

شبیه‌سازی عددی آزمون‌های دینامیکی سووی خالص و یاو خالص بر روی یک شناور زیرسطحی

احسان جوانمرد^۱، شهریار منصورزاده^۲

^۱کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ e.javanmard@me.iut.ac.ir

^۲استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ shahriar@cc.iut.ac.ir

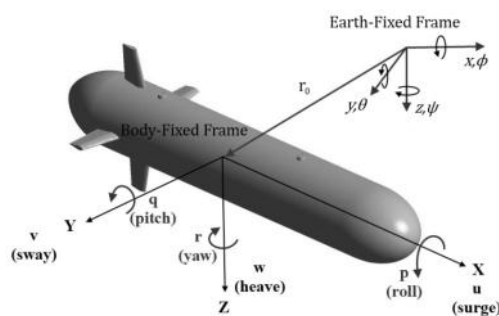
چکیده

در این مقاله هدف شبیه‌سازی آزمون‌های دینامیکی سووی خالص و یاو خالص به روش دینامیک سیالات محاسباتی به‌منظور استخراج ضرائب هیدرودینامیکی N_p ، Y_p و $N_{p'}$ ، $Y_{p'}$ مربوط به یک شناور زیر سطحی می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد ANSYS CFX انجام می‌شوند که در آن معادلات متوسط گیری شده نویر استوکس در یک میدان جریان تراکم ناپذیر به‌صورت غیر دائم حل خواهند شد. در این شبیه‌سازی‌ها از خاصیت تغییر شکل شبکه جهت اعمال حرکات نوسانی در راستاهای سووی و یاو استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در سرعت ۱/۵ متر برثانیه و در سه پرپود ۹/۳۳، ۱۱/۶۷ و ۱۵/۵۶ ثانیه انجام شده و دامنه نوسانات عرضی شناور ۲۵ سانتی متر در راستای سووی در نظر گرفته شده‌است. با استخراج منحنی‌های نیرو و گشتاور وارد بر شناور، ضرائب هیدرودینامیکی مربوطه با استفاده از روش چند اجزائی استخراج می‌شوند.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، حرکت سووی خالص، حرکت یاو خالص، ربات هوشمند زیرآبی

مقدمه

امروزه یکی از مهمترین حوزه‌ها در صنایع دریایی حوزه زیر سطحی است. شناورهای زیر سطحی با توجه به قابلیت‌ها و روش استفاده از آنها به دو گروه شناورهای باسرنشین و بدون سرنشین تقسیم می‌شوند. از جمله شناورهای بدون سرنشین، ربات هوشمند زیر آبی^۱ می‌باشد که به‌صورت یک شناور هوشمند عمل می‌کند که قادر به پیمودن یک مسیر از پیش تعیین شده می‌باشد. حوزه‌هایی نظیر اکتشاف، بازرسی، تعمیر و نگهداری، عملیات نجات، نظامی، محیط زیست و بیولوژیک از مصرف کنندگان عمده این شناورها هستند [۱-۴]. در مسیر طراحی شناورهای زیر سطحی لازم است که مقادیر نیروها و گشتاورهای وارد شده از سوی سیال بر شناور مشخص باشد. تعیین این نیروها امکان برآورد قدرت پیشران مورد نیاز و نیز بررسی پایداری و قابلیت کنترل و مانور پذیری شناور را میسر می‌سازد. دینامیک حرکت شناورهای زیر سطحی توسط مدل‌های ریاضی دقیق موسوم به مدل دینامیکی تحلیل می‌شود که شامل تمامی نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که در شرایط واقعی به شناور وارد می‌شود. در مباحث هیدرودینامیکی این نیروها به صورت ضرائب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. در شکل ۱ شماتیکی از یک شناور هوشمند زیرآبی به همراه دستگاه‌های مختصات مورد نیاز نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است مولفه‌های سرعت خطی شامل سرج^۲، سووی^۳ و هیو^۴ بوده و مولفه‌های سرعت زاویه‌ای شامل رول^۵، پیچ^۶ و یاو^۷ است.



شکل ۱: نمایش دستگاه‌های مختصات و مولفه‌های سرعت خطی و زاویه‌ای بر روی یک ربات زیرآبی

¹ Autonomous Underwater Vehicle

² Surge

³ Sway

⁴ Heave

⁵ Roll

⁶ Pitch

⁷ Yaw

ضرائب هیدرودینامیکی را می توان برحسب نوع نیروهای هیدرودینامیکی که به شناور وارد می شوند به دو دسته ضرائب استهلاک و ضرائب جرم افزوده تقسیم کرد. درشرایطی که سرعت شناور ثابت باشد، نیروهای درگ و لیفت، نیروهای مقاوم وارد بر شناور خواهند بود. این نیروهای هیدرودینامیکی تنها تابعی از سرعت بوده و به نیروهای هیدرودینامیکی سرعت و ضرائب هیدرودینامیکی آنها به ضرائب استهلاک مشهور می باشند. چنانچه بدنه شناور در صفحه افقی و یا عمودی تغییر سرعت و یا تغییر جهت داشته باشد، نیروهای دیگری نیز بر بدنه وارد خواهند شد که مقادیر و جهت آنها برحسب نوع مانور بسیار متفاوت خواهد بود. مقادیر این نیروها وابسته به مقادیر شتابهای زاویه ای، انتقالی و یا شتابهای کریولیس¹ می باشد که به علت تغییر سرعت و یا تغییر جهت تولید می شوند. این نیروها به نیروهای هیدرودینامیکی شتاب و ضرائب هیدرودینامیکی آنها به ضرائب جرم افزوده² معروفند. ضرائب جرم افزوده بخش مهمی از ضرائب هیدرودینامیکی را شامل می شود که نقش آن ارائه رفتار دینامیکی شناور در شرایطی است که شناور دارای حرکت شتابدار باشد. این حالت معمولاً علاوه بر زمان شتاب گیری یا توقف در مانورهای تغییر عمق و جهت رخ می دهد و عدم پیش بینی درست آنها منجر به ناکارآمدی مدل دینامیکی در کنترل هوشمند ربات و در نتیجه عدم مانورپذیری ربات خواهد شد. جرم افزوده به مقدار جرمی از سیال اطلاق می شود که به علت شتاب گرفتن شناور درون سیال همراه با آن حرکت می کند [5]. درحالت کلی ممکن است شناور در یک جهت شتاب بگیرد ولی اثرات جرم افزوده ناشی از آن به آن جهت محدود نشود و در جهت دیگر نیز بر روی شناور اثر گذار باشد از اینرو جرم افزوده برای یک ربات زیر آبی با شش درجه آزادی حرکت، بوسیله یک ماتریس شش در شش بیان می شود. این ماتریس در حالت کلی به فرم زیر نمایش داده می شود:

$$\begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{u}} & K_{\ddot{u}} & M_{\ddot{u}} & N_{\ddot{u}} \\ X_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{v}} & K_{\ddot{v}} & M_{\ddot{v}} & N_{\ddot{v}} \\ X_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{w}} & K_{\ddot{w}} & M_{\ddot{w}} & N_{\ddot{w}} \\ X_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{p}} & K_{\ddot{p}} & M_{\ddot{p}} & N_{\ddot{p}} \\ X_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{q}} & K_{\ddot{q}} & M_{\ddot{q}} & N_{\ddot{q}} \\ X_{\ddot{r}} & Y_{\ddot{r}} & Z_{\ddot{r}} & K_{\ddot{r}} & M_{\ddot{r}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

