مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۳، ص‌ص ۵۱-۵۹

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر افزودن تونل بر نیروی درگ در شناور تندرو

عبدالرضا یوسفی[۱]، روزبه شفقت[۲*]، مصطفی محبی[۳]، عباس رامیار[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۳- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* بابل، کد پستی ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸، rshafaghat@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۱۴ تیر ۱۳۹۲
پذیرش: ۰۳ مهر ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:
شناور تندروی پروازی
تونل، نیروی درگ
انسیس-فلوئنت
روش حجم سیال

چکیده

با توجه به کاربردهای مختلف شناورهای تندرو، تقاضا برای استفاده از این شناورها افزایش یافته است. یکی از اهداف مهم در راستای طراحی و ساخت این دسته از شناورها، دست‌یابی به سرعت‌های بالاتر می‌باشد؛ لذا روش‌های مناسب کاهش درگ، کمک شایانی جهت نیل به این هدف خواهند نمود. روش‌های گوناگونی به‌منظور کاهش درگ در شناورهای تندرو معرفی شده‌اند که یکی از این روش‌ها تغییر در شکل بدنه به واسطهٔ ایجاد تونل‌های جانبی طولی در بدنهٔ شناور می‌باشد. در این روش شکل معمول (تک بدنه) این دسته از شناورها تغییر می‌کند. در این مطالعه اثرات افزودن تونل به یک شناور پلنینگ تک بدنه با هدف کاهش درگ مورد بررسی قرار گرفته است که برای این منظور از نرم‌افزار تجاری انسیس-فلوئنت استفاده شده است. برای بررسی توزیع دو فاز سیال از روش حجم سیال استفاده می‌شود. نتایج نهایی در قالب تأثیرات تونل بر روی کاهش درگ و نیز تغییرات زاویهٔ تریم شناور در دوحالت بدون تونل و با تونل، برای سرعت‌های ورودی مختلف برمبنای محدودهٔ عدد فرود از ۱ تا ۵/۶۲ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌ها، افزودن تونل‌های جانبی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کاهش درگ خواهد داشته، به‌طوری که در سرعت ۳۰ متربرثانیه حدود ۱۶ درصد کاهش درگ مشاهده شده است.

Drag reduction in a high-speed planing hull using tunnels

Abdorreza Yousefi[1], Rouzbeh Shafaghat[2*], Mostafa Mohebbi[3], Abbas Ramiar[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshiravani University of Technology, Babol, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* P.O. B. 47148-71167 Babol, Iran, rshafaghat@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 July 2013
Accepted 25 September 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:
High-Speed Planning Hull
Tunnel
Drag Force
Ansys-Fluent
Volume Of Fluid (VOF)

ABSTRACT

Various applications of the high speed boats have increased demand for it. One of the important objectives in the design of high speed boats is to use proper methods in order to achieve higher speeds. Methods for drag reduction will help to reach this aim. Lots of methods have been introduced in order to decrease the drag in the high speed boats. One of these methods is to create the longitudinal lateral tunnels in the body of the boat. In this method normal shape (mono-hull) of these boats will be changed. In the current study, effects of the added tunnels in a mono-hull planning boat have been studied in order to decrease the drag force. The ANSYS-FLUENT commercial software has been used as a numerical solver. Distribution of the two phases of the fluid is investigated, using the Volume Of Fluid (VOF) model. The drag forces and trim angle of both the original and modified Cougar hulls were obtained for various forward speeds, corresponding to the original hull length based Froude numbers ranging from 1.00 to 5.62. The results show 16% reduction in the total drag for the modified hull at the forward speed of 30 m/sec.

۱- مقدمه

به‌دلیل استفاده از شناورهای تندرو در کاربردهای مختلف نظامی، تفریحی، ورزشی مسافربری و حمل بار، تقاضا برای استفاده ار این شناورها همواره در حال افزایش است. در سال‌های اخیر تعداد شناورهای تندرو به میزان قابل وجهی افزایش یافته است. برای این شناورها طراحی مناسب سازه دارای اهمیت بسیاری بوده، فرایند طراحی تأثیر زیادی روی وزن شناور و به دنبال آن هزینه و میزان بار قابل حمل دارد. با توجه به این مسائل، ارائهٔ مفاهیم و ایده‌های جدید در طراحی این دسته از شناورها بسیار ضروری است. امروزه همگام با رشد سریع تکنولوژی در سطح دنیا، صنعت کشتی‌سازی نیز در کنار سایر صنایع مربوط به آن، پیشرفت‌های چشم‌گیری را شاهد بوده است. نمونه‌ای از این پیشرفت‌ها طراحی و ساخت شناورهای تندرو با شکل و کاربری‌های گوناگون است. این دسته از شناورها با بهره‌مندی از سرعت بالا (بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه) قابلیت استفاده در زمینه‌های مختلف نظامی، تفریحی، امداد و غیره را دارا می‌باشند.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A.R. Yousefi, R. Shafaghat, M. Mohebbi, A. Ramiar, Drag reduction in a high-speed planing hull using tunnels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 51-59, 2014 (In Persian)

با بررسی انواع شناورهای سطحی، شایان ذکر است که مهم‌ترین پارامتر طراحی، سرعت شناور می‌باشد. بر این اساس شناورها به لحاظ سرعت اصولاً به سه دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند:

۱-جابه‌جایی

۲-نیمه پروازی

۳-پروازی

در شناورهای نوع جابه‌جایی عدد فرود در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۴ می‌باشد. در این دسته از شناورها تمام وزن شناور توسط نیروی شناوری خنثی می‌شود. عدد فرود در شناورهای از نوع نیمه‌پروازی حدود ۰/۴ تا ۱/۱ درنظر گرفته می‌شود که در آن‌ها وزن شناور توسط اثرات هم‌زمان نیروی لیفت و بویانسی تحمل خواهد شد. شناورهای پروازی عددهای فرود بزرگ‌تر از ۱/۱ را به خود اختصاص می‌دهند که در این شرایط و با توجه به سرعت طراحی، بخش اعظم وزن توسط نیروی لیفت تحمل می‌شود[۱].

زمانی که سرعت شناور افزایش می‌یابد، علاوه‌بر قسمت زیر آب شناور که تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی می‌باشد، قسمتی از شناور که بالای خط آب است نیز تحت تأثیر نیروهای آئرودینامیکی در رفتار دینامیکی شناور مؤثر می‌باشد. دقت روش‌ها برای هر یک از دسته‌ها و برای انواع شناورها متفاوت است. شاید در یک نگاه کلی بتوان گفت که هر چه سرعت شناور زیاد شود، نیروها افزایش یافته، تغییرات نیروها نسبت به زمان شدیدتر شده و پیچیدگی‌های رفتار هیدرودینامیکی این دسته از شناورها بیشتر می‌گردد.

