

تحلیل عددی هیدرودینامیکی شناور نظامی با پروانه دوتایی موازی و اثر شکل پاشنه

کریم اکبری وکیل آبادی^۱، حسین بردیده^۲، عباس حسن آبادی^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر akbari.karim@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد، مکانیک سیالات، صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۳- کارشناسی ارشد کشتی سازی، مدرس دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)، نوشهر

چکیده

یکی از مهم ترین فاکتورها در بهره گیری از شناورهای نظامی، قابلیت مانورینگ بسیار زیاد می باشد. تعیین فاصله بهینه بین پروانه های و از بدنه شناورها و از طرفی زاویه جریان ورودی به پروانه ها از مسائل بسیار پیچیده بوده که طراحان کشتی ها نگاه ویژه ای به آن دارند. در این مقاله به شبیه سازی و تحلیل هیدرودینامیکی یک شناور نظامی با در نظر گرفتن دو پروانه مخالف چرخنده، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته است. جهت شبیه سازی این فرایند از نرم افزار فلونت ۵/۱۴ استفاده شده است. یکی از بخش هایی که شکل آن در میزان نیروهای مقاومت وارد بر بدنه شناور مؤثر است، شکل پاشنه شناور می باشد. در این تحقیق از فرم بدنه شناور فریگیت DTMB5415 استفاده شده است که در قسمت اول با تغییر دادن زاویه انحنا و جابجایی محل انحنای پاشنه، در چند حالت بهترین شکل پاشنه از نظر هیدرودینامیکی انتخاب شده است. در مرحله بعد دو پروانه از نوع پروانه های مخالف چرخنده را در پشت پاشنه انتخابی قرار داده و برای زاویه شافت صفر درجه و دو درجه، تحلیل صورت گرفته است. برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل دو معادله ای $k-\epsilon$ RNG استفاده شده است. تحلیل به صورت جریان دو فاز در نظر گرفته شده و مدل سازی جریان دوفازی نیز با در نظر گرفتن روش volume of fluid method تحقق یافته است.

کلیدواژگان

دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه سازی سه بعدی، مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG، مدل دوفازی VOF

Hydrodynamic Numerical Analysis of the Naval ship with Twin-Propeller and Effect of the Stern Shape

Karim Akbari Vakilabadi¹, Hossein Bardideh², Abbas Hasanabadi³

1-Assistant Professor, Department of Mechanic Engineering Faculty, Imam Khomeini Maritime University, Nowshahr, Iran

2- MSc, fluid mechanics Noshirvani babol, Babol, Iran.

3-Lecturer, Department of Mechanic Engineering Faculty, Imam Khomeini Maritime University, Nowshahr, Iran

Abstract

One of the most important factors in using military vessels is the ability to maneuvering. Determining the distance between the impellers and the body of the boats and the angle of the flow into the butterflies are very complex issues that ship designers particularly look at. In This article investigated the hydrodynamic modeling and analysis of a military vessel by taking two anti-rotating propeller using computational fluid dynamics. Fluent 5.14 software is used to simulate this process. The stern of the vessel is one of the components that it's shape is effective on the resistance forces acting on the body of the vessel. The target vessel in this article was Frigate DTMB5415. First by altering the angle of the stern and displacement of the curvature of the stern, the best stern chosen from hydrodynamic point of view. Then two anti-rotating propeller was placed at the back of the chosen stern and analysis was performed for the shaft angles equal to zero and two degree respectively. Simulation of turbulent flow was performed by using $k-\epsilon$ RNG model with two equation. Two phase flow were considered for the analysis and modeling of two phase flow was carried out by volume of fluid method.

