



## بررسی عددی حساسیت ضرایب دینامیکی و جرم افزوده یک زیرسطحی هوشمند به دامنه و بسامد تحریک

حسین عدنیان آرانی<sup>۱</sup>، میراعلم مهدی<sup>۲\*</sup> و مصطفی ورمزیار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴

### چکیده

ضرایب و مشتقات هیدرودینامیکی یک زیرسطحی پارامترهای خیلی مهمی هستند که کنترل پذیری و مانور آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. معمولاً از روش کشش مستقیم و حرکت اجباری هیو و پیچ خالص برای استخراج ضرایب و مشتقات استفاده می‌شود. در این مقاله به روش دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد حجم کنترل و با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت، جریان اطراف یک زیرسطحی شبیه‌سازی شده است. ابتدا شبیه‌سازی برای حالت کشش مستقیم صورت گرفته تا با مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نوع شبکه و مدل آشفتگی مناسب انتخاب شود. برای شبیه‌سازی حرکت اجباری هیو و پیچ خالص، یک برنامه udf نوشته شده که مدل را با دامنه و بسامد مشخص نوسان می‌دهد. خروجی نرم‌افزار تغییرات ضرایب با زمان است که به وسیله یک برنامه مطلب به ضرایب دینامیکی تبدیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ضریب  $Z'_{W}$  با تغییر دامنه و بسامد نوسان مدل تقریباً ثابت است، ولی ضرایب  $Z'_{W}$ ،  $M'_{W}$  و  $M'_{W}$  با تغییر بسامد و دامنه تا میزان ۳۵ درصد تغییر می‌کنند. نتایج حاصل تمامی ضرایب حرکت پیچ با افزایش دامنه و بسامد نوسانات مدل از خود افزایش نشان دادند. کمترین افزایش، مربوط به ضریب  $M'_q$  است با کمتر از ۸ درصد تغییرات در مقدار مطلق خود. مابقی ضرایب تا حدود ۸۰ درصد نیز، تغییرات از خود نشان دادند.

**کلمات کلیدی:** مشتقات هیدرودینامیکی؛ زیر سطحی خودکنترل؛ حرکت هیو خالص؛ مکانیزم حرکت صفحه‌ای.

## Numerical Investigation of Sensitivity of AUV Dynamic Coefficients and Added Mass to Variations in Amplitude and Frequency of Excitation

H. Adnian Arani<sup>1</sup>, M. Mahdi<sup>2,\*</sup>, M. Varmazyar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc. Student, Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaei Teacher Training Univ., Tehran, Iran.

### Abstract

The hydrodynamic coefficients and derivatives of a AUV are very important parameters that affect its control and maneuverability. Usually, a straight-line towing test method and forced heave and pitch motion are used to derive coefficients. In this paper, we used the CFD method with the control volume approach and commercial Fluent software, the flow is simulated around a subsurface. First, simulation was performed for straight-line towing test to by comparing the results with experimental results, to selected the grid type and suitable turbulent model. To simulate forced heave and pitch motion, a udf program is written that oscillates the model with specific amplitudes and frequencies. Software output is the time-coefficients varying that is converted to dynamic coefficients by a Matlab program. The results show that the  $Z'_{W}$  coefficient is approximately constant with variation of amplitude and oscillation frequency of the model but the  $Z'_{W}$ ,  $M'_{W}$  and  $M'_{W}$  coefficients change with frequency and amplitude to 35%. The results show all coefficients of pitch motion increased with increasing amplitude and frequency of model oscillation that the lowest increase is related to the  $M'_q$  coefficient with less than 8% variation in its absolute value. The remaining coefficients showed up to 80%.

**Keywords:** Hydrodynamic Derivatives; Autonomous Underwater Vehicle; Pure Heave Motion; Planar Motion Mechanism.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر وسایل بدون سرنشین به دلیل کاهش خطرات انسانی در بخش دریا، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مهندسی زیرسطحی و عملیات دریایی نیز، این موضوع اهمیت ویژه‌ای یافته و به دلیل محدودیت در تامین توان مورد نیاز برای رانش و تجهیزات جانبی وسیله، تخمین دقیق نیروهای مورد نیاز برای انجام ماموریت امری ضروری است. بر این اساس، تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک وسیله زیرسطحی هوشمند در مرحله طراحی بسیار مهم است. به عبارت دیگر، برای طراحی یک AUV باید قابلیت کنترل و مانور آن توسط مدل‌های ریاضی دقیق، مورد بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل، نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی است که به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند؛ بنابراین جهت شبیه‌سازی دقیق کارکرد AUV بدست آوردن مقادیر دقیق این ضرایب ضروری است.

مطمئن‌ترین روش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV، انجام آزمایش‌های هیدرودینامیک است؛ بنابراین آزمایش‌های هیدرودینامیک بخش اجتناب ناپذیری در فرایند طراحی این وسایل خواهند بود. از طرف دیگر با پیشرفت و افزایش قدرت رایانه‌ها، امکان شبیه‌سازی آزمایش‌های هیدرودینامیک با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی فراهم آمده که به کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت این وسایل کمک شایانی کرده است و به عنوان یک ابزار کمکی قدرتمند در کنار آزمایش‌های هیدرودینامیک، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه تحقیقات فراوانی صورت گرفته که برخی تنها ضرایب استاتیکی را محاسبه کرده و تعدادی نیز ضرایب دینامیکی و جرم افزوده را بدست آورده‌اند. استخراج ضرایب استاتیکی همانند ضریب پسا، برا و ممان به روش پایا امکان‌پذیر است، ولی برای ضرایب دینامیکی و جرم افزوده لازم است، به صورت گذرا انجام شود. وو و همکاران [۱]، حرکت پایا مستقیم الخط زیرسطحی مدل SUBOFF را در حالات با و بدون زاویه حمله در نزدیکی بستر سیال شبیه‌سازی کرده‌اند و اثرات حرکت در نزدیکی بستر را روی ضرایب و نیروهای استاتیکی بدست آوردند. در این تحقیق از شکل متوسط‌گیری شده معادلات ناویر-استوکس برای شبیه‌سازی عددی استفاده شد. نتایج بدست آمده از روش عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خیلی

خوبی داشت که بیان قابلیت روش‌های عددی در استخراج ضرایب استاتیکی است.

تیاگی و همکارانش [۲]، به روش CFD و با استفاده از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) در نرم‌افزار فلونت به محاسبه ضرایب نیروها و گشتاورهای دمپینگ هیدرودینامیکی عرضی برای دو هندسه زیرسطحی پرداخته و نتایج را با نتایج نیمه تجربی موجود مقایسه کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت روش CFD داشته و نشان می‌دادند که نیروها و گشتاورها با سرعت جانبی یک رابطه غیر خطی دارند. بروگلیا و همکارانش [۳]، حرکت سوی خالص را برای یک مدل مغروق در آب با استفاده از کدهای CFD همراه با در نظر گرفتن اثرات سطوح آزاد، شبیه‌سازی کردند و نتایج آن را با داده‌های تجربی موجود مقایسه کردند. تقریباً پذیرفته شده که شبیه‌سازی‌های آزمایش PMM، روش رایج برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی و ضرایب دمپینگ آن هستند. باروس و همکارانش [۴]، برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی معروف‌ترین AUVها به مطالعه روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی پرداختند. آن‌ها همچنین برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی MAYA AUV یک برنامه پیاده‌سازی کردند که توسط شرکت Indian-Portuguese در حال توسعه‌یابی است. تانگ و همکارانش [۵]، ضرایب دمپینگ اینرسی یک AUV با هندسه پیچیده را با استفاده از روش‌های CFD محاسبه کردند. ابتدا ضرایب بدست آمده را با نتایج تجربی مقایسه کردند، سپس با بررسی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند که برخی از ضرایب وابسته به لزجت هستند و برخی دیگر وابسته به نیروی اینرسی هستند که می‌توان با استفاده از جریان پتانسیل محاسبه کرد. واز و همکارانش [۶]، با تمرکز بر پیش‌بینی دقیق نیروهای مانورینگ زیرسطحی DARPA SUBOFF به روش CFD و با استفاده از کد توسعه داده شده در نرم‌افزار اختصاصی MARIN و همچنین نرم‌افزار تجاری AcuSolve به محاسبه نیروها و الگوی جریان حول زیرسطحی برای دو حالت بدون بدنه و بدنه کامل پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده رضایت‌بخش بوده و با داده‌های تجربی همخوانی داشتند. صادق‌زاده و همکاران [۷]، با استفاده از روش تجربی ضرایب دینامیکی زیرسطحی هوشمند SUT-2 را استخراج کردند. کیم و همکارانش [۸]، از روش CFD برای

[۱۵]، برای استخراج ضرایب مربوط به جرم افزوده یک مدل زیرسطحی از نرم افزار CFX استفاده کردند. شبیه‌سازی در یک بسامد و عدد رینولدز ثابت انجام شد و مدل آشفتگی با رویکرد جریان گذرا بکارگرفته شد. با اعمال معکوس تابع فوریه بر نتایج CFD مقادیر ضرایب جرم افزوده برای یک زیرسطحی بدست آمد. اردشیری و همکاران [۱۶]، با استفاده از روش دینامیکی سیالات محاسباتی و نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام و بهره‌گیری از مش دینامیک اورست، ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی متقارن بیضیگون، محاسبه و اثر پارامترهای سرعت و دامنه حرکت جسم مورد بررسی قرار گرفت. راسخ و همکاران [۱۷]، با ترکیب روش فیلتر کالمن هیبریدی توسعه یافته و دینامیک سیالات محاسباتی با یک روش نوین ضرایب هیدرودینامیکی یک بیضی‌گون را بدست آوردند که نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی داشت.

