



محاسبه عددی و تحلیلی گشتاور مانک در جریان لزج برای یک زیردریایی هوشمند در وضعیت سووی خالص در آزمایش PMM

مسعود حکمی فرد^۱ و محمود رستمی ورنوسفادرائی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی دریا، گروه دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان

^۲ استادیار، گروه دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر اصفهان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

چکیده

در این مقاله گشتاور مانک برای بدنه یک زیردریایی هوشمند با روش حجم محدود محاسبه شده است. بعلاوه ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافه برای محاسبه گشتاور مانک با رابطه تحلیلی در جریان پتانسیل محاسبه گردید. ضرایب دمپینگ نیز در شبیه سازی محاسبه گردیدند. شبیه سازی جریان لزج اطراف شناور در حرکات سرچ و سووی خالص، به صورت عددی و در حالت غیردائم انجام شده است. بعلاوه آشفتگی با مدل $k - \omega$ SST لحاظ گردید. برای استخراج نیرو و گشتاور، از مکانیزم حرکت صفحه‌ای PMM در وضعیت سووی خالص و در شبکه بندی دامنه محاسباتی برای حرکت شناور از تکنیک شبکه همپوشان (overset) استفاده شده است. پس از استخراج نیرو و گشتاور، معادلات چند جمله‌ای مرتبه ششم آنها بر حسب سرعت و شتاب حرکت سووی درونیابی گردید. با استفاده از معادلات بدست آمده و تعریف هر ضریب، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافه و دمپینگ مرتبه دوم بمنظور معتبرسازی استخراج گردیدند که تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی داشتند. در نهایت، مقایسه‌ای بین گشتاور بدست آمده در شبیه سازی عددی و فرمول تحلیلی گشتاور مانک مقادیر انجام گردید. بعلاوه مقدار N_{ψ} (مشتق گشتاور حول محور z نسبت به شتاب حرکت عرضی)، با استفاده از تئوری پتانسیل محاسبه و با مقدار عددی و آزمایشگاهی مقایسه گردید.

کلمات کلیدی: گشتاور مانک؛ ضریب جرم اضافه؛ مکانیزم حرکت صفحه‌ای؛ سووی خالص؛ جریان لزج.

Numerical and Analytical Calculation of Munk Moment in Real Flow for an Autonomous Submarine in Pure Sway Motion in PMM Test

M. Hakamifard¹, M. Rostami V.F.^{2,*}

¹M.Sc., Marine Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin-Shahr, Isfahan, Iran.

²Assis. Prof., Marine Engineering Department, Faculty of Mechanics, Malek-Ashtar University of Technology, Shahin-Shahr, Isfahan, Iran.

Abstract

The Munk moment may make the vessel unstable in simultaneous Surge and Sway motions. In this paper the munk moment was calculated by computational fluid dynamics (CFD) and finite volume method (FVM) for an autonomous submarine. Furthermore the added mass coefficients were calculated for computation of munk moment using analytical formulation in potential flow. The damping coefficients were also calculated. The unsteady state numerical simulation of real flow for surge and sway motions has been performed. The turbulent effects were considered by using $k - \omega$ SST turbulence model. Using Planar Motion Mechanism (PMM) in pure sway situation, the forces and moments were calculated. The overset mesh was used for grid generation in computational domain. The mesh independency has been also preformed. Using sixth order polynomial interpolation for forces and moments of numerical simulation, the hydrodynamic coefficients were calculated. The results showed good agreement with experimental data. Finally, the munk moment of numerical simulation and analytical formulation have been compared. Furthermore N_{ψ} was calculated based on potential theory and also compared with numerical and experimental ones.

Keywords: Munk Moment; Added Mass Coefficient; PMM; Pure Sway; Real Flow.

۱- مقدمه

یکی از روش‌های بیان نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه شناور زیرسطحی از جمله نیروی لیفت و درگ، استفاده از بسط تیلور است که در آن نیروها به فرم ضرایبی از سرعت و شتاب نوشته می‌شوند. این ضرایب که به دو دسته ضرایب جرم افزوده و دمپینگ تقسیم می‌شوند را ضرایب هیدرودینامیکی می‌نامند [۱]. برای بررسی مانور شناورها، استفاده از ضرایب هیدرودینامیکی بسیار مهم است. سه حرکت مهم در مانور شناورها شامل، سرج^۱، سووی^۲ و یاو^۳ هستند که در شکل ۱ نشان داده شده است. در اثر ترکیب حرکات سرج و سووی یک شناور و حتی بدون وارد نمودن هیچ گونه گشتاور خارجی به بدنه، گشتاوری بر جسم در جهت حرکت یاو وارد می‌شود که ممکن است، در حرکت شناور ناپایداری ایجاد کند. به این گشتاور، ممان مانک گفته می‌شود. در شکل ۲ ممان مانک نشان داده شده است. بررسی مانور شناورها، از روش‌های آزمایشگاهی و عددی امکان پذیر است که بدلیل هزینه‌های زیاد روش‌های آزمایشگاهی، محققان بسیاری استفاده از روش‌های عددی را انتخاب کرده‌اند. در میان این روش‌ها، روش حجم محدود بدلیل دقت بالا، دارای کاربرد بسیاری است. رفرنس و همکاران [۲]، نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه یک AUV را به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها از روش بدنه باریک^۴ برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی به صورت تحلیلی استفاده کردند که در پژوهش خود، از روش عددی استفاده‌ای نکرده‌اند. مادون [۳] نیروهای هیدرودینامیکی لیفت و درگ یک شناور AUV را بدون استخراج ضرایب، مورد بررسی عددی و نیمه تجربی قرار داده است. او از سه روش نیمه تجربی متفاوت برای اعتبارسنجی نتایج عددی خود استفاده می‌کند، در صورتی که در مقاله حاضر برای اعتبارسنجی نتایج عددی، از مرجع آزمایشگاهی کمک گرفته شده است. کپلر و همکاران [۴] با استفاده از روش نیمه تجربی، نیروهای هیدرودینامیکی یک شناور AUV را در جریان پتانسیل تحلیل کردند و پس از