Keywords

Computational fluid dynamics, 3D simulation, $k-\epsilon$ RNG turbulent model, VOF two phase model

۱- مقدمه

در مهندسی معماری کشتی منظور از هیدرودینامیک بررسی نیروهای سیال آب وارد بر بدنه کشتی می‌باشد که مهم‌ترین خروجی آن محاسبه نیروی مقاومت سیال در برابر حرکت شناور می‌باشد. پس از محاسبه نیروی مقاومت، می‌توان مواردی مانند توان موردنیاز موتور، مشخصات پروانه، طراحی و بهینه‌سازی شکل بدنه را مشخص نمود.

در قسمت پاشنه شناورها به علت شکل و هندسه آن جریان پیچیده‌ای بوجود می‌آید که معمولاً به‌عنوان یک شناخته می‌شود. این منطقه شامل گردابه‌های نامنظم و تصادفی است. با توجه به خصوصیات ویک جریان در ناحیه ویک، توزیع سرعت جریان در پاشنه شناور که محل قرارگیری پروانه است، دارای توزیع ویک سه‌بعدی، غیریکنواخت و وابسته به زمان خواهد بود. در یک کشتی پروانه در پشت آن نصب و در وضعیت نسبتاً پیچیده‌ای از جریان کار خواهد نمود. عملکرد پروانه را با استفاده از نتایج در آب آزاد و یا استفاده از تحلیل‌های عددی می‌توان بررسی نمود، ولی در این بررسی‌ها تأثیرات متقابل پروانه و شناور در نظر گرفته نمی‌شود اما در این مقاله تأثیرات متقابل پاشنه و پروانه در نظر گرفته شده و نتایج واقعی‌تری حاصل گردیده است.

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

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 اگرچه حل‌های تحلیلی بسیار مؤثر و دقیق هستند اما برای هندسه‌های پیچیده نمی‌توانند به کار 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.

۱-۱- اشاره به مراجع

در مورد پژوهش‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی شناور با استفاده از CFD می‌توان به تحقیقات چنگ‌جی‌شنگ [۱] اشاره کرد. این مقاله به شبیه‌سازی سه‌بعدی موج‌های ایجاد شده در یک کانال بر اثر حرکت یک شناور می‌پردازد. هدف این مقاله به دست آوردن رابطه‌ای بین هندسه و پارامترهای سینماتیکی می‌باشد. آن‌ها جهت شبیه‌سازی توربولانس از مدل $k-\epsilon$ standard استفاده نمودند. احمد [2] به شبیه‌سازی شناور 5415 DTMB را با استفاده از cfx در دو عدد فرود متفاوت پرداخت. او برای مدل‌سازی جریان سطح آزاد از روش VOF و برای شبیه‌سازی توربولانس از مدل $k-\epsilon$ standard استفاده نمود. دو مدل پتانسیل و توربولانس برای مدل‌سازی جریان حول شناور وجود دارد. مدل پتانسیل بر پایه Boundary Element Method (BEM) است که برای مطالعه امواج در سطح آزاد در این مقاله استفاده شده است.

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 قابل‌اتکا درآمده است. جونز و کلارک [3] در سال ۲۰۱۰ با استفاده از فلوئنت به شبیه‌سازی جریان اطراف یک بدنه 5415 DTMB پرداختند. این مطالعه به بررسی قابلیت روش حجم محدود برای شبیه‌سازی سطح

در معادلات فوق u, v, w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x, y, z و τ_{ij} نیز مؤلفه‌های تنش مربوط به تانسور تنش می‌باشند و داریم:

$$\tau = \mu (\nabla v + \nabla v^T) \quad (3)$$

۱ بردار سرعت کلی، μ لزجت مولکولی می‌باشد.

