

محاسبه‌ی کارایی شناور سه‌بدنه‌ی پروازی تونل‌دار با استفاده از

شبیه‌سازی عددی

عباس دشتی‌منش^{۱*}، رضا ملاح‌زاده^۲، هانیبه حاتمی رشک‌وسطائی^۳

^{۱*} استادیار هیدرومکانیک دریا، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

^{۳،۲} دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

(تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۲)

چکیده:

با توجه به هزینه‌های زیاد آزمایش در حوضچه‌ی کشش و در دسترس نبودن آن در همه‌ی مکان‌ها برای تست شناورهای تندرو، استفاده از نرم‌افزارهای مختلف برای شبیه‌سازی عددی افزایش یافته است. یکی از هدف‌های مهم شبیه‌سازی عددی، رسیدن به پاسخی مناسب، با هزینه‌ای پایین‌تر و با دقتی خوب و قابل قبول در زمان کمتر می‌باشد. لذا، در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی یک بدنه‌ی تریماران تونل‌دار با استفاده از ترکیبی روش‌های محدود و حجم سیال صورت گرفته و به بررسی نیروی درگ شناور، انتشار امواج در سطح آزاد آب و توزیع فشار بر روی بدنه شناور پرداخته شده است. نتایج نهایی در قالب ارائه داده‌های مقاومت و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، نمایش انتشار امواج در سطح آزاد آب و نمایش توزیع فشار بر روی بدنه‌ی شناور در بازه‌ی گسترده‌ای از سرعت بوده است. نتایج به دست‌آمده در شبیه‌سازی عددی دقت بسیار مناسبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی داشته و مدل عددی ارائه شده می‌تواند در کاربردهای واقعی مورد استفاده قرار بگیرد.

واژه‌های کلیدی:

شناور تونل‌دار پروازی، شبیه‌سازی عددی، پیش‌بینی مقاومت، توزیع فشار.

Performance Computation of Planing Trimaran Tunneled Boat Using Numerical Simulation

^{1,*}Abbas Dashtimanesh, ²Reza Mallahzade, ³Haniyeh Hatami Rashkvastaei

^{1,*} Assistant Professor of Marine Hydrodynamics, Engineering Department, Persian Gulf University,
a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

^{2,3} Bsc Student of Naval Architecture, Engineering Department, Persian Gulf University
(Submitted: 2016/July/20; Accepted: 2016/Aug/2)

Abstract

By regarding expensive towing tank experiments and inavailability of appropriate towing carriage for high speed craft, implementation of various software for numerical simulation are intensified. The main purpose of numerical simulation is to achieve a suitable answer in a low expense, good accuracy and reasonable solution in a short time. Therefore, in the current study, numerical simulation of planing trimaran tunneled boat is performed using commercial software STARCCM+ and resistance, ship waves and pressure distribution on boat's hull are analyzed. The final results are presented by comparison of numerical data against experimental results and free surface flows around tunneled boat are illustrated. Pressure distributions over the hull bottom at wide range of Froude number from 1.07 up to 8.4 are also presented and variation of waterlines is considered. Obtained results by numerical simulation have a good accuracy in comparison with experimental data.

Keywords:

Planning Tunneled Boat, Numerical Simulation, Resistance Prediction, Pressure Distribution.

شناورهای تونل‌دار به دلیل طراحی خاص خود به گزینه بسیار مطلوبی برای ساخت شناورهای تندرو پروازی تبدیل شده‌اند. در این شناور هوا به داخل تونل‌ها مکیده شده و علاوه بر لیفت هیدرودینامیکی، لیفت آئرودینامیکی نیز ایجاد خواهد شد. بدنه شناورهای تونل‌دار از یک بدنه اصلی و دو بدنه‌ی جانبی تشکیل شده است. وزن این شناور به طور عمده توسط نیروهای هیدرودینامیکی در بدنه و نیروی آیرودینامیکی تحمل می‌شود. زمانی که سرعت شناور افزایش می‌یابد، علاوه بر اینکه قسمت‌هایی از شناور که در زیر آب هستند، تحت نیروی هیدرودینامیکی قرار می‌گیرند. قسمت‌هایی از شناور نیز که بالای خط آب هستند، تحت تأثیر نیروی آئرودینامیکی قرار می‌گیرند. با یک نگاه کلی، می‌توان گفت که هر چه سرعت شناور بیشتر شود، تغییرات نیروها نسبت به زمان بیشتر گردیده و در نتیجه رفتار هیدرودینامیکی شناور پیچیده‌تر خواهد شد. این پیچیدگی‌ها سبب شده است که بسیاری از مسائل و سؤالات در این زمینه حل‌نشده باقی بمانند. لذا، استفاده از روش‌های عددی می‌تواند بسیاری از سؤالات را با دقت قابل قبولی پاسخ داده و بسیاری از مسائل را حل نماید.

