاری، امکان ارزیابی دقیق عملکرد هیدرودینامیکی شناور در شرایط مانوری مختلف را فراهم نموده و پایه‌گذار صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها در مراحل بعدی تحقیق بوده است.



(الف)



(ب)

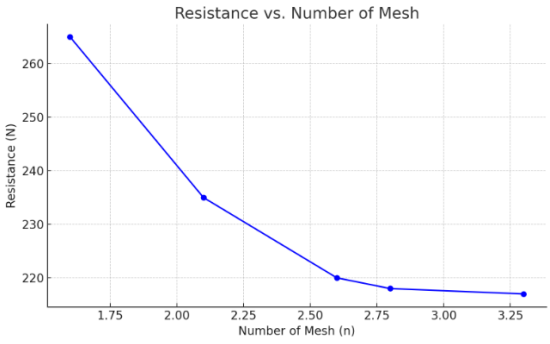


(ج)

شکل۷- نمایی از شناور ناجی در نرم افزار STAR-CCM+

۵- معتبرسازی نتایج

مقاومت هیدرودینامیکی شناور تندروی ناجی تحت مش‌بندی‌های مختلف در نرم‌افزار STAR-CCM+ مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۸، مش با تعداد ۳/۴ میلیون سلول به دلیل رفتار همگرایی مناسب و دقت قابل قبول در برآورد نیروی مقاومت، برای ادامه تحلیل‌ها انتخاب شد. معیار انتخاب این مش، تغییر کمتر از ۵ درصد در مقدار نیروی مقاومت نسبت به مش ریزتر بود که نشان‌دهنده‌ی پایداری و استقلال نسبی نتایج از اندازه‌ی مش است. همچنین مقایسه با نتایج تجربی منتشرشده برای شناورهای مشابه، میانگین خطایی کمتر از ۸٪ در نیروها و کمتر از ۱۲٪ در ممان‌ها را نشان داد. کل زمان محاسباتی برای اجرای شبیه‌سازی‌ها حدود ۳۲ ساعت بر روی یک سیستم با ۸ هسته پردازشی بود.



شکل ۸- مقایسه مقاومت شناور ناجی در مش بندی های مختلف

۶- نتایج تست استاتیکی

در این بخش، عملکرد هیدرودینامیکی شناور در زوایای مختلف دریفت مورد تحلیل قرار گرفته است. با اعمال زوایای دریفت مشخص، جریان سیال پیرامون بدنه شبیه‌سازی شده و اثر آن بر نیروهای عرضی و ممان‌های یاو بررسی گردیده است. محاسبه این نیروها و ممان‌ها نقش مهمی در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی مانورپذیری دارد، چرا که رفتار دینامیکی شناور در مانورهای جانبی تا حد زیادی تحت تأثیر پاسخ آن در برابر دریفت می‌باشد. نتایج حاصل از این تحلیل، شامل مقادیر نیروهای عرضی و ممان‌های یاو در زوایای مختلف دریفت، در جدول ۳ ارائه شده است. این داده‌ها به‌عنوان ورودی کلیدی برای استخراج ضرایب مانور در ادامه پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۳- نتایج مربوط به تست استاتیکی دریفت در عدد فرود ۱/۱۹

Drift	Y	N	Y'	N'
12	-672.12	-689	-0.01979	-0.00838
10	-507.67	-543.3	-0.01495	-0.00661
8	-411.8	-429.8	-0.01213	-0.00523
6	-282	-307.84	-0.00831	-0.00375
4	-168.89	-193.7	-0.00497	-0.00236
2	-88.2	-102	-0.0026	-0.00124
0	0	0	0	0
-2	88.2	102	0.002598	0.001241
-4	168.89	193.7	0.004974	0.002357
-6	282	307.84	0.008305	0.003746
-8	411.8	429.8	0.012128	0.00523
-10	507.67	543.3	0.014951	0.006612
-12	672.12	689	0.019794	0.008385

در جدول ۴، نتایج مربوط به تغییرات وضعیت دینامیکی شناور شامل بالاآمدگی ، تریم و زاویه هیل در زوایای مختلف دریفت ارائه خواهد شد. این پارامترها بیانگر پاسخ شناور نسبت به نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان غیرمتقارن پیرامون بدنه در شرایط دریفت هستند. تغییرات بالا آمدگی و تریم می‌توانند بر توزیع فشار، تعادل طولی و نیروی مقاومت تأثیرگذار باشند، در حالی‌که زاویه هیل، به ویژه در سرعت‌های بالا، می‌تواند شاخصی مهم برای پایداری عرضی و رفتار حرکتی شناور باشد. بررسی این مؤلفه‌ها در زوایای مختلف دریفت، درک دقیق‌تری از پویایی شناور در شرایط مانور واقعی فراهم می‌کند و داده‌های پایه برای اعتبارسنجی ضرایب مانورپذیری استخراج‌شده در این پژوهش به‌شمار می‌روند.

جدول۴- نتایج مربوط به تست استاتیکی دریفت در عدد فرود ۱/۱۹

Drift	Rise up	Trim	Heel
0	26.56	3.25	0
2	29.43	3.32	2.9
4	28.03	3.72	4.9
6	31.31	4.6	8.94
8	34.31	5.98	13.7
10	48.67	7.87	19.3
12	87.84	13.03	33.86

حال به بررسی علت انتخاب عدد فرود ۱/۱۹ در این مقاله پرداخته می شود. از جمله دلایل انتخاب این عدد فرود را می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-مطابق با سرعت واقعی عملکردی شناور ناجی ۷:

در شناورهای تندروی جستجو و نجات مانند ناجی ۷، سرعت طراحی معمولاً بالا بوده و در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که $Fr>1$ باشد. این ناحیه را **رژیم پلانینگ**[10] می‌نامند.