در یک جریان آشفته برای به‌دست‌آوردن معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی ابتدا معادلات مذکور برای کمیت‌های لحظه‌ای نوشته‌شده، سپس به طرفین هر معادله متوسط گیری زمانی اعمال می‌شود. با جایگذاری مقادیر متوسط زمانی و مقادیر نوسانی به‌جای مقادیر لحظه‌ای در معادله پیوستگی جریان آرام و نیز استفاده از قواعد متوسط‌گیری رینولدز معادله پیوستگی جریان آشفته به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i') = 0 \quad (4)$$

با اعمال متوسط‌گیری زمانی بر معادله مومنتم جریان آرام با ویسکوزیته ثابت و با ساده‌سازی، معادله مومنتم برای جریان آشفته به‌صورت زیر می‌شود.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \quad (5)$$

تنها تفاوت معادله حاصله با معادله اندازه حرکت برای کمیت‌های لحظه‌ای اضافه شدن عبارت آخر در سمت راست معادله، یعنی ترم $-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j'$ می‌باشد. این عبارت را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا رینولدز می‌نامند.

$$K = \frac{1}{2} U_i U_i \quad (6)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) U_{i,j} U_{i,j} \quad (7)$$

در رابطه فوق C_μ یک ضریب تجربی است که مقدار آن برابر ۰/۰۹ می‌باشد. معادلات انتقال زیر که برای معادلات K, ε بکار می‌روند، عبارتند از:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (9)$$

ثابت‌های این مدل که در گستره وسیعی از جریان‌های آشفته وارد می‌شوند به قرار زیرند:

$$C_1 = 1.44, C_1 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_K = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

آزاد، مقاومت کل یک شناور و میدان سرعت با استفاده از شبکه‌های سازمان‌یافته و شبکه‌های بی‌سازمان پرداخته است. مقاومت کل در حالت شبکه‌بندی هگزاهدال نسبت به روش آزمایشگاهی دارای خطای ۳/۸ درصد بوده است. امواج تولیدشده 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 فلوننت توان شبیه‌سازی امواج، ویک، میدان سرعت و فشار، شبیه‌سازی سطح آزاد و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور را دارا می‌باشد.

تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با مدل‌سازی جریان اطراف پروانه صورت گرفته است. چارلس ای بادوی و همکاران [4] به بررسی اندرکنش پروانه و سکان و تأثیرات متقابل آن دو پرداختند. آن‌ها این بررسی را بر روی یک شناور با سه طول متفاوت انجام دادند. جهت شبیه‌سازی حرکت پروانه از مدل Arbitrary Mesh Interface (AMI) استفاده کردند. آن‌ها جهت بررسی تأثیر زاویه شافت و زاویه سکان تحلیل را برای زاویه شافت 0 درجه و 7.5- با زاویه سکان مختلف در هر حالت انجام دادند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که در هر دو زاویه شافت، با افزایش زاویه سکان راندمان پروانه بالا می‌رود و راندمان در زاویه سکان 10 درجه حاصل می‌گردد. در این زاویه با افزایش ضریب پیشروی راندمان افزایش قابل‌توجهی داشته است. ام کلین [5] به بررسی تجربی جریان حول سه نوع شناور فله‌بر، کانتینربر و شناور RO/RO پرداختند. در این پژوهش تأثیر شکل حبابی سینه بر پروفیل موج بر روی بدنه نسبت به زمان، به‌طور آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفت.

۲- معادلات حاکم

با توجه به فیزیک جریان، جریان به‌صورت تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\rho \nabla \cdot (v \cdot v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

۳- هندسه، دامنه و شرایط مرزی

ابعاد اصلی و ابعاد مدل آن در زیر آورده شده است. نسبت مقیاس نمونه اصلی نسبت به مدل ۲۴/۸۳۲ است.

جدول ۱- پارامترهای شناور واقعی و مدل

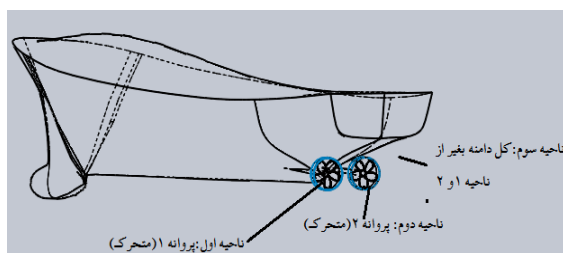
parameter	real size	model size
Length	142.037m	4.861
Wet surface area	6.179	0.248
Draft	6.189	0.248
Block coefficient	0.506	

