

بررسی عددی تأثیر دامنه و بسامد نوسان یک AUV روی مشتقات هیدرودینامیکی در حرکت خالص هیو

حسین عدنیان آرائی^۱، میراعلم مهدی^{۲*}

ha.arani@srttu.edu

m.mahdi@srttu.edu

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۶

چکیده

در این مقاله به روش دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد حجم کنترل و با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت، جریان اطراف یک زیرسطحی به صورت پایا و ناپایا شبیه‌سازی شده است. در ابتدا، شبیه‌سازی برای حالت کشش مستقیم صورت گرفته تا با مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نوع شبکه و مدل آشفتگی مناسب انتخاب شود. با استفاده از این روش که به صورت پایا انجام شده، تنها ضرایب استاتیکی قابل محاسبه است. برای شبیه‌سازی حرکت اجباری هیو خالص، میدان جریان به دو ناحیه تقسیم شده که ناحیه مجاور بدنه زیرسطحی همراه با بدنه با اعمال یک برنامه udf نوسان می‌کند. با استفاده از روش شبکه متحرک، سلول‌های میدان بیرونی تغییر کرده و اجازه می‌دهند میدان جریان درونی جابه‌جا شود. بدین ترتیب به صورت ناپایا حرکت هیو خالص شبیه‌سازی می‌شود. در این مقاله تأثیر تغییرات دامنه و بسامد نوسان مدل در حرکت هیو خالص بر مشتقات هیدرودینامیکی بررسی شده است. با توسعه یک برنامه به زبان مطلب نمودارهای خروجی نرم‌افزار فلوئنت به ضرایب دینامیکی تبدیل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ضریب $Z'_{W\dot{w}}$ مستقل از دامنه و بسامد مدل نوسانی است اما با تغییر دامنه و بسامد ضرایب $M'_{W\dot{w}}$ و $Z'_{W\dot{w}}$ تغییر پیدا می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: مشتقات هیدرودینامیکی، زیرسطحی خودکنترل، حرکت هیو خالص، سازوکار حرکت صفحه‌ای

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر در بخش دریا، وسایل بدون سرنشین (AUV) به دلیل کاهش خطرات انسانی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در مهندسی زیرسطحی و عملیات دریایی نیز این موضوع اهمیت ویژه‌ای یافته و به دلیل محدودیت در تأمین توان مورد نیاز برای رانش و تجهیزات جانبی وسیله، تخمین دقیق نیروهای مورد نیاز برای انجام مأموریت 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 به وسیله مدل‌های ریاضی دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مدل ریاضی شامل نیروها و ممان‌های هیدرودینامیکی است که به صورت ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شوند.

دارند. بروگلیا و همکارانش، 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 [۵]. تقریباً پذیرفته شده که شبیه‌سازی‌های آزمایش PMM، روش رایج برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی و ضرایب دمپینگ آن هستند. زیبا و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار CFX به شبیه‌سازی مانور برای زیرسطحی CR-02 پرداخته‌اند [۶]. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای محاسبه مشتقات هیدرودینامیکی مکانی و مدل آشفتگی $k-\omega$ برای ضرایب چرخشی و سایر ضرایب کوپله هیدرودینامیکی به کار گرفته شده است.

باروس و همکارانش، برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی معروف‌ترین AUV ها به مطالعه روش‌های تحلیلی و نیمه تجربی پرداختند. آن‌ها همچنین برای تخمین مشتقات هیدرودینامیکی MAYA AUV برنامه‌ای پیاده‌سازی کردند که از سوی یک شرکت هندی-پرتغالی^۱ در حال توسعه‌یابی است [۷]. تانگ و همکارانش ضرایب دمپینگ اینرسی یک AUV به هندسه پیچیده را با استفاده از روش‌های CFD محاسبه کردند. ابتدا ضرایب به دست 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 به نیروی اینرسی وابسته هستند که می‌توان با استفاده از جریان پتانسیل محاسبه کرد [۸]، واز و همکارانش، با تمرکز بر پیش‌بینی دقیق نیروهای مانورینگ زیرسطحی DARPA SUBOFF به کمک CFD و با استفاده از کد توسعه داده شده در نرم‌افزار اختصاصی MARIN و نرم‌افزار تجاری AcuSolve به محاسبه نیروها و الگوی جریان حول زیرسطحی برای دو حالت بدون بدنه و بدنه کامل پرداختند. نتایج به دست آمده رضایت‌بخش بوده و با داده‌های تجربی همخوانی داشتند [۹]. کیم و همکارانش، از روش CFD برای شبیه‌سازی مانورهای بدنه DARPA SUBOFF استفاده کردند [۱۰]. آن‌ها به بررسی جریان آشفتخته اطراف بدنه پرداختند و از دو مدل آشفتگی Wilcox $k-\omega$ و SST $k-\omega$ برای تحلیل‌های خود استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج

بنابراین برای شبیه‌سازی دقیق کارکرد AUV به دست آوردن مقادیر دقیق این ضرایب ضروری است.