استخراج ضرایب، آن‌ها را با روش عددی و استفاده از آزمون مکانیزم حرکت صفحه‌ای PMM مقایسه کردند. در تحقیق آن‌ها ضریب هیدرودینامیکی N_D که در این مقاله محاسبه گردیده، بدست نیامده است. ژانگ [۵] ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور را با استفاده از روش عددی و به کمک 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. پرسترو [۶] یک شناور زیرسطحی را به صورت شش درجه آزادی مورد آزمایش قرار داده و نتایج را با یک روش تحلیلی مقایسه کرده است. او ضرایب هیدرودینامیکی را به صورت میانگین از این دو روش استخراج نموده که به عنوان مرجع آزمایشگاهی، در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. در پژوهش علیجانی و همکاران [۷]، انواع پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ دماغه یک AUV از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی، مورد بررسی قرار گرفته است. امینی و همکاران [۸]، با شبیه‌سازی عددی مانور یک زیرسطحی، ضرایب هیدرودینامیکی آن را استخراج کرده و با نتایج تجربی مقایسه کردند. در این پژوهش، از روش تحلیلی استفاده نشده است.

در این مقاله، پس از بررسی معادلات حاکم بر جریان لزج و پتانسیل، به تشریح اصول مدل‌سازی عددی جریان لزج پرداخته می‌شود. برای بررسی اثر ممان مانک^۵، روابط حاکم بر جریان پتانسیل نیز بیان می‌شوند. به منظور انجام شبیه سازی عددی جریان لزج، از نرم افزار Star-CCM+ [۱۰] که بر مبنای روش حجم محدود توسعه یافته استفاده می‌شود. شبیه‌سازی در شرایط غیردائم و با استفاده از مدل توربولانسی $k - \omega$ SST انجام می‌شود. در ادامه چگونگی انتخاب شبکه و استقلال از آن بررسی می‌شود. برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان لزج، از آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای PMM^۶ استفاده می‌شود. این آزمایش از طریق مازول اختصاصی نرم‌افزار و در وضعیت سووی خالص^۷ شبیه‌سازی می‌شود. ممان مانک در

^۵ Munk moment

^۶ Planner Motion Mechanism

^۷ Pure sway

^۱ Surge

^۲ Sway

^۳ Yaw

^۴ Slender Body

که در آن u_i بیانگر مؤلفه‌ی بردار سرعت در راستای i ، P بیانگر فشار، B_i بیانگر نیروی حجمی در راستای i ، μ بیانگر ویسکوزیته دینامیکی سیال و ξ نیز، بیانگر ضریب دوم ویسکوزیته است که به دلیل کوچک بودن می‌توان از آن صرف نظر کرد. برای یک سیال تراکم‌ناپذیر معادله مومنتم در رابطه (۱) معروف به معادلات ناویر استوکس به صورت رابطه (۲) تبدیل می‌شود [۱۲]:

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

که در آن τ^* بیانگر ترم آشفتگی جریان است. برای در نظر گرفتن اثرات آشفتگی، از مدل SST $k-\omega$ استفاده شده است که یک مدل دو معادله‌ای لزجت گردابی محسوب می‌شود. استفاده از روابط $k-\omega$ در بخش درونی لایه مرزی باعث می‌شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه 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 [۱۳].

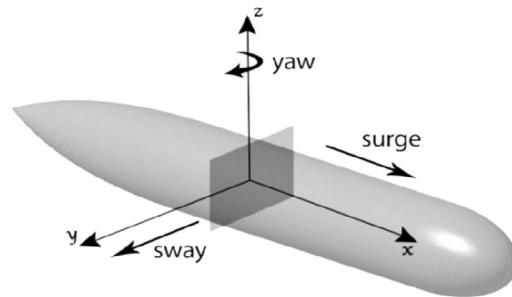
۱-۲- جریان پتانسیل

در جریان پتانسیل (جریان ایده آل و غیر چرخشی)، فرض جریان غیرلزج روی رابطه (۱) اعمال می‌شود. با در نظر گرفتن این فرض، معادله ناویراستوکس، به معادله اوپلر تبدیل می‌شود. رابطه (۳) نشان دهنده معادله جریان پتانسیل [۱۲] است:

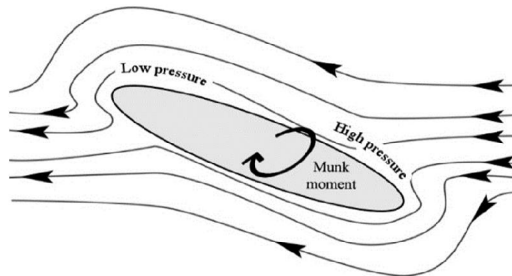
$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

که در آن ϕ تابع پتانسیل سرعت جریان است. گشتاور مانک [۹] بدلیل زاویه دار شدن بدنه (البته در هر جسم بجز کره) نسبت به مسیر جریان ایجاد می‌شود. این زاویه دار شدن می‌تواند در اثر ترکیب حرکات سرچ و سووی ایجاد شود. بعلاوه این گشتاور حتی در جریان ایده آل نیز بوجود می‌آید. برخلاف نیروی مقاوم که طبق پارادوکس دالامبر در جریان ایده آل صفر است، گشتاور در این جریان لزوماً صفر نیست. در اجسامی مانند شناور زیرسطحی مورد بحث که نسبت به صفحات xy و xz متقارن است، در صورت حرکت با زاویه حمله، گشتاور مجزایی به جسم اعمال می‌شود که تمایل دارد تا جسم را در جهت زاویه دوران دهد. این ممان به دلیل توزیع متفاوت فشار در جریان پتانسیل به جسم وارد می‌شود.