با بررسی پژوهش‌های انجام شده برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی یک زیرسطحی مشخص شد که ضرایب استاتیکی با دقت قابل قبولی با رویکرد پایا به روش دینامیکی سیالات محاسباتی قابل استخراج است. برای استخراج ضرایب دینامیکی و جرم افزوده، روش‌هایی ارائه شده تا روش بازوی دوار و آزمایش PMM به صورت عددی شبیه‌سازی شود. برای این منظور لازم است، مدل با بسامد و دامنه مشخص طوری حرکت داده شود که خروجی آن حرکت هیو یا پیچ خالص شود. معمولاً در شبیه‌سازی‌های انجام شده تنها برای یک دامنه و بسامد مشخص شبیه‌سازی صورت می‌گرفت. از آنجایی‌که مانور یک زیر سطحی ممکن است به گونه‌ای باشد که بسامدهای مختلف را تجربه کند؛ بنابراین بررسی حساسیت ضرایب دینامیکی به مقدار بسامد تحریک موضوعی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معادلات حاکم

یکی از روش‌های موجود برای استخراج ضرایب دمپینگ هیدرودینامیکی، این است که زیرسطحی حرکت هیو یا پیچ خالص داشته باشد. در این حالت برخی از مؤلفه‌های نیرو و ممان حذف شده و با استفاده از روابطی می‌توان ضرایب دمپینگ را بدست آورد. با توجه به مانوری که یک زیرسطحی

شبیه‌سازی مانورهای بدنه DARPA SUBOFF استفاده کردند. آن‌ها به بررسی جریان آشفته اطراف بدنه پرداختند و دو مدل آشفتگی Wilcox  $k-\omega$  و SST  $k-\omega$  را برای تحلیل-های خود استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود مقایسه شدند. آن‌ها نشان دادند که مدل آشفتگی Wilcox  $k-\omega$  برای در نظر گرفتن گردابه‌ها و دیگر ویژگی‌های جریان از مدل SST  $k-\omega$  بهتر است. ملیک و همکارانش [۹]، به شبیه‌سازی آزمایش PMM با روش CFD برای هندسه متقارن محوری بیضی‌گون با نسبت ابعادی ۶:۱ پرداخته‌اند و با استفاده از نرم‌افزار فلوننت و قابلیت مش متحرک و چند ناحیه کردن حوزه جریان برای اعمال حرکت‌های هیو و پیچ خالص توانسته‌اند، نتایجی با دقت بالا در مقایسه با حل تحلیلی موجود به دست آورند. از روش مشابه برای استخراج مشتقات دینامیکی زیرسطحی اتوساب استفاده شده است [۱۰].

کیمبر و همکاران [۱۱]، به صورت آزمایشگاهی یک زیرسطحی مدل اتوساب را مورد بررسی قرار دادند و ضرایب هیدرودینامیکی آن را استخراج کردند که نتایج بدست آمده مورد ارجاع خیلی از تحلیل‌های عددی قرار گرفت. وری و همکاران [۱۲] برای کاهش هزینه محاسبات و امکان ایجاد شبکه با سازمان با کیفیت بالا روشی را ارائه دادند که برای استخراج ضرایب دینامیکی یک زیرسطحی امکان مدل‌سازی جداگانه بالک با بدنه وجود دارد. ایشان روش ارائه شده را با نتایج آزمایشگاهی نیز اعتبارسنجی کردند. جوانمرد و همکاران [۱۳]، روش جدیدی جهت استخراج ضرایب جرم افزوده یک ربات زیرآبی پیشنهاد دادند. در این روش، حرکت شتاب دار ربات بصورت عددی شبیه سازی شده و نیروهای ناشی از سرعت و شتاب آن استخراج و از آنجا ضرایب جرم افزوده محاسبه می‌شود. 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.

شادلقلانی و همکاران [۱۴]، با کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی آزمایش بازوی دوار را به صورت خطی شبیه‌سازی کردند و برخی از مشتقات دینامیکی خطی را بدست آوردند. ضرایب بدست آمده از این روش با نتایج تست PMM نیز، مطابقت قابل قبولی داشت. مولیادی و همکاران

صورت ضریب ارائه شوند. در جدول ۱ پارامترهایی آورده شده است که برای بی‌بعد کردن ضرایب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با جایگذاری روابط سرعت و شتاب در معادلات (۱) و اعمال پارامترهای بی‌بعدسازی ضرایب (جدول ۱) داریم:

$$Z' = -Z'_W \dot{W}' - Z'_W W' \quad (3)$$

همچنین سری فوریه ضرایب به صورت رابطه (۴) است.

$$z' = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (4)$$

ضرایب هیو خالص به صورت ترکیبی از توابع سینوس (ضریب A) و کسینوس (ضریب B) بدست می‌آیند که با توجه به خروجی عددی نرم‌افزار به این صورت خواهند بود:

$$Z'_W = \frac{-AV}{a\omega} \quad Z'_W = \frac{BV^2}{a\omega^2 L} \quad (5)$$

در حرکت پیچ خالص از دید ناظر متصل به بدنه، جسم صرفاً حول محور Y نوسان دورانی دارد و در جهت عمود بر جسم سرعتی را حس نمی‌کند.

روابط مربوط به سرعت و شتاب برای حرکت پیچ به صورت رابطه (۶) است.

$$\theta = -\theta_0 \cos \omega t$$

$$q = \dot{\theta} = \theta_0 \omega \sin \omega t$$

$$\dot{q} = \ddot{\theta} = \theta_0 \omega^2 \cos \omega t \quad (6)$$

با جایگذاری روابط سرعت و شتاب در معادلات (۱) و اعمال پارامترهای بی‌بعدسازی ضرایب (جدول ۱) داریم:

$$Z' = -Z'_q \dot{q}' - Z'_q q' \quad (7)$$

$$M' = -M'_q \dot{q}' - M'_q q'$$

ضرایب پیچ خالص نیز همانند هیو خالص به صورت ترکیبی از توابع سینوس و کسینوس بدست می‌آیند.

$$Z'_q = \frac{-BV}{\theta_0 \omega L} \quad Z'_q = \frac{-AV^2}{\theta_0 \omega^2 L^2}$$

$$M'_q = \frac{-BV}{\theta_0 \omega L} \quad M'_q = \frac{-AV^2}{a\omega^2 L^2} \quad (8)$$

دارد، مقدار نیروی Z و ممان پیچ M از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$Z = (m-Z_W)\dot{W} + (mx_G - Z_q)\dot{q} - Z_W W + (mU_0 - Z_q)q$$

$$M = (mx_G - M_W)\dot{W} + (I_Z - M_q)\dot{q} - M_W W + (mx_G U_0 - M_q)q \quad (1)$$

با حذف اثرات جرم و اینرسی بدنه ( $m, I=0$ ) و قراردادن دستگاه مختصات بدنی روی مرکز جرم زیرسطحی ( $x_G, y_G, z_G = 0$ )، تنها نیروهای خالص وارده از طرف سیال بدست می‌آیند. در حرکت هیو خالص از دید ناظر متصل به بدنه، جسم فقط در جهت عمود بر محور Z حرکت می‌کند؛ بنابراین مقادیر q و  $\dot{q}$  در این حرکت برابر صفر خواهند بود. در صورتی که زیرسطحی در راستای قائم به صورت سینوسی حرکت کند، روابط مربوط به سرعت و شتاب در این راستا به صورت رابطه (۲) است:

$$z = a \sin \omega t$$

$$W = \dot{z} = a \omega \cos \omega t$$

$$\dot{W} = \ddot{z} = -a \omega^2 \sin \omega t \quad (2)$$

معمولاً در شبیه‌سازی یک زیرسطحی از ضرایب بدون بعد استفاده می‌شود که لازم است، مقادیر نیرو و ممان به