حل جریان به صورت دو فاز آب و هوا در نظر گرفته شده است. مدل سازی جریان دوفازی نیز با در نظر گرفتن روش volume of fluid method تحقق یافته است. حل جریان نیز به صورت گذرا و گام زمانی برابر ۰/۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. جهت کوپل نمودن معادلات فشار و سرعت از روش simple استفاده شده است. در حالت دارای پروانه، دو پروانه مخالف چرخنده به قطر واقعی ۳/۵ متر و تعداد دوران پروانه واقعی 400 rpm در نظر گرفته شده است.

جدول ۲- ابعاد پروانه

تعداد پره	قطر پروانه	قطر هاب	نسبت قطر هاب به پروانه
۵	۳/۵	۰/۶۷ متر	۰/۱۹۱

دو ناحیه متحرک که دربرگیرنده پروانه است در پشت شناور در نظر گرفته شده که طول و قطر این نواحی متناسب با قطر پروانه می باشد. هدف از ساخت این نواحی مدل سازی حرکت دورانی دو پروانه و هاب و وارد ساختن ترم شتاب کوریولیس در معادلات کلی حاکم بر جریان سیال می باشد. در این نواحی از شبکه بی سازهان چهاروجهی استفاده شده و تعداد المان های هر یک از این نواحی ۱۰۴۱۰۰۰ می باشد. شبکه بندی سطح پره با استفاده از مش مثلثی بوده و ابعاد مش ها بر روی سطح پره متغیر بوده، به طوری که در ناحیه اطراف نوک و لبه از تراکم المان بیشتر نسبت به نواحی دیگر استفاده شده است. (به دلیل اهمیت بالای بررسی جریان در این نواحی). برای شبکه بندی کل حجم متحرک از نسبت رشد ۱/۱۵ (از سطح پروانه به کل حجم) استفاده شده است.

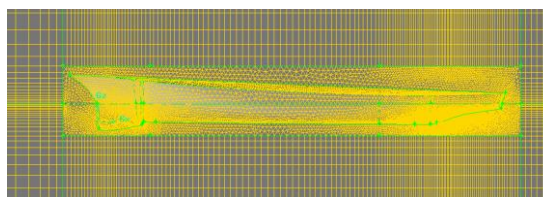


شکل ۲- نواحی حل برای مدل سازی

در شناورهای نظامی دو پروانه ای به دلیل کم بودن فضای پشت پاشنه جهت نصب پروانه، شافت را زاویه دار نسبت به خط افق می سازند تا این کمبود فضا جبران شود. در این پژوهش دو حالت جریان مورد بررسی قرار گرفته است در حالت اول شافت موازی سطح افق در نظر گرفته شده و در

جهت المان بندی هندسه و اعمال شرایط مرزی از نرم افزار گمبیت ۲،۴،۶ استفاده شده است. به دلیل پیچیده بودن هندسه شناور و جهت بررسی اثرات مختلف جریان لزج بر روی مدل لازم است تا حد ممکن از شبکه بهینه استفاده شود تا جواب های دقیقی به دست بیاید. در این تحقیق از شبکه بی سازهان در ناحیه نزدیک شناور و از چند حجم (بلوک) با شبکه بندی سازمان یافته در نواحی دور از شناور استفاده شده است تا بتوانیم با کمترین تعداد سلول در اطراف شناور جواب های معقولی به دست آوریم.

تعداد کل المان های حل در حالت بدون پروانه ۱۷۰۰۰۰ می باشد که ۱۳۰۰۰۰ آن مربوط به ناحیه بی سازهان (نزدیک شناور) و بقیه مربوط به نواحی سازمان یافته مکعبی شش وجهی است. نمایی از شبکه بندی ناحیه و اندازه دامنه حل در زیر آورده شده است.