این مقاله به دو صورت بدست آمده است؛ اولی با استفاده از گشتاور بدست آمده در مدلسازی عددی حرکت سووی خالص در آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای و دومی با استفاده از رابطه تحلیلی در تئوری جریان پتانسیل محاسبه می‌شود. در پایان، مقایسه‌ای بین این دو مقدار صورت خواهد گرفت. بعلاوه خطای نسبی ضریب گشتاور هیدرودینامیکی N_p در دو روش عددی با مقدار آزمایشگاهی پرسترو [۶] بدست می‌آید.



شکل ۱- حرکات اصلی در مانور



شکل ۲- ممان مانک در جریان پتانسیل [۹]

۲- معادلات حاکم

معادلات بقای جرم و معادلات مومنتم، معادلات حاکم بر جریان سیال تراکم‌ناپذیر هستند. فرم تانسوری این معادلات در حالت کلی به صورت رابطه (۱) بیان شده است [۱۱]:

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

چگالی آب ۱۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و لزجت دینامیکی سیال اطراف بدنه $1/88 \times 10^{-3}$ پاسکال ثانیه در نظر گرفته می شود.

۴- شبکه محاسباتی

به منظور انجام شبیه سازی عددی، شرایط مرزی بر اساس شکل ۴ تعیین شده است. انتخاب ابعاد شرایط مرزی براساس معیار مرجع [۱۵] صورت گرفته است. دست یابی به پاسخ عددی دقیق مستلزم انتخاب دامنه، تعریف شرایط مرزی مناسب و شبکه بندی دقیق است. بهترین گزینه برای مسائل با جدایش جریان، حالت Trimmed است [۱۰]. برای حرکت از شبکه هم پوشان^۱ در اطراف بدنه استفاده شده که در شکل ۵ قابل مشاهده است.

برای بررسی استقلال از شبکه، بدنه با شبکه های 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 شبیه سازی عددی شد. مشخصات شبکه-هایی که در مرحله استقلال از شبکه ایجاد شدند، در جدول ۲ بیان شده اند.

جدول ۲- مشخصات شبکه های ایجاد شده

شبکه	تعداد سلول	نیروی درگ (N)
۱	۲۳۵۶۰۳	۲/۵۷۵
۲	۵۵۳۴۸۶	۵/۶۱۹
۳	۱۱۵۵۸۷۲	۵/۶۳۸
۴	۲۷۷۵۸۵۸	۵/۶۴۴
۵	۳۴۴۲۰۱۱	۵/۶۴۵

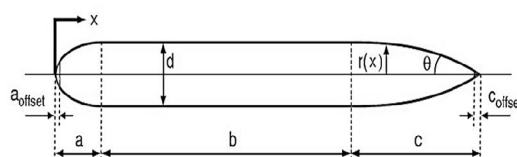
شکل ۶ نشان دهنده نیروی درگ (نیوتن) بر حسب تعداد سلول های شبکه است. از این شکل مشخص می شود که شبکه شماره ۴ برای انجام شبیه سازی مناسب است؛ زیرا نیروی درگ حاصل از شبکه ۵ تفاوت چندانی با قبلی ندارد.

¹ Overset Mesh

اهمیت وجود بالک و سکان روی شناورهای زیرسطحی به دلیل حضور همین گشتاور است.

۳- هندسه و شرایط مسئله

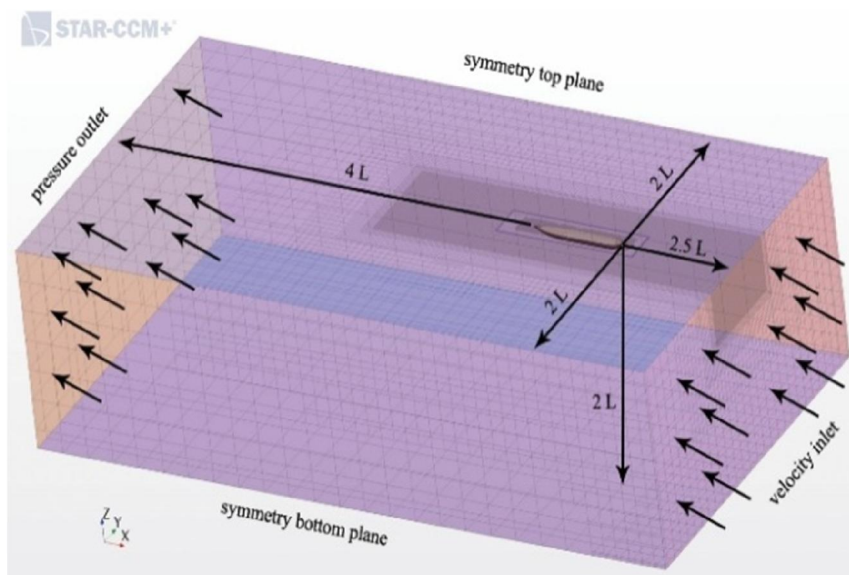
به منظور انجام شبیه سازی عددی حرکت شناور در جریان لزج، پروفیلی مطابق با فرم بدنه ی مایرینگ [۱۴] بدون ملحقات، با طول کلی ۱/۳۳۰ متر و حداکثر قطر ۰/۱۹۱ متر انتخاب شده است. سایر مشخصات نشان داده شده در شکل ۳ مربوط به شناور REMUS [۶] در جدول ۱ بیان شده است.



