بررسی عددی حرکت شتابدار یک ربات زیر آبی و تعیین ضرایب جرم افزوده آن

احسان جوانمرد[۱*]، شهریار منصورزاده[۲]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ e.javanmard@me.iut.ac.ir
[۲] استادیار، پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ shahriar@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۴

کلمات کلیدی:
جرم افزوده
ربات هوشمند زیرآبی
دینامیک سیالات محاسباتی
حرکت شتابدار
مکانیزم حرکت صفحه ای

چکیده

در این مقاله روش جدیدی جهت استخراج ضرائب جرم افزوده یک ربات زیرآبی پیشنهاد شده است. در این روش، حرکت شتاب دار ربات بصورت عددی شبیه سازی شده و نیروهای ناشی از سرعت و شتاب آن استخراج و از آنجا ضرائب جرم افزوده محاسبه می گردد. جهت اعتبار سنجی روش پیشنهادی، ضرایب جرم افزوده یک بیضیگون با استفاده از روش حاضر محاسبه و با نتایج تحلیلی موجود برای بیضیگون مقایسه شده است. نتایج عددی حاصله تطابق خوبی با نتایج تحلیلی داشته و میتوان از آن جهت استخراج ضرایب جرم افزوده هندسه های پیچیده تر نظیر شناور هوشمند زیر آبی پژوهشکده علوم و فناوری زیردریا استفاده نمود. نتایج عددی حاصله انطباق قابل قبولی با نتایج تجربی تست‌های مکانیزم حرکت صفحه ای انجام شده در پژوهشکده علوم و فناوری زیردریا نشان میدهد.

Numerical Investigation of an Underwater Vehicle Accelerated Motion and Determination of Its Added Mass Coefficients.

Ehsan Javanmard[1*], Shahriar Mansoorzadeh[2]

[1] MSc in Mechanical Engineering, Subsea Science & Technology Center, Isfahan University of Technology; e.javanmard@me.iut.ac.ir
[2] Assistance Professor, Subsea Science & Technology Center, Isfahan University of Technology; shahriar@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 1 Nov. 2014
Accepted: 26 Oct. 2015

Keywords:
Added mass
Autonomous Underwater Vehicle
Computational Fluid Dynamic
Accelerated motion
Planar Motion Mechanism

ABSTRACT

In this paper a new method is suggested to calculate added mass coefficients of an underwater vehicle. In this method linear accelerated motion of the underwater vehicle is numerically simulated. Velocity and acceleration related forces, are extracted from the simulation results, from which the added mass coefficients are extracted. In order to validate the obtained results, initially, the added mass coefficients of an ellipsoid are calculated with the use of the present method and compared with the available corresponding analytical results. The obtained results from the suggested numerical method agreed well with those obtained from the analytical method, indicating that the present method can be used to obtain the added mass coefficients of more complicated geometries, including the underwater vehicle model constructed in Subsea Research and Development Centre. In addition, the numerically obtained results agreed well with the experimental results recently obtained, using the Planar Motion Mechanism tests conducted in Subsea Research and Development Centre.

۱- مقدمه

دینامیک حرکت شناورهای زیر سطحی توسط مدل‌های ریاضی دقیقی موسوم به مدل دینامیکی تحلیل می شود. مدل دینامیکی شامل تمامی نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور است که به صورت ضرائب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند. ضرائب جرم افزوده[۱] بخش مهمی از این ضرائب هیدرودینامیکی را شامل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

میشود 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 ضرائب جرم افزوده مرتبط با آن منجر به ناکارآمدی مدل دینامیکی در کنترل هوشمند ربات و درنتیجه عدم مانورپذیری ربات خواهد شد. در پژوهش حاضر هدف استخراج ضرائب جرم افزوده ربات هوشمند زیرآبی[۲] پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا در راستای طولی و عرضی است. شکل ۱ تصویری از ربات مورد نظر را نشان میدهد. در جدول ۱ نیز مشخصات فنی این ربات ارائه شده است.

۲- ضرائب هیدرودینامیکی ربات در حالت خطی

نیروها و گشتاورهای وارد بر یک شناور زیرسطحی معمولاً دارای مقادیر ثابتی نمی باشند و تابعی از سرعت بدنه، نوع حرکت و مانور وسیله و نیز شکل هندسی بدنه هستند، به همین دلیل در مباحث هیدرودینامیکی این نیروها به صورت حاصل ضرب ضرائب هیدرودینامیکی در سرعت ها و شتاب های خطی و زاویه ای بیان می‌شوند. برای تشریح ضرائب هیدرودینامیکی، یک ربات زیر سطحی مطابق با شکل ۲ را در نظر بگیرید. برروی این ربات دو دستگاه مختصات قابل تعریف است که عبارتند از دستگاه مختصات اینرسی[۳] و دستگاه مختصات متصل به بدنه[۴]. مبدأ دستگاه مختصات اینرسی یک نقطه مشخص از فضا است درحالیکه مبدأ دستگاه مختصات متصل به بدنه دقیقاً روی مرکز شناوری جسم قرار می‌گیرد. محورهای مختصات، مولفه‌های سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای در شکل ۲ نشان داده شده است.

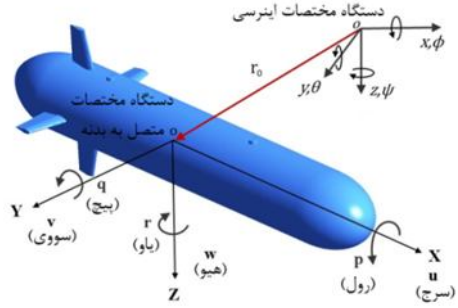
نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی وارد بر ربات با شش درجه آزادی حرکت در حالت خطی در رابطه (۱) ارائه شده است. این روابط بیانگر مدل دینامیکی ربات هستند که با استفاده از مفهوم مشتقات هیدرودینامیکی بیان شده اند. استخراج ضرائب هیدرودینامیکی موجود در این روابط جهت انجام هرگونه تحلیل هیدرودینامیکی بر روی ربات الزامیست.



شکل ۱- ربات هوشمند زیرآبی دانشگاه صنعتی اصفهان

جدول ۱- مشخصات فنی ربات هوشمند زیرآبی

مشخصه	توضیحات
شکل	Torpedo
طول(m)	۱/۴۵
قطر(m)	۰/۲۳
وزن(kg)	۴۵
بیشینه عمق عملیات(m)	۲۰
بیشینه زمان عملیات(hr)	۲/۵
سطوح کنترلی	Naca0015
بیشینه سرعت افقی($m.s^{-1}$)	۱/۵
حجم(m^3)	۰/۰۵۵۶



شکل ۲- نمایش دستگاه های مختصات و مولفه های سرعت خطی و زاویه ای

$$\sum X_{net} = X_u u + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_q q$$
$$\sum Y_{net} = Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{\delta_r}\delta_r$$
$$\sum Z_{net} = Z_w w + Z_q q + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{\delta_s}\delta_s$$
$$\sum K_{net} = K_P p + K_{\dot{P}}\dot{p}$$
$$\sum M_{net} = M_w w + M_q q + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{\delta_S}\delta_S$$
$$\sum N_{net} = N_v v + N_r r + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{\delta_r}\delta_r \qquad (۱)$$

ضرائب هیدرودینامیکی یک شناور زیر سطحی را می‌توان برحسب نوع نیروهای هیدرودینامیکی که به شناور وارد می‌شوند به دو دسته ضرائب استهلاک و ضرائب جرم افزوده تقسیم کرد. در شرایطی که سرعت شناور ثابت باشد، نیروهای درگ و لیفت، نیروهای مقاوم وارد بر شناور خواهند بود. این نیروهای هیدرودینامیکی تنها تابعی از شکل بدنه و سرعت آن بوده و به نیروهای هیدرودینامیکی سرعت و ضرائب هیدرودینامیکی آنها به ضرائب استهلاک مشهور می‌باشند.