هر سطر از این ماتریس معرف نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که بواسطه یکی از مولفه های شتاب خطی یا زاویه ای به ربات وارد می شوند. به عنوان مثال سطر اول این ماتریس بیانگر نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که بعلمت شتاب خطی سرچ³ (\ddot{u}) در راستاهای مختلف به ربات وارد می شوند. برای ربات تحت بررسی در پژوهش حاضر بواسطه تقارن در دو صفحه افقی و عمودی بخشی از ضرائب این ماتریس قابل اغماض هستند و ماتریس جرم افزوده در حالت رفتار خطی به فرم زیر ساده خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\ddot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\ddot{w}} & 0 & M_{\ddot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\ddot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\ddot{q}} & 0 & M_{\ddot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\ddot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

مدل دینامیکی ربات زیر آبی پژوهش حاضر در رابطه (3) ارائه شده است که بیانگر نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر آن در حالت خطی است. سمت چپ معادلات بیانگر نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که در هر لحظه به مدل اعمال می شوند و قابل اندازه گیری می باشند. استخراج ضرائب هیدرودینامیکی موجود در طرف راست این روابط جهت انجام هرگونه تحلیل هیدرودینامیکی بر روی ربات الزامیست.

$$\begin{aligned} \sum X_{net} &= X = X_u u + X_{\ddot{u}} \ddot{u} + X_q q \\ \sum Y_{net} &= Y = Y_v v + Y_r r + Y_{\ddot{v}} \ddot{v} + Y_{\ddot{r}} \ddot{r} + Y_{\delta_r} \delta_r \\ \sum Z_{net} &= Z = Z_w w + Z_q q + Z_{\ddot{w}} \ddot{w} + Z_{\ddot{q}} \ddot{q} + Z_{\delta_s} \delta_s \\ \sum K_{net} &= K = K_p p + K_{\ddot{p}} \ddot{p} \\ \sum M_{net} &= M = M_w w + M_q q + M_{\ddot{w}} \ddot{w} + M_{\ddot{q}} \ddot{q} + M_{\delta_s} \delta_s \\ \sum N_{net} &= N = N_v v + N_r r + N_{\ddot{v}} \ddot{v} + N_{\ddot{r}} \ddot{r} + N_{\delta_r} \delta_r \end{aligned} \quad (3)$$

¹ Coriolis

² Added mass

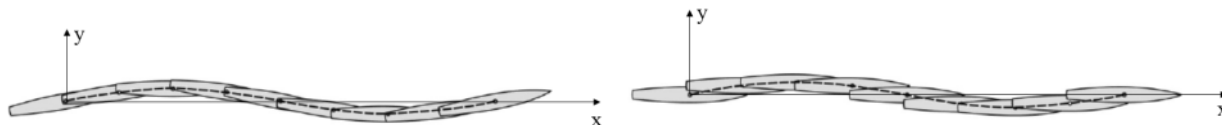
³ Surge

بنابراین باتوجه به مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۳)، ضرائب $N_v, M_{\delta_s}, M_q, M_w, K_p, Z_{\delta_s}, Z_q, Z_w, Y_{\delta_r}, Y_r, Y_v, X_q, X_u$ ، ضرائب N_{δ_r}, N_r ، ضرائب $N_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}, M_{\dot{q}}, M_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, Z_{\dot{q}}, Z_{\dot{w}}, Y_{\dot{r}}, Y_{\dot{v}}, X_{\dot{u}}$ و ضرائب هیدرودینامیکی استهلاک می‌باشند.

روش های استخراج ضرائب جرم افزوده و پژوهش های انجام شده

بطور کلی جهت برآورد ضرائب جرم افزوده سه روش اصلی وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از انجام آزمون‌های دینامیکی تجربی درون حوضچه کشش^۱، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش‌های تحلیلی. در آزمون‌های دینامیکی از مکانیزم‌هایی استفاده می‌شود که بتوانند حرکات و مانورهای مورد نیاز را به شناور اعمال کنند. آزمون‌های انجام شده توسط مکانیزم بازوی چرخان^۱ و مکانیزم حرکت صفحه‌ای^۲ از مهمترین آزمون‌های تجربی هستند. مکانیزم مورد استفاده در آزمون‌های حرکت صفحه‌ای به گونه‌ایست که مانورها و حرکاتی را در یکی از صفحات افقی و یا قائم به شناور اعمال می‌کند. با انجام این مانورها، مولفه‌های نیروی وارد بر مدل بصورت یک سیگنال استخراج شده و با انجام تحلیل‌های خاص، ضرائب جرم افزوده استخراج می‌شوند. از جمله مهمترین مانورهایی که توسط مکانیزم حرکت صفحه‌ای اعمال می‌شود می‌توان به مانورهای سرج نوسانی^۳، سووی خالص^۴ و یاو خالص^۵ اشاره کرد. برای آشنایی با این سه حرکت، بار دیگر شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود.

در حرکت صفحه‌ای سرج نوسانی، ضمن حرکت شناور با یک سرعت ثابت در جهت X (راستای حوضچه کشش)، مکانیزم حرکت صفحه‌ای یک حرکت نوسانی نیز در همان راستای X به شناور اعمال می‌کند. در حرکت صفحه‌ای سووی خالص، ضمن کشش شناور با یک سرعت ثابت در جهت X ، مکانیزم در راستای سووی یعنی Y (راستای عرضی کانال)، یک حرکت نوسانی به آن اعمال می‌کند. بنابراین در طی این حرکت، شناور بر روی یک مسیر سینوسی مشابه شکل ۲ حرکت خواهد کرد. با توجه به شکل ۲ در این حرکت زاویه یاو همواره صفر است بدین معنی که شناور در صفحه افقی هیچ گونه حرکت زاویه‌ای حول محور Z انجام نمی‌دهد. در حرکت صفحه‌ای یاو خالص، ضمن کشش شناور با یک سرعت ثابت در راستای X مکانیزم حرکت صفحه‌ای دو نوع حرکت نوسانی به طور هم زمان به آن اعمال می‌کند. یک حرکت نوسانی در راستای Y بوده (نوسان عرضی در راستای سووی) و دیگری حرکت نوسانی زاویه‌ای حول محور عمود بر صفحه افقی یا همان محور Z می‌باشد (نوسان زاویه‌ای در راستای یاو). بنابراین در طی این حرکت، شناور بر روی یک مسیر سینوسی شکل مشابه شکل ۲ حرکت خواهد کرد. در این حرکت بردار سرعت شناور در هر نقطه مماس بر مسیر سینوسی است. این حرکت تحت عنوان حرکت ماهیگون نیز شناخته می‌شود. با توجه به شکل ۲، در این حرکت، زاویه یاو جز در نقاط اکسترمم همواره مخالف صفر است.