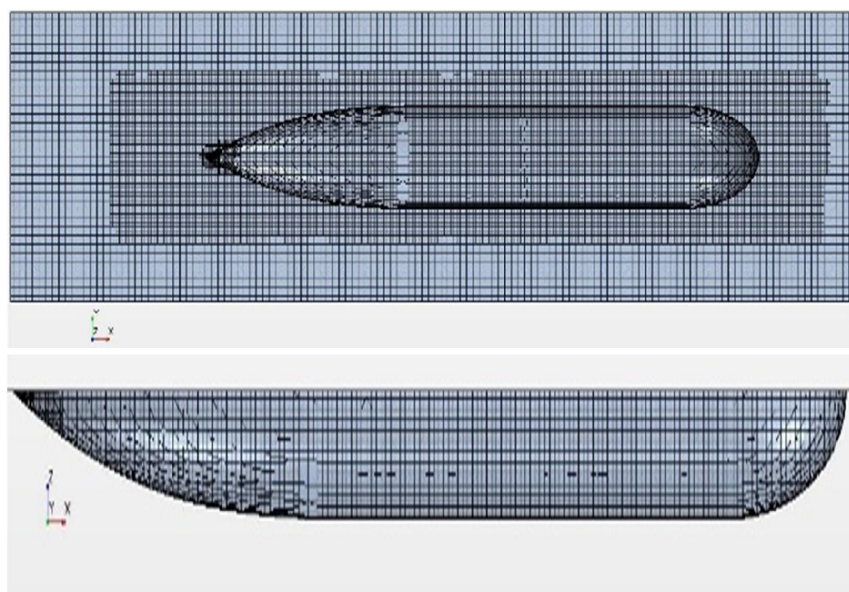
شکل ۳- پروفیل بدنه REMUS [۶]

جدول ۱- مشخصات هندسی بدنه REMUS

مقدار	واحد	مشخصه
۱/۳۳۰	متر	طول
۰/۱۹۱	متر	قطر
۰/۱۹۱	متر	a
۰/۰۱۶۵	متر	a_offset
۰/۶۵۴	متر	b
۰/۵۴۱	متر	c
۰/۰۳۶۸	متر	c_offset
۰/۴۳۶	رادیان	θ
۲۹۹	نیوتن	وزن
۳۰۶	نیوتن	بویانسی



شکل ۴- شرایط مرزی بر روی دامنه محاسباتی



شکل ۵- شبکه ایجاد شده روی دامنه محاسباتی

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 ۷ مقدار y^+ را روی بدنه شناور نشان می‌دهد. مقدار بدست آمده بین ۳۰ تا ۳۰۰ است.

در مدل‌سازی جریان آشفته و در اطراف جسم، اغلب از مفهومی به نام تابع دیواره^۱ [۱۲] استفاده می‌شود. توابع

^۱ Wall Function

ممان مربوطه نسبت به سرعت مرتبط است. به طور مثال برای حرکت سووی، رابطه

(۵) بیانگر تعریف ریاضی ضرایب هیدرودینامیکی مربوطه است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial v} &= Y_v \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial v^2} &= Y_{vv} \\ \frac{\partial^3 Y}{\partial v^3} &= Y_{vvv} \\ \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} &= Y_{\dot{v}} \end{aligned} \quad (5)$$

برای استخراج این ضرایب، ۷ شبیه سازی عددی جداگانه انجام گرفت که شامل، پنج شبیه سازی برای حرکت سرچ با سرعت ثابت، یک شبیه سازی سرچ با شتاب ثابت و یک شبیه سازی PMM در وضعیت سووی خالص هستند که در ادامه مقاله تشریح شده است. جدول ۳ ضرایب مرتبط با هر حرکت را نشان می دهد.

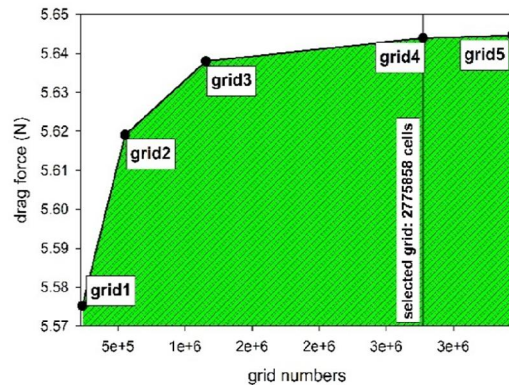
جدول ۳- حرکت های مانور و ضرایب هیدرودینامیکی

حرکت	ضرایب
سرچ	$X_{\dot{u}}$ و X_{uuu} و X_{uu} و X_u
سووی خالص	Y_v و Y_{vv} و Y_{vvv} و $Y_{\dot{v}}$ $N_{\dot{v}}$ و N_{vvv} و N_{vv} و N_v

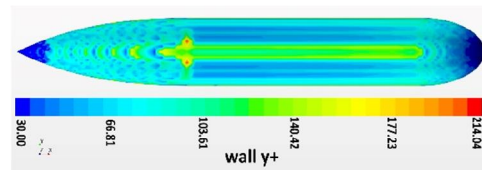
شکل ۸ مدت زمان انجام هر مرحله از شبیه سازی در نرم افزار را بیان می کند که در مجموع ۲۱۶ ساعت طول کشیده است. این شبیه سازی ها به کمک پردازنده ۸70 Core i7 و ۸ گیگابایت رم انجام شد که از ۶ هسته آن و با فرکانس پردازش ۲/۹۳ گیگاهرتز در هر هسته استفاده شده است.

۵-۱- حرکت سرچ

برای استخراج ضرایب مربوط به حرکت سرچ، 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. از



شکل ۶- مقایسه نیروی درگ (N) برحسب تعداد سلول



شکل ۷- توزیع +y روی بدنه شناور

۵- استخراج عددی ضرایب هیدرودینامیکی

به طور کلی، ضرایب هیدرودینامیکی به دو بخش ضرایب دمپینگ و ضرایب جرم افزوده تقسیم می شوند. جهت محاسبه ضرایب میرایی بهتر است، شتاب وارد بر شناور صفر باشد تا از اثر جرم افزوده صرف نظر شود. سه حرکت اصلی در مانور وجود دارد که در این مقاله دو حرکت سرچ و سووی مورد بررسی قرار می گیرد. نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به صورت رابطه (۴) هستند [۱۶]:

$$\begin{aligned} X &= X_u u + X_{uu} u^2 + X_{uuu} u^3 + X_{\dot{u}} \dot{u} \\ Y &= Y_v v + Y_{vv} v^2 + Y_{vvv} v^3 + Y_{\dot{v}} \dot{v} \\ N &= N_v v + N_{vv} v^2 + N_{vvv} v^3 + N_{\dot{v}} \dot{v} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن X نشان دهنده نیروی سرچ، Y نشان دهنده نیرو در راستای محور y و N نشان دهنده گشتاور حول محور z است. در سمت راست معادلات نیز، u معرف سرعت در راستای x (سرعت سرچ) و v معرف سرعت در راستای محور y (سرعت سووی) است؛ همچنین ضرایب X_{uu} ، Y_v ، N_v و... همان ضرایب هیدرودینامیکی هستند که هر ضریب برابر با مشتق نیرو یا