بنابراین باتوجه به مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۱)، ضرائب X_u ، X_q ، Y_v ، Y_r ، Y_{δ_r} ، Z_w ، Z_q ، Z_{δ_s} ، K_P ، M_w ، M_q ، M_{δ_s} ، N_v ، N_r ، N_{δ_r} ضرائب هیدرودینامیکی استهلاک می‌باشند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

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. مقادیر این نیروها وابسته به مقادیر شتاب‌های زاویه‌ای، انتقالی و یا شتاب های کوریولیس[5] می‌باشد و به همین علت به نیروهای هیدرودینامیکی شتاب و ضرائب هیدرودینامیکی آنها به ضرائب جرم افزوده معروفند. این ضرائب در مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۱) شامل ضرائب $X_{\dot{u}}$ ، $Y_{\dot{v}}$، $Y_{\dot{r}}$ ، $Z_{\dot{w}}$ ، $Z_{\dot{q}}$ ، $K_{\dot{p}}$ ، $M_{\dot{w}}$ ، $M_{\dot{q}}$ ، $N_{\dot{v}}$ ، $N_{\dot{r}}$ می باشند. جرم افزوده در واقع به مقدار جرمی از سیال اطلاق میشود که به علت شتاب گرفتن وسیله درون سیال همراه با وسیله حرکت می کند[۱]. درحالت کلی ممکن است وسیله در یک جهت شتاب بگیرد ولی اثرات جرم افزوده ناشی از آن به آن جهت محدود نشود و در جهات دیگر نیز برروی ربات اثر گذار باشد از اینرو جرم افزوده برای یک ربات زیر سطحی 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:

$$\begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & Y_{\dot{u}} & Z_{\dot{u}} & K_{\dot{u}} & M_{\dot{u}} & N_{\dot{u}} \\ X_{\dot{v}} & Y_{\dot{v}} & Z_{\dot{v}} & K_{\dot{v}} & M_{\dot{v}} & N_{\dot{v}} \\ X_{\dot{w}} & Y_{\dot{w}} & Z_{\dot{w}} & K_{\dot{w}} & M_{\dot{w}} & N_{\dot{w}} \\ X_{\dot{p}} & Y_{\dot{p}} & Z_{\dot{p}} & K_{\dot{p}} & M_{\dot{p}} & N_{\dot{p}} \\ X_{\dot{q}} & Y_{\dot{q}} & Z_{\dot{q}} & K_{\dot{q}} & M_{\dot{q}} & N_{\dot{q}} \\ X_{\dot{r}} & Y_{\dot{r}} & Z_{\dot{r}} & K_{\dot{r}} & M_{\dot{r}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

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 میشوند. به عنوان مثال سطر اول این ماتریس بیانگر نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی است که بعلت شتاب خطی سرج ($\dot{u}$) در راستاهای مختلف به ربات وارد میشوند یا سطر پنجم معرف نیروها و گشتاورهایی است که بواسطه مولفه شتاب زاویه ای پیچ ($\dot{q}$) در راستاهای مختلف به ربات وارد میشوند. 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 به فرم زیر ساده خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{v}} \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{r}} & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

بنابراین در مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۱) صرفاً آرایه های این ماتریس دیده میشود. در پژوهش حاضر هدف استخراج دو ضریب جرم افزوده $X_{\dot{u}}$ و $Y_{\dot{v}}$ است. به دلیل تقارن هندسی نیز $Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}}$.

۳-روش‌های استخراج ضرائب جرم افزوده و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه

روش‌های برآورد ضرائب جرم افزوده شامل انجام آزمون های دینامیکی تجربی درون حوضچه کشش[6]، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و روش های تحلیلی است. در آزمون های دینامیکی از مکانیزم‌هایی استفاده می‌شود که بتوانند حرکات و مانورهای مورد نیاز را به شناور اعمال کنند. آزمون های انجام شده توسط بازوی چرخان[7] و مکانیزم حرکت صفحه‌ای[8] از مهمترین آزمون‌های تجربی هستند. مکانیزم مورد استفاده در این آزمون ها به گونه‌ایست که مانورها و حرکاتی را در یکی از صفحات افقی و یا قائم به شناور اعمال می‌کند. با انجام این مانورها، مولفه های نیروی وارد بر مدل بصورت یک سیگنال استخراج شده و با انجام تحلیل فوریه، ضرائب جرم افزوده استخراج میشوند. از جمله مهمترین مانورهایی که توسط مکانیزم حرکت صفحه‌ای اعمال میشود میتوان به مانورهای سرج نوسانی[9]، سووی خالص[10] و یاو خالص[11] اشاره کرد. هریک از این حرکات منجر به استخراج تعدادی از ضرائب جرم افزوده خواهد شد. در این زمینه میتوان به پژوهش های تجربی گرفلر[۲]، ایج[۳]، آرهی و همکاران[۴]، فیلیپس و همکاران[۵]، لی و همکاران[۶] اشاره نمود. در تمامی این پژوهش ها، مانورهای مورد نظر در صفحه قائم یا افقی از طریق مکانیزم های حرکت صفحه ای به مدل تحت آزمایش اعمال و ضرائب جرم افزوده مربوط به آنها استخراج شده است. از آنجائیکه تجهیزات مورد نیاز جهت انجام آزمون های دینامیکی در حوضچه کشش هزینه های بالایی داشته و نتایج آن با عدم قطعیت های زیادی همراه است، امروزه استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی جهت استخراج ضرائب جرم افزوده 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 ایده آل پتانسیل است. روشهایی از قبیل روش پانل [12] و المان مرزی[13] مهمترین آنها هستند. فرض اساسی این روشها بر اساس جریان پتانسیل است در حالیکه در واقعیت جریان پیرامون ربات یک جریان لزج محسوب میشود. این فرض باعث میشود که نتایج از دقت بالا برخوردار نباشند. در مراجع[۷و۸] نمونه‌ای از پژوهش های صورت گرفته در این زمینه ارائه شده است. حالت دوم مربوط به شبیه سازی آزمونهای دینامیکی شامل حرکات مکانیزم حرکت صفحه ای یا بازوی چرخان است که در آن معادلات نویر استوکس با استفاده از یک کد تجاری (نظیر CFX، Fluent و...) 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 پژوهش‌های فیلیپس و همکاران[۵]، لی و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

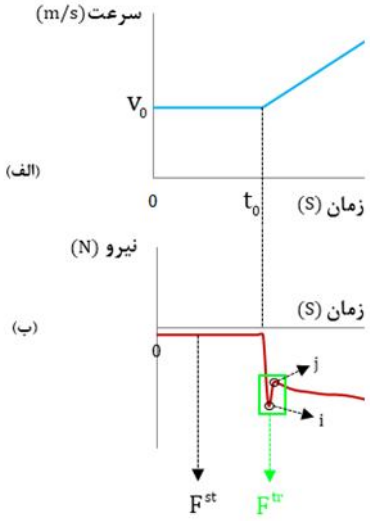
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

همکاران[۶]، جوانمرد[۹]، ساکوموتو[۱۰]، تانگ و همکاران[۱۱]، ژانگ [۱۲] اشاره نمود. روش های تحلیلی مانند تئوری بدنه لایه ای[۱۴] و روش بیضیگون های معادل، صرفاً از مشخصات هندسی جسم جهت استخراج ضرائب جرم افزوده استفاده میکنند. اصول حاکم بر این روشها استخراج تابع پتانسیل سرعت جسم با استفاده از شرایط مرزی و استفاده از آن جهت تعیین توزیع فشار حول جسم با استفاده از معادله برنولی است. با مشخص شدن توزیع فشار نیروهای وارد بر جسم استخراج شده و به کمک آن ضرائب جرم افزوده قابل استخراج هستند. براساس تئوری لایه ای، جرم افزوده یک هندسه در یک راستا برابر است با مجموع جرم افزوده بر واحد طول لایه های آن جسم. در این زمینه میتوان به پژوهش های پرسترو[۱] و فریرا و همکاران[۱۳] اشاره کرد. در روش بیضیگون های معادل، بخش های مختلف جسم توسط بیضیگون هایی تقریب زده میشود و با در اختیار داشتن روابط تحلیلی جهت استخراج ضرائب جرم افزوده یک بیضیگون، جرم افزوده بخشهای مختلف جسم در راستای مورد نظر بدست می آید. جرم افزوده یک بیضیگون از طریق حل مستقیم معادلات لاپلاس برای پتانسیل سرعت بدست می آید. دراین زمینه میتوان به پژوهش های لامب[۱۴]، کورتکین[۱۵] و تور[۱۶] اشاره نمود. روش های تحلیلی صرفاً برای هندسه های ساده قابل استفاده بوده و با اندکی پیچیدگی در هندسه مدل، دقت خود را از دست خواهند داد. با توجه به توضیحات ارائه شده، استخراج ضرائب جرم افزوده بصورت تجربی نیاز به تجهیزات مخصوص جهت انجام مانور های مشخص سینوسی در فرکانس های مختلف در حوضچه های کشش یا مانور داشته و تحلیل نتایج آن با فرضهای خطی سازی مختلف، پیچیدگیها و ابهامات خاص خود را دارد. از طرف دیگر گرچه شبیه سازی های عددی نیاز به تجهیزات فوق را برطرف می سازد اما اولاً پیاده سازی مانورهای مختلف بصورت عددی پیچیده بوده و ثانیاً ابهامات تحلیل نتایج حاصله نیز همچنان وجود دارد. از سوی دیگر استفاده از روش های تحلیلی و عددی با فرض جریان پتانسیل نیز همراه با تقریب هایی خواهد بود که میزان آن بستگی به پارامتر های مختلفی خواهد داشت. در پژوهش حاضر روشی پیشنهاد شده است که با استفاده از شبیه سازی عددی یک مانور ساده بدون استفاده از فرض جریان پتانسیل بتوان با تحلیلی ساده ضریب جرم افزوده یک ربات زیر آبی را در راستا های گوناگون محاسبه نمود.

۴- تئوری مسئله

در کار حاضر جهت استخراج ضریب جرم افزوده یک جسم در راستای مورد نظر، پیشنهاد گردیده که جسم به دو روش مختلف در دامنه حل شتابدار گردد و حرکت سیال در هر دو حالت بصورت عددی شبیه سازی شود. این دو روش به صورت مفصل در این بخش تشریح گردیده است.