جدول ۱- پارامترهای بی‌بعدسازی

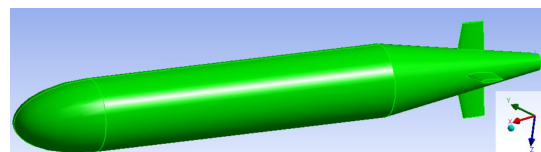
| پارامتر بی‌بعدسازی    | ضریب بی‌بعد |
|-----------------------|-------------|
| $1/2\rho V^2 L^2$     | نیرو        |
| $1/2\rho V^2 L^3$     | مومنوم      |
| $W 1/2\rho V L^2$     | $Z'_W$      |
| $W 1/2\rho V L^3$     | $M'_W$      |
| $\dot{W} 1/2\rho L^3$ | $Z'_W$      |
| $\dot{W} 1/2\rho L^4$ | $M'_W$      |
| V                     | $W'$        |
| $V^2/L$               | $\dot{W}'$  |

### ۳- مدل سازی زیرسطحی اتوساب

زیرسطحی اتوساب در سال ۱۹۸۸ توسط شورای پژوهشی محیط زیست بریتانیا برای برنامه‌های علمی دریایی ساخته شد که می‌تواند اطلاعاتی در مورد آب و خصوصیات آن مثل دما، عمق، کیفیت نمک و ... را جمع‌آوری کند. مدل  $3/4$  مقیاس اتوساب برای آزمایش هیدرودینامیک در مطالعات مرجع برای کارهای CFD استفاده شده است. مبدأ مختصات روی مرکز جرم زیرسطحی قرار دارد، به طوری که محور X در راستای طولی و به سمت دماغه و محور Z عمود بر بدنه به سمت پایین است. جدول ۲ مشخصات هندسی زیرسطحی اتوساب را بیان می‌کند و شکل ۱ هندسه سه بعدی مدل را نشان می‌دهد. زیرسطحی شامل، یک دماغه بیضی، بدنه استوانه‌ای و انتهای مخروطی است که چهار بالک کنترلی در قسمت انتهایی آن نصب شده‌اند.

جدول ۲- مشخصات هندسی مدل اتوساب

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| طول                            | ۵/۲ متر       |
| قطر                            | ۰/۶۷ متر      |
| طول دماغه                      | ۰/۷۷ متر      |
| شکل دماغه                      | بیضی          |
| طول بدنه                       | ۲/۸۷ متر      |
| سطح مقطع بدنه                  | ۰/۳۵ متر مربع |
| فاصله مرکز ثقل از دماغه        | ۲/۳۴۷ متر     |
| اندازه بالک (نوک تا نوک)       | ۰/۸۸ متر      |
| طول وتر نوک بالک               | ۰/۲۱ متر      |
| زاویه رفت و برگشت (لبه راهنما) | ۱۱/۱۳ درجه    |
| زاویه رفت و برگشت (لبه عقبی)   | صفر درجه      |
| ایرفویل بالک                   | NACA0015      |

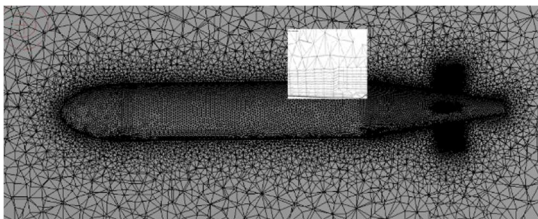


شکل ۱- مدل سه بعدی زیرسطحی اتوساب

### ۴- شبکه‌بندی و شبیه‌سازی آزمایش کشش

#### مستقیم

برای انتخاب نوع شبکه و مدل آشفتگی مناسب برای استخراج ضرایب هیدرودینامیکی، ابتدا نتایج مربوط به نیروی محوری و عمودی و ممان پیچ به ازای زوایای حمله مختلف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در تمام تحلیل‌های صورت گرفته از شبکه پیوندی برای میدان جریان استفاده شده است. در این نوع شبکه‌بندی، کنار دیواره‌های مدل از شبکه لایه مرزی استفاده شده است و در فاصله دور از میدان شبکه‌بندی بی‌سازمان است. شبکه سطح روی بالک‌ها به نحوی انجام شده که تراکم در نزدیکی لبه‌ها زیاد و در نواحی دورتر از لبه‌ها کمتر باشد. تعداد لایه مرزی در شبکه ۲۰ لایه است که ۱۰ لایه اول بصورت نمایی و با المان‌های منشور/گوه و ۱۰ لایه بعدی با المان‌های چهار ضلعی مستطیلی تولید می‌شوند. فاصله اولین لایه از بدنه طوری انتخاب شده که شرط  $y^+ < 1$  برقرار شود. شکل ۲، شبکه لایه مرزی و حجمی تولید شده در اطراف مدل و داخل حوزه جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شبکه لایه مرزی و حجم اطراف مدل و داخل حوزه جریان

برای بررسی دقت نتایج عددی بدست آمده از شرایط مرزی استفاده شده که داده‌های آزمایشگاهی برای آن موجود است. مقادیر مربوط به شرایط مرزی در جدول ۳ آورده شده است. این شبیه‌سازی به صورت پایا و با رویکرد فشار مینا انجام شده است. منفصل‌سازی تمامی معادلات با دقت مرتبه ۲ انجام شده است و معیار همگرایی ثابت شدن تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی بوده است.

آزمایش کشش مستقیم برای چهار شبکه با تعداد سلول‌های مختلف انجام شد. جدول ۴ تعداد سلول‌های این شبکه‌ها را بیان می‌کند. برای ریز کردن شبکه پارامترهای

جدول ۳- شرایط آزمایش کشش مستقیم

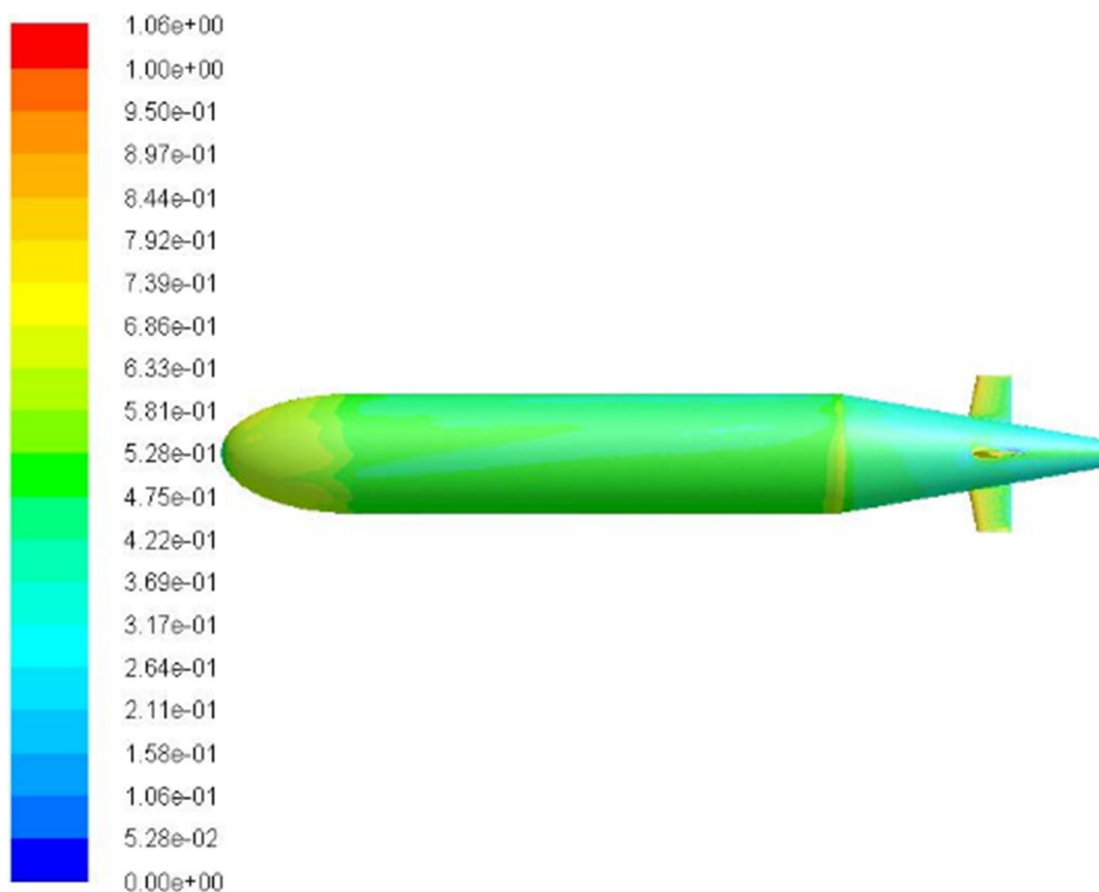
|                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| سرعت (متر بر ثانیه) | ۲/۶۹                   |
| زاویه حمله (درجه)   | ۰ و ۲ و ۴ و ۶ و ۸ و ۱۰ |
| فشار محیط (پاسکال)  | ۱۵۰۲۷۷                 |

