محاسبه ضرایب هیدوردینامیکی زیردریایی به روش ترکیبی

سجاد اردشیری[۱*] ، احسان یاری[۲]

[۱] دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، s.ardeshiri@mut-es.ac.ir
[۲] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مکانیک، ehsanyari11@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

کلمات کلیدی:
زیردریایی
ضرایب هیدرودینامیک
مکانیزم حرکت صفحه‌ای
تست کشش مورب
تست بازوی چرخان

چکیده

افزایش دقت در محاسبات ضرایب هیدرودینامیکی، تعیین دقیق‌تر پیش‌بینی مانور شناور را نتیجه می‌دهد. روش‌های مختلف تعیین ضرایب هیدرودینامیکی در تعیین دقت ضرایب، بخصوص در شبیه‌سازی عددی موثر خواهد بود. در این مطالعه آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام)، تست کشش مورب و تست بازوی چرخان، شبیه‌سازی شده و دقت نتایج آنها با داده‌های آزمایشگاهی سنجیده شده و با هم مقایسه شده‌اند. دقت نتایج شبیه‌سازی مدل آشفتگی جریان کی-اِپسیلون ری‌الایزیبل و کا-اومگا اس‌اس‌تی در شبیه‌سازی آزمایش تست بازوی چرخان بررسی شده است. همچنین روشی جهت کاهش ابعاد دامنه و زمان حل در شبیه‌سازی حرکت سوِای و هیو خالص ارائه و مورد بحث و ارزیابی قرار گرفته است. این روش با دقتی برابر روش مرسوم شبیه‌سازی، محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی را با کاهش بیش از نصف اندازه شبکه و زمان حل، ممکن می‌سازد. با ترکیب روش‌های فوق محاسبه ضرایب میرایی حرکات هیو و سوِای با خطای زیر ۸/۵ درصد قابل انجام است. همچنین تعیین ضرایب میرایی حرکات پیچ و یاو با خطای کمتر از ۹/۵ درصد قابل انجام است. مقادیر جرم افزوده حرکات سوِای و هیو با خطای کمتر از ۲۰ درصد و برای حرکات پیچ و یاو با خطای کمتر از ۱۵ درصد قابل انجام است.

Calculation Submarine Hydrodynamic Coefficient by Hybrid Method

Sajad ardeshiri [1*], E. Yari [2]

[1] Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, s.ardeshiri@mut-es.ac.ir
[2] Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, ehsanyari11@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 03 Aug 2022
Accepted: 07 Mar 2023

Keywords:
Submarine
hydrodynamic coefficient
planar motion mechanism (PMM)
captive test
RA(Rotating arm) test

ABSTRACT

Increase in the accuracy of hydrodynamic coefficient calculation cause to increase in the prediction of vessel maneuvering ability. Different methods of determining hydrodynamic coefficients will be effective in determining the accuracy of coefficients, especially in numerical simulation. In this paper, we do planar motion mechanism (PMM) test, oblique towing test, and rotating arm test simulations to compare the accuracy of their results with experimental data. The accuracy of the simulation results of K-ε Realizable and K-ω SST turbulence model has been investigated in the simulation of the rotating arm test. Also, a method to reduce the dimensions of the domain and the run-time in the simulation of the motion of pure-Sway and pure-heave has been presented, discussed, and evaluated. The results show that by hybridizing these methods we can calculate the sway and heave damping coefficients with an error under 8.5% and their added mass coefficients with an error under 20%, the yaw and pitch damping coefficient with an error under 9.5%, and the yaw and pitch added-mass coefficient with an error under 15%.

۱- مقدمه

تعیین مشخصات مانور شـناورها از گذشـته بـه شـکل ویـژه‌ای در طراحی شناورها مورد توجـه بـوده اسـت و اهمیـت روزافزونـی در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

طراحی و بهره‌برداری از شناورها، مخصوصا زیردریایی با توجه به حرکت ۶ درجه آزادی آن، پیدا کرده است. این موضوع به تعیین ویژگی‌های حرکتی قبل از ساخت شناورها و رفع نقایص در مرحله طراحی مجدد کمک می‌کند. یک زیردریایی با طراحی صحیح، باید عملکرد خوبی هم در پایداری حرکت و هم در مانورپذیری داشته باشد که متناقض اما به هم مرتبط هستند. معمولا مطالعات مشخصات مانور شناورها بر اساس معادلات حرکت هیدرودینامیکی انجام می‌شود. معادلات حرکت هیدرودینامیکی مبتنی بر مشتق‌ها و یا ضرایب هیدرودینامیکی مرسوم‌ترین این روش‌ها است. این معادلات برمبنای مدل اولیه ابکوویتز [۱] و استفاده از بسط سری تیلور توسعه داده شده‌اند که تعیین ضرایب و یا مشتق‌های هیدرودینامیکی یک نیاز اولیه برای تخمین و پیش‌بینی مانور یک متحرک دریایی در این‌گونه معادلات است. ضرایب هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی در این معادلات به سه دسته: ضرایب بازگرداننده[۱] ، ضرایب میرایی [۲] و ضرایب جرم افزوده[۳] تقسیم‌بندی می‌شوند. ضرایب بازگرداننده وابسته به وضعیت و فاصله مرکز جرم و شناوری است و معمولا در اثر تقابل نیروهای وزن و شناوری حاصل می‌گردد. این ضرایب معمولا به صورت تحلیلی و دقیق قابل محاسبه هستند. ضرایب میرایی تابع سرعت جسم است و در اثر ویسکوزیته سیال و موج حاصل بر روی سطح آزاد آب در اثر حرکت جسم ایجاد می‌شود. ضرایب جرم افزوده تابع شتاب حرکتی جسم حاصل می‌شود.

روش‌های متفاوت تجربی و تحلیلی برای تعیین ضرایب میرایی و جرم افزوده توسعه داده شده است. روش‌های تجربی شامل انجام آزمایش برروی مدل مقیاس‌بندی شده جسم در حوضچه کشش[۴] و حوض مانور[۵] است. آزمایش‌های مرسوم، تحت عنوان آزمایشات مدل مقید[۶] موسوم هستند که شامل آزمایش‌های کشش مورب[۷]، آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام)[۸]و آزمایش‌های بازوی چرخان[۹]می‌شوند. آزمایش‌های کشش مورب و مکانیزم حرکت صفحه‌ای در حوضچه کشش و آزمایش‌های بازوی چرخان در حوض مانور انجام می‌شود. آزمایش‌های کشش مورب و بازوی چرخان جهت تعیین ضرایب میرایی و آزمایش‌های مکانیزم حرکت صفحه‌ای برای تعیین کلیه ضرایب میرایی و جرم افزوده هستند. برای انجام این آزمایشات نیاز به امکانات آزمایشگاهی بزرگ دریایی برای تعیین ضرایب با دقت بالا و با اثرات مقیاس[۱۰]حداقلی است.

با افزایش قابلیت فناوری کامپیوترها، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (سی‌اف‌دی)[۱]برای مسائل مختلف در زمینه طراحی شناور توسعه داده شده است. ژانگ و همکاران[۲] با بکارگیری نرم‌افزار فلوئنت ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی را از طریق شبیه‌سازی آزمایش پی‌ام‌ام بدست آوردند. نذیر و همکاران[۳] از نرم افزار فلوئنت برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک ربات زیردریایی و یک فین سه بعدی، استفاده کردند. یوسون و همکاران[۴] با استفاده از کد تجاری فلوئنت ضرایب هیدرودینامیکی مدل زیردریایی سابوف را استخراج نمودند که نتایج تطابق مناسبی را با مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد. فنگ و همکاران[۵] شناسایی پارامتری و تجزیه و تحلیل حساسیت شناور زیرسطحی هوشمند نسبت به ضرایب هیدرودینامیکی آن را با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار دادند. منصورزاده و همکاران[۶]، ضرایب هیدرودینامیکی یک ای‌یووی[۲]را از طریق شبیه سازی عددی آزمون کشش مدل شناور با زاویه انحراف و نیز بازوی چرخان به روش محاسباتی، استخراج نمودند و از آن برای تعیین پایداری استفاده کردند. یوسون و همکاران[۷] با استفاده از روش عددی، مانور بازوی چرخان را بر روی مدل شناور سابوف شبیه سازی نمودند و ضرایب وابسته به این آزمایش را استخراج نمودند. نتایج تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. جوانمردی و همکاران[۸] به بررسی اثر تغییر زاویه سطوح کنترل افقی بر میزان نیروی پسا وارد بر ربات هوشمند زیرسطحی به دو روش عددی و تجربی پرداختند که نتایج نشان دهنده تطابق خوب دو روش است. نوری و همکاران[۹]، تخمین مشتقات هیدرودینامیکی زیرسطحی را با استفاده از ترکیب روش عددی و نیمه تجربی انجام دادند. با مقایسه‌ای که با نتایج آزمایشگاهی انجام شده، نتیجه گرفته شده است که ترکیب روش سی‌اف‌دی با آزمایش در مرحله طراحی تفصیلی روش کارآمدی است. حاجیوند و همکاران[۱۰] با استفاده از نرم افزار استارسی‌سی‌ام پلاس[۱۲]روش سی‌اف‌دی را برای استخراج ضرایب هیدرودینامیک میرایی یک شناور با نسبت طول به قطرهای مختلف بررسی کردند و نتیجه گرفتند، ضرایب هیدرودینامیکی با افزایش طول افزایش می‌یابند. شجاعی‌فرد و همکاران[۱۱] حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی هیدروفویل دو بعدی با مقطع ناکا-۴۰۰۱۲[۱۳]را نسبت به دامنه و نوسان از روش سی‌اف‌دی با استفاده از نرم افزار فلوئنت مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نبود اطلاعات کافی در زمینه اعتبار سنجی مدل دو بعدی، ایشان پارامتر پسا را به عنوان مبنای بررسی صحت روش عددی قرار داده و حساسیت ضرایب عددی را نسبت به دامنه و فرکانس مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند تغییرات دامنه و فرکانس بر روی ضرایب حاصل از شبیه‌سازی اثر گذار است. جائو و همکارن[۱۲] با استفاده از نرم افزارسی‌سی‌ام پلاس، روشی ابداعی و مقرون به صرفه از نظر زمان برای محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی ارائه نمودند. آنها نتیجه گرفتند، نتایج این روش با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی نشان می‌دهد. اردشیری و همکاران[۱۳و۱۴] با روش عددی و استفاده از نرم‌افزار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

