

مدل سازی عددی جریان اطراف شناور کاتاماران و محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی آن به روش دینامیک سیالات محاسباتی

ابوذر ابراهیمی^{۱*}، علی حاجیلوی^۲ و منوچهر راد^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: شناور کاتاماران، مقاومت هیدرودینامیکی، مدل سازی عددی، دینامیک سیالات محاسباتی، آزمایش مدل.	یکی از مراحل مهم در طراحی شناورها، محاسبه مقاومت هیدرودینامیکی شناور می باشد. امروزه استفاده از روش های عددی و بخصوص روش دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه مقاومت شناور (درگ) به شاخه ای از علم مهندسی دریا تبدیل شده است. در این مقاله جریان اطراف بدنه یک شناور کاتاماران (دو بدنه) به روش عددی مدل سازی شده و مقاومت آن محاسبه گردیده است. مدل سازی با استفاده از نرم افزار حل عددی فلوئنت (FLUENT) انجام شده است. این نرم افزار به روش حجم محدود، معادلات حاکم بر سیال را حل می کند. مدل سازی برای دو نسبت S/L (فاصله بین دو نیم بدنه به طول شناور) انجام شده است. در انتها نتایج حل عددی با نتایج تجربی آزمایش مدل شناور مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از روش عددی در سرعت های پایین شناور مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد؛ اما در سرعت های بالاتر، نتایج روش عددی خطایی در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد نسبت به نتایج تجربی نشان می دهد. با افزایش فاصله بین دو نیم بدنه، مقاومت کل شناور کاهش می یابد که دلیل آن، کاهش اثرات متقابل بدنه ها بر روی یکدیگر است.

۱- مقدمه

باعث می شود شناور به سرعت های بالاتری دست یابد. همچنین فاصله بین نیم بدنه ها سبب پایداری عرضی^۳ بهتر و ایمنی بیشتر شناور شده و باعث افزایش مساحت عرشه شناور می شود که موارد فوق به ویژه برای شناورهای مسافربری یک مزیت محسوب می شود. در شکل ۱ یک شناور کاتاماران مسافربری نمایش داده شده است. محققین و طراحان کشتی برای رسیدن به بدنه های مناسب تر از لحاظ هیدرودینامیکی تحقیقاتی را بر روی شناورهای مختلف انجام می دهند. اگرچه روش آزمایش مدل مطمئن ترین روش برای محاسبه مقاومت شناورها

امروزه شناورهای تندرو در صنعت حمل و نقل دریایی نقش بسزایی را ایفا می کنند. از جمله این شناورها می توان به شناورهای کاتاماران^۱ اشاره کرد. شناورهای کاتاماران به جای یک بدنه بزرگ (مانند شناورهای عادی) از دو نیم بدنه^۲ باریک و کشیده تشکیل شده اند. نیم بدنه های باریک سبب کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناور شده و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ab_ebrahimi@cmu.ac.ir

۱. مربی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۳. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

¹ Catamaran

² Demihull

³ Transverse stability

این تحقیقات ذکر شده‌اند. آزکوتا [۲] با استفاده از روش حل عددی، مقاومت یک شناور با فرم بدنه سری ۶۰ و شناور دیگری با فرم بدنه استاندارد ویگلی^۲ را محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه کرد. در مقاله سالاس [۳] مقایسه‌ای بین روش CFD و آزمایش مدل برای به‌دست آوردن مقاومت یک کاتاماران تندرو انجام شده است. در این مقاله از دو کد مختلف برای محاسبه مقاومت کاتاماران استفاده شده است. سپس هر دو سری نتایج عددی با نتایج تجربی به‌دست آمده از تست مدل مقایسه شده است. در مقاله کومار [۴] تاثیرات دیواره حوضچه کشش بر روی مقاومت مدل شناور به‌صورت عددی و تجربی بررسی شده است. حل عددی توسط نرم‌افزار فلوئنت و به‌وسیله ۶۴ دستگاه رایانه که با استفاده از روش پردازش موازی کار می‌کردند، انجام شده است. دورنهییل [۵] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت عملکرد یک شناور تندرو با بدنه پروازی^۳ را مدل‌سازی و مقاومت هیدرودینامیکی آن را محاسبه کرد و نتایج عددی را با نتایج آزمایش مدل مقایسه کرد.

سنوکاک [۶] به کمک نرم‌افزار فلوئنت جریان اطراف یک مدل ناوشکن را مدل‌سازی کرده است. وی تاثیر عوامل مختلف از قبیل نوع مش‌بندی، کیفیت مش و روش‌های تشخیص سطح آزاد را بر روی امواج اطراف شناور بررسی کرده است.

تاها را و همکاران [۷] با استفاده از یک کد عددی به نام CFDSHIP-IOWA مدل‌سازی عددی را بر روی یک شناور کانتینربر انجام داد و صحت نتایج عددی را با استفاده از نتایج تجربی بررسی کرد.

شکبیافر و همکاران [۸] مقاومت یک شناور پروازی را به سه روش تحلیلی، عددی و تجربی محاسبه کردند. برای حل عددی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شد. در نهایت برای صحت‌سنجی نتایج عددی، مدل آزمایشگاهی از جنس

می‌باشد، اما این روش نیز دارای معایبی از قبیل نیاز به حوضچه کشش، صرف وقت زیاد و همچنین هزینه ساخت مدل می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش سرعت رایانه‌ها، روش‌های عددی برای تحلیل سیالات پیشرفت قابل توجهی داشتند که از مهمترین این روش‌ها دینامیک سیالات محاسباتی^۱ می‌باشد که امروزه استفاده از آن در صنایع دریایی گسترش یافته است. از روش CFD می‌توان در علم مهندسی دریا برای حل برخی جریان‌های اطراف بدنه شناورها استفاده کرد ولی به‌دلیل پیچیده بودن این جریان‌ها، ساده‌سازی‌های زیادی باید صورت گیرد که دقت نتایج را پایین می‌آورد. این روش با وجود مفید بودن در بعضی قسمت‌ها هنوز تا این‌که بتواند با اطمینان جایگزین آزمایش مدل شود فاصله زیادی دارد. لذا می‌تواند تنها در طراحی‌های اولیه و یا تحقیق به موازات آزمایش مدل به‌کار گرفته شود [۱].