شکل ۲: حرکت سووی خالص (راست)، حرکت یاو خالص (چپ)

هریک از این حرکات منجر به استخراج تعدادی از ضرائب جرم افزوده خواهد شد. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های تجربی گرافلر [۶]، ایچ [۷]، آرهی و همکاران [۸]، فیلیپس و همکاران [۹]، لی و همکاران [۱۰] اشاره نمود. در تمامی این پژوهش‌ها، مانورهای مورد نظر در صفحه قائم یا افقی از طریق مکانیزم‌های حرکت صفحه‌ای به مدل تحت آزمایش اعمال و ضرائب جرم افزوده مربوط به آنها استخراج شده است. از آنجائیکه تجهیزات مورد نیاز جهت انجام آزمون‌های دینامیکی در حوضچه کشش هزینه‌های بالایی را شامل می‌شود، امروزه استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی جهت استخراج ضرائب هیدرودینامیکی مورد توجه محققان قرار گرفته است. کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در استخراج ضرائب جرم افزوده به دو شکل مطرح است. حالت اول استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با فرض جریان ایده‌آل پتانسیل است. روش‌هایی از قبیل روش پانل^۴ و المان مرزی^۵ مهمترین آنها هستند. فرض اساسی این روش‌ها بر اساس جریان پتانسیل است در حالیکه در واقعیت جریان پیرامون شناور یک جریان لزج محسوب می‌شود. این فرض باعث می‌شود که نتایج از دقت بالا برخوردار نباشند. در مراجع [۱۱-۱۲] نمونه‌ای از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه ارائه شده است. حالت دوم مربوط به شبیه‌سازی آزمون‌های دینامیکی شامل حرکات مکانیزم حرکت صفحه‌ای یا بازوی چرخان است که در آن معادلات نویر استوکس با استفاده از یک کد عددی حل می‌شوند بنابراین لزجت یا ویسکوزیته جریان هم در معادلات وارد شده و به همین علت بعد از روش تجربی به عنوان یک روش مناسب جهت استخراج ضرائب جرم افزوده شناخته می‌شود. در این زمینه می‌توان به پژوهش-

¹ Rotating Arm

² Planar Motion Mechanism

³ Perturbed Surge Motion

⁴ Pure Sway

⁵ Pure Yaw

⁶ Panel Method

⁷ Boundary Element Method

های فیلیپس و همکاران [۹]، لی و همکاران [۱۰]، جوانمرد [۱۳]، ساکومتو [۱۴]، تانگ و همکاران [۱۵]، ژانگ [۱۶] اشاره نمود. روش‌های تحلیلی مانند تئوری بدنه لایه ای^۴ و روش بیضیگون های معادل، صرفاً از مشخصات هندسی جسم جهت استخراج ضرائب جرم افزوده استفاده می‌کنند. روش‌های تحلیلی صرفاً برای هندسه‌های ساده قابل استفاده بوده و با اندکی پیچیدگی در هندسه، دقت خود را از دست خواهند داد. در پژوهش حاضر ضرائب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ ، $N_{\dot{v}}$ ، $Y_{\dot{r}}$ و $N_{\dot{r}}$ مربوط به یک شناور زیرآبی با استفاده از شبیه‌سازی آزمون‌های دینامیکی شامل حرکات مکانیزم حرکت صفحه‌ای سووی خالص و یاو خالص استخراج خواهند شد.

تئوری مسئله

با توجه به مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۳)، هنگامیکه شناور در صفحه افقی (X-Y) حرکت می‌کند، مولفه نیروی سووی و گشتاور یاو حائز اهمیت هستند. باتوجه به آنکه در شبیه‌سازی آزمون‌های سووی خالص و یاو خالص که با حضور سطوح کنترلی انجام می‌شوند، زاویه انحراف سطوح کنترلی صفر است ($\delta_r = \delta_s = 0$) و اثرات اینرسی مدل (جرم و ممان اینرسی) در معادلات بایستی لحاظ شود، لذا می‌توان رابطه زیر را بعنوان معادلات دینامیکی حاکم بر شناور در صفحه افقی (X-Y) در نظر گرفت.

$$\sum Y_{net} = Y = Y_v v + Y_r r + (Y_{\dot{v}} - m)\dot{v} + (Y_{\dot{r}} - m x_g)\dot{r} \quad (4)$$

$$\sum N_{net} = N = N_v v + N_r r + (N_{\dot{v}} - m x_g)\dot{v} + (N_{\dot{r}} - I_z)\dot{r} \quad (5)$$

در روابط فوق $m = \rho V$ جرم معادل مدل (زمانی که با آب پر شده باشد)، V معرف حجم شناور است که معادل 0.0556 متر مکعب است، x_g موقعیت طولی مرکز جرم مدل است که معادل صفر می‌باشد چراکه دستگاه مختصات دقیقاً بر روی مرکز شناوری و ثقل مدل قرار گرفته است و I_z ممان اینرسی معادل مدل (زمانی که با آب پر شده باشد) حول محور Z می‌باشد که معادل $8/4$ کیلوگرم متر مربع برای مدل با سطوح کنترلی و $8/3$ کیلوگرم متر مربع برای مدل بدون سطوح کنترلی می‌باشد. چنانچه آزمون‌های تجربی دینامیکی مد نظر بود، m جرم مدل تحت آزمایش در نظر گرفته می‌شد. در حرکت سووی خالص همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مولفه سرعت و شتاب زاویه‌ای یاو همواره صفر است. یعنی $\dot{r} = \dot{v} = 0$ خواهد بود. پس معادلات حاکم بر شناور در یک حرکت سووی خالص بشکل زیر است.

$$\sum Y_{net} = Y = Y_v v + (Y_{\dot{v}} - \rho V)\dot{v} \quad (6)$$

$$\sum N_{net} = N = N_v v + N_{\dot{v}}\dot{v} \quad (7)$$

در حرکت یاو خالص همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، بردار سرعت بایستی همواره بر مسیر حرکت مماس باشد. این بدان معنی است که با توجه به اینکه دستگاه مختصات متصل به بدنه همواره همراه با شناور در حال حرکت است، در طی این حرکت، مولفه‌های سرعت و شتاب خطی سووی صفر می‌باشند. بنابراین $v = \dot{v} = 0$ خواهد بود. پس معادلات حاکم بر شناور در یک حرکت یاو خالص بشکل زیر است.