از جمله کارهایی که در چند سال اخیر در این زمینه صورت پذیرفته است، کار سویامین و همکاران [۱] است که شبیه‌سازی عددی بر پایه حلگر معادلات ناویر استوکس و روش حجم سیال برای آنالیز عملکرد هیدرودینامیکی بدنه تونل‌دار می‌باشد. سویامین و همکاران [۲] نیز با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عملکرد مقاومت شناور سه بدنه تونل‌دار را مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین، اثرات حجم‌های جابجایی مختلف و مرکز ثقل‌های متفاوت بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور بررسی شد. قصاب‌زاده و قاسمی [۳] برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرودینامیکی شناورهای چندبدنه‌ی تونل‌دار در سرعت‌های مختلف از شبیه‌سازی عددی بر اساس روش حجم محدود و حجم سیال استفاده کردند. ویجییا [۴] عملکرد هیدرودینامیکی بدنه‌های پروازی تونل‌دار را با توجه به مقادیر حجم جابجایی و مرکز ثقل طولی مورد مطالعه قرار داد.

در مقاله فعلی، به بررسی شناور تونل‌دار در زاویه‌های تریم مختلف و بازه‌ی گسترده سرعت پرداخته شده است. ویژگی‌های هیدرودینامیکی مختلف نظیر انتشار امواج در سطح آزاد اطراف بدنه، مقادیر مقاومت و توزیع فشار وارد بر بدنه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- معادلات حاکم و روش عددی

از نرم‌افزار استارسی.سی.ام برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک شناور تونل‌دار استفاده شده است. میدان جریان، ویسکوز و غیر قابل تراکم فرض می‌شود. بنابراین، معادلات حاکم بر سیال به صورت رابطه (۱) قابل بیان است:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \rho u_i u_j' \right) + s_i$$

$$(i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

در روابط بالا ρ نشان‌دهنده‌ی چگالی سیال، ν ضریب ویسکوزیته سینماتیکی، u_i مؤلفه‌ی سرعت گذرا، u' مؤلفه‌ی سرعت نوسان، \bar{u}_i مؤلفه‌ی سرعت متوسط، s_i بخش منبع می‌باشد. نکته‌ی دیگری که همواره باید در مسأله مورد توجه قرار بگیرد، رژیم جریان آشفته در مسأله می‌باشد. مدل آشفته $k - \varepsilon$ رایج‌ترین مدل مورد استفاده در دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان متوسط برای شرایط جریان آشفته می‌باشد. این مدل یک مدل دو معادله می‌دهد که یک توصیف کلی از غتشاش می‌باشد. معادلات دقیق $k - \varepsilon$ حاوی بسیاری از شرایط ناشناخته و غیرقابل محاسبه هستند. نهایتاً اینکه، معادلات برای انرژی جنبشی آشفته (k) به صورت رابطه (۲) و معادلات برای اتلاف انرژی جنبشی متلاطم (ε) به صورت رابطه (۳) قابل بیان است:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2)$$

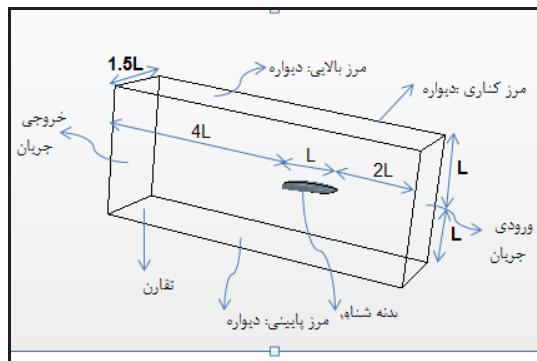
نسبت ۱:۶,۴۶ از شناور واقعی مورد نظر آورده شده است. در جدول ۲ فیزیک حل مسأله بیان شده است.

جدول (۱): ابعاد مدل شناور.

عنوان	واحد	ابعاد مدل
طول	متر	۲/۴
عرض	متر	۰/۶۴
ددرایز	درجه	۱۳
جرم	کیلوگرم	۵۰
طول مرکز جرم	متر	۰/۶۴
تربیم تعادل	درجه	۳

جدول (۲): انتخاب مدل فیزیکی.