شکل ۱- یک شناور کاتاماران مسافبری

۲- پیشینه تحقیق

در زمینه محاسبه مقاومت شناورها به روش مدل‌سازی عددی تحقیقات فراوانی صورت گرفته است و در بیشتر آزمایشگاه‌های معتبر دریایی نرم‌افزارهای حل عددی رای این کار توسعه یافته است که در مقالات گوناگون نتایج

² Wigley hull form

³ Planing hull

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

۳- معادلات حاکم

معادله پیوستگی برای یک حجم کنترل در حالت کلی به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{c.v} \rho dv + \int_{c.s} \rho \vec{v} dA = 0 \quad (1)$$

پس از انتگرال‌گیری، معادله به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2)$$

برای جریان تراکم‌ناپذیر و حالت یکنواخت^۲ معادله به شکل زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

حرکت یک سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر با استفاده از معادلات ناویر-استوکس^۳ بیان می‌شود [۹]:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = \rho g - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4)$$

در این معادلات \vec{u} ، g ، p ، ρ و μ به ترتیب بردار سرعت، نیروی حجمی به ازای واحد جرم (شتاب ثقل)، فشار، چگالی و ویسکوزیته سیال می‌باشد. جریان اطراف بدنه شناور همواره به صورت آشفته می‌باشد و ویژگی اصلی این جریان‌ها میدان جریان نوسانی می‌باشد. این نوسانات باعث می‌شود که کمیت‌های انتقالی مانند مومنتم و انرژی نیز نوسان کنند. این نوسانات دارای اندازه کوچک و فرکانس بالا می‌باشند که مدل‌سازی مستقیم آن‌ها در محاسبات مهندسی مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد خواهد بود. به جای مدل‌سازی مستقیم این معادلات، می‌توان به روش متوسط‌گیری رینولدز آن‌ها را ساده کرد که معادلات RANS^۴ نامیده می‌شوند. در متوسط‌گیری رینولدز متغیرهای لحظه‌ای جریان به دو قسمت متوسط و نوسانی تقسیم می‌شوند. برای مؤلفه‌های سرعت می‌توان نوشت:

$$u_i = \overline{u_i} + u_i' \quad (5)$$

فایبرگلاس ساخته شد و در حوضچه کشش دانشگاه شریف مورد آزمایش قرار گرفت.

در تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۱۳ انجام می‌شود که دارای قابلیت‌های گوناگونی می‌باشد. علاوه بر مدل‌سازی جریان و سطح آزاد اطراف شناور کاتاماران، مقاومت کل شناور نیز محاسبه شده و همچنین تاثیر فاصله بین نیم‌بدنه‌ها^۱ بر روی مقاومت شناور در هر دو روش عددی و آزمایش مدل بررسی می‌شود. در شکل ۲ مدل شناور کاتاماران مورد استفاده در آزمایش‌ها و مدل‌سازی عددی نمایش داده شده است. در جدول ۱ نیز ابعاد اصلی شناور کاتاماران مشخص شده است. مدل به نحوی ساخته شده است که توسط پیچ‌های تنظیم کننده که می‌توان تاثیر تغییرات فاصله بین نیم‌بدنه‌ها (S) را بر روی مقاومت بررسی کرد.



شکل ۲- مدل شناور کاتاماران مورد استفاده در مدل‌سازی عددی و تجربی

جدول ۱- ابعاد اصلی مدل ساخته شده

ابعاد اصلی مدل	اندازه (متر)
طول (L)	۰/۶۶۵
عرض نیم بدنه‌ها (B)	۰/۰۳۸
آبخور (D)	۰/۰۳۰
ارتفاع (H)	۰/۰۷۵
فاصله بین نیم‌بدنه‌ها (S)	۰/۱۲ و ۰/۰۹

- 2- Steady State
- 3- Navier-Stokes Equations
- 4- Reynolds-Averaged Navier-Stokes

- 1- Separation

در جریان‌های آشفته که شامل دو فاز آب و هوا می‌باشند، استفاده همزمان از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG و روش کسر حجمی سیال^۲ (VOF) می‌تواند به نتایج دقیق تری منجر شود [۱۱].

در تحقیق حاضر با توجه به کارهای انجام شده قبلی در ابتدا از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، RNG k- ε و Realizable $k-\varepsilon$ استفاده و نتایج بررسی شد. نتایج نشان داد که دقت سه مدل تفاوت چندانی ندارد اما زمان محاسبات مدل $k-\varepsilon$ استاندارد تقریباً ۱۰ درصد کمتر از دو مدل دیگر است. بنابراین این مدل برای ادامه کار انتخاب شد. $k-\varepsilon$ استاندارد یک مدل دو معادله‌ای استاندارد است که از دو معادله انتقال به شکل زیر برای بیان خواص آشفتگی جریان استفاده می‌کند:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

معادله اول برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و معادله دوم برای اتلاف انرژی آشفتگی (ε) حل می‌شود. در این معادلات، G_k نشان‌دهنده تولید انرژی جنبشی آشفتگی در اثر گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشد. همچنین σ_k و σ_ε اعداد پراوتل و نیز $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ اعداد ثابت و μ_t ویسکوزیته آشفتگی^۳ می‌باشند.

این مدل آشفتگی نیمه تجربی یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای کاربردهای صنعتی می‌باشد [۱۲].

۲-۳- مدل‌سازی سطح آزاد

برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال، دامنه حل به سلول‌های کوچک‌تر تقسیم شده و معادلات حل می‌شود. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار عددی فلوئنت برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار برای تحلیل جریان سیال، معادلات حاکم به روش حجم

که در آن \bar{u}_i و u'_i به ترتیب مؤلفه‌های متوسط و نوسانی سرعت بوده و i برای سه جهت اصلی از ۱ تا ۳ تغییر می‌کند. به همین صورت فشار و متغیرهای اسکالر دیگر را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (6)$$

با جای‌گذاری عبارت‌های فوق در معادلات پیوستگی و مومنتم و متوسط‌گیری زمانی، معادلات متوسط‌گیری شده زمانی به فرم زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] \quad i=x,y,z \quad (7)$$

عبارت $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ که در معادلات فوق ظاهر شده است، نشان‌دهنده اثرات آشفتگی می‌باشد و تنش‌های رینولدز نامیده می‌شود. برای تعیین مقادیر تنش‌های رینولدز برحسب مقادیر معلوم جریان، از مدل‌های آشفتگی^۱ استفاده می‌شود تا معادلات قابل حل باشد [۱۰].