شکل ۱- شبکه بندی اطراف شناور

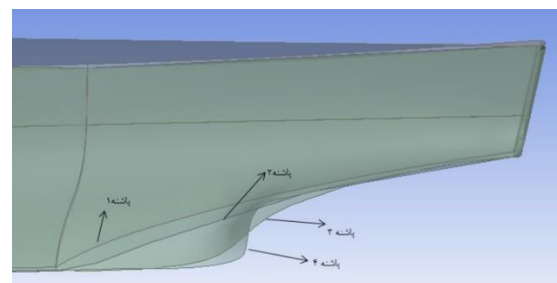
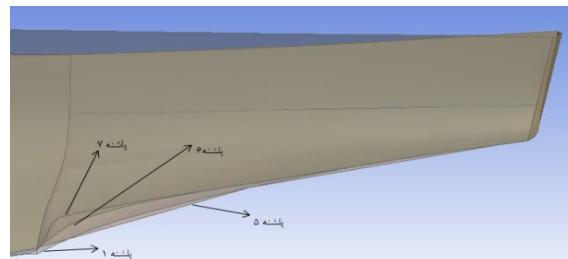
طول شناور d در نظر گرفته شده و فاصله صفحه ورودی تا ابتدای شناور $2d$ ، فاصله انتهایی آن هم $3d$ و به اندازه $0.9d$ از بالا (فاز هوا) و $1.3d$ از پایین (فاز آب) در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل ۱ مشخص است در ناحیه پاشنه شناور از شبکه بندی متراکم تری نسبت به نقاط دیگر استفاده شده است. جهت بهینه سازی شبکه بندی از نسبت رشد ۰/۷ از سطح شناور به حجم دربرگیرنده استفاده شده است.

حالت دوم شافت دارای زاویه ۲ درجه به سمت پایین نسبت به سطح افق می‌باشد.

۴- فرضیات و نتایج

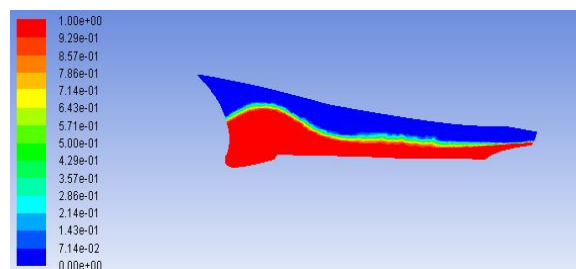
با توجه به اینکه عدد فرود $fr = \frac{V}{\sqrt{gl}}$ در شبیه‌سازی شناور مهم است و این عدد در نمونه واقعی و مدل باید یکسان باشد، با در نظر گرفتن سرعت ۱۵ متر بر ثانیه ۳۰ گره در نمونه واقعی، سرعت مدل را برابر ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. (مقیاس ۲۴/۸۳۲)

شکل پاشنه‌های تغییر یافته در شکل ۳ آورده شده است. پاشنه‌ها در شش حالت تغییر یافته‌اند و تفاوت آن‌ها در مکان اتصال بدنه به پاشنه و شیب آنهاست. در پاشنه‌های ۲، ۳ و ۴ مکان اتصال بدنه با پاشنه جلوتر آمده (همراه با تغییر شیب) و در پاشنه‌های ۵، ۶ و ۷ مکان تغییری نکرده اما شیب آن‌ها تغییر کرده است. پاشنه ۱ نشان‌دهنده پاشنه اصلی است و شکل‌های بعدی پاشنه‌های تغییر یافته را نشان می‌دهد.