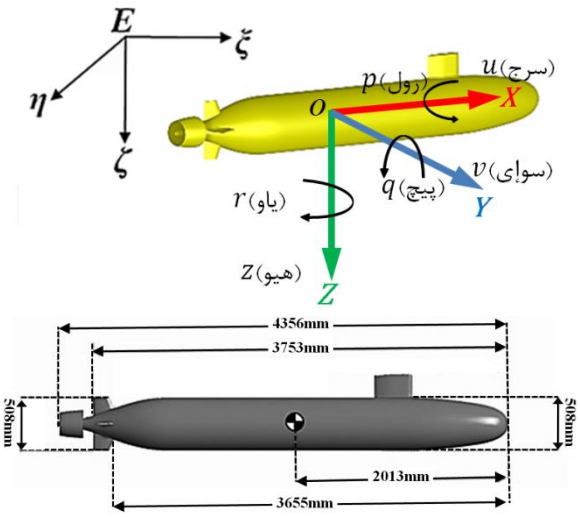
استار سی‌سی‌ام پلاس و شبکه متحرک، تاثیر سرعت، دامنه حرکت و فرکانس را در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی به روش شبیه‌سازی آزمایشات پی‌ام‌ام را مورد بررسی قرار دادند و با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها محدوده‌ای برای ابعاد دامنه، فرکانس و سرعت شبیه‌سازی آزمایشات پی‌ام‌ام ارائه نمودند. سیف و همکاران[۱۵] برنامه‌ای جهت طراحی مفهومی شناور ای‌یووی فراهم نمودند. دراین کد چند نوع بدنه مرسوم ای‌یووی استفاده شده است. از این کد جهت تحلیل حرکت شش درجه آزادی شناور نیز استفاده شده است. هان و همکاران [۱۶] از برنامه استارسی‌سی‌ام پلاس و شبکه متحرک برای محاسبه رفتار یک مدل زیردریایی در مانور چرخش استفاده کردند و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ابراز داشتند که نتایج تطابق خوبی را نشان می‌دهند.

نویسندگان تاکنون مرجعی که به‌طور مشخص دقت روش‌های مختلف محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی را با هم مقایسه کرده باشد، مشاهده نکرده‌اند. در مطالعه پیش رو، آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام)، تست کشش مورب و تست بازوی چرخان در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی، شبیه‌سازی شده و دقت نتایج آنها با داده‌های آزمایشگاهی سنجیده شده و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. دقت نتایج شبیه‌سازی مدل آشفتگی جریان کی-اپسیلون ری‌الایزیبل و کا-اومگا اس‌اس‌تی در شبیه‌سازی آزمایش تست بازوی چرخان بررسی شده است. همچنین روشی اصلاح شده با تلفیق شبکه متحرک و شرط مرز ورودی سرعت، جهت شبیه‌سازی آزمایشات هیو و سوای و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی بررسی شده است که نتایج نشان می‌دهد تعداد شبکه و زمان مورد نیاز شبیه‌سازی بیشتر از نصف کاهش می‌یابد و دارای دقتی برابر روش مرسوم است.

۲- صورت مسئله، مشخصات مدل و دستگاه مختصات

همانطور که در مقدمه عنوان گردید، بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی به منظور کاربری تلفیقی و افزایش دقت پیش‌بینی مانور یک زیردریایی، صورت مسئله این تحقیق است. مدل سابوف[۱۷] که به وسیله مرکز تحقیقات دیوید تیلور طراحی و آزمایش شده است، جهت اعتبارسنجی و انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است(شکل ۱). یکسری آزمایشات تست مقید در حوضچه تست مدل دیوید تیلور برای اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی بر روی مدل‌های مختلفی از سابوف، شامل بدنه بدون ملحقات، بدنه با برجک، بدنه با ملحقات پاشنه، بدنه با رینگ و بدنه با ملحقات کامل انجام شده است[۱۸]. جهت اعتبار سنجی، مدل با ملحقات کامل شبیه سازی شده است. طول کلی مدل سابوف ۴/۳۵۶ متر ، فاصله بین عمود سینه و پاشنه ۴/۲۶۱ متر و حداکثر قطر بدنه ۰/۵۰۸ متر است. مرکز محاسبه نیروها بر روی خط مرکز بدنه و در فاصله ۲/۰۱۳ متر از دماغه اندازه‌گیری شده است. جهت مثبت محورهای مختصات، محور- x (حرکت سرج)[۱] در جهت دماغه، محور- y (حرکت سوای)[۲] در جهت چپ بدنه و محور- z (حرکت هیو)[۳] در جهت پایین در نظر گرفته شده است.

سیستم مختصات دوم، سیستم مرجع مختصات اینرسیایی است که برای تعریف حرکات انتقال و چرخش از سیستم مختصات بدنه به مختصات ثابت زمین که در شکل ۱ ارائه شده است بکار می‌رود. در این سیستم، موقعیت وسیله پس از تعریف در مختصات متصل به بدنه، در مختصات ξ، η و ζ بیان می‌شود. جهت سیستم مرجع مختصات بدنه به وسیله زوایای اویلر یعنی ψ (یاو)[۱]، θ (پیچ)[۲] و ϕ (رول)[۳] بیان می‌شود.



شکل ۱- ابعاد و هندسه سابوف، سیستم های مختصات بدنه و اینرسیایی، جهات و پارامترهای معادلات ۶ درجه آزادی

۳- معادلات دینامیکی

جهات و پارامترهای مربوط به معادلات ۶ درجه آزادی شناور در شکل ۱ ارائه گردیده است. معادلات دینامیکی یک متحرک دریایی با شش درجه آزادی توسط فوسن[۱۹و۲۰] با نمادهای اسنم[۱][۲۱] را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$(\boldsymbol{M_{RB}} + \boldsymbol{M_A})\,\dot{\boldsymbol{\nu}} + [\boldsymbol{C_{RB}}(\boldsymbol{\nu}) + \boldsymbol{C_A}(\boldsymbol{\nu})]\,\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})\,\boldsymbol{\nu} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau_E} + \boldsymbol{\tau} \qquad (۱)$$

که در آن $\boldsymbol{M_{RB}}$ ، $\boldsymbol{M_A}$ به ترتیب ماتریس اینرسی جسم صلب و جرم افزوده، $\boldsymbol{C_{RB}}(\boldsymbol{\nu})$ و $\boldsymbol{C_A}(\boldsymbol{\nu})$ به ترتیب ماتریس کوریولیس و گریز از مرکز جسم صلب و جرم افزوده، $\boldsymbol{D}(\boldsymbol{\nu})$ ماتریس میرایی (که حاوی ضرایب نیرو و ممان‌های پسا و لیفت است.)، $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{\eta})$، ماتریس نیروها و ممان‌های بازگرداننده، $\boldsymbol{\tau_E}$ و $\boldsymbol{\tau}$ به ترتیب نیروها

و ممان‌های محیطی و سیستم رانش هستند. این پارامترها از روابط زیر برای دستگاه متصل به بدنه محاسبه می‌شود:

$$\boldsymbol{M_{RB}} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\boldsymbol{M_A} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

mجرم جسم، x_G، y_G و z_G مختصات مرکز جرم و تانسور $\boldsymbol{I}$ ممان‌های اینرسی جسم حول محورهای مختصات است. مقادیر ضرایب جرم افزوده همچون $X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}$ محاسبه می‌شوند.

$$\boldsymbol{C_{RB}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_{zz}r & I_{yy}q \\ -mw & 0 & mu & -I_{zz}r & 0 & I_{xx}p \\ mv & -mu & 0 & I_{yy}q & -I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\boldsymbol{C_A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

نحوه محاسبه مقادیر ماتریس(۵) در مرجع [۱۹] ارائه گردیده است.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{D} &= \boldsymbol{D_l} + \boldsymbol{D_{nl}} \\ &= \mathrm{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ &+ \mathrm{diag}\begin{Bmatrix} X_{u|u|}|u|, Y_{v|v|}|v|, Z_{w|w|}|w|, \\ K_{p|p|}|p|, M_{q|q|}|q|, N_{r|r|}|r| \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (۶)$$

$\boldsymbol{D_l}$ و $\boldsymbol{D_{nl}}$ به ترتیب ضرایب میرایی خطی و غیر خطی است. با توجه به اینکه سرعت شناورها عموما در محدوده‌ای قرار دارد که مقدار ضرایب لیفت در مقایسه با ضرایب پسا قابل صرفنظر کردن است، بنابراین اغلب مقادیر قطری در نظر گرفته می‌شود. مقادیر ضرایب میرایی همچون $X_u = \frac{\partial X}{\partial u}$ محاسبه میگردند.