۳-۱- مدل‌های آشفتگی

تعداد معادلات دیفرانسیل موجود در مدل آشفتگی بیانگر نوع مدل می‌باشد. ساده‌ترین مدل‌های آشفتگی که فاقد هر معادله دیفرانسیلی می‌باشند با عنوان مدل جبری یا مدل صفر معادله‌ای شناخته می‌شوند. مدل‌هایی که دارای یک معادله دیفرانسیلی هستند در گروه مدل‌های یک معادله‌ای قرار می‌گیرند و در نهایت مدل‌هایی که دارای دو معادله هستند مدل‌های دو معادله‌ای نام دارند. البته مدل‌هایی وجود دارد که بیش از دو معادله دیفرانسیلی را در خود جای داده اند مانند مدل RSM که هر یک از عبارت‌های تانسور تنش رینولدز را مستقیماً با یک معادله انتقال مرتبط می‌کند. بدیهی است که با بالا رفتن تعداد معادلات، وقت و هزینه بیشتری باید جهت حل هر مدل صرف نمود.

² Volume of Fluid (VOF)

³ Turbulent Viscosity

¹ Turbulence Models

انجام می‌شود. برای فاز q ام، این معادله به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (9)$$

معمولاً سمت راست معادله که نمایانگر چشمه می‌باشد، صفر می‌باشد اما می‌توان یک مقدار ثابت را برای آن در نظر گرفت [۱۵].

قابل ذکر است که معادله کسر حجمی برای فاز اصلی حل نمی‌شود و برای محاسبه آن از رابطه کلی زیر می‌توان استفاده کرد:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (10)$$

نتیجه حل این معادلات عددی مثل α خواهد بود که بیانگر نسبت حجمی دو فاز سیال درون هر یک از سلول‌های محاسباتی می‌باشد. برای مثال $\alpha = 1$ بیانگر پر بودن حجم سلول از آب و $\alpha = 0$ بیانگر پر بودن حجم سلول از هوا می‌باشد. در این حالت با حل یک معادله انتقال اضافی برای نسبت حجمی α علاوه بر معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی محیط جریان به سه بخش تقسیم می‌شود:

الف) $\alpha = 1$: سیال اول

ب) $\alpha = 0$: سیال دوم

ج) $0 < \alpha < 1$: منطقه گذر بین دو سیال

بدین ترتیب جرم حجمی و لزجت دینامیکی سیال موثر در کل دامنه محاسباتی به‌جای دو فاز سیال به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (11)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (12)$$

در این حالت جرم حجمی و لزجت سیال در گذر بین دو فاز تغییرات پیوسته‌ای داشته و این مسئله برای معادلات حاکم بر جریان که به کمیت‌های پیوسته نیاز دارند، مناسب است. مبنای این روش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

محدود^۱ حل می‌شوند. مدل‌سازی سطح آزاد و محاسبه مقاومت شناور از دو بخش تشکیل می‌شود که عبارتند از:

۱- مدل‌سازی جریان

۲- مدل‌سازی سطح آزاد

با مدل‌سازی جریان و سطح آزاد، توزیع سرعت و فشار اطراف بدنه به‌دست آمده و نیروهای وارد بر آن با انتگرال‌گیری از تنشهای وارد بر بدنه محاسبه می‌شوند. روش‌های مختلفی برای یافتن شکل سطح آزاد وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته کلی تقسیم کرد [۱۳]:

۱- روش‌هایی که سطح آزاد را به‌عنوان یک مرز جهشی در نظر گرفته و حرکت آن را دنبال می‌کنند که به روش سطحی^۲ معروفند. در این روش از شبکه‌های منطبق بر مرز استفاده می‌شود که در هر بار تکرار حل تا انطباق کامل بر سطح آزاد جابه‌جا می‌شوند.

۲- روش‌هایی که از یک مرز استفاده نمی‌کنند (روش‌های تسخیر سطح آزاد یا روش حجمی). در این روش محاسبات روی شبکه ثابت انجام می‌گیرد و شکل سطح آزاد با سلول‌هایی که بخشی از آن‌ها پر می‌شود مشخص می‌گردد.

در این تحقیق، برای محاسبه سطح آزاد از روش کسر حجمی سیال استفاده می‌شود. روش VOF، برای حالتی که مسئله شامل دو یا چند سیال مخلوط نشدنی می‌باشد و سطح مشترک بین دو سیال مدنظر می‌باشد، استفاده می‌شود [۱۲]. در تحقیق حاضر، این سطح مشترک نشان دهنده امواج اطراف بدنه شناور می‌باشد. در این روش همچنین اثرات نیروی ثقل و کشش سطحی سیال نیز در نظر گرفته می‌شود. این روش ساده اما قوی، برای حل مسائل پیچیده شامل سطح آزاد بسیار انعطاف‌پذیرتر و کارآمدتر از روش‌های دیگر می‌باشد [۱۴].

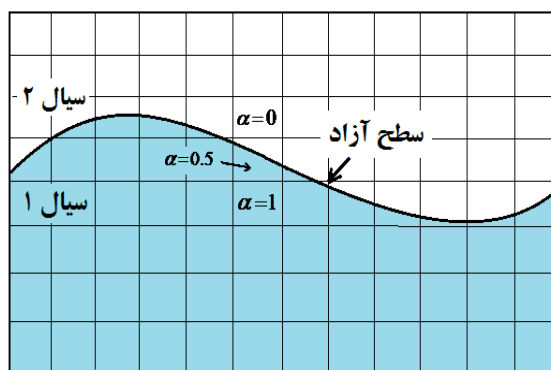
در روش VOF، یافتن سطح مشترک بین دو فاز با حل یک معادله پیوستگی برای کسر حجمی فازهای موجود

¹ Finite Volume Method (FVM)

² Interface Tracking

کمتری برای دامنه حل استفاده کرد. باتوجه به مشکلات شبکه‌بندی مجدد، مدل‌سازی با همین ابعاد انجام شد. برای مدل‌سازی شناور کاتاماران دامنه محاسباتی توسط پیش‌پردازنده گمبیت^۱ شبکه‌بندی شده است. در کل دامنه حل از شبکه ساختار یافته^۲ با المان‌های شش‌وجهی^۳ استفاده می‌شود. از آنجا که مدل‌سازی برای دو نسبت $S/L=0.13$ و $S/L=0.18$ انجام می‌شود، شبکه‌بندی نیز برای دو حالت متفاوت است. برای انتخاب شبکه مناسب در هر حالت، در ابتدا پنج شبکه‌بندی مختلف مورد استفاده قرار گرفت و با بررسی نیروی مقاومت در هر حالت، شبکه بهینه انتخاب شد.