عنوان	مدل
زمان	پایدار
ماده	چند فازی
مدل چند فاز	حجم سیال
رژیم جریان	آشفته
متوسط آشفستگی رینولدز	$k - \varepsilon$ آشفته



شکل (۱): ابعاد دامنه محاسباتی.

شکل ۱ ابعاد دامنه محاسباتی را مطابق با طول شناور نشان می‌دهد. به گونه‌ای که اگر طول شناور برابر با L باشد، ابعاد دامنه محاسباتی بر حسب ضریبی از L هستند. برای ابعاد دامنه محاسباتی اگر ابعاد دامنه محاسباتی بیش از حد کوچک باشد، جریان‌های اطراف سیال به خوبی مدل نشده و پاسخ به دست آمده دارای دقت پایینی خواهد بود. از سوی دیگر، اگر ابعاد دامنه محاسباتی بیش از حد بزرگ باشد، زمان محاسباتی افزایش می‌یابد. بنابراین، باید ابعاد بهینه‌ای برای دامنه

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

در روابط بالا u_i نشان‌دهنده مؤلفه‌ی سرعت در جهت مربوطه، E_{ij} نشان‌دهنده بخشی از نرخ تغییر شکل و μ_i نشان‌دهنده ویسکوزیته گردابی هستند که معادله ویسکوزیته گردابی به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$\mu_i = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

و همچنین، مقادیر ثابت $C_{2\varepsilon}$ ، $C_{1\varepsilon}$ ، σ_ε ، σ_k ، C_μ برای روابط بالا برای طیف گسترده‌ای از جریان آشفته به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$c_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.30 \quad c_{1\varepsilon} = 1.44$$

$$c_{2\varepsilon} = 1.92$$

نکته‌ی دیگری که باید در این مسأله مورد توجه قرار بگیرد مدل‌سازی سطح آزاد می‌باشد که از روش حجم سیال برای مدل‌سازی سطح آزاد استفاده می‌شود. در این مورد، کسر حجمی، چگالی و گرانیوی پویا از دو فاز موجود (آب و هوا) در هر حجم کنترل برای تمام مراحل زمان حل با استفاده از معادله (۵) قابل بیان می‌باشد:

$$\rho = \alpha \rho_2 + (1 - \alpha) \rho_1 \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_2 + (1 - \alpha) \mu_1$$

در روابط بالا ρ نشان‌دهنده چگالی، μ بیانگر ویسکوزیته مؤثر و α نشان‌دهنده نسبت حجمی سیال هستند که معادله نسبت حجمی سیال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \Delta \cdot (\alpha u) = 0 \quad (6)$$

که در رابطه بالا u نشان‌دهنده سرعت است و α عددی بین صفر و یک که عدد یک محاسبات در فاز آب، عدد صفر محاسبات در فاز هوا و اعداد بین صفر و یک، شرایط سطح مشترک آب و هوا را نشان می‌دهد.

۳- حل عددی

برای شبیه‌سازی عددی یک شناور تونل‌دار مورد توجه قرار گرفته است. در جدول ۱ ابعاد مدل شناور که با

گونه‌ای انتخاب گردد که افزایش تعداد مش‌ها تغییرات زیادی را در نتایج ایجاد نکند. با توجه به نکات گفته شده، در این مسأله برای ایجاد شبکه‌بندی مناسب پنج بلوک با توجه به حساسیت ناحیه‌های مورد بررسی بر روی مدل شناور و دامنه‌ی محاسباتی ساخته شده است. بلوک اول بر روی کل مدل شناور ساخته شده که سایز شبکه‌بندی آن ۰/۱۵ متر می‌باشد. بلوک دوم در عقب شناور در قسمت‌هایی از پاشنه که بیشتر با آب برخورد دارد، ساخته شده که سایز شبکه‌بندی آن ۰/۰۰۵ متر می‌باشد. در محدوده تونل‌ها نیز از دو مش ریز و درشت با شکل تونل مانند استفاده شده است که به ترتیب بلوک سوم و چهارم در تونل‌های با مش درشت و ریز ساخته شده‌اند که سایز شبکه‌بندی آن‌ها ۰,۰۰۲ متر می‌باشد. و بلوک پنجم در سطح مشترک آب و هوا در کل طول و عرض دامنه‌ی محاسباتی تشکیل شده است. که سایز شبکه‌بندی آن ۰/۰۳۵ متر می‌باشد.

برای بررسی روند استقلال از شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی، مسأله در چند حالت شبکه‌بندی حل شده و مقایسه‌ای بین نیروی درگ کل در این چند مرحله انجام شده است. نتایج مطالعه استقلال حل از مش منجر به استفاده از مشی با یک میلیون و دویست هزار سلول جهت شبیه‌سازی نهایی گردید.