$$\sum Y_{net} = Y = Y_r r + Y_{\dot{r}}\dot{r} \quad (8)$$

$$\sum N_{net} = N = N_r r + (N_{\dot{r}} - I_z)\dot{r} \quad (9)$$

لازم به ذکر است که در روابط بالا Y و N به ترتیب معرف سیگنال‌های نیروی سووی و گشتاور یاو وارد بر شناور در طی یک آزمون حرکت صفحه-ای است که در شبیه‌سازی قابل استخراج است. فرض کنید $X = f(t)$ سیگنال نیرو و یا گشتاور حاصل از انجام یک حرکت صفحه‌ای باشد، در این صورت سیگنال نیرو یا گشتاور بدست آمده را می‌توان بصورت سری انتگرالی فوریه نوشت [۱۷]:

$$f(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_{Cn} \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} X_{Sn} \sin n\omega t \quad (10)$$

که در آن

$$X_0 = \frac{1}{T} \int_0^{NT} f(t) dt = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i \quad (11)$$

$$X_{Cn} = \frac{2}{NT} \int_0^{NT} f(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M X_i \cos n\omega t_i \quad (12)$$

$$X_{Sn} = \frac{2}{NT} \int_0^{NT} f(t) \sin n\omega t dt = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^M X_i \sin n\omega t_i \quad (13)$$

در این روابط M تعداد کل دیتاهای تست در N پرپود کامل بوده و X_i مقدار نیرو یا گشتاور در زمان t_i می‌باشد. در واقع رابطه (۱۲) نمایانگر بسط نیم دامنه کسینوسی و رابطه (۱۳) نمایانگر بسط نیم دامنه سینوسی سیگنال $X = f(t)$ است. بسط نیم دامنه کسینوسی سیگنال $X = f(t)$ با نماد X_{Cn} و بسط نیم دامنه سینوسی آنرا با نماد X_{Sn} نشان داده شده است. حال با توجه به تعریف انجام شده برای تابع جابجائی (خطی یا زاویه ای) در هر یک از حرکات صفحه‌ای مورد استفاده، می‌توان گفت که کدام بسط نیم دامنه معرف بخش همفاز سیگنال $f(t)$ و کدام بسط نیم دامنه معرف بخش غیر همفاز سیگنال $f(t)$ است. از آنجائیکه در شبیه‌سازی‌های انجام شده، حرکت نوسانی در راستای سووی برای آزمون سووی خالص و یاو خالص تحت تابع $y(t) = -a \sin \omega t$ انجام می‌شود، لذا X_{Sn} نشان دهنده بخش همفاز سیگنال نیرو (گشتاور) و X_{Cn} نشان دهنده بخش غیر همفاز سیگنال نیرو (گشتاور) خواهد بود. از آنجائیکه در آزمون یاو خالص حرکت نوسانی زاویه‌ای تحت تابع $\psi(t) = -\psi_0 \cos \omega t$ انجام می‌شود، لذا X_{Cn} نشان دهنده بخش همفاز سیگنال نیرو (گشتاور) و X_{Sn} نشان دهنده بخش غیر همفاز سیگنال نیرو (گشتاور) خواهد بود. بنابراین با بهره‌گیری از مفهوم سری انتگرالی فوریه می‌توان بخش همفاز و غیر همفاز یک سیگنال را نسبت به تابع نوسانی اعمال شده استخراج کرد. در این توابع a دامنه نوسانات خطی شناور در راستای سووی، ψ_0 دامنه نوسانات زاویه‌ای شناور در راستای یاو و ω فرکانس نوسانات عرضی و زاویه‌ای است. بنابراین در هر یک از دو حرکت صفحه‌ای می‌توان سیگنال‌های نیروی سووی (Y) و گشتاور یاو (N) را برحسب بسط‌های نیم دامنه سینوسی و کسینوسی تا مرتبه دلخواه n بسط داد.

$$Y = Y_{S1} \sin \omega t + Y_{C1} \cos \omega t \quad (14)$$

$$N = N_{S1} \sin \omega t + N_{C1} \cos \omega t \quad (15)$$

بنابراین با جایگذاری روابط (۱۴) و (۱۵) در معادلات مربوط به هر یک از آزمون‌های سووی خالص و یاو خالص و همچنین جایگذاری مقادیر شتاب و سرعت سووی (v, \dot{v}) و نیز شتاب و سرعت یاو (r, \dot{r}) و تفکیک ضرائب سینوسی و کسینوسی میتوان نوشت:

$$Y_{C1} = -(Y_{\dot{v}} - \rho V) \dot{v}_{max} \quad (16)$$

$$N_{C1} = -N_{\dot{v}} \dot{v}_{max} \quad (17)$$

$$Y_{S1} = Y_{\dot{r}} \dot{r}_{max} \quad (18)$$

$$N_{S1} = (N_{\dot{r}} - I_Z) \dot{r}_{max} \quad (19)$$

بنابراین می‌توان گفت که در حرکت سووی خالص از دو رابطه (۱۶) و (۱۷) جهت استخراج ضرائب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ و در حرکت یاو خالص از دو رابطه (۱۸) و (۱۹) جهت استخراج ضرائب جرم افزوده $Y_{\dot{r}}$ و $N_{\dot{r}}$ می‌توان بهره برد. با توجه به دو رابطه (۱۶) و (۱۷)، ضرائب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ و $N_{\dot{v}}$ به ترتیب شیب تغییرات بسط‌های نیم دامنه Y_{C1} و N_{C1} نسبت به بیشینه شتاب سووی ($\dot{v}_{max} = a\omega^2$) می‌باشند. به همین ترتیب با توجه به دو رابطه (۱۸) و (۱۹)، ضرائب جرم افزوده $Y_{\dot{r}}$ و $N_{\dot{r}}$ به ترتیب شیب تغییرات بسط‌های نیم دامنه Y_{S1} و N_{S1} نسبت به بیشینه شتاب زاویه‌ای یاو ($\dot{r}_{max} = \psi_0\omega^2$) می‌باشند.

شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال بیانی از قوانین بقاء هستند و به معادلات ناویر استوکس^۱ مشهورند. در تحلیل جریان‌های گذار و یا آشفته به علت حضور حرکت‌های گردابه‌ای، بکارگیری این معادلات و حل آنها بطور مستقیم بسیار مشکل است. به همین دلیل معمولاً از شکل متوسط گیری شده معادلات ناویر استوکس بشکل زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (20)$$

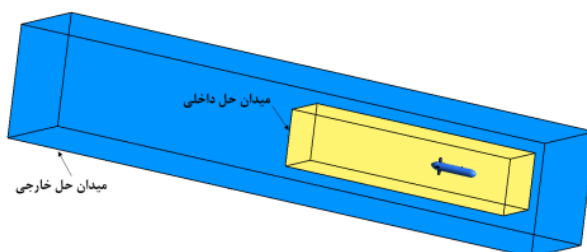
$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + f_i \quad (21)$$

در این فرم از معادلات عبارتی تحت عنوان تنش‌های رینولدز^۲ ($\bar{U}_i \bar{U}_j$) به معادلات اضافه می‌شود که برای بسته شدن معادلات وحل کردن آنها لازم است که آنها مدل‌سازی کرد. در کار حاضر برای مدل‌سازی تنش‌های رینولدز از مدل آشفته‌گی SST بعلت توانایی بالا در پیش بینی جدایش