این پیچیدگی‌ها سبب شده است تا بسیاری از مسائل در این زمینه هنوز حل نشده بوده، یا مسائل حل شده دارای دقت پایینی باشند و بسیاری از جواب‌هایی که امروزه ارائه می‌شوند، همان روابط تجربی هستند که در دهه‌های گذشته ارائه شده‌اند. استفاده از روش‌های عددی می‌تواند به بسیاری از این سؤالات پاسخ داده؛ رفتار دینامیکی این شناورها را شبیه‌سازی کند. در بررسی جریان حول شناورهای پروازی با مسئلهٔ جریان‌های سطح آزاد مواجه هستیم که درنظر گرفتن این پارامتر، پیچیدگی جریان حول شناور را بیشتر می‌کند. به‌طور کلی برای شبیه‌سازی و حل میدان‌های جریان سه روش وجود دارد:

الف) روش‌های تجربی (آزمایشگاهی)

ب) روش‌های تئوری و تحلیلی

ج) روش‌های حل عددی و دینامیک سیالات محاسباتی[1]

روش‌های آزمایشگاهی یکی از مهم‌ترین و منطقی‌ترین روش‌ها برای پیشگویی عملکرد یک شناور جدید می‌باشد. متأسفانه انجام تست‌های تجربی می‌تواند مشکل و گران باشد و بعضی اوقات وقت زیادی را صرف کند. یک پیشنهاد در مقابل تست‌های آزمایشگاهی، حل معادلات حاکم بر میدان جریان است؛ در این راستا اگر چه حل‌های تحلیلی بسیار مؤثر و دقیق هستند اما برای هندسه‌های پیچیده نمی‌توانند به‌کار برده شوند؛ چون معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار و با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند؛ بنابراین در بیشتر موارد حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است و با اعمال شرایط مرزی این محدودیت‌ها بیشتر می‌شوند. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش سرعت رایانه‌ها، روش‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته‌اند که امروزه استفاده از آن در صنایع دریایی گسترش یافته است. از مهم‌ترین مزیت‌های روش‌های عددی این است که دیگر با محدودیت‌های آزمایش مدل از قبیل اندازه شناور، اعمال شرایط مختلف محیطی، تحلیل و انتقال نتایج برای شناورهای واقعی و هزینه بالای ساخت مدل مواجه نیست. در این حالت، مدل‌سازی هیدرودینامیکی شناور در ابعاد واقعی و بررسی اثر مؤلفه‌های مختلف طراحی در مراحل اولیه کار فراهم آمده و امکان استخراج اطلاعات گوناگون با جزئیات دلخواه به وجود می‌آید. در این راستا یکی از کارهایی که اخیراً صورت گرفته کار فولتز[۲] در سال ۲۰۰۸ است که با استفاده از روش حجم محدود و در دو حالت شرایط دائم تک فاز و حالت حجم سیال دو فازی به‌بررسی جریان سیال روی یک شناور پنتاماران پرداخت.

پناهی و همکاران[۳] نیز در سال ۲۰۰۹ از روش حجم محدود، مدل‌سازی سطح آزاد حجم سیال و همچنین روش گام جزئی برای کوپلینگ بین سرعت و فشار به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی دو نمونه از شناور پرداختند. در حالت اول یک گوه را در حالت دو درجه آزادی، به‌صورت دوبعدی تحلیل کردند و در ادامه به بیان حرکت یک شناور پروازی کاتاماران در حالت ۳بعدی پرداختند. آن‌ها در این کار ضمن بررسی نمودارهای مقاومت و زاویه تریم، کار خود را با سایر نتایج عددی موجود مقایسه کردند که نتایج مقایسه نشان دهنده دقت بالای حل بود. آن‌ها در این کار از کد حجم محدودی که در آزمایشگاه مهندسی دریای دانشگاه صنعتی شریف توسط سیف و همکاران[۴] در سال ۲۰۰۹ تهیه و طی چند مرحله بهینه‌سازی شده بود، استفاده کردند. این کد برای تحلیل هیدرودینامیکی و مانور شناور تندرو استفاده می‌شود. با کمک این کد مطالعاتی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی سه‌بعدی حرکات غیرخطی شناور تندرو، شبیه‌سازی حرکت شناور کاتاماران با تکنیک حرکت شبکه مانند کار جهانبخش و همکاران[۵] در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد. استفانو بریزولورا[۶] نیز در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش حجم محدود و مدل حجم سیال، الگوی سطح آزاد را برای یک شناور پروازی با بدنه گوه‌ای مدل کرد. او در کار خود به تحلیل نتایج مربوط به نیروهای درگ، لیفت و تریم پرداخت و نتایج کار خود را با نتایج کارهای آزمایشگاهی و روش تجربی سویتسکی[۷] مقایسه کرد.

محاسبه نیروی درگ یک جسم شناور بر روی آب با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزارهای تجاری در سال‌های اخیر با توجه به توسعه روش‌های عددی به شکل یک روش قابل اتکا درآمده است. جونز و کلارک[۸] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از فلوئنت به شبیه‌سازی جریان اطراف یک بدنه DTMB5415 پرداختند. این مطالعه به‌بررسی قابلیت روش حجم محدود برای شبیه‌سازی سطح آزاد، مقاومت کل یک شناور، شکل امواج و میدان سرعت با استفاده از شبکه‌های سازمان یافته و شبکه‌های بی‌سازمان پرداخته است. مقاومت کل در حالت شبکه‌بندی هگزاهدرال نسبت به‌روش آزمایشگاهی دارای خطای ۳/۸ درصد بوده است. امواج تولید شده در هر دو حالت از دقت خوبی برخوردار است. شبیه‌سازی میدان سرعت بسیار سخت است و با خطای ۱۰ درصد انجام شده است و در پایان نتیجه‌گیری شده است که فلوئنت توان شبیه‌سازی امواج، ویک، میدان سرعت و فشار، شبیه‌سازی سطح آزاد و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور را دارا می‌باشد.

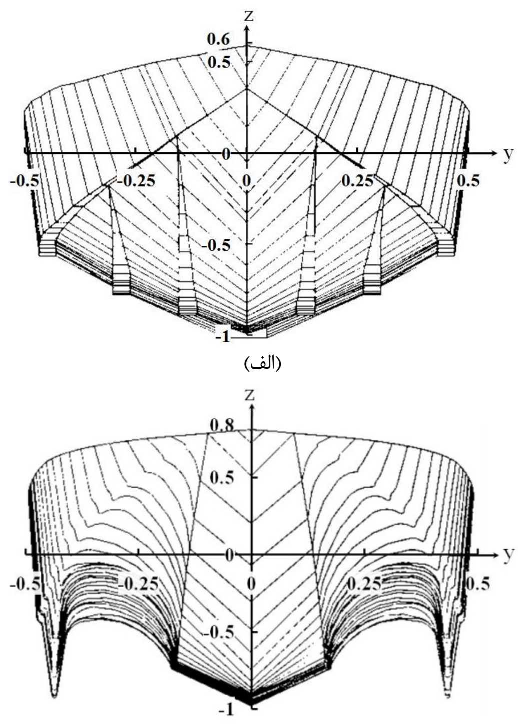
سابرامانیان و همکاران[۹] در سال ۲۰۰۷ با استفاده از روش حجم محدود در حالت تک فازی و با استفاده از مدل RANS به بررسی عملکرد ایجاد تونل بر روی نیروهای درگ فشاری و لیفت روی شناور پروازی پرداختند. آن‌ها در این کار از کد تجاری فلوئنت استفاده نموده، نتایج کار خود را با روش‌های تجربی[۱۰] مقایسه کردند. از نتایج مهمی که در کار آن‌ها قابل مشاهده بود، کاهش درگ به واسطهٔ وجود تونل بود. البته بررسی اصلی این کار بر روی اثر تونل بر جانمایی پروانه شناور بود. همچنین در کار

1- CFD (Computational Fluid Dynamic)

آن‌ها با توجه به مدل حل تک فازی درنظر گرفته شده، اثرات سطح آزاد، مدل نشده است. یکی از کارهایی که در این زمینه صورت پذیرفت، مقایسه بین دو شناور بود که یکی از آن‌ها تک بدنه و دیگری کاتاماران بود که توسط سیف و همکاران[۱۰] صورت گرفت. در این کار آن‌ها به‌بررسی نیروهای درگ اصطکاکی و فشاری و همین طور درگ کلی بر روی شناور پرداختند و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که نیروی درگ اصطکاکی شناور تک بدنه در سرعت‌های مختلف نسبت به شناور کاتاماران بیشتر است و نیروی درگ کل کاتاماران نیز بیشتر از نیروی درگ کل در شناور تک بدنه می‌باشد. در سال ۱۳۹۱ وفایی صفت و همکاران[۱۱] در کار خود به شبیه‌سازی و محاسبه نیروهای وارد بر یک شناور پلنینگ با زاویه ددرایز متغیر پرداخته، نتایج کار خود را با نتایج تجربی مقایسه کرده‌اند. در ادامه به بهینه‌سازی فرم بدنه این شناور تندرو پرداختند.