۲-مرز میان رفتار نیمه‌جابه‌جایی و پلانینگ:

عدد فرود ۱/۱۹ دقیقاً در ناحیه‌ای است که گذار از حالت جابه‌جایی[11] به حالت پروازی کامل اتفاق می‌افتد. در این شرایط، شناور بخش قابل توجهی از وزن خود را با نیروی بالابر هیدرودینامیکی (و نه صرفاً شناوری استاتیکی) تحمل می‌کند.

۳-حساسیت بالا به ضرایب مانورپذیری:

در این ناحیه، نیروی موج، الگوی فشار، و لحظات ناشی از حرکات مانوری به‌شدت وابسته به هندسه بدنه و سرعت هستند، لذا استخراج ضرایب هیدرودینامیکی در این عدد فرود اهمیت بیشتری دارد.

۴-تجربه صنعتی و منابع پیشین:

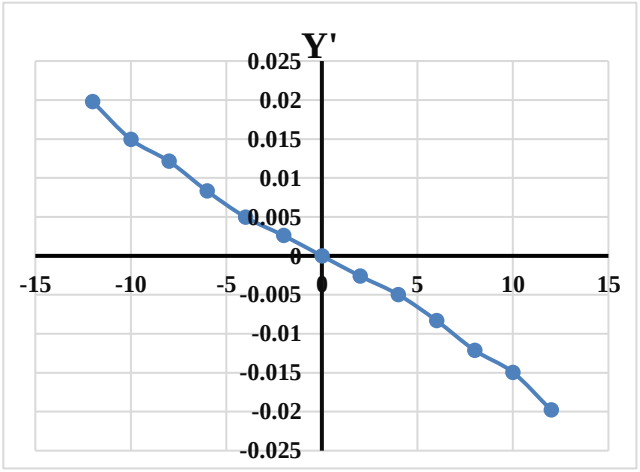
در اغلب مقالات و استانداردهای مربوط به تحلیل شناورهای تندرو مانندITTC ، Savitsky، و منابع دینامیک سیالات محاسباتی، عدد فرود بین ۱ تا ۱/۵ برای بررسی عملکرد مانوری شناورهای نجات، رزمی، و گشتی توصیه شده است.

عدد فرود ۱/۱۹ مطابق با سرعت کروز عملیاتی واقعی شناور ناجی ۷ در مأموریت‌های جستجو و نجات انتخاب شده است. این مقدار در محدوده رژیم پلانینگ قرار دارد که در آن نیروهای هیدرودینامیکی بیشترین تأثیر را بر رفتار مانوری دارند. از این‌رو، تمرکز بر این عدد فرود منجر به دستیابی به ضرایب مانورپذیری با بیشترین دقت و کاربردپذیری در طراحی عملیاتی خواهد شد.

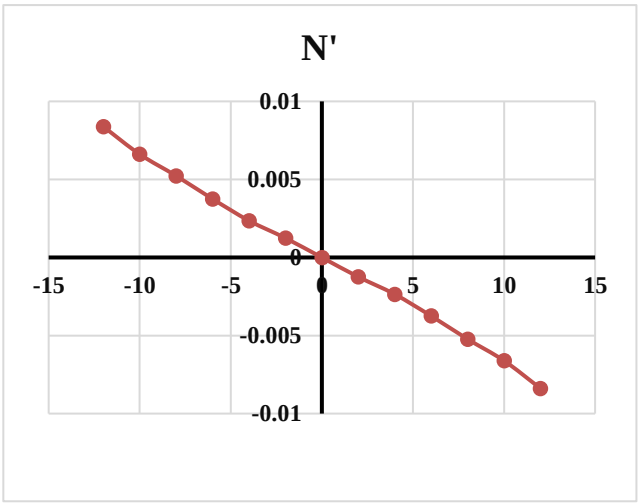
[10] Planing regime or High-speed regime

[11] Displacement

شکل ۹، نمودار نیروها و ممان‌های بی‌بعد شده‌ی هیدرودینامیکی را در مقابل زوایای مختلف دریفت نمایش می‌دهد. این نمودارها شامل تغییرات ضریب نیروی عرضی و ضریب ممان یاو نسبت به زاویه دریفت هستند که به‌صورت بی‌بعد ارائه شده‌اند تا امکان مقایسه و تحلیل رفتار شناور در مقیاس‌های مختلف فراهم گردد. استفاده از ضرایب بی‌بعد، علاوه‌بر افزایش دقت تحلیل، به درک بهتر روندهای فیزیکی حاکم بر جریان کمک می‌کند. با تحلیل این نمودارها می‌توان به وابستگی غیرخطی نیروها و ممان‌ها نسبت به زاویه دریفت پی برد و نواحی بحرانی در عملکرد مانوری شناور را شناسایی کرد. همچنین، این نتایج پایه‌ای برای استخراج ضرایب مانور در معادلات حرکت و بررسی پایداری دینامیکی شناور به شمار می‌آیند.