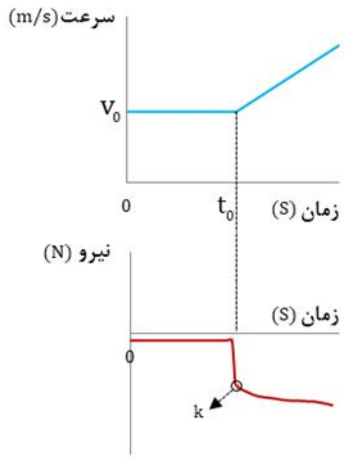
در روش اول جهت تخمین جرم افزوده یک جسم ابتدا فرض میشود که جسم از لحظه ابتدایی تا زمان $t = t_0$ با سرعت ثابت V_0 در داخل سیال در حال حرکت باشد. سپس در لحظه t_0 مطابق با شکل ۳-الف حرکت پایای آن در همان راستا تبدیل به یک حرکت با شتاب ثابت گردد. در شرایط پایا، نیروی وارد بر جسم صرفاً شامل نیروی ثابت درگ و متناسب با توانی از سرعت جسم می باشد. فرض می‌شود که F^{st} معرف این نیرو باشد. در لحظه $t = t_0$ که حرکت پایای ربات تبدیل به حرکت شتابدار می‌شود نیروی اینرسی سیال نیز به نیروی درگ قبلی اضافه میشود. در لحظه ای که جریان شتابدار می‌شود، فشار دینامیکی در بالادست جریان افزایش یافته درحالیکه در پائین دست جریان هنوز اثرات شتاب احساس نشده است. این اختلاف فشار باعث افزایش موضعی درگ فشاری و طبعاً درگ وارد بر جسم در لحظه شتابگیری می-شود (نقطه i در شکل ۳-ب). هنگامی که شتاب سیال برروی کل جسم گسترش میابد، افزایش درگ فشاری از بین میرود (نقطه j در شکل ۳-ب) این بدان معنی است که مدت زمانی طول می‌کشد تا جریان شتابدار بتواند بطور کامل خود را برروی سیال گسترش دهد (اثر تاریخچه[۱۵]). در غیر این صورت نیروی وارد بر ربات مشابه شکل ۴ خواهد شد.



شکل۳- تابع سرعت در مرز ورودی و تغییرات نیروی ناشی از آن مربوط به روش اول

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]



شکل۴- تابع سرعت در مرز ورودی و تغییرات نیروی ناشی از آن بدون در نظر گرفتن اثرات اینرسی جریان در حالت پایا

با فرض اینکه ضریب درگ در محدوده سرعت مورد نظر ثابت باشد می توان با بررسی منحنی شکل ۳-ب، زمان پایان اثرات تاریخچه (نقطه j) را تعیین و سرعت متناظر با آن را از روی شکل ۳-الف مشخص و سپس نیروی درگ، F^{st}، را در نقطه j محاسبه نمود. اگر نیروی کل در لحظه $t = t_j$ برابر F^{tr} باشد، میتوان آن را متشکل از نیروی درگ و نیروی اینرسی سیال اطراف آن دانست. با استفاده از مفهوم جرم افزوده، $m_{added\ mass}$ ، نیروی اینرسی سیال را میتوان بصورت $(\rho\forall + m_{added\ mass})|a|$ در نظر گرفت، زیرا علاوه بر جرم سیالی که برابر با جرم حجم سیال جابجا شده است، بخشی از سیال اطراف آن($m_{added\ mass}$) نیز شتاب خواهد گرفت. تفاضل دو نیروی F^{tr} و F^{st} نشان دهنده نیروی اینرسی سیال در لحظه $t = t_0$ خواهد بود.

$$|F^{tr} - F^{st}|_{t=t_j} = (\rho\forall + m_{added\ mass})|a| \qquad (۴)$$

در این رابطه ρ دانسیته سیال، $\forall$ حجم جسم، $m_{added\ mass}$ جرم افزوده در راستای مورد نظر و a شتاب در راستای مورد نظر است. بنابراین می‌توان جرم افزوده را از رابطه زیر بدست آورد:

$$m_{added\ mass} = \frac{|F^{tr} - F^{st}|_{t=t_j}}{|a|} - \rho\forall \qquad (۵)$$

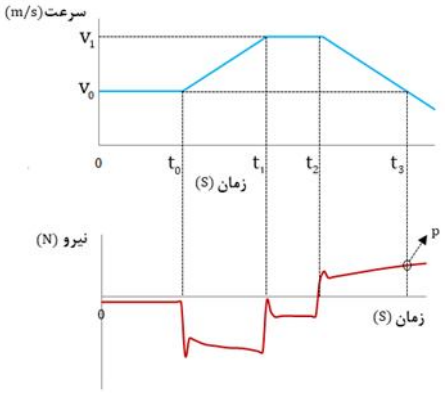
تقریب بکار رفته در این روش شامل تعیین زمان پس از پرش ناشی از اثرات تاریخچه جریان میباشد که مستلزم برآورد دقیق نقطه j است. از آنجائیکه در یک بازه زمانی کوتاه پیرامون نقطه $\boldsymbol{j}$، نیرو دارای تغییرات زیادی است لذا شناسایی دقیق این نقطه همواره با خطا همراه بوده و عدم قطعیت بالایی را شامل خواهد شد. به همین دلیل روش دومی پیشنهاد میگردد که در آن نیازی به تقریب این زمان وجود ندارد.

در روش دوم، حرکت جسم به صورت یک تابع چند ضابطه‌ای اعمال می‌شود (شکل ۵)، بگونه‌ای که در مرحله اول جریان بصورت پایا و با سرعت V_0 در نظر گرفته می‌شود، در لحظه $t = t_0$ جریان شتابدار شده و سرعت جریان تحت تابع $V(t) = at + b_1$ نسبت به زمان افزایش پیدا می‌کند. حرکت شتابدار تا لحظه $t = t_1$ ادامه یافته و در این لحظه، جریان فاقد شتاب شده و بصورت یک جریان پایا با مقدار ثابت $V(t) = V_1$ اعمال می‌شود. این جریان پایا تا لحظه $t = t_2$ ادامه پیدا میکند. در لحظه $t = t_2$، یک شتاب منفی اعمال می‌شود و سرعت جریان تحت تابع $V(t) = -bt + c$ نسبت به زمان کاهش پیدا می‌کند. در لحظه $t = t_3$ سرعت جریان به سرعت جریان پایای اولیه میرسد یعنی $V(t_3) = V_0$ خواهد شد. در این لحظه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ربات شامل اثرات شتاب نیز خواهند بود (نقطه p) و چون در این لحظه سرعت ربات مجدداً به مقدار V_0 رسیده است، لذا تفاضل نیرو در دو زمان $t < t_0$ (که معرف درگ در شرایط پایا در سرعت V_0 است) و $t = t_3$، نشان دهنده نیروی اینرسی سیال، $(\rho\forall + m_{added\ mass})|a|$، در لحظه $t = t_3$ است. یعنی:

$$|F_{t=t_3} - F_{t<t_0}| = (\rho\forall + m_{added\ mass})|b| \qquad (۶)$$

$$m_{added\ mass} = \frac{|F_{t=t_3} - F_{t<t_0}|}{|b|} - \rho\forall \qquad (۷)$$

تفاوت روش حاضر با روش اول در محاسبه جرم افزوده در این است که در این روش در لحظه $\boldsymbol{t = t_3}$ پرشی در نمودار نیرو بدلیل آثار تاریخچه جریان دیده نمی شود.



شکل۵- تابع سرعت در مرز ورودی و تغییرات نیروی ناشی از آن مربوط به روش دوم

در نتیجه نقاط i وj بر هم منطبق هستند و نیازی به تقریب نیرو در لحظه $\boldsymbol{t = t_3}$ وجود ندارد. بنابراین در پژوهش حاضر از روش دوم جهت استخراج ضرائب جرم افزوده استفاده خواهد شد. روش پیشنهادی حاضر علاوه بر اینکه اثر لزجت را در محاسبه توزیع فشار که عامل اصلی بوجود آمدن جرم افزوده است در نظر میگیرد نیاز به شبیه‌سازی پیچیده آزمون‌های حرکت صفحه‌ای را نیز از بین می‌برد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

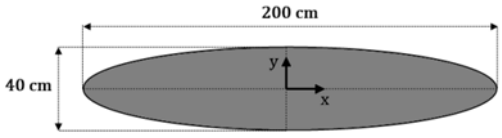
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

۵- اعتبار سنجی

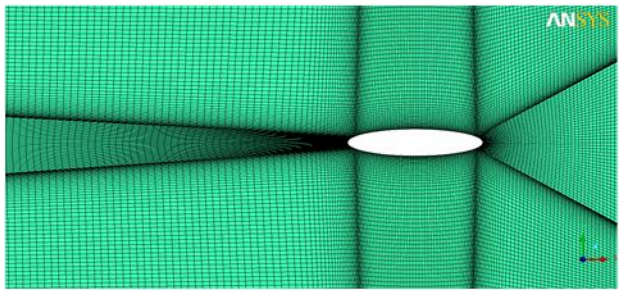
جهت اعتبار سنجی روش پیشنهاد شده، سه مسئله بایستی مورد بررسی قرار گیرد: الف) اعتبار سنجی ضرائب جرم افزوده محاسبه شده از طریق مقایسه با نتایج تحلیلی و تجربی، ب) اعتبار سنجی ضرائب درگ محاسبه شده از طریق مقایسه با نتایج تجربی و تحلیلی، ج) بررسی استقلال ضرائب جرم افزوده محاسبه شده از شتاب جریان. برای این منظور یک بیضیگون کاملاً مغروق با معادله زیر و مشخصات ارائه شد در شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود[۱۶].