در کار حاضر با الگو گرفتن از شناور بلیدرانر که در سال ۲۰۰۶ توسط شرکت آیس-مارین[1] معرفی شده است[۱۲]، در قسمت تحتانی شناور تک بدنه کوگار که در شکل ۱ آورده شده است، دو تونل ایجاد شده است که فرم بدنه این شناور تک‌بدنه را به یک شناور بلیدرانر تبدیل کرده است.

برای ارزیابی اثرات تونل ایجاد شده، با استفاده از روش دوفازی حجم سیال به‌بررسی نیروهای درگ وارد شده به شناور و همین طور زاویهٔ تریم شناور در سرعت‌های مختلف پرداخته، این دو شناور با یکدیگر مقایسه شده است. با ایجاد دو تونل در زیر شناور، اجازه عبور هوا از این تونل‌ها فراهم شده، با فشرده شدن هوای وارد شده به تونل‌ها و با ایجاد اثری مشابه بالشتک هوا[2] شرایط ایجاد نیروی لیفت بیشتر فراهم می‌شود. انتظار می‌رود در حالت بار کامل و در وزن برابر (با فرض برابری مرکز جرم برای دو شناور)، با افزودن تونل، زاویه تریم افزایش یافته، نیروی مقاومت کل کاهش یابد که این حالت به افزایش سرعت شناور کمک خواهد کرد.



(ب)

شکل ۱ شناور کوگار اصلی (الف) و تغییر شکل یافته (ب)

1- Ice-Marine
2- Cushioning

۲- معادلات حاکم و روش عددی

با توجه به شرایط حاکم بر جریان سیال، معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به‌صورت رابطهٔ (۱) قابل بیان است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\nu\ \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}+g_i$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{۱}$$

در این معادلات، u مؤلفه سرعت، P فشار، ν لزجت و g_i مؤلفه نیروی گرانش می‌باشد. نکتهٔ دیگری که باید همواره مورد توجه قرار گیرد، رژیم جریان آشفته در مسالهٔ مورد نظر می‌باشد که برای لحاظ این ویژگی از مدل بهبود یافته‌ای از مدل k-ε به‌نام RNG k-ε استفاده شده است. در مدل RNG k-ε ویژگی‌های میدان جریان آشفته براساس دو مفهوم انرژی جنبشی جریان آشفته[3] و نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته[4] بیان می‌شود. بر این اساس معادلات حاکم به فرم روابط (۱) و (۲) قابل ارائه هستند:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho U k\right)=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right)$$
$$+P_k-\rho\varepsilon \tag{۲}$$
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho U\varepsilon\right)=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}}\right)\nabla\varepsilon\right)$$
$$+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1RNG}\left(P_k+P_{\varepsilon b}\right)-C_{\varepsilon 2RNG}\rho\varepsilon\right)$$
$$C_{\varepsilon 1RNG}=1.42-f_n$$
$$f_n=\frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{4.38}\right)}{\left(1+\beta_{RNG}\eta^3\right)}$$
$$\eta=\sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG}\varepsilon}} \tag{۳}$$

در روابط بالا ρ چگالی سیال، U بردار سرعت، k انرژی جنبشی توربولانسی، μ ویسکوزیته دینامیکی، μ_t ویسکوزیته آشفته، σ_k عدد پرانتل آشفته و P_k تولید آشفتگی به‌علت نیروهای ویسکوز می‌باشد. حال براساس معادلات حاکم، برای مدل‌سازی عددی جریان سیال، حول شناور، از نرم‌افزار تجاری فلوئنت استفاده شده است که در این نرم‌افزار، حل عددی جریان با روش حجم محدود انجام می‌شود. در این روش، الگوریتم حل شامل سه مرحله انتگرال‌گیری از معادلات حاکم بر جریان سیال روی حجم کنترل، گسسته‌سازی معادلات شامل جایگذاری نوعی از تقریب‌ها برای عبارت‌های داخل معادله انتگرالی (مربوط به فرآیندهای جریان مثل جابه‌جایی، نفوذ و چشمه) و تبدیل معادلات انتگرالی به یک دستگاه معادلات جبری می‌شود.

در روش‌های معمول در شبیه‌سازی حرکات شناور عموماً از تغییر شکل سازه شناور و تأثیر آن بر نتایج صرف نظر شده، سازه شناور به‌صورت جسم صلب فرض می‌گردد. بدین ترتیب شبیه‌سازی حرکات شناور را می‌توان به قسمت‌های زیر تقسیم‌بندی نمود: حل معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال (معادلات ناویر استوکس و پیوستگی)، اعمال معادلات آشفتگی، مدل‌سازی سطح آزاد و بررسی وضعیت تعادل.

3- Turbulence Kinetic Energy (TKE)
4- Viscous dissipation of turbulence kinetic energy

با توجه به استفاده از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم، برای کوپل میدان سرعت و فشار از مدل سیمپل[1] استفاده شده است. در این مدل معادله اصلاح فشار چندین بار حل شده، براساس آن سرعت‌ها اصلاح می‌شوند تا پیوستگی در میدان محاسباتی ایجاد گردد. نکتهٔ حایز اهمیت دیگر در این مساله اهمیت تأثیر هم‌زمان جریان آب در زیر سطح آزاد و جریان هوا در بالای آن است. لذا برای اعمال تغییر شکل‌های پیچیده در سطح مشترک دو سیال، از روش حجم سیال برای مدل‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. در این حالت یک معادله انتقال برای محاسبه نسبت حجمی دو فاز سیال (آب و هوا) در گام زمانی حل می‌شود.