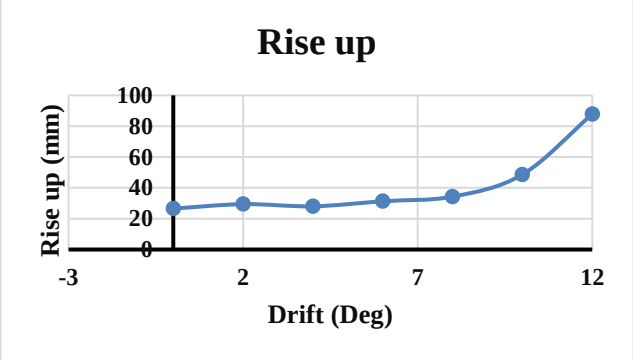
(الف)



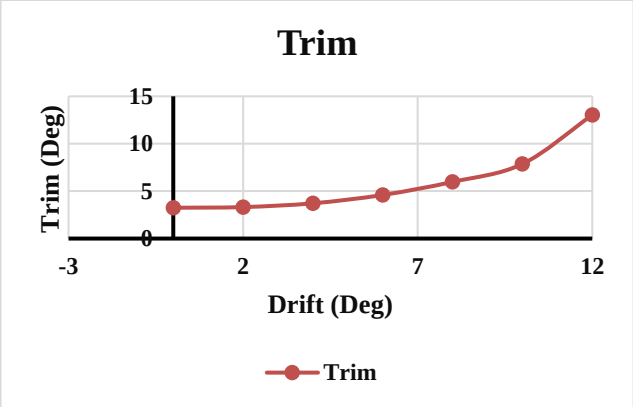
(ب)

شکل ۹-نمودارهای نیروها و ممانهای بی بعد بر حسب زاویه دریفت

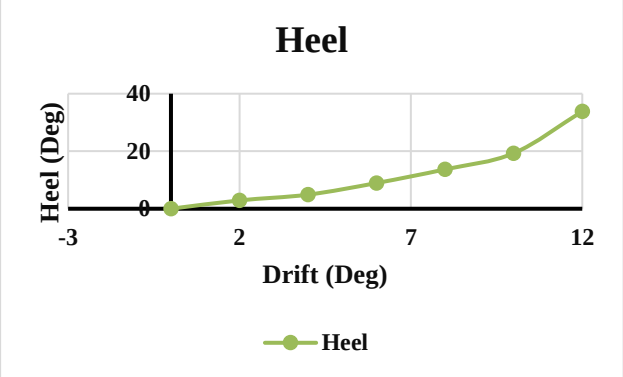
شکل ۱۰، روند تغییر پارامترهای هیدرودینامیکی کلیدی مانند نیروی جانبی و ممان چرخشی را نسبت به زاویه دریفت نمایش می‌دهد. این نمودارها با ارائه تصویری واضح از تأثیر زاویه دریفت بر پایداری و پاسخ‌های حرکتی شناور، درک بهتری از رفتار جریان و عملکرد بدنه فراهم کرده و مبنای تحلیل‌های بعدی برای استخراج ضرایب دینامیکی را شکل می‌دهند.



(الف)



(ب)



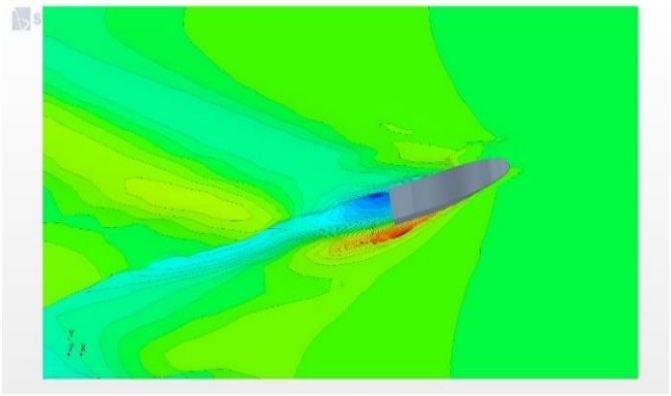
(ج)

شکل ۱۰- بالا آمدگی، تریم و هیل در زوایای مختلف و عدد فرود ۱/۱۹

الگوی موج کلوین نشان‌دهنده نحوه شکل‌گیری و انتشار موج‌های سطحی ناشی از حرکت شناور در سطح آب بوده و از دو بخش اصلی شامل موج‌های زاویه‌دار و موج‌های عرضی تشکیل می‌شود. در شرایطی با عدد فرود ۱/۱۹، این الگو با وضوح بالایی مشاهده می‌شود و تحلیل آن اطلاعات ارزشمندی در رابطه با رفتار جریان اطراف شناور ارائه می‌دهد.

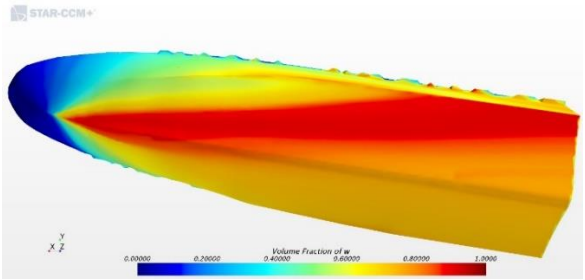
با افزایش زاویه دریفت، ویژگی‌های این الگو مانند شـــدت، دامنه و جهت انتشار امواج دستخوش تغییر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در شکل ۱۱، نیز قابل مشـــاهده اســـت، تغییرات در الگوی موج بیانگر اثرات هیدرودینامیکی قابل توجهی است.

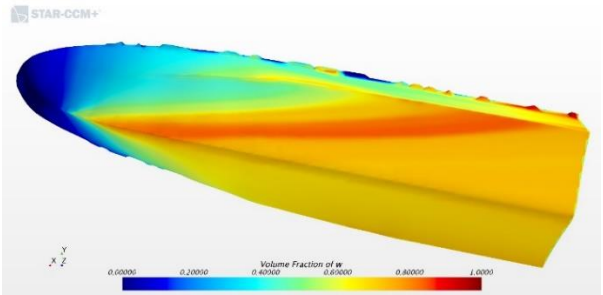
از جمله این اثرات می‌توان به افزایش مقاومت موجی و تغییر در توزیع فشار روی بدنه اشاره کرد.بررسی دقیق الگوی موج کلوین در این شرایط، نقش بسزایی در تحلیل عملکرد مانوری و بهینه‌سازی طراحی بدنه شـــناورهای تندرو دارد؛ به‌ویژه در مراحل طراحی اولیه که هدف، کاهش مقاومت و افزایش پایداری حرکتی شناور است.