در شکل ۵ نمودار مقاومت برحسب اندازه شبکه‌های مختلف برای حالت $S/L=0.18$ در سرعت ۲ متر بر ثانیه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول‌ها پس از حدود ۳۲۰۰۰۰، تغییرات چشمگیری در مقدار نیروی مقاومت ایجاد نمی‌شود. بنابراین این شبکه برای ادامه محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۶ شبکه بندی دامنه حل برای حالت $S/L=0.18$ نمایش داده شده است. قابل ذکر است که با ریزتر شدن شبکه محاسباتی، در بسیاری از موارد گام زمانی مورد استفاده نیز کوچک‌تر خواهد شد که منجر به طولانی‌تر شدن زمان حل مسئله خواهد شد. از آنجا که در نواحی نزدیک بدنه شناور بدلیل وجود لایه مرزی، تغییرات سرعت بیشتر است، شبکه در این قسمت‌ها ریزتر شده تا نتایج، دقت بهتری داشته باشد.



شکل ۳- مبنای روش کسر حجمی سیال

۳-۳- شبکه‌بندی دامنه حل

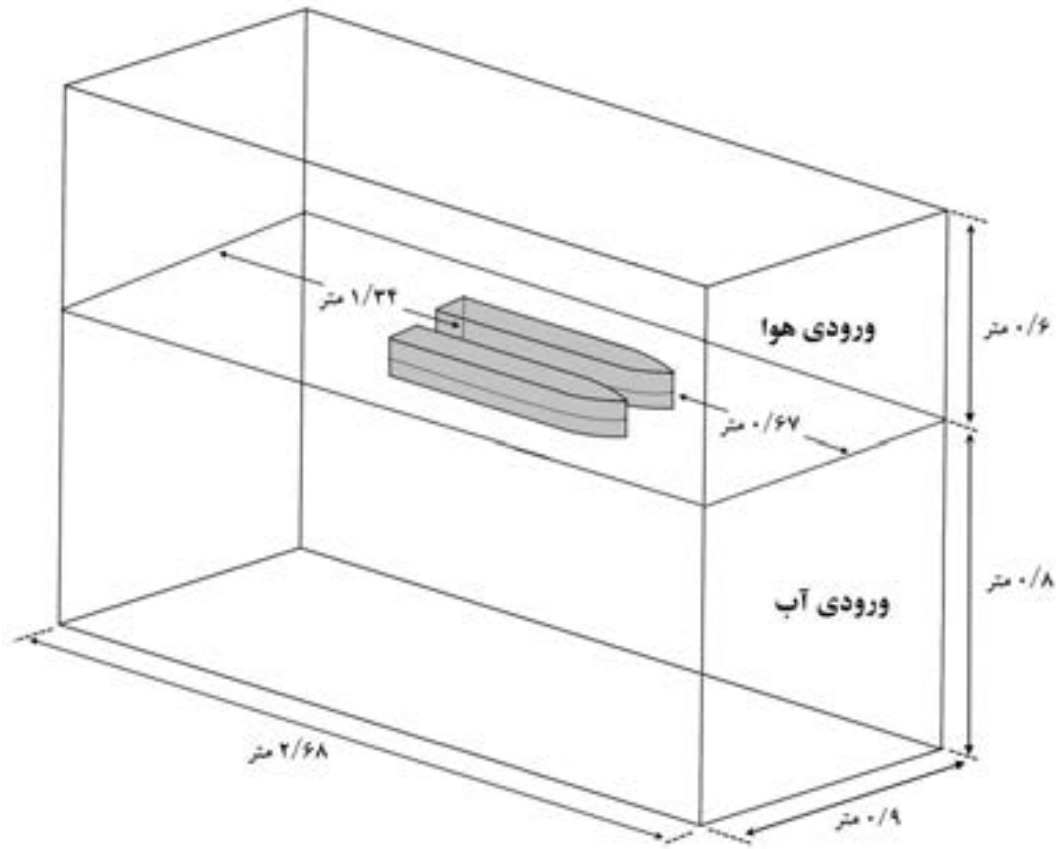
مدل‌سازی هندسه مسئله و شبکه‌بندی مناسب آن در مدل‌سازی عددی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. برای حل عددی یک مسئله ابتدا باید ابعاد دامنه حل مورد نیاز را باتوجه به هندسه مسئله تخمین زد. ابعاد دامنه باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا مرزهای دامنه دور از بدنه شناور واقع شده و تاثیری بر پارامترهای جریان اطراف بدنه و جواب مسئله نداشته باشد. بزرگ بودن بیش از حد دامنه نیز باعث بالا رفتن حجم محاسبات خواهد شد. در تحقیق حاضر ابعاد دامنه محاسباتی براساس کارهای انجام شده قبلی و به‌خصوص مقاله دورنپیل [۵] انتخاب شده است. ابعاد دامنه حل که برای مدل‌سازی استفاده می‌شود در شکل ۴ نمایش داده شده است. فاصله جلوی مدل تا مرز ورودی به اندازه طول مدل و فاصله عقب مدل تا مرز خروجی ۲ برابر طول مدل می‌باشد. باتوجه به شکل ۶ و ۷، اگرچه در انتهای محدوده حل امواج کوچکی ایجاد شده است اما این امواج تاثیر زیادی بر روی مقاومت شناور ندارند. بنابراین نیازی به بزرگ‌تر کردن ابعاد دامنه حل وجود ندارد. باتوجه به مقارن بودن مدل شناور کاتاماران، برای کاهش حجم محاسبات فقط نیمی از دامنه مدل‌سازی می‌شود.