در روش اصلی حجم سیال که توسط هیرت و نیکولز در سال ۱۹۸۱ ارائه شده است[۱۳]، روابط اساسی حاکم بر جریان (معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی) به جای حل جداگانه برای هر فاز، برای سیال مؤثری با خواص فیزیکی متغیر در دامنه محاسباتی حل می‌شوند. این سیال در یک محدوده، خواص فاز اول (آب) و در محدوده دیگر خواص فاز دوم (هوا) و در ناحیهٔ فصل مشترک (سطح آزاد) ترکیبی از این خواص را دارا می‌باشد.

$$\rho_{eff}=\alpha\cdot\rho_1+\rho_2\left(1-\alpha\right)$$
$$v_{eff}=\alpha\cdot v_1+v_2\left(1-\alpha\right) \qquad (۴)$$

در روابط ارائه شده، ρ_{eff} و v_{eff} به‌ترتیب نشان‌دهنده، چگالی و لزجت مؤثر می‌باشند. α که بیانگر نسبت حجمی سیال است، عددی بین صفر و یک می‌باشد و در حقیقت درصد حضور هر سیال در دامنهٔ محاسباتی را بیان می‌کند. بر این اساس هنگامی که برابر ۱ باشد، درون سیال ۱، اگر صفر باشد درون سیال ۲ و وقتی بین صفر و یک باشد، شرایط سطح آزاد مورد نظر خواهد بود. براساس معادلهٔ پیوستگی و با توجه به غیر قابل تراکم بودن دوفاز، معادلهٔ انتقال نسبت حجمی در رابطهٔ ۵ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{D\rho}{Dt}=\frac{D(\rho_1\cdot\alpha+\rho_2(1-\alpha))}{Dt}=0$$
$$\rightarrow\frac{D\alpha}{Dt}=\frac{\partial\alpha}{\partial t}+u(\nabla\alpha)=0$$
$$\nabla\cdot(\alpha u)=\alpha(\nabla u)+u(\nabla\alpha)=u(\nabla\alpha)$$
$$\rightarrow\frac{\partial\alpha}{\partial t}+\nabla\cdot(\alpha u)=0 \qquad (۵)$$

با محاسبهٔ توزیع دوفاز سیال در کل دامنه محاسباتی، می‌توان فرض نمود که یک سیال مؤثر در کل دامنه وجود دارد؛ بدین ترتیب معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی برای یک سیال مؤثر با لزجت و جرم حجمی متغیر در دامنهٔ محاسباتی حل می‌شوند. با اعمال این خصوصیات مؤثر، به معادلات زیر رسیده، با انتگرال‌گیری در حجم کنترل، این معادلات گسسته‌سازی و حل خواهند شد.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho_{eff}}\frac{\partial p}{\partial x_i}+v_{eff}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j\partial x_j}+g_i$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۶)$$

در جدول ۱ تنظیمات مهم مربوط به نرم‌افزار فلوئنت برای تحلیل جریان حول این شناورها ارائه شده است.

۳- مشخصات هندسی و شرایط مرزی

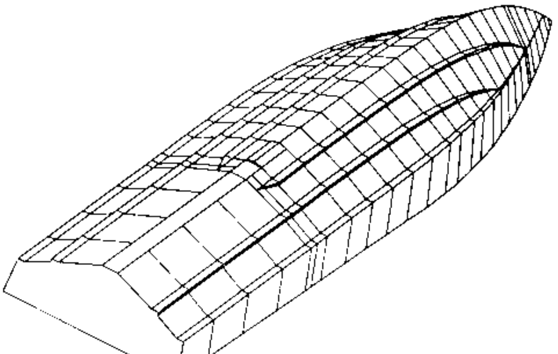
در این مسأله از یک شناور تندرو با نام کوگار برای شبیه‌سازی استفاده گردید؛ به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی‌ها هم با درنظر گرفتن شرایط شناور موجود و هم با فرض ایجاد دو تونل در طرفین بدنه انجام شده است. پروفیل تونل، با استفاده از الگوی شناور بلید رانر که دو تونل در قسمت تحتانی آن قرار دارد، بر روی چند مقطع مهم و بحرانی در شناورکوگار و با توجه به اندازهٔ عرض و ارتفاع مقطع مورد نظر ایجاد شده است. فرض بر این است که ابعاد اصلی و وزن دو شناور کاملاً با یکدیگر برابر باشد. در جدول ۲ ابعاد اصلی و مدل شناور آمده است. شکل ۲ نمای تکمیلی از دو شناور را در دوحالت بدون تونل و با تونل‌های جانبی نشان می‌دهد.

جدول ۱ تنظیمات مورد استفاده در نرم‌افزار فلوئنت

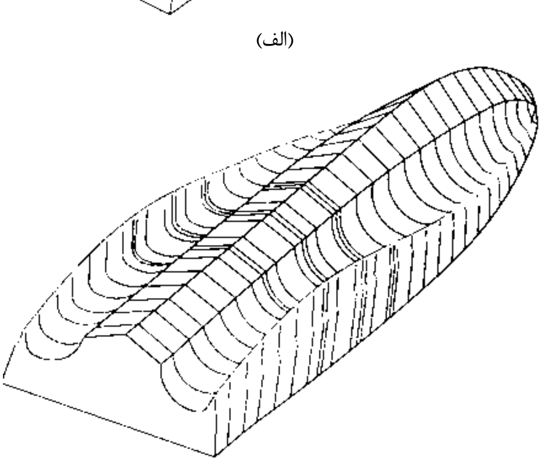
عنوان	روش انتخابی	
حل‌گر	ضمنی، گذرا، مجزا	
مدل توربولانسی	مدل $K-\varepsilon$ استاندارد	
روش دوفازی	حجم سیال	
روش گسسته‌سازی	نسبت حجمی	پیشرفتهHRIC
	مومنتوم	بالادست مرتبه دوم
	فشار	Presto
	انرژی جنبشی توربولانسی	بالادست مرتبه اول
	نرخ اتلاف توربولانسی	بالا دست مرتبه دوم

جدول ۲ ابعاد اصلی و مدل شناورها

عنوان	واحد	ابعاد اصلی	ابعاد مدل
طول کلی شناور	متر	۱۳/۱۸۷	۱/۳۱۸۷
عرض کلی	متر	۲/۹	۰/۲۹
ارتفاع کلی	متر	۱/۵	۰/۱۵
وزن شناور در حالت بار کامل	کیلو نیوتن	۲۲۹	۰/۲۲۹
آبخور سطحی	متر	۱/۲	۰/۱۲
طول مرکز جرم	متر	۵/۶۷	۰/۵۶۷



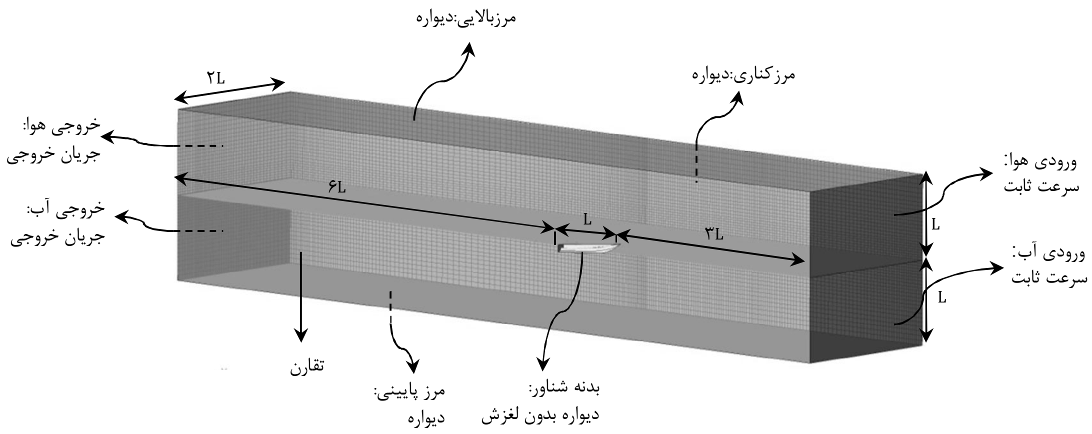
(الف)