مطمئن‌ترین روش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی یک AUV، انجام آزمایش‌های هیدرودینامیک است. بنابراین آزمایش‌های هیدرودینامیک بخش پرهیزناپذیری 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 ابزار کمکی قدرتمندی در کنار آزمایش‌های هیدرودینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کیمبر و اسکریمشاو، آزمایش‌های بازوی دوار و مکانیزم حرکت صفحه‌ای را برای مدل مقیاس $3/4$ زیرسطحی اتوساب برای تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی وسیله و محاسبه اندازه مناسب و هندسه سطوح کنترلی، انجام دادند [۱]. پرستو برای شبیه‌سازی شش درجه آزادی یک AUV با استفاده از تئوری نواری ضرایب دینامیکی را محاسبه کرد که با مقایسه نمودارهای شبیه‌سازی با داده‌های تجربی معلوم شد که برخی از ضرایب به دست آمده خطای خیلی بالایی دارند [۲].

وو و همکاران، حرکت پایا مستقیم‌الخط 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 مشتقات هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار داده‌اند و مشتقات به دست آمده را با دقت بالایی محاسبه و با نتایج تجربی موجود مقایسه کرده‌اند [۳]. تیاگی و همکارانش به کمک CFD و با استفاده از معادله‌های 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 [۴]. نتایج به دست آمده نشان از دقت روش CFD داشته و نشان می‌دادند که نیروها و گشتاورها با سرعت جانبی رابطه‌ای غیرخطی

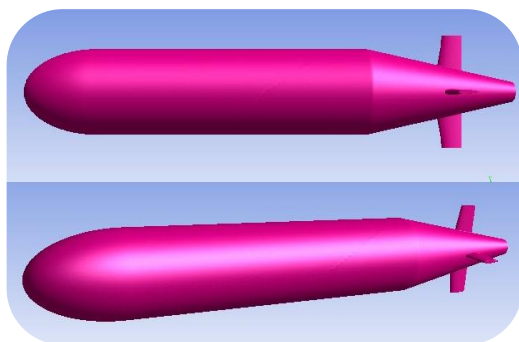
۲. مدل سازی زیرسطحی اتوساب

زیرسطحی اتوساب در سال ۱۹۸۸ توسط شورای پژوهشی محیط زیست بریتانیا^۳ برای برنامه‌های علمی دریایی ساخته شد که می‌تواند اطلاعاتی در مورد آب و خصوصیات آن مانند 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. جدول ۱ مشخصات هندسی زیرسطحی اتوساب را بیان می‌کند و شکل ۱ هندسه سه بعدی مدل را نشان می‌دهد.

اغلب در شبیه‌سازی یک زیرسطحی از ضرایب بی‌بعد استفاده می‌شود که لازم است مقادیر نیرو و ممان به صورت ضریب ارائه شوند. در جدول ۲ پارامترهایی آورده شده است که برای بی‌بعد کردن ضرایب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱: 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

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، به شبیه‌سازی آزمایش PMM به کمک CFD برای هندسه متقارن محوری بیضی‌گون با نسبت ابعادی ۶:۱ پرداخته‌اند و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت 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 [۱۱]. نوری و همکاران، به روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ضرایب دینامیکی بال و بدنه یک AUV را استخراج کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که روش دینامیک سیالات محاسباتی با دقت قابل قبولی قادر به محاسبه ضرایب دینامیکی است [۱۲].

شادلاقانی و منصورزاده، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت پایا برخی از ضرایب دینامیکی خطی را محاسبه کردند که نیاز به هزینه کمتری نسبت به روش ناپایاست [۱۳]. البته این روش قادر به محاسبه تمام ضرایب نیست.

در این مقاله، ابتدا حرکت کشش مستقیم با ۴ شبکه با تعداد سلول‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. سپس با بررسی استقلال از شبکه، شبکه مناسب برای ادامه بررسی‌ها انتخاب شد. همچنین آزمایش کشش مستقیم با سه مدل آشفتگی اسپالارت-آلماراز^۲، $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ شبیه‌سازی شد و مدل آشفتگی مناسب برای ادامه کار برگزیده شد. در ادامه سازوکار حرکت صفحه‌ای برای حرکت هیو خالص شبیه‌سازی شده و اثر تغییرات دامنه و بسامد حرکت روی ضرایب مربوط به این حرکت مورد بررسی قرار گرفته است. در کارهای گذشته، بررسی ضرایب برای یک دامنه و فرکانس خاص بررسی شده است. ولی در این مقاله حساسیت ضرایب حرکت هیو خالص به تغییرات دامنه و فرکانس حرکت نوسانی مورد بررسی قرار داده شده تا مشخص شود با درصد تغییر دامنه و بسامد نوسان مدل هر یک از ضرایب چه مقدار تغییر می‌کنند.