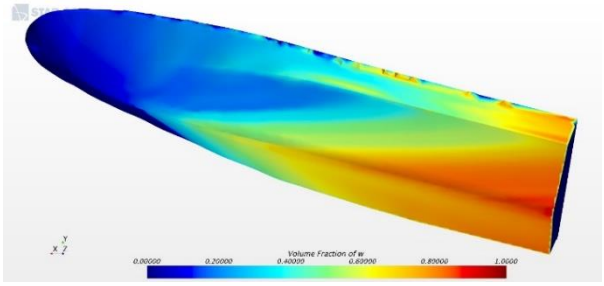


شکل ۱۱- نمونه‌ای از الگوی موج کلوین در یک زاویه دریفت

شـکل ۱۲، سـطح خیس شـناور در زاویه دریفت خاصـی را نشـان می‌دهد؛ سـطح خیس بخشـی از بدنه اسـت که با آب تماس دارد و تأثیر قابل توجهی بر نیروی مقاومت هیدرودینامیکی و پایداری شـــناور دارد.با افزایش زاویه دریفت، توزیع و اندازه ســـطح خیس تغییر می‌کند که معمولاً باعث افزایش مقاومت و کاهش کارایی شـــناور می‌شـود. تحلیل این تغییرات، به‌ویژه در شـــناورهای تندرو، برای بهینه‌ســـازی طراحی بدنه و کاهش مقاومت‌های جانبی اهمیت دارد و در استخراج ضرایب هیدرودینامیکی کاربرد دارد.

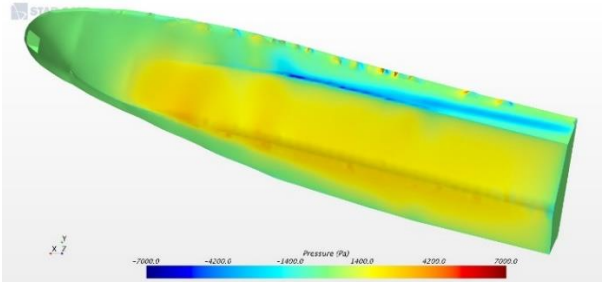






شکل ۱۲-سطح خیس در زوایای دریفت مختلف در عدد فرود ۱/۱۹

شـکل ۱۳، توزیع فشـار هیدرودینامیکی سـطح بدنه شـناور را در زوایای مختلف دریفت به نمایش می‌گذارد. این توزیع فشار که ناشی از جریان سیال پیرامون شناور است، نقش مهمی در تعیین نیروها و ممان‌های وارد بر شـــناور ایفا می‌کند. با تغییر زاویه دریفت، نحوه پراکندگی فشار در نقاط مختلف بدنه تغییر می‌کند که این امر تأثیر مســـتقیم بر پایداری، مقاومت و پاســـخ‌های حرکتی شـــناور دارد. بررسی دقیق الگوهای فشار در این شرایط امکان شناسایی نواحی با فشـــار بالا و کم، نقاط بحرانی ایجاد نیروی جانبی و ممان‌های پیچشـــی، و همچنین ارزیابی تأثیر تغییر زاویه دریفت بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور را فراهم می‌آورد. این داده‌ها به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های دقیق‌تر در اســـتخراج ضـــرایب هیدرودینامیکی و بهبود طراحی بدنه شناور مورد استفاده قرار می‌گیرند.