$$\frac{x^2}{\bar{a}^2}+\frac{y^2}{\bar{b}^2}+\frac{z^2}{\bar{c}^2}=1 \qquad (۸)$$

در رابطه (۸)، ضریب $\bar{a}$ معرف قطر اصلی و ضرایب $\bar{b}$ و $\bar{c}$ معرف قطر های جانبی بیضیگون هستند. از نرم افزار CFX جهت حل عددی این مسئله استفاده میشود. شبکه محاسباتی برای این هندسه شامل تعداد ۲۹۶۲۲۴۱ المان و ۱۰۰۱۵۶۵ گره برای شبیه سازی حرکت شتابدار در راستای طولی و تعداد ۳۰۹۱۹۵۶ المان و ۱۰۳۶۴۳۸ گره برای شبیه سازی حرکت شتابدار در راستای عرضی خواهد بود. در شکل ۷ بخشی از شبکه باسازمان پیرامون بیضیگون جهت شبیه سازی حرکت شتابدار در راستای طولی نشان داده شده است.



شکل۶- جسم بیضیگون مورد استفاده جهت اعتبار سنجی



شکل ۷ - شبکه با سازمان پیرامون جسم بیضیگون جهت تحلیل حرکت شتابدار در راستای طولی

برای یک بیضیگون با دو قطر جانبی برابر ($\bar{c}=\bar{b}$) و $\bar{a}>\bar{b}$، لامب[۱۶] روابط تحلیلی زیر را جهت استخراج ضرائب جرم افزوده ارائه کرده است[۱۴]:

$$X_{\dot{u}}=-k_1 m \qquad (۹)$$

$$Y_{\dot{v}}=Z_{\dot{w}}=-k_2 m \qquad (۱۰)$$

در روابط بالا m معادل جرم سیالی است که درون بیضیگون قرار می‌گیرد و k_1 و k_2 به فاکتورهای لامب معروف هستند و بشکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_1=\frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \qquad (۱۱)$$

$$k_2=\frac{\beta_0}{2-\beta_0} \qquad (۱۲)$$

$$m=\frac{4}{3}\rho\pi\bar{a}\bar{b}^2 \qquad (۱۳)$$

که در آن α_0 و β_0 ثابت‌هایی هستند که با توجه به ویژگی‌های هندسی بیضیگون بصورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\alpha_0=\frac{2(1-e^2)}{e^2}\left(\frac{1}{2}\ln\frac{1+e}{1-e}-e\right) \qquad (۱۴)$$

$$\beta_0=\frac{1}{e^2}-\frac{1-e^2}{2e^2}\ln\frac{1+e}{1-e} \qquad (۱۵)$$

در این روابط e خروج از مرکز بیضیگون است و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$e^2=1-\left(\frac{\bar{b}}{\bar{a}}\right)^2 \qquad (۱۶)$$

باتوجه به مشخصات هندسی ارائه شده در شکل۶ و روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) مقادیر زیر استخراج می‌شوند:

$$e=0.979795$$
$$\alpha_0=0.10938$$
$$\beta_0=0.946147 \qquad (۱۷)$$

حال با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) فاکتورهای لامب محاسبه می‌شوند:

$$k_1=0.057859$$
$$k_2=0.897798 \qquad (۱۸)$$

بنابراین ضرائب جرم افزوده این بیضیگون با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) بشکل زیر قابل محاسبه است:

$$X_{\dot{u}}=-k_1 m=-9.682(kg) \qquad (۱۹)$$

$$Y_{\dot{v}}=Z_{\dot{w}}=-k_2 m=-150.23(kg) \qquad (۲۰)$$

حال دو ضریب $X_{\dot{u}}$ و $Y_{\dot{v}}$ با استفاده از روش عددی پیشنهاد شده در این پژوهش برای بیضیگون مورد نظر استخراج خواهند شد. همانطور که اشاره شد جهت استخراج ضریب جرم افزوده در راستای مورد نظر بایستی حرکت شتابدار ربات در آن راستا شبیه سازی شود. برای این منظور از تابع چند ضابطه ای رابطه (۲۱) برای حرکت شتابدار در راستاهای طولی و عرضی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی جهت محاسبه نیروی وارد بر بیضیگون در حرکات شتابدار طولی و عرضی بترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

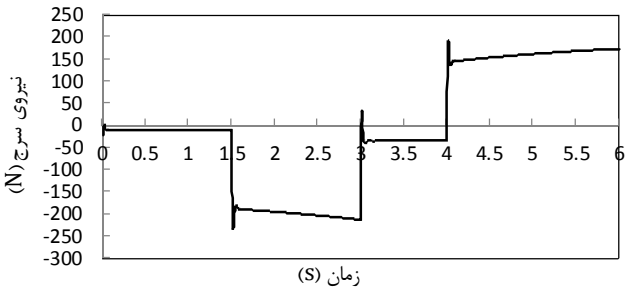
$$V(t)=u(t)=\begin{cases}1.5 & t\le 1.5\\ at & 1.5<t\le 3\\ 3 & 3<t\le 4\\ -a(t-4)+3 & t>4\end{cases},\ a=1(m.s^{-2}) \qquad (۲۱)$$

با توجه به دو شکل ۸ و ۹، ضرائب جرم افزوده $X_{\dot{u}}$ و $Y_{\dot{v}}$ برای جسم بیضیگون بصورت زیر استخراج می‌شوند.

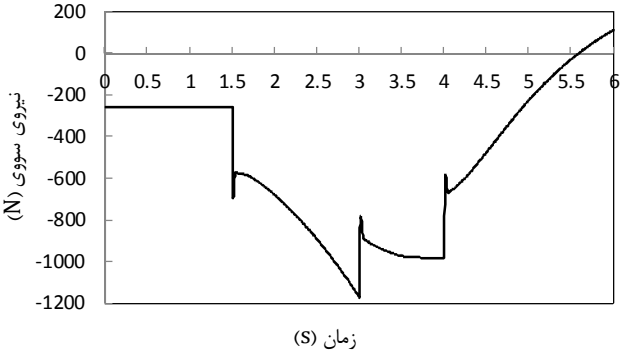
$$X_{\dot{u}}=\frac{|F_{t=5.5}-F_{t=1.5}|}{|\dot{u}|}-\rho\forall=10.036\ (kg) \qquad (۲۲)$$

$$Y_{\dot{v}}=\frac{|F_{t=5.5}-F_{t=1.5}|}{|\dot{v}|}-\rho\forall=143.48\ (kg) \qquad (۲۳)$$

نتایج تحلیلی و عددی حاصله برای دو ضریب بی بعد $\acute{X}_{\dot{u}}=\frac{X_{\dot{u}}}{\rho\forall}$ و $\acute{Y}_{\dot{v}}=\frac{Y_{\dot{v}}}{\rho\forall}$ در جدول ۳ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند. بنابراین مشاهده می‌شود که ضرائب استخراج شده به روش عددی برای جسم بیضیگون انطباق قابل قبولی با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که روش عددی ارائه شده در این پژوهش با نتایج تحلیلی ارائه شده برای یک بیضیگون که در آن از فرض جریان بدون لزجت جهت تخمین ضریب جرم افزوده استفاده شده است مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل۸- نمودار تغییرات نیروی وارد بر بیضیگون در راستای طولی در حرکت شتابدار با شتاب ۱ متر بر مجذور ثانیه



شکل ۹ - نمودار تغییرات نیروی وارد بر بیضیگون در راستای عرضی در حرکت شتابدار با شتاب ۱ متر بر مجذور ثانیه

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصله برای ضریب بدون بعد $\acute{X}_{\dot{u}}$ حاصل از روش های عددی و تحلیلی برای بیضیگون

ضریب هیدرودینامیکی	سرعت (متر برثانیه)	روش تحلیلی	روش عددی	درصد اختلاف
$\acute{X}_{\dot{u}}$	۱/۵	۰/۰۵۷۸	۰/۰۶	۳/۶
$\acute{Y}_{\dot{v}}$	۱/۵	۰/۸۹۷۷	۰/۸۵۷۴	۴/۵

لی و همکاران[۶] ضریب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ یک بیضیگون با مشخصات مشابه را با استفاده از مکانیزم حرکت صفحه ای برای ۳ پریود نوسانی به روش تجربی استخراج کردند که نتایج آن در جدول ۴ ارائه و با نتایج تحلیلی و عددی بکار گرفته شده در این پژوهش مقایسه شده است. اصولاً ماهیت حرکت شتابدار مدل در بستر سیال ساکن جهت استخراج ضرائب جرم افزوده به روش تجربی، با حرکت شتابدار میدان جریان که در حال عبور از روی مدل ساکن است(جهت استخراج ضرائب جرم افزوده به روش عددی) متفاوت می‌باشد. علت این تفاوت ها به گرادیان فشار مورد نیاز در میدان جریان جهت شتاب گرفتن جریان سیال مربوط می‌شود[۱۷]. تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته در زمینه استخراج ضرائب جرم افزوده نشان می‌دهد که استخراج یک ضریب جرم افزوده مشخص با استفاده از دو حرکت متفاوت نه تنها نسبت به یکدیگر نتایج کاملاً یکسانی را نشان نمی‌دهد بلکه نتایج حاصله با نتایج تئوری نیز اندکی متفاوت خواهد بود که علت آن، تفاوت بین جریان پتانسیل مورد استفاده در تحلیل‌های تئوری و جریان واقعی در آزمایشات است[۱۷].