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W-B)\sin(\theta) \\ -(W-B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W-B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(y_gW - y_bB)\cos(\theta)\cos(\phi) + (z_gW - z_bB)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_gW - z_bB)\sin(\theta) + (x_gW - x_bB)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(x_gW - x_bB)\cos(\theta)\sin(\phi) - (y_gW - y_bB)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

W نیروی وزن و B نیروی شناوری است. x_b، y_b و z_b معرف مرکز شناوری جسم است. تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک الزام اولیه برای حل معادله (۱) و تعیین مشخصات مانورپذیری یک شناور است. برای محاسبه این مقادیر باید جریان اطراف جسم آنالیز و بررسی شود.

۴- معادلات حاکم بر حرکت سیال

معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند. با حل این معادلات می‌توان مشخصات جریان از قبیل سرعت و فشار را به دست آورد. با توجه به ماهیت توربولانسی جریان، با استفاده از عبارات میانگین‌گیری شده زمانی سرعت و فشار، معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس (رنز)[۲۲] حاصل می‌گردد.

$$\frac{\partial(\rho\overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i}\,\overline{u_j} + \rho\overline{u_i'u_j'}\right) = \\ = \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \rho g_i + \mu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j}\right) \quad (۸)$$

که μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است. ρ و u_i به ترتیب معرف چگالی و مولفه سرعت i ام هستند و $i = 1,2,3$ است. p بیانگر فشار استاتیکی و $-\rho\overline{u_i'u_j'} = \tau_{ij}$ مبین تنش رینولدز است که از رابطه (9) محاسبه می‌شود:

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \quad (۹)$$

در رابطه فوق δ_{ij} دلتا کرونکر و μ_t، لزجت توربولانسی[۳]است که با توجه به مدل توربولانسی انتخابی، مدل‌سازی می‌شود. از مدل توربولانسی کی-إپسیلون ری‌الایزیبل[۴]و کا-اومگا اس‌اس‌تی[۲۵] برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است[۲۲و۲۳]. آثار لوید و اسپانولز [۲۴]، جک و هیز [۲۵]، دانتاس و باروس [۲۶] را می‌توان به عنوان مرجع راهنمای استراتژی شبیه‌سازی عددی در نظر گرفت[۱۲].

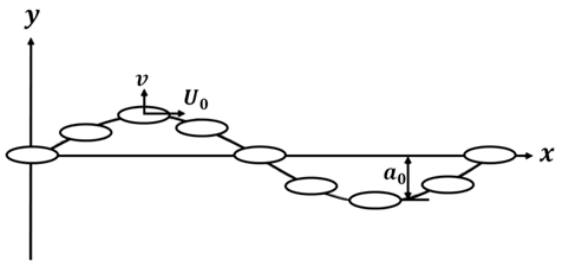
۵- آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام)

اولین مکانیزم حرکت صفحه‌ای کاملا کاربردی در سال ۱۹۶۰ در حوضچه کشش دیوید تیلور[۶]نصب شد. گودمن[۲۷] و گتلر[۲۸] توضیح مشابهی از مشخصات فیزیکی تاسیسات و همچنین قوانین تئوری که تست پی‌ام‌ام بر مبنای آن انجام می‌شود، ارائه کرده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

این نوع آزمایش شامل یک وسیله‌ی الکترومکانیکی است که برای حرکت دادن مدل، بصورت یک سری حرکات نوسانی از پیش برنامه‌ریزی شده در حوضچه کشش مورد استفاده قرار می‌گیرد. پی‌ام‌ام قادر است که مدل را در حرکات زیگزاگی (سوای خالص[۷]در صفحه افق و هیو خالص[۸]در صفحه عمود) یا ماهیگون (یاو خالص[۲۹] در صفحه افق و پیچ خالص[۰]در صفحه عمود) یا ترکیبی از این دو به نوسان درآورد. پی‌ام‌ام‌ها معمولا شامل دو بازو هستند که مدل را بصورت افقی یا عمودی دچار نوسان می‌کنند. این آزمایشات برای تعیین نیروها و ممان‌های عمل کننده بر روی مدل در نتیجه ی این حرکت‌ها استفاده می‌شود. نتایج این تست‌ها برای بدست آوردن ضرایب هیدرودینامیکی خطی و یا غیرخطی شناور استفاده می‌شود.

تست پی‌ام‌ام حرکت سوای(هیو) خالص، شامل حرکتی نوسانی مقید در راستای y (z) با سرعت ثابت U_0 است، بطوریکه مدل باید همیشه موازی با محور مرکزی حوضچه قرار بگیرد، که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-آزمایش حرکات زیگزاگی صفحه‌ای در صفحه افق (سوای خالص)

در این روش مقادیر سرعت زاویه‌ای r و شتاب زاویه‌ای $\dot{r}$ در محور مختصات متصل به بدنه در طول مسیر حرکت همیشه صفر است. جابجایی y، سرعت v و شتاب $\dot{v}$ می‌تواند بصورت روابط (۱۰) تا (۱۲) بیان شوند:

$$y = -a_0 \sin \omega t \tag{۱۰}$$

$$\dot{y} = v = -a_0 \omega \cos \omega t \tag{۱۱}$$

$$\ddot{y} = \dot{v} = a_0 \omega^2 \sin \omega t \tag{۱۲}$$

که در آن a_0 دامنه و ω فرکانس نوسانات حرکت می‌باشند. در این حالت حرکت هارمونیک بالا و پایین در جهت جریان و یک زاویه برخورد بر بدنه وجود دارد. در طول یک سیکل حرکت سرعت v و شتاب $\dot{v}$ بین حداکثر مقادیر مثبت و منفی تغییر می‌کند و بنابراین دامنه نیروی Y و ممان N بر مدل اعمال می‌شود. این نیروها در معادلات سوای و یاو مشاهده می‌گردد که در معادلات (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است:

$$Y = (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} - Y_v + (m - Y_r)r \tag{۱۳}$$

$$N = (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_v v + (mx_G U_0 - N_r)r \tag{۱۴}$$

با توجه به اینکه $r = \dot{r} = 0$ است بنابراین معادلات بصورت معادلات (۱۵) و (۱۶) ساده می‌شوند:

$$Y = (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_v \tag{۱۵}$$

$$N = (mx_G - N_{\dot{v}})\dot{v} - N_v v \tag{۱۶}$$

مقادیر نیروی Y و ممان N می‌تواند به دو بخش در فاز و خارج فاز جابجایی y تجزیه شود. از معادلات سوای خالص، شتاب $\dot{v}$ تابع سینوسی است که با جابجایی y هم فاز است، برخلاف سرعت v که تابعی کسینوسی بوده و با جابجایی y، ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد. اجزاء هم فاز نیروی Y_{in} و ممان N_{in} بطور مستقیم در ارتباط با شتاب $\dot{v}$ هستند و بنابراین می‌توانند برای محاسبه مشتقات شتاب $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ استفاده شوند. بطور مشابه، نیرو و ممان خارج از فاز جابجایی (Y_{out} و N_{out}) مشتقات Y_v و N_v را حاصل می‌کنند. هنگامیکه نیرو و ممان هم فاز حرکت هستند یعنی ($v = 0$ و $\dot{v} = a_0\omega^2$)، مشتقات شتاب وابسته (نیروهای جرم افزوده) از روابط (۱۷) حاصل می‌شوند:

$$Y_{\dot{v}} = m - \frac{Y_{\text{in}}}{a_0\omega^2}\ , N_{\dot{v}} = mx_G - \frac{N_{\text{in}}}{a_0\omega^2} \tag{۱۷}$$

برای شرایط خارج از فاز ($\dot{v} = 0$و $v = a_0\omega$)، نیروها و ممان‌های در ارتباط با سرعت (میرایی) بصورت روابط (۱۸) استخراج می‌شوند:

$$Y_v = \frac{Y_{\text{out}}}{a_0\omega}\ , N_v = -\frac{N_{\text{out}}}{a_0\omega} \tag{۱۸}$$

برای حرکت یاو خالص، ضروری است که مقادیر $v = \dot{v} = 0$ باشد، بنابراین سرعت مدل باید مماس بر مسیر حرکت باشد. این تست ما را قادر می‌سازد تا بتوانیم مشتقات هیدرودینامیک حرکت چرخش یعنیY_r، $Y_{\dot{r}}$، N_r و $N_{\dot{r}}$ را محاسبه کنیم.