¹ Reynolds Averaged Navier Stokes

² Reynolds Stresses

جریان [۱۸] در شبیه‌سازی‌هایی که سطوح کنترلی وجود دارد، استفاده می‌شود. در شرایطی که سطوح کنترلی وجود نداشته باشد از مدل توربولانس $k - e$ استفاده شده است. با این کار معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس در شرایط غیر دائم، غیرقابل تراکم به منظور حل کردن میدان جریان کارتیزین $(U_i = u, v, w)$ و فشار (p) سیال توسط نرم افزار بکار گرفته شده است. در تحلیل هر مسئله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، کیفیت شبکه محاسباتی ایجاد شده پیرامون مدل، تاثیر بسیار زیادی برهمگرایی، صحت و دقت نتایج دارد. به منظور شبیه‌سازی آزمون‌های حرکت صفحه‌ای به دو میدان حل داخلی و خارجی نیاز است چراکه در شبیه‌سازی این آزمون‌ها، اعمال حرکات صفحه‌ای بصورت حرکت میدان حل داخلی در میدان حل خارجی شبیه‌سازی خواهند شد. باتوجه به شکل ۳، هر دو میدان بشکل مکعب مستطیل می‌باشند. ابعاد هندسی میدان‌های حل داخلی و خارجی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳: موقعیت میدان‌های حل داخلی و خارجی

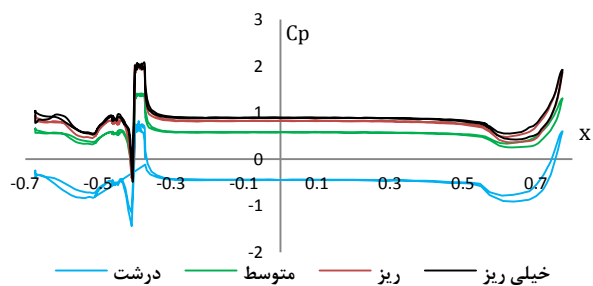
جدول ۱: ابعاد هندسی میدان‌های حل داخلی و خارجی برحسب قطر و طول شناور (L, d)

میدان حل	بالا و پائین	جانبی	پائین دست	بالا دست
داخلی	$3d$	$3d$	$3L$	L
خارجی	$6.5d$	$6.5d$	$9L$	$2L$

پس از آماده‌سازی دامنه حل، با شبکه بندی آن زمینه برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل حاکم و حل عددی جریان فراهم می‌گردد. شبکه بندی میدان حل با توجه به نوع شبیه‌سازی بصورت باسازمان یا بی سازمان صورت گرفته است. در مناطقی از میدان که پیچیدگی‌های هندسی و تغییرات شدید متغیرهای جریان وجود دارد، مانند نواحی پیرامون شناور، شبکه ریز شده است. در لایه مرزی حول بدنه، در شبکه‌های باسازمان از شبکه‌های چند لایه ریز و در شبکه‌های بی‌سازمان از المان‌های منشوری استفاده شده است. تولید این نوع المان‌ها به منظور کسب دقت بالاتر در حل لایه مرزی انجام می‌شود. یکی از مسائل مهم در حل عددی یافتن مشخصات شبکه‌ای است که نتایج حاصله، مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها بدست آید. به همین منظور شبکه‌های موجود در جدول ۲ برای آزمون استقلال جواب از شبکه مورد مطالعه قرار گرفت تا بتوان با توجه به سرعت جریان، شبکه‌ای را انتخاب نمود که دقت کافی را در حل عددی تأمین نماید و از لحاظ هزینه‌های محاسباتی نیز مقرون به صرفه باشد. برای بررسی استقلال جواب از شبکه از پارامتر ضریب فشار استفاده شده است. بدین منظور برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف، ضریب فشار بر روی بدنه شناور محاسبه می‌گردد. توزیع ضریب فشار بدست آمده از شبکه‌های محاسباتی مختلف بر روی بدنه شناور در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ضریب فشار در شبکه درشت 15% ، شبکه متوسط 40% و شبکه ریز $8/5\%$ با شبکه خیلی ریز اختلاف دارد. لذا جهت صرفه جویی در زمان و هزینه‌های محاسباتی در شبیه‌سازی‌ها از شبکه ریز استفاده خواهد شد. با یافتن شبکه‌های حل بهینه، مشخصات این شبکه‌ها به تفکیک حضور یا عدم حضور سطوح کنترلی در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۵ نیز تصاویری از شبکه حل آماده شده برای شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات شبکه‌های حل جهت انجام مطالعه شبکه

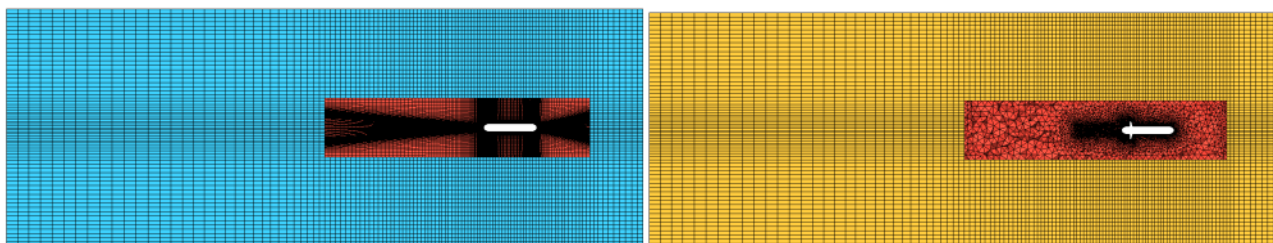
شبکه	تعداد گره‌ها	تعداد المان‌ها
درشت	۲۵۷۶۰۸	۶۲۸۱۲۲
متوسط	۳۵۹۳۱۴	۸۷۵۲۰۳
ریز	۴۱۳۹۲۶	۱۰۰۸۸۶۵
خیلی ریز	۶۷۲۰۵۳	۱۶۳۳۰۹۳



شکل ۴: توزیع ضریب فشار در حرکت سووی خالص با پرپود ۹/۳۳ ثانیه

جدول ۳: مشخصات شبکه های حل مناسب برای شبیه سازی آزمون های حرکت صفحه ای پس از انجام مطالعه شبکه

تعداد کل گره ها	تعداد کل المان ها	المان هر می	المان منشوری	المان شش وجهی	المان چهار وجهی	شبکه	میدان حل	وضعیت سطوح کنترلی
۲۱۵۶۱۸	۸۲۶۹۱۳	۱۱۵	۲۱۱۹۲۷	-	۶۱۴۸۷۱	بی سازمان	داخلی	حضور
۱۹۸۳۰۸	۱۸۱۹۵۲	-	-	۱۸۱۹۵۲	-	باسازمان	خارجی	حضور
۸۰۴۹۷۳	۷۸۲۸۶۰	-	-	۷۸۲۸۶۰	-	باسازمان	داخلی	عدم حضور
۱۹۸۳۰۸	۱۸۱۹۵۲	-	-	۱۸۱۹۵۲	-	باسازمان	خارجی	عدم حضور