(ب)

شکل ۲ نمای تکمیلی شناور کوگار اصلی (الف) و تغییر شکل یافته (ب)

1- Simple



شکل ۳ ابعاد دامنه محاسباتی

برای حل عددی جریان اطراف شناور ابتدا ابعاد دامنهٔ محاسباتی با توجه به نوع شناور باید انتخاب شود. اگر این ابعاد بیش از حد کوچک باشد، نزدیک بودن مرزها به دیواره شناور روی حل تأثیر منفی می‌گذارد و اگر بیش از حد بزرگ باشد زمان محاسباتی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین باید ابعاد بهینه برای دامنهٔ محاسباتی به‌گونه‌ای انتخاب شود که در کنار ارضای مرزهای بینهایت، زمان محاسباتی در کمترین مقدار خود باشد. شکل۳ ابعاد دامنهٔ محاسباتی را بر روی شناور نمایش می‌دهد؛ به‌طوری که اگر طول شناور برابر با L باشد، ابعاد دامنهٔ محاسباتی در قالب ضرایبی از طول L نمایش داده شده است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل عددی تعیین شرایط مرزی است. با توجه به شرایط مسالهٔ مورد نظر، مرز ورودی ناحیه حل از دو قسمت مجزای ورودی آب و هوا تشکیل شده است که باید به‌طور جداگانه تعریف شوند. به همین دلیل از همان ابتدا صفحه ورودی به وسیلهٔ صفحه آبخور به دو بخش تقسیم شده، بخش بالای صفحهٔ آبخور ورودی هوا و بخش پایینی، ورودی آب درنظر گرفته شده است.

برای شرط مرزی این دو بخش از شرط سرعت ثابت[1] (برابر با سرعت مدل شناور) استفاده می‌شود. برای ناحیه خروجی جریان از شرط مرزی جریان خروجی[2] استفاده می‌شود. البته از شرط سرعت ثابت نیز می‌توان در خروجی استفاده کرد؛ اما طول ناحیه محاسباتی در پشت شناور به اندازه کافی بزرگ بوده، شرط مرزی جریان خروجی در این ناحیه از دقت بالایی برخوردار است. برای صفحه میانی شناور که صفحهٔ تقارن می‌باشد، از شرط مرزی تقارن[3] استفاده شده است. با توجه به این که مرزهای کناری و بالا و پایین به اندازهٔ کافی از بدنه شناور فاصله دارند، اثرات جریان در این نقاط بر بدنهٔ شناور ناچیز بوده، می‌توان از شرط مرزی دور دست استفاده کرد؛ لذا برای این مرزها از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. برای دیوارهٔ شناور نیز از شرط مرزی دیوارهٔ بدون لغزش[4] استفاده می‌شود.

۴- شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

در مطالعهٔ حاضر برای تولید هندسه شناورها از نرم‌افزار سالید ورکس[5] استفاده شده است و سپس برای شبکه‌بندی بر روی مدل تولید شده، از نرم‌افزار گمبیت[6] استفاده شده است. به دلیل هندسه پیچیده از شبکه‌بندی بی‌سازمان با المان‌های چهار وجهی تتراهدرال در اطراف بدنه استفاده

1- Velocity inlet
2- Outflow
3- Symmetry
4- No slip
5- Solid Works
6- Gambit

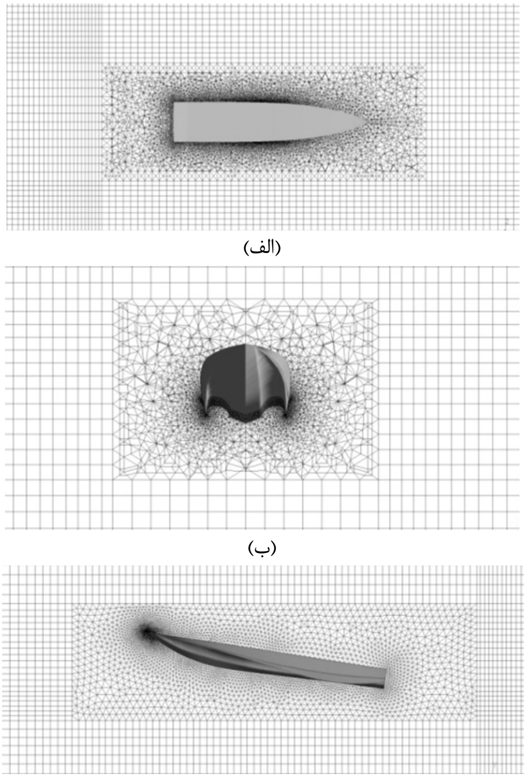
می‌شود. اگر همین المان‌ها برای کل دامنه حل استفاده شود، تعداد شبکه‌ها بالا رفته، زمان محاسباتی نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین برای کاهش تعداد سلول‌ها در نواحی دور از بدنه از شبکهٔ سازمان یافته با المان‌های مکعبی هگزاهدرال استفاده شده است. با توجه به تقارن مدل، تنها نیمی از بدنهٔ شناور در دامنهٔ مدل‌سازی وارد می‌شود. شکل ۴ نماهایی از شبکه‌بندی بر روی مدل شناور کامل را نمایش می‌دهد.

از موارد مهمی که در تحلیل عددی باید به آن توجه نمود، سایز مش‌های تولید شده می‌باشد. سایز مش در نتایج تحلیل بسیار تأثیرگذار است. درشت بودن مش سبب خطا در تحلیل می‌گردد. لذا بهتر است سایز مش‌ها تا حد امکان ریز باشد. اما با افزایش تعداد مش‌ها، حجم محاسبات زیاد می‌گردد و در نتیجه زمان محاسبات زیاد می‌شود. از طرفی باید سایز مش‌ها به‌گونه‌ای باشد که با افزایش تعداد مش‌ها تغییر زیادی در نتایج ایجاد نگردد. با توجه به مطالب گفته شده، برای این مساله در نواحی حول شناور از مش‌های با سایز ۲ تا ۱۵ میلی‌متر (با توجه به حساسیت ناحیهٔ مورد بررسی) استفاده شده است. برای نواحی دور از بدنه با یک روند افزایشی شبکه‌بندی از سایز ۲۰ تا ۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای بررسی روند استقلال از شبکه، مسأله برای شناور اصلی و تونل‌دار در چند حالت شبکه‌بندی حل شده، به مقایسه نیروی درگ کل پرداخته شده است. که به‌ترتیب در حدود ۳/۷۲ و ۳/۰۱ درصد خطا بین جواب‌های این چهار مرحله پیاپی دیده شده است. نتایج این بررسی در شکل ۵ و جداول ۳ و ۴ آورده شده است. نکته مهم در اینجا زمان محاسباتی بالا برای تعداد مش‌های بیشتر بود که با توجه به خطای کم بین شبکه‌بندی حالت سوم و چهارم از تعداد شبکه‌های کمتر، یعنی شبکه‌بندی حالت سوم با ۱۵۳۲۵۴۱ و ۱۶۲۳۳۸۳ مش به‌ترتیب برای شناور اصلی و تونلدار استفاده شده است.

در این مدل‌سازی از شبکه‌بندی ثابت استفاده شده است. مسالهٔ مورد بررسی، سه‌بعدی، گذرا و دوفازی می‌باشد. برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به زمان از تغییرات نیروی درگ و لیفت در مقابل زمان در روند حل استفاده می‌شود. بدین صورت که باید شرایطی ایجاد شود که با گذشت زمان تغییر چندانی در مقادیر نیروها ملاحظه نشود.