ضرایب دمپینگ حرکت سرج مشخص می‌شوند. این ضرایب در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

$$X_D = X_{uuu}u^3 + X_{uu}u^2 + X_uu \quad (7)$$

پس از این مرحله، شبیه سازی حرکت سرج به صورت شتاب دار انجام می‌گیرد. رابطه (۸) که ساده شده معادله حرکت از دیدگاه مانور است [۱۶]. بیان‌گر معادله نیروی درگ در حرکت مستقیم با شتاب ثابت است. با مقایسه رابطه های (۷) و (۸) ضریب جرم افزوده حرکت سرج نیز محاسبه می‌شود:

$$X_A = (m + X_{\ddot{u}})\ddot{u} + X_D \quad (8)$$

که برای محاسبه $X_{\ddot{u}}$ بایستی مقدار X_D در سرعت $u = 2.5 \text{ m/s}$ از X_A در لحظه $t = 3 \text{ s}$ کسر گردد. مقدار این ضریب در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- ضرایب هیدرودینامیکی حرکت سرج

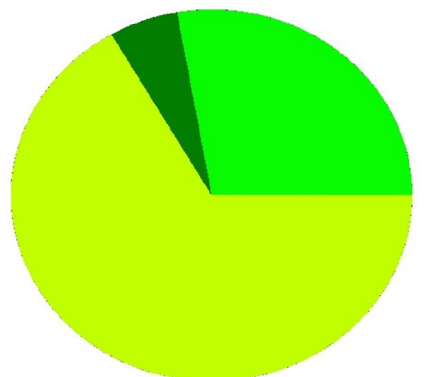
ضریب	مقدار عددی	مقدار [آزمایشگاهی ۶]	خطا (درصد)
X_{uu}	-۱/۴۳	-۱/۶۲	۱۱/۰
$X_{\ddot{u}}$	-۰/۹۰	-۰/۹۳	۳/۱۱

همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده در حدود ۳ درصد است که تطابق خوبی را بین روش عددی حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می‌دهد. خطای نسبی ضریب دمپینگ مرتبه دوم نیز، مقدار نسبتاً کمی است که می‌تواند ناشی از درون یابی انجام گرفته برای منحنی نیرو سرعت و خطاهای بوجود آمده در روند شبیه سازی عددی باشد که امری معمول در همه محاسبات عددی است.

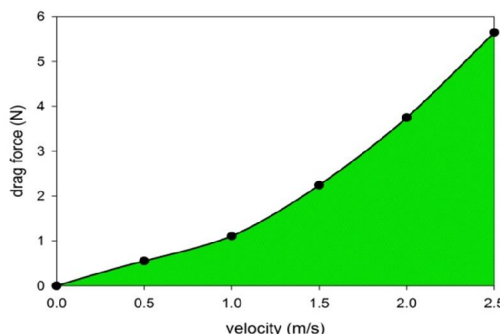
۵-۲- حرکت سووی

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 می‌شود و بازو با مشخصات مندرج در جدول ۵ در آب حرکت می‌کند. پارامترهای حرکت سووی از آزمایش PMM در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

آنجا که این ۵ مرحله شبیه سازی، از نوع سرعت ثابت است و شتاب در آن اعمال نشده، بنابراین در این حالات جرم افزوده وجود ندارد. مقادیر نیروی درگ در هر یک از سرعت‌های فوق استخراج شد که نمودار آن در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل ۸- مدت زمان پردازش در هر مرحله از شبیه سازی



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

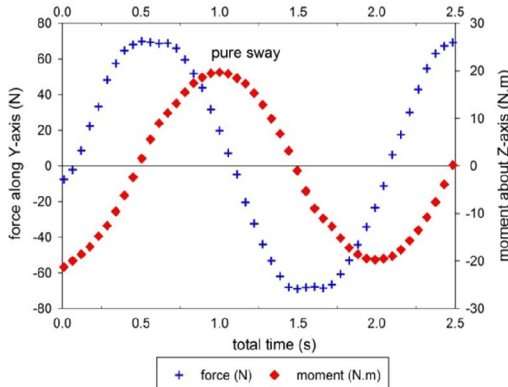
با استفاده از درون یابی نقاط نمودار شکل ۹ رابطه (۶) که معرف نیروی درگ بر حسب سرعت سرج است، بدست می‌آید:

$$X_D = 0.1239u^3 - 1.4314u^2 + 0.7885u \quad (6)$$

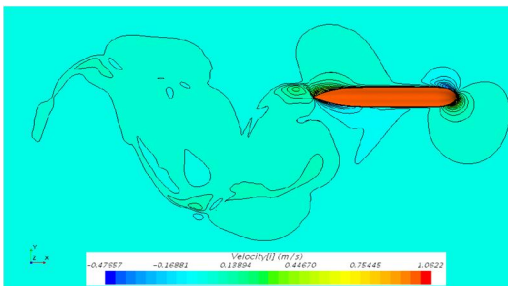
رابطه (۷) از سطر اول رابطه (۴) با در نظر گرفتن شتاب صفر بدست می‌آید. با تطبیق رابطه (۶) و رابطه (۷) که بیان‌گر معادله نیروی درگ در حرکت سرج بدون شتاب است،

سازی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. شکل ۱۲ توزیع سرعت سیال در اطراف شناور را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. شباهت خط اثر حرکت شناور روی سیال بین شکل ۱۰ و شکل ۱۲ مشهود است.