شکل ۵: شبکه های محاسباتی بی سازمان برای شناور با سطوح کنترلی (راست) و با سازمان برای شناور بدون سطوح کنترلی (چپ)

برای میدان خارجی، در مرز ورودی از شرط جریان یکنواخت با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه و شدت اغتشاشات متوسط، در خروجی از شرط دبی جرمی و برای دیواره های جانبی از شرط دیواره لغزش آزاد استفاده می شود. شبکه خارجی با سایز درشت در فضا ثابت باقی مانده، در حالیکه شبکه داخلی که شامل شناور است درون شبکه خارجی حرکت می کند و باعث تغییر شکل شبکه خارجی می شود. شبکه حل داخلی نسبت به حرکات شناور کاملاً ثابت است یعنی شبکه همراه با شناور جابجا می شوند. مرز بین دو شبکه حل داخلی و خارجی از طریق سطح مشترک^۱ بین دو شبکه شناسایی می شود. نحوه اعمال حرکات نوسانی به میدان حل داخلی و شناور از طریق زبان برنامه نویسی TCL^۲ میسر می شود. پس از اعمال شرایط مرزی و اولیه مذکور، مسائل مورد نظر بر روی یک پردازنده ۴ هسته ای ۸ رشته ای با قدرت ۳/۰۲ گیگا هرتز و استفاده از قابلیت موازی سازی نرم افزار حل می شود. گام زمانی معادل ۰/۰۱ پرپود نوسانات در نظر گرفته می شود. حداکثر تعداد تکرار حلقه داخلی برای همگرایی معادلات در مسائل گذرا در هر بازه زمانی، ۲۰ تکرار در نظر گرفته شده است. در هر گام زمانی نیز معادلات جریان تا مرتبه ۰/۰۰۰۰۱ همگرا می شود. شرایط تحت بررسی در شبیه سازی آزمون های حرکت صفحه ای که بصورت گذرا تحلیل می شوند در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: شرایط تحت بررسی در شبیه سازی آزمون های حرکت صفحه ای

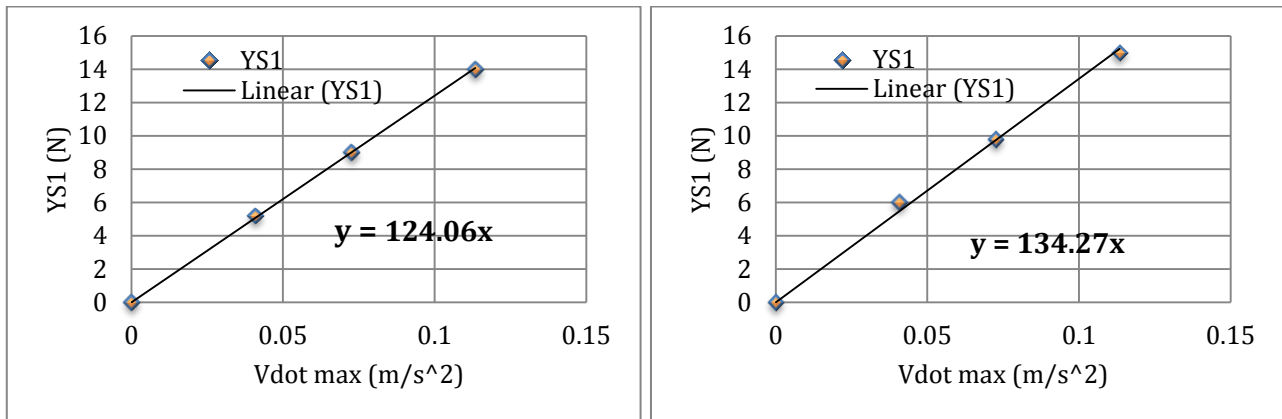
مدل تحت آزمایش	سرعت (m/s)	پرپود نوسانات جانبی (s)	دامنه نوسانات عرضی (m)
مدل با سطوح کنترلی	۱/۵	۱۵/۱۲، ۵۶/۵۷، ۹/۳۳	۰/۲۵
مدل بدون سطوح کنترلی	۱/۵	۱۵/۱۲، ۵۶/۵۷، ۹/۳۳	۰/۲۵

نتایج و بحث

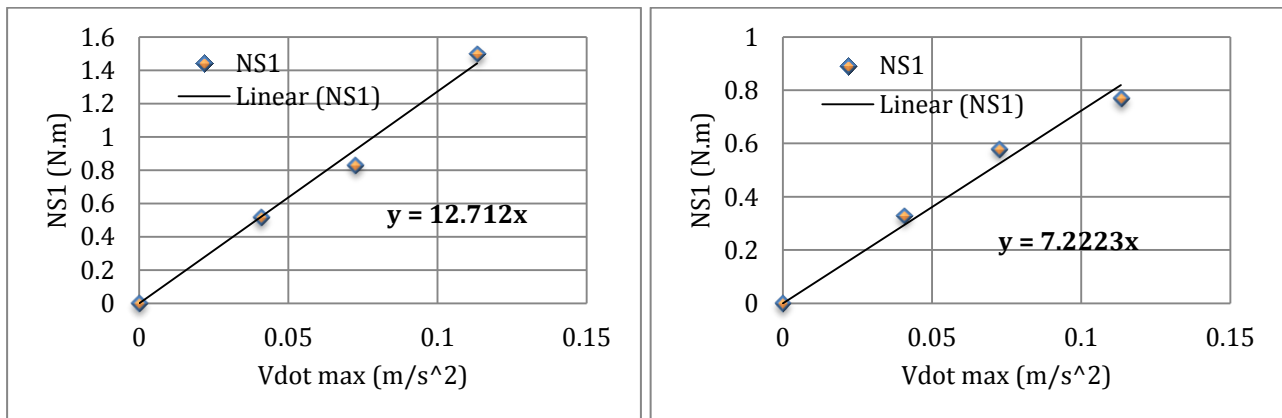
پس از انجام هر شبیه سازی، دو سیگنال نیروی سووی و گشتاور یا استخراج می شود. با بهره گیری از روابط (۱۲) و (۱۳) بسط های نیم دامنه سینوسی یا کسینوسی مربوط به هر آزمون با توجه به روابط (۱۶) تا (۱۹) و نوع آزمون (سووی خالص یا یو خالص) استخراج می شوند. با تکرار