جدول ۴- تعداد سلول‌های انواع شبکه

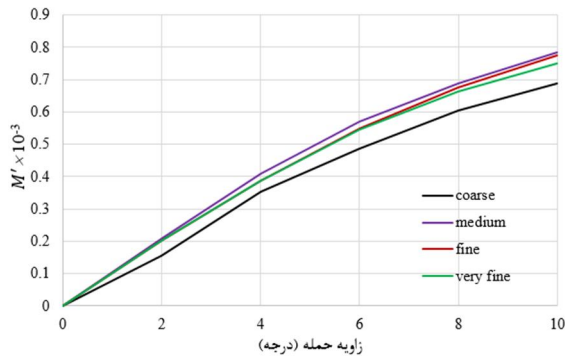
|            |            |
|------------|------------|
| تعداد سلول | تراکم شبکه |
| ۱۶۹۳۹۳۶    | درشت       |
| ۲۴۹۴۹۳۰    | متوسط      |
| ۳۴۲۱۹۶۸    | ریز        |
| ۴۰۶۲۰۳۸    | خیلی ریز   |

مختلف مثل، نرخ رشد شبکه درون حجم کنترل، تعداد لایه مرزی و تعداد گره‌های موجود در سطح بدنه زیرسطحی تغییر داده شده است.

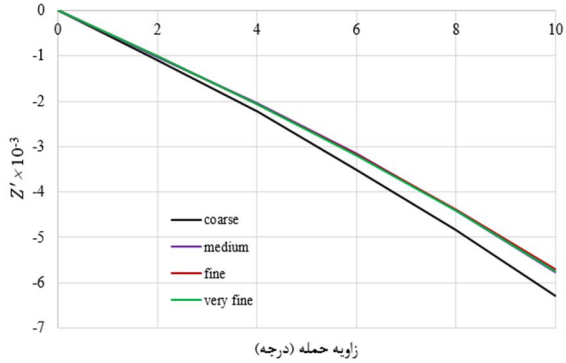
برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت الگوریتم SIMPLE استفاده شده است؛ همچنین برای ۱۰۰ تکرار اول از روش آپویند مرتبه اول و برای مابقی تکرارها، آپویند مرتبه دوم انتخاب شد. شدت آشفتگی و ضریب ویسکوزیته آشفتگی هم به ترتیب ۳٪ و ۵ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی همگرایی نتایج علاوه بر کنترل کردن مقادیر باقیمانده‌ها، منحنی‌های ضرایب برآ، پسا و ممان و همچنین مقادیر  $y^+$  نیز کنترل شدند. شکل ۳ توزیع مقادیر  $y^+$  را نمایش می‌دهد. شکل‌های ۴ و ۵ منحنی‌های رسم شده از نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم برای نیروهای برآ و مومنتوم را نشان می‌دهد.



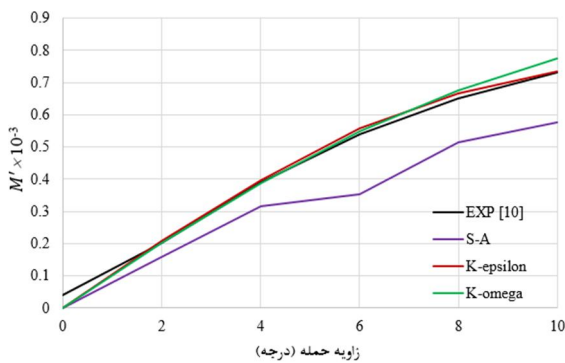
شکل ۳- توزیع مقادیر  $y^+$



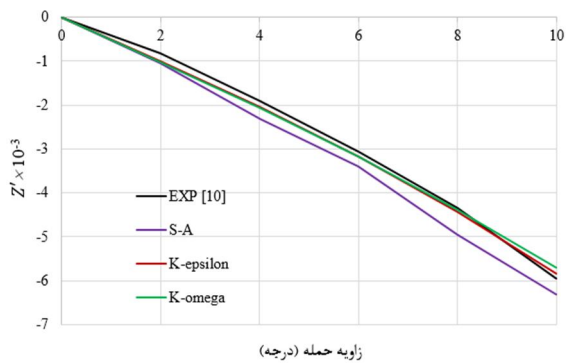
شکل ۵- ضریب مومنتوم پیچ زیرسطحی برای انواع شبکه



شکل ۴- ضریب نیروی برا زیرسطحی برای انواع شبکه



شکل ۷- ضریب مومنتوم پیچ زیرسطحی برای انواع مدل‌های آشفتگی



شکل ۶- ضریب نیروی برا زیرسطحی برای انواع مدل‌های آشفتگی

حمله ۱۰ درجه بررسی شده و مقادیر خطا بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در جدول ۵ آورده شده‌اند.

### ۵- شبیه‌سازی حرکت اجباری هیو در آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای

برای شبیه‌سازی حرکت هیو خالص میدان جریان اطراف مدل به دو قسمت تقسیم شده است. یک میدان جریان

جدول ۵- خطای مدل‌های آشفتگی در زاویه حمله ۱۰ درجه

| ضریب | درصد خطا |             |               |
|------|----------|-------------|---------------|
|      | S-A      | k- $\omega$ | k- $\epsilon$ |
| X'   | ۴۹/۰۷    | ۱۲/۵۱       | ۲/۶۷          |
| Z'   | ۵/۹۲     | ۴/۴۳        | ۲/۱۷          |
| M'   | ۲۱/۱۳    | ۵/۷۸        | ۰/۳۲          |

همانطور که از نمودارها مشخص است، نتایج پس از استفاده از شبکه ریز همگرا شده و شبکه ریز به دلیل اینکه دارای حجم شبکه کمتری نسبت به شبکه خیلی ریز است و در نتیجه حجم و زمان محاسبات را پایین می‌آورد، جهت ادامه کار انتخاب می‌شود.

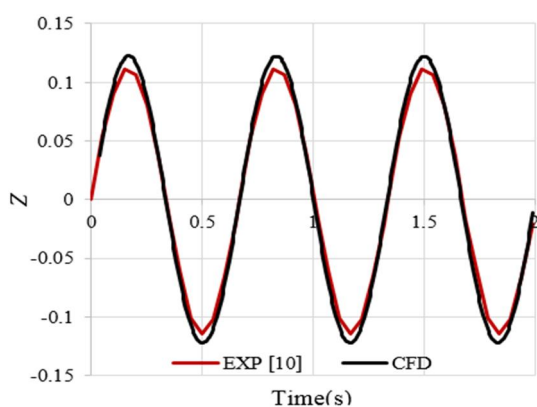
شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم برای سه مدل آشفتگی S-A (Near Wall Treatment: Enhanced k- $\epsilon$ -realizable) و SST k- $\omega$  Wall Treatment) با نتایج تجربی مقایسه شدند تا مدل آشفتگی مناسب برگزیده شود. نتایج شبیه‌سازی همراه با داده‌های تجربی برای نیروی برآ و گشتاور پیچ در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده‌اند.

همانطور که از نمودارها مشخص است، نتایج بدست آمده توسط مدل آشفتگی k- $\epsilon$ -realizable با شرایط کنار دیواره Enhanced Wall Treatment دقیق‌تر از دو مدل دیگر هستند. به‌عنوان نمونه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در زاویه

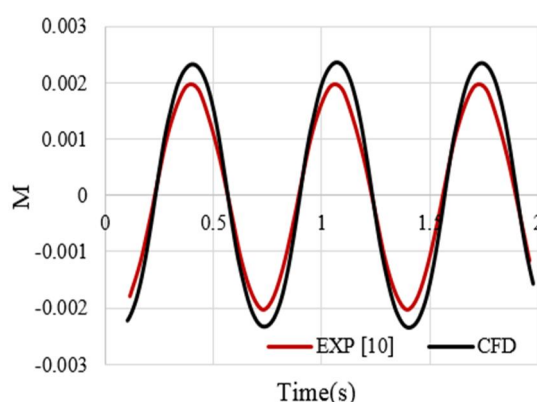
است و مطابقت خوبی بین نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف بیشینه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در لحظه‌ای بیشتر است که ضرایب به قلّه می‌رسد.