جدول ۳ تغییرات درگ در مقابل افزایش مش برای شناور کوگار

مرحله	تعداد مش	نیروی درگ (کیلونیوتن)
۱	۷۵۸۹۳۷	۴۵/۹۵۲
۲	۹۸۳۷۵۷	۴۲/۹۲۵
۳	۱۵۳۲۵۴۱	۴۱/۳۸۰
۴	۲۳۸۶۹۹۰	۴۰/۲۲۸



(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۴ نماهایی از شبکه‌بندی بر روی شناور؛
الف) نمای از بالا، ب) نمای از مقابل، ج) نمای جانبی

جدول ۴ تغییرات درگ در مقابل افزایش مش برای شناور تونلدار

مرحله	تعداد مش	نیروی درگ (کیلونیوتن)
۱	۱۰۲۵۱۷۸	۳۹/۹۶۰
۲	۱۲۳۶۵۵۴	۳۶/۹۳۷
۳	۱۶۲۳۳۸۳	۳۴/۹۴۵
۴	۲۷۵۲۴۳۱	۳۳/۹۱۴

۵- ارائه نتایج و بحث

به‌منظور اعتباربخشی نتایج حاصل از تحلیل عددی، با توجه به قابلیت اعتماد روش سویتسکی[۷]، نتایج به‌دست آمده با نتایج روش سویتسکی مقایسه شده است. روش سویتسکی یک روش تجربی–تئوری است که در سال ۱۹۶۴ توسط سویتسکی و همکاران[۷] ارائه شده است. با استفاده از این روش نیروهای مقاومت وارد بر شناور، زاویهٔ تریم، عمق غوطه‌وری و محدوده پایداری شناورهای پروازی، قابل دست‌یابی است. براساس روش سویتسکی هر چقدر سرعت افزایش یابد، اثرات نیروهای هیدرواستاتیکی کمتر شده، شناور به حالت پروازی نزدیک‌تر می‌شود و دقت نتایج حاصل از این روش نیز افزایش می‌یابد.

مقاومت بدنه شناور شامل مقاومت ویسکوز، مقاومت موج و مقاومت شکل بدنه است که خود شامل مقاومت فشاری و اسپری می‌باشد. برای شناورهای پروازی معمولاً مقاومت به دو دسته کلی مقاومت ویسکوز و مقاومت فشاری تقسیم می‌شود. مقاومت ویسکوز در روش سویتسکی که به واسطهٔ سطح-ترشدهٔ قایق ایجاد می‌شود، با توجه به رابطهٔ ۷ به‌دست می‌آید

$$R_f = \frac{\rho V_m^2 \lambda b^2 C_F}{2\mathrm{Cos}\beta \mathrm{Cos}\tau} \quad (۷)$$

مقاومت فشاری سویتسکی نیز به‌صورت رابطهٔ ۸ محاسبه می‌شود:

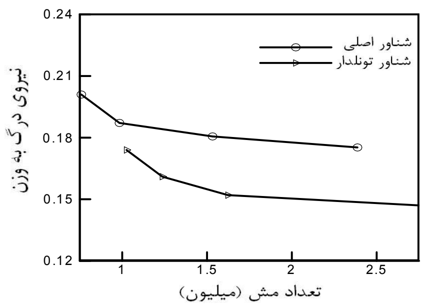
$$R_p = \Delta \tan\tau \quad (۸)$$

که در اینجا λ نسبت طول به پهنای شناور، β زاویه ددرایز، τ زاویه تریم شناور، b عرض شناور، Δ وزن شناور و C_F ضریب اصطکاک می‌باشد. مقاومت کل وارد بر شناور نیز برابر مجموع این مقاومت‌ها می‌باشد.

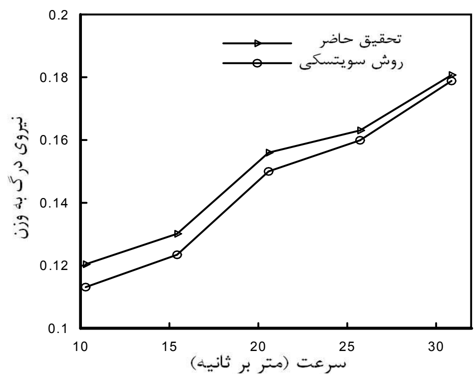
برای رسیدن به تعادل باید شرایط تعادل برقرار شود. شناور زمانی در حرکت هیو به تعادل می‌رسد که برایند نیروهای عمودی وارد بر بدنه برابر صفر شود. به‌عبارتی نیروی وزن باید با مجموع نیروهای لیفت و بویانسی برابر شود. همچنین زمانی که مجموع گشتاور نیروهای وارده حول مرکز جرم برابر با صفر شود، آنگاه شناور در حرکت پیچ به تعادل می‌رسد. برای رسیدن به این حالت باید طول مرکز فشار برابر با طول مرکز جرم شود.

برای این منظور نتایج نیروی درگ شناور کوگار بدون حضور تونل در سرعت‌های گوناگون به‌دست آمده، با نتایج حاصل از روش سویتسکی مقایسه شده است شکل ۶. روند نتایج نمایانگر دقت مناسب روش حاضر در تخمین درگ شناور است و همان‌طور که انتظار می‌رود (با توجه به ماهیت روش سویتسکی) با افزایش سرعت هم‌خوانی بیشتری بین نتایج دو روش ایجاد می‌شود؛ یا به‌عبارتی در سرعت‌های بالا دو روش نتایج تقریباً برابر دارند.

در یک مقایسه دیگر در شکل ۷ نمودار تریم در مقابل سرعت نیز ارائه شده است که نشان دهندهٔ دقت موجود در نتایج به‌دست آمده می‌باشد. برای این که شرایط مناسبی برای مقایسهٔ نتایج تحلیل برای دو شناور در حالت بدون تونل و با تونل محیا شود، تحلیل جریان در سرعت‌های گوناگون انجام شده موقعیت شناور براساس معیاری که پیش‌تر تشریح شده است، به‌دست آمد. شکل ۸ دنباله سطح آزاد ایجاد شده را برای دو شناور در سرعت‌های مختلف نمایش می‌دهد؛ همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش سرعت دنباله جریان در پشت شناور افزایش یافته، شناور به سمت بیرون آب آمده، به حالت پروازی درمی‌آید.