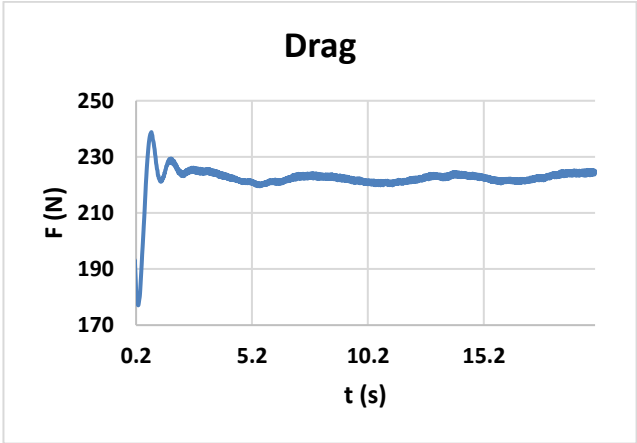


شکل ۱۳-توزیع فشار در عدد فرود ۱/۱۹ در یکی از زوایای دریفت

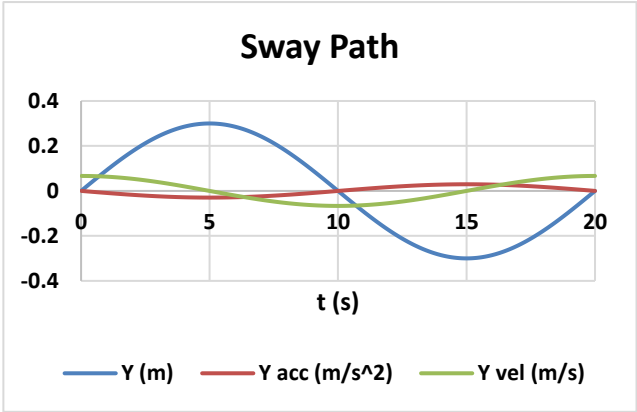
۷- نتایج تست دینامیکی

در این بخش، نتایج تست‌های دینامیکی حرکات سوی خالص و یاو خالص بررسی شده‌اند. ابتدا، رفتار شناور در حرکت سوی خالص در پنج فرکانس تحریک (۰/۰۵ تا ۰/۴ هرتز) تحلیل شـــده تا اثر نیروی جانبی و ممان‌های ایجادشـده در پاسخ به تحریکات مختلف مشـــخص شـــود. این تحلیل‌ها مبنایی برای اســـتخراج ضـــرایب هیدرودینامیکی ســـوی فراهم می‌آورد. ســـپس، نتایج حرکات یاو خالص نیز بررسی شده تا با مقایسه دو نوع حرکت، تحلیل دینامیکی کامل‌تری از عملکرد مانوری شناور به دست آید.

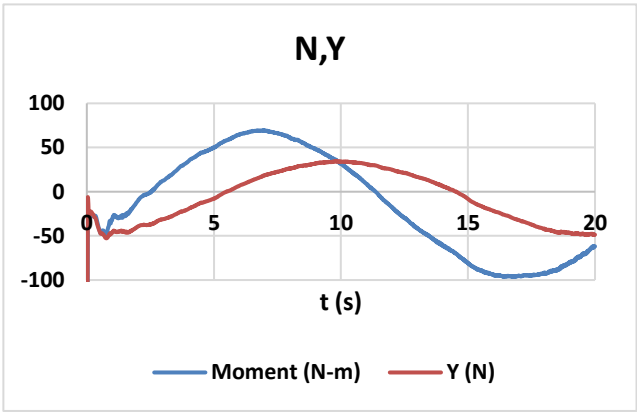
شکل ۱۴، نتایج تست حرکت سوی خالص در فرکانس **۰/۰۵** هرتز را نمایش می‌دهد. برای اختصـــار، تنها نتایج این فرکانس به‌عنوان نمونه تحلیل شده است.



(الف)



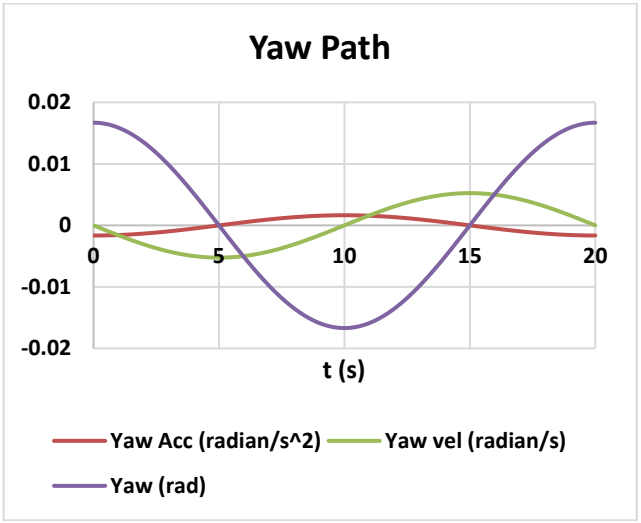
(ب)



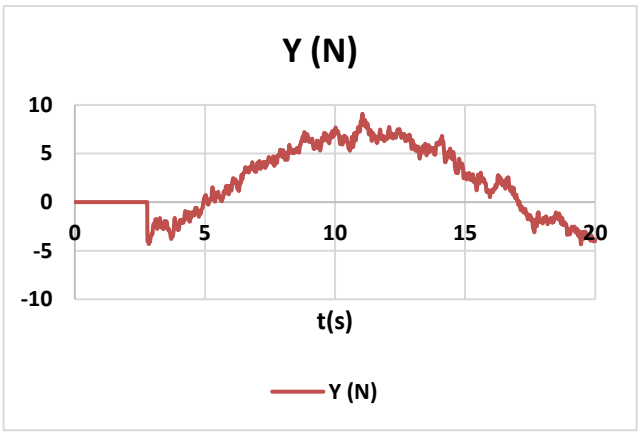
(ج)

شکل ۱۴-نتایج تست سوی خالص فرکانس ۰/۰۵

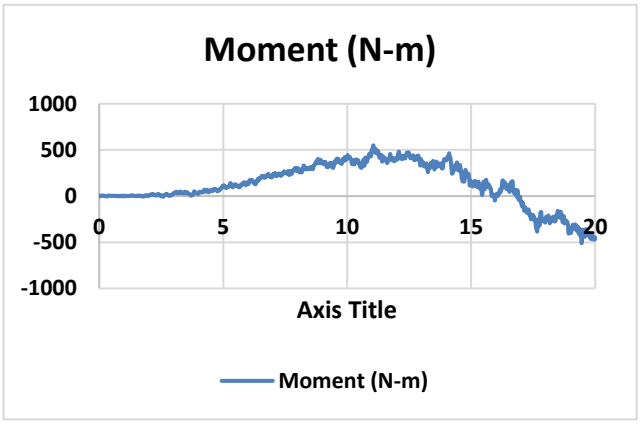
در این بخش، واکنش دینامیکی شناور در حرکت یاو خالص تحلیل شده است تا درک دقیق‌تری از رفتار حرکتی آن به‌دست آید. اگرچه تست‌ها در پنج فرکانس مختلف (۰/۰۵ تا ۰/۴ هرتز) انجام شده‌اند، برای اختصار تنها نتایج مربوط به فرکانس ۰/۰۵ هرتز در شکل ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۵-نتایج تست سوی خالص فرکانس ۰/۰۵