ابعاد مشخص شده در شکل ۴ در مراحل اولیه مدل‌سازی عددی انتخاب شده است. اگر چه باتوجه خواص فیزیکی فیزیکی هوا و آب، می‌توان در محدوده سیال هوا، از ارتفاع

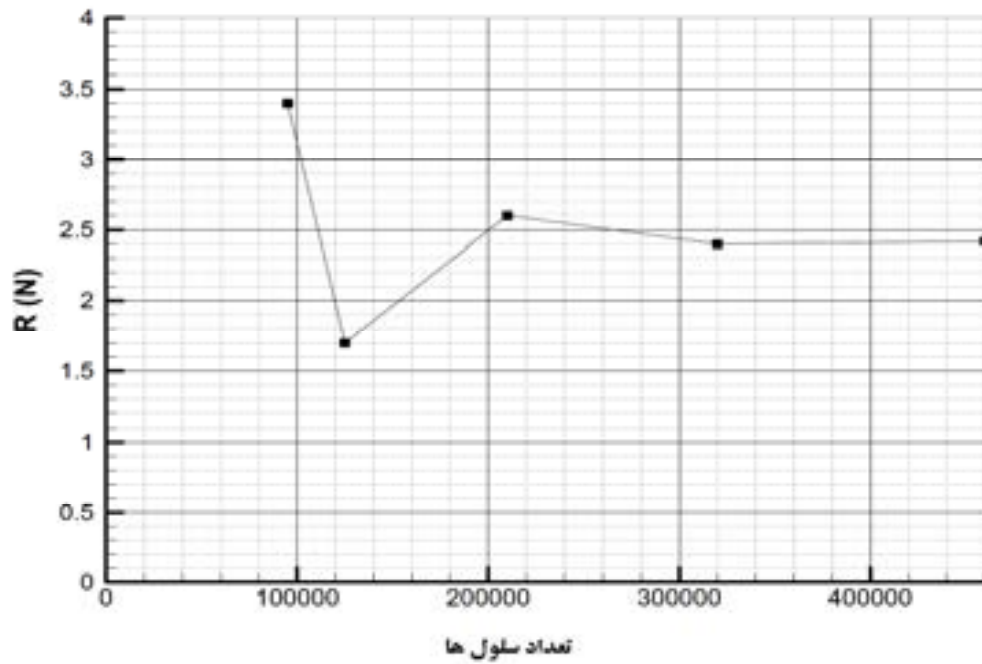
¹ Gambit

² Structured Mesh

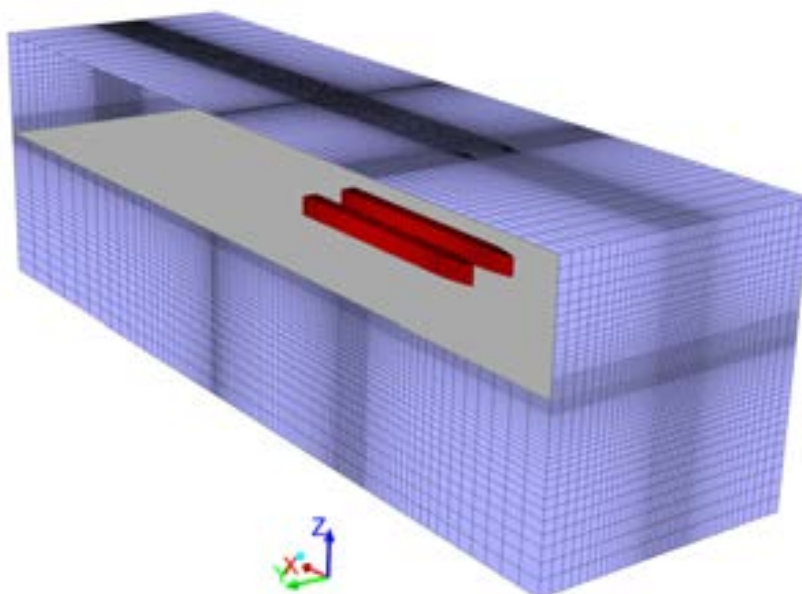
³ Hexahedral Cells



شکل ۴- ابعاد دامنه محاسباتی



شکل ۵- تغییرات مقاومت شناور برحسب تعداد سلول های شبکه



شکل ۶- شبکه‌بندی دامنه محاسباتی

که V و L سرعت و طول شناور می‌باشد. مدل‌سازی شناور کاتاماران در سرعت‌های 0.5 ، 1 ، 1.5 ، 2 و 2.5 متر بر ثانیه انجام می‌شود که معادل عدد فرود حدود 0.2 تا 1 می‌باشد. برای مدل‌سازی، مسئله به صورت گذرا^۵ حل می‌شود اما نتایج حالت پایدار^۶ برای ما دارای اهمیت می‌باشد. برای حل مسئله، گام‌های زمانی به اندازه 0.005 ثانیه انتخاب می‌شود. معیار رسیدن به جواب تقریباً پایدار در این مدل‌سازی عبارت است از:

- بررسی روند تغییرات نیروی مقاومت در اثر گذشت زمان
- بررسی روند تغییرات سطح آزاد در پشت بدنه شناور
طبق بررسی‌های انجام شده بر روی این دو معیار، حدوداً ۹ ثانیه طول می‌کشد تا حرکت مدل به یک حالت پایدار برسد. پس از این زمان مقدار مقاومت به دست آمده از مدل‌سازی تقریباً ثابت مانده و تغییرات ناچیزی دارد. بنابراین برای همه سرعت‌ها همین زمان برای رسیدن به حالت پایدار در نظر گرفته شده است. یکی از خروجی‌های مدل‌سازی عددی حرکت شناور، شکل امواج ایجاد شده اطراف بدنه می‌باشد. امواج ایجاد شده در اطراف بدنه

سطح ورودی دامنه از روی سطح آب‌خور به دو بخش تقسیم و قسمت پایین به ورودی آب و قسمت بالا به ورودی هوا تبدیل می‌شود (شکل ۳). مرز کناری نیز به همین شکل تقسیم می‌شود. شرایط مرزی که بر روی مسئله اعمال شده عبارتند از:

- شرط عدم لغزش^۱ برای بدنه شناور
- شرط جریان یکنواخت^۲ برای مرز ورودی آب و هوا
- شرط مرزی دیواره متحرک^۳ برای مرزهای کناری، بالا و پایین دامنه.