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصله برای ضریب جرم افزوده $\acute{Y}_{\dot{v}}$ بیضیگون

روش عددی حاضر	روش تحلیلی لامب [6]	نتایج عددی لی [6]	نتایج تجربی لی [6]
۰/۸۵۷۴	۰/۸۹۷۷	۰/۹۹	۱/۰۷

همانطور که اشاره شد، یکی دیگر از موارد مهم در اعتبار سنجی روش مورد استفاده، ضریب درگ بیضیگون است. نیروی درگ وارد بر یک جسم بیضیگون از رابطه زیر قابل محاسبه است[۱۸]:

$$F=\frac{1}{2}\rho V^2\forall^{(2/3)}C_d \qquad (۲۴)$$

که در آن ρ دانسیته سیال، V سرعت جریان، $\forall$ حجم بیضیگون و C_d ضریب درگ بیضیگون است که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱۸]:

$$C_d=C_f\left(4\lambda^{(1/3)}+6\lambda^{(-7/6)}+24\lambda^{(-8/3)}\right) \qquad (۲۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

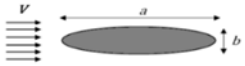
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

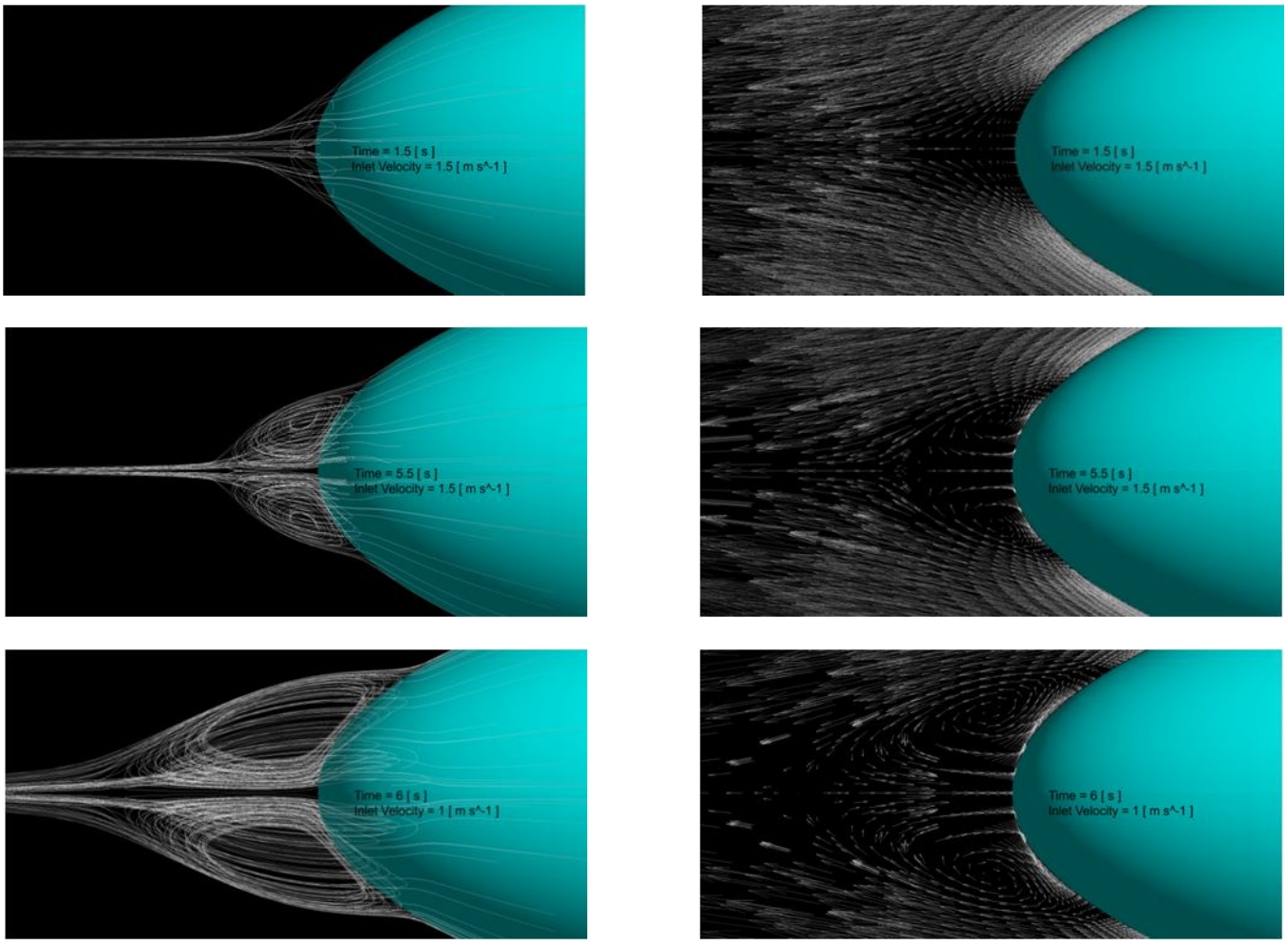
در رابطه (۲۵)، λ نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک $(\lambda = \frac{\bar{a}}{\bar{b}})$ و C_f ضریب درگ اصطکاکی مربوط به یک صفحه تخت است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_f = \frac{0.045}{Re^{(1/6)}} \qquad (۲۶)$$

رینولدز جریان در رابطه (۲۶) بصورت $Re = \frac{Va}{\upsilon}$ محاسبه می‌شود که در آن υ ویسکوزیته سینماتیک آب است و معادل $\upsilon = 1.004 \times 10^{-6}(\mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1})$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ضریب درگ بیضیگون در حالت طولی برای حالتیکه سرعت جریان معادل ۱/۵ متر بر ثانیه باشد معادل ۰/۰۳۰۳ خواهد بود. بنابراین نیروی درگ وارد بر بیضیگون طبق رابطه (۲۵) معادل ۱۰/۳۵ نیوتن خواهد شد که با مقدار ۹/۵۷۵ نیوتن بدست آمده از طریق شبیه سازی (شکل ۸) سازگاری نسبتاً قابل قبولی دارد. در جدول ۵ نتایج عددی و تجربی مربوط به نیروی درگ و ضریب درگ بیضیگون بطور کامل ارائه شده است. در شکل ۱۰ خطوط جریان و نیز بردارهای سرعت در پشت بیضیگون نشان داده شده است. این شکل مربوط به شبیه سازی حرکت شتابدار بیضیگون در راستای طولی بوده و تصاویر ارائه شده مربوط به زمان‌های ۵/۱،۵/۵ و ۶ ثانیه می‌باشند. با توجه به این شکل، در دو زمان ۱/۵ و ۵/۵ ثانیه سرعت جسم ۱/۵ متر برثانیه است با این تفاوت که در لحظه $t = 1.5\ (s)$ جریان دارای شتاب $a = 1\ (m.s^{-2})$ و در لحظه $t = 5.5\ (s)$ دارای شتاب $a = -1\ (m.s^{-2})$ است. هنگامیکه جریان در لحظه $t = 1.5\ (s)$ شتابدار می‌شود خطوط جریان در پشت جسم به هم نزدیک میشود.

جدول ۵- ضریب و نیروی درگ بیضیگون ، محاسبه شده به دو روش تجربی و عددی

شماتیک بیضیگون و جریان در راستای طولی	سرعت (m/s)	رینولدز جریان ($\times 10^6$)	C_f	C_d	درگ محاسبه شده به روش عددی(N)	نتایج تجربی(N)	درصد اختلاف
	۱/۵	۲/۹۸۸	۰/۰۰۳۷۴	۰/۰۳۰۳	۹/۵۷۵	۱۰/۳۵	۷/۴۹
	۳	۵/۹۷۶	۰/۰۰۳۳۴	۰/۰۲۷	۳۴/۲۲	۳۶/۸۹	۲



شکل۱۰- خطوط جریان (چپ) و بردارهای سرعت (راست) در پشت جسم بیضیگون در حرکت شتابدار در راستای طولی در ۳ زمان مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

در لحظه $t = 5.5\ (s)$ میدان جریان تحت اثر شتاب منفی قرار گرفته و این پدیده باعث شکل گیری گردابه در پشت جسم شده است. با گذشت زمان، در لحظه $t = 6\ (s)$ وسعت گردابه ها در پشت جسم افزایش یافته بگونه‌ای که باعث وارد شدن نیروی اینرسی بیشتر در خلاف جهت نیروی درگ به جسم می‌شود. به همین دلیل با توجه به شکل ۸ نیرو به سمت مقادیر مثبت میل خواهد کرد. بطوریکه اشاره شد، نتایج حاصل از روش پیشنهادی بایستی مستقل از شتاب جریان باشد. بنابراین لازم است که استقلال نتایج از شتاب جریان بررسی گردد. جهت بررسی اثر شتاب جریان بر نتایج، دو جریان با دو شتاب متفاوت بصورت جداگانه در راستای طولی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جریان اول با شتاب ۱ متر بر مجذور ثانیه مطابق با تابع سرعت نشان داده شده در رابطه (۲۱) و جریان دوم با شتاب ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه به شکل زیر در نظر گرفته میشود.