در این بخش، مقادیر نیرو و ممان هیدرودینامیکی در لحظات اوج سرعت و شتاب شناور در جدول ۵ ارائه شده است. این داده‌ها برای تحلیل دقیق رفتار دینامیکی شناور و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی ضروری هستند. تحلیل این مقادیر همچنین امکان بررسی سهم هر یک از مؤلفه‌های سرعت و شتاب در ایجاد

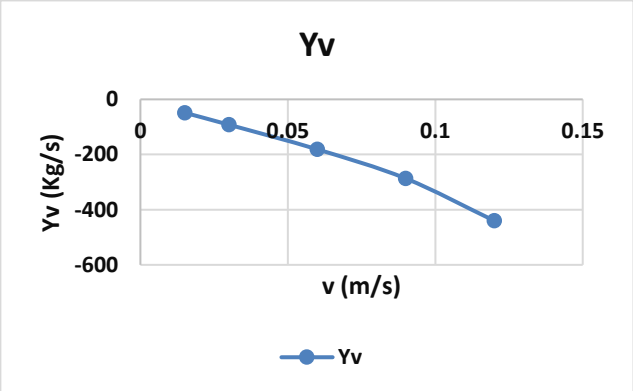
پاسخ‌های هیدرودینامیکی را فراهم می‌سازد و نقش آن‌ها را در شکل‌گیری رفتار مانوری شناور برجسته می‌کند.

جدول ۵-نیروها و ممانهای وابسته به شتاب در حرکت سوی

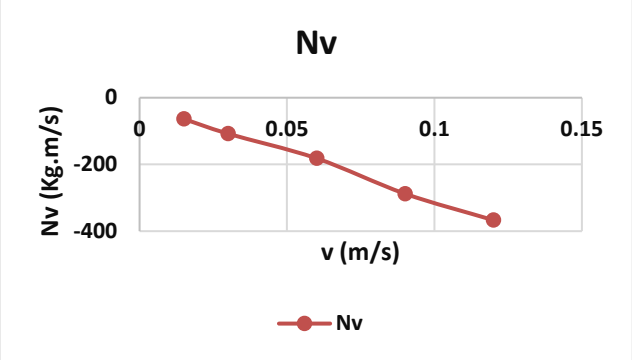
f(Hz)	Yv	Nv	Yvdot	Nvdot
0	0	0	0	0
0.05	-48.5	-63.75	-8.7	-71.27
0.1	-91.87	-107.8	-11.55	-85.76
0.2	-181.3	-181.7	-26.4	-91.76
0.3	-287	-287.7	-57.61	-106.56
0.4	-440	-367	-89	-116.9

شکل ۱۶، تغییرات نیرو و ممان‌های هیدرودینامیکی وابسته به سرعت و شتاب زاویه‌ای یاو را در عدد فرود ۱/۱۹ نمایش می‌دهد. این نمودارها حاصل شبیه‌سازی دقیق تست یاو خالص هستند که در آن مدل شناور تنها حول محور قائم و به‌صورت سینوسی نوسان می‌کند. هدف از این آزمون، استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مرتبط با حرکت چرخشی، نظیر ممان مقاومتی یاو و ضرایب جرم افزوده زاویه‌ای است. این ضرایب نقش مهمی در مدل‌سازی دینامیک مانور شناور در صفحه افق دارند، به‌ویژه هنگام تحلیل پاسخ‌های غیرخطی در مانورهای شدید.

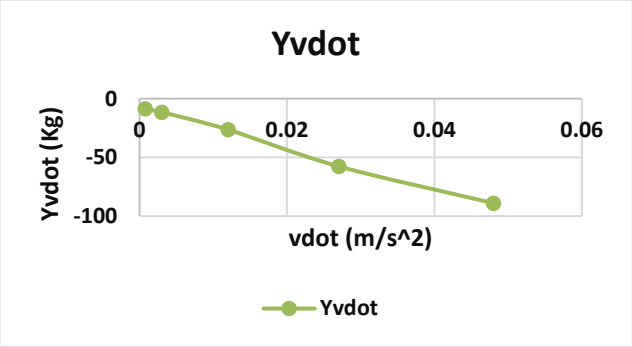
نتایج به‌دست‌آمده از این آزمون، با داده‌های تجربی حاصل از مطالعات روی شناورهای مشابه مطابقت قابل قبولی دارد. از این‌رو، می‌توان از آن‌ها در چارچوب استانداردهای تعریف‌شده توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی بهره گرفت. اهمیت این روش در شرایطی که دسترسی به داده‌های آزمایشگاهی وجود ندارد یا انجام آزمون‌های فیزیکی مقرون‌به‌صرفه نیست، دوچندان می‌شود، چراکه امکان برآورد دقیق پارامترهای کلیدی مانورپذیری را به‌صورت مجازی و در محیط شبیه‌سازی عددی فراهم می‌سازد.