۴- نتایج مدل‌سازی عددی

برای بررسی مقاومت شناورها عدد فرود^۴ که حاصل تقسیم اینرسی به نیروهای ثقلی می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (13)$$

¹ Non Slip
² Velocity Inlet
³ Moving Wall
⁴ Froude Number

⁵ Unsteady
⁶ Steady state

با افزایش فاصله بین نیم‌بدنه‌ها، امواج دو نیم‌بدنه تاثیر کمتری بر روی هم دارند. همچنین با افزایش سرعت شناور، امواج بزرگتری تولید شده است که سبب می‌شود مقاومت موج شناور و در نتیجه مقاومت کل افزایش یابد. برای بررسی دقت رو عددی در محاسبه امواج شناور، در شکل ۸ امواج ناشی از حرکت شناور با سرعت ۲ متر بر ثانیه که از آزمایش مدل و مدل‌سازی عددی به‌دست آمده است، با هم مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تشابه زیادی با امواج به‌دست آمده از دو روش وجود دارد که نشان دهنده دقت خوب مدل‌سازی عددی در محاسبه امواج شناور دارد. با ریزتر کردن شبکه می‌توان با دقت بیشتری امواج را محاسبه نمود اما با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری از این کار صرف‌نظر شد. برای بررسی دقیق شکل امواج، پروفیل سرعت و توزیع فشار در روش تجربی نیاز به امکانات پیشرفته‌ای می‌باشد که متأسفانه در زمان انجام آزمایش‌ها در دسترس نبوده است. به‌همین دلیل مقایسه شکل امواج برای دو روش تجربی و عددی صرفاً به‌صورت کیفی و ظاهری انجام شده است. این مقایسه صرفاً جهت اطمینان بیشتر به نتایج عددی انجام شده است و برای صحت‌سنجی از نتایج تست مقاومت شناور استفاده شده است.

در شکل ۹ نمودار مقاومت کل شناور برای دو نسبت S/L برحسب عدد فرود ترسیم شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که فاصله بین نیم‌بدنه‌ها نسبت عکس با مقاومت کل شناور دارد. یعنی هرچه نیم‌بدنه‌ها از هم فاصله بیشتری داشته باشند، مقاومت کمتر خواهد بود. دلیل این امر کاهش اثرات تداخل دو نیم‌بدنه بر روی همدیگر می‌باشد که باعث می‌شود امواج نیم‌بدنه‌ها تاثیر کمتری بر روی هم داشته باشند و در نتیجه مقاومت شناور کمتر شود.

شناورها شامل امواج سینه و پاشنه می‌باشد. انرژی که کشتی برای ایجاد این امواج صرف می‌کند، مقاومت امواج کشتی را تشکیل می‌دهد. در شکل ۷ امواج ایجاد شده و سطح آزاد اطراف مدل شناور کاتاماران در سرعت‌های ۱ و ۲ متر بر ثانیه برای دو نسبت S/L نمایش داده شده است.



