

استخراج عددی ضرایب هیدرودینامیکی دمپینگ و جرم افزوده مانور شناور هوشمند زیرسطحی تا مرتبه سوم با استفاده از روش حجم محدود

مسعود حکمی فرد^۱، محمود رستمی ورنوسفادرانی^{۲*}

۱. گروه دریا، مهندسی دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر

۲. گروه دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۲

شناسه دیجیتال (DOI): [10.22113/jmst.2019.167904.2253](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.167904.2253)

چکیده

یکی از رایج‌ترین روش‌های بررسی رفتار هیدرودینامیکی زیردریایی مانند مانور شناور، مطالعه ضرایب هیدرودینامیکی آن است. در این مقاله محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی تا مرتبه سوم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به روش حجم محدود انجام گرفته است. به این منظور، بدنه‌ی بدون ملحقات با فرم مایرینگ انتخاب گردید و مانور آن شامل حرکات سرج، سووی و یاو به صورت عددی و در حالت غیردائم شبیه‌سازی شده است. بعلاوه اثرات آشفتگی با مدل $k - \omega$ SST در مدل‌سازی عددی لحاظ شده است. برای استخراج نیروها و ممان‌ها در حرکات سووی و یاو، از مکانیزم حرکت صفحه‌ای (PMM) استفاده گردیده و در شبکه‌بندی مساله از تکنیک شبکه overset استفاده شده است. همچنین برای بررسی دقت شبیه‌سازی، استقلال از شبکه صورت گرفته است. پس از استخراج نیروها و گشتاورها، با استفاده از معادلات بدست آمده از طریق درونیایی و تعریف هر ضریب، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافه و دمپینگ استخراج گردیدند. مقادیر عددی با نتایج آزمایشگاهی مرجع (Prestero, 2001) مقایسه شده‌اند. اختلاف مقادیر عددی ضرایب دمپینگ نسبت به نتایج آزمایشگاهی در محدوده‌ی ۰/۸ تا ۱۲ درصد است. این اختلاف در ضرایب جرم افزوده در محدوده‌ی ۰/۸ تا ۳۷ درصد می‌باشد که نشان از تطبیق خوب روش عددی با آزمایشگاهی دارد.

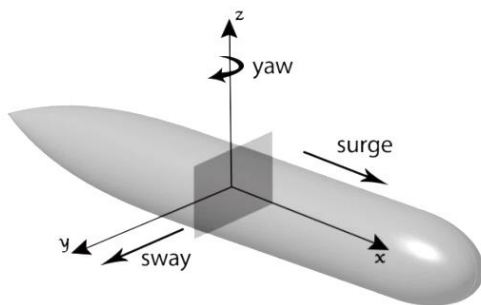
واژگان کلیدی: ضرایب هیدرودینامیکی، PMM، حجم محدود، شبکه Overset

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: rostamivf@aut.ac.ir

۱. مقدمه

نیروه‌های هیدرودینامیکی وارد بر بدنه شناور زیرسطحی از جمله نیروی لیفت و درگ را می‌توان به وسیله‌ی بسط تیلور به فرم ضرایبی از سرعت و شتاب نوشت. این ضرایب، ضرایب هیدرودینامیکی نامیده می‌شوند. با بی‌بعدسازی این ضرایب می‌توان آن‌ها را با استفاده از اصل تشابه به مدل‌های دیگر تعمیم داد. ضرایب جرم افزوده و دمپینگ بعنوان ضرایب هیدرودینامیکی محسوب می‌شوند (Triantafyllou & Hover, 2003). برای بررسی مانور شناورها استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی بسیار مهم است. به عبارت دیگر، برای کنترل و هدایت زیردریایی هوشمند، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. این مدل‌ها با تکیه بر ضرایب هیدرودینامیکی توسعه یافته‌اند. در نتیجه اطلاع از این ضرایب در مرحله طراحی شناور، بسیار با اهمیت است. سه حرکت مهم در مانور شناورها شامل سرچ^۱، سووی^۲ و یاو^۳ هستند که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای بررسی مانور شناورها می‌توان از روش‌های آزمایشگاهی و عددی استفاده نمود که بدلیل هزینه‌ها و امکانات زیاد روش‌های آزمایشگاهی، محققان بسیاری از روش‌های عددی استفاده کرده‌اند. در میان این روش‌ها، روش حجم محدود با وجود هزینه محاسباتی بالا اما بدلیل دقت بسیار خوب، دارای کاربرد بسیاری است. ژانگ & Zhang, Xu, Cai, & (2010) Application, ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور را با استفاده مدل توربولانسی $k - \epsilon$ بدست آورد که این مدل برای سیال دارای جدایش جریان مناسب نیست. از طرف دیگر، ژانگ صرفاً حرکات سووی و هیو را بررسی کرده و در واقع مسئله را به صورت دو بعدی حل کرده است. وانگ (Wang,

Sun, Wang, Wu, & Wang, 2011) حرکات مانور یک زیرسطحی را در حالت دائم بررسی کرده است. پرال (Perrault, Bose, O'Young, & Williams, 2003) به بررسی اثرات سطوح کنترلی بر روی ضرایب جرم افزوده پرداخته و ضرایب دمپینگ را مطالعه نکرده است. پرسترو (Prestero, 2001) یک شناور زیرسطحی را به صورت شش درجه آزادی مورد آزمایش قرار داده و نتایج را با یک روش تحلیلی مقایسه کرده است که به عنوان مرجع آزمایشگاهی در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. زارع نژاد و همکاران (zare-nezhad & ghasemi, 2016) به محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی یک نمونه AUV به روش تحلیلی-تجربی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روابط تحلیلی ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده و دمپینگ را استخراج کرده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند.



شکل (۱): حرکات اصلی در مانور

در این مقاله، پس از بررسی معادلات حاکم بر سیال، به تشریح اصول مدل‌سازی عددی پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Star-CCM+ (CD-adapco™, 2015) که بر مبنای روش حجم محدود توسعه یافته، انجام می‌گردد. شبیه‌سازی در شرایط غیردائم و با استفاده از مدل توربولانسی $k - \omega SST$ انجام می‌شود. در ادامه برای افزایش دقت نتایج، چگونگی انتخاب شبکه و استقلال از آن بررسی می‌گردد. برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، شبیه‌سازی

Surge^۱
Sway^۲
Yaw^۳

آزمایش PMM^۱ از طریق ماژول اختصاصی نرم‌افزار در دو وضعیت سووی و یاو خالص^۲ صورت می‌گیرد. در نهایت، میزان خطای ضرایب نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پرسترو (Prestero, 2001) بدست می‌آیند.

۲. مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم ناپذیر معادلات بقای جرم و معادلات مومنتم هستند. فرم تانسوری این معادلات در حالت کلی به صورت
رابطه

^۱ Planner Motion Mechanism
^۲ Pure Yaw

بیان شده است (Fefferman, 2006):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + B_i \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right. \right. \\ &+ \left. \left. \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\xi \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

معروف به معادلات ناویر استوکس به صورت رابطه‌ی (۲) تبدیل می‌شود (Batchelor & Batchelor, 1967):

که در آن u_i بیان گر مؤلفه‌ی بردار سرعت در راستای i ، P بیان گر فشار، B_i بیان گر نیروی حجمی در راستای i ، μ بیان گر ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال و ξ نیز بیان گر ضریب دوم ویسکوزیته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که مقدار ξ برای اغلب سیالات بسیار کوچک بوده و می‌توان از آن صرف نظر کرد. برای یک سیال تراکم‌ناپذیر معادله مومنتم در رابطه‌ی مایرینگ (Myring, 1976) بدون ملحقات، با طول کلی $1/330$ متر و حداکثر قطر $0/191$ متر و دارای کمترین نیروی مقاومت در جهت سرج در این

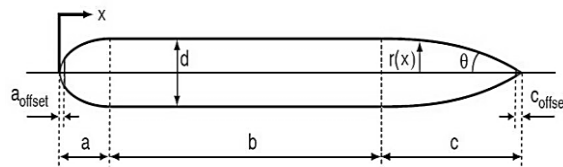
$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \frac{\nabla \tau^*}{\rho} + \rho g \quad (2)$$

نسبت ابعادی (L/D) است. بر اساس رابطه مایرینگ، طول هر بدنه، تابع فاصله از دماغه است. سایر مشخصات نشان داده شده در شکل (۲) مربوط به شناور REMUS (Prestero, 2001) در جدول (۱) بیان شده است.

برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی، از مدل $k - \omega$ SST استفاده شده است. این مدل از انرژی آشفتگی جنبشی k و فرکانس آشفتگی ω استفاده می‌کند. مدل $k - \omega$ شامل دو مدل ویسکوکس^۱ و انتقال تنش برشی SST^۲ است. مدل آشفتگی SST یک مدل دو معادله‌ای لزجت گردابی است. استفاده از روابط $k - \omega$ در بخش درونی لایه مرزی باعث می‌شود که این مدل در تمام ناحیه‌ی زیر لایه‌ی لزج نزدیک دیواره، عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد و در نتیجه مدل SST به عنوان مدل آشفتگی رینولدز پایین بدون هرگونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گرفته است (Menter, 1994).

روابط مربوط به هر حرکت در بخش مربوطه و در قسمت نتایج به تفصیل ذکر شده اند. محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی نیاز به تعیین پروفیل بدنه، جرم و توزیع جرم دارد. شناور مورد بحث در این مقاله، پروفیلی مطابق با فرم بدنه‌ی

^۱ Wilcox
^۲ Shear Stress Transport (SST)



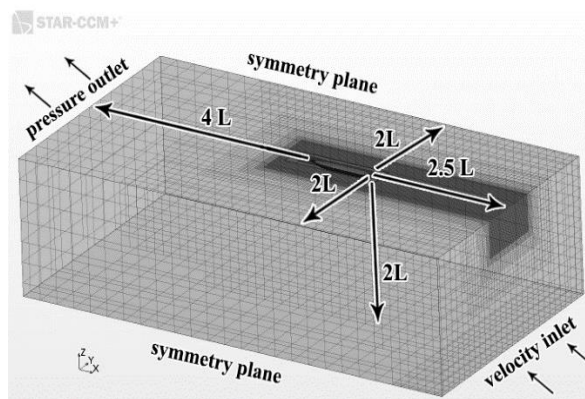
شکل (۲): پروفیل بدنه REMUS (Prestero, 2001)

جدول (۱): هندسه‌ی بدنه REMUS

مقدار	واحد	مشخصه
۱/۳۳۰	m	طول
۰/۱۹۱	m	قطر
۰/۱۹۱	m	A
۰/۰۱۶۵	m	a_{offset}
۰/۶۵۴	m	B
۰/۵۴۱	m	C
۰/۰۳۶۸	m	c_{offset}
۰/۴۳۶	r	θ
۲۹۹	N	وزن
۳۰۶	N	بویانسی

بدنه باید به نحوی تعیین شود که مرزها اثری بر جریان اطراف بدنه نگذارند. مراجع مختلفی درباره‌ی حدافل فاصله مرزها تا بدنه صحبت به میان آورده‌اند. محققان (Tyagi & Sen, 2006) نشان داده‌اند که دامنه مناسب جهت حرکت بدنه، بیش از دو برابر طول از مقابل و طرفین و چهار برابر طول بدنه از انتها است.

با توجه به این که شناور در آب دریا در حال حرکت است، چگالی و لزجت دینامیکی سیال اطراف بدنه همانند آب شور دریا به ترتیب، ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و $۱/۸۸ \times ۱۰^{-۳}$ پاسکال ثانیه در نظر گرفته می شود. مدل سازی عددی بدنه‌ی شناور در نرم افزار، نیازمند تعیین شرایط مرزی مناسب با مسئله است. به همین منظور، شرایط مرزی بر اساس شکل (۳) تعیین شده است. فاصله مرزها تا



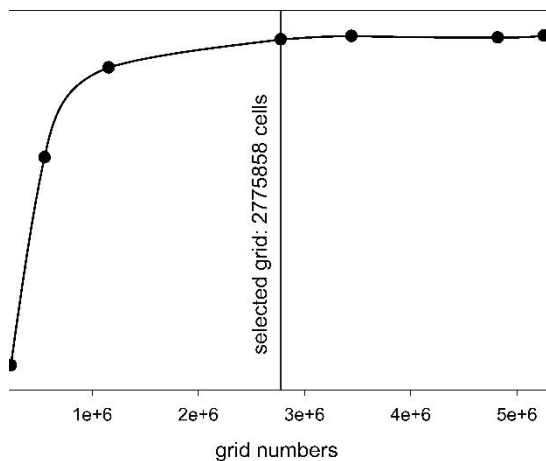
شکل (۳): شرایط مرزی بر روی دامنه محاسباتی

متناسب با فیزیک مسئله باعث دستیابی به پاسخ دقیق می شود. بهترین گزینه برای مسائل با

انتخاب دامنه و شرایط مرزی مناسب از یک طرف و از طرف دیگر شبکه بندی دقیق و شرایط عددی

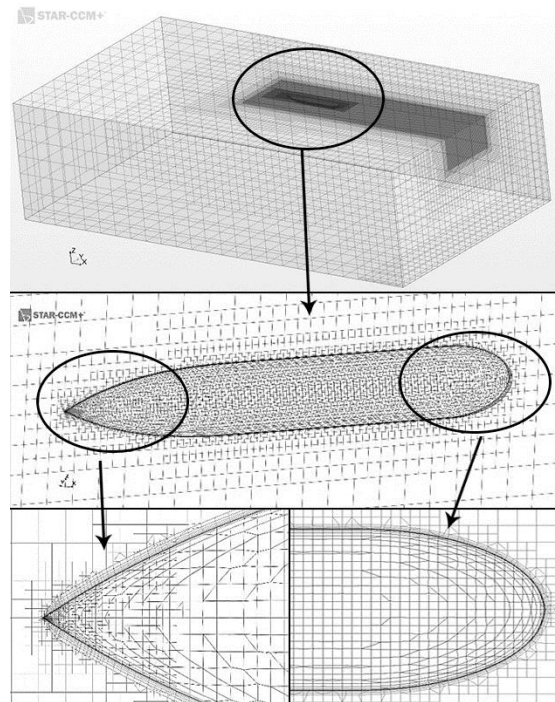
۲/۵۷۵	۲۳۵۶۰۳	۱
۵/۶۱۹	۵۵۳۴۸۶	۲
۵/۶۳۸	۱۱۵۵۸۷۲	۳
۵/۶۴۴	۲۷۷۵۸۵۸	۴
۵/۶۴۵	۳۴۴۲۰۱۱	۵
۵/۶۴۴	۴۸۱۸۸۱۵	۶
۵/۶۴۵	۵۲۵۲۵۰۸	۷

شکل (۵) نشان دهنده نیروی درگ (نیوتن) بر حسب تعداد سلول‌های شبکه است. از این شکل مشخص می‌شود که شبکه شماره ۴ برای انجام شبیه‌سازی مناسب است، زیرا نیروی درگ حاصل از شبکه‌های ۵ تا ۷ تفاوت چندانی با شبکه ۴ ندارند.