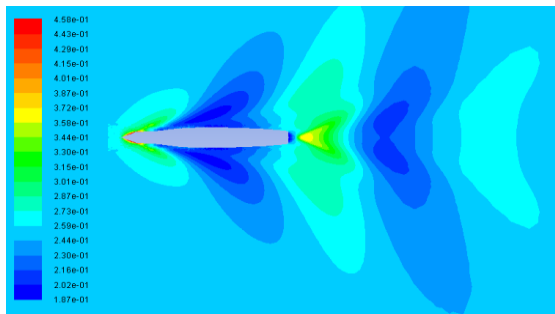
شکل ۳- پاشنه‌های تغییر یافته در شناور DTMB5415

کانتور مربوط به فاز جریان بر روی بدنه در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴- کانتور فاز جریان بر بدنه

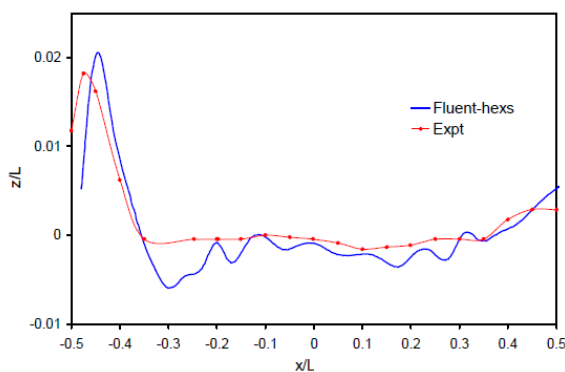
کانتور موج در حالت اصلی (پاشنه اصلی) در شکل ۵ آورده شده است. ناحیه آبی‌رنگ نشان‌دهنده فرو رفتگی‌های موج است. در نقاط جلوی شناور رنگ کانتور زرد و قرمز است یعنی در این ناحیه موج دارای تفرع است. در نقاط میانی ناحیه آبی‌رنگ نشان‌دهنده فرو رفتگی‌ها و ناحیه زردرنگ پشت شناور نشان‌دهنده بالا بودن سطح آب است.



شکل ۵- کانتور موج در سطح آزاد

۴-۱- اعتبار آزمایشی

جهت اعتبار آزمایشی از داده‌های تجربی مربوط به شناور DTMB5415 [6] استفاده شده است. نمودار مربوط به نمودار مربوط به ارتفاع موج ایجاد شده بر روی بدنه در طول شناور در شکل ۶ آمده است.

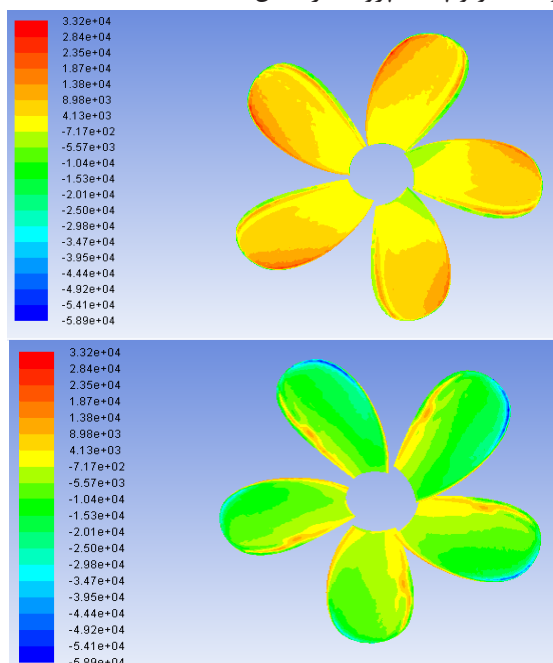


شکل ۶- پروفیل موج بر روی بدنه در دو حالت تجربی و عددی

همچنین مقادیر مربوط به ضریب مقاومت فشاری، اصطکاکی و مجموع در نتایج تجربی با مقادیر این ضرایب در شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مقادیر ضرایب مقاومت در داده‌های تجربی و عددی		
	EXP	cfD
CF	2.806×10^{-3}	2.743×10^{-3}
C_p	3.094×10^{-3}	2.989×10^{-3}
C_t	5.9×10^{-3}	5.723×10^{-3}

مدل سازی پروانه در دو حالت دارای زاویه شافت و بدون زاویه شافت انجام شده است. کانتور فشار بر روی وجه جلو و پشت پروانه در شکل ۷ آمده است.