(الف)



(ب)



(ج)

محاسباتی انتخاب شود به گونه‌ای که هم جریان اطراف سیال را به خوبی مدل کند و هم زمان محاسباتی در کمترین زمان خود باشد.

یکی از بخش‌های دیگر در تحلیل عددی تعیین میرایی موج‌های برگشتی است که دو نوع منبع برای موج‌های برگشتی وجود دارد:

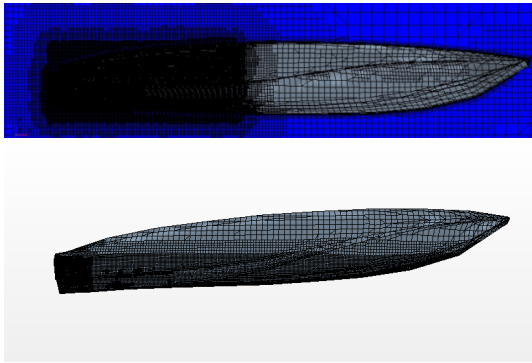
۱- موج‌های برگشتی از مرزها.

۲- موج‌های برگشتی در اثر انتقال ناگهانی مش.

که موج‌های برگشتی در اثر انتقال ناگهانی مش در طول مرحله تولید مش کنترل می‌شوند. میرایی موج‌های برگشتی برای ورودی جریان، خروجی جریان، ناحیه جریان در مرزهای کناره و کف در نظر گرفته می‌شود و به دلیل اینکه شناور متقارن است، در طول حل نصف شناور مدل می‌شود. در صفحه‌ی تقارن و در مرزهای بالایی، میرایی موج‌های برگشتی در نظر گرفته نمی‌شود. یکی از بخش‌های دیگر که از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل عددی می‌باشد، تعیین شرایط مرزی دامنه‌ی محاسباتی است. برای ورودی جریان از شرط سرعت ورودی ثابت که برابر با سرعت مدل شناور می‌باشد، استفاده خواهد شد. برای خروجی جریان شرط فشار ثابت به کار گرفته شده و برای مرزهای جانبی، بالایی و دیواره کف از سرعت مماسی ثابت استفاده می‌گردد.

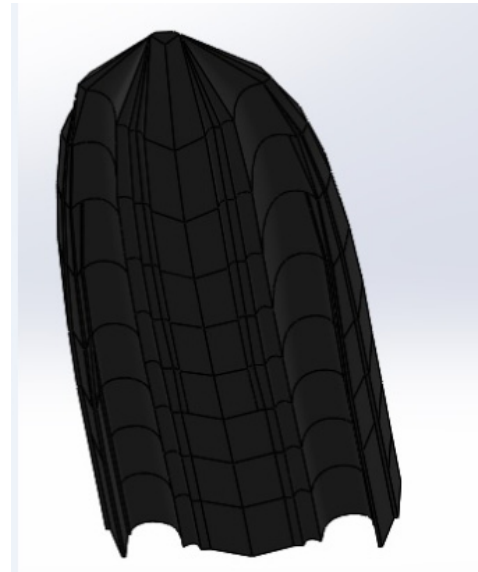
در این مطالعه، برای تولید هندسه مدل شناور از نرم‌افزارهای کد استفاده شده است (شکل ۲). سپس، برای شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی از نرم‌افزار استارسی.سی.ام استفاده شده است. برای شبکه‌بندی دامنه‌ی محاسباتی در بحث آنالیز مقاومت شناور عموماً از مش تریمر و مش لایه منشوری استفاده می‌شود. شکل ۳ نماهایی از شبکه‌بندی بر روی مدل شناور را نمایش می‌دهد.

با توجه به تقارن مدل شناور تنها نیمی از بدنه شناور در دامنه مدل‌سازی وارد می‌شود. یکی از نکات مهم در تحلیل عددی که باید به آن توجه نمود سایز مش‌های تولید شده می‌باشد که در نتایج حاصل بسیار تأثیرگذار هستند. اگر سایز مش خیلی بزرگ باشد، سبب خطای زیادی در تحلیل می‌گردد. بنابراین، باید برای رسیدن به تحلیلی با دقت بالا سایز مش‌ها را خیلی ریز در نظر گرفت. با افزایش تعداد مش‌ها حجم محاسبات و زمان محاسبات افزایش می‌یابد. همچنین باید سایز مش‌ها به



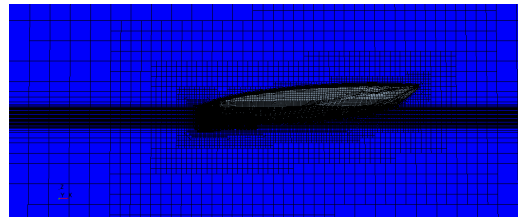
(د)

شکل (۳): نماهایی از شبکه‌بندی بر روی شناور، (الف) نمای کلی، (ب) نمای از پایین، (ج) نمای از عقب، (د) نمای از بغل.