شکل (۵): مقایسه نیروی درگ (N) بر حسب تعداد سلول در مدل‌سازی جریان آشفته و در اطراف جسم، اغلب از مفهومی به نام تابع دیواره^۲ (Gerhart, Gerhart, & Hochstein, 2016) استفاده می‌شود. توابع دیواره در حقیقت پروفیل‌های تحلیلی جریان در لایه مرزی مجاور دیواره هستند که با استفاده از روش‌های تحلیلی و از حل صریح معادلات جریان در نزدیکی دیواره به دست آمده‌اند. شکل (۶) مقدار y^+ را بر روی بدنه شناور نشان می‌دهد. مقدار بدست آمده بین ۳۰ تا ۳۰۰ است که با توجه

جدایش جریان، حالت Trimmed است (CD-adapcoTM, 2015). برای حرکت از شبکه‌ی هم-پوشان^۱ در اطراف بدنه استفاده شده است. شکل (۴) شبکه اطراف بدنه را نشان داده است.



شکل (۴): شبکه بندی انجام شده روی شناور و دامنه محاسباتی

برای بررسی استقلال از شبکه، بدنه با شبکه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، شناور در حرکت سرچ با سرعت طراحی ۲/۵ متر بر ثانیه، به مدت ۱ ثانیه و با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه شبیه‌سازی عددی شد. مشخصات شبکه‌هایی که در مرحله استقلال از شبکه ایجاد شدند در جدول (۲) بیان شده‌اند.

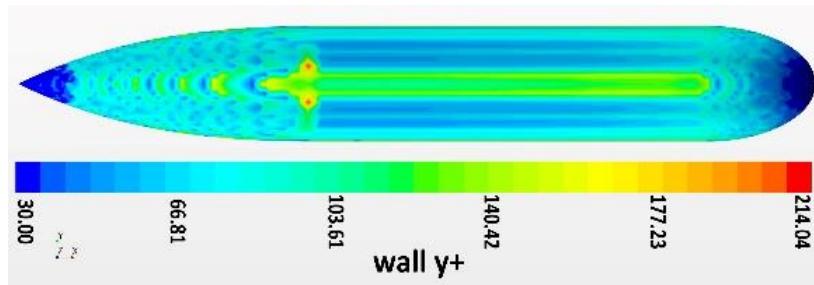
جدول (۲): مشخصات شبکه‌های ایجاد شده

شبکه	تعداد سلول	نیروی درگ (N)
------	------------	---------------

² Wall function

¹ Overset mesh

به مدل استفاده شده $k - \omega SST$ این مقادیر در بازه معتبر y^+ قرار دارند.



شکل (۶): توزیع y^+ روی بدنه شناور

میرایی بهتر است شتاب وارد بر شناور صفر باشد تا از اثر جرم افزوده صرف نظر شود. از آنجا سه حرکت اصلی در مانور وجود دارد، نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به صورت رابطه

هستند (Fossen, 2011):

$$\begin{aligned} X &= X_u u + X_{uu} u^2 + X_{uuu} u^3 + X_{\dot{u}} \dot{u} \\ Y &= Y_v v + Y_{vv} v^2 + Y_{vvv} v^3 + Y_r r + \\ &Y_{rr} r^2 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\ N &= N_v v + N_{vv} v^2 + N_{vvv} v^3 + N_r r \\ &+ N_{rr} r^2 + N_{rrr} r^3 \\ &+ N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (3)$$

مشتق نیرو یا ممان مربوطه نسبت به سرعت مرتبط می‌باشد. به طور مثال برای حرکت سووی، رابطه‌ی (۴) بیان‌گر تعریف ریاضی ضرایب هیدرودینامیکی مربوطه است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial v} &= Y_v \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial v^2} &= Y_{vv} \\ \frac{\partial^3 Y}{\partial v^3} &= Y_{vvv} \\ \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} &= Y_{\dot{v}} \end{aligned} \quad (4)$$

محاسبه‌ی هر ضریب نیازمند آزمایش مجزایی است و با یک بار شبیه‌سازی امکان استخراج همه ضرایب نیست. به طور کلی، ضرایب هیدرودینامیکی به دو بخش ضرایب میرایی یا دمپینگ و ضرایب جرم افزوده تقسیم می‌شوند. جهت محاسبه‌ی ضرایب

$$\begin{aligned} X &= X_u u + X_{uu} u^2 + X_{uuu} u^3 + X_{\dot{u}} \dot{u} \\ Y &= Y_v v + Y_{vv} v^2 + Y_{vvv} v^3 + Y_r r + \\ &Y_{rr} r^2 + Y_{rrr} r^3 + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} \\ N &= N_v v + N_{vv} v^2 + N_{vvv} v^3 + N_r r \\ &+ N_{rr} r^2 + N_{rrr} r^3 \\ &+ N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن X ، Y و N به ترتیب نشان دهنده نیروی سرج، نیروی سووی و گشتاور یاو و u ، v و r به ترتیب نشان دهنده سرعت حرکت سرج، سرعت حرکت سووی و سرعت دورانی یاو هستند. همچنین ضرایب X_u ، Y_v و N_r و... همان ضرایب هیدرودینامیکی هستند که هر ضریب برابر با

سرج با شتاب ثابت و دو شبیه سازی PMM شامل سووی خالص و یاو خالص هستند، که در ادامه مقاله تشریح شده است.

برای استخراج این ضرایب، ۸ شبیه سازی عددی جداگانه انجام گرفت که شامل پنج شبیه سازی برای حرکت سرج با سرعت ثابت، یک شبیه سازی جدول (۳) ضرایب مرتبط با هر حرکت را نشان می دهد.

جدول (۳): حرکت های مانور و ضرایب هیدرودینامیکی

حرکت	ضرایب
سرج	X_u و X_{uu} و X_{uuu} و $X_{\dot{u}}$
سووی خالص	Y_v و Y_{vv} و Y_{vvv} و $Y_{\dot{v}}$ و N_v و N_{vv} و N_{vvv} و $N_{\dot{v}}$
یاو خالص	Y_r و Y_{rr} و Y_{rrr} و $Y_{\dot{r}}$ و N_r و N_{rr} و N_{rrr} و $N_{\dot{r}}$

۳. نتایج

ها به کمک پردازنده ۶ هسته ای با فرکانس پردازش ۲/۹۳ گیگاهرتز در هر هسته و ۸ گیگابایت رم انجام شده است.

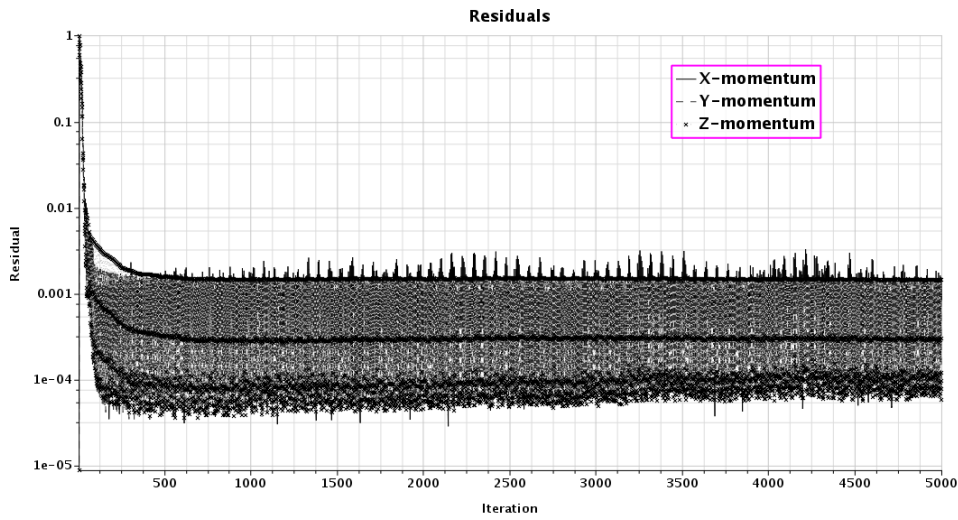
جدول (۴) مدت زمان انجام هر مرحله از شبیه سازی در نرم افزار را بیان می کند. این شبیه سازی -