شکل ۳ حرکت یاو خالص را توضیح می‌دهد که در آن سرعت V منتجه از جسم مماس بر مسیر حرکت است. در این روش جزء عمودی سرعت یعنی v و بنابراین مشتق آن یعنی $\dot{v}$ در دستگاه مختصات بدنه در طول سیکل حرکت صفر باقی می‌ماند. پارامترهای حرکت در مورد حرکت یاو خالص را می‌توان بصورت روابط (۱۹) تا (۲۱) نوشت:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

$$\psi = \psi_0 \cos \omega t \,, y = -a_0 \sin \omega t \quad (۱۹)$$

$$\dot{\psi} = r = -\psi_0 \omega \sin \omega t \quad (۲۰)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{r} = -\psi_0 \omega^2 \cos \omega t \quad (۲۱)$$

که $\psi_0 = \frac{a_0 \omega}{U_0}$ دامنه نوسانات زاویه‌ای است. برای حرکت یاو خالص، معادلات حرکت سوای و یاو بصورت روابط (۲۲) و (۲۳) ساده می‌شوند:

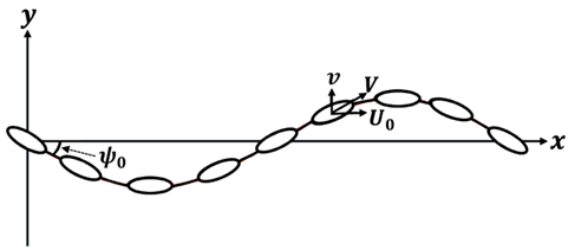
$$Y = (mx_G - Y_{\dot{r}})\dot{r} + (mU_0 - Y_r)r \quad (۲۲)$$

$$N = (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (mx_G U_0 - N_r)r \quad (۲۳)$$

Y و N را به دو دسته، در فاز جابجایی زاویه‌ای $(\dot{\psi} = r = 0)$ و خارج فاز جابجایی زاویه‌ای $(\ddot{\psi} = \dot{r} = 0)$ تجزیه می‌کنیم. مشتقات هیدرودینامیکی از روابط (۲۴) و (۲۵) بدست می‌آید.

$$Y_{\dot{r}} = mx_G - \frac{Y_{\text{in}}}{\psi_0 \omega^2}, \quad N_{\dot{r}} = I_z - \frac{N_{\text{in}}}{\psi_0 \omega^2} \quad (۲۴)$$

$$Y_r = mU_0 - \frac{Y_{\text{out}}}{\psi_0 \omega}, \quad N_r = mx_G U_0 - \frac{N_{\text{out}}}{\psi_0 \omega} \quad (۲۵)$$



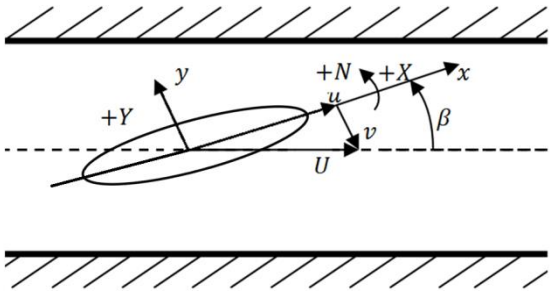
شکل ۳- آزمایش ماهی در صفحه افق(یاو خالص)

۶- آزمایش کشش مورب

در این آزمایش مدل شناور در طول حوضچه با یک سرعت مشخص و ثابت U_0 ، در زوایای انحراف β مختلف در صفحه افق، کشیده می‌شود. با تغییر زوایای انحراف β در سرعت ثابت مقدار v تغییر خواهد کرد. بدین ترتیب مقدار نیروی عرضی Y و ممان یاو N حول بدنه در سرعت های مختلف v بدست می‌آید[۲۹]، شکل ۴. مشابه همین حرکت را در صفحه عمودی خواهیم داشت. بنابراین می‌توان نوشت:

$$v = U_0 \sin \beta \quad (۲۶)$$

$$w = U_0 \sin \alpha \quad (۲۷)$$

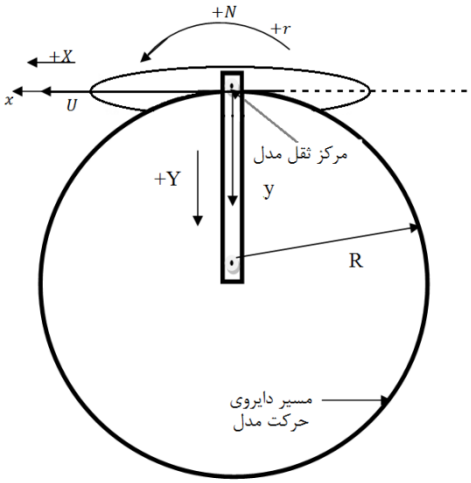


شکل ۴-تست حوضچه کشش با زاویه دریفت در صفحه افق

با رسم منحنی Y و N بر حسب v ضرایب Y_v ، N_v بدست می‌آید. برای صفحه قائم مدل در زوایای حمله α مختلف تست می‌شود. نیروسنجی که به مرکز ثقل جسم نصب شده است، نیرو Z و ممان M وارد شده در هر زاویه حمله را اندازه گیری می‌کند. با رسم منحنی Z و M بر حسب w ضرایب Z_w ، M_w بدست می‌آید.

۷- آزمایش بازوی چرخان

در این آزمایش، ضرائب هیدرودینامیکی چرخشی نظیر Y_r و N_r، Y_r در نوع خاصی از حوضچه کشش بدست می‌آیند. جسم به یک بازوی دوار که دارای سرعت زاویه‌ای است، متصل شده و حول محور عمود بر تانک با سرعت خطی ثابت در یک شعاع مشخص می‌چرخد.



شکل ۵- تست بازوی چرخان

موقعیت و سرعت زاویه‌ای بازو می‌تواند تغییر کند. اگر محور طولی مدل عمود بر بازو باشد، سرعت عرضی مدل، v صفرخواهد بود، در نتیجه خواهیم داشت $r = U_0/R$ که در آن R طول بازو، r سرعت زاویه‌ای و U_0 سرعت خطی مدل است. با تغییر R و ثابت نگه داشتن U_0، سرعت زاویه ای r تغییر خواهد کرد. با اندازه-گیری نیروی Y و گشتاور N در مقادیر مختلف سرعت زاویه‌ای

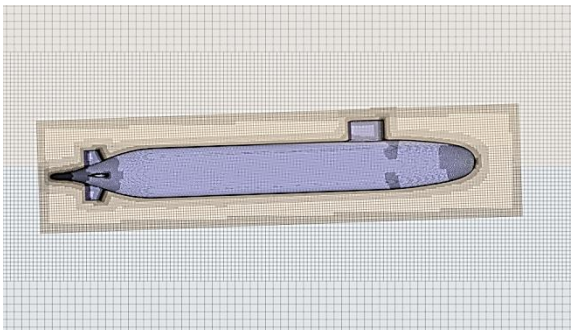
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

r، می‌توان منحنی تغییرات نیرو و گشتاور را نسبت به سرعت زاویه‌ای رسم کرد. شیب نمودارها در مبدا، ضرایب Y_r، N_r هستند. برای اینکه منحنی‌ها از دقت خوبی برخوردار باشند، این آزمایش باید حداقل سه یا چهار مرتبه انجام شود.

باید توجه داشت که نیروی گریز از مرکز $((m-Y_{\dot{v}})r^2R)$ نیز در محاسبه نیروی Y در نظر گرفته شود. در صورتی که مرکز جرم شناور بر روی مرکز اتکای بازو منطبق نباشد، بنابراین تاثیر آن به صورت $Y_r - mU$ در محاسبه Y و $N_r - mx_GU$ در محاسبه N باید در نظر گرفته شود[۲۹].

۸- شبیه سازی عددی

تمامی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته این تحقیق، توسط کد تجاری استار سی‌سی‌ام پلاس انجام شده است. شبیه‌سازی حجم محدود گذرا، که مدل جریان مجزا(پیش‌بینی-اصلاح)[۱] و الگوریتم حل سیمپل[۲]را برای معادلات فشار بکار می‌گیرد، مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه ساختار یافته تریمر[۳]برای حجم بندی دامنه محاسباتی استفاده شده است. این روش، روشی بهینه و قدرتمند برای تولید شبکه‌های ساختار یافته با حداقل تقارن است. شکل ۶ شبکه تولید شده در اطراف شناور و شبکه متحرک اورست[۴]برای شبیه سازی تست پیچ خالص را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شبکه تریمر و اورست در دامنه حل جریان حرکت پیچ خالص

تنظیمات نرم افزار بصورت جدول۱ خلاصه شده است.