جدول ۲: پارامترهای بی بعد سازی

پارامتر بی بعد سازی	ضریب بی بعد
$\rho V^2 L^2 / 2$	نیرو
$\rho V^2 L^3 / 2$	مومنتوم
$\rho V L^2 W^{1/2}$	Z'_W
$\rho V L^3 W^{1/2}$	M'_W
$\rho L^3 W^{1/2}$	Z'_W
$\rho L^4 W^{1/2}$	M'_W
V	W'
V^2/L	\dot{W}'

برای بررسی دقت نتایج عددی به دست آمده، از شرایط مرزی که داده‌های آزمایشگاهی برای آن موجود است استفاده شده است. مقادیر مربوط به شرایط مرزی در جدول ۳ آورده شده است. شرط مرزی مربوط به ورودی جریان به صورت سرعت ورودی با مقدار $2/69 \text{ m/s}$ به ازای زوایای حمله مختلف است و شرط مرزی خروجی فشار خروجی با مقدار فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است.

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

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

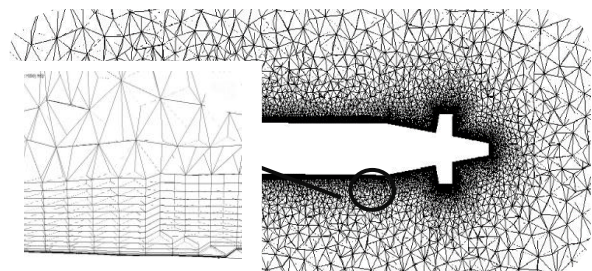
جدول ۴: تعداد سلول‌های انواع شبکه

تعداد سلول	تراکم شبکه
۱۸۹۳۹۳۶	درشت
۲۱۹۴۹۳۰	متوسط
۳۴۲۱۹۶۸	ریز
۴۰۶۲۰۳۸	خیلی ریز

برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت الگوریتم سیمپل^۴ استفاده شده است. همچنین برای ۱۰۰ تکرار اول از روش آپویند مرتبه اول و برای مابقی تکرارها آپویند مرتبه دوم انتخاب شد. شدت آشفتگی^۵ و ضریب ویسکوزیته آشفتگی^۶ هم به ترتیب ۳٪ و ۵٪ در نظر گرفته شده است. برای بررسی همگرایی نتایج افزون بر کنترل کردن مقادیر باقی مانده‌ها، منحنی‌های ضرایب برآ، پسا، ممان و مقادیر γ^+ نیز کنترل شدند. شکل ۳ منحنی مقادیر γ^+ را نمایش می‌دهد.

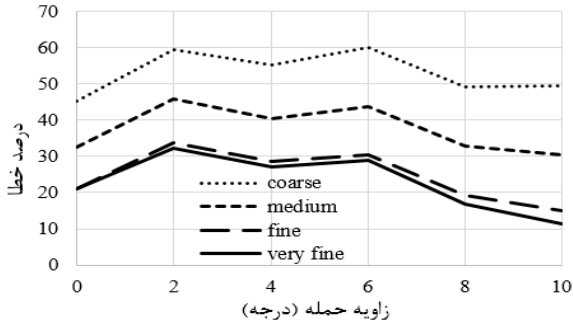
شبکه‌بندی و شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم

برای انتخاب نوع شبکه و مدل آشفتگی مناسب برای استخراج ضرایب هیدرو دینامیکی، ابتدا نتایج مربوط به نیروی محوری، 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 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 به صورت 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 حوزة جریان را نشان می‌دهد. کیفیت شبکه نیز بعد از هر شبکه‌بندی بررسی شده که بیشترین مقدار Skewness شبکه کمتر از ۰/۸۵ است.

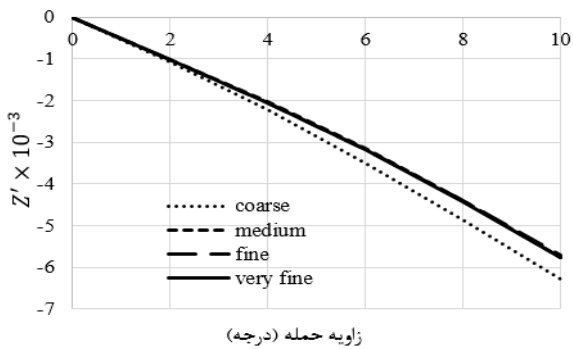


شکل ۲: شبکه لایه مرزی و حجم اطراف مدل و داخل حوزة جریان

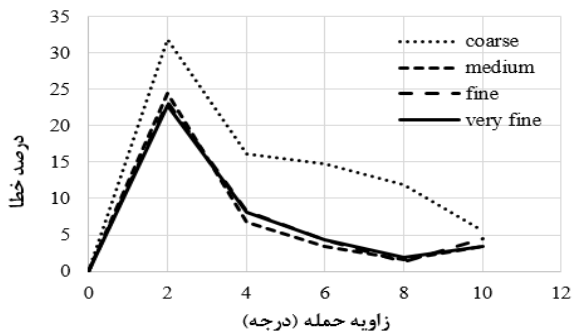
شکل‌های ۶ و ۸ و ۱۰ منحنی درصد خطای محاسبات با مقدار تجربی را برای هر یک از انواع شبکه نمایش می‌دهد.