جدول (۴): مدت زمان انجام شبیه سازی در هر مرحله

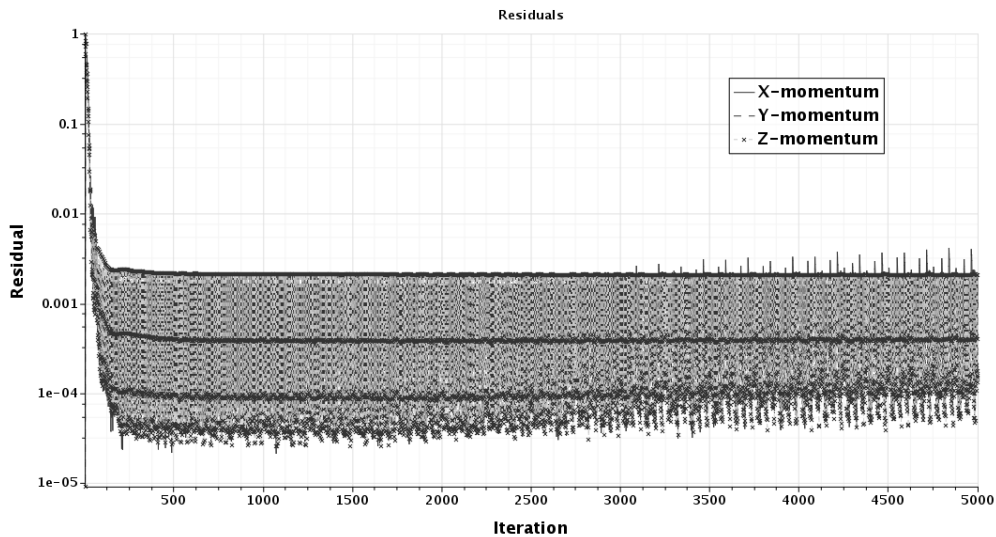
حرکت	مدت زمان انجام شبیه سازی (ساعت)
سرج در ۵ سرعت	۶۰
سرج شتابدار	۱۲
سووی	۱۴۴
یاو	۱۴۴
جمع	۳۶۰

منظور معتبر بودن نتایج کفایت می کند. به عنوان نمونه، در شکل (۷) و شکل (۸) نمودارهای خطای باقیمانده در حرکت سرج با سرعت های مختلف نشان داده شده است.

برای استخراج ضرایب مربوط به حرکت سرج، شناور در سرعت های ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵، ۲/۰ و ۲/۵ متر بر ثانیه به صورت مستقیم و در هر سرعت به مدت ۲/۵ ثانیه حرکت می کند. این مدت به دلیل همگرایی خطای باقیمانده در شبیه سازی، به



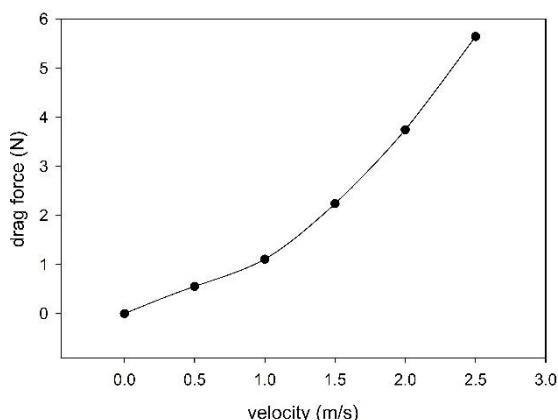
شکل (۷): نمودار خطای باقیمانده در حرکت سرج با سرعت ۱ متر بر ثانیه



شکل (۸): خطای باقیمانده در حرکت سرج با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه

مقادیر نیروی درگ در هر یک از سرعت‌های فوق استخراج شد که نمودار آن در شکل (۹) قابل مشاهده است.

از آنجا که ۵ مرحله شبیه‌سازی حرکت سرج، از نوع سرعت ثابت است و شتاب در آن اعمال نشده، بنابراین در این حالات جرم افزوده وجود ندارد.



شکل (۹): نیروی درگ (N) بر حسب سرعت (m/s)

با استفاده از درون یابی نقاط نمودار شکل (۹)

رابطه

$$X_D = 0.1239u^3 - 1.4314u^2 + 0.7885u \quad (۵)$$

که معرف نیروی درگ بر حسب سرعت سرچ

است، بدست می آید:

$$X_D = 0.1239u^3 - 1.4314u^2 + 0.7885u \quad (۵)$$

رابطه

$$X_D = X_{uuu}u^3 + X_{uu}u^2 + X_uu \quad (۶)$$

از سطر اول رابطه

با در نظر گرفتن شتاب صفر بدست می آید. با

تطبيق رابطه

$$\begin{aligned} X &= X_uu + X_{uu}u^2 + X_{uuu}u^3 + X_{\dot{u}}\dot{u} \\ Y &= Y_v v + Y_{vv}v^2 + Y_{vvv}v^3 + Y_r r + \\ &Y_{rr}r^2 + Y_{rrr}r^3 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} \\ N &= N_v v + N_{vv}v^2 + N_{vvv}v^3 + N_r r \\ &+ N_{rr}r^2 + N_{rrr}r^3 \\ &+ N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} \end{aligned} \quad (۳)$$

و رابطه

$$X_D = 0.1239u^3 - 1.4314u^2 + 0.7885u \quad (۵)$$

که بیانگر معادله نیروی درگ در حرکت سرچ

بدون شتاب است، ضرایب دمپینگ حرکت سرچ

مشخص می شوند. این ضرایب در

$$X_D = X_{uuu}u^3 + X_{uu}u^2 + X_uu \quad (۶)$$

جدول (۵) نشان داده شده اند.

$$X_D = X_{uuu}u^3 + X_{uu}u^2 + X_uu \quad (۶)$$

پس از این مرحله، شبیه سازی حرکت سرچ به

صورت شتاب دار انجام می گیرد. رابطه

$$X_A = (m + X_{\dot{u}})\dot{u} + X_D \quad (۷)$$

بیانگر معادله نیروی درگ در حرکت مستقیم با

شتاب ثابت است. با مقایسه رابطه های

و

$$X_D = X_{uuu}u^3 + X_{uu}u^2 + X_uu \quad (۶)$$

ضریب جرم افزوده حرکت سرچ نیز محاسبه می

$$X_A = (m + X_{\dot{u}})\dot{u} + X_D \quad (۷)$$

شود:

$$X_A = (m + X_{\dot{u}}) \dot{u} + X_D \quad (7)$$

که برای محاسبه $X_{\dot{u}}$ بایستی مقدار X_D در سرعت $u = 2.5m/s$ از X_A در لحظه $t = 3s$ کسر گردد. مقدار این ضرایب در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): ضرایب هیدرودینامیکی حرکت سرج

خطا (درصد)	مقدار آزمایشگاهی (Prestero, 2001)	مقدار عددی	ضریب
-	-	۰/۱۲	X_u
۱۱/۰	-۱/۶۲	-۱/۴۳	X_{uu}
-	-	۰/۷۹	X_{uuu}
۳/۱۱	-۰/۹۳	-۰/۹۰	$X_{\dot{u}}$

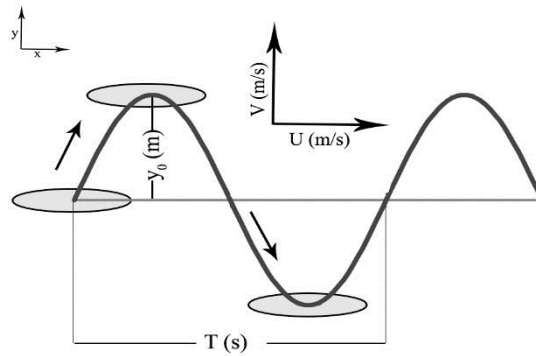
منحنی نیرو سرعت و خطاهای بوجود آمده در روند شبیه سازی عددی باشد که امری معمول در همه محاسبات عددی است.