جدول ۶- شرایط مرزی شبیه‌سازی حرکت هیو خالص

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| سرعت جریان آزاد (m/s) | ۲/۶۹   |
| بسامد (Hz)            | ۱/۵    |
| دامنه (m)             | ۰/۱    |
| فشار محیط (Pa)        | ۱۵۰۲۷۷ |



شکل ۸- ضریب نیروی Z نسبت به زمان برای حرکت هیو خالص در دامنه ۱۰ cm و بسامد ۱/۵ Hz



شکل ۹- ضریب گشتاور پیچ نسبت به زمان برای حرکت هیو خالص در دامنه ۱۰ cm و بسامد ۱/۵ Hz

کروی که مدل را شامل می‌شود و میدان خارجی که شرایط مرزی ورودی و خروجی روی آن است. یک لایه میانی این دو میدان جریان را هم جدا می‌کند. میدان داخلی قابلیت حرکت در میدان خارجی را دارد و از اینرو شبکه میدان خارجی با زمان تغییر می‌کند، ولی تعداد سلول‌های میدان داخلی ثابت است. در این حالت نیز از شبکه پیوندی برای شبکه‌بندی استفاده شده است.

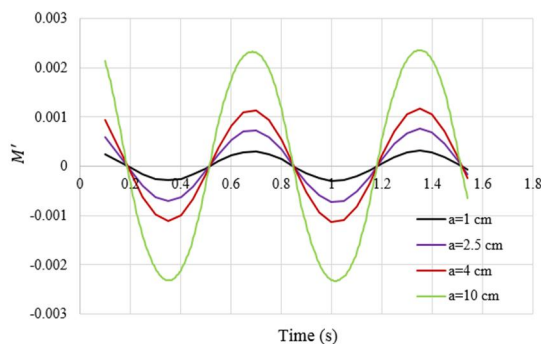
با توجه به اینکه در حرکت هیو خالص، مدل همراه با میدان جریان داخلی حرکت نوسانی سینوسی در جهت قائم انجام می‌دهند؛ بنابراین تحلیل مسئله به صورت گذرا با شبکه متحرک انجام گرفته است. حرکت هیو خالص توسط ماکرو CG\_MOTION به صورت یک کد به برنامه فلونت اعمال می‌شود. کد ارائه شده به نرم‌افزار به صورت یک تابع تعریف شده توسط کاربر (UDF) به نرم‌افزار اعمال می‌شود. این کد در بخش ضمايم ۱ آورده شده است. در آخرین خط فایل UDF باید به جای  $\omega$  مقدار حاصل ضرب عددی دامنه در بسامد و به جای  $\omega$  مقدار عددی آن را جایگذاری کنیم و سپس در نرم‌افزار فراخوانی می‌شود. خروجی نرم‌افزار فلونت به صورت ماتریس ضرایب بی‌بعد برآ و مومنتوم خواهد بود. برای محاسبه مقادیر A و B و در نتیجه یافتن مقادیر ضرایب دینامیکی، باید سری فوریه گسسته مقادیر خروجی از نرم‌افزار فلونت را بدست آید. برای نیل به این هدف، مقادیر خروجی نرم‌افزار را وارد برنامه متلب کرده و با کمک این برنامه سری فوریه گسسته و مقادیر A و B و نهایتاً ضرایب دینامیکی را محاسبه می‌شود. به عنوان نمونه، برنامه مورد استفاده در متلب برای محاسبه سری فوریه گسسته ماتریس خروجی CI برای بسامد ۱/۵ در ضمیمه ۲ آمده است.

شبیه‌سازی حرکت هیو خالص برای شرایطی انجام شد که داده‌های تجربی [۱۳] آن موجود هستند. این شرایط در جدول ۶ داده شده‌اند. تحلیل جریان به صورت ناپایا با گام زمانی  $\Delta t = 0.0025s$  انجام شده است. تعداد تکرار برای هر گام زمانی بین ۲۰ تا ۴۰ امتحان شد که با این گام زمانی تعداد تکرار ۲۵ حالت بهینه بوده است.

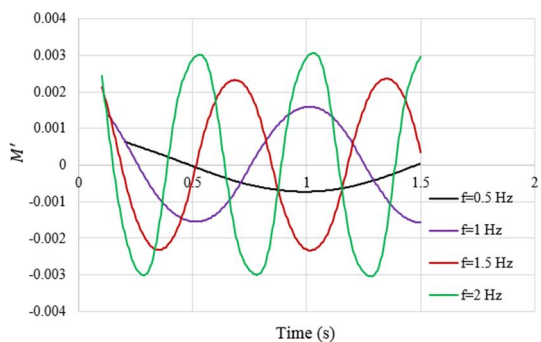
شکل‌های ۸ و ۹ و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج حاصل از داده‌های تجربی [۱۳] را برای ضریب نیروی عمودی Z و ضریب مومنتوم پیچ M نشان می‌دهد. در هر دو شکل تغییرات مقادیر ضرایب برحسب زمان به صورت سینوسی



مربوط می‌شود، به کاهش زمان نوسان مدل در یک دامنه مشخص و تغییر ناگهانی نیروهای اعمالی شده به آن دانست. روند تغییرات ضریب نیروی Z هم در دو حالت مشابه ممان است.



شکل ۱۰- ضریب گشتاور M نسبت به زمان برای بسامد ۱/۵ Hz و دامنه‌های مختلف حرکت هیو خالص



شکل ۱۱- ضریب گشتاور M نسبت به زمان برای دامنه ۱۰ cm و بسامدهای مختلف حرکت هیو خالص

شکل ۱۲ تغییرات ضریب  $Z'_{W'} و Z'_{W}$  را برحسب دامنه نمایش می‌دهد. مقدار قدرمطلق ضریب  $Z'_{W}$  با افزایش دامنه نوسانات افزایش یافته است. این ضریب بیانگر نیروی پسا در راستای قائم است و در خلاف جهت حرکت زیرسطحی اعمال می‌شود. انتظار می‌رود، مقدار آن با افزایش دامنه تحریک زیاد شود که در این شکل نیز چنین است؛ زیرا زمانی که بسامد تحریک ثابت است و دامنه افزایش می‌کند، یعنی در یک دوره زمانی مشخص زیر سطحی یک بازه مکانی بیشتری را در راستای قائم جابجا می‌شود؛ بنابراین نیروی وارده با آن نیز تغییر می‌کند. مقدار دامنه از ۰/۵ cm به مقدار ۱۰ cm افزایش یافته (حدود ۲۰ برابر) که در این صورت افزایش

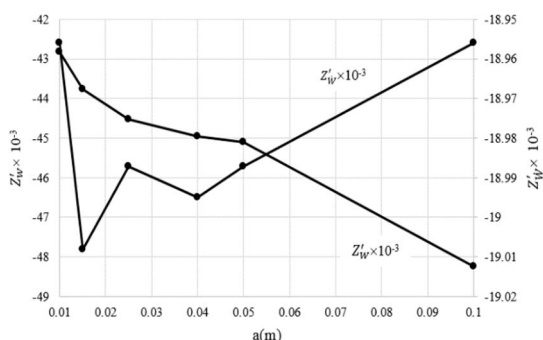
با استفاده از برنامه توسعه داده شده از روی نمودارهای مربوط به هریک از ضرایب، مشتقات دینامیکی بدست می‌آید. مقادیر مشتقات دینامیکی همراه با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۷ آمده است. مقادیر مربوط به ضرایب نیروی عمودی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد و مقدار خطا کمتر از ۵ درصد است؛ ولی مشتقات دینامیکی مربوط به گشتاور تا حداکثر به میزان ۱۸ درصد نیز می‌رسد. شاید کوچک بودن این ضرایب، دلیل بر درصد خطای بالا است.