همانطور که در بخش مربوط بدست آوردن ضرایب حرکت سرچ گفته شد، بایستی نمودار نیرو بر حسب سرعت v ترسیم گردد. در بخش سرچ بطور مستقیم نمودار نیرو بر حسب سرعت ترسیم شده؛ اما در این بخش برای انجام این کار مقادیر نیرو، گشتاور و سرعت متناظر با زمان، از منحنی های نیرو زمان، گشتاور زمان و سرعت زمان استخراج می‌شود. به منظور تخمین بهتر توابع نیرو و ممان سووی بر حسب سرعت از تابع چندجمله ای درجه ۶ استفاده می‌شود. شکل ۱۳ نشان دهنده نیرو و گشتاور بر حسب



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



شکل ۱۲- توزیع سرعت سیال اطراف بدنه در آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص در زمان $t=2.5$ s

قابل ذکر است که روابط مربوط به جابجایی، سرعت و شتاب جسم از طریق رابطه (۹) بدست می‌آیند:

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

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

$$\dot{v} = \frac{d^2y}{dt^2} = -y_0 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (9)$$

که در روابط فوق مقادیر T و y_0 از

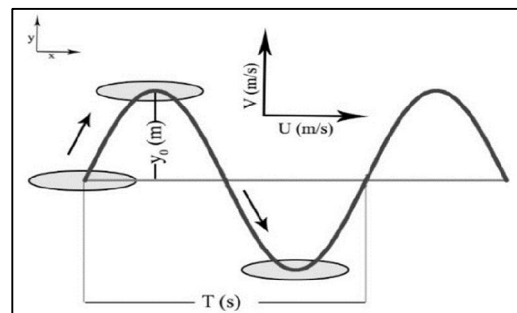
جدول ۵- پارامترهای شبیه سازی حرکت سووی

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

جدول ۵ بدست می‌آیند.

جدول ۵- پارامترهای شبیه سازی حرکت سووی

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



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

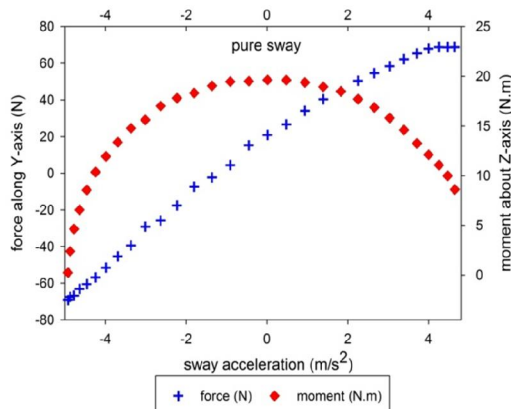
$$N = 0.458 v^6 + 2.4553 v^5 + 4.6428 v^4 + 3.4618 v^3 - 0.8854 v^2 - 15.907 v - 1.4029 \quad (11)$$

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 ۷ آورده شده‌اند. شکل ۱۴ نشان دهنده نیرو و گشتاور سووی برحسب \dot{v} است. روابط (۱۲) و (۱۳) بیانگر توابع تخمین زده شده از روی شکل ۱۴ هستند.

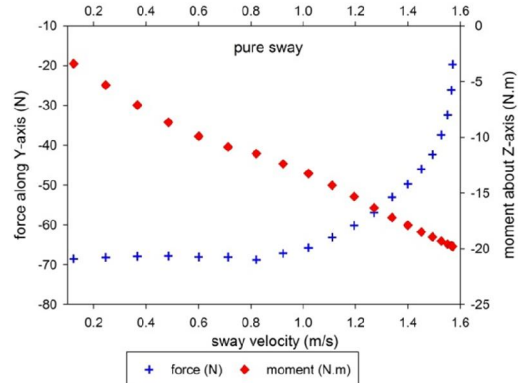
$$Y = -64.6 \dot{v}^6 - 1556.3 \dot{v}^5 - 15273 \dot{v}^4 - 77527 \dot{v}^3 - 211776 \dot{v}^2 - 287578 \dot{v} - 142795 \quad (12)$$

$$N = -0.0019 \dot{v}^6 + 0.0088 \dot{v}^5 + 0.0075 \dot{v}^4 - 0.0466 \dot{v}^3 + 0.3769 \dot{v}^2 + 0.0782 \dot{v} - 19.773 \quad (13)$$

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 ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴- نیرو و گشتاور بدست آمده در آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص برحسب شتاب



شکل ۱۳- نیرو و گشتاور بدست آمده در آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص برحسب سرعت

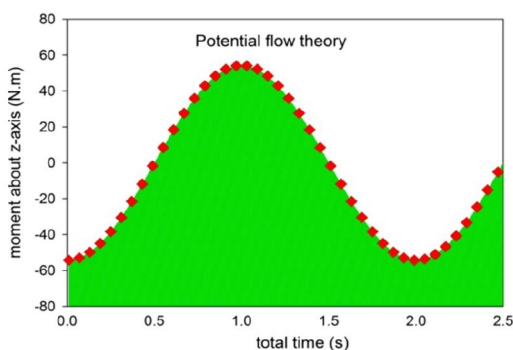
سرعت سووی v است. روابط (۱۰) و (۱۱) از شکل ۱۳ در بازه کوچکی حول نقطه‌ای استخراج می‌شود که مشتق‌گیری انجام می‌شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، مشتق‌گیری از نیرو و ممان نسبت به سرعت و شتاب برای آوردن ضرایب هیدرودینامیکی صورت می‌گیرد. ضرایب دمپینگ حرکت سووی، زمانی اندازه‌گیری می‌شوند که شتاب صفر و سرعت ماکزیمم باشد. همچنین ضریب جرم افزوده زمانی اندازه‌گیری می‌شود که شتاب و جابجایی حداکثر باشند. سرعت‌ها و شتاب‌های متناظر با زمان‌های ذکر شده، نقاطی هستند که مشتق‌گیری در آنها انجام می‌شود. جدول ۶ این نقاط را برای هر ضریب نشان می‌دهد.