به منظور استخراج ضرایب مربوط به حرکت سووی، آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص در نرم افزار مدل سازی می شود. به این صورت که بدنه از مرکز بویانسی خود به یک بازوی مجازی متصل می شود و بازو با مشخصات مندرج در

همانطور که مشاهده می شود با روش عددی حاضر ضرایب دمپینگ تا مرتبه سوم بدست آمده اند در حالی که در روش آزمایشگاهی (Prestero, 2001) فقط مرتبه دوم محاسبه شده است. از سووی مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده در حدود ۳ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می دهد. خطای نسبی ضریب دمپینگ مرتبه دوم نیز مقدار نسبتاً کمی است که می تواند ناشی از درون یابی انجام گرفته برای جدول (۶) در آب حرکت می کند. پارامترهای حرکت سووی از آزمایش PMM در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

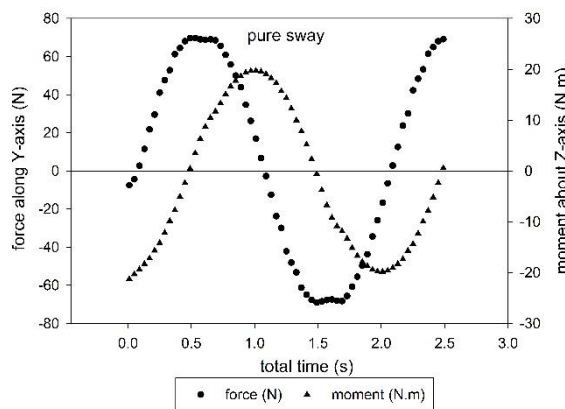
جدول (۶): پارامترهای شبیه سازی حرکت سووی

مقدار	واحد	نماد	پارامتر
۱	m/s	U	سرعت بازو در راستای x
۲	s	T	نوسان بازو در راستای y
۰/۵	m	y_0	حداکثر دامنه نوسان

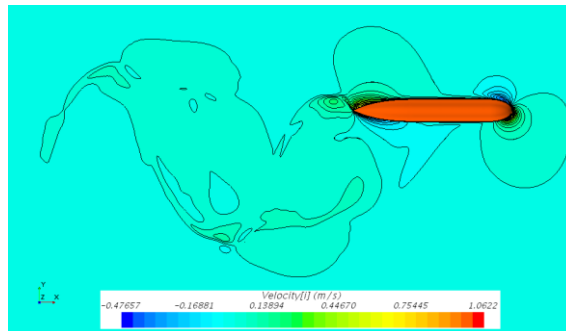


شکل (۱۰): پارامترهای حرکت سووی

شبیه سازی فوق برای مدت ۲/۵ ثانیه انجام شد. مقادیر نیروی درگ در راستای محور y و گشتاور حول محور z بدست آمدند. شکل (۱۱) نمودار نیرو و گشتاور حاصل از شبیه سازی را بر حسب زمان نشان می دهد. شکل (۱۲) توزیع سرعت سیال در اطراف شناور را نشان می دهد. شباهت خط اثر حرکت شناور بر روی سیال بین شکل (۱۰) و شکل (۱۲) مشهود است.



شکل (۱۱): نیرو و گشتاور بدست آمده در آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص بر حسب زمان



بطور مستقیم نمودار نیرو بر حسب سرعت ترسیم شد. اما در این بخش اعداد نیرو، گشتاور و سرعت متناظر با زمان از منحنی های نیرو زمان، گشتاور زمان و سرعت زمان استخراج می شود. قابل ذکر است که روابط مربوط به جابجایی، سرعت و شتاب از طریق روابط

شکل (۱۲): توزیع سرعت سیال اطراف بدنه در آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص در زمان ۲/۵ ثانیه همانطور که در بخش مربوط به بدست آوردن ضرایب حرکت سرچ گفته شد بایستی نمودار نیرو بر حسب سرعت v ترسیم گردد. در بخش سرچ

$$\dot{v} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -y_0 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

بدست می آیند:

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$v = \frac{dy}{dt} = y_0 \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (\lambda)$$

$$\dot{v} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -y_0 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

هیدرودینامیکی صورت می گیرد. ضرایب دمپینگ حرکات سووی و یاو، در زمانی اندازه گیری می شوند که شتاب صفر و سرعت ماکزیمم باشد. همچنین ضرایب جرم افزوده زمانی اندازه گیری می شوند که شتاب و جابجایی حداکثر باشند. سرعت ها و شتاب های متناظر با زمان های ذکر شده، نقاطی هستند که مشتق گیری در آنها انجام می گ_____ردد.

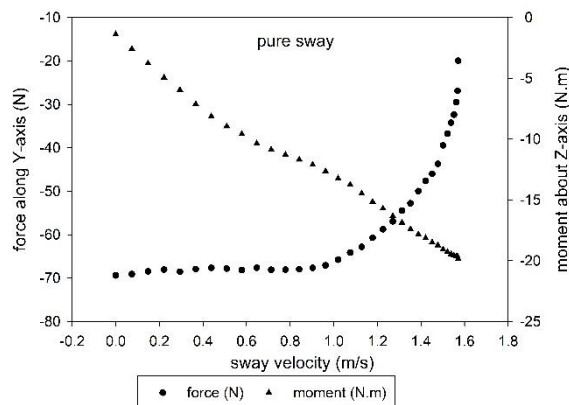
$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (\lambda)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = y_0 \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t$$

که در روابط فوق مقادیر T و y_0 از جدول (۶) بدست می آیند. به منظور تخمین بهتر توابع نیرو و ممان سووی بر حسب سرعت از تابع چندجمله ای درجه ۶ استفاده می شود. شکل (۱۳) نشان دهنده نیرو و گشتاور بر حسب سرعت سووی v است. روابط (۹) و (۱۰) از شکل (۱۳) در بازه ی کوچکی حول نقطه ای که مشتق گیری انجام می شود، استخراج می گردد. همانطور که قبلا ذکر شد، مشتق گیری از نیرو و ممان نسبت به سرعت و شتاب برای بدست آوردن ضرایب جدول (۷) این نقاط را برای هر ضریب را نشان می دهد.