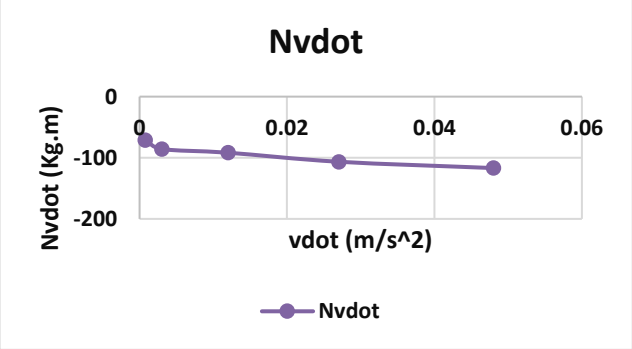
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۶-نیروها و ممانهای وابسته به سرعت و شتاب حرکت سوی

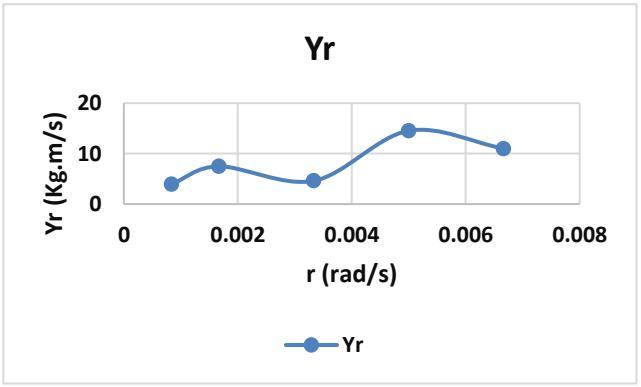
جدول ۶ مقادیر نیرو و ممان‌های هیدرودینامیکی وابسته به سرعت و شتاب زاویه‌ای یاو را نشان می‌دهد که از تحلیل تست‌های دینامیکی یاو خالص در فرکانس‌های مختلف به‌دست آمده‌اند. این داده‌ها برای مدل‌سازی دقیق نیروهای مقاومتی چرخشی و استخراج ضرایب مرتبط با ممان یاو کاربرد دارند و به‌عنوان ورودی معادلات حرکت، نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار مانوری و طراحی بهینه شناورهای تندرو ایفا می‌کنند.

جدول ۶- نیروها و ممانهای وابسته به سرعت و شتاب یاو

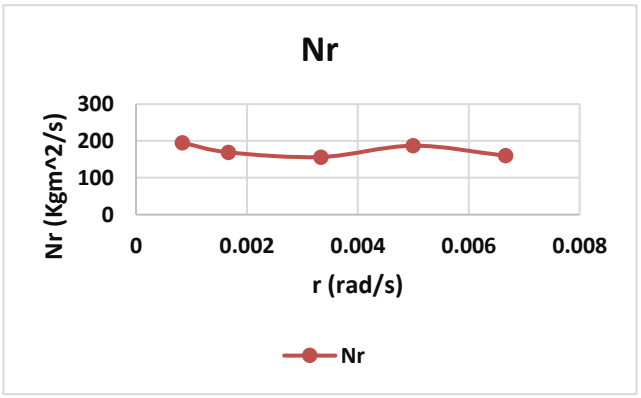
f(Hz)	Yr	Nr	Yrdot	Nrdot
0	0	0	0	0
0.05	3.93	195.3	7.31	50

0.1	7.47	169.17	7.42	71.69
0.2	4.6	156.4	2.2	32.9
0.3	14.52	187.03	5.75	50
0.4	11	160	21.1	421.5

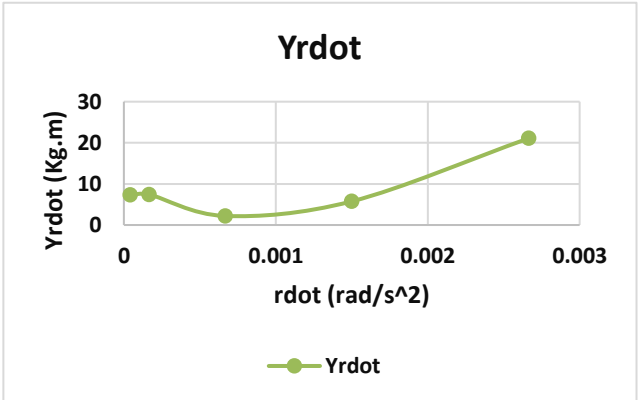
شـــکل ۱۷ روابط بین ســـرعت و شـــتاب زاویه‌ای یاو با نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی را به‌صـــورت نمودارهای کمی و گرافیکی نشـان می‌دهد. این داده‌ها، حاصـل شـبیه‌سـازی‌های دینامیکی، برای اسـتخراج ضـرایب مانور، توسـعه مدل‌های کنترلی، تحلیل پایداری چرخشـــی و ارزیابی رفتار خطی یا غیرخطی شـــناور کاربرد دارند و نقش مهمی در طراحی سیستم‌های ناوبری ایفا می‌کنند.



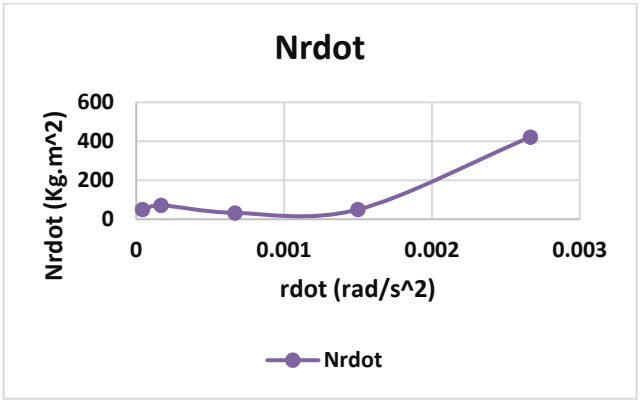
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۷-نیروها و ممانهای وابسته به سرعت و شتاب حرکت یاو

نتایج تحلیل نیروها و ممان‌های دینامیکی منجر به استخراج ضرایب هیدرودینامیکی مهم برای حرکت ســوی و یاو شــناور شــده اســت. جدول ۷ ضرایب مربوط به حرکت سوی و جدول ۸ ضرایب مرتبط با حرکت چرخشـــی یاو را نشـــان می‌دهد. این ضـــرایب که از شـــبیه‌ســـازی‌های دقیق CFD به‌دســـت آمده‌اند، برای مدل‌ســـازی دقیق دینامیک شـناور در معادلات حرکت شش درجه آزادی کاربرد دارند و در طراحی مســـیر مانور و تحلیل پایداری حرکتی شـــناورها اهمیـت دارنـد. این جـداول خروجی کلیـدی و نهـایی پژوهش برای شناورهای تندرو جستجو و نجات ناجی ۷ محسوب می‌شوند.