جدول۱-تنظیمات نرم‌افزاری استفاده شده برای شبیه‌سازی

پارامتر	تنظیمات
Solver	3D, Segregated, Unsteady/Steady, Implicit
Viscous model	K-ε Realizable, K-ω only for RA simulation
Time step(s)	0.01
Velocity	Constant
Pressure-velocity coupling	SIMPLE

۹- تولید شبکه ، شرایط محیطی و مشخصات رایانه

برای انجام محاسبات چگالی آب دریا ۹۹۷/۵۶۱ کیلوگرم بر متر مکعب و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. در تولید المان‌های شبکه، حداقل تعداد المان‌هایی که شرط دست‌یابی به باقیمانده کمتر از $۱۰^{-۵}$ و $y^+ = ۳۰$ و در شبیه‌سازی تست پی‌ام‌ام الزامات شبکه اورست از نظر عدم بوجود آمدن خطای حجم محدود منفی را ارضا می‌کردند، مد نظر قرار گرفت. همچنین روش روچ [۳۲-۳۰] با معیار جی‌سی‌آی[۵]جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه مورد استفاده قرار گرفت. روابط زیر مراحل محاسبه جی‌سی‌آی برای هر پارامتر را ارائه می‌کنند.

$$r_{i-1,i} = (n_{i-1,i}/n_i)^{1/D} \quad (۲۸)$$

$$\varepsilon_{i-1,i} = \left|(f_{i-1,i} - f_i)/f_i\right| \quad (۲۹)$$

$$GCI_{i-1,i}^{fine} = (F_s\left|\varepsilon_{i-1,i}\right|/)/\left(r_{i-1,i}^p - 1\right) \quad (۳۰)$$

$$\alpha = r_{12}GCI_{12}^{fine}/GCI_{23}^{fine} \quad (۳۱)$$

n تعداد سلول، r نسبت تعداد سلول‌ها، $D = 3$ برای هندسه سه بعدی، ε نسبت خطای پارمترهای کلیدی، f پارامترکلیدی، $FS = 1.25$ فاکتور اطمینان، پارامتر α که وقتی نزدیک یک باشد پارمتر f مستقل از شبکه خواهد بود، p توان ظاهری روش است که برای سه سطح شبکه بصورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$p = \frac{1}{\ln r_{12}}\left|\ln\left|\varphi_{23}/\varphi_{21}\right| + q(p)\right| \quad (۳۲)$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{12}^p - s}{r_{23}^p - s}\right) \quad (۳۳)$$

$$s = 1.\ \mathrm{sgn}\ (\varphi_{23}/\varphi_{21}) \quad (۳۴)$$

در روابط فوق $\varphi_{12} = f_1 - f_2$ و $\varphi_{23} = f_2 - f_3$ است.

در جدول۲ نتایج معیار جی‌سی‌آی برای روش مرسوم شبیه‌سازی آزمایشات هیو (پیچ) خالص ارائه شده است. با توجه به تقارن بدنه نسبت به صفحه عمودی بنابراین نصف بدنه و دامنه در شبیه‌سازی درنظر گرفته شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ضریب ۲ در جدول ارائه شده است. سه پارامتر کلیدی(f) نیروی در راستای محور x یعنی X، نیروی در راستای محور z یعنی Z و ممان حول محور z یعنیM در صفحه عمودی در زاویه θ=۸ درجه، جهت آنالیز حساسیت نتایج نسبت به شبکه‌بندی در شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مورد سایر شبیه‌سازی‌ها نیز این معیار انجام شده است که جهت اختصار از ارائه آن صرفنظر شده است.

جدول۲-مقادیر جی‌سی‌آی در θ=۸ درجه

n_1 =۲۳۴۶۸۱۰	X'_1 = -۰/۰۰۱۲۵۱	Z'_1 = -۰/۰۰۲۵۹۳	M'_1 = ۰/۰۰۱۴۰۷
n_2 =۷۹۴۲۷۴	X'_2 = -۰/۰۰۱۲۶۷	Z'_2 = -۰/۰۰۲۶۲۱	M'_2 = ۰/۰۰۱۳۸۹
n_3 = ۲۴۲۶۲۷	X'_3 =	Z'_3 =	M'_3 =

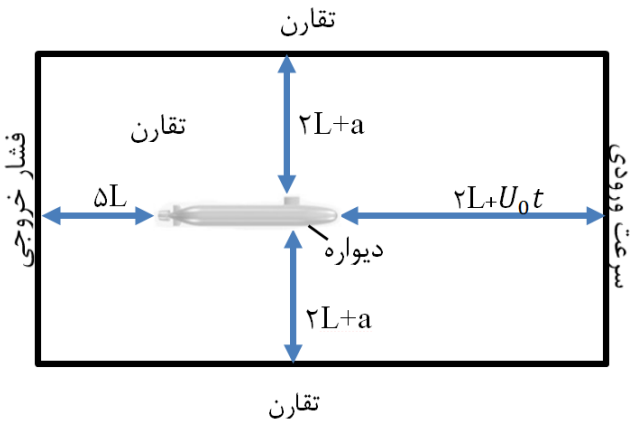
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

	-۰/۰۰۱۲۹۲	-۰/۰۰۲۶۸۳	۰/۰۰۱۳۵۴
r_{21}	۱/۴۳۵	۱/۴۳۵	۱/۴۳۵
r_{32}	۱/۴۸۵	۱/۴۸۵	۱/۴۸۵
$\varepsilon_{21}(\%)$	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۸
$\varepsilon_{32}(\%)$	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۳۵
p	۰/۹۳۸	۱/۸۵۳	۱/۵۱۵
$GCI_{12}^{fine}(\%)$	۳/۹۶۵	۱/۴۱۷	۲/۲۰۲
$GCI_{23}^{fine}(\%)$	۵/۴۹۵	۲/۷۳۷	۳/۸۵۲
α	۱/۰۱۳	۱/۰۱۱	۰/۹۹۳

مشخصات رایانه استفاده شده برای شبیه‌سازی‌ها (Core i7 Processor (2x 3.4 GHz) and 16GB RAM) است.

۱۰- شبیه سازی آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام-ام) با روش مرسوم

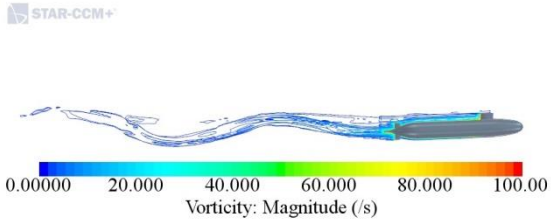
جهت شبیه‌سازی آزمایش پی‌ام‌ام به روش مرسوم از شبکه اُورست استفاده گردید. با توجه به ماهیت شتاب دار بودن حرکات، در شبیه‌سازی آزمایشات دینامیکی باید از شبکه‌بندی استفاده نمود که قابلیت حرکت داشته باشد. بدین منظور از شبکه‌بندی اورست برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. شبکه‌بندی اورست، جهت شبکه‌بندی غیر پیوسته چندگانه، برای گسسته‌سازی دامنه جریان استفاده می‌شود. اجزاء شبکه می‌تواند هر نوع سایز، اندازه و شکل را داشته باشند اما باید به‌گونه‌ای با دیگر اجزاء به روی هم قرار بگیرند که هم‌پوشانی کامل بر روی دامنه محاسباتی ایجاد شود. با توجه به استفاده از شبکه اورست، لازم است علاوه بر در نظر گرفتن فواصل بصورتی که شرط مغروق بودن جسم را ارضا میکند، فواصل طولی به‌گونه‌ای انتخاب شود که ضمن حرکت جسم تداخلی با مرزها ایجا نشود. بنابراین دامنه انتخاب شده، دامنه نسبتا عریضی است. دامنه محاسباتی به صورت شکل ۷ برای آزمایشات سوای(هیو) خالص و یاو(پیچ) خالص در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- دامنه و شرایط مرزی شبیه سازی تست پی‌ام‌ام

صفحه روبروی حرکت جسم شرط مرزی جریان سرعت ورودی، صفحه پشت حرکت جسم شرط فشار خروجی، جسم مغروق شرط دیواره بدون لغزش و سایر صفحات شرط تقارن[۳۶] محاسبات اعمال شده است. از مدل توربولانسی کی-اپسیلون ری‌الایزیبل برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است، شکل ۷. L برابر با طول شناور، a دامنه حرکت ، U_0 سرعت شناور و t مدت زمان شبیه‌سازی است که از رابطه $t = \frac{N}{2\pi f}$ بدست می‌آید. f فرکانس حرکت و $N = n\pi\ , n = 2,3, \ldots$ تعداد پریود شبیه‌سازی است.

شکل ۸ ورتیسته اطراف شناور با گذشت زمان در شبیه‌سازی آزمایش پیچ را نشان می‌دهد. ورتیسته حاصل از حرکت شناور نشان دهنده مسیر حرکت شناور است. نحوه قرارگیری مدل شناور در مسیر نشان دهنده آن است که مدل شناور مماس بر مسیر سینوسی شکل است و مطابق با تعریف آزمایش پیچ خالص برای یک شناور است.



شکل ۸- ورتیسته اطراف شناور

در جدول۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی تست‌های پی‌ام‌ام بر روی شناورمدل ارائه شده است. همانگونه که درجدول مشاهده می‌شود، محاسبه تمامی ضرایب خطی هیدرودینامیکی با روش پی‌ام‌ام قابل انجام است. همچنین نتایج نشان دهنده آن است که با صرف‌نظر کردن از خطای محاسبه ضریب Z'_q (۲۴٪/۳) محاسبه ضرایب خطی هیدرودینامیکی با خطای کمتر از ۲۰ درصد قابل انجام است.