جدول ۷- ضرایب دینامیکی محاسبه شده از شبیه‌سازی حرکت هیو خالص و داده‌های تجربی

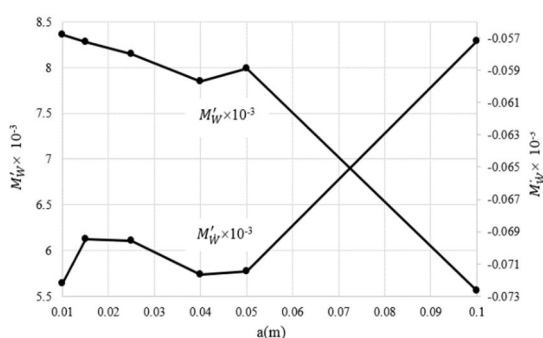
| ضریب      | CFD $\times 10^{-3}$ | EXP $\times 10^{-3}$ | خطا (%) |
|-----------|----------------------|----------------------|---------|
| $Z'_{W'}$ | -۳۰                  | -۲۹/۱۳               | ۳       |
| $Z'_{W}$  | -۱۸/۱۳               | -۱۷/۳۹               | ۴/۳     |
| $M'_{W'}$ | ۵/۵۶                 | ۴/۶۸                 | ۱۸      |
| $M'_{W}$  | -۱۵                  | -۰/۱۷                | ۱۱/۴    |

جهت بررسی اثر تغییرات دامنه روی ضرایب حرکت هیوخالص، شبیه‌سازی برای بسامد ۱/۵ هرتز و محدوده تغییرات دامنه بین یک تا ۱۰ سانتی متر انجام شده است. شکل ۱۰، تغییرات ضریب ممان برحسب زمان را برای بسامد ۱/۵ هرتز به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف نشان می‌دهد. برای تمام دامنه‌های نوسانی روند تغییر ضریب مشابه است. با افزایش دامنه نوسانات، مقدار دامنه ضریب نیز افزایش می‌یابد، ولی محل بیشینه و کمینه ضریب در کلیه حالت در یک زمان اتفاق می‌افتد.

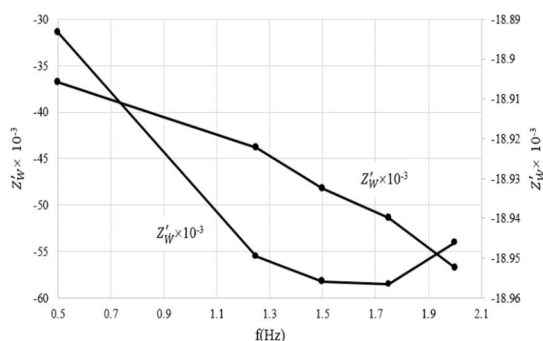
در حالت دوم مقدار دامنه نوسان ثابت نگه داشته شده و تأثیر تغییرات بسامد روی ضرایب بررسی شده است. شکل ۱۱ تغییر ضریب ممان برحسب زمان را برای بسامدهای مختلف نشان می‌دهد. متناسب با بسامدی که مدل نوسان داده شده، تغییرات ضریب ممان نیز نوسان می‌کند. به عبارتی بسامد مربوط به تغییرات ضریب ممان برابر با بسامد تحریک مدل است. مقدار دامنه تغییرات ممان پیچ مربوط به هریک از بسامدها تقریباً ثابت است، ولی دامنه تغییرات با افزایش بسامد تحریک، افزایش یافته است. علت این افزایش



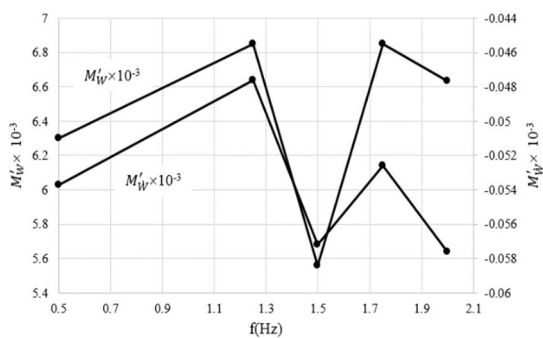
شکل ۱۲- اثر تغییرات دامنه روی ضریب  $Z'_{W'}$  و  $Z''_{W'}$



شکل ۱۳- اثر تغییرات دامنه روی ضریب  $M'_{W'}$  و  $M''_{W'}$



شکل ۱۴- اثر تغییرات بسامد روی ضریب  $Z'_{W'}$  و  $Z''_{W'}$



شکل ۱۵- اثر تغییرات بسامد روی ضریب  $M'_{W'}$  و  $M''_{W'}$

ضریب  $Z'_{W'}$  حدود ۱۳ درصد است. با افزایش مقدار دامنه نوسانات از مقدار اولیه شیب تغییرات نیز تندتر شده است؛ همچنین روند تغییرات ضریب  $Z'_{W'}$  (جرم افزوده ناشی از شتاب خطی مدل در راستای قائم) برحسب دامنه نشان می‌دهد که تغییر دامنه نوسانات مدل تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی این ضریب ندارد، در مقدار این ضریب با افزایش دامنه نوسانات تغییر چندانی ندارد.

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش ۲۰ برابری دامنه، مقدار ضریب  $M'_{W'}$  حدود ۱۸ درصد کاهش پیدا می‌کند؛ همچنین مشخص است که تا دامنه ۵ cm تغییرات ضریب  $M'_{W'}$  کم است، ولی زمانی که دامنه نوسانات به مقدار ۱۰ cm افزایش یابد، مقدار قدرمطلق این ضریب حدود ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.

برای بررسی حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی مربوط به حرکت هیو خالص به بسامد نوسانات مدل، در این حالت مقدار دامنه نوسانات ۱۰ cm ثابت در نظر گرفته شده و با تغییر بسامد از ۰/۵ تا ۲ هرتز بررسی ضرایب صورت گرفته است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش بسامد مقدار مطلق ضریب  $Z'_{W'}$  نیز افزایش می‌یابد، این مقدار افزایش، حدود ۳۵ درصد است. همانند تغییرات دامنه، تغییر بسامد نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی ضریب  $Z'_{W'}$  ندارد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تغییرات ضریب  $Z'_{W'}$  برحسب بسامد کمتر از ۱ درصد است. شکل ۱۵ به ترتیب روند تغییرات ضرایب  $M'_{W'}$  و  $M''_{W'}$  را برحسب بسامد نوسانات مدل نشان می‌دهد. در این حالت رفتار مشخصی بین تغییر ضرایب برحسب بسامد دیده نمی‌شود. با افزایش بسامد مقدار تغییرات بیشینه ضرایب  $M'_{W'}$  و  $M''_{W'}$  به ترتیب ۸ و ۱۷ درصد است.

## ۶- شبیه‌سازی حرکت اجباری پیچ در آزمایش مکانیزم حرکت صفحه‌ای

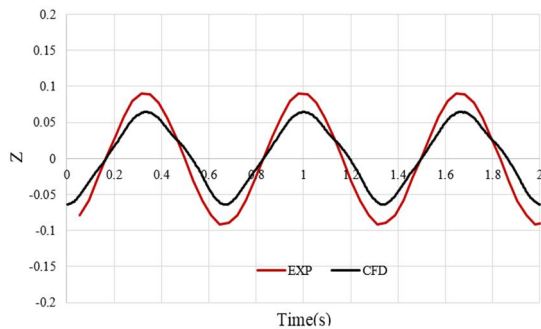
در شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص، هندسه جریان از ۴ ناحیه اصلی تشکیل شده است؛ ناحیه اول ناحیه لایه مرزی حول جسم به منظور ارائه شبکه‌بندی مناسب جهت تخمین بهتر اثرات لایه مرزی است؛ ناحیه دوم موسوم به ناحیه نوسان چرخشی است که شامل یک کره در اطراف جسم است؛ ناحیه سوم موسوم به ناحیه نوسان خطی است که یک هندسه مکعبی است و نهایتاً ناحیه چهارم، موسوم به ناحیه

جدول ۸- شرایط مرزی برای شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص

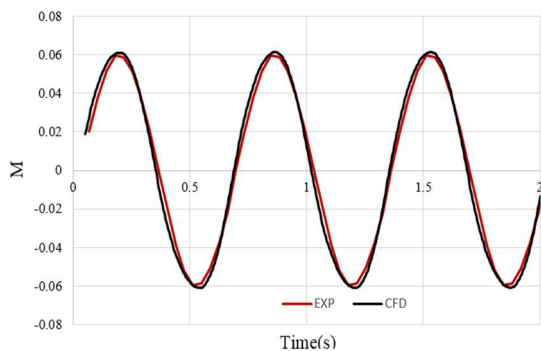
|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| سرعت جریان آزاد (متر بر ثانیه) | ۲/۶۹   |
| دامنه (درجه)                   | ۱۰     |
| بسامد (هرتز)                   | ۱/۵    |
| فشار محیط (پاسکال)             | ۱۵۰۲۷۷ |