V=1 m/s



V=2 m/s

الف) $S/L=0.13$ 

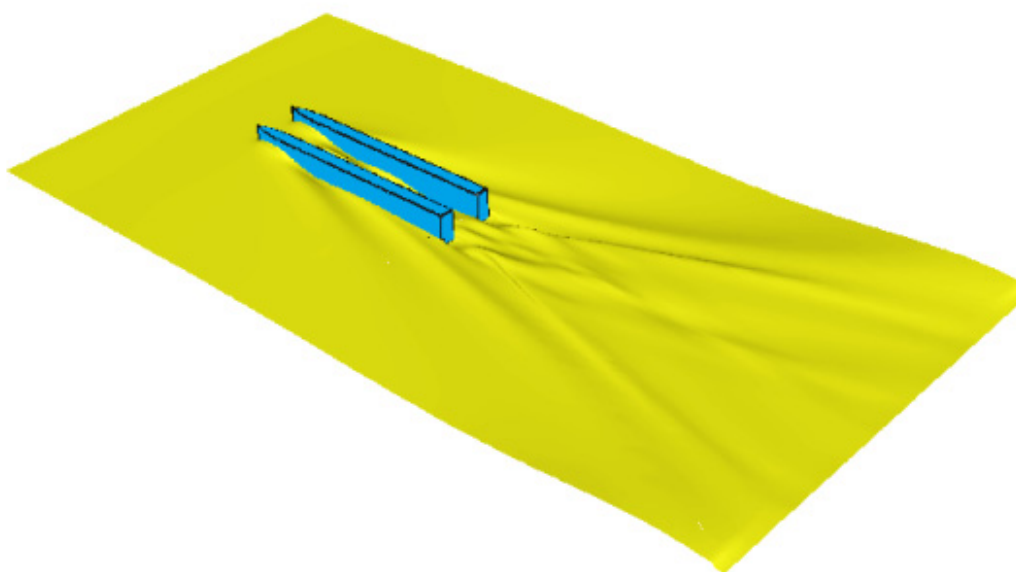
V=1 m/s



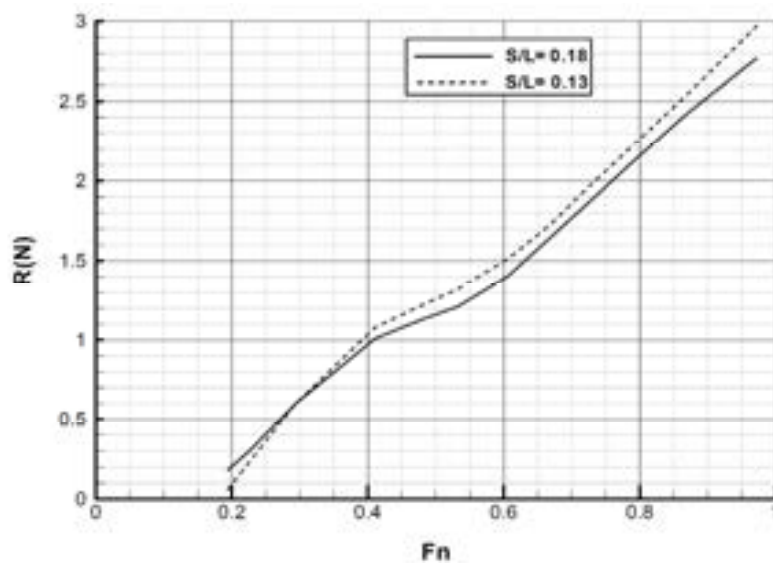
V=2 m/s

ب) $S/L=0.19$

شکل ۷- امواج ایجاد شده و سطح آزاد اطراف مدل کاتاماران



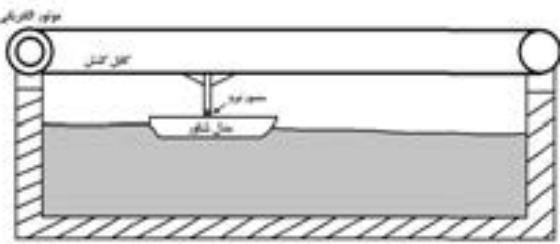
شکل ۸- مقایسه امواج محاسبه شده از روش عددی و آزمایش مدل



شکل ۹- مقاومت کل شناور در دو نسبت S/L

۵- آزمایش مدل

می‌گیرد. در شکل ۱۱ سیستم کشش به صورت شماتیک نمایش داده شده است. پس از هر مرحله تست مدل، سرعت و مقدار نیروی مقاومت مدل ثبت می‌شود. برای اطمینان از دقت نتایج، می‌توان یک تست را چند بار تکرار کرد.

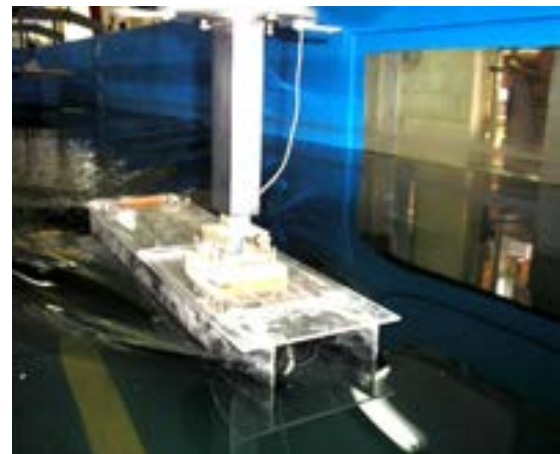


شکل ۱۱- شکل شماتیک سیستم کشش مدل

مدل شناور کاتاماران در دو نسبت S/L و در سرعت‌های مختلف بین 0.5 تا $2/5$ متر بر ثانیه (مشابه حل عددی) مورد آزمایش قرار گرفته است.

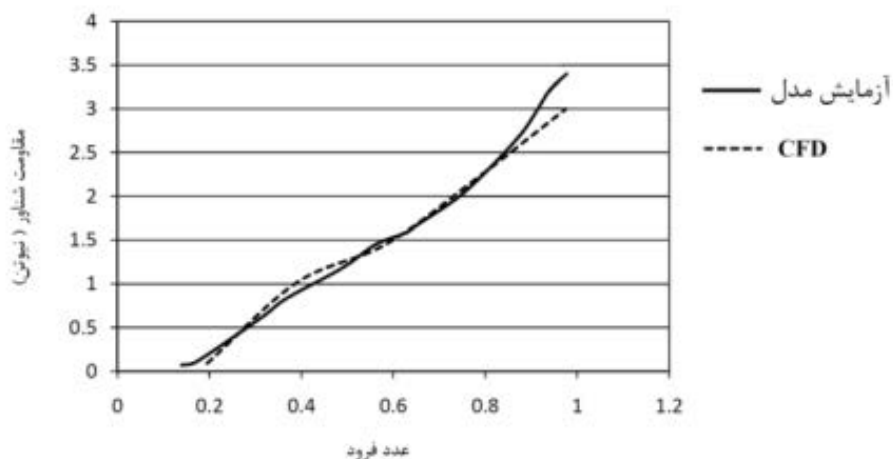
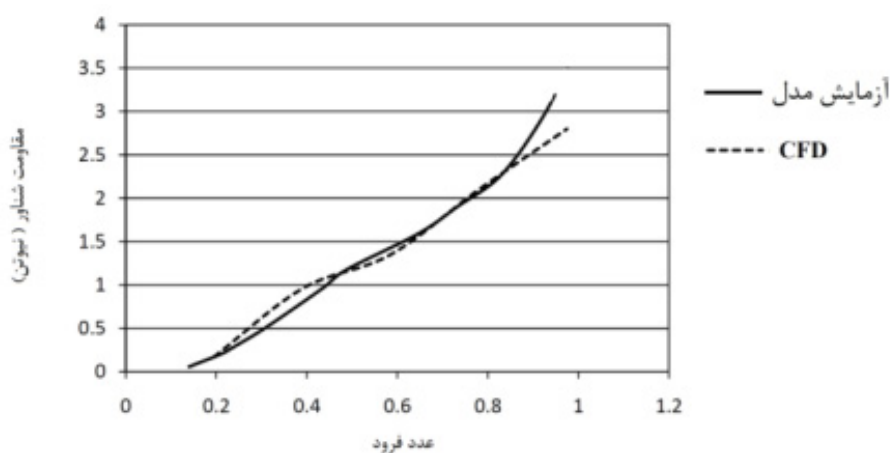
در شکل ۱۲ نتایج آزمایش مدل شناور کاتاماران برای هر دو نسبت S/L با نتایج مدل‌سازی عددی مقایسه شده است. بخش عمده‌ای از مقاومت شناورها را دو مولفه مقاومت اصطکاکی و مقاومت موج تشکیل می‌دهد. در سرعت‌های بالا امواج تشکیل شده اطراف بدنه شناور بزرگ‌تر بوده و مقاومت موج درصد بیشتری از مقاومت کل را به خود اختصاص می‌دهد که این امر در شناورهای تندرو کاملاً مشهود است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، در هر دو حالت، نتایج عددی و تجربی تا عدد فرود حدود 0.8 مطابقت خوبی با هم دارند اما پس از آن خطای روش عددی به حدود 15 درصد می‌رسد. دلیل اصلی این خطا می‌تواند ضعف نرم‌افزار مدل‌سازی در محاسبه مقاومت موج شناور باشد که باعث بوجود آمدن خطا در نتایج می‌شود.