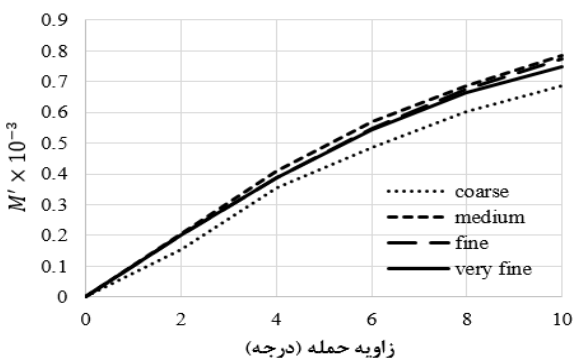
شکل ۶: خطای ضریب نیروی پسای زیرسطحی با مقدار تجربی برای انواع شبکه



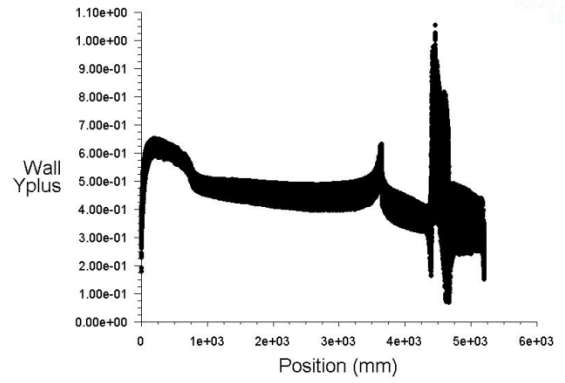
شکل ۷: ضریب نیروی برا زیرسطحی برای انواع شبکه



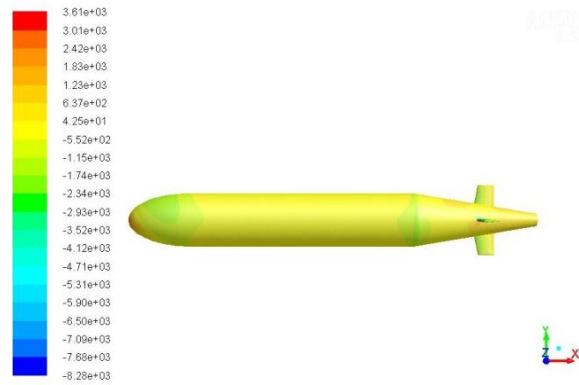
شکل ۸: خطای ضریب نیروی برا زیرسطحی با مقدار تجربی برای انواع شبکه



شکل ۹: ضریب مومنتوم پیچ زیرسطحی برای انواع شبکه

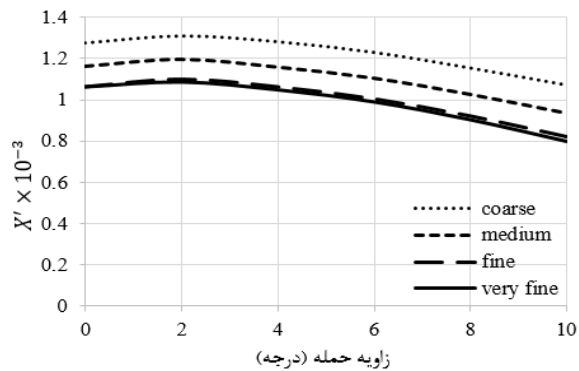


شکل ۳: منحنی مقادیر Y^+



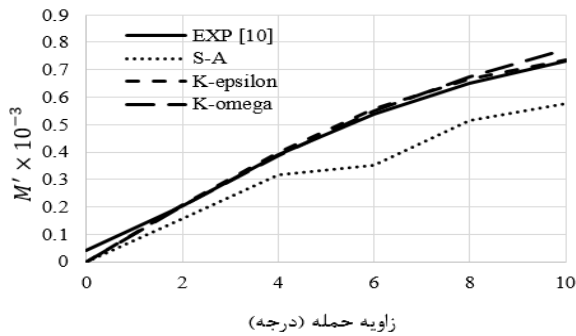
شکل ۴: توزیع فشار استاتیکی روی بدنه

شکل ۴ توزیع فشار استاتیکی را برای سرعت $2/69 \text{ m/s}$ در زاویه حمله 10° روی بدنه AUV نشان می‌دهد. به دلیل زاویه حمله جریان شرایط سکون در زیر دماغه تشکیل شده است.



شکل ۵: ضریب نیروی پسای زیرسطحی برای انواع شبکه

شکل‌های ۵ و ۷ و ۹ منحنی‌های رسم شده از نتایج به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم برای ضرایب نیروهای پسای، برآ و مومنتوم را نشان می‌دهد و



شکل ۱۲: ضریب مومنتوم پیچ زیرسطحی برای انواع مدل‌های آشفتگی

همان‌طور که از نمودارها مشخص است، نتایج به دست آمده با مدل آشفتگی k-ε دقیق‌تر از دو مدل دیگر هستند. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در زاویه حمله ۱۰ درجه بررسی شده و مقادیر خطا بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در جدول ۶ آورده شده‌اند.