جدول (۷): نقاط زمانی جهت مشتق گیری از توابع نیرو و ممان

شرایط شناور در این لحظه	لحظه اعمال مشتق (ثانیه)	ضریب
حداکثر سرعت v	۱	N_{vvv} و N_{vv} و N_v و Y_{vvv} و Y_{vv} و Y_v
حداکثر شتاب \dot{v}	۱/۵	$N_{\dot{v}}$ و $Y_{\dot{v}}$
حداکثر سرعت r	۱/۵	Y_r و Y_{rr} و Y_{rrr} و N_r و N_{rr} و N_{rrr}
حداکثر شتاب \dot{r}	۱	$N_{\dot{r}}$ و $Y_{\dot{r}}$

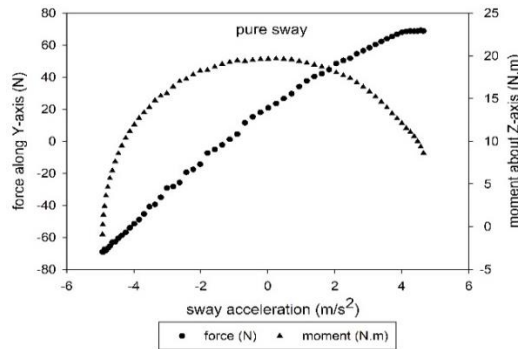


شکل (۱۳): نیرو و گشتاور حرکت سووی بر حسب سرعت سووی

$$\begin{aligned}
 Y = & 57.409 v^6 + 186.87 v^5 \\
 & + 195.35 v^4 \\
 & + 49.507 v^3 \\
 & + 1.6425 v^2 \\
 & - 4.6479 v - 68.962
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 N = & 0.458 v^6 + 2.4553 v^5 \\
 & + 4.6428 v^4 \\
 & + 3.4618 v^3 \\
 & - 0.8854 v^2 \\
 & - 15.907 v - 1.4029
 \end{aligned} \quad (10)$$

از رابطه‌های فوق در نقطه حداکثر سرعت v_{max} سه مرتبه مشتق گیری شد و هر بار یکی از ضرایب بدست آمد. مقادیر این ضرایب در جدول (۸) آورده شده اند. شکل (۱۴) نشان دهنده نیرو و گشتاور سووی بر حسب \dot{v} است. روابط (۱۱) و (۱۲) بیانگر توابع تخمین زده شده از روی شکل



شکل (۱۴): نیرو و گشتاور حرکت سووی بر حسب شتاب سووی

$$\begin{aligned}
 Y = & -64.6 \dot{v}^6 - 1556.3 \dot{v}^5 \\
 & - 15273 \dot{v}^4 \\
 & - 77527 \dot{v}^3 \\
 & - 211776 \dot{v}^2 \\
 & - 287578 \dot{v} \\
 & - 142795
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 N = & -0.0019 \dot{v}^6 + 0.0088 \dot{v}^5 \\
 & + 0.0075 \dot{v}^4 \\
 & - 0.0466 \dot{v}^3 \\
 & + 0.3769 \dot{v}^2 \\
 & + 0.0782 \dot{v} - 19.773
 \end{aligned} \quad (12)$$

از رابطه‌های فوق در نقطه حداکثر شتاب \dot{v}_{max} مشتق گیری شد و ضرایب جرم افزوده نیرو و گشتاور بدست آمدند. مقادیر این ضرایب در جدول (۸) نشان داده شده اند.

جدول (۸): ضرایب دمپینگ و جرم افزوده در وضعیت سووی خالص تست PMM

ضریب	مقدار عددی	مقدار آزمایشگاهی (Prestero, 2001)	خطا (درصد)
Y_v	۲۷۷/۵۵	-	-
Y_{vv}	-۱۳۲۰/۷۱	-۱۳۱۰/۰۰	۰/۸۲
Y_{vvv}	۶۱۰۳/۰۷	-	-
$Y_{\dot{v}}$	-۳۵/۸۱	-۳۵/۵۰	۰/۸۷
N_v	-۱۱/۰۱	-	-
N_{vv}	-۳/۶۱	-۳/۱۸	۱۳/۵
N_{vvv}	۳/۸۰	-	-
$N_{\dot{v}}$	۲/۵۷	۱/۹۳	۳۳/۱۶

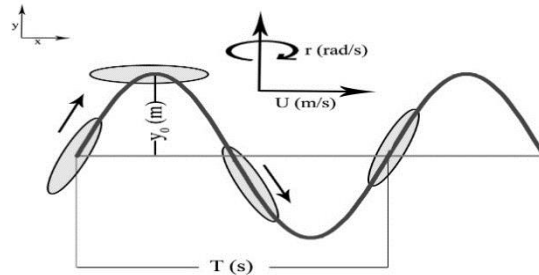
است، که می تواند بعلت خطا در درون یابی و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت سووی خالص باشد که ممکن است ناشی از امکان بروز خطای نرم افزار نیز باشد.

به منظور استخراج ضرایب مربوط به حرکت یاو، آزمایش PMM در وضعیت یاو خالص در نرم افزار مدل سازی می شود. به این صورت که بدنه از مرکز بویانسی خود به یک بازوی مجازی متصل می شود و بازو با مشخصات مندرج در جدول (۹) در آب حرکت می کند. پارامترهای حرکت سووی از آزمایش PMM در شکل (۱۵) نشان داده شده است. شبیه سازی فوق برای مدت ۲/۵ ثانیه انجام شد. مقادیر نیروی درگ در راستای محور y و گشتاور حول محور z بدست آمدند. شکل (۱۶) نمودار نیرو و گشتاور حاصل از شبیه سازی را بر حسب زمان نشان می دهد.

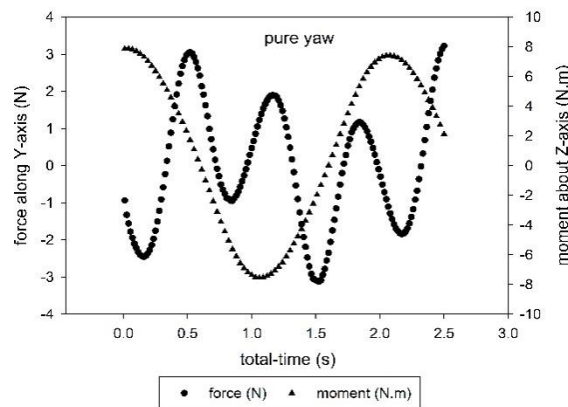
شکل (۱۷) توزیع سرعت سیال در اطراف شناور را نشان می دهد. شباهت خط اثر حرکت شناور بر روی سیال بین شکل (۱۷) مشهود است.

جدول (۹): پارامترهای شبیه سازی حرکت یاو

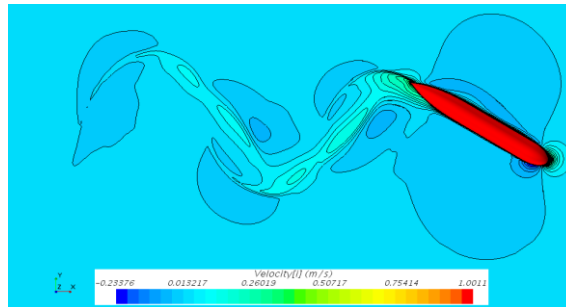
پارامتر	نماد	واحد	مقدار
سرعت بازو در راستای x	U	m/s	۱
نوسان بازو در راستای y	T	s	۲
حداکثر دامنه نوسان	γ_0	m	۰/۲



شکل (۱۵): پارامترهای حرکت یاو



شکل (۱۶): نیرو و گشتاور بدست آمده در آزمایش PMM در وضعیت یاو خالص برحسب زمان



بخش برای انجام استخراج ضرایب، اعدادنیرو، گشتاور و سرعت متناظر با زمان از منحنی های نیرو زمان، گشتاور زمان و سرعت زمان استخراج می شود. قابل ذکر است که روابط مربوط به جابجایی، سرعت و شتاب در یاو خالص از طریق رابطه بدست می آیند:

شکل (۱۷): توزیع سرعت سیال اطراف بدنه در آزمایش PMM در وضعیت یاو خالص در زمان ۲/۵ ثانیه