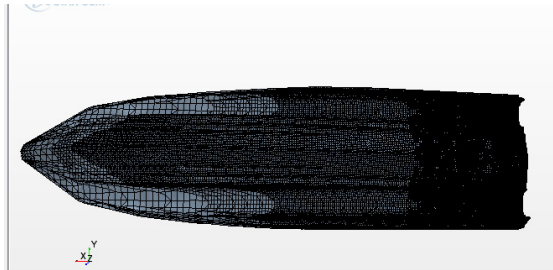


(د)

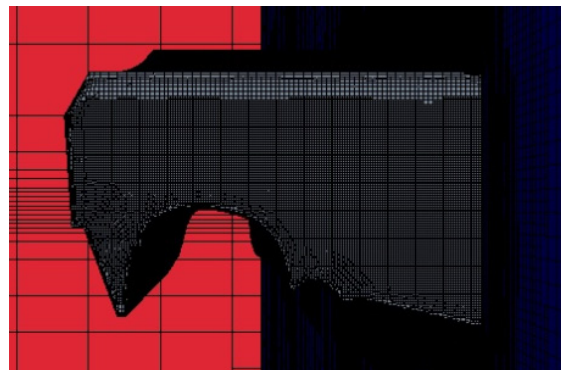
شکل (۲): نماهایی از بدنه‌ی سالید شده شناور (تونل‌دار، الف) نمای جانبی، (ب) نمای از جلو، (ج) نمای از عقب، (د) نمای از پایین.



(الف)



(ب)

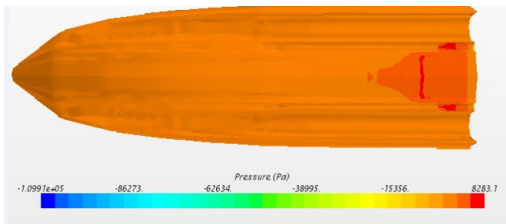


(ج)

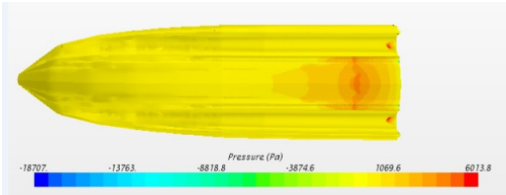
۴- اعتبارسنجی و ارائه نتایج

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از تحلیل عددی، می‌بایست از نتایج آزمایشگاهی موجود برای بدنه‌های تونل‌دار استفاده نمود. نتایج این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی تست عملکرد مقاومت شناور تندروی سه‌بدنه مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی تست عملکرد مقاومت شناور تندروی سه‌بدنه در سال ۲۰۱۳ توسط ویجیپاما و همکاران [۵] ارائه شده است که مقادیر مقاومت، زاویه تریوم و خط آب‌خور در سرعت‌های مختلف قابل دستیابی است. بر اساس نتایج به دست آمده، زمانی که سرعت افزایش یابد، اثرات نیروهای هیدرواستاتیکی بر روی شناور کمتر شده، و شناور به حالت پروازی نزدیک تر شده و دقت نتایج حاصل نیز افزایش می‌یابد.

برای این منظور در این مطالعه نتایج نیروی درگ شناور در اعداد فرود مختلف به دست آمده، و با نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی تست عملکرد مقاومت شناور تندرو سه‌بدنه مقایسه شده است. شکل ۴ بیانگر آن است که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی از دقت مطلوبی برخوردارند.



(ه)



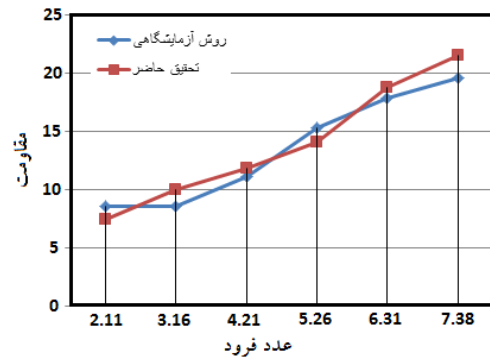
(ی)

شکل (۵): توزیع فشار وارد بر بدنه شناور، الف) در عدد فرود ۲/۲۱، ب) در عدد فرود ۳/۱۶، ج) در عدد فرود ۴/۲۱، د) در عدد فرود ۵/۲۶، ه) در عدد فرود ۶/۳، ی) در عدد فرود ۷/۳.