جدول ۶: خطای مدل‌های آشفتگی در زاویه حمله ۱۰ درجه

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

نتایج مدل k-ε در توافق خوبی با داده‌های تجربی هستند و انتظارات شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم را برآورده می‌سازند.

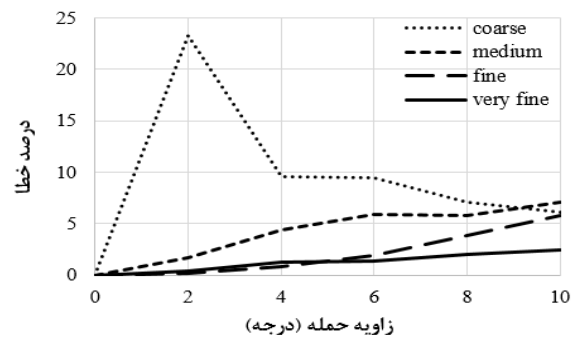
۴. شبیه‌سازی حرکت اجباری هیو در آزمایش سازوکار حرکت صفحه‌ای

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 به دست آورد. با توجه به مانوری که یک زیرسطحی دارد مقدار نیروی Z و ممان پیچ M از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z = (m - Z_W)\dot{W} + (m x_G - Z_q)\dot{q} - Z_W W + (m U_0 - Z_q)q$$

$$M = (m x_G - M_W)\dot{W} + (I_z - M_q)\dot{q} - M_W W + (m x_G U_0 - M_q)q$$

(۱)



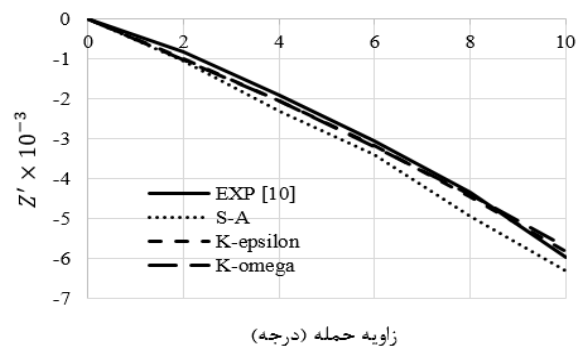
شکل ۱۰: خطای ضریب مومنتوم پیچ زیرسطحی با مقدار تجربی برای انواع شبکه

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

شبیه‌سازی آزمایش کشش مستقیم برای سه مدل آشفتگی (Near Wall Treatment: Enhanced Wall k-ε, S-A Treatment) و SST k-ω انجام شد و با نتایج تجربی مقایسه شدند تا مدل آشفتگی مناسب برگزیده شود. نتایج شبیه‌سازی همراه با داده‌های تجربی برای نیروی برآ و مومنتوم پیچ در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده‌اند. همچنین چون داده‌های تجربی برای نیروی پسا فقط در زاویه حمله صفر درجه موجود بودند، جدول ۵ مقادیر این نیرو را برای هر سه روش و روش تجربی با هم مقایسه می‌کند.

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی برای نیروی پسا در زاویه حمله صفر درجه

مدل آشفتگی	S-A	k-ω	k-ε	Exp[10]
نیروی پسا (N)	۱۸۵	۱۰۸/۵۷	۱۲۰/۷۸	۱۲۴/۱



شکل ۱۱: ضریب نیروی پسا زیرسطحی برای انواع مدل‌های آشفتگی

و در نهایت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} Z' &= -Z'_W \cdot \dot{W}' - Z'_W \cdot W' \\ M' &= -M'_W \cdot \dot{W}' - M'_W \cdot W' \end{aligned} \quad (۶)$$

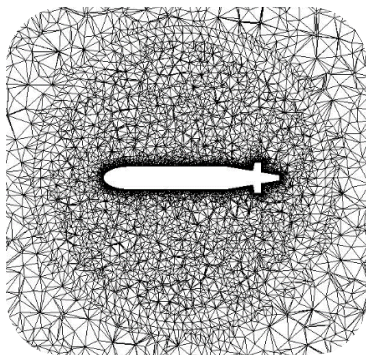
همچنین سری فوریه ضرایب به صورت رابطه (۷) است.

$$\begin{aligned} Z' &= A \cos \omega t + B \sin \omega t \\ M' &= A \cos \omega t + B \sin \omega t \end{aligned} \quad (۷)$$

با برابر قراردادن روابط (۵) و (۷)، ضرایب هیو خالص به صورت ترکیبی از توابع سینوس (ضریب A) و کسینوس (ضریب B) به دست می آیند که با توجه به خروجی عددی نرم افزار به این صورت خواهند بود:

$$\begin{aligned} Z'_W &= \frac{-AV}{a\omega}, & Z'_W &= \frac{BV^2}{a\omega^2 L} \\ M'_W &= \frac{-AV}{a\omega}, & M'_W &= \frac{BV^2}{a\omega^2 L} \end{aligned} \quad (۸)$$