همانند قبل، پس از شبیه سازی برای ۲/۵ ثانیه، مقادیر نیروی درگ در راستای محور y و گشتاور حول محور z بر حسب زمان بدست آمدند. در این

$$\begin{aligned} \Psi &= a \cos \frac{2\pi}{T} t \\ r &= \frac{d\Psi}{dt} = -a \frac{2\pi}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t \\ \dot{r} &= \frac{d^2r}{dt^2} = -a \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Psi = a \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (13)$$

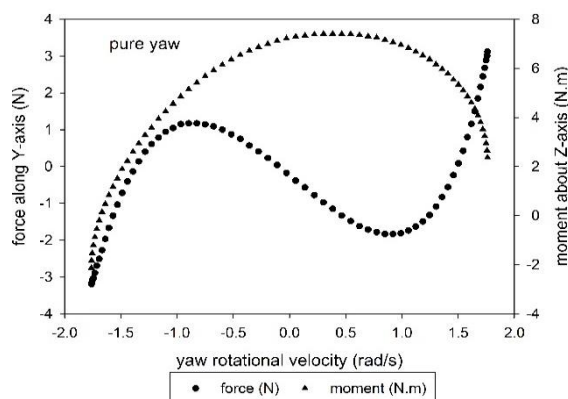
$$r = \frac{d\Psi}{dt} = -a \frac{2\pi}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$\dot{r} = \frac{d^2r}{dt^2} = -a \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t$$

که در روابط فوق مقادیر $a = \arctan\left(\frac{2\pi y_0}{UT}\right)$ و T از

است. روابط (۱۴) و (۱۵) از شکل (۱۸) در بازه ی کوچکی حول نقطه ای که مشتق گیری انجام می شود، استخراج می گردد.

جدول (۹) بدست می آیند. به منظور تخمین بهتر توابع نیرو و ممان سووی بر حسب سرعت از تابع چندجمله ای درجه ۶ استفاده می شود. شکل (۱۸) نشان دهنده نیرو و گشتاور در PMM در وضعیت یاو خالص بر حسب سرعت دورانی یاو r



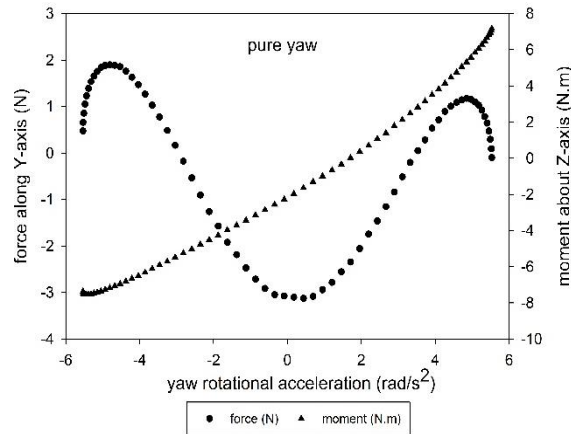
شکل (۱۸): نیرو و گشتاور حرکت در PMM در وضعیت یاو خالص بر حسب سرعت دورانی یاو

$$Y = 5.6143 r^6 + 36.044 r^5 + 92.983 r^4 + 125.2 r^3 + 90.053 r^2 - 31.06 r - 4.742 \quad (14)$$

$$N = -2.0532 r^6 - 6.4094 r^5 - 5.1531 r^4 + 1.1334 r^3 + 0.3816 r^2 + 0.9816 r + 7.1653 \quad (15)$$

شتاب یاو \ddot{r} است. روابط (۱۶) و (۱۷) بیانگر توابع تخمین زده شده از روی شکل (۱۹) هستند.

از رابطه های فوق در نقطه حداکثر سرعت دورانی r_{max} سه مرتبه مشتق گیری شد و هر بار یکی از ضرایب بدست آمد. شکل (۱۹) نشان دهنده نیرو و گشتاور در PMM در وضعیت یاو خالص بر حسب



شکل (۱۹): نیرو و گشتاور حرکت در PMM در وضعیت یابو خالص برحسب شتاب دورانی یابو

$$\begin{aligned}
 Y = & -0.0001 \dot{r}^6 + 3 \times 10^{-5} \dot{r}^5 \\
 & - 0.0037 \dot{r}^4 \\
 & + 0.0026 \dot{r}^3 \quad (16) \\
 & + 0.3537 \dot{r}^2 \\
 & - 0.1559 \dot{r} - 3.1049
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N = & -6E^{-5} \dot{r}^6 - 1 \times 10^{-5} \dot{r}^5 \\
 & + 0.0014 \dot{r}^4 \\
 & + 0.0045 \dot{r}^3 \quad (17) \\
 & - 0.0555 \dot{r}^2 \\
 & + 1.1918 \dot{r} + 2.1574
 \end{aligned}$$

و گشتاور بدست آمدند. ضرایب دمپینگ و جرم افزوده در وضعیت یابو خالص تست PMM در

از رابطه‌های فوق در نقطه حداکثر شتاب دورانی \dot{r}_{max} مشتق گیری شد و ضرایب جرم افزوده نیرو جدول (۱۰) نشان داده شده اند.

جدول (۱۰): ضرایب دمپینگ و جرم افزوده در وضعیت یابو خالص تست PMM

خطا (درصد)	مقدار آزمایشگاهی (Pretero, 2001)	مقدار عددی	ضریب
-	-	۱۰/۲۱	Y_r
۵/۲۲	۰/۶۳	۰/۶۶	Y_{rr}
-	-	-۱۵۲/۴۶	Y_{rrr}
۰/۵۲	۱/۹۳	۱/۹۴	$Y_{\dot{r}}$
-	-	۲۳/۳۲	N_r
۱/۹۳	-۹۴/۰	-۹۵/۸۲	N_{rr}
-	-	۳۷۹/۰	N_{rrr}
۳۶/۷	-۴/۸۸	-۳/۰۹	$N_{\dot{r}}$

بـ تـ وـ جـ هـ بـ هـ

جدول (۱۰)، با استفاده از روش عددی حاضر، ضرایب دمپینگ تا مرتبه سوم بدست آمده اند در حالی که در روش آزمایشگاهی (Prestero, 2001) فقط مرتبه دوم محاسبه شده است. از سویی مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده حاصل از نیروی Y بسیار ناچیز و کمتر از ۱ درصد و ضریب دمپینگ حاصل از نیروی Y کم و حدود ۵ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می دهد. خطای نسبی ضریب جرم افزوده ناشی از ممان N مقدار قابل توجهی است، که می تواند بعلت خطا در درون یابی و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت یاو خالص باشد که ممکن است ناشی از امکان بروز خطای نرم افزار نیز باشد. از طرفی ضریب دمپینگ ناشی از ممان N کمتر از ۲ درصد است.

با توجه به نتایج عددی حرکت PMM در وضعیت سووی خالص، مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده و ضریب دمپینگ حاصل از نیروی Y بسیار ناچیز و کمتر از ۱ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می دهد. خطای نسبی ضریب جرم افزوده ناشی از ممان N مقدار قابل توجهی است، که می تواند بعلت خطا در درون یابی و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت سووی خالص باشد که ممکن است ناشی از امکان بروز خطای نرم افزار نیز باشد.