در شکل‌های ۶، ۷ و ۸، انتشار امواج در سطح آزاد آب و در سرعت‌های مختلف از چند نمای متفاوت نشان داده شده است. با افزایش سرعت انتشار امواج در سطح آزاد آب شدت یافته و جدایش جریان از بخش‌های مختلف بدنه اتفاق می‌افتد. همانگونه که مشاهده می‌شود، جدایش بیشتر در پاشنه و در تونل‌ها حادث می‌شود. شناور به واسطه نیروی لیفت ایجاد شده، تا حدی از سطح آب جدا گردیده و عمق غوطه‌وری کاهش می‌یابد.

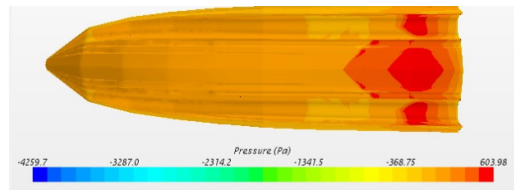
در شکل ۷ نمای جریان سیال خروجی از تونل‌ها ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که تغییرات سرهت اثرات مختلفی بر نوع و شکل جریان خروجی از تونل‌ها دارد. بر همین اساس میزان لیفت هیدرودینامیکی و آئرو دینامیکی ایجاد شده قابل ارزیابی خواهد بود. توجه داشته باشید که هندسه تونل کاملاً بر میزان لیفت اثرگذار بوده که در تحقیقات بعدی این اثرات به طور دقیق مورد بررسی و مطالعه قرار خواهد گرفت.

علاوه بر این، نمای داخلی جریان سیال درون تونل‌ها نیز می‌تواند نکات ارزنده‌ای را در بر داشته باشد. در واقع، با شناسایی نحوه‌ی جدایش جریان درون تونل‌ها، امکان گسترش مدل‌های ریاضی فراهم گردیده و می‌توان بدون نیاز به روش‌های عددی، به طور تحلیلی کارایی بدنه‌های تونل‌دار نظیر بلیدرانر را پیش‌بینی نمود.

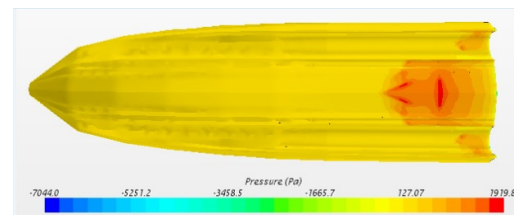


شکل (۴): اعتبارسنجی نیروهای به دست آمده از روش حاضر با روش آزمایشگاهی.

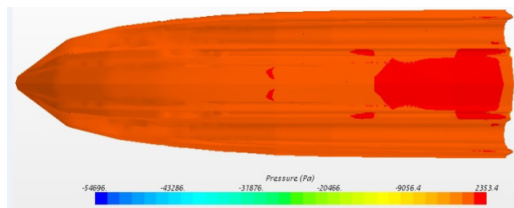
در شکل ۵، توزیع فشار بر روی بدنه شناور در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل‌های زیر بیشترین فشار در تونل‌ها و بر روی بدنه اصلی که در تماس با آب هستند، مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت در قسمت‌های تحتانی شناور، توزیع فشار شناور افزایش می‌یابد.



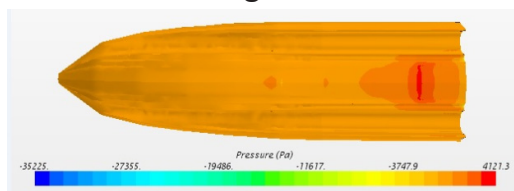
(الف)



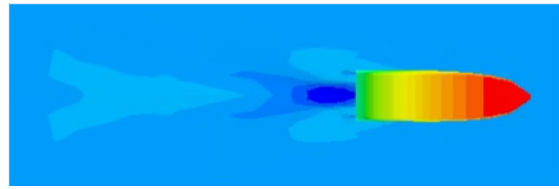
(ب)



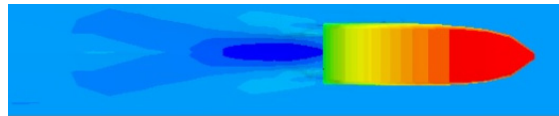
(ج)