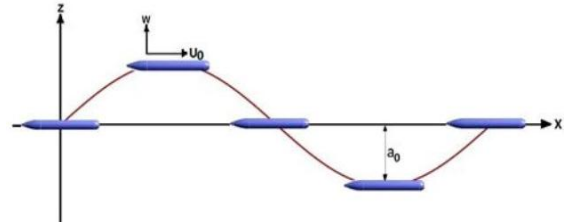
برای شبیه سازی حرکت هیو خالص میدان جریان اطراف مدل به دو قسمت تقسیم شده است. یک میدان جریان کروی که مدل را شامل می شود و میدان خارجی که شرایط مرزی ورودی و خروجی روی آن است. یک لایه میانی این دو میدان جریان را هم جدا می کند. میدان داخلی قابلیت حرکت در میدان خارجی را دارد و از اینرو شبکه میدان خارجی با زمان تغییر می کند؛ ولی تعداد سلول های میدان داخلی ثابت است. شکل ۱۴ شبکه بندی ایجاد شده در این دو میدان جریان را نشان می دهد. در این حالت نیز از شبکه پیوندی برای شبکه بندی استفاده شده است.



شکل ۱۴: شبکه بندی حرکت هیو

با توجه به این که در حرکت هیو خالص، مدل همراه با میدان جریان داخلی حرکت نوسانی سینوسی در جهت قائم انجام می دهند؛ بنابراین تحلیل مسئله به صورت ناپایا با شبکه متحرک انجام گرفته است. حرکت هیو خالص توسط ماکرو

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 به دست می آیند. در حرکت هیو خالص از دید ناظر متصل به بدنه، جسم فقط در جهت عمود بر محور Z حرکت می کند. بنابراین مقادیر q و \dot{q} در این حرکت برابر صفر خواهند بود. شکل ۱۳ حرکت هیو خالص را نشان می دهد.



شکل ۱۳: حرکت هیو خالص

با توجه به نکات گفته شده، معادله های دینامیکی حاکم بر این حرکت به صورت زیر در خواهند آمد.

$$\begin{aligned} Z &= -Z'_W \cdot \dot{W} + Z'_W \cdot W \\ M &= -M'_W \cdot \dot{W} - M'_W \cdot W \end{aligned} \quad (۲)$$

در صورتی که زیرسطحی در راستای قائم به صورت سینوسی حرکت کند روابط مربوط به سرعت و شتاب در این راستا به صورت زیر است:

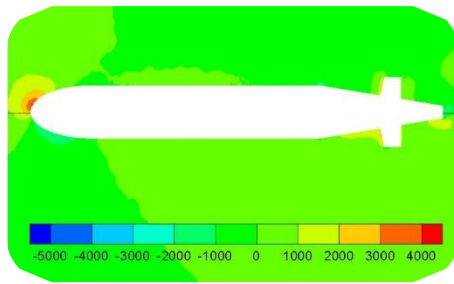
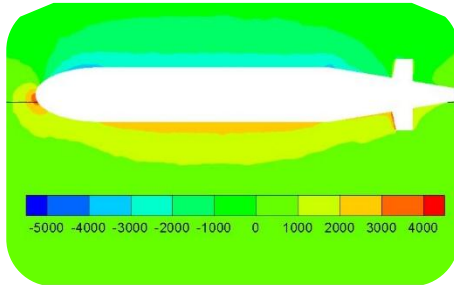
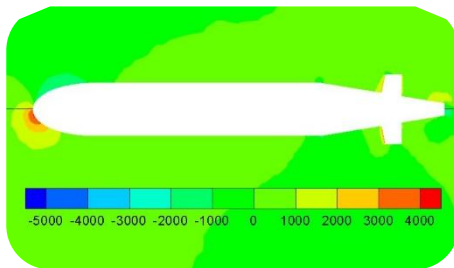
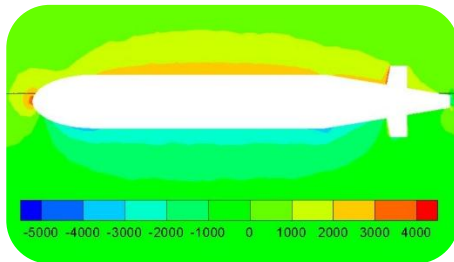
$$\begin{aligned} z &= a \sin \omega t \\ W &= \dot{z} = a\omega \cos \omega t \\ \dot{W} &= \ddot{z} = -a\omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (۳)$$

با جایگذاری معادله های (۳) در سری معادله های (۲) و اعمال پارامترهای بی بعدسازی ضرایب (جدول ۲) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{Z}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} &= \frac{a_0 \omega^2}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} Z'_W \sin \omega t - \frac{a_0 \omega}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} Z'_W \cos \omega t \\ \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} &= \frac{a_0 \omega^2}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} M'_W \sin \omega t - \frac{a_0 \omega}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} M'_W \cos \omega t \end{aligned} \quad (۴)$$