در این تحقیق برای صحت سنجی نتایج مدل‌سازی عددی از نتایج آزمایش مدل استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری مقاومت، مدل شناور در حوضچه کشش آزمایش می‌شود. برای این کار ابتدا یک مدل از شناور کاتاماران ساخته شده است (شکل ۲). این مدل که از جنس پلکسی گلاس ساخته شده است، دارای دو نیم‌بدنه مشابه و متقارن می‌باشد. این دو نیم‌بدنه به صورت کاملاً مجزا از هم می‌باشند و به وسیله یک ورق پلکسی گلاس در کنار هم قرار می‌گیرند. آزمایش‌ها در حوضچه کشش آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. در شکل ۱۰ مدل کاتاماران در حال آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- مدل کاتاماران در حال آزمایش در حوضچه کشش

مدل توسط یک سیستم کشش الکتریکی در طول حوضچه کشش با سرعت مشخص شده به حرکت در می‌آید و نیروی طولی (مقاومت شناور) وارد بر شناور توسط سنسورهای نیرو ثبت می‌شود. در شروع و پایان حرکت مدل به دلیل آن‌که حرکت شتاب‌دار می‌باشد، نیروی ثبت شده دارای خطا می‌باشد و به همین دلیل فقط نیروی وارد بر مدل در میانه حوضچه کشش (که سیستم به یک سرعت ثابت رسیده است) مورد بررسی قرار

الف) $S/L = 0.13$ ب) $S/L = 0.18$

شکل ۱۲- مقایسه نتایج آزمایش مدل و حل عددی

۶- نتیجه گیری

است. از این رو انجام آزمایش‌های مدل برای بررسی دقت روش‌های عددی لازم بوده و حصول اطمینان از نتایج عددی مستلزم مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی خواهد بود. مقایسه نتایج تجربی و مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد تطابق خوبی بین این نتایج در محدوده سرعت‌های پایین وجود دارد. اما در سرعت‌های بالاتر خطای حل عددی به ۱۵ درصد می‌رسد. در سرعت‌های بالا مقاومت موج سهم زیادی در مقاومت کل شناورها دارد و از آنجا که دقت نرم‌افزار مورد استفاده در مدل‌سازی عددی در محاسبه مقاومت موج پایین است، به نظر می‌رسد دلیل خطای بین روش تجربی و عددی در سرعت‌های بالا همین امر باشد.

در این تحقیق مدل‌سازی جریان اطراف بدنه مدل شناور کاتاماران به وسیله نرم‌افزار فلوئنت انجام شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد روش‌های حل عددی می‌تواند برای حل جریان اطراف بدنه شناور به کار رود اما نتایج در سرعت‌های بالا دارای خطای نسبتاً زیادی می‌باشد. لازم به ذکر است رسیدن به جواب مناسب و منطقی در روش‌های عددی مستلزم درک کامل مسئله و رعایت نکات لازم در مدل‌سازی از قبیل شبکه‌بندی مناسب، و اعمال شرایط مرزی صحیح می‌باشد. همواره دقیق‌ترین روش برای محاسبه مقاومت یک شناور، آزمایش مدل مناسب آن

باتوجه به نتایج عددی، به نظر می‌رسد این روش به خوبی رفتار هیدرودینامیکی شناور را مدل‌سازی کرده و می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای آزمایش مدل در طراحی و محاسبه مقاومت شناورها مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [۱] فخرايي، الف. (۱۳۸۴). "بررسی شناور ایرکاویتی، ساخت و آزمایش مدل آن". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک.
- [2] Azcueta, R. (1998). "Ship resistance prediction by free-surface RANS computations". TU Hamburg-Harburg.
- [3] Salas, M., Luco, R., Sahoo, P.K., Browne, N. Lopez, M. (2004). "Experimental and CFD resistance calculation of a small fast catamaran". Institute of Naval and Maritime Sciences, Faculty of Engineering Sciences, University Austral of Chile, Valdivia, Chile.
- [4] Kumar, M., Subramanian, V. (2007). "A numerical and experimental study on tank wall influences in drag estimation". Journal of Ocean Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 192-205.
- [5] Thornhill, E. (2003). "Planing hull performance evaluation using a general purpose CFD code". Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, the National Academy of Sciences.
- [6] Senocak, I., Iaccarino, G. (2005). "Progress towards RANS simulation of free-surface flow around modern ships". Center of turbulence research, Annual research briefs.
- [7] Tahara, Y., Wilson, R.V., Carrica, P.M., Stern, F. (2006). "RANS simulation of a container ship using a single-phase level set method with overset grids and the prognosis for extension to self-propulsion simulator". Journal of marine science and technology, Vol. 11, No. 4, pp. 209-228.
- [۸] شکیبافر، م.ح.، گنجی، د.، شکیبافر، م.ح. (۱۳۸۷). "محاسبه‌ی مقاومت شناور پروازی با سه روش تحلیلی، عددی و تجربی". مجموعه مقالات دهمین همایش صنایع دریایی.
- [9] White, F.M. (2003). "Fluid Mechanics". McGraw-Hill.
- [۱۰] موسوی راد، س.م. (۱۳۸۳). "محاسبه مقاومت لزجی شناور به روش عددی". پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک.
- [11] Zhao, Q., Misra, S.K. (2004). "Numerical study of a turbulent hydraulic jump". Proceedings of the 17th Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, New York.
- [12] FLUENT, (2005). "Introductory FLUENT notes". Fluent Inc.
- [۱۳] پناهی، ر.، جهان بخش، الف.، سیف، م.س. (۱۳۸۵). "مدل‌سازی عددی آزمایش‌های هیدرودینامیکی، روابط حاکم و معتبرسازی". مجموعه مقالات هفتمین همایش صنایع دریایی.
- [14] Hirt, C.W., Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". Journal of computational physics, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225.
- [15] FLUENT, (2010). "FLUENT Manual". General Multiphase model.