شکل ۸- کانتور فشار بر روی وجه جلو (بالا) و پشت پروانه (پایین)

فشار سیال در پشت پره با نزدیک شدن به سمت پره کاهش یافته و ایجاد یک منطقه مکش در ورودی پره می نماید در این منطقه علاوه بر وجود روند کاهش فشار، شاهد افزایش سرعت جریان نیز هستیم. روند کاهش فشار تا نزدیکی سطح پره ادامه پیدا کرده تا در نزدیک سطح به دلیل وجود تنش های صفحه های فشار به طور ناگهانی افزایش می یابد. در سطح دیگر پره که سطح پرفشار پره نیز نامیده می شود، اندازه مومنتم جریان به همراه فشار، افزایش می یابد؛ همچنین در لبه های حمله پره به دلیل اثرات برخوردی آب با آن، بیشترین فشار وارده بر پره ایجاد شده است. گشتاور و نیروی تراست و راندمان هر پروانه در دو حالت بدون زاویه و دارای زاویه، در جدول آمده است.

جدول ۵- گشتاور، تراست و راندمان پروانه ها در دو حالت (بدون زاویه و دارای زاویه)

راندمان	گشتاور	تراست	پروانه	
۰/۵۵	۳/۰۳۶	۱۱۷/۵۱	۱	
۰/۵۵۲	۳/۰۵۵	۱۱۷/۸	۲	
۰/۵۲۶	۳/۱۲	۱۱۶/۸۱	۱	
۰/۵۲۶	۳/۱۳۷	۱۱۷/۶	۲	

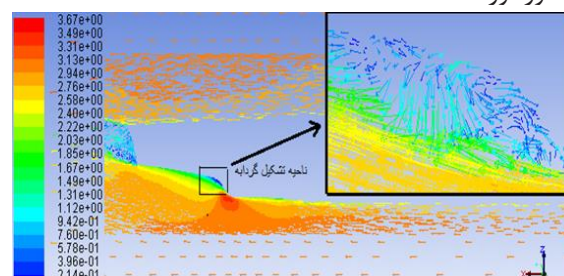
نتایج شبیه سازی عددی با نتایج تجربی تفاوت ناچیزی دارد که این موضوع نشان دهنده درستی فرضیات اعمال شده است. مقادیر نیرو لیفت و درگ به ازای هر پاشنه در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- ضرایب هیدرودینامیکی پاشنه ها

مجموع درگ	درگ ویسکوز	درگ فشاری	شماره پاشنه
۶۵/۶۹	۲۲/۶۲	۴۳/۰۷	پاشنه ۱
۶۹/۵۷	۲۳/۱	۴۶/۴۷	پاشنه ۲
۷۰/۷	۲۴/۰۶	۴۶/۷	پاشنه ۳
۷۳/۴	۲۲/۸	۵۰/۶	پاشنه ۴
۶۷/۸۵	۲۲/۹	۴۴/۹	پاشنه ۵
۶۴/۶۸	۲۳/۳۸	۴۱/۲۹	پاشنه ۶
۶۷/۶۱	۲۳/۸۲	۴۳/۷۸	پاشنه ۷

با دقت در مقادیر بالا نتیجه می گیریم که وقتی از انحنای پاشنه زیاد می شود (حالت ۲ و ۳ و ۴) درگ ویسکوز به دلیل افزایش سطح تماس پاشنه با آب بیشتر می شود، درگ فشاری به دلیل شیب ناگهانی پاشنه (مخصوصاً در پاشنه ۴)، مقدار آن افزایش می یابد. از بین پاشنه های بالا پاشنه شماره ۶ دارای کمترین ضریب درگ می باشد که به عنوان حالت بهینه انتخاب شده است.