جدول ۶- نقاط زمانی جهت مشتق‌گیری از توابع

نیرو و ممان		
شرایط شناور در این لحظه	لحظه اعمال مشتق (ثانیه)	ضریب
حداکثر سرعت v	۱	N_{vv} و Y_{vv}
حداکثر شتاب \dot{v}	۱/۵	$N_{\dot{v}}$ و $Y_{\dot{v}}$

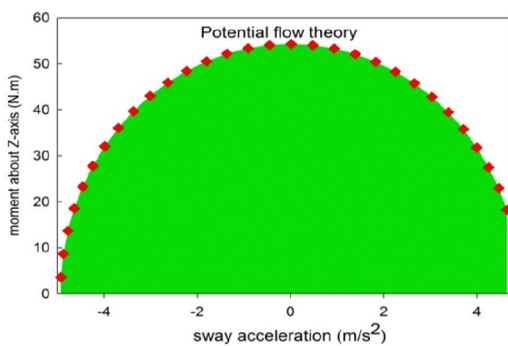
$$Y = 57.409 v^6 + 186.87 v^5 + 195.35 v^4 + 49.507 v^3 + 1.6425 v^2 - 4.6479 v - 68.962 \quad (10)$$

براساس رابطه (۱۴) در بازه زمانی ۲/۵ ثانیه انجام آزمایش PMM در وضعیت سووی خالص، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- گشتاور مانک بدست آمده بر اساس تئوری جریان پتانسیل بر حسب زمان

به منظور استخراج ضریب هیدرودینامیکی گشتاور حرکت سووی ناشی از جرم افزوده یعنی N_{ψ} ، مقادیر گشتاور و شتاب متناظر با زمان از منحنی‌های گشتاور زمان و سرعت زمان استخراج می‌شود. این مقادیر به صورت نموداری در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۶- گشتاور مانک بر حسب شتاب سووی با روش تئوری جریان پتانسیل

همانطور که قبلاً اشاره شد، تابع گشتاور به صورت یک تابع چندجمله‌ای مرتبه ۶، از روی شکل ۱۶ درونیابی می‌شود که در رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

جدول ۷- ضرایب دمپینگ و جرم افزوده در وضعیت سووی

خالص تست PMM			
ضریب	مقدار عددی	مقدار آزمایشگاهی [۶]	خطا (درصد)
$Y_{\psi\psi}$	-۱۳۲۰/۷۱	-۱۳۱۰/۰۰	۰/۸۲
Y_{ψ}	-۳۵/۸۱	-۳۵/۵۰	۰/۸۷
$N_{\psi\psi}$	-۳/۶۱	-۳/۱۸	۱۳/۵
N_{ψ}	۲/۵۷	۱/۹۳	۳۳/۱۶

همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار خطای نسبی ضریب جرم افزوده و ضریب دمپینگ حاصل از نیرو Y بسیار ناچیز و کمتر از ۱ درصد است که تطابق خوبی را بین روش حاضر و روش آزمایشگاهی نشان می‌دهد. خطای نسبی ضریب جرم افزوده ناشی از ممان N مقدار قابل توجهی است که می‌تواند بعلت خطا در درون یابی و رفتار پیچیده ناشی از ممان بدست آمده در حرکت سووی خالص باشد.

۶- محاسبه تحلیلی گشتاور مانک

در قسمت قبل، ضرایب هیدرودینامیکی حرکات سرج و سووی خالص از نوع دمپینگ و جرم افزوده به صورت عددی و با در نظر گرفتن جریان لزج اطراف بدنه شبیه سازی و استخراج شدند و گشتاور هیدرودینامیکی که شامل گشتاور مانک و گشتاور ناشی از ایجاد لایه مرزی و جدایش جریان روی جسم است.

در تئوری جریان پتانسیل گشتاور هیدرودینامیکی فقط همان گشتاور مانک است که ناشی از ترکیب حرکت سووی و سرج است که از طریق رابطه تحلیلی [۹] قابل استخراج است و در رابطه (۱۴) نشان داده شده است:

$$N = -(Y_{\psi} - X_{\psi\psi})Uv \quad (14)$$

ضرایب هیدرودینامیکی $X_{\psi\psi}$ و Y_{ψ} در بخش‌های قبلی محاسبه شدند. U نشان دهنده سرعت حرکت شناور در راستای X و برابر با ۱ متر بر ثانیه است. v نشان دهنده سرعت شناور در راستای Y است که قبلاً از رابطه (۹) بدست آمد. با توجه به پارامترهای معلوم، مقدار گشتاور

در این مقاله ضرایب هیدرودینامیکی دمپینگ و جرم افزوده شناور زیرسطحی REMUS در حرکت‌های سرج و سووی خالص محاسبه شد. در روش عددی از دینامیک سیالات محاسباتی و تکنیک حجم محدود استفاده گردید. به منظور استخراج ضرایب هیدرودینامیکی به روش عددی، بدنه بدون ملحقات شناور با فرم مایرینگ انتخاب شد و مانور آن شامل حرکات سرج و سووی در حالت غیردائم شبیه‌سازی گردید. علاوه بر آن، اثرات آشفتگی با مدل $k-\omega$ SST در مدلسازی عددی لحاظ شد. برای استخراج نیروها و ممان‌ها در حرکت سووی، از مکانیزم حرکت صفحه‌ای PMM در وضعیت 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 جمله‌ای مرتبه ششم آنها بر حسب سرعت و شتاب درونیابی گردید. با استفاده از معادلات بدست آمده و تعریف هر ضریب، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی جرم اضافه و دمپینگ استخراج شدند. مقادیر عددی تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی مرجع داشتند.