شکل ۵ استقلال از شبکه



شکل ۶ اعتبار سنجی نیروهای به‌دست آمده از روش حاضر با روش سویتسکی برای شناور اصلی

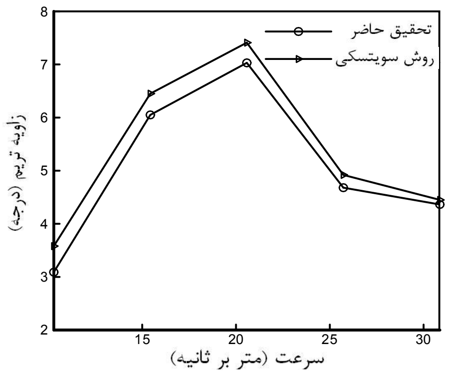
شایان توجه است که زاویهٔ تریم تا رسیدن شناور به حالت پروازی روند افزایشی داشته، پس از آن کاهش می‌یابد. با توجه به شکل، زاویهٔ تریم در حالت شناور تونل‌دار بیشتر و عمق غوطه‌وری کمتر است. با افزایش سرعت انتظار می‌رود درگ کل شناور افزایش یابد. وقتی سرعت شناور افزایش می‌یابد زاویهٔ تریم زیاد شده، شناور به‌واسطه نیروی لیفت ایجاد شده در قسمت تحتانی از آب خارج می‌شود، در این حالت عمق غوطه‌وری کاهش پیدا می‌کند. همزمان با بیرون آمدن شناور از آب، سطح تماس بدنه با آب کاهش پیدا کرده، درگ اصطکاکی کم می‌شود؛ در ابتدای حالت پروازی بیشترین زاویه تریم در شناور به‌وجود می‌آید و سطح تماس با آب کمترین مقدار خواهد بود؛ در نتیجه نیروی درگ اصطکاکی در این حالت دارای کمترین مقدار می‌باشد. در این حالت به‌دلیل بالا بودن زاویه تریم سطح مواجهه با سیال افزایش یافته، در نتیجه نیروی درگ فشاری افزایش پیدا می‌کند. همین‌طور که سرعت شناور در حالت پروازی افزایش می یابد، مرکز فشار به‌سمت جلوی شناور حرکت کرده، زاویهٔ تریم کم می‌شود؛ در نتیجه سطح تماس سیال با بدنه زیاد شده، درگ اصطکاکی زیاد و شیب نمودار درگ فشاری نسبت به حالت قبل کم می‌شود.

زمانی که سرعت افزایش می‌یابد به‌واسطهٔ عبور هوای فشرده در تونل، یک نیروی لیفت ایجاد می‌شود که منجر به بالا آمدن شناور از آب می‌شود، با توجه به اینکه در شناور کوگار اصلی اثر ورود هوای فشرده وجود ندارد؛ در نتیجه نیروی لیفت در حالت حضور تونل بیشتر و عمق غوطه‌وری کمتر می‌باشد. نیروی درگ اصطکاکی در شناور تونل‌دار با افزایش سرعت به‌واسطهٔ کاهش سطح‌تر شده کم می‌شود. کاهش در نیروی درگ تا سرعت پروازی ادامه می‌یابد. بعد از رسیدن به‌حالت پروازی، با کاهش زاویهٔ تریم، سطح تماس افزایش یافته، درگ اصطکاکی افزایش خواهد یافت.

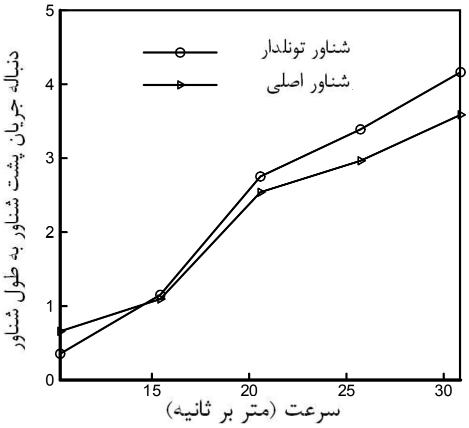
با توجه به حضور تونل در قسمت تحتانی شناور، سطح تر شدهٔ شناور افزایش می‌یابد. به‌عبارتی با افزودن تونل سطح بیشتری از شناور شامل دیوارهٔ داخلی، خارجی و سقف تونل در مواجهه با آب قرار می‌گیرد که سبب بالا رفتن درگ اصطکاکی نسبت به‌حالت بدون تونل به‌واسطهٔ سطح تر شده می‌شود. از طرفی با اضافه‌کردن تونل، سطح در مقابل حرکت شناور به‌واسطهٔ کم شدن پروفیل تونل از سطح بدنه کم شده، درگ فشاری شناور در آغاز حرکت کمتر از حالت بدون تونل می‌باشد. نیروی درگ فشاری با توجه به شکل همزمان با افزایش سرعت در حال افزایش است. این افزایش در نیروی درگ همانند حالت بدون تونل تا انتها ادامه خواهد داشت. در حالتی که تونل وجود دارد طول مرکز فشار به‌گونه‌ای است که برای برقراری تعادل و برابری طول مرکز جرم و فشار زاویهٔ تریم نسبت به‌حالت بدون تونل افزایش می‌یابد. با توجه به مطالب ذکر شده، در حالت تونل‌دار و در حالت پروازی، زاویهٔ تریم بیشتر، سطح در مقابل حرکت بیشتر و درگ فشاری بیشتر می‌باشد.

براساس تحلیل‌های انجام شده، در شکل ۹ مقایسهٔ بین نمودار تغییرات درگ کل در دو شناور ارائه شده است. همان‌طور که از نمودار دیده می‌شود، در سرعت‌های پایین و در مود جابه‌جایی درگ کل شناور بدون تونل، کمتر می‌باشد؛ ولی با افزایش سرعت درگ کل شناور با تونل به میزان قابل توجهی کم می‌شود. از علل اصلی این کاهش می‌توان به افزایش نیروی لیفت در حالت با تونل نسبت به‌حالت بدون تونل (با توجه به وجود هوای فشرده در سقف تونل)، کاهش عمق غوطه‌وری و همین‌طور کاهش در سطح در مقابل حرکت جریان اشاره کرد.

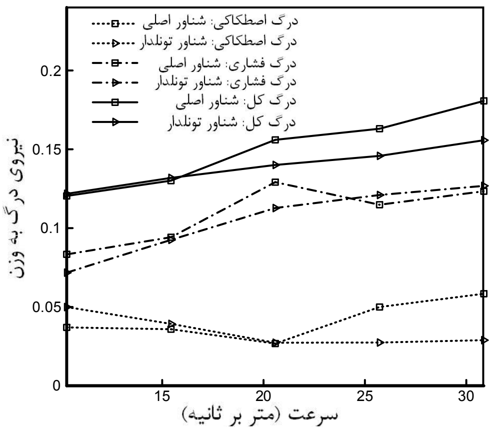
با توجه به شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت عمق شناور کم شده، شناور به سطح آب نزدیک می‌شود. این کاهش عمق در سرعت پلنینگ



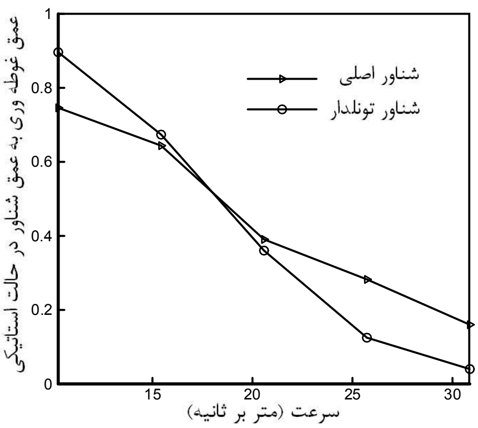
شکل ۷ مقایسه زاویه تریم به‌دست آمده از روش حاضر با روش سویتسکی برای شناور اصلی



شکل ۸ دنباله جریان ایجاد شده بر روی شناور



شکل ۹ مقایسه بین نمودار تغییرات درگ اصطکاکی، فشاری و کل برای دو شناور



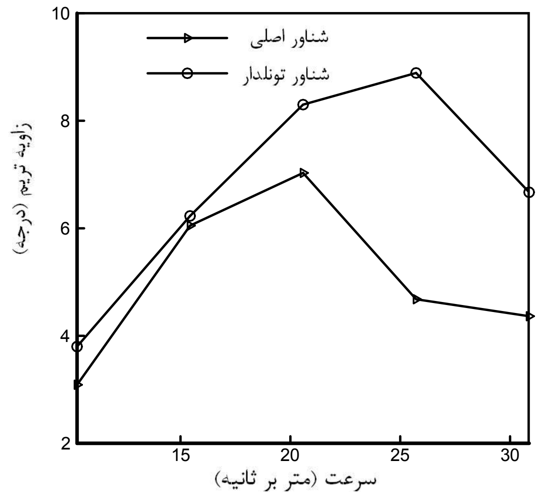
شکل ۱۰ تغییرات عمق غوطه‌وری شناور با ایجاد تونل

برای شناور تونل‌دار بیشتر خواهد بود.