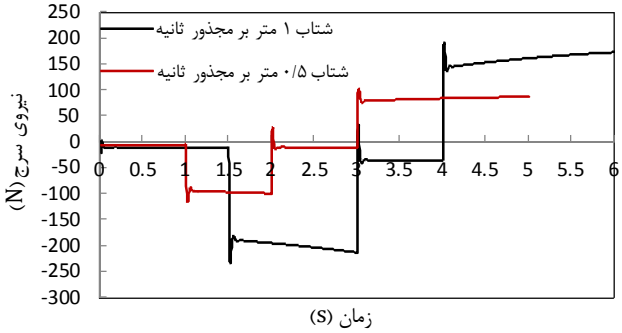
$$V(t) = u(t) = \begin{cases} 1 & t \le 1 \\ at + 0.5 & 1 < t \le 2 \\ 1.5 & 2 < t \le 3 \\ -a(t-3) + 1.5 & t > 3 \end{cases}, a = 0.5(m.s^{-2}) \quad (۲۷)$$

تغییرات نیروی وارد بر بیضیگون درطی این دو حرکت شتابدار در شکل۱۱ نشان داده شده است. با استفاده از رابطه (۷)، ضریب $X_{\dot{u}}$ بصورت زیر محاسبه میشود:

$$X_{\dot{u}} = 10.7\ (kg) \quad \text{در} \quad a = 0.5(m.s^{-2}) \quad (۲۸)$$

$$X_{\dot{u}} = 10.04(kg) \quad \text{در} \quad a = 1(m.s^{-2}) \quad (۲۹)$$

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده برای ضریب جرم افزوده بی بعد بیضیگون در دو جریان با شتاب‌های متفاوت، ۶/۳ درصد اختلاف دارند و می‌توان نتیجه گرفت که ضرائب جرم افزوده حاصله تابع ضعیفی از شتاب است.



شکل۱۱- نمودار تغییرات نیروی وارد بر بیضیگون در راستای طولی در دو حرکت با شتاب‌های متفاوت

جدول ۶ - مقایسه نتایج در دو شتاب ۰/۵ و ۱ متر بر مجذور ثانیه

ضریب جرم افزوده طولی	شتاب ۰/۵ متر برمجذور ثانیه	شتاب ۱ متر برمجذور ثانیه	درصد اختلاف
$\acute{X}_{\dot{u}}$	۰/۰۶۴	۰/۰۶۰	۶/۳

با توجه به اعتبار سنجی انجام گرفته در پژوهش حاضر، روش عددی ارائه شده جهت استخراج ضرائب جرم افزوده $X_{\dot{u}}$ و $Y_{\dot{v}}$ از دقت کافی برخوردار بوده، لذا از این روش جهت استخراج ضرائب جرم افزوده هندسه های پیچیده تر نیز میتوان بهره گرفت. از این رو از روش عددی پیشنهاد شده جهت استخراج ضرائب جرم افزوده ربات زیر سطحی مورد نظر استفاده خواهد شد.

۶- تحلیل عددی

۶-۱- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال بیانی از قوانین بقاء هستند و به معادلات ناویر- استوکس 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[۱۷](RANS) استفاده می‌شود. این معادلات در روابط (۳۰) و (۳۱) نشان داده شده است[۱۹].

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۳۰)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U_\iota U_J}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\upsilon\left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i}\right)\right\} - \frac{\partial \overline{\acute{U}_\iota \acute{U}_J}}{\partial x_j} + f_i \quad (۳۱)$$

در این فرم ازمعادلات عبارتی تحت عنوان تنش‌های رینولدز ($\overline{\acute{U}_\iota \acute{U}_J}$) به معادلات اضافه می‌شود که برای بسته شدن معادلات و حل آنها لازم است که آنها را مدل سازی نمود. در کار حاضر برای مدل‌سازی تنش های رینولدز از مدل آشفتگی SST[۱۸] بعلت توانایی بالای این مدل در پیش بینی جدایش جریان استفاده می شود[۲۰]. با این کار معادلات متوسط گیری شده ناویر- استوکس در شرایط دائم، غیرقابل تراکم و بدون در نظر گرفتن مسئله دمایی، به منظور حل کردن میدان جریان کارتزین $(U_i = u, v, w)$ و فشار (p) سیال توسط نرم افزار بکار گرفته شده است.

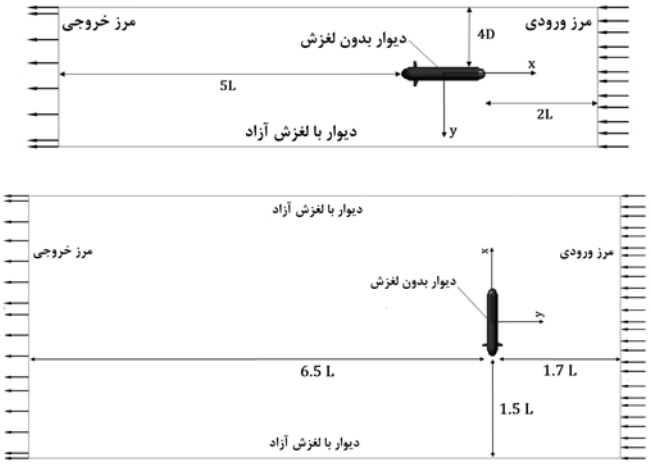
۶-۲- مشخصات بدنه، میدان جریان و شرایط مرزی

بطوریکه در شکل ۱۲ نشان داده شده است میدان های جریان برای شبیه سازی های عددی بصورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته می‌شود. در حالت محوری، شرط مرزی ورودی در فاصله ای معادل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

۲ برابر طول ربات در بالادست جریان قرار گرفته و دارای شدت اغتشاش[۱۹] ٪۵ است. شرط مرزی خروجی در فاصله ای در حدود ۵ برابر طول ربات در پایین دست جریان قرار گرفته و دارای شرط فشار متوسط استاتیکی است. دیواره های جانبی دارای شرط لغزش آزاد[۲۰] بوده و در فاصله ای در حدود ۴ برابر قطر ربات قرار گرفته اند. شرط عدم لغزش[۲۱] نیز به عنوان شرط مرزی بدنه ربات درنظر گرفته می شود.

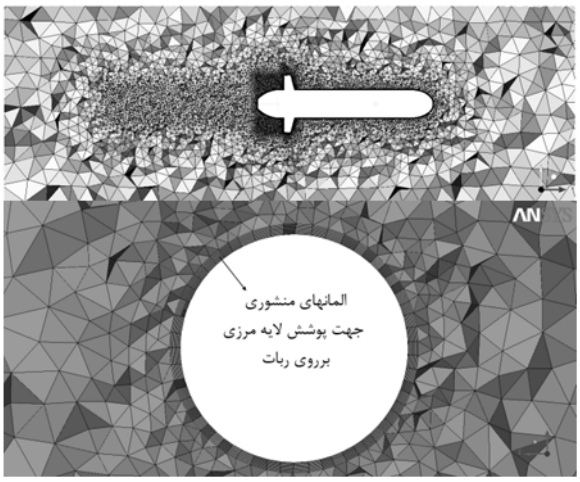


شکل۱۲- میدان حل و شرایط مرزی در شبیه سازی های آزمون های کشش محوری و جانبی

۶-۳- شبکه[۲۲] بندی میدان حل

جهت ایجاد شبکه برروی هندسه و میدان حل از کارآمدترین نرم افزار تولید شبکه یعنی ICEM CFD استفاده شده است. ساختار شبکه از نوع بی‌سازمان بوده و ضمن استفاده از شبکه ریز در نواحی که دارای گرادیان شدید است نظیر بالک ها و دماغه[۲۳]، برای حل دقیقتر لایه مرزی پیرامون وسیله، روی دیواره‌های وسیله مرز ایجاد شده است. مفهوم این کار افزایش چگالی شبکه در نزدیکی دیوارها است. در مناطق نزدیک دیوار، لایه مرزی سبب می‌شود که گرادیان‌های سرعت عمود بر صفحه زیاد باشد. بنابراین در نزدیک دیواره‌های ربات از المانهای منشوری[۲۴] استفاده می شود تا شبکه تولید شده دارای چگالی زیاد در جهت عمود بر دیوار باشد. در شکل ۱۳ بخشی از شبکه حل تولید شده نمایش داده شده است.