در نتیجه:

$$\begin{aligned} Z' &= \frac{Z'_W}{\dot{W}} \frac{a_0 \omega^2 \sin \omega t}{\frac{1}{2}\rho L^3} - \frac{Z'_W}{W} \frac{a_0 \omega \cos \omega t}{\frac{1}{2}\rho V L^2} \\ M' &= \frac{M'_W}{\dot{W}} \frac{a_0 \omega^2 \sin \omega t}{\frac{1}{2}\rho L^4} - \frac{M'_W}{W} \frac{a_0 \omega \cos \omega t}{\frac{1}{2}\rho V L^3} \end{aligned} \quad (۵)$$

الف: $t = 0$ ب: $t = T/4$ پ: $t = T/2$ ت: $t = 3T/4$

شکل ۱۵: توزیع فشار استاتیکی

در صفحه میانی میدان جریان در زمان‌های مختلف

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج حاصل از داده‌های تجربی [۱] 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 است و مطابقت خوبی بین نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف بیشینه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در لحظه‌ای که ضرایب به قله می‌رسد بیشتر است.

CG_MOTION به صورت یک کد به برنامه فلونت اعمال می‌شود. کد ارائه شده به نرم‌افزار به صورت یک تابع تعریف شده از سوی کاربر (UDF) به نرم‌افزار اعمال می‌شود. این کد در بخش پیوست ۱ آورده شده است.

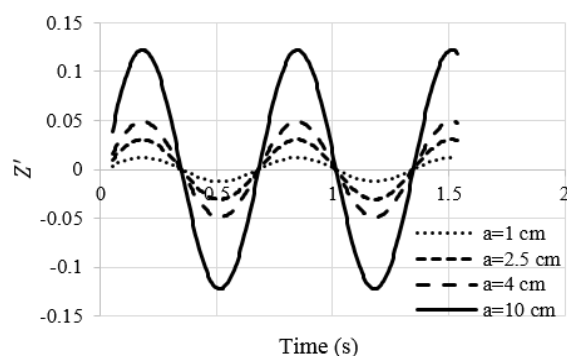
در آخرین خط فایل UDF باید به جای $a\omega$ مقدار حاصل ضرب عددی دامنه در بسامد و به جای ω مقدار عددی آن را جایگذاری کنیم و در نرم‌افزار فراخوانی شود. خروجی نرم‌افزار فلونت به صورت ماتریس ضرایب بی‌بعد برآ و مومنتوم خواهد بود. برای محاسبه مقادیر A و B و در نتیجه یافتن مقادیر ضرایب دینامیکی (معادله‌های ۴) باید سری فوریه گسسته مقادیر خروجی از نرم‌افزار فلونت را به دست 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 در نهایت ضرایب دینامیکی محاسبه می‌شود.

شبیه‌سازی حرکت هیو خالص برای شرایطی که داده‌های تجربی [۱] آن موجود هستند انجام شد. این شرایط در جدول ۷ داده شده‌اند. تحلیل جریان به صورت ناپایا با گام زمانی $\Delta t = 0.0025s$ انجام شده است. توزیع فشار استاتیکی در صفحه میانی میدان جریان در زمان‌های مختلف در شکل ۱۵ آمده است. در لحظه شروع که هندسه به طرف بالا حرکت می‌کند، نقطه سکون در قسمت بالای دماغه تشکیل شده است. با گذشت زمان به اندازه یک چهارم دوره تناوب هندسه به نقطه بالایی می‌رسد (شکل ۱۵ ب) تشکیل ناحیه پرفشار در قسمت زیر هندسه به دلیل شتاب منفی هندسه است. با گذشت زمان دوباره به حالت قبلی خود برگشته و ارتفاع آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۵-پ و ت موقعیت مکانی و توزیع فشار را به ترتیب در لحظه $T/2$ و $3T/4$ نشان می‌دهد.

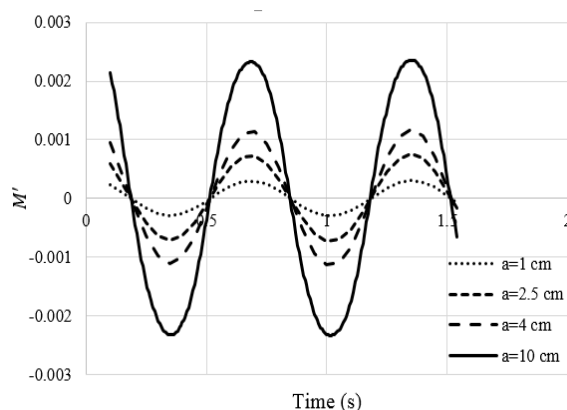
جدول ۷: شرایط مرزی شبیه‌سازی حرکت هیو خالص

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

برای بررسی اثر تغییرات دامنه روی ضرایب حرکت هیوخالص، شبیه‌سازی برای بسامد ۱/۵ هرتز و محدوده تغییرات دامنه بین یک تا ۱۰ سانتی‌متر انجام شده است. شکل ۱۸ تغییرات ضریب نیروی Z 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 همه حالت‌ها در یک زمان اتفاق می‌افتد. تغییرات ضریب ممان نیز مشابه حالت قبل است. افزایش دامنه نوسان مدل موجب افزایش دامنه ضریب شده است (شکل ۱۹).