جدول۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی تست‌های پی‌ام‌ام

ضریب	سی‌اف‌دی	داده‌های آزمایش[۱۸]	خطا(٪)
Y'_v	-۰/۰۲۹۷۰۷	-۰/۰۲۷۸۳۴	۶/۷۳
$Y'_{\dot{v}}$	-۰/۰۱۶۶۴۹	-۰/۰۱۶۱۸۶	۲/۸۶
N'_v	-۰/۰۱۴۴۹۸	۰/۰۱۳۶۴۸	۶/۲۳
$N'_{\dot{v}}$	۰/۰۰۰۳۱۹	۰/۰۰۰۳۹۶	۱۹/۵۷
Z'_w	-۰/۰۱۵۶۲۱	-۰/۰۱۳۹۱۰	۱۲/۳۰
$Z'_{\dot{w}}$	-۰/۰۱۶۹۸۲	-۰/۰۱۴۵۲۹	۱۶/۸۸
M'_w	۰/۰۰۹۹۱۵	۰/۰۱۰۳۲۴	۳/۹۶
$M'_{\dot{w}}$	-۰/۰۰۰۶۶۴	-۰/۰۰۰۵۶۱	۱۸/۳۰
Y'_r	۰/۰۰۵۲۲۱	۰/۰۰۵۲۵۱	۰/۵۶
$Y'_{\dot{r}}$	۰/۰۰۰۳۹۱	۰/۰۰۰۳۹۸	۱/۶۶
N'_r	-۰/۰۰۴۴۷۴	-۰/۰۰۴۴۴۴	۰/۶۶
$N'_{\dot{r}}$	-۰/۰۰۰۹۹۹	-۰/۰۰۰۸۹۷	۱۱/۳۲
Z'_q	-۰/۰۰۵۷۱۱	-۰/۰۰۷۵۴۵	۲۴/۳۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

$Z'_{\dot{q}}$	-۰/۰۰۰۷۲۵	-۰/۰۰۰۶۳۳	۱۴/۵۳
M'_q	-۰/۰۰۴۲۷۰	-۰/۰۰۳۷۰۰	۱۵/۳۴
$M'_{\dot{q}}$	-۰/۰۰۰۸۱۸	-۰/۰۰۰۸۶۰	۴/۸۴

۱۱- شبیه سازی آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام-ام) هیو و سوای با روش اصلاح شده

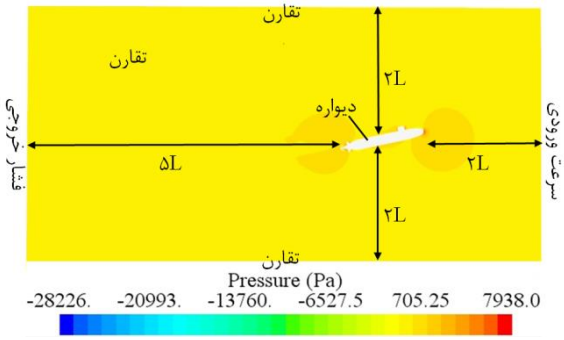
همانطور که در بخش ۱۰ مشاهده گردید، در روش مرسوم شبیه‌سازی آزمایشات مکانیزم حرکت صفحه‌ای (پی‌ام‌ام) جهت شبیه‌سازی علاوه بر حداقل فواصل مورد نیاز جهت عدم تداخل باید مقدار جابجایی معادل $U_0 t$ برای حرکت شبکه به دامنه اضافه نمود. زمان t وابسته به تعداد پریود شبیه‌سازی و فرکانس حرکت است. بنابراین با فرض در نظر گرفتن تعداد پریود حرکت ۳ $n =$ ، فرکانس $f =$ ۰/۳ هرتز، مدت زمان مورد نیاز شبیه‌سازی برابر ۵ ثانیه خواهد بود و با در نظر گرفتن سرعت ۴ متر بر ثانیه مقدار دامنه برابر ۲۰ متر اضافه خواهد شد. بنابراین مدت زمان حل و هزینه محاسباتی افزایش می‌یابد. برای شبیه‌سازی حرکات هیو و سوای با توجه به اینکه جهت حرکت جسم موازی محور مختصات است (شکل ۲)، بنابراین می‌توان سرعت در مرز را به گونه‌ای تعریف نمود که مجموع سرعت ورودی و حرکت جسم برابر با مقدار مورد نظر باشد. در مورد فوق، سرعت جریان ورودی در مرز برابر با ۳/۹۵ متر بر ثانیه و بنابراین سرعت حرکت شناور برابر با ۰/۰۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. پس، دامنه مورد نیاز جهت حرکت جسم برابر با ۰/۲۵ متر است. مقایسه دو روش شبیه‌سازی مرسوم و اصلاح شده برای آزمایشات هیو و سوای در فرکانس ۰/۳ هرتز در جدول۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص است که تعداد شبکه مورد نیاز و همچنین مدت زمان حل، در روش اصلاح شده کمتر از نصف روش مرسوم شبیه‌سازی است. تعداد شبکه در نظر گرفته شده برای حرکت هیو با توجه به تقارن بدنه نسبت به صفحه-XZ برای نصف بدنه است.

جدول۴- مقایسه شبیه سازی‌تست‌های پی‌ام‌ام مرسوم و اصلاح شده

پارامتر	روش پی‌ام‌ام اصلاح شده	روش پی‌ام‌ام مرسوم
درصد خطای نتایج	در هر دو روش برابر هستند	
تعداد شبکه حرکت هیو	۱۰۳۲۶۶۳	۲۳۴۶۸۱۰
تعداد شبکه حرکت سوای	۲۳۱۹۱۳۵	۵۱۰۷۶۸۸
مدت زمان شبیه سازی حرکت هیو(ساعت)	۱۱	۲۴
مدت زمان شبیه سازی حرکت سوای(ساعت)	۲۳	۴۹

۱۲- شبیه‌سازی آزمایش کشش مورب

برای شبیه‌سازی تست حوضچه کشش لازم است که میدان حل بصورت یک مکعب مستطیل با شرایط مرزی ورودی، خروجی ودیواره در نظر گرفته شود. بدنه شناور در زوایای دریفت و حمله مختلف قرار می‌گیرد. با حل معادلات ناویر- استوکس و تعیین نیروها و ممان‌های وارد بر بدنه و رسم نمودار نیرو و ممان بر حسب سرعت، مانند روش آزمایشگاهی، ضرایب مربوطه بدست می‌آید. با رسم منحنی Y و N بر حسب v، ضرایب Y_v، N_v و با رسم منحنی Z و M بر حسب w ضرایب Z_w، M_w بدست می‌آید. شکل ۹ ابعاد دامنه و شرایط مرزی شبیه‌سازی تست کشش مورب همراه با میدان فشار در زاویه ۱۲ درجه برای تست کشش مورب در راستای هیو را نشان می‌دهد. از مدل توربولانسی کی-إپسیلون ری‌الایزیبل برای شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۹- ابعاد دامنه و شرایط مرزی شبیه‌سازی تست کشش مورب همراه با میدان فشار

در جدول۵ نتایج بدست آمده از تست کشش مورب ارائه شده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که این روش می‌تواند برای تعیین ضرایب میرایی حرکات سوای و هیو با خطای کمتر از ۸/۵ درصد مورد استفاده قرار گیرد.

جدول۵) ضرایب بدست آمده از شبیه‌سازی تست کشش مورب

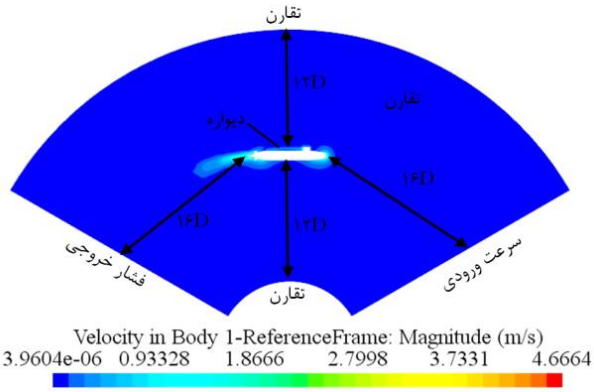
ضریب	سی‌اف‌دی	داده آزمایش[۱۸]	خطا(٪)
Z'_w	-۰/۰۱۵۰۴۲	-۰/۰۱۳۹۱	۸/۱۴
M'_w	۰/۰۰۹۸۹۱	۰/۰۱۰۳۲۴	۴/۱۹
Y'_v	-۰/۰۲۹۱۴۲	-۰/۰۲۷۸۳	۴/۷۲
N'_v	-۰/۰۱۳۵۰۲	-۰/۰۱۳۶۵	۱/۰۷

۱۳- شبیه سازی آزمایش بازوی چرخان

برای شبیه‌سازی تست بازوی چرخان همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است دامنه حل بصورت کانالی با مقطع دایره و قطاع یک دایره می باشد. بدین صورت که در ورودی شرط مرزی سرعت ورودی استفاده می‌شود. در خروجی شرط فشار خروجی و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