¹ Interface
Tool Command Language

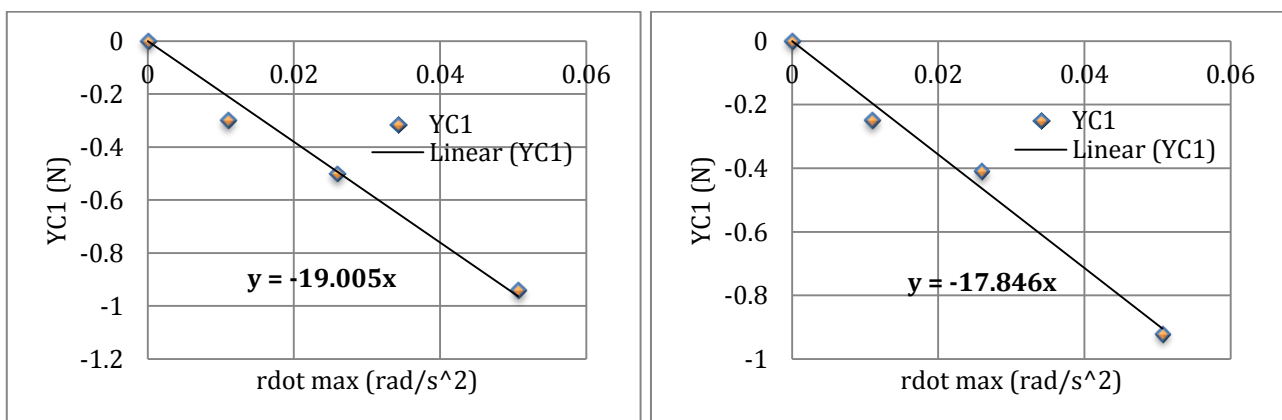
آزمون با توجه به سناریوی ارائه شده در جدول ۴، می‌توان تغییرات بسط‌های نیم دامنه را نسبت به شتاب‌های بیشینه خطی یا زاویه‌ای بصورت یک تابع خطی ترسیم و شیب آن‌ها را بدست آورد. سپس با استفاده از روابط (۱۶) تا (۱۹)، مقادیر ضرائب جرم افزوده مربوط به هر آزمون استخراج خواهد شد.



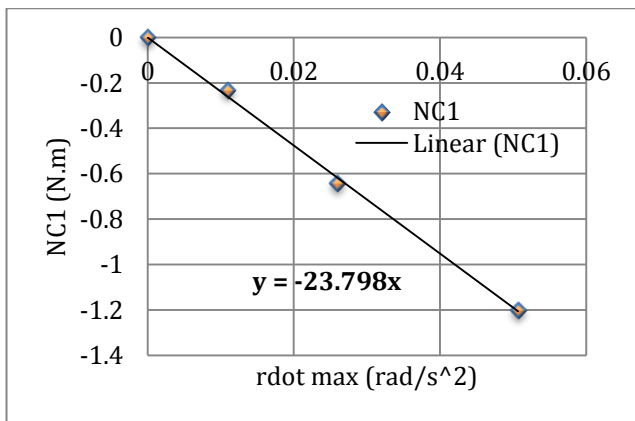
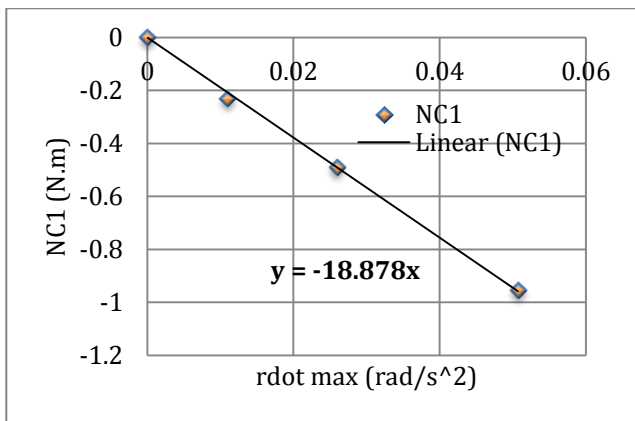
شکل ۶: تغییرات بسط نیم دامنه Y_{S1} نسبت به بیشینه شتاب سووی برای مدل با سطوح کنترلی (راست) و بدون سطوح کنترلی (چپ) در تست سووی خالص



شکل ۷: تغییرات بسط نیم دامنه N_{S1} نسبت به بیشینه شتاب سووی برای مدل با سطوح کنترلی (راست) و بدون سطوح کنترلی (چپ) در تست سووی خالص



شکل ۸: تغییرات بسط نیم دامنه Y_{C1} نسبت به بیشینه شتاب یاو برای مدل با سطوح کنترلی (راست) و بدون سطوح کنترلی (چپ) در تست یاو خالص



شکل ۹: تغییرات بسط نیم دامنه N_{C1} نسبت به بیشینه شتاب یاو برای مدل با سطوح کنترلی (راست) و بدون سطوح کنترلی (چپ) در تست یاو خالص

با توجه به نتایج بدست آمده و روابط (۱۶) تا (۱۹)، می توان ضرائب جرم افزوده مدل با سطوح کنترلی و بدون آن استخراج کرد. این نتایج در جدول ۵ ارائه شده اند.

جدول ۵: مقادیر ضرائب جرم افزوده محاسبه شده به روش تست چند اجرائی

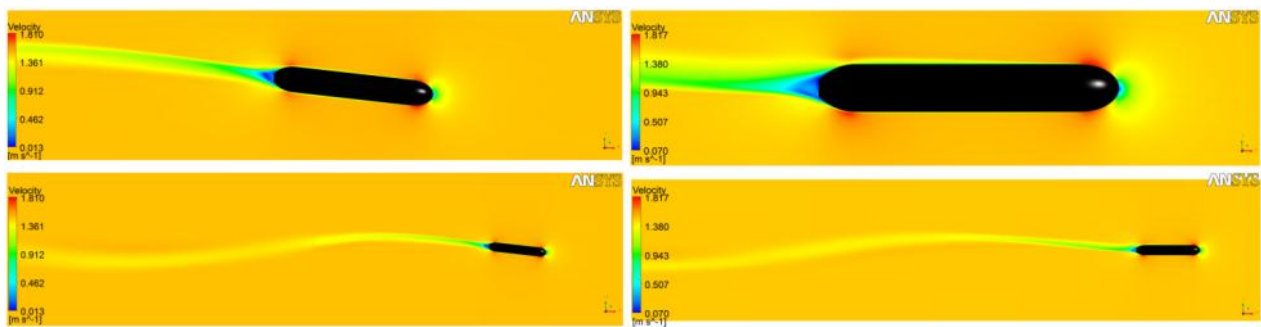
نام آزمون	سیگنال تحت بررسی	مدل تحت آزمون	منحنی برازش	شیب منحنی	ضریب جرم افزوده
سووی خالص	نیروی سووی	با سطوح کنترلی	$y = 134.3x$	$C = 134.3$	$Y_{\dot{\psi}} = -78.7(kg)$
		بدون سطوح کنترلی	$y = 124.1x$	$C = 124.1$	$Y_{\dot{\psi}} = -68.5(kg)$
	گشتاور یاو	با سطوح کنترلی	$y = 7.22x$	$C = 7.22$	$N_{\dot{\psi}} = -7.22(kg.m)$
		بدون سطوح کنترلی	$y = 12.71x$	$C = 12.71$	$N_{\dot{\psi}} = -12.71(kg.m)$
یاو خالص	نیروی سووی	با سطوح کنترلی	$y = -17.85x$	$C = -17.85$	$Y_{\dot{\gamma}} = -17.85(kg.m)$
		بدون سطوح کنترلی	$y = -19.01x$	$C = -19.01$	$Y_{\dot{\gamma}} = -19.01(kg.m)$
	گشتاور یاو	با سطوح کنترلی	$y = -23.8x$	$C = -23.8$	$N_{\dot{\gamma}} = -15.4(kg.m^2)$
		بدون سطوح کنترلی	$y = -18.88x$	$C = -18.88$	$N_{\dot{\gamma}} = -10.58(kg.m^2)$