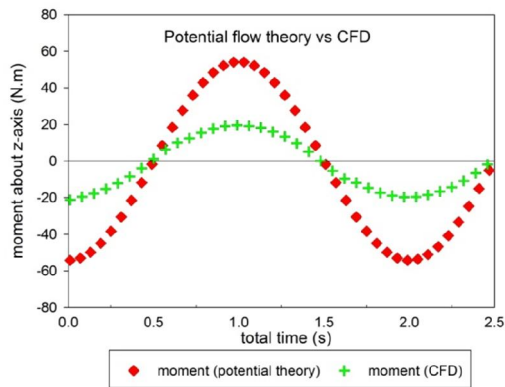
در ادامه، گشتاور هیدرودینامیکی وارد بر بدنه در وضعیت سووی خالص به روش تحلیلی بر اساس تئوری جریان پتانسیل محاسبه شد. پس از ترسیم مقدار گشتاور بر حسب شتاب \dot{v} ، تابع گشتاور از طریق درونیابی به کمک چندجمله‌ای مرتبه ۶ استخراج شد. با مشتق گیری از این تابع در نقطه \dot{v} ماکزیمم، ضریب هیدرودینامیکی $N_{\dot{v}}$ محاسبه گردید. با مقایسه مقدار این ضریب در روش تحلیلی و روش عددی، اختلاف قابل توجهی مشاهده شد. این اختلاف که به دلیل مفروضات حاکم بر تئوری جریان پتانسیل به وجود آمدند، نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن ایجاد لایه مرزی و جدایش در جریان لزوج است.

۷- فهرست علائم

u_i	سرعت در راستای i ، m/s
P	فشار، kg/m^2
B_i	نیروی حجمی در راستای i ، N/v
μ	ویسکوزیته دینامیکی، Pa.s

$$N = -0.0006 \dot{v}^6 - 0.0014 \dot{v}^5 - 0.0127 \dot{v}^4 + 0.0006 \dot{v}^3 - 1.1139 \dot{v}^2 - 3 \times 10^{-5} \dot{v} + 54.302 \quad (15)$$

از رابطه فوق در نقطه حداکثر شتاب \dot{v} مشتق گیری می‌شود که نتیجه آن، ضریب هیدرودینامیکی $N_{\dot{v}}$ و برابر با $7/86$ است که مقدار آن در شبیه سازی عددی $2/57$ و در تست آزمایشگاهی برابر $1/93$ است که نشان‌دهنده نزدیک بودن مقدار شبیه سازی عددی به آزمایشگاهی است و علت اختلاف فاحش مقدار تحلیلی با آزمایشگاهی بدلیل در نظر نگرفتن لزجت و چرخش در جریان است که منجر به در نظر نگرفتن لایه مرزی و جدایش می‌شود. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و روش تحلیلی، مقادیر گشتاور در حرکت سووی خالص برحسب زمان در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه‌ی گشتاور مانک (جریان پتانسیل) و گشتاور در جریان لزوج برحسب زمان

با توجه به شکل ۱۷، رفتار گشتاور در تئوری جریان پتانسیل با روش عددی تفاوت چشمگیری دارد. دلیل این اختلاف، مفروضاتی است که تئوری جریان پتانسیل برای سیال در نظر می‌گیرد. همانطور که اشاره شد، در جریان پتانسیل، ذرات سیال غیرچرخشی و غیرلزوج در نظر گرفته می‌شوند.

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

- [6] Prestero TTJ (2001) Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. Massachusetts Institute of Technology.
- [7] Alijani M, Nouri NM, Zeinali M (2018) Designing an autonomous underwater vehicle hull shape with direct approach. J Marine Eng 13(26): 107-122.
- [۸] امینی فروشانی ج، گندم کار م (۲۰۱۸) استخراج ضرایب هیدرودینامیک با استفاده از مانور مکانیزم حرکت صفحه‌ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۲۸-۲۱۵: ۸(۱)
- [9] Lewandowski EM (2004) The dynamics of marine craft: maneuvering and seakeeping, World scientific.
- [10] CD-adapco™ (2015) STAR-CCM+® Documentation: p.5517-5531.
- [11] Fefferman CLJ (2006) Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation. The Millennium Prize Problems, Clay Mathematics Institute, Cambridge, 57-67.
- [12] Gerhart PM, Gerhart AL, Hochstein JI Munson (2016) Fundamentals of fluid mechanics. John Wiley & Sons.
- [13] Menter FR (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J 32(8): 1598-1605.
- [14] Myring DF (1976) A theoretical study of body drag in subcritical axisymmetric flow. The Aeronautical Quarterly 27: 186-194.
- [15] Tyagi A, Sen D (2006) Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. J Ocean Eng 33(5): 798-809 .
- [16] Fossen TI (2011) Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons.
- ضریب دوم ویسکوزیته (ناچیز) ξ
- ترم آشفتگی جریان τ^*
- تابع جریان پتانسیل φ
- چگالی آب، kg/m^3 ρ
- تابع دیواره $Y+$
- نیروی سرج و سووی، N Y و X
- نیروی درگ حاصل از دمپینگ، N X_D
- نیروی درگ حاصل از جرم افزوده، N X_A
- گشتاور یاو یا گشتاور مانک، N.m N

۸- مراجع

- [1] Triantafyllou MS, Hover FS (2003) Maneuvering and control of marine vehicles. Massachusetts of Institute of Technology.
- [2] Refsnes JEG (2007) Nonlinear model-based control of slender body AUVs 30(226): 229-231.
- [3] Issac MT (2017) Hydrodynamic Analysis of AUV Hulls Using Semi-empirical and CFD Approach. J Mech Eng 5(5): 137-143.
- [4] Kepler ME, Pawar S, Stilwell DJ, Brizzolara S, Neu WL (2018) Assessment of AUV hydrodynamic coefficients from analytic and semi-empirical methods. OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston.
- [5] Zhang H, Xu YR, Cai HP (2010) Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients. J Mar Sci Appl 9(2): 149-55.