جدول ۷-ضرایب بی بعد وابسته به سرعت وشتاب سوی

Y'v	N'v	Y'vv
-0.10224	-0.01559	0.522926
N'vv	**Y'vdot**	**N'vdot**
-1.84802	-0.1227	-0.02516

جدول ۸- ضرایب بی بعد وابسته به سرعت وشتاب حرکت یاو

Y'r	N'r	Y'rdot	N'rdot
-0.08844	-0.52023	-0.471	-0.0716

۸- نتیجه گیری و جمع بندی

در پاســـخ بـه کمبود داده‌هـای تجربی برای تحلیـل مـانورپـذیری شـــنـاورهـای تنـدرو، این پژوهش یـک چـارچوب عـددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارائه داد که با استفاده از آن، ضـرایب هیدرودینامیکی مانور شـناور ناجی ۷ اسـتخراج شـد. تحلیل حسـاسـیت مش‌بندی در عدد فرود ۱/۱۹ به‌عنوان گام کلیدی برای افزایش دقت شـبیه‌سـازی انجام گرفت. شـبیه‌سـازی‌های اسـتاتیکی و دینامیکی در نرم‌افزار STAR-CCM+ انجام شـد و رفتار مانوری شـناور در زوایای دریفت و تحریکات سـینوسـی بررسـی گردید. نتایج نشـــان داد کـه روش CFD می‌توانـد جایگزین منـاســـبی برای

آزمایش‌های فیزیکی باشد و پاسخگوی نیازهای طراحی مهندسی با دقت و صرفه‌جویی بالا باشد. این چارچوب قابلیت کاربرد در مراحل مختلف طراحی، ارزیابی عملکرد و تحلیل مانور را دارد. در گام‌های بعدی، اعتبارسنجی نتایج با داده‌های واقعی و بررسی مانورهای پیچیده‌تر مانند زیگ‌زاگ و ترمز اضطراری پیشنهاد می‌شود. همچنین، بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند مسیر جدیدی برای پیش‌بینی سریع و دقیق ضرایب مانوری فراهم سازد.

کلید واژگان

SAR (Search And Rescue Vessel)
IMO(International Maritime Organization)
CFD(Computational Fluid Dynamic)

۸- مراجع

1- International Maritime Organization. (2002). *Standards for ship manoeuvrability* (MSC.137(76)). IMO.

2- Larsson, L., Stern, F., & Bertram, V. (2022). *Ship resistance and flow*. Springer.

3- Taheri, S., Mousaviraad, S. M., & Ahmadi, A. (2023). CFD-based estimation of maneuvering coefficients for a high-speed catamaran. *Ocean Engineering*, 277, 114094. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114094

4-Kim, S., & Ha, T. (2020). Prediction of ship maneuvering using overset mesh method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 202. https://doi.org/10.3390/jmse8030202

5- Lyu, Y., & Kim, W. (2022). Numerical prediction of a trimaran's maneuvering performance at high speed. *Applied Ocean Research*, 122, 103063. https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103063

6- Liu, Y., Carrica, P. M., & Stern, F. (2021). URANS simulations for marine vehicles in maneuvering. *Ocean Engineering*, 240, 110084. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110084

7- Wang, J., Zou, Z., & Zhang, J. (2019). Numerical estimation of hydrodynamic derivatives based on virtual PMM tests. *Applied Ocean Research*, 87, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.007

8- Azcueta, R. (2020). CFD simulation of ship manoeuvring including dynamic trim and sinkage. *Ship Technology Research*, 67(1), 24–38. https://doi.org/10.1080/09377255.2019.1709275

9- Carrica, P. M., Xing, T., & Stern, F. (2020). Comprehensive CFD prediction of a combatant ship in maneuvering conditions. *Journal of Fluids and Structures*, 94, 102862. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.102862

10- Borazjani, I. (2021). A hybrid RANS/LES method for marine vehicle simulations. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 15–28. https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.10.004

11- Li, Y. (2004). *Simulation of ship maneuvering & course keeping with escort tugs* [Master's thesis, University of British Columbia]. UBC Library. https://doi.org/10.14288/1.0055443

12- International Towing Tank Conference (ITTC). (2005). *Recommended procedures and guidelines: Free running model test procedure* (7.5-02-01-01).

13- Yoon, H. K. (2013, June). *Planar motion mechanism test program manual*. Changwon National University.

14- Sadeghi, M., & Mohammadzadeh, A. (2022). Calculation of maneuvering coefficients of a tanker ship with appendages using model tests in a laboratory. *Journal of Marine Science and Technology*, 82(901), Spring 2022. https://doi.org/10.22034/ijmst.2022.543575.1562. (In Persian)

15- Moghaddas Ahangari, A. A., & Bakhtiari, M. (2014, May). Required constrained model tests for assessing IMO maneuvering standards and their requirements at the Persian Gulf Martyrs National Marine Laboratory. In *Proceedings of the 3rd National Conference on High-Speed Vessels* (Tehran, Iran). Iranian Marine Science and Research Association. (In Persian)

16- Photograph courtesy of the Public Relations Department, Khuzestan Ports and Maritime Administration.