با بررسی نتایج عددی حرکت PMM در وضعیت یاو خالص، مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده حاصل از نیروی Y بسیار ناچیز و کمتر از ۱ درصد و ضریب دمپینگ حاصل از نیروی Y کم و حدود ۵ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می دهد. خطای نسبی ضریب جرم افزوده ناشی از ممان N مقدار قابل توجهی است، که می تواند بعلت خطا در درون یابی

جدول (۱۰)، با استفاده از روش عددی حاضر، ضرایب دمپینگ تا مرتبه سوم بدست آمده اند در حالی که در روش آزمایشگاهی (Prestero, 2001) فقط مرتبه دوم محاسبه شده است. از سویی مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده حاصل از نیروی Y بسیار ناچیز و کمتر از ۱ درصد و ضریب دمپینگ حاصل از نیروی Y کم و حدود ۵ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می دهد. خطای نسبی ضریب جرم افزوده ناشی از ممان N مقدار قابل توجهی است، که می تواند بعلت خطا در درون یابی و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت یاو خالص باشد که ممکن است ناشی از امکان بروز خطای نرم افزار نیز باشد. از طرفی ضریب دمپینگ ناشی از ممان N کمتر از ۲ درصد است.

۴. بحث و نتیجه گیری

در این مقاله ضرایب هیدرودینامیکی دمپینگ و جرم افزوده شناور زیرسطحی REMUS تا مرتبه سوم محاسبه شد. این ضرایب به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و به روش حجم محدود استخراج شدند. به این منظور، بدنه‌ی بدون ملحقات شناور با فرم مایرینگ انتخاب گردید و مانور آن شامل حرکات سرچ، سووی و یاو به صورت عددی و در حالت غیردائم شبیه‌سازی شد. علاوه بر آن، اثرات آشفتگی با مدل $k - \omega$ SST در مدل سازی عددی لحاظ شد. برای استخراج نیروها و ممان‌ها در حرکات سووی و یاو، از مکانیزم حرکت صفحه‌ای PMM در دو وضعیت یاو خالص و سووی خالص استفاده گردید. در شبکه بندی دامنه محاسباتی مساله برای ایجاد حرکت شناور از تکنیک شبکه overset استفاده شد. همچنین برای بررسی دقت شبیه سازی، استقلال از شبکه صورت گرفت. پس از استخراج نیروها و گشتاورها، معادلات چند جمله ای مرتبه ششم آنها بر حسب

Perrault, D., Bose, N., O'Young, S., & Williams, C. D. J. O. e. (2003). Sensitivity of AUV added mass coefficients to variations in hull and control plane geometry. *30*(5), 645-671.

Prestero, T. T. J. (2001). *Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle*. Massachusetts institute of technology.

Zare-nezhad, Saeid & Hasan-zade gh., Reza. (2016). *investigation and calculation of hydrodynamic coefficients of an AUV by analytical-experimental technique*. kish, Iran, MIC2016 (188).

Triantafyllou, M. S., & Hover, F. S. (2003). *Maneuvering and control of marine vehicles*: Massachusetts of Institute of Technologyq.

Tyagi, A., & Sen, D. J. O. E. (2006). Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. *33*(5-6), 798-809.

Wang, S.-x., Sun, X.-j., Wang, Y.-h., Wu, J.-g., & Wang, X.-m. J. C. O. E. (2011). Dynamic modeling and motion simulation for a winged hybrid-driven underwater glider. *25*(1), 97-112.

Zhang, H., Xu, Y.-r., Cai, H.-p. J. J. o. M. S., & Application. (2010). Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients. *9*(2), 149-155.

و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت یاو خالص باشد که ممکن است ناشی از امکان بروز خطای نرم افزار نیز باشد. از طرفی ضریب دمپینگ ناشی از ممان N کمتر از ۲ درصد است.

مزیت استفاده از روش مطرح شده در این مقاله، سرعت بالای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی از مرتبه اول تا مرتبه سوم، و نیز استخراج همزمان ضرایب دمپینگ و جرم افزوده است. با استفاده از روش حاضر، امکان استخراج ضرایب با دقتی مناسب نسبت به ضرایب آزمایشگاهی وجود دارد.

منابع

Batchelor, C. K., & Batchelor, G. (1967). *An introduction to fluid dynamics*: Cambridge university press.

CD-adapco™. (2015). *STAR-CCM+® Documentation*.

Fefferman, C. L. J. T. m. p. p. (2006). Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation. *57*, 67.

Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*: John Wiley & Sons.

Menter, F. R. J. A. j. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *32*(8), 1598-1605.

Myring, D. J. T. A. Q. (1976). A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. *27*(3), 186-194.

Numerical Calculation of Maneuvering Damping and Added Mass Coefficients of an Autonomous Underwater Vehicle up to Third Order using Finite Volume Method

Hakamifard, Masoud¹.Rostami V.F., Mahmoud^{2*}

1. Malek-Ashtar University of technology, Shahin-Shahr.
2. Marine Engineering Department, Faculty of Mechanics, Malek-Ashtar University of technology, Shahin-Shahr. Email:Rostamivf@aut.ac.ir

(DOI): [10.22113/jmst.2019.167904.2253](https://doi.org/10.22113/jmst.2019.167904.2253)

Abstract

One of the most prevalent ways for studying the submarine's hydrodynamic behavior, like maneuvering, is calculating the hydrodynamic coefficients the hydrodynamic coefficients. In this paper calculation of hydrodynamic coefficients (up to third order) of an AUV using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Finite Volume Method (FVM) was performed. Therefore, a Myring body was chosen to simulate the unsteady maneuvering for surge, sway and yaw motions. The turbulence effects were modeled by $k - \omega$ sst turbulent model. The Planar Motion Mechanism (PMM) in two situations has been implemented to calculate the forces and moments for sway and yaw motions. Creating body motions in computational domain, the Overset mesh was used. Furthermore, the grid study was performed for investigating of the simulation accuracy. Then for calculating the coefficients, some six order polynomial equations were interpolated for forces and moments versus velocity and acceleration. The numerical results were compared with the results of (Prestero, 2001) . The relevant error for damping coefficients was between 0.8 to 12 percent. These values for added mass coefficients were between 0.8 to 37 percent.

Keywords: Hydrodynamic Coefficients, PMM, FVM, Overset Mesh.

List of tables & figures

- Fig 1. Maneuvering motions (Surge, Sway and Yaw)
- Fig 2. REMUS body profile
- Fig 3. Boundary conditions on computational domain
- Fig 4. Grids on the body and computational domain
- Fig 5. Drag force (N) versus cell numbers
- Fig 6. The Y^+ distribution on the body
- Fig 7. The residual diagram in surge motion with 1 m/s velocity
- Fig 8. The residual diagram in surge motion with 1.5 m/s velocity
- Fig 9. Drag force (n) versus velocity (m/s)
- Fig 10. The parameters of pure sway motion
- Fig 11. The forces and moments calculated in PMM test in pure sway situation versus time (s)

* Responding author, Email: rostamivf@aut.ac.ir

- Fig 12. The contour of velocity of flow around the body in PMM test in pure sway situation in $t=2.5$ s
- Fig 13. The forces and moments in sway motion versus velocity of sway
- Fig 14. The forces and moments in sway motion versus acceleration of sway
- Fig 15. The parameters of pure yaw motion
- Fig 16. The forces and moments calculated in PMM test in pure yaw situation versus time (s)
- Fig 17. The contour of velocity of flow around the body in PMM test in pure yaw situation in $t=2.5$ s
- Fig 18. The forces and moments in yaw motion versus rotational velocity of yaw
- Fig 19. The forces and moments in yaw motion versus rotational acceleration of yaw
- Table 1. Geometry of the REMUS body
- Table 2. Properties of grids
- Table 3. The maneuvering motions and the hydrodynamic coefficients
- Table 4. The simulation time of each part
- Table 5. The hydrodynamic coefficients of surge motion
- Table 6. The simulation parameters of pure sway motion
- Table 7. The time points for derivation of force and moment functions
- Table 8. The damping and added mass coefficients in PMM test in pure sway situation
- Table 9. The simulation parameters of pure yaw motion
- Table 10. The damping and added mass coefficients in PMM test in pure yaw situation