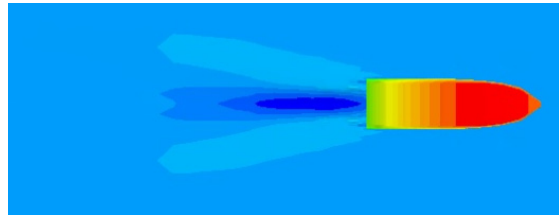
(د)



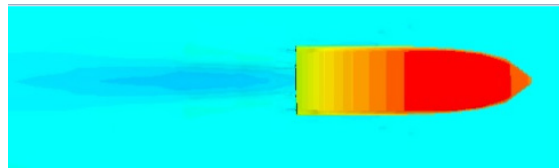
(الف)



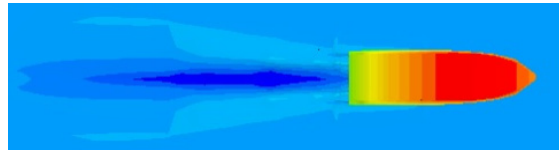
(ب)



(ج)



(د)

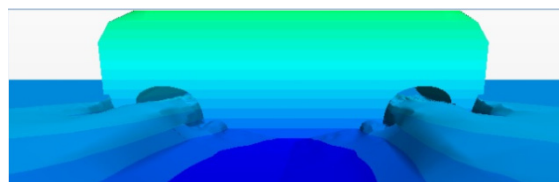


(ه)

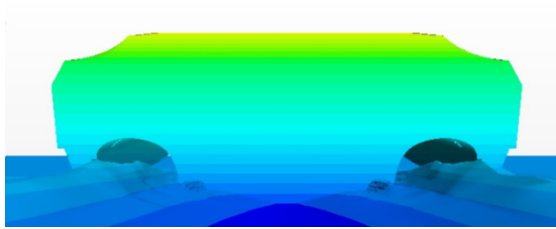


(ی)

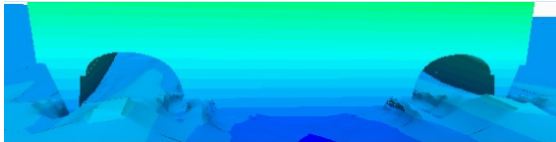
شکل (۶): انتشار امواج در سطح آزاد آب از نمای بالای شناور، الف) در عدد فرود ۲/۲۱، ب) در عدد فرود ۳/۱۶، ج) در عدد فرود ۴/۲۱، د) در عدد فرود ۵/۲۶، ه) در عدد فرود ۶/۳، ی) در عدد فرود ۷/۳.



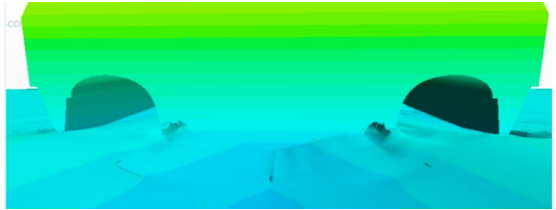
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

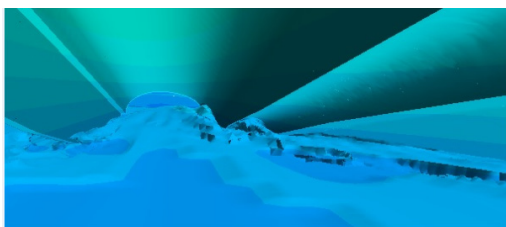


(ه)

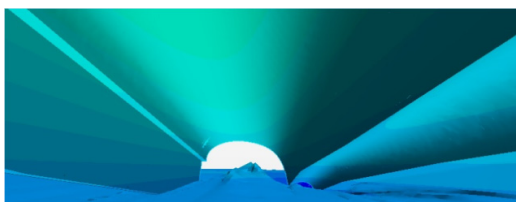


(ی)

شکل (۷): انتشار امواج در سطح آزاد آب از نمای عقب شناور، الف) در عدد فرود ۲/۲۱، ب) در عدد فرود ۳/۱۶، ج) در عدد فرود ۴/۲۱، د) در عدد فرود ۵/۲۶، ه) در عدد فرود ۶/۳، ی) در عدد فرود ۷/۳.