در قسمت پاشنه ناحیه کم فشاری ایجاد می شود که این اختلاف فشار بین سینه و پاشنه سبب ایجاد درگ فشاری بر بدنه می شود، لذا در پاشنه هایی که دارای تغییر شیب ناگهانی هستند (پاشنه ۴) ناحیه با گرادیان فشار معکوس ایجاد شده که سبب ایجاد جریان چرخشی در قسمت پاشنه می شود. در شکل ۷ بردار سرعت جریان عبوری از شناور آورده شده است.



شکل ۷- بردار سرعت و جریان چرخشی در پاشنه

۴-۲- شبیه سازی شناور با پروانه

از آنجایی که ضریب پیشروی $z = \frac{V_A}{ND}$ در پروانه واقعی و مدل باید برابر باشد و با توجه به اینکه مقیاس مدل ۲۴/۸۳۲ می باشد، تعداد دوران را در مدل 2000 rpm را نظر می گیریم. (V_A سرعت جریان آب).

in a Restricted Waterway”, *Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval*, France, 2012

- [2] Y.M. Ahmed., “Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different Froude numbers”, *Naval Architecture and Marine Engineering Department, Alexandria University, Alexandria, Egypt*, 2011
- [3] 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.
- [4] Charles E. Badoen, Alexander B. Phillips, Stephen R. Turnock, “Influence of drift angle on the computation of hull-propeller-rudder interaction”, *Fluid Structure Interactions Research Group, Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton*, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom, 2015
- [5] G.F. Clauss, M. Klein, “Experimental investigation on the vertical bending moment in extreme sea states for different hulls”, *Technical University of Berlin, Ocean Engineering Division, Sekr. SG-17, Salzuffer 17-19, 10587 Berlin, Germany*, 2016
- [6] Larsson, L., Stern, F. and Bertram, V., “Benchmarking of Computational Fluid Dynamics for Ship Flows: The Gothenburg 2000 Workshop”, *Journal of Ship Research*, **47**, No.1, pp. 63-81, March 2003.

نیروی تراست به وجود آمده در حالت زاویه دار کمتر از حالت بدون زاویه است. همچنین به دلیل افزایش قابل توجه گشتاور در این حالت، حالت زاویه دار دارای راندمان کمتری نسبت به حالت بدون زاویه است.

۴-۳- نتایج

برای داشتن راندمان کل مناسب نیاز بود که اثرات تداخل پروانه ها و شکل پاشنه شناور مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به محدودیت ابعادی در پاشنه شناورهای نظامی نیاز بود که علاوه بر زاویه صفر درجه شافت، زاویه دو درجه نیز جهت داشتن جریان مناسب تر در ورودی پروانه مورد بررسی قرار گیرد.

در مرحله اول شیب پاشنه شناور در شش حالت تغییر یافت و در همه حالات جریان مورد بررسی قرار گرفت. یک حالت (پاشنه ۶) به عنوان بهترین حالت (شیب پاشنه) انتخاب شده است. با افزایش سطح پاشنه (پاشنه ۲ و ۳) مقدار نیروی لیفت افزایش یافته ولی به نیروی درگ به دلیل ایجاد ناحیه کم فشار در پشت پاشنه (جریان چرخشی در پاشنه ۴) افزوده شده است.

در شناورهای نظامی دو پروانه ای به دلیل کم بودن فضای پشت پاشنه جهت نصب پروانه، شافت را زاویه دار نسبت به خط افق می سازند تا این کمبود فضا جبران شود. در دو حالت شافت بدون زاویه و شافت با زاویه دو درجه تحلیل انجام شد و به این نتیجه حاصل شد که با اعمال زاویه شافت، راندمان به میزان ۲/۷ درصد کاهش یافت.

۵- فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Re	عدد رینولدز
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	تنش (s)
J	ضریب پیشروی
T	نیروی تراست (N)
D	قطر پروانه (m)
Fr	عدد فرود
VA	سرعت پیشروی (m/s)
Z	تعداد پره

۶- مراجع

- [1] Ji Sheng Cheng, OUAHSINE Abdellatif., “3-D Numerical Simulation of Convey-Generated Waves