اطراف کانال را شرط تقارن در نظر می‌گیریم. r سرعت زاویه‌ای چرخش شناور برابر U_0/R است. با اندازه‌گیری نیروی Y و گشتاور N در مقادیر مختلف r، می‌توان منحنی تغییرات نیرو و گشتاور را نسبت به سرعت زاویه‌ای رسم کرد. شیب نمودارها در مبدا، ضرایب N_r،Y_r هستند. شکل ۱۰ میدان سرعت، شرایط مرزی و ابعاد دامنه در شبیه سازی عددی تست بازوی چرخان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- میدان سرعت، شرایط مرزی و ابعاد دامنه در شبیه سازی عددی تست بازوی چرخان

روش قاب مرجع چرخان (ام‌آر‌اف)[۳۷] جهت شبیه سازی حرکت چرخشی بکارگرفته شده است. مدل آشفتگی جریان کی-إپسیلون ری‌الایزیبل و کا-اومگا اس‌اس‌تی در شبیه سازی آزمایشات تست بازوی چرخان مورد استفاده قرار گرفته است. مدل کی-إپسیلون ری‌الایزیبل ابتدا با چند y^+ متفاوت در تست حرکت یاو استفاده شد که نتایج در جدول۶ ارئه شده است. نتایج نشان دهنده حداقل خطای ۲۹/۸۸ درصد و حداکثر خطای ۳۷/۵۹ درصد در تعیین ضریب Y'_r است. همچنین کمترین خطا در محاسبه N'_r مقدار ۱۴/۷۷درصد و بیشترین خطا ۱۵/۵۳ درصد است.

جدول۶- ضرایب بدست آمده از شبیه سازی تست بازوی چرخان با مدل آشفتگی جریان کی-إپسیلون ری‌الایزیبل در حرکت یاو

Y^+	ضریب	سی‌اف‌دی	داده آزمایشگاه[۱۸]	خطا(٪)
۲۰	Y'_r	۰/۰۰۳۴۵۴	۰/۰۰۵۲۵۱	۳۴/۲۲
	N'_r	-۰/۰۰۳۷۹	-۰/۰۰۴۴۴	۱۴/۷۷
۳۰	Y'_r	۰/۰۰۳۶۸۲	۰/۰۰۵۲۵۱	۲۹/۸۸
	N'_r	-۰/۰۰۳۷۷	-۰/۰۰۴۴۴	۱۵/۱۸
۱۵۰	Y'_r	۰/۰۰۳۲۷۷	۰/۰۰۵۲۵۱	۳۷/۵۹
	N'_r	-۰/۰۱۳۵۰۳	-۰/۰۰۴۴۴	۱۳/۲۰
۲۵۰	Y'_r	۰/۰۰۳۲۹۷	۰/۰۰۵۲۵۱	۳۷/۲۱
	N'_r	-۰/۰۰۳۷۵۰	-۰/۰۰۴۴۴	۱۵/۵۳

جهت بررسی امکان افزایش دقت نتایج، از روش کا-اومگا اس‌اس‌تی استفاده گردید. نتایج بدست آمده از روش کا اومگا اس‌اس‌تی بصورت جدول۷ است. مشاهده می‌گردد که کمترین مقدار خطای محاسبه ضریب Y'_r ، ۹/۳۱درصد و حداکثر خطای آن ۲۷/۱۲ درصد است. همچنین حداقل خطای محاسبه ضریب N'_r، ۶/۷۱درصد و حداکثر خطای آن ۱۷/۵۱درصد است. بنابراین مقدار خطای مدل کا اومگا اس‌اس‌تی در مقایسه با مدل کی-إپسیلون ری‌الایزیبل کمتر است و یا می‌توان گفت دقت آن بیشتر است.

جدول۷- ضرایب بدست آمده از شبیه سازی تست بازوی چرخان با مدل آشفتگی جریان کا-اومگا اس‌اس‌تی در حرکت یاو

Y^+	ضریب	سی‌اف‌دی	داده آزمایشگاه[۱۸]	خطا(٪)
۱/۵	Y'_r	۰/۰۰۴۰۶۸	۰/۰۰۵۲۵۱	۲۲/۵۴
	N'_r	-۰/۰۰۳۸۸	-۰/۰۰۴۴۴	۱۲/۵۸
۳	Y'_r	۰/۰۰۴۶۳۳	۰/۰۰۵۲۵۱	۱۱/۷۷
	N'_r	-۰/۰۰۴۰۳	-۰/۰۰۴۴۴	۹/۴۱
۵	Y'_r	۰/۰۰۴۷۶۲	۰/۰۰۵۲۵۱	۹/۳۱
	N'_r	-۰/۰۰۴۱۵	-۰/۰۰۴۴۴	۶/۷۱
۱۹	Y'_r	۰/۰۰۳۸۲۷	۰/۰۰۵۲۵۱	۲۷/۱۲
	N'_r	-۰/۰۰۳۶۷	-۰/۰۰۴۴۴	۱۷/۵۱

با بررسی جدول ۵ و ۶ مشخص گردید که بیشترین دقت نتایج مدل کی-إپسیلون ری‌الایزیبل در $y^+ = 30$ و برای مدل کا اومگا اس‌اس‌تی در $y^+ = 5$ محاسبه شده است. بر مبنای این نتایج، شبیه‌سازی حرکت پیچ به روش آزمایش بازوی چرخان با استفاده از دو مدل آشفتگی فوق انجام شده است و در جدول۸ ارائه شده است. نتایج نشان دهنده آن است که نتایج مدل کا-اومگا اس‌اس‌تی نسبت به مدل کی-إپسیلون از دقت بیشتری برخوردار است.

جدول۸- ضرایب حاصل از شبیه سازی تست بازوی چرخان پیچ ، مدل آشفتگی جریان کی-إپسیلون ری‌الایزیبل و کا-اومگا اس‌اس‌تی حرکت

مدل آشفتگی جریان	Y^+	ضریب	روش سی‌اف‌دی	داده آزمایشگاه[۱۸]	خطا(٪)
k-ε	۳۰	Z'_q	۰/۰۰۶۲۷	-۰/۰۰۷۵۵	۱۶/۹۳
		M'_q	-۰/۰۰۳۴۴	-۰/۰۰۳۷	۹/۶۶
k-ω	۵	Z'_q	-۰/۰۰۶۸۶	-۰/۰۰۷۵۵	۹/۱۳
		M'_q	۰/۰۰۳۳۹۱	-۰/۰۰۳۷	۸/۳۵

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

۱۴- بحث و نتیجه‌گیری

خطـای مقـادیر محاسـبه شـده از روش‌هـای مختلـف را می‌تـوان بصورت جدول۹ خلاصه نمود.

با توجه بـه داده‌هـای جـدول و نتـایج ارائـه شـده در قسـمت‌های پیشین ، نتایج زیر بدست می‌آید:

۱. روش تست کشش مـورب محاسـبه ضـرایب میرایـی حرکـات سوِای و هیو را با خطای کمتر از ۸/۵ درصد ممکـن می‌سـازد، در روش پی‌ام‌ام این مقادیر با خطای کمتر از ۱۲/۵ درصد قابل محاسبه است.

جدول۹: خطای ضرایب هیدرودینامیکی حاصل از شبیه‌سازی روش‌های مختلف بر حسب درصد(٪)

ضریب	داده‌های آزمایش [۱۸]	پی‌ام‌ام	کشش مورب	بازوی چرخان
Y'_v	-۰/۰۲۷۸۳۴	۶/۷۳	۴/۷۲	-
$Y'_{\dot{v}}$	-۰/۰۱۶۱۸۶	۲/۸۶	-	-
N'_v	۰/۰۱۳۶۴۸	۶/۲۳	۱/۰۷	-
$N'_{\dot{v}}$	۰/۰۰۰۳۹۶	۱۹/۵۷	-	-
Z'_w	-۰/۰۱۳۹۱۰	۱۲/۳۰	۸/۱۴	-
$Z'_{\dot{w}}$	-۰/۰۱۴۵۲۹	۱۶/۸۸	-	-
M'_w	۰/۰۱۰۳۲۴	۳/۹۶	۴/۱۹	-
$M'_{\dot{w}}$	-۰/۰۰۰۵۶۱	۱۸/۳۰	-	-
Y'_r	۰/۰۰۵۲۵۱	۰/۵۶	-	۹/۳۱
$Y'_{\dot{r}}$	۰/۰۰۰۳۹۸	۱/۶۶	-	-
N'_r	-۰/۰۰۴۴۴۴	۰/۶۶	-	۶/۷۱
$N'_{\dot{r}}$	-۰/۰۰۰۸۹۷	۱۱/۳۲	-	-
Z'_q	-۰/۰۰۷۵۴۵	۲۴/۳۰	-	۹/۱۳
$Z'_{\dot{q}}$	-۰/۰۰۰۶۳۳	۱۴/۵۳	-	-
M'_q	-۰/۰۰۳۷۰۰	۱۵/۳۴	-	۸/۳۵
$M'_{\dot{q}}$	-۰/۰۰۰۸۶۰	۴/۸۴	-	-

۲. روش بازوی چرخان می‌تواند بدون ملاحظاتی همچون تاثیرات دامنه و فرکانس که در روش پی‌ام‌ام وجود دارد، برای محاسـبه ضرایب چرخشی یاو و پیچ با خطای کمتر از ۹/۵ درصد مـورد استفاده قرار گیرد، این مقادیر با روش پی‌ام‌ام با خطـای کمتـر از ۲۵ درصد قابل محاسبه است.