(الف)

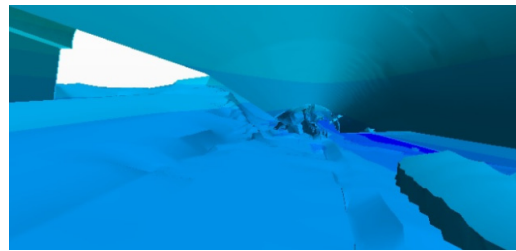


(ب)

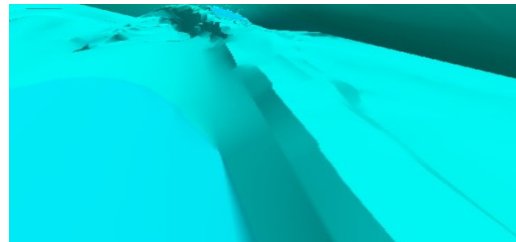
این، توزیع فشار وارد بر سطوح مختلف بدنه پله‌دار مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شد که هر چه سرعت شناور افزایش یابد، فشار ماکزیمم در تونل‌ها و انتهای بدنه‌ی شناور بیشتر می‌شود. در انتها نیز، نحوه انتشار امواج و جدایش آنها در تونل‌ها در سرعت‌های مختلف ارائه شد. مشاهده گردید که جدایش به نحو مؤثری در تونل‌ها ایجاد شده و منجر به تولید لیفت هیدرودینامیکی و آئرو دینامیکی می‌گردد. در مطالعات آینده، جزئیات دقیق‌تر سیالاتی در محل تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و تلاش می‌شود یک مدل ریاضی مناسب برای پیش‌بینی کارایی بدنه‌های تونل‌دار توسعه یابد.

۶- منابع و مراجع

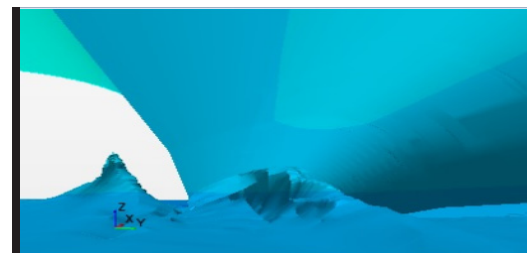
- [1] Yu-min, S., and Wang, S., "Experimental Study On Resistance Performance Of a Channel Type Planning Trimaran Model," Journal of Harbin Engineering University, Vol. 34, No. 7, 2013, pp. 832-836.
- [2] Yu-min, S., Wang, S., and Shen, H., "Numerical and experimental analyses of hydrodynamic performance of a channel type planing trimaran," Journal of Hydrodynamics, Vol. 26, No. 4, 2014, pp. 549-557.
- [3] Ghassabzadeh, and M., Ghassemi, H., "Numerical Hydrodynamic of Multihull Tunnel Vessel," Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 3, 2013, pp. 198-204.
- [4] Weijia, M., Sun, H., Sun, H., Zou, J., and Zhuang, J., "Test Studies of the Resistance and Seakeeping Performance of a Trimaran Planing Hull," Polish Maritime Research, Vol. 85, No. 1, 2015, pp. 22-27.
- [5] Weijia, M., Sun, H., Zou, J., and Yang, H., "Test research on the resistance performance of high-speed trimaran planing hull," Polish Maritime Research, Vol. 80, No. 4, 2014, pp. 45-51.



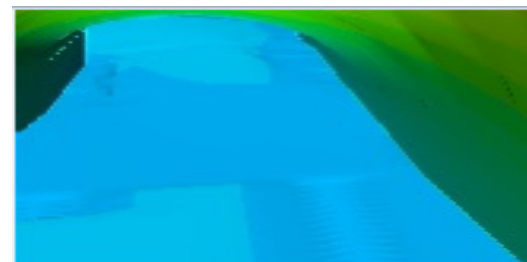
(ج)



(د)



(ه)



(ی)

شکل (۸): انتشار امواج در سطح آزاد آب از نمای پایین در تونل شناور، الف) در عدد فرود ۲/۲۱، ب) در عدد فرود ۳/۱۶، ج) در عدد فرود ۴/۲۱، د) در عدد فرود ۵/۲۶، ه) در عدد فرود ۶/۳، ی) در عدد فرود ۷/۳.

۵- جمع‌بندی و مطالعات آینده

در این مقاله، با استفاده از حلگر حجم محدود-حجم سیال، مدل‌سازی شناور تونل‌دار در حالت دو فازی آب و هوا انجام شده است. هدف از این مطالعه محاسبه نیروی مقاومت شناور در سرعت‌های مختلف بود. نتایج به دست آمده از حل عددی با داده‌های مدل آزمایشگاهی مقاومت شناور تندروی سه‌بدنه اعتبارسنجی گردید. نتایج به دست آمده در سرعت‌های بالا دارای دقت بسیار خوبی بوده و می‌توان از آن در کاربردهای واقعی استفاده نمود. علاوه بر