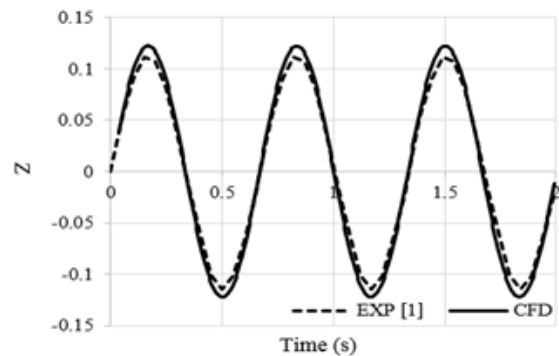


شکل ۱۸: ضریب نیروی Z نسبت به زمان برای بسامد ۱/۵ Hz و دامنه‌های مختلف حرکت هیو خالص



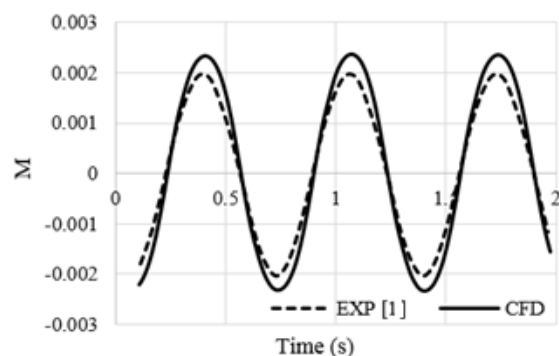
شکل ۱۹: ضریب گشتاور M نسبت به زمان برای بسامد ۱/۵ Hz و دامنه‌های مختلف حرکت هیو خالص

در حالت دوم مقدار دامنه نوسان ثابت نگه داشته شده و تأثیر تغییرات بسامد روی ضرایب بررسی شده است. شکل ۲۰ تغییر ضریب نیروی Z برحسب زمان را برای بسامدهای مختلف نشان می‌دهد. در این حالت افزایش بسامد نوسان



شکل ۱۶: ضریب نیروی Z نسبت به زمان برای حرکت هیو خالص در دامنه ۱۰ cm و بسامد ۱/۵ Hz

با استفاده از برنامه توسعه داده شده از روی نمودارهای مربوط به هر یک از ضرایب، مشتقات دینامیکی به دست می‌آید. مقادیر مشتقات دینامیکی همراه با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۸ 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 ممان تا حد اکثر به میزان ۱۸ درصد نیز می‌رسد. شاید کوچک بودن این ضرایب دلیل بر درصد خطای بالاست.

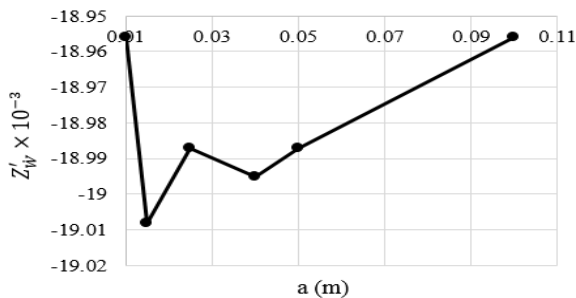


شکل ۱۷: ضریب مومنوم پیچ نسبت به زمان برای حرکت هیو خالص در دامنه ۱۰ cm و بسامد ۱/۵ Hz

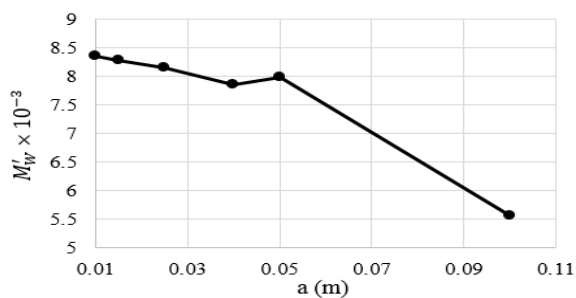
جدول ۸: ضرایب دینامیکی محاسبه شده از شبیه‌سازی حرکت هیو خالص و داده‌های تجربی

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

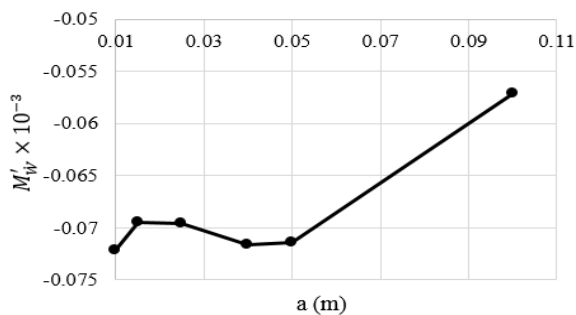
می‌کند. در شکل ۲۴ مشخص است که تا دامنه ۵ cm تغییرات ضریب $M'_{W'}$ کم است ولی زمانی که دامنه نوسانات به مقدار ۱۰ cm افزایش یابد، مقدار قدرمطلق این ضریب حدود ۲۱ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۲: اثر تغییرات دامنه روی ضریب $Z'_{W'}$