یکی از مسائل مهم در حل عددی یافتن مشخصات شبکه ای است که نتایج حاصله، مستقل از تعداد و اندازه المان‌ها باشد. به همین منظور شبکه‌های آماده شده در جدول ۷ برای تحلیل استقلال جواب از شبکه، مورد مطالعه قرار گرفت تا بتوان با توجه سرعت جریان، شبکه‌ای را انتخاب نمود که دقت کافی را در حل عددی تامین نماید و از لحاظ هزینه‌های محاسباتی نیز مقرون به صرفه باشد. از آنجائیکه کمیت‌های انتگرالی نظیر نیرو، بشدت به شبکه بندی مجاور بدنه و نوع تابع دیوار وابسته است، برای بررسی استقلال جواب از شبکه، پارامترهای مناسبی نیستند لذا برای گزینش شبکه بهینه از پارامتر ضریب فشار استفاده می‌شود که بصورت $C_P = \frac{P-P_{ref}}{0.5\rho\overline{V}^2}$ تعریف می‌شود. بدین منظور برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف، توزیع ضریب فشار برروی خط انتخاب شده برروی دماغه ربات در شبکه های مختلف محاسبه و مقایسه می‌شوند. در شکل ۱۴ موقعیت این خط نشان داده شده است. در شکل ۱۵ مقادیر ضریب فشار برحسب پارامتر بدون بعد z/D در طول خط مذکور برای چهار شبکه مختلف رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با ریز شدن شبکه، ضریب فشار برروی دماغه کاهش پیدا می‌کند و این روند در حالتی که شبکه ریز است تقریباً به حالت ثابت رسیده است و توزیع ضریب فشار در این حالت تقریباً با توزیع فشار شبکه بسیار ریز مطابقت دارد. بنابراین میتوان گفت که نتایج شبکه ریز با نتایج شبکه خیلی ریز انطباق داشته لذا جهت صرفه جویی در زمان و هزینه‌های محاسباتی در شبیه سازی از شبکه ریز استفاده می‌شود.



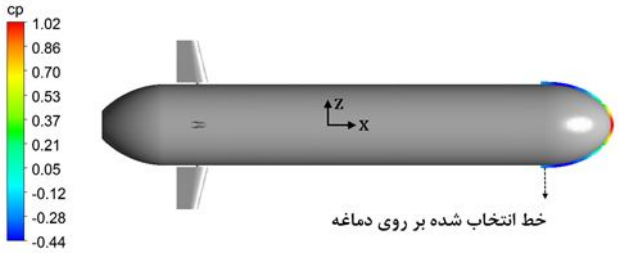
شکل۱۳- شبکه حل مورد استفاده و نمائی از المانهای منشوری جهت پوشش لایه مرزی برروی ربات

جدول۷ - سایز شبکه های حل مورد استفاده جهت مطالعه شبکه

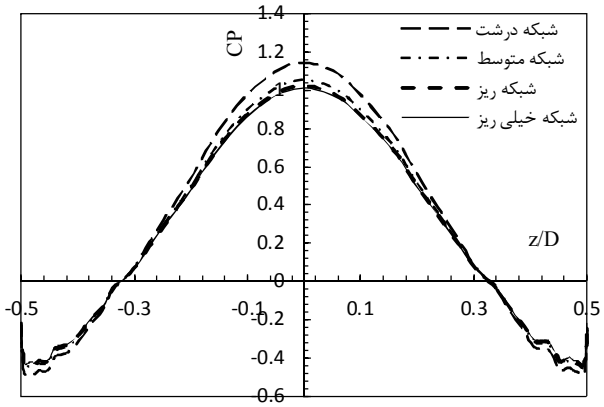
نوع شبکه	تعداد گره	تعداد المان
درشت	۴۱۹۷۹۱	۱۸۳۵۱۵۵
متوسط	۴۹۴۱۶۷	۲۲۸۱۳۵۱
ریز	۸۳۹۴۹۴	۳۹۶۲۳۴۵
خیلی ریز	۱۵۶۲۸۵۵	۶۲۲۰۱۴۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]



شکل ۱۴- موقعیت خط انتخاب شده برروی دماغه جهت ترسیم منحنی توزیع ضریب فشار

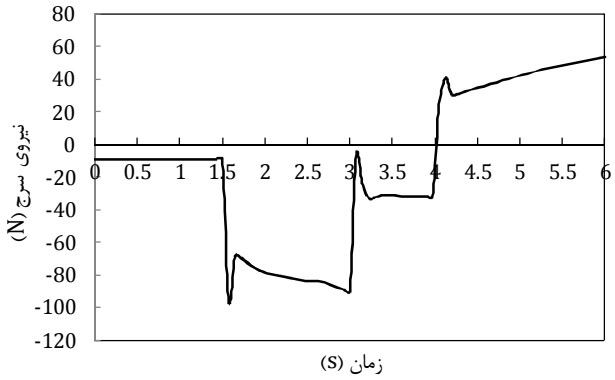


شکل۱۵- توزیع ضریب فشار برروی دماغه نسبت به پارامتر بدون بعد z/D برای چهار شبکه مختلف

۷- نتایج شبیه سازی عددی

۷-۱- حرکت شتابدار در راستای سرج

این حرکت جهت استخراج ضریب جرم افزوده در راستای سرج $(X_{\dot{u}})$ انجام می‌شود. رابطه چند ضابطه‌ای (۲۱) بعنوان سرعت جسم مورد استفاده قرار گرفته است. تحت چنین شرایطی منحنی تغییرات نیرو در راستای سرج مشابه شکل ۱۶ خواهد شد.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات نیروی سرج در حرکت شتابدار سرج

ضریب جرم افزوده $X_{\dot{u}}$ در سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه با استفاده از روش دوم قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به ضابطه تابع سرعت، در لحظه $t_0 = 5.5\ (s)$ ربات بار دیگر به سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه میرسد. با مقایسه نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر ربات در این لحظه و زمان‌های $t < 1.5\ (s)$ مشاهده می‌شود که با وجود یکسان بودن سرعت ربات (۱/۵ متر بر ثانیه)، در لحظه $t_0 = 5.5\ (s)$ نیروی وارد بر ربات شامل اثرات جرم افزوده بوده در حالیکه در زمان‌های $t < 1.5\ (s)$ نیروی وارد بر ربات صرفاً شامل اثرات استهلاکی است. علت این موضوع شتابدار بودن حرکت ربات در لحظه $t_0 = 5.5\ (s)$ است. بنابراین با استفاده از رابطه (۷) میتوان نوشت:

$$X_{\dot{u}} = \frac{|F_{t=5.5\ s} - F_{t<1.5\ s}|}{|\dot{u}|} - \rho\forall = 3.586\ (kg) \qquad (۳۲)$$

۷-۲- حرکت شتابدار در راستای سووی

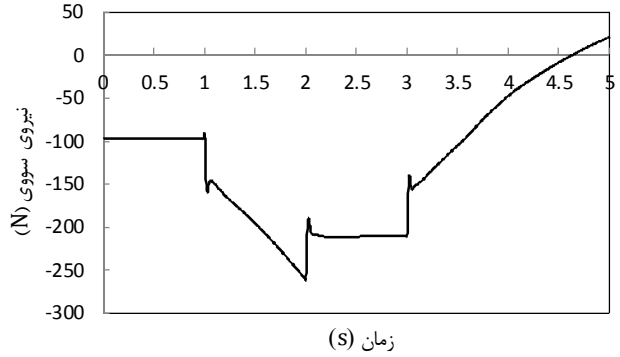
این حرکت جهت استخراج ضریب جرم افزوده در راستای سووی $(Y_{\dot{v}})$ انجام می‌شود. تابع چند ضابطه ای مورد استفاده بشکل زیر است:

$$V(t) = v(t) = \begin{cases} 1 & t \le 1 \\ at + 0.5 & 1 < t \le 2 \\ 1.5 & 2 < t \le 3 \\ -a(t-3) + 1.5 & t > 3, a = 0.5(m.s^{-2}) \end{cases} \qquad (۳۳)$$

تحت چنین شرایطی منحنی تغییرات نیروی وارد بر ربات در راستای سووی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. ضریب جرم افزوده $Y_{\dot{v}}$ در سرعت ۱ متر بر ثانیه با استفاده از روش دوم قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به رابطه (۳۳)، در لحظه $t_0 = 4\ (s)$ ربات بار دیگر به سرعت ۱ متر بر ثانیه رسیده است. بنابراین با استفاده از رابطه (۷) میتوان نوشت:

$$Y_{\dot{v}} = \frac{|F_{t=4} - F_{t<1}|}{|\dot{v}|} - \rho\forall = 50.15\ (kg) \qquad (۳۴)$$

نتایج حاصله برای ضرائب بی بعد جرم افزوده $\acute{X}_{\dot{u}}$ و $\acute{Y}_{\dot{v}}$ در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۱۷- نمودار تغییرات نیروی سووی در حرکت شتابدار سووی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