جدول ۹- ضرایب دینامیکی محاسبه شده از شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص و داده‌های تجربی

| ضریب   | $CDF \times 10^{-3}$ | $EXP \times 10^{-3}$ | ERROR (%) |
|--------|----------------------|----------------------|-----------|
| $Z'_q$ | -۱۴/۰۱۵              | -۱۱/۲۲               | ۲۵        |
| $Z'_q$ | -۰/۱۳۶               | -۰/۱۶۹               | ۱۹/۵      |
| $M'_q$ | -۴/۷۵                | -۵/۰۴                | ۵/۸       |
| $M'_q$ | -۰/۹۳۷               | -۰/۹۸                | ۴/۴       |



شکل ۱۶- ضریب نیروی Z نسبت به زمان برای شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص در دامنه ۱۰ Deg و بسامد ۱/۵ Hz



شکل ۱۷- ضریب مومنتوم پیچ نسبت به زمان برای شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص در دامنه ۱۰ Deg و بسامد ۱/۵ Hz

تغییر شکل دهنده در اثر حرکت دو ناحیه کروی و مکعبی است که به منظور ایجاد فضای مورد نیاز برای ناحیه و یک پشت جسم است.

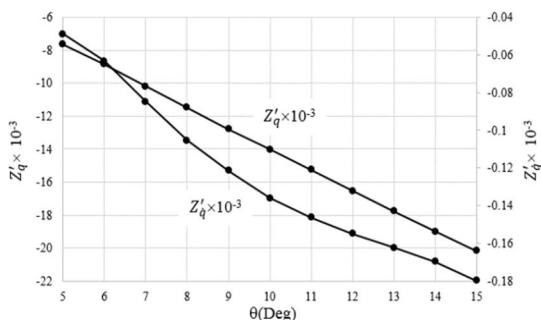
مابقی شرایط مرزی و نحوه استخراج ضرایب هیدرودینامیکی از خروجی‌های نرم‌افزار فلوئنت همانند حرکت هیو انجام شده است. شبیه‌سازی حرکت پیچ خالص برای شرایطی انجام شد که داده‌های تجربی [۱۳] آن موجود هستند. این شرایط در جدول ۸ داده شده‌اند.

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی [۱۳] را برای ضریب نیروی عمودی Z و ضریب مومنتوم پیچ M نشان می‌دهد. در اینجا نیز تغییرات مقادیر ضرایب بر حسب زمان به صورت سینوسی است و مطابقت خوبی بین نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

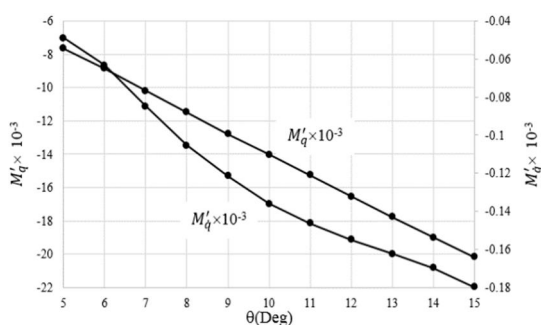
مقادیر مربوط به ضرایب نیروی عمودی تا بیشینه ۲۵ درصد خطا را از خود نشان خواهند داد که البته بدلیل حساسیت بالای این ضرایب نسبت به گرد کردن اعداد است؛ ولی مقادیر ضرایب مربوط به ممان مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و بیشینه خطای آنها کمتر از ۶ درصد خواهد بود.

برای بررسی اثر تغییرات دامنه روی ضرایب حرکت پیچ خالص، شبیه‌سازی برای بسامد ۱/۵ هرتز و محدوده تغییرات دامنه بین ۵ تا ۱۵ درجه انجام شده است. شکل ۱۸ تغییرات ضریب ممان بر حسب زمان را برای بسامد ۱/۵ هرتز به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف نشان می‌دهد. برای تمام دامنه‌های نوسانی روند تغییرات مشابه است. با افزایش دامنه نوسانات، مقدار دامنه ضریب نیز افزایش می‌یابد، ولی محل بیشینه و کمینه ضریب در تمام حالت‌ها در یک زمان اتفاق می‌افتد.

در حالت بعد دامنه نوسان ثابت نگه داشته شده و اثر تغییرات بسامد روی ضرایب حرکت پیچ مورد بررسی قرار گرفت. مقدار دامنه نوسان در این حالت ۱۰ درجه و تغییرات بسامد بین ۱ تا ۲ هرتز در نظر گرفته شد. شکل ۱۹، نحوه تغییرات ضریب ممان را بر حسب زمان برای بسامدهای مختلف نشان می‌دهد. روند تغییرات ضریب نیروی Z هم در دو حالت مشابه ممان است.



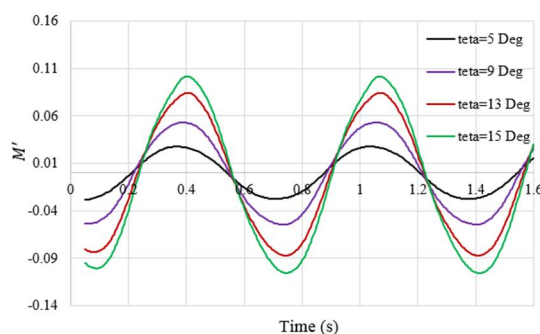
شکل ۲۰- اثر تغییرات دامنه روی ضریب  $Z'_q$  و  $Z''_q$



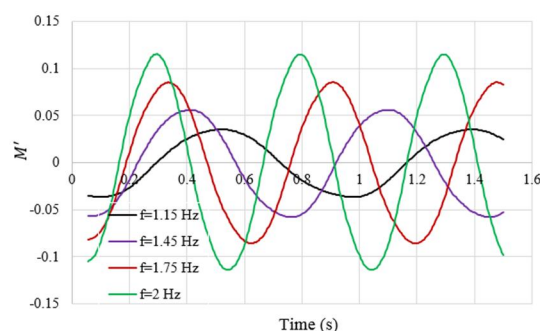
شکل ۲۱- اثر تغییرات دامنه روی ضریب  $M'_q$  و  $M''_q$

را از خود نشان نمی‌دهد. حداکثر تغییرات این ضریب با افزایش ۳ برابری دامنه نوسانات کمتر از ۵ درصد خواهد بود.

شکل ۲۲ نحوه تغییرات ضرایب  $Z'_q$  و  $Z''_q$  را در اثر تغییرات بسامد نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده ضریب  $Z'_q$  با افزایش دو برابری در مقدار بسامد نوسان حدوداً ۵۰ درصد افزایش را در مقدار مطلق خود نشان خواهد داد. ضریب  $Z''_q$  نیز، تحت تاثیر تغییرات بسامد، حدود ۸۰ درصد افزایش در مقدار مطلق خود دارد. شکل ۲۳ تغییرات ضریب  $M'_q$  و  $M''_q$  را بر حسب بسامد نوسان نشان می‌دهد. با توجه به این شکل قدر مطلق ضریب  $M'_q$  با افزایش نوسانات مدل کمتر از ۷۰ درصد افزایش را از خود نشان خواهد داد. با توجه به این شکل، ضریب  $M''_q$  تحت تاثیر تغییرات بسامد نوسانات مدل تغییرات محسوسی را از خود نشان نمی‌دهد. به نحوی که با افزایش دو برابری مقدار بسامد نوسانات مدل این ضریب حداکثر ۸ درصد تغییرات را از خود نشان خواهد داد.