در شکل ۱۱ تغییرات زاویۀ تریم در مقابل سرعت نمایش داده شده است. با اضافه کردن تونل طول مرکز فشار شناور تغییر کرده، زاویۀ تریم نسبت به‌حالت بدون تونل افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت یک نقطۀ ماکزیمم برای هر دو شناور وجود دارد که این نقطه نمایان‌گر شروع حالت پروازی است. با افزایش سرعت بعد از سرعت پروازی، زاویۀ تریم شروع به کم شدن می‌کند.

مطالبی که در رابطه با مقایسه زاویه تریم، عمق شناور و طول دنباله جریان ایجاد شده در پشت شناور مطرح شده را می‌توان به‌طور روشن‌تر در شکل ۱۲ مشاهده کرد.

در شکل ۱۲ دنباله جریان آب در پشت شناور مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت، دنباله جریان پشت شناور افزایش یافته، شناور به‌سمت بیرون لیفت پیدا می‌کند. با ایجاد تونل، این دنباله جریان افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱ تغییرات زاوبه تریم برای دو شناور

شکل ۱۲ جریان ایجاد شده در پشت شناور از نمای جانبی، الف) شناور اصلی، ب) شناور تونلدار (برای ۵ سرعت ۱۰ ، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر بر ثانیه به‌ترتیب از بالا به پایین)

۶- نتیجه‌گیری

دینامیک سیالات محاسباتی یکی از روش‌های عددی به‌منظور مدل‌سازی جریان سیالات در حالت چندفازی است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس-فلوئنت مدل‌سازی دوفازی سیال جهت به‌دست آوردن نیروی درگ وارد بر شناور و نیز مدل‌سازی سطح آزاد مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این کار بررسی اثرات اضافه نمودن تونل‌های جانبی (براساس الگوی شناور بلیدرانر) بر روی نیروی درگ و زاویۀ تریم بوده است که برای این منظور با انتخاب شناور کوگار به‌عنوان شناور پایه، تونل‌های جانبی بر روی این پلت‌فرم ایجاد شده است. سپس مدل‌سازی و تحلیل‌های مورد نظر برای هر دو نوع شناور (بدون تونل‌های جانبی و با تونل‌های جانبی) انجام گرفته است. برای پیدا کردن موقعیت تعادل شناور از میان‌یابی خطی استفاده شده است؛ بدین صورت که شناور را در چند حالت مختلف از لحاظ عمق و زاویۀ تریم قرار داده، نیروی لیفت و مرکز فشار شناور در این حالت‌ها با استفاده از حل عددی استخراج شد. سپس با استفاده از این دو اصل که اولاً زمانی شناور از لحاظ حرکت هیو در تعادل است که وزن شناور با لیفت برابر باشد و ثانیاً زمانی شناور در حرکت پیچ در تعادل است که طول مرکز فشار در شناور با مرکز جرم برابر باشد؛ به میان‌یابی نتایج پرداخته، موقعیت تعادل شناور به‌دست آمده است. با مقایسه نیروی درگ وارد بر شناورها، ملاحظه شد که با ایجاد تونل نیروی درگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، همچنین سطح آزاد ایجاد شده بر روی دو شناور، در حالت‌های مختلف به نمایش گذاشته شد. با مشاهدۀ این کانتورها دیده شد که با افزایش سرعت در هر دو شناور عمق شناور کم شده، شناور به‌سمت بیرون آب حرکت می‌کند؛ به‌طوری که در حالت پروازی کاملاً خارج از آب می‌باشد؛ که این نتایج کاملاً منطقی است. نتایج گرفته شده از این حالت‌ها با نتایج روش تجربی سویتسکی مقایسه شده، که مقایسۀ این نتایج برای زاویۀ تریم و نیروی مقاومت کل نشان دهندۀ دقت مناسب روش حل عددی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه شد، روند تغییرات نیروی درگ برحسب سرعت در دو شناور به‌گونه‌ای است که در حالت جابه‌جایی نیروی درگ وارد بر شناور با تونل بیشتر است؛ ولی به مرور که به مود پروازی نزدیک می‌شود، نیروی درگ وارد بر شناور با تونل به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در ضمن تغییرات زاویۀ تریم با سرعت نیز نمایانگر افزایش زاویۀ تریم در شناور با تونل نسبت به شناور بدون تونل است.

۷- مراجع

[1] O. M. Faltinsen, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press, pp.342-355, 2006.

[2] E. R. Fultz, CFD Analysis of a Penta-hulled, Air-Entrapment, High-Speed Planning Vessel, Master's Thesis, *Mechanical Engineering*, Naval Postgraduate School, 2008.

[3] R. Panahi, E. Jahanbakhsh, M. S. Seif, Towards simulation of 3D nonlinear high-speed vessels motion, *Ocean Engineering*, Vol. 36, pp. 256-265, 2009.

[4] M. S. Seif, E. Jahanbakhsh, R. Panahi, M. H. Karimi, A unified computational method for simulating dynamic behavior of planing vessels. *China Ocean Engineering*, Vol. 23, pp. 517-528, 2009.

[5] E. Jahanbakhsh, R. Panahi, M. S. Seif, Catamaran motion simulation based on moving grid technique, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 17, pp. 128-136, 2009.

[6] S. Brizzolara, F. Serra, Accuracy of CFD codes in the prediction of planning surface hydrodynamic characteristics, *INSEAN (Italian Ship Model Basin)*, Rome, 2011.

[7] D. Savitsky, Hydrodynamic analysis of planing hulls, *Marine Technology*, No. 1, PP. 71-95, 1964.

[8] D. A. Jones, D. B. Clarke, FLUENT Code simulation of flow around a naval hull: the DTMB 5415, *Maritime Platforms Division, DSTO Defence Science and Technology Organisation*, Australia, 2010.

[9] A. V. Subramanian, P. V. V. Subramanian, N. S. Ali, *Pressure and Drag Influences Due to Tunnels in High-Speed Planing Craft*, Amsterdam:IOS Press, PAYS-BAS, 2007.

[10] M. S. Seif and E. Amini, performance comparison between planing monohull and catamaran at hihgh froude numbers, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B*, Vol. 28, No. B4, pp. 435-441, 2004.

[11] A. Vafaeesefat, M. S. Seif, M. Tavakoli Dakhrabadi, Hull form hydrodynamic optimization of high speed planning craft with variable deadrise angle by using genetic algorithm, *Scientific Research Monthly Journal Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, PP. 80-90, 2012. (In Persian)

[12] http://www.icemarine.com/design.htm,[2006].

[13] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume Of Fluid (VOF) method for the Dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201–221, 1981.