۳. نتایج نشان دهنـده آن اسـت کـه روش ام‌آرِاف روش مناسـبی برای بکارگیری در شبیه‌سازی آزمایش بازوی چرخان است.

۴. دقت مدل آشفتگی کا-اومگا اس‌اس‌تی نسبت به مدل آشفتگی جریان کی-إپسیلون ری‌الایزیبـل در شـبیه سـازی آزمایشـات تست بازوی چرخان بیشتر است.

۵. تعیین مقادیر جرم افزوده برای حرکات سوِای و هیو با خطـای کمتر از ۲۰ درصد، و حرکات پیچ و یاو با خطـای کمتـر از ۱۵ درصد با روش پی‌ام‌ام قابل انجام است.

۶. روش اصلاح شده‌ای برای شبیه‌سازی حرکات سوِای و هیو، بـا تلفیق شـبکه متحـرک و شـرط مـرزی سـرعت ورودی، مـورد بررسی قرار گرفت که در مقایسه با روش مرسـوم، بـا کـاهش بیش از نصـف تعـداد شـبکه و زمـان حـل، محاسـبه ضـرایب هیدرودینامیکی را با همان دقت ممکن می‌سازد.

۷. با استفاده ترکیبـی از روش‌هـای فـوق می‌تـوان ضـرایب جـرم افزوده را با خطای کمتر از ۲۰درصـد و ضـرایب میرایـی را بـا خطای کمتر از ۱۰ درصد محاسبه کرد.

کلید واژگان

1-Restoring Coefficients
2-Damping Coefficients
3-Added Mass Coefficients
4-Towing Tank
5-Maneuvering Basin
6-Captive model tests
7-Oblique towing tests
8-Planar Motion Mechanism (PMM) tests
9-Rotating arm tests
10-Scale effects
11-Computational fluid dynamics (CFD)
12-Autonomous Underwater Vehicle(AUV)
13-Star ccm+
14-NACA0012
15-Surge
16-Sway
17-Heave
18-Yaw
19-Pitch
20-Roll
21-SNAME
22-Navier–Stokes(RANS)
23-Turbulent Viscosity
24-K-ε Realizable
25-K-ω SST
26-DTMB (David Taylor Model Basin
27-Pure sway
28-Pure heave
29-Pure yaw
30-Pure Pitch
31-Segregated (Predictor-Corrector) Flow
32-SIMPLE
33-Trimmer
34-Overset
35-Grid convergence index(GCI)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

3 -Symmetry 6
3 -Multiple Rotating Reference Frame(MRF) 7

۶ - مراجع

1- Abkowitz, M. A., (1969), *Stability and motion control of ocean vessels*, M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology.

2- Zhang, H., Xu, Y-r. and peng Cai, H. , (2010), *Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients, Journal of Marine Science and Application*, Vol. 9, No. 2, pp. 149–155.

3- Nazir, Z., min Su, Y. and Z. li Wang, *A CFD based investigation of the unsteady hydrodynamic coefficients of 3-D fins in viscous flow*, Journal of Marine Science and Application, Vol. 9, No. 3, pp. 250–255, 2010.

4- Pan, Y., Zhang, H. and Q. Zhou, *Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation*, (2012), Journal of Hydrodynamics, Vol. 24, No. 6, pp. 840–847.

5- Xu, F., Zou, Z. J., Yin, J. C. and Cao J., *Parametric identification and sensitivity analysis for Autonomous Underwater Vehicles in diving plane*, (2012), Journal of Hydrodynamics, Vol. 24, No. 5, pp. 744–751.

6- Mansoorzadeh, S., Pishevar, A. R. and Javanmard, E., (2013), *Numerical investigation of dynamic stability of an AUV*, Fluid Mechanic and Aerodynamic, Vol. 2, No. 1, pp. 69–81. (in Persian)

7- Pan, Y. C., Zhou, Q. D. and H. X. Zhang, *Numerical simulation of rotating arm test for prediction of submarine rotary derivatives*, (2015), Journal of Hydrodynamics, Vol. 27, No. 1, pp. 68–75.

8- Javanmard E., Mansoorzadeh, S. Pishevar, A. R. , (2015), *Numerical and experimental investigation of effect of control surface angle on an autonomous underwater vehicle drag, Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 358–366. (in Persian)

9- Nouri, N. M., Mostafapour, K., Sooha, Y. H. and Hassanpour, S. H. , (2016), *Investigation of hydrodynamic derivatives of an auv based on the water tunnel testing maneuvers, Journal of Marine engineering*, Vol. 25,No1, pp. 67–75. (in Persian)

10- Hajvand, A., Hasani, M., Babaee, M. and Sadeghian, M. , (2016), *Determine of an AUV hydrodynamic coefficient by CFD*, darya fonoon, Vol. 3, No. 1, pp. 54–66. (in Persian)

11- Shojaeefard, M. H., Khorampanahi, A., Mirzaei, M., *Numerical investigation of oscillation frequency and amplitude effects on the hydrodynamic coefficients of a body with NACA0012 hydrofoil section*, (2017), Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 31, No. 5, pp. 2251–2260.

12- T. Gao, Y. Wang, Y. Pang, Q. Chen, and Y. Tang, (2018), *A time-efficient CFD approach for hydrodynamic coefficient determination and model simplification of submarine*, , Ocean Engineering, vol. 154, no. February, pp. 16–26.

13- Ardeshiri, S., Mousavizadegan, S.H and Kheradmad, S., *Effect of Motion Domain and Velocity on Calculation of Underwater Vehicle Coefficients*, (2019), Modares Mechanical Engineering.; vol. 20, No. 1, pp.117-128. (in Persian)

14- Ardeshiri, S., Mousavizadegan, S.H and Kheradmad, S., *Virtual Simulation of PMM Tests Independent of Test Parameters*, (2020), Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike; vol. 71, No. 1, pp. 55–73.

15- Seif, M. S., Hasanvand, A., *Investigating the geometry and control surface of AUV robots on hydrodynamics performance*, (2021), marine-engineering. Vol. 17,No, 33,pp. 53-64. (in Persian)

16- K. Han et al. (2021), *Six-dof cfd simulations of underwater vehicle operating underwater turning maneuvers*, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 9, no. 12.

17- Groves, N. C., Huang, T. T., and M. S. Chang, *Geometric Characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF Models (DTRC Model Numbers 5470 and 5471, DTRC/SHD-1298-01)*, (1989), David Taylor Research Center, Bethesda, Maryland 20084-5000.

18- Roddy, R. F., *Investigation of The Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA SUBOFF Model*, 1990.

19- Fossen, T. I., *Underwater Vehicle Dynamics. Book TSI Press*, (1995), Albuquerque, pp.41-108.

20- Fossen, T. I. and Fjellstad, O., *Mathematical Modelling of Systems : Methods , Tools and Applications in Engineering and Related Sciences Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom, International Journal of Mathematical Modeling of Systems*, (1995), Vol. 1, No. February 2014, pp. 17–27.

21-SNAME, T, (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Technical and Research Bulletin No 1–5.

22- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., *A new k-epsilon eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows model development and validation*, (1994), Computers & Fluids, Vol. 24, No. August, pp. 227–238.

23- Launder, B. E. and Spalding, D. B., The numerical computation of turbulent flows, (1974), Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 269–289.

24- Lloyd, G., Espanoles, A., (2002). *Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics*. WS Atkins Consultants and Members of the NSC, MARNET-CFD Thernatic Network.

25- I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, (2008). *Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications*, Journal of Fluids

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]

Engineering, Transactions of the ASME, vol. 130, No. 7, pp. 0780011–0780014.
26- Dantas, J.L.D., Barros, E.A.d, (2013). *Numerical analysis of control surface effects on AUV maneuverability*. Applied Ocean Research, Vol.42, No.1, pp. 168–181.
27- Goodman, A., *Experimental techniques and methods of analysis used in submerged body research. The 3rd Symposium on Naval Hydrodynamics*, (1960), September, 17-24, Scheveningen. Washington: National Academy Press; 1960. pp. 379-449.
28- Gertler, M., *The DTMB planar motion mechanism system (PMM)*, (1967), Zagreb: Defense Technical Information Center.
29- Renilson, M., *Submarine Hydrodynamics*, 2015.
30- Roache, P. J., *a method for uniform reporting of grid refinement studies*, (1994), Journal of Fluid Engineering, vol. 116. pp. 405–413.
31- Roache, P. J., *Verification of Codes and Calculations*, (1998), AIAA J., vol. 36, no. 5, pp. 696–702.
32- Roache, P. J., *Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics*, (1997), Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 29, no. 1, pp. 123–160.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-31]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.38.4.8]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.38.38]