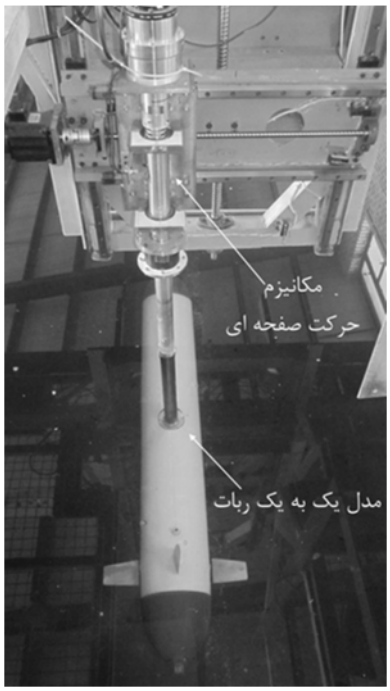
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

جدول ۸ - نتایج عددی حاصله برای ضرائب بی بعد AUV

ضریب هیدرودینامیکی	سرعت (متر برثانیه)	مقدار حاصل از روش عددی
$\acute{X}_{\dot{u}}$	۱/۵	۰/۰۶۴۶
$\acute{Y}_{\dot{v}}$	۱	۰/۹۰۳۴

۸- نتایج تجربی

همانطور که اشاره شد استخراج ضرائب جرم افزوده بصورت تجربی مستلزم استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی خاص نظیر مکانیزم حرکت صفحه‌ای جهت انجام مانورهای دینامیکی در حوضچه کشش میباشد. در شکل ۱۸ تصویری از مدل یک به یک ربات تحت بررسی نشان داده شده است که توسط مکانیزم حرکت صفحه ای پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا آماده انجام تست‌های دینامیکی جهت استخراج ضرائب جرم افزوده است. روند انجام تست های دینامیکی و فرآیند تحلیل نتایج آن بسیار مفصل بوده و در کار حاضر مجال آن نیست. لذا از نتایج تجربی بدست آمده جهت صحت سنجی نتایج روش عددی پیشنهادی در پژوهش حاضر استفاده خواهد شد. در جدول ۹، مقادیر بدست آمده از تست های دینامیکی سووی خالص(جهت استخراج ضریب $Y_{\dot{v}}$) و سرج نوسانی(جهت استخراج ضریب $X_{\dot{u}}$) با مقادیر عددی حاصل از روش پیشنهادی مقایسه شده اند[۲۱].



شکل ۱۸- تصویری از مکانیزم حرکت صفحه ای و مدل یک به یک ربات جهت انجام تست های دینامیکی

جدول ۹ - مقایسه نتایج عددی و تجربی حاصله برای ضرائب بی بعد AUV

ضریب هیدرودینامیکی	نتایج عددی	نتایج تجربی	درصد اختلاف
$\acute{X}_{\dot{u}}$	۰/۰۶۴۶	۰/۰۶۸۲	٪۵/۳
$\acute{Y}_{\dot{v}}$	۰/۹۰۳۴	۰/۹۵۰۳	٪۵

۹- نتیجه گیری

با توجه به نتایج جدول ۸، جرم افزوده ربات زیرآبی در راستای جانبی($Y_{\dot{v}}$) در حدود ۱۴ برابر جرم افزوده ربات در راستای طولی($X_{\dot{u}}$) است. چنانچه بخش استوانه ای ربات مورد نظر توسط یک بیضیگون تقریب زده شود، روابط لامب مقدار ۰/۸۵۷۴را برای ضریب $X_{\dot{u}}$ و مقدار ۰/۰۶ را برای $Y_{\dot{v}}$ ارائه خواهد کرد که در مقایسه با نتایج جدول ۸ مقادیر کمتری را نشان میدهد که علت آن حضور بالک‌های افقی و عمودی است که در تحلیل عددی اثرشان لحاظ شده ولی در تحلیل لامب به علت عدم توانایی این روش در تحلیل هندسه‌های پیچیده اثرشان نادیده گرفته شده است.

از طرفی باتوجه به توضیحات ارائه شده، مقایسه نتایج حاصل از روش عددی پیشنهاد شده با نتایج تجربی مربوط به تست های دینامیکی انجام شده بر روی ربات حداکثر اختلاف ۵/۳ درصدی را نشان میدهد. بنابراین روش عددی پیشنهاد شده از دقت قابل قبولی جهت استخراج ضرائب جرم افزوده ربات زیرآبی برخوردار است و میتوان آنرا جایگزین روش های پرهزینه آزمایشگاهی کرد. بعلاوه تحلیل نتایج تست های تجربی نظیر سرج نوسانی، سووی خالص و یاو خالص به منظور استخراج ضرائب جرم افزوده بسیار پیچیده بوده و ضرائب استخراج شده تابع پارامترهای مختلفی نظیر فرکانس نوسانات جابجائی، دامنه نوسانات طولی و عرضی است. از سوی دیگر شبیه سازی این آزمون های تجربی نیز بسیار مشکل و زمان بر است. حال آنکه روش عددی ارائه شده این محدودیت ها را شامل نمی شود و از طرفی با توجه به جدول ۶، نتایج آن مستقل از شتاب بوده و برخلاف شبیه سازی تست های دینامیکی، پیچیده و زمان بر نیست. بنابراین میتوان از آن به عنوان یک روش قابل اطمینان و کم هزینه جهت استخراج ضرائب جرم افزوده هر هندسه ای استفاده کرد.

کلید واژگان

1. Added mass
2. Autonomous Underwater Vehicle
3. Earth-Fixed frame
4. Body-Fixed frame
5. Coriolis
6. Towing tank
7. Rotating arm
8. Planar motion Mechanism
9. Perturbed Surge Motion
10. Pure Sway

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]

11. Pure Yaw
12. Panel Method
13. Boundary Element Method
14. Strip Theory
15. History effects
16. Lamb
17. Reynolds Averaged Navier Stokes
18. Shear Stress Transport
19. Turbulence Intensity
20. Free Slip
21. No Slip
22. Mesh
23. Nose
24. Prism

منابع

1- Prestero,T., (2001), *Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle,* Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, University of California.

2- Gerfler,M., (1967), *The DTMB Planar-Motion-Mrchan ISM System,* Naval Ship Research And Development Center.

3- Aage,C. and Smit,L.W., (1994), *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, p. 425-430.

4- Rhee,K., Yoon,H.K., Sung,T.J., Kim,S.H. and Kang,J.N., (2000), *An Experimental Study on Hydrodynamic Coefficients of Submerged Body Using Planar Motion Mechanism and Coning Motion Device,* International Workshop on Ship Manoeuvrability, p. 1-20.

5- Phillips,A., Furlong,M. and Turnock,S.R., (2007), *Virtual planar motion mechanism tests of the autonomous underwater vehicle autosub,* In, STG-Conference Lectureday CFD in Ship Design, Hamburg, Germany, p.8.

6- Lee,S.K., Joung,T.H., Cheon,S.J., Jang,T.S. and Lee,J.H., (2011), *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, p. 174-180.

7- Lin,Z. and Liao,S., (2011), *Calculation of added mass coefficients of 3D complicated underwater bodies by FMBEM,* Journal of Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, Vol. 16, p. 187-194.

8- Sahin,I., Crane,J.W. and Watson,K.P., (1997), *Application of a panel method to hydrodynamics of underwater vehicles,* Ocean Engineering, Vol. 24,No.6, p. 501-512.

9- Javanmard,E.,(2013), *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. (In persian)

10- Sakamoto,N., (2009), URANS , *DES Simulations of Static and Dynamic Maneuvering for Surface Combatant,* Ph.D Thesis, University of Iowa, USA.

11- Tang,S., Ura,T., Nakatani,T., Thornton,B. and Jiang,T., (2009), *Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous Underwater Vehicle TUNA-SAND,* Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, p. 373-386.

12- Zhang,H., Xu,Y.R. and Cai,H.P., (2010), *Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficient,* Journal of Marine Science and Technology, Vol. 9, p. 149-155.

13- Ferreira,B., Pinto,M., Matos,A. and Cruz,N., (2009), *Hydrodynamic modeling and motion limits of auv mares,* 35th Annual Conference of IEEE, p.2241-2246.

14- Lamb,S.H., (1945), *Hydrodynamics, Sixth Edition ed.,* p. 152-155: Dover Publications.

15- Korotkin,A.L., (2007), *Added Mass of Ship Structures*, Krylov Shipbuilding Research Institute, Russia.

16- Thor,I.F., (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles,* John Wiley and Sons ,p. 37-42.

17- Frederick,H.I., (1961), *The complete expressions for Added Mass of a rigid body moving in an ideal fluid,* Department of the Navy David Taylor Model Basin,Hydromechanics Laboratory, Report 1528.

18- Rademacher,A.T., *Very large luxury airship (VLLA),* San Jose State University.

19- White,F.M., (1985), *Fluid Mechanics,* Fourth ed., University of Rhode Island.

20-ANSYS, (2011), *Ansys-cfx solver modeling guide,* USA, Ansys Inc.

21- Javanmard,E.,(2015), *Determination of Hydrodynamic Coefficients of an AUV by planar motion mechanism tests,* Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, Subsea Research snd Development Center, Isfahan University of Technology. (In persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.3.9]