شکل ۱۸- ضریب مومنتوم M نسبت به زمان برای بسامد ۱/۵ Hz و دامنه‌های مختلف حرکت پیچ خالص



شکل ۱۹- ضریب مومنتوم M نسبت به زمان در دامنه ۱۰ Deg و بسامدهای مختلف حرکت پیچ خالص

تغییرات ضریب  $Z'_q$  و  $Z''_q$  بر حسب تغییرات دامنه در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در انتهای بدنه بالک کنترلی وجود دارد، زمانی که زیرسطحی در راستای پیچ سرعت زاویه‌ای پیدا کند، نیرویی در راستای قائم بر آن وارد می‌شود؛ به همین دلیل علامت ضریب  $Z'_q$  منفی شده است. روند تغییر این ضریب با دامنه به صورت خطی تغییر می‌کند. در یک بسامد ثابت با افزایش دامنه تحریک و تقویت نیروهای اعمالی به مدل مقدار ضریب نیز افزایش می‌یابد. با افزایش ۳ برابری مقدار دامنه، افزایشی ۶۰ درصدی را در این ضریب شاهد خواهیم بود. تغییرات ضریب  $Z'_q$  در اثر تغییرات دامنه افزایش تقریباً ۷۰ درصدی در مقدار مطلق این ضریب را نشان می‌دهد.  $M'_q$  تحت تاثیر تغییرات دامنه افزایشی حدود ۸۰ درصد را در مقدار مطلق خود دارد. شکل ۲۱ تغییرات این ضریب را در برابر تغییرات دامنه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ضریب  $M'_q$  با نوسانات دامنه تغییرات محسوسی

۳- در حرکت پیچ خالص با افزایش دامنه و بسامد نوسان مدل، مقادیر قدرمطلق تمامی ضرایب از خود افزایش نشان دادند. این مقدار افزایش، تنها در مقادیر ضریب  $M'_q$  کمتر از ۸ درصد است که می‌توان این فرضیه را تقویت نمود که این ضریب رفتاری مستقل از رفتار دامنه و بسامد دارد.

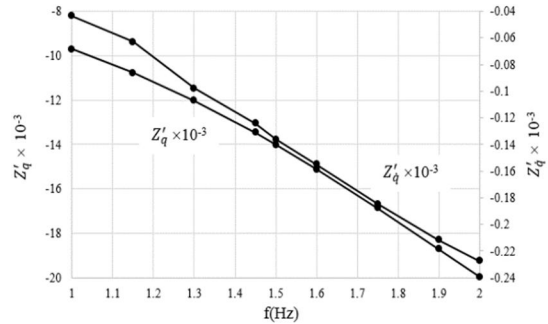
### ۸- فهرست علائم و اختصارات

|   |            |
|---|------------|
| Free-stream Velocity                                    | V          |
| Amplitude of Sinusoidal Function                        | $a_0$      |
| Frequency of Sinusoidal Function                        | f          |
| Time  | t          |
| Z Force Coefficient                                     | $Z'$       |
| Pitch Moment Coefficient                                | $M'$       |
| Z Force Coefficient Derivative with Z Velocity          | $Z'_W$     |
| Pitch Moment Coefficient Derivative with Z Velocity     | $M'_W$     |
| Z Force Coefficient Derivative with Z Acceleration      | $Z''_W$    |
| Pitch Moment Coefficient Derivative with Z Acceleration | $M''_W$    |
| Non-Dimensional Z Velocity                              | $W'$       |
| Non-Dimensional Z Acceleration                          | $\dot{W}'$ |

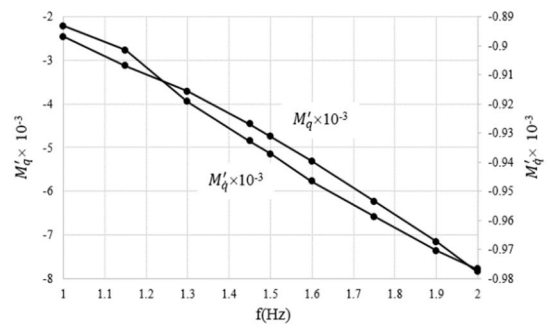
### ۹- ضمائم

```

۱-
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(trans, dt, vel, omega,
time, dtime)
{
    vel[1] = a0*cos(omega*time);
}
۲-
close all
clc
dx=0.005;
    
```



شکل ۲۲- اثر تغییرات بسامد روی ضریب  $Z'_q$  و  $Z''_q$



شکل ۲۳- اثر تغییرات بسامد روی ضریب  $M'_q$  و  $M''_q$

### ۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود و به‌کارگیری شبکه پیوندی تأثیر بسامد و دامنه نوسان مدل روی ضرایب دینامیکی بررسی شد. نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- مقایسه نتایج مربوط به تست کشش با داده‌های تجربی [۱۳] نشان داد که استفاده از ۲۰ لایه سلول در شبکه لایه مرزی و مدل آشفتگی re-k-ε نتایج نزدیکتری به داده‌های تجربی می‌دهد.

۲- برای حرکت هیو خالص:

الف) با تغییر بسامد و دامنه نوسان مدل، مقدار ضریب  $Z'_W$  تقریباً ثابت می‌ماند.

ب) با افزایش دامنه و بسامد مقدار قدرمطلق ضریب  $Z'_W$  افزایش می‌یابد.

ج) تغییر دامنه و بسامد نوسان مدل موجب تغییر ضرایب  $Z'_W$ ،  $M'_W$  و  $M''_W$  تا حدود ۳۵ درصد می‌شود.

- [8] Kim S, Rhee B, Miller R (2012) Anatomy of turbulent flow around DARPA SUBOFF body in a turning maneuver using high-fidelity TANS computations. in 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden.
- [9] Malik SA, Guang P (2013) Transient numerical simulation for hydrodynamic derivatives prediction of an axisymmetric submersible vehicle. Res J Appl Sci Eng Tech 5: 5003-5011.
- [10] Pan Y, Zhang H, Zhou Q (2012) Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation. J Hydrodyn 24(6): 840-847.
- [11] Kimber N, Marshfield W (1993) Design and testing of a control surfaces for the autosub demonstrator test vehicle. Defence Research Agency, Haslar.
- [12] Noori NM, Mostafapour K, Hassanpour SH (2016) CFD modeling of wing and body of an AUV for estimation of hydrodynamic coefficients. J Appl Fluid Mech 9(6): 2717-2729.

```
x=time;
f=C1;
x_length=length(x);
sum_value=0;
for k=1:x_length-1
sum_value=sum_value+dx*f(k)*cos(3*3.1416*x(k));
end
integral_value=3*sum_value;
a_n=integral_value;
sum_value=0;
for k=1:x_length-1
sum_value=sum_value+dx*f(k)*sin(3*3.1416*x(k));
end
integral_value=3*sum_value;
b_n=integral_value;
a_n
b_n
f_new=a_n*cos(3*3.1416*x)+b_n*sin(3*3.1416*x);
plot(x,f,'r*',x,f_new,'k>');
legend('main func','proxi func');
```

[۱۳] جوانمرد اح، منصورزاده ش (۱۳۹۴)، بررسی عددی

حرکت شتابدار یک ربات زیر آبی و تعیین ضرایب جرم افزوده آن. مجله مهندسی دریا ۱۳-۱: ۱۱(۲۲).

- [14] Shadlaghani A, Mansoorzadeh (2016) Calculation of linear damping coefficients by numerical simulation of steady state experiments. J Appl Fluid Mech 9(2): 653-660.
- [15] Agoes Moelyadi M, Bambang Riswandi B (2018) CFD based added mass prediction in cruise condition of underwater vehicle dynamic. 5th International Seminar of Aerospace Science and Technology, IOP Conf.

[۱۶] اردشیری س، موسوی زادگان سح، خردمند س (۱۳۹۸) بررسی تأثیر سرعت و دامنه حرکت در محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور زیرسطحی. مجله مهندسی مکانیک مدرس ۱۲۸-۱۱۷: ۲۰(۱).

[۱۷] راسخ م، مهدی م (۱۳۹۹) تخمین ضرایب هیدرودینامیکی یک بیضی گون با ترکیب فیلتر کالمن توسعه یافته هیبریدی و دینامیک سیالات محاسبات. مجله مهندسی مکانیک شریف ۱۰۸-۹۹: ۳۶(۱).

#### ۱۰- مراجع

- [1] Wu BS, Fu K (2005) Investigation of hydrodynamic characteristic of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods. J Ship Mech 9: 14-17.
- [2] Tyagi A, Sen D (2006) Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using CFD approach. Ocean Eng 33: 798-809.
- [3] Broglia R, Mascio AD, Amati GA (2007) Parallel unsteady RANS code for the numerical simulations of free surface flows. 2nd international conference on marine research and transportation, Ischia (NA), Italy.
- [4] Barros ED, Pascoal A, Sa ED (2008) Progress towards a method for predicting AUV derivatives. University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil.
- [5] Tang S, Tamaki U, Takeshi N, Thornton B, Jiang T (2009) Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND. J Mar Sci Technol 14: 373-386.
- [6] Vaz G, Toxopeus S, Holmes S (2010) Calculation of maneuvering forces on submarines using two viscous-flow solvers. ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

[۷] صادقزاده ب، سیف م، مهدیقلی م (۱۳۹۰) تعیین ضرایب هیدرودینامیکی زیرسطحی به روش تست مدل. مجله مهندسی دریا ۴۲-۳۱: ۷(۱۴).