با توجه به نتایج جدول ۵، با اضافه شدن سطوح کنترلی، جرم افزوده در راستای سووی ($Y_{\dot{\psi}}$) در حدود ۱۰ کیلوگرم افزایش پیدا کرده است که در این میان اثر دو سطح کنترلی سکان قطعاً بیشتر از دو سطح کنترلی استرن^۱ خواهد بود چراکه سطوح کنترلی سکان در حرکات و مانورهای افقی بیشترین تأثیر را دارا می باشند و هنگامیکه مدل در راستای سووی شتاب بگیرد این دو سطح کنترلی کاملاً عمود بر جریان خواهند بود. این افزایش جرم افزوده که در راستای سووی با اضافه شدن سطوح کنترلی پدید می آید حول مرکز شناوری مدل یک گشتاور اضافی هم به مدل القا می کند و باعث افزایش ضریب جرم افزوده $N_{\dot{\psi}}$ خواهد شد. بطوریکه در جدول ۵ مشخص است این افزایش در حدود ۴۳ درصد است که خود گویای این حقیقت است.

اضافه شدن سطوح کنترلی اثر چندانی بر ضریب $Y_{\dot{\gamma}}$ نشان نداده و تنها افزایش ۶ درصدی را نشان می دهد. علت آن است که اضافه شدن سطوح کنترلی (و بویژه سطوح کنترلی سکان) هنگامیکه مدل شتاب زاویه ای یاو داشته باشد باعث افزایش جرم افزوده در راستای سووی نخواهد شد بلکه جرم افزوده قابل توجهی را بصورت دورانی حول مدل القا خواهد نمود به عبارت بهتر اثر قابل توجهی بر روی گشتاور یاو خواهد گذاشت و به همین دلیل است که جرم افزوده در راستای سووی تغییر چندانی نکرده است حال آنکه در راستای یاو ضریب جرم افزوده $N_{\dot{\gamma}}$ در حدود ۴۵ درصد افزایش نشان داده است.

در شکل ۱۰ کانتور سرعت پیرامون شناور در دو حرکت حرکت سووی خالص و یاو خالص با پریود ۹/۳۳ ثانیه بدون حضور سطوح کنترلی پس از طی یک سیکل ترسیم شده است. تصویر پائین مربوط به کل میدان جریان و تصویر بالا بر روی مدل بزرگنمایی شده است.

¹ Stern



شکل ۱۰: کانتور سرعت در حرکت سووی خالص با پریود ۹/۳۳ ثانیه بعد از یک سیکل کامل (راست)، کانتور سرعت در حرکت یاو خالص با پریود ۹/۳۳ ثانیه بعد از یک سیکل کامل (چپ)

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در کار حاضر چهار ضریب جرم افزوده $N_{\dot{v}}$ ، $Y_{\dot{v}}$ ، $N_{\dot{r}}$ و $Y_{\dot{r}}$ مربوط به یک ربات هوشمند زیرآبی از طریق شبیه‌سازی عددی حرکات صفحه‌ای سووی خالص و یاو خالص استخراج شد. نتایج حاصله نشان داد که سطوح کنترلی سکان باعث افزایش ۱۳ درصدی جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ ، افزایش ۴۳ درصدی جرم افزوده $N_{\dot{v}}$ و افزایش ۴۵ درصدی جرم افزوده $N_{\dot{r}}$ می‌شود.

مراجع

- [1] Dhanak, M.R., and Holappa, K., "An Autonomous Ocean Turbulence Measurement Platform", Journal of Atmospheric and Ocean Technology, Vol. 16, pp. 1506-1518, 1999.
- [2] An, P.E., and Smith, S.M., "an Experimental Data Base of Ocean Explore AUV for Self-Motion Controlled Study," IEEE Transactions on Oceanic Engineering, pp. 174-285, 1998.
- [3] Smith, S.M., Dunn, S.E., Hopkins, T.L., Heeb, K., and Pantelakis, T., "The Application of a Modular AUV to Coastal Oceanography", in Proceeding of IEEE Ocean 95 Conference, San Diego, 1995.
- [4] Curtin, T., "the Autonomous Oceanographic Sampling Network", in Proceeding of Oceanology International 98 Conference, Brighton, 1998.
- [5] Prestero, T., "Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, University of California, 2001.
- [6] Gerfler, M., "the DTMB Planar-Motion-Mechanism ISM System", Naval Ship Research And Development Center, 1967.
- [7] Aage, C., and Smit, L.W., "Hydrodynamic maneuverability data of a flatfish type AUV", in Proceeding of the IEEE Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, Vol. 3, pp. 425-430, 1994.
- [8] Rhee, K., Yoon, H.K., Sung, T.J., Kim, S.H., and Kang, J.N., "An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device", International Workshop on Ship Manoeuvrability, pp. 1-20, 2000.
- [9] Phillips, A., Furlong, M., and Turnock, S.R., "Virtual planar motion mechanism tests of the autonomous underwater vehicle autosub", STG Conference Lectureday CFD in Ship Design, Germany, pp. 8, 2007.
- [10] Lee, S.K., Joung, T.H., Cheon, S.J., Jang, T.S., and J.H. Lee, "Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 174-180, 2011.
- [11] Lin, Z., and Liao, S., "Calculation of added mass coefficients of 3D complicated underwater bodies by FMBEM", Journal of Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, Vol. 16, pp. 187-194, 2011.
- [12] Sahin, I. Crane, J.W., and Watson, K.P., "Application of a panel method to hydrodynamics of underwater vehicles", Ocean Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 501-512, 1997.
- [13] Javanmard, E., "Determination of Hydrodynamic Coefficients of an AUV with Computational Fluid Dynamics and Experimental Fluid Dynamics Methods", Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, 2013.
- [14] Sakamoto, N., "URANS, DES Simulations of Static and Dynamic Maneuvering for Surface Combatant", Ph.D Thesis, University of Iowa, USA, 2011.
- [15] Tang, S., Ura, T., Nakatani, T., Thornton, B., and Jiang, T., "Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous Underwater Vehicle TUNA-SAND", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, pp. 373-386, 2009.
- [16] Zhang, H., Xu, Y.R., and Cai, H.P., "Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficient", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, pp. 149-155, 2010.
- [17] Yoon, H., "Phase-Averaged Stereo-PIV Flow Field and Force/Moment/Motion Measurements for Surface Combatant in PMM Maneuvers", Ph.D Thesis, University of Iowa, USA, 2009.
- [18] ANSYS, Ansys-cfx solver modeling guide, (2011), USA, Ansys Inc.