

شبیه‌سازی عددی ضرایب میرایی و جرم‌افزوده یک شناور زیرسطحی در آب عمیق

آرش شادلاقانی^۱، شهریار منصورزاده^{۲*} و محمدعلی بدری^۲

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیردریا، اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۴/۲۵)

چکیده - تعیین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر شناور، اولین مرحله در طراحی شناورهای زیرسطحی است. نیروهای هیدرودینامیکی برحسب ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌گردند. در این مقاله روشی جهت تعیین ضرایب هیدرودینامیک غیر خطی میرایی شرح داده شده‌است. در این روش از محاسبه تغییرات ضرایب درگ و لیفت با زاویه حمله و انحراف جهت تعیین ضرایب میرایی استفاده شده‌است. روش ذکر شده، برای تعیین ضرایب میرایی زیردریایی سابوف نیز به کار رفته‌است. در این مقاله همچنین از روشی جدید جهت تعیین ضرایب خطی جرم‌افزوده در راستاهای طولی و عرضی زیردریایی استفاده شده‌است. جهت اثبات کارایی این روش، نتایج به‌دست آمده با نتایج مشخص موجود برای ضریب جرم‌افزوده یک کره مقایسه شده‌است. نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج موجود تجربی برای زیردریایی همخوانی خوبی دارد. واژگان کلیدی: شبیه‌سازی عددی، ضرایب هیدرودینامیک، ضریب میرایی، جرم‌افزوده، نرم افزار انسیس-سی اف ایکس.

Numerical Simulation of Damping and Added Mass Coefficients for a Prototype Submersible in Deep Water

A. Shadlaghani¹, Sh. Mansourzadeh^{2*} and M.A. Badri²

1. Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

2. Research Institute for Subsea Science & Technology, Isfahan

Abstract: Estimation of hydrodynamic forces is the first step in the design of submersibles. The hydrodynamic forces are expressed in terms of hydrodynamic coefficients. In this paper, to calculate the damping coefficients a method based on calculation of variation of the Drag and Lift coefficients with angles of attack and drift is described. The method is used to calculate the damping hydrodynamics of the Suboff submarine. A new method is also described in order to calculate the linear added mass coefficients of the submarine in axial and lateral directions. The method is validated by comparing its results with the known results for the added mass coefficient of a sphere. The numerical results agree well with the available experimental results of the submarine.

Keywords: Computational fluid dynamics, hydrodynamics coefficients, damping coefficients, added mass coefficient, ANSYS-CFX.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shahriar@cc.iut.ac.ir

فهرست علائم

ضرایب جرم افزوده خطی در جهت محورها (kg)	X_u, Y_v, Z_w	ضریب درگ	C_d
ضرایب میرایی خطی در جهت x ناشی از حرکت سایر جهات (kg s^{-1})	X_{uu}, X_{vv}, X_{ww}	ضریب لیفت	C_L
ضرایب میرایی غیرخطی در جهت x (kg m^{-1})	$X_{uuu}, X_{uuv}, X_{uww}$	فشار ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$)	p
علائم یونانی		تنش رینولدز (kg m s^{-2})	R_{ij}
چگالی (kg m^{-3})	ρ	سرعت (m s^{-1})	u
لزجت دینامیکی ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	μ	حاصل ضرب متوسط نوسان سرعت ها (تنش رینولدز)	$\bar{u}_i' \bar{u}_j'$
		زوایای اوایلر (rad)	θ, ϕ, ψ
		نیروهای میرایی در جهت محورها مختصات متصل به بدنه (N)	X, Y, Z

۱- مقدمه

زیردریایی پرداخته است. ژینکسین [۲] نیز اثر نیروی درگ وارد بر یک شناور زیرسطحی هوشمند را مورد بررسی قرار داده است. از دیگر کارهای عددی می توان به شبیه سازی های انجام شده توسط تانگ [۳] و ژانگ [۴] اشاره کرد. ایوب و همکاران [۵]، به کمک نرم افزار فلوئنت جریان اطراف یک شناور زیرسطحی را با در نظر گرفتن سه طول متفاوت برای این شناور در حرکت دائم تحلیل کردند و تأثیر این تغییرات را بر روی نیروی درگ، مورد بررسی قرار دادند. چاز [۶] نیز در پایان نامه خود، حرکت یکنواخت یک زیردریایی را به دو روش آزمایشگاهی و عددی انجام داده است. وی همچنین تأثیر وجود پروانه بر ضرایب درگ را مورد بررسی قرار داده است. از کارهای انجام شده در تعیین ضرایب جرم افزوده به روش عددی، شبیه سازی آزمایشهای حرکات صفحه ای برای انواع شناورهای زیرسطحی است که توسط فیلیپس [۷] و لی [۸] انجام شده است.

۲- معادلات حاکم

معادلات ناویر-استوکس اغتشاشی حاکم بر جریان سیال اطراف یک شناور زیرسطحی، به صورت معادلات متوسط گیری شده رینولدز^۱ بیان می شوند. در این معادلات، متغیرهای جریان به دو

امروزه شناورهای زیرسطحی در صنایع مختلف زیردریا، موارد استفاده وسیعی دارند. قابلیت کنترل و مانورپذیری شناورها که به شدت تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی وارده قرار دارند، در مرحله طراحی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. روش های مختلفی برای محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی وجود دارد که یکی از مهمترین آنها، روش های عددی است. سرعت بالا، دقت مناسب و همچنین ارزان بودن روش های عددی در مقایسه با روش های آزمایشگاهی و تحلیلی باعث استفاده روزافزون این روش ها در محاسبات هیدرودینامیکی شده است. همچنین در روش های عددی، حساسیت سنجی نیروهای وارد بر شناور با تغییر کمیت های هیدرودینامیکی و هندسی به آسانی قابل بررسی است. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر جسم توسط مدل ریاضی در قالب ضرایب هیدرودینامیکی بیان می شود. این ضرایب بدون در نظر گرفتن اثرات موج و گردابه شامل ضرایب میرایی و جرم افزوده بوده و به شکل هندسی جسم، نوع و جهت حرکت آن و سایر فرضیات مسأله وابسته است. کارهای زیادی در زمینه محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی به روش عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. بیکر [۱] با استفاده از نرم افزارهای عددی به تخمین نیروی درگ وارد بر بدنه یک



شکل ۱- شماتیک زیردریایی سابوف

جدول ۱- ابعاد هندسی زیردریایی مورد بررسی در آزمایشگاه دیوید- تیلور [۹]

طول کل	۴/۳۵۶ متر
قطر ماکزیمم	۵۰۸/۰ متر
حجم کل	۷۱۸/۰ مترمکعب
مساحت خیس شده	۶/۳۳ مترمربع

مقادیر معلوم جریان مانند سرعت ارتباط برقرار کرده و باعث کاهش تعداد مجهولات معادلات ناویر-استوکس در جریان اغتشاشی می‌شود. متداولترین مدل‌های اغتشاشی، مدل‌های K-ε و SST^۲ هستند. مدل K-ε در گستره وسیعی از اعداد رینولدز در جریان‌های خارجی کاربرد دارد. مشکل اصلی این مدل در پیش‌بینی محل جدایش جریان است. مدل SST، مدل اصلاح شده K-ω (دارای دقت بالا در جریان‌های خزشی) است به‌طوری که از ترکیب این مدل در نزدیک دیواره و مدل K-ε در نواحی دور از دیواره، به‌دست می‌آید.

۱-۲- تعریف هندسه

شناور زیرسطحی مورد بررسی، زیردریایی سابوف^۳ بوده که در مؤسسه دیوید-تیلور طراحی شده‌است. شماتیک این زیردریایی در شکل (۱) نشان داده شده‌است. کاربرد فراوان و وجود اطلاعات آزمایشگاهی و هیدرودینامیکی این زیردریایی دلیل استفاده از این مدل در مقاله حاضر است [۹]. همانگونه که مشاهده می‌شود هندسه جسم دارای چهار سطح کنترلی در عقب برای کنترل حرکات سمتی و عمقی و یک برجک در قسمت جلو است. در جدول ۱ ابعاد هندسی آن نشان داده شده است.

۳- ضرایب هیدرودینامیکی

نیروی هیدرودینامیکی کل وارد بر جسم را می‌توان توسط بسط تیلور نیرو برحسب متغیرهای تأثیرگذار بر نیرو نظیر سرعت،

مؤلفه متوسط و نوسانی تجزیه شده و سپس در معادلات جایگزین می‌شوند. این معادلات با فرض تراکم‌ناپذیری و همدمای بودن سیال، به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

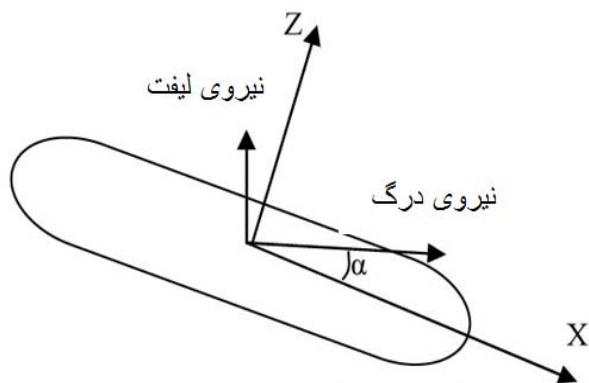
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

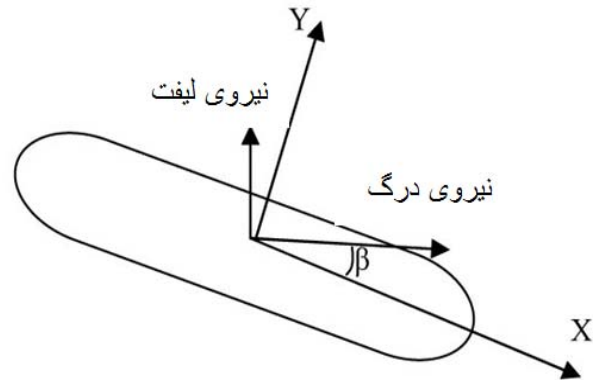
آخرین جمله سمت راست معادله ممنتوم (معادله (۲)) بیانگر ماتریس تنش‌های رینولدز است:

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \begin{bmatrix} -\rho \bar{u}_1'^2 & -\rho \bar{u}_1' \bar{u}_2' & -\rho \bar{u}_1' \bar{u}_3' \\ -\rho \bar{u}_2' \bar{u}_1' & -\rho \bar{u}_2'^2 & -\rho \bar{u}_2' \bar{u}_3' \\ -\rho \bar{u}_3' \bar{u}_1' & -\rho \bar{u}_3' \bar{u}_2' & -\rho \bar{u}_3'^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

مقادیر مجهول تنش‌های رینولدز توسط روابط جبری و تجربی که به مدل‌های اغتشاشی موسوم‌اند به متغیرهای معلوم جریان مرتبط می‌شوند. مدل‌های اغتشاشی در واقع بین مقادیر مجهول تنش‌های رینولدز که در معادلات RANS بوجود آمده‌اند و



(ب) کشش همراه با زاویه حمله



(الف) کشش همراه با زاویه انحراف

شکل ۲- نحوه حرکت جسم در حرکات همراه با زاویه حمله و انحراف

متصل به بدنه تعریف شده‌اند، برحسب متغیرهای سرعت و شتاب توسط رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$X = X_0 + X_u u + X_v v + X_w w + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{v}} \dot{v} + X_{\dot{w}} \dot{w} + X_{uu} u^2 + X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2 + X_{uv} uv + X_{uw} uw + X_{vw} vw$$

$$Y = Y_0 + Y_u u + Y_v v + Y_w w + Y_{\dot{u}} \dot{u} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{w}} \dot{w} + Y_{uu} u^2 + Y_{vv} v^2 + Y_{ww} w^2 + Y_{uv} uv + Y_{uw} uw + Y_{vw} vw$$

$$Z = Z_0 + Z_u u + Z_v v + Z_w w + Z_{\dot{u}} \dot{u} + Z_{\dot{v}} \dot{v} + Z_{\dot{w}} \dot{w} + Z_{uu} u^2 + Z_{vv} v^2 + Z_{ww} w^2 + Z_{uv} uv + Z_{uw} uw + Z_{vw} vw \quad (5)$$

نیروهای X_0 ، Y_0 و Z_0 توسط شرایط اولیه مشخص می‌شود. به‌عنوان نمونه در رابطه (۵) ضرایب هیدرودینامیک به‌صورت زیر قابل تعریف هستند:

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u}, X_{uu} = \frac{\partial^2 X}{\partial u^2}, X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \quad (6)$$

۳-۱- ضرایب میرایی

یکی از راههای استخراج ضرایب میرایی غیرخطی، شبیه‌سازی آزمون‌های کشش سرعت ثابت به همراه زاویه انحراف و حمله است. همانگونه که می‌دانیم نیروی درگ و لیفت برای هر جسم دلخواهی به صورت $F_D = 0.5 \rho V^2 A_f$ و $L = 0.5 \rho C_L V^2 A_f$ بیان می‌شود که V سرعت و A_f مساحت پیشانی جسم است.

شتاب، زاویه سطوح کنترلی، شناوری و جاذبه در مختصات متصل به بدنه به‌دست آورد [۱۰]:

$$F_{ext} = f(u, v, w, p, q, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}, \theta, \phi, \psi, \delta) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، r, q, p, w, v, u به ترتیب مؤلفه‌های سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای در راستاهای x, y و z است. $\dot{r}, \dot{q}, \dot{p}, \dot{w}, \dot{v}, \dot{u}$ نیز به ترتیب مؤلفه‌های شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای مرتبط با مؤلفه‌های سرعت است. لازم به ذکر است که به حرکت در راستای x, y و z به ترتیب حرکت سرج^۴، سووی^۵ و هیو^۶ گفته می‌شود. θ, ϕ, ψ نیز زاویه بین دستگاه مختصات متصل به بدنه و دستگاه مرجع (زمین) بوده و δ نیز زاویه سطوح کنترلی است. بدون در نظر گرفتن اثر زاویه سطوح کنترلی، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر جسم تنها به متغیرهای سرعت و شتاب وابسته است. به این ترتیب ضرایب میرایی با بسط سری تیلور نیرو برحسب سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای و ضرایب جرم و ممان‌افزوده، با بسط نیرو برحسب شتاب خطی و شتاب زاویه‌ای با در نظر گرفتن شش درجه آزادی برای حرکت به‌دست می‌آید. مشتقات مرتبه اول سری تیلور ماتریس میرایی، ضرایب خطی و مشتقات مرتبه دوم این ماتریس، ضرایب غیرخطی را تشکیل می‌دهند.

با در نظر گرفتن حرکت در صفحات افقی و عمودی (بدون حرکات چرخشی) نیروهای Z, Y, X که در دستگاه مختصات

زمانی که همانند شکل (۲) جسم با زاویه حمله α نسبت به صفحه افقی و یا به طور مشابه با زاویه انحراف β نسبت به صفحه عمودی حرکت کند، تغییرات ضریب درگ با زاویه α یا β را می توان به صورت یک رابطه سهموی تقریب زد [۱۳]:

نیروی درگ و لیفت در صفحه x-y به ترتیب به مؤلفه های نیروی D_x, D_y, L_x, L_y تقسیم می شود. در این حالت توان دوم سرعت در صفحه x-y برابر با $u^2 + v^2$ است. رابطه (۹) مؤلفه های نیروی درگ و لیفت را در این حالت نشان می دهد:

$$\begin{aligned}(D_x)_\beta &= \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + v^2) \cos \beta \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + v^2) (1 - \frac{\beta^2}{2}) \\ D_y &= \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + v^2) \sin \beta \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + v^2) \beta \\ (L_x)_\beta &= -\frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f V^2 \beta \cos \beta \cong \\ &\quad -\frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f (u^2 + w^2) \beta (1 - \frac{\beta^2}{2}) \\ L_y &= \frac{1}{2} \rho C_{L\beta} A_f V^2 \beta \cos \beta \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho C_{L\beta} A_f (u^2 + v^2) \beta (1 - \frac{\beta^2}{2})\end{aligned}\quad (9)$$

در روابط (۸) و (۹)، A_f مساحت پیشانی زیردریایی و برابر $\frac{\pi}{4}$ مترمربع است. برآیند نیروهای وارده در راستاهای x، y و z به صورت رابطه (۱۰) بیان می شوند:

$$\begin{aligned}X &= (D_x)_\alpha + (D_x)_\beta + (L_x)_\alpha + (L_x)_\beta \\ Y &= D_y + L_y \\ Z &= D_z + L_z\end{aligned}\quad (10)$$

با جایگزینی روابط (۸) و (۹) در رابطه (۱۰) و استفاده از معادله ضریب درگ در رابطه (۷) و نیز بیان زوایای α و β برحسب سرعت های خطی و با صرف نظر کردن از عبارات بالاتر از مرتبه دوم، ضرایب غیرخطی مرتبه دو در راستاهای x، y و z را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned}X_{uu} &= \frac{1}{2} \rho A_f (c_\beta + c_\alpha) & Y_{vv} &= \frac{1}{2} \rho A_f (b_\beta) \\ X_{uw} &= \frac{1}{2} \rho A_f (b_\alpha) & Y_{uv} &= \frac{1}{2} \rho A_f (c_\beta + C_{L\beta}) \\ X_{uv} &= \frac{1}{2} \rho A_f (b_\beta) & Z_{ww} &= \frac{1}{2} \rho A_f (b_\alpha) \\ X_{ww} &= \frac{1}{2} \rho A_f (a_\alpha + \frac{c_\alpha}{2} - C_{L\alpha}) & Z_{uw} &= \frac{1}{2} \rho A_f (c_\alpha + C_{L\alpha}) \\ X_{vv} &= \frac{1}{2} \rho A_f (a_\beta + \frac{c_\beta}{2} - C_{L\beta})\end{aligned}\quad (11)$$

$$(C_D)_\alpha = a_\alpha \alpha^2 + b_\alpha \alpha + c_\alpha \quad (7)$$

$$(C_D)_\beta = a_\beta \beta^2 + b_\beta \beta + c_\beta$$

که در آن a، b و c ضرایبی ثابت بوده و مقادیر آنها برای دو حالت زاویه حمله و انحراف با هم متفاوت است. همچنین شیب نمودار ضریب لیفت برحسب زاویه حمله و انحراف به صورت $C_{L\alpha} = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ و $C_{L\beta} = \frac{\partial C_L}{\partial \beta}$ نشان داده می شود.

با فرض کوچک بودن زوایا $\tan \alpha \approx \alpha = \frac{w}{u}$ و $\tan \beta \approx \beta = \frac{v}{u}$ است. در نتیجه نیروی درگ و لیفت در صفحه x-z متصل به جسم به دو مؤلفه نیروی x و z تقسیم می شود که در رابطه (۸) این موضوع نشان داده شده است:

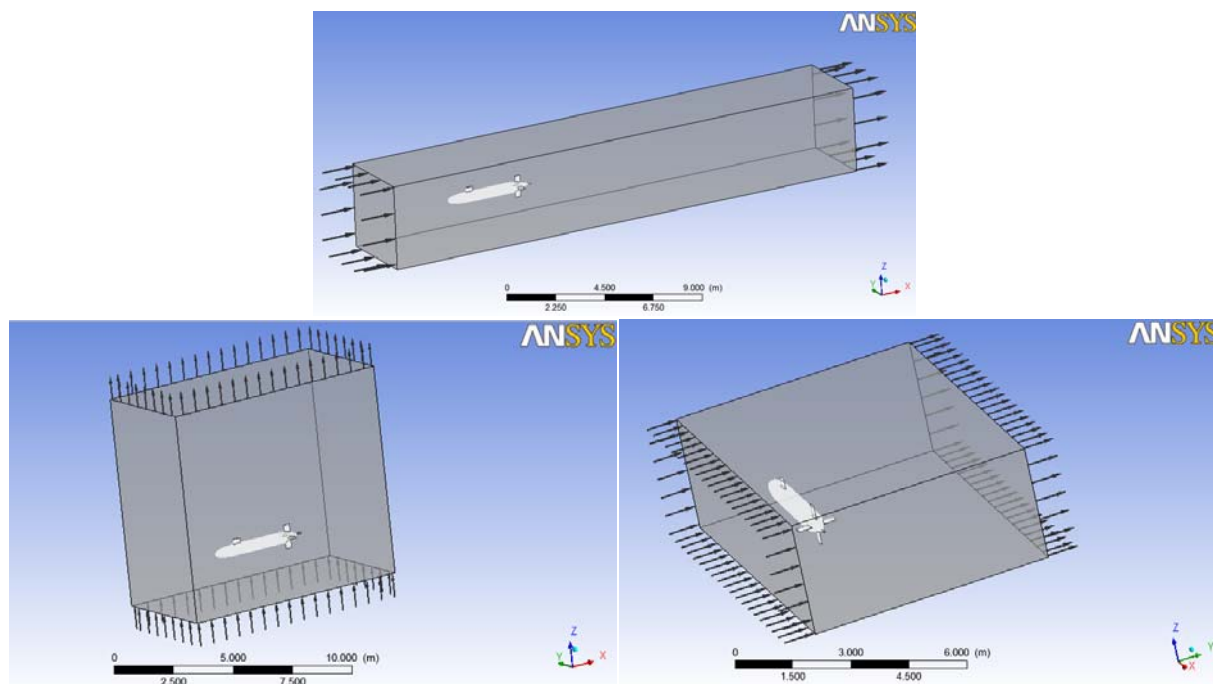
$$\begin{aligned}(D_x)_\alpha &= \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + w^2) \cos \alpha \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + w^2) (1 - \frac{\alpha^2}{2}) \\ D_z &= \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + w^2) \sin \alpha \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho A_f C_D (u^2 + w^2) \alpha\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}(L_x)_\alpha &= -\frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f V^2 \alpha \sin \alpha \cong \\ &\quad -\frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f (u^2 + w^2) \alpha^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}L_z &= \frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f V^2 \alpha \cos \alpha \cong \\ &\quad \frac{1}{2} \rho C_{L\alpha} A_f (u^2 + w^2) \alpha (1 - \frac{\alpha^2}{2})\end{aligned}$$

که در آن D_x, D_z, L_x, L_z مؤلفه های نیروی درگ و لیفت در راستای x و z است که در نتیجه حرکت شناور با زاویه حمله α حاصل شده است. در این حالت توان دوم سرعت در صفحه x-z برابر با $u^2 + w^2$ است.

به طور مشابه، برای حرکت همراه با زاویه انحراف β ،



شکل ۳- دامنه حل در نرم افزار ANSYS-CFX

۲-۳- ضرایب جرم افزوده

وقتی جسمی در سیالی با چگالی قابل ملاحظه دارای حرکت شتابدار باشد، به واسطه شتاب جسم، سیال اطراف آن به حرکت درمی آید. بنابراین نیرویی اضافه جهت شتاب دادن به سیال اطراف جسم لازم است. معمولاً برای مشخص کردن این نیروی اضافی فرض می شود جرم جسم مقداری بیش از جرم اصلی آن است که به این جرم، جرم افزوده گفته می شود. روش عددی استفاده شده در این مقاله جهت محاسبه ضرایب جرم افزوده، به این صورت است که اگر فرض شود جسم به نیروی سنجی متصل شده و در راستای افق در سیال با سرعت ثابت کشیده شود در این صورت نیروئی که نیروسنج اندازه می گیرد برابر با نیروی درگ وارد بر جسم بوده که با F_1 نشان داده می شود. حال اگر به صورت ناگهانی به جسم یک شتاب یکنواخت اعمال شود، در لحظه اعمال شتاب علاوه بر نیروی درگ، نیروسنج نیروی ناشی از شتاب سیال را نیز نشان می دهد که بخشی از این نیرو ناشی از شتاب خود جسم و بخش دیگر ناشی از شتاب سیال اطراف آن که مرتبط با جرم افزوده است. اگر

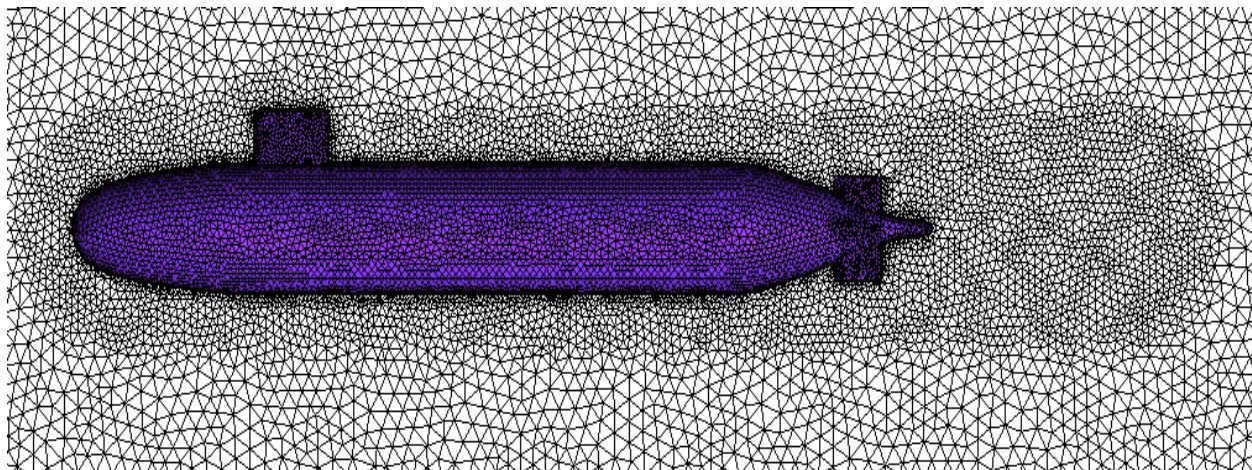
نیروی نشان داده شده توسط نیروسنج، دقیقاً در لحظه اعمال شتاب در این حالت با F_2 مشخص شود، اختلاف عدد نشان داده شده توسط نیروسنج در این حالت با نیروی نشان داده شده در حالت سرعت ثابت، ناشی از شتاب جسم است، زیرا نیروی درگ در لحظه اعمال شتاب در دو حالت یکسان است. بنابراین:

$$F_2 - F_1 = (m + m_a)a \quad (12)$$

که در آن m جرم سیالی است که جسم اشغال کرده و m_a جرم افزوده آن است. با داشتن اختلاف این دو نیرو و نیز شتاب و جرم جسم می توان از رابطه فوق جرم افزوده را در راستای حرکت محاسبه نمود. به این ترتیب با شبیه سازی این حرکات در جهت محورهای مختصات ضرایب افزوده مربوط به هر جهت محاسبه خواهد شد.

۴- شبیه سازی عددی

شبیه سازی عددی بر پایه روش حجم محدود و در نرم افزار ANSYS-CFX صورت گرفته است. شبیه سازی حرکات به



شکل ۴- شبکه بندی بی‌سازمان دامنه حل

پانزده برابر قطر، ورودی سه برابر قطر و دیواره‌های جانبی دو برابر طول جسم در نظر گرفته شده است.

صورت حرکت سیال بر روی جسم با کمک شرایط مرزی انجام شده است.

۴-۲- شبکه‌بندی

تولید شبکه در ماژول ICEM که در داخل نرم‌افزار ANSYS CFX قرار دارد، صورت گرفته و قابلیت تولید شبکه‌های باسازمان، بی‌سازمان، منشوری^۷ و یا ترکیبی از آنها را برای هندسه‌های سه‌بعدی دارا است. هنگام انتخاب نوع شبکه ملاحظات زیر در نظر گرفته می‌شود: ۱- سادگی تولید شبکه ۲- هزینه محاسباتی.

در کار حاضر از شبکه‌های بی‌سازمان برای کاهش زمان تولید و حل شبکه استفاده شده است. ویژگی اصلی این نوع شبکه‌بندی این است که برای هندسه‌های پیچیده به راحتی قابل پیاده سازی است. مزیت دیگر شبکه‌های بی‌سازمان، قابلیت انجام سریع عمل تطبیق و بهینه‌سازی شبکه است. نکته مهمی که در شبکه‌بندی باید رعایت شود، تعیین ضخامت لایه مرزی است. ضخامت کل لایه مرزی، δ ، به صورت تابعی از طول شناور، L ، و عدد بی‌بعد رینولدز، Re ، از رابطه (۱۳) به دست می‌آید [۱۱]:

$$\delta = 0.035L(Re)^{-1/7} \quad (13)$$

معیار مهمی که در تولید شبکه داخل لایه مرزی باید به آن توجه

۴-۱- شرایط مرزی

مطابق با شکل (۳)، دامنه حل به شکل یک مکعب مستطیل در نظر گرفته شده است. ابعاد آن به صورتی انتخاب شده است که شرایط آب عمیق برای شبیه‌سازی برقرار باشد. ابعاد تعیین شده به نوع حرکت مدل، انحراف خطوط جریان به واسطه حضور جسم، گردابه‌های تشکیل شده در پشت جسم و غیره بستگی دارد. با توجه به مطالب بالا، شرایط مرزی و فاصله مدل زیردریایی از قسمت‌های مختلف دامنه حل به صورت زیر انتخاب شده است:

(۱) ورودی سرعت ثابت و شتابدار به فاصله یک برابر طول مدل

(۲) خروجی با فشار استاتیکی صفر به فاصله چهار برابر طول مدل

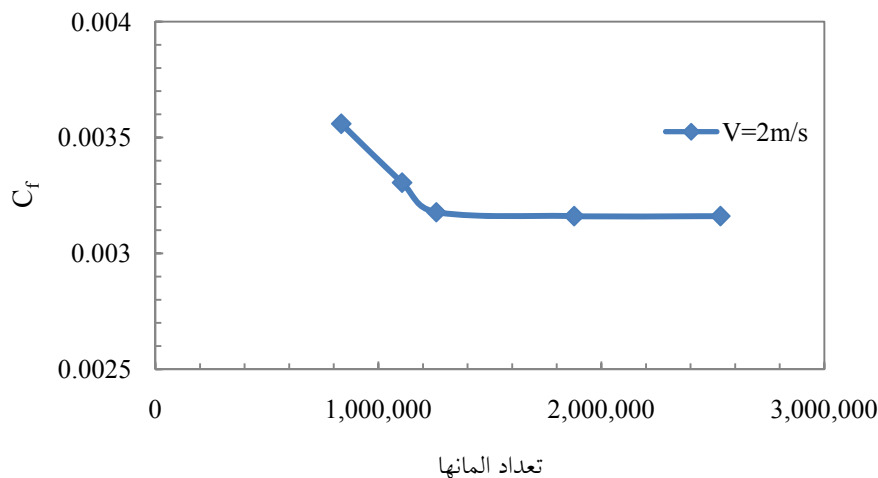
(۳) بدنه جسم با شرط دیوار از نوع بدون لغزش

(۴) دیواره‌های جانبی دامنه حل با شرط لغزش آزاد به فاصله هشت برابر قطر مدل برای حرکت یکنواخت و شتابدار در جهت X .

برای حرکات شتابدار در جهت Y و Z خروجی به فاصله

جدول ۲- تعداد و نوع شبکه‌بندی

درشت	متوسط	ریز	خیلی ریز	بسیار ریز	
۲۰۱۹۵۱	۲۶۸۰۴۰	۳۰۸۸۱۷	۴۵۰۶۸۴	۵۶۴۳۹۷	تعداد گره
۷۰۲۳۵۰	۹۳۵۱۵۴	۱۰۵۳۹۴۵	۱۵۹۲۳۰۱	۱۹۸۵۶۶۲	شبکه مثلثی
۱۳۱۵۱۴	۱۷۱۴۶۲	۲۰۵۹۳۲	۲۸۵۹۲۴	۳۶۳۵۴۰	شبکه منشوری
۸۳۳۸۶۴	۱۱۰۶۶۱۶	۱۲۵۹۸۷۷	۱۸۷۸۲۲۵	۲۵۳۴۱۷۱	تعداد کل



شکل ۵- تغییرات ضریب درگ اصطکاکی برحسب تعداد المانهای شبکه

جدول ۲ مشخصات شبکه‌بندی به‌کار گرفته شده برای بررسی استقلال نتایج از شبکه را بیان می‌کند. روش‌های مختلفی برای اطمینان از همگرایی نتایج وجود دارد که می‌توان به بررسی پارامتر ضریب فشار یا ضریب درگ اشاره کرد. در کار حاضر، ضریب فشار برای بررسی استقلال نتایج کمیت مناسبی نیست، زیرا اندازه شبکه متأثر از پارامتر لزجت است. بنابراین از کمیت ضریب درگ برای انتخاب نهایی شبکه بهینه استفاده می‌شود. ضریب درگ اصطکاکی که وابسته به پارامتر لزجت است را می‌توان به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف کرد:

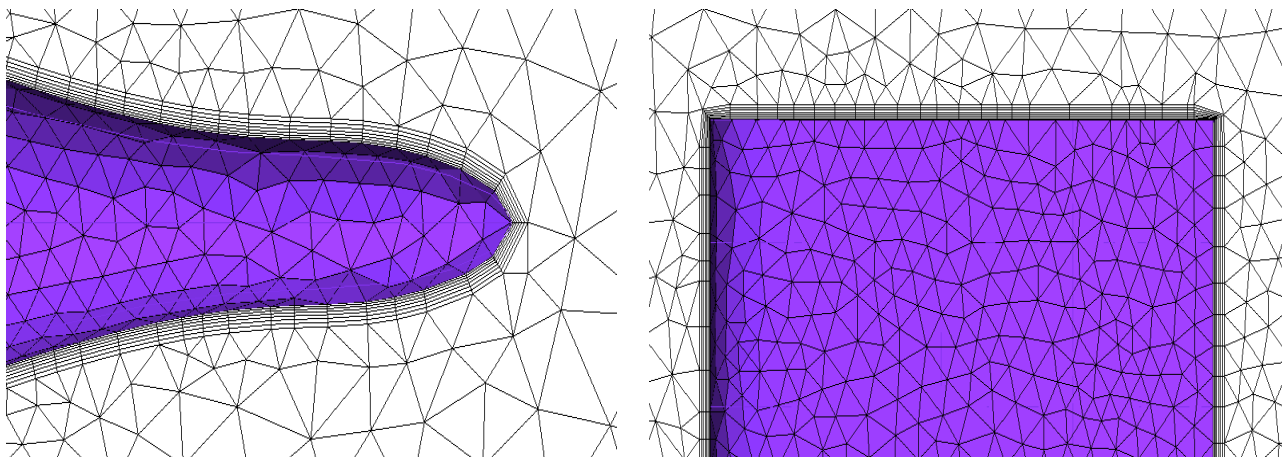
$$C_f = \frac{F_D}{0.5\rho V^2 A} \quad (15)$$

که A در این رابطه، سطح خیس شده بدنه زیردریایی است. به

نمود، y^+ است که به فاصله بی‌بعد اولین گره از شبکه نسبت به سطح اطلاق می‌شود. رابطه زیر با مقدار مشخص y^+ ، در تعیین فاصله اولین گره تا سطح جسم، Δy ، به‌کار گرفته می‌شود [۱۱]:

$$\Delta y = L y^+ \sqrt{74} Re_L^{-13/14} \quad (14)$$

با وجود اینکه رابطه (۱۴) برای صفحات تخت به‌دست‌آمده اما می‌تواند تقریب خوبی برای شبکه‌بندی سطوح دارای انحنا نیز باشد. به‌دلیل عبور جریان سیال بر روی جسم، گردابه‌هایی در پشت جسم تشکیل می‌شود که در نیروی وارد بر جسم تأثیرگذار است. بدین منظور شبکه‌بندی در پشت و نواحی نزدیک به جسم ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. شکل (۴) شبکه‌بندی حول جسم و دامنه حل را نشان می‌دهد.



شکل ۶- شبکه‌بندی منشوری برجک و دم مخروطی

۵- نتایج و بحث روی آن

۵-۱- سرعت

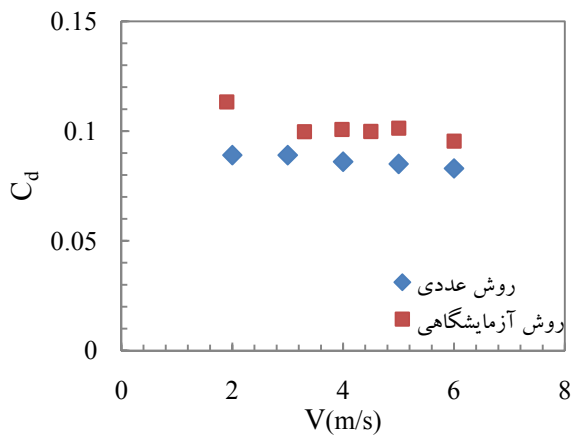
برای بررسی تغییرات نیروی درگ برحسب عدد رینولدز، در چند سرعت مختلف شبیه‌سازی صورت گرفته‌است. شکل (۷) تغییرات نیروی درگ را برحسب سرعت نشان می‌دهد. این شبیه‌سازی جهت مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی که توسط چاز [۶] ارائه شده است، انجام گرفته است. ضریب درگ نیز به‌عنوان کمیتی بی‌بعد که می‌تواند نیروی وارد بر جسم را به‌صورت مستقل از شکل بدنه توصیف کند، محاسبه شده است. نمودار شکل (۸) تغییرات ضریب درگ را برحسب سرعت نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از شکل (۸)، مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی‌ها در حدود ده درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد، که این مقدار با وجود خطاهای مختلف عددی و آزمایشگاهی، در محدوده قابل قبولی است.

۵-۲- زاویه حمله و انحراف

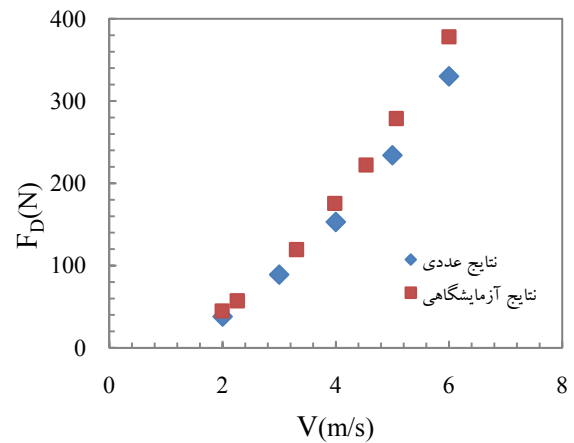
نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سرعت دو متر بر ثانیه به همراه زوایای حمله و انحراف مختلف، در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در زاویه حمله و انحراف کمتر از ۴ درجه، ضریب درگ نسبت به زاویه صفر

این منظور برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف جدول ۲، مقدار ضریب درگ اصطکاکی وارد بر جسم در سرعت ۲ متر بر ثانیه محاسبه و نتایج آن در نمودار شکل (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در روابط مربوط به بخش ۱-۳ از مساحت پیشانی جسم به منظور تعیین ضریب درگ استفاده شد که این موضوع باید از نحوه محاسبه ضریب درگ اصطکاکی در این بخش، تفکیک داده شود. همانگونه که از نمودار دیده می‌شود، با ریز شدن شبکه، مقدار ضریب اصطکاک کاهش پیدا کرده و این روند برای شبکه‌بندی ریز، خیلی ریز و بسیار ریز به مقدار ثابتی می‌رسد. بنابراین برای کاهش زمان و هزینه محاسباتی در شبیه‌سازی از شبکه‌بندی ریز استفاده خواهد شد.

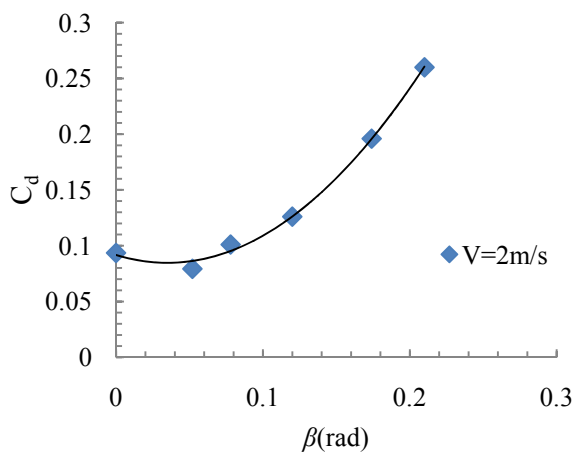
نیشی [۱۲]، در سال ۲۰۰۷ در مقاله خود عنوان کرد که شبکه‌های منشوری در ناحیه لایه مرزی، دقت حل را بالا می‌برد. از این‌رو بررسی اثر تعداد شبکه‌های داخل لایه مرزی بر همگرایی و صحت نتایج، یکی از مراحل مهم در شبیه‌سازیهای عددی است. در داخل لایه مرزی از شبکه‌های منشوری با رشد ۱/۲ از روی سطح تا لایه مرزی با تعداد ۱۰ لایه استفاده شده است. شکل (۶) شبکه‌بندی منشوری در نزدیکی دیواره را نشان می‌دهد.



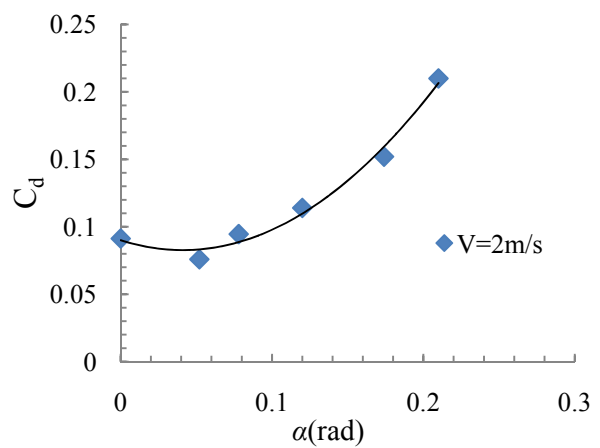
شکل ۸- نمودار ضریب درگ برحسب سرعت



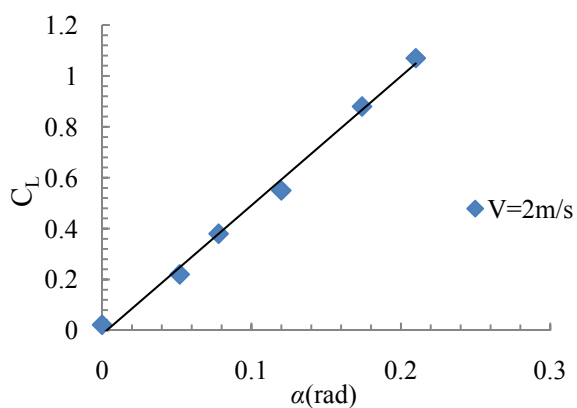
شکل ۷- تغییرات نیروی درگ برحسب سرعت



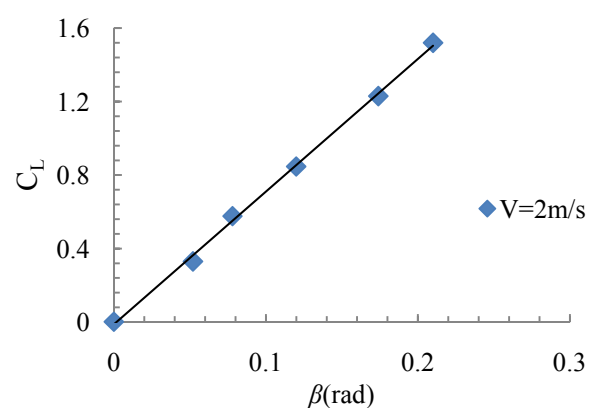
شکل ۱۰- تغییرات ضریب درگ برحسب زاویه انحراف
در سرعت ۲ m/s



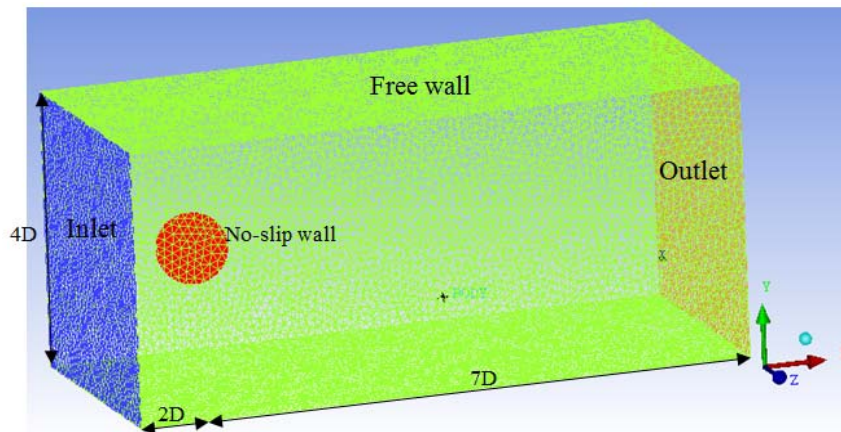
شکل ۹- تغییرات ضریب درگ برحسب زاویه حمله
در سرعت ۲ m/s



شکل ۱۲- نمودار ضریب لیفت برحسب زاویه حمله
در سرعت ۲ m/s



شکل ۱۱- نمودار ضریب لیفت برحسب زاویه انحراف
در سرعت ۲ m/s



شکل ۱۳- ابعاد و شبکه بندی دامنه حل

جدول ۳- ضرایب میرایی غیرخطی

X_{uu}	X_{uv}	X_{uw}	X_{vv}	X_{ww}	Y_{vv}	Z_{ww}	Y_{uv}	Z_{uw}	واحد
۴۵/۳	-۹۹/۷	-۸۷/۲	-۳۵۲/۶	-۱۵۳/۳	-۹۹/۷	-۸۷/۲	۱۸۱۷/۵	۱۲۶۸/۷	$\frac{kg}{m}$

$$(C_d)_\alpha = 4.34\alpha^2 - 0.35\alpha + 0.09 \quad (16)$$

$$(C_d)_\beta = 5.74\beta^2 - 0.4\beta + 0.092$$

همچنین با تعیین ضریب زاویه به دست آمده از منحنی نیروی لیفت برحسب زوایای حمله و انحراف مختلف، با در نظر گرفتن شکل های (۱۱) و (۱۲)، شیب ضرایب لیفت نیز به شکل رابطه (۱۷) به دست آمد:

$$(C_L)_\alpha = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = 5 \quad (17)$$

$$(C_L)_\beta = \frac{\partial C_L}{\partial \beta} = 7.2$$

با استفاده از ضرایب به دست آمده از روابط بالا، ضرایب میرایی هیدرودینامیکی زیردریایی توسط رابطه (۱۱) محاسبه شده و این مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.

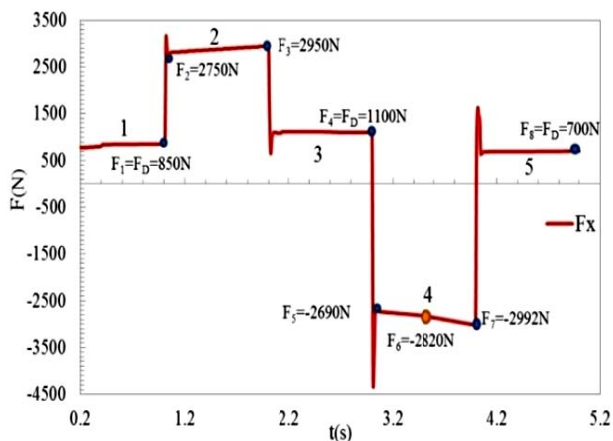
۳-۵- ضرایب افزوده

جهت اطمینان از عملکرد روش عددی به کار گرفته شده در محاسبه ضرایب جرم افزوده و استفاده از آن جهت تعیین

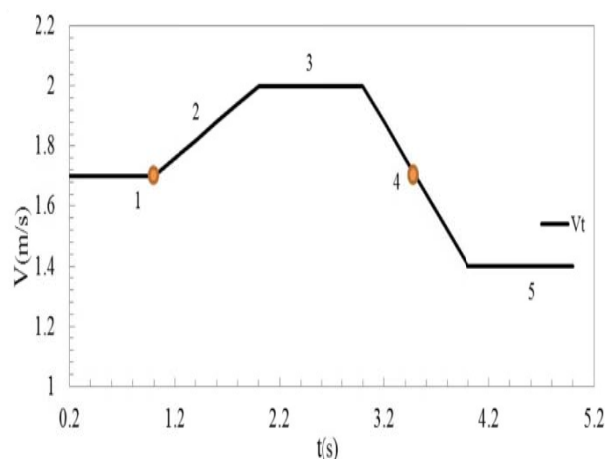
درجه روند کاهشی دارد. علت این امر این است که با افزایش کم زوایای حمله و انحراف، بعضی از سطوح کنترلی از دید جریان خارج شده و در نتیجه نیروی درگ کاهش می یابد. با افزایش بیشتر این زوایا مساحت پیشانی بدنه اصلی جسم بیشتر شده و اثر نادیده گرفته شدن سطوح کنترلی از دید جریان پوشش داده می شود. در نتیجه نیروی درگ از زاویه حدود ۴ درجه به بعد به طور پیوسته افزایش می یابد.

نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی ریدلی [۱۳] که برای یک شناور زیرسطحی هوشمند برای زوایای حمله و انحراف مختلف در دانشگاه کوئینزلند استرالیا انجام شده، مؤید این روند تغییر برای ضریب درگ است.

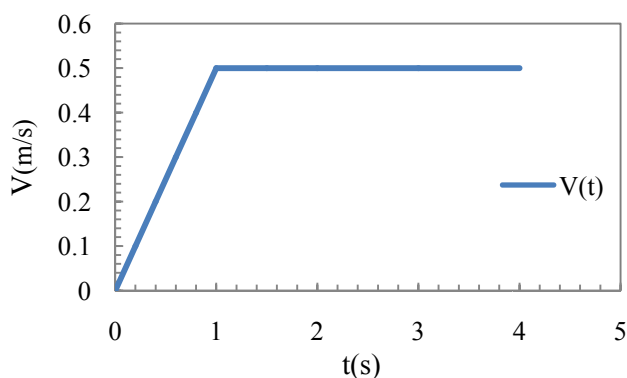
شبیه سازی ها برای زوایای مختلف حمله و انحراف (حداکثر تا ۱۲ درجه) انجام شد و نیروهای درگ و لیفت و سپس ضرایب درگ و لیفت در هر مورد محاسبه شد. با توجه به شکل های (۹) و (۱۰) با عبور منحنی های درجه دوم از نقاط به دست آمده برای ضریب درگ، ضرایب ثابت معادله درجه دوم به صورت رابطه (۱۶) محاسبه گردید:



شکل ۱۵- نمودار نیروی وارد بر کره



شکل ۱۴- نمودار سرعت حرکت کره در سیال



شکل ۱۶- نمودار سرعت ورودی برای تمام حرکات

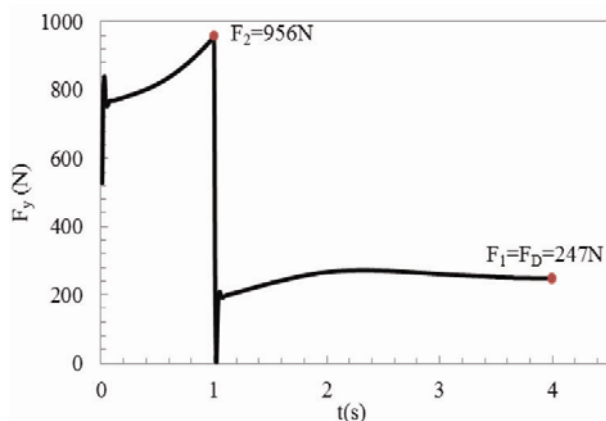
شبهه سازی که در سرعت $1/5$ متر بر ثانیه بوده در $t = 3/5$ s نیز، سرعت $1/5$ متر بر ثانیه است. با این تفاوت که حرکت مرحله چهارم شتابدار است.

با توجه به نمودار نیروی به دست آمده از پروفیل سرعت شکل (۱۵)، مشاهده می شود که نمودار نیرو در لحظه تبدیل حرکت از شتابدار به یکنواخت و یا بالعکس به دلیل اینکه سیال نمی تواند در یک لحظه حرکت خود را از شتابدار به سرعت ثابت و یا بالعکس تبدیل کند، یک جهش دارد. این جهش ناشی از اثر تاریخچه حرکت سیال بوده که یک پدیده فیزیکی است و در آزمون های حقیقی نیز دیده می شود [۱۴]. به منظور مشخص کردن نیروی لازم برای محاسبه جرم افزوده در هنگام اعمال شتاب می توان نیروهای محاسبه شده در نقاط ۱ و ۴ در شکل های (۱۴) و (۱۵) را با یکدیگر مقایسه کرد. این

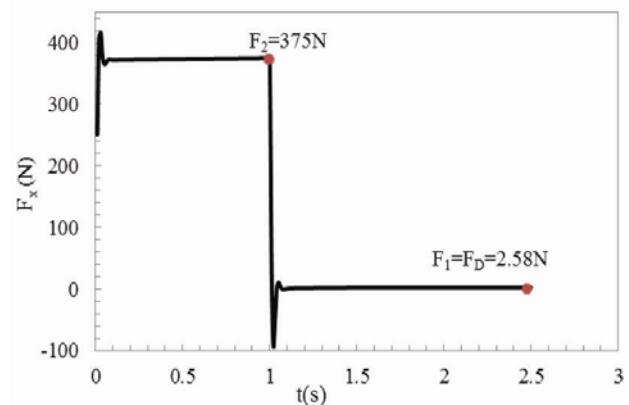
ضریب جرم افزوده زیردریایی، ابتدا شبهه سازی روی یک کره انجام می شود. علت انجام این شبهه سازی این است که اولاً ضریب جرم افزوده کره مشخص است (حدوداً برابر $0/5$) و نتایج شبهه سازی را می توان با این مقدار مقایسه کرد. ثانیاً در هنگام تبدیل حرکت سرعت ثابت به حرکت شتابدار، جهشی ناگهانی در نمودار نیرو دیده می شود که لازم است جهت محاسبه جرم افزوده مقدار صحیح نیرو در لحظه اعمال شتاب تعیین گردد. مطالعه بر روی جرم افزوده کره نحوه صحیح انتخاب نیرو در هنگام اعمال شتاب را نشان می دهد. شکل (۱۳) موقعیت و نحوه شبکه بندی حول کره را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۱۴) مشخص است در شبهه سازی چند سرعت و شتاب ثابت مختلف به کره اعمال شده است. با دقت در این نمودار مشاهده می شود که علاوه بر حرکت ابتدایی

جدول ۴- نیروهای اندازه‌گیری شده و ضرایب جرم افزوده C از شبیه‌سازی کره

$C = \frac{m}{\rho V}$	$m_a = \frac{F_{tot} - F_D}{a} - m \text{ (kg)}$	$F_2 \text{ (N)}$	$F_1 \text{ (N)}$	
۰/۵۱	۲۱۵۷/۱	۲۷۵۰	۸۵۰	مرحله ۱ و ۲
۰/۴۸	۱۹۹۰/۴	۲۹۵۰	۱۱۰۰	مرحله ۲ و ۳
۰/۵۱	۲۱۴۰/۴	-۲۶۹۰	۱۱۰۰	مرحله ۳ و ۴
۰/۴۷	۱۹۷۷/۱	-۲۹۹۲	۷۰۰	مرحله ۴ و ۵
۰/۴۶	۱۹۴۰/۵	-۲۸۲۰	۸۵۰	مرحله ۱ و ۴



شکل ۱۸- نیروی وارد بر زیردریایی در جهت y



شکل ۱۷- نیروی وارد بر زیردریایی در جهت x

داشته و نشان از درستی روش عددی استفاده شده جهت محاسبه جرم افزوده دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از کره و مستقل بودن نتایج از شتاب، از این روش جهت محاسبه ضریب جرم افزوده زیردریایی سابوف استفاده می‌شود. بدین‌منظور حرکت شتابدارخطی و سرعت ثابت زیردریایی سابوف به‌صورت نمودار شکل (۱۶) شبیه‌سازی شده‌است. لازم به ذکر است که اختلاف نیرو در $t=1s$ ناشی از نیروی جرم افزوده است. نمودار نیرو در شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است. نیرو پس از اعمال حرکت شتابدار اولیه، پس از گذار از ناحیه ناپایدار، به‌صورت خطی افزایش می‌یابد ولی تغییرات آن به‌دلیل مقیاس‌های استفاده شده در منحنی به‌راحتی قابل مشاهده نیست. به‌دلیل شکل هیدرودینامیک متفاوت زیردریایی در جهات مختلف، زمان حرکت سرعت ثابت برای حرکت سرع ۱ ثانیه و برای حرکات سووی و هیو ۳ ثانیه است. نتایج عددی حاصل

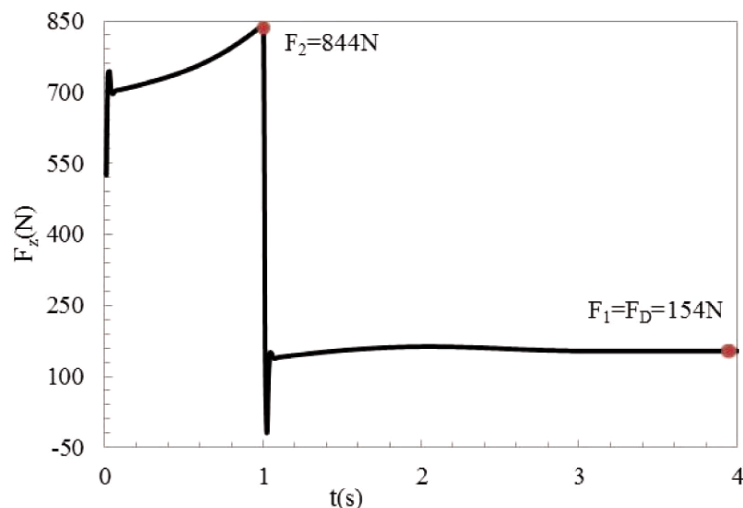
نقاط دارای سرعت یکسان بوده و یکی در حرکت بدون شتاب و دیگری شتابدار است. در این حالت جهش نیرو نیز وجود ندارد. مقایسه این نیرو در نقطه ۴ و نیرو در نقطه‌ای که شتاب به‌صورت ناگهانی وارد شده (نقطه ۱) نشان می‌دهد که در محاسبه جرم افزوده نباید نیروی جهش اولیه لحاظ شود و اختلاف نیروی درگ با نیروی حالت شتابدار پس از اتمام جهش باید در نظر گرفته شود.

جدول ۴ نیروهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی و ضرایب جرم‌افزوده محاسبه شده در حرکات مختلف شتابدار و سرعت ثابت به تفکیک مرحله‌های مشخص شده در شکل (۱۵) را نشان می‌دهد. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ضریب جرم افزوده تقریباً مستقل از شتاب است.

نکته قابل توجه در این نتایج این است که ضریب جرم افزوده به‌دست آمده برای کره که در جدول ۴ آمده است، با نتایج مورد انتظار برای جرم افزوده کره (حدود ۰/۵) مطابقت

جدول ۵- مقایسه ضرایب افزوده بی بعد جرم افزوده در راستاهای مختلف

روش عددی	روش آزمایشگاهی	درصد اختلاف
X'_{ii}	-	-
Y'_v	۰/۰۱۶	۵٪
Z'_w	۰/۰۱۴۵	۱۰٪



شکل ۱۹- نیروی وارد بر زیردریایی در جهت Z

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، به نحوه استخراج ضرایب هیدرودینامیکی یک شناور زیرسطحی شامل ضرایب میرایی و افزوده با شبیه سازی عددی آزمون های شتابدار و سرعت ثابت در عمق زیاد پرداخته شد. برای استخراج ضرایب میرایی غیرخطی مرتبه دوم از شبیه سازی حرکات همراه با زاویه انحراف و حمله استفاده شد و مشخص شد که تغییرات ضریب درگ با زوایای حمله و انحراف به صورت تابع سهموی است. همچنین با شبیه سازی حرکات شتابدار خطی در جهات مختلف، ضرایب جرم افزوده قطری محاسبه شد. در روش عددی استفاده شده، ابتدا شبیه سازی بر روی یک شکل استاندارد نظیر کره انجام شد و نتایج نشان داد که مقدار جرم افزوده مستقل از شتاب حرکت است. مقایسه نتایج عددی حاصل با گزارش های آزمایشگاهی موجود، نشان دهنده دقت روش های عددی به کار گرفته شده است.

برای ضریب جرم افزوده در راستاهای مختلف، با نتایج ارائه شده توسط مؤسسه دیوید-تیلور در جدول ۵ مقایسه شده است [۹]. بدیهی است که انجام مراحل آنالیز خطا جهت اطمینان از نتایج روش آزمایشگاهی در مؤسسه دیوید-تیلور صورت گرفته و نتایج قطعی و نهایی آزمایشات در دسترس است. در جدول مذکور X'_{ii} ، Y'_v و Z'_w به ترتیب ضرایب جرم افزوده بی بعد در راستای محورهای x ، y و z هستند که با تقسیم جرم افزوده (m_a) بر $\frac{1}{2}\rho l^3$ بی بعد شده اند. نتایج به دست آمده از این شبیه سازی نشان از دقت نسبتاً خوب آن در مقایسه با نتایج تجربی دارد.

به دلیل شکل هیدرودینامیک شناور در راستای طولی آن، نمودار نیروی سرج نوسانات زمانی کمتری نسبت به دیگر نمودارها دارد. همچنین در راستای طولی، مقدار نیروی سرج نسبت به نیرو در دو جهت دیگر کمتر است.

- | | | |
|--|-----------|----------|
| 1. Reynolds average Navier-Stokes (RANS) | 3. Suboff | 6. heave |
| 2. shear stress transport | 4. surge | 7. prism |
| | 5. sway | |

مراجع

- Baker, C., "Estimating Drag Forces on Submarine Hulls", University of New Brunswick, Canada, Atlantic, 2004.
- Jinxin, Z., Yumin, S., Lei, J., and Jian, C., "Hydrodynamic Performance Calculation and Motion Simulation of an AUV with Appendages", *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Vol. 2, pp. 657-660, 2011.
- Tang, S., Ura, T., Nakatan, T., Thornton, B., and Jian, T., "Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous Underwater Vehicle TUNA-SAND", *Journal of Marine Science Technology*, Vol. 14, pp. 373-386, 2009.
- Zhang, H., Yu-ruXu, and Cai, H., "Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficients", *Journal of Marine Science Application*, Vol. 9, pp. 149-155, 2010.
- Ayub, A. M., Sohaib, M., Bilal, S., Zahir, S., and Khan, M. A., "Estimation of Hydrodynamic Coefficient of DARPA-2 and Their Geometry Dependence", *National Engineering and Scientific Commission Magazine*, No. 43, I2005.
- Chase, N., "Simulations of the DARPA Suboff Submarine Including Self-Propulsion with the E1619 propeller", M. Sc. Thesis, University of Iowa, Iowa, 2012.
- Phillips, A., Furlong, M., and Turnock, S. R., "Virtual Planar Motion Mechanism Tests of the Autonomous Underwater Vehicle Autosub", *STG-Conference/L, CFD in Ship Design*, 2007.
- Lee, S. K., and Joung, T. H., "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, pp. 174-180, 2014.
- Rody, R. F., "Investigation of the Stability AMD Control Characteristic of Several Configuration of the DARPA Suboff Model.", *Ship Hydromechanics Department, Departmental Report*, 1990.
- Fossen, T., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", *John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK*, 1994.
- ANSYS-CFX-Solver Modeling Guide, *Turbulence and Near-Wall Modeling*, "Modeling Flow Near the Wall, Guidelines for Mesh Generation", Release 13.0. ANSYS Ltd.
- Nishi, Y., Kashiwagi, M., Koterayama, W., Nakamura, M., Samuel, Yamamoto, Hyakudome, "Resistance and Propulsion Performance of an Underwater Vehicle Estimated by a CFD Method and Experiment", *ISOPE '07*, Lisbon, Spain, 2007.
- Ridley, P., Fontan, J., and Corke, P., "Submarine Dynamic Modeling", *Proceeding of the Conference on Robotics and Automation*, Brisbane, 2003.
- Fernandes, A. C., and Mineirob, F. P. S., "Assessment of Hydrodynamic Properties of Bodies with Complex Shapes", *Applied Ocean Research*, Vol. 29, pp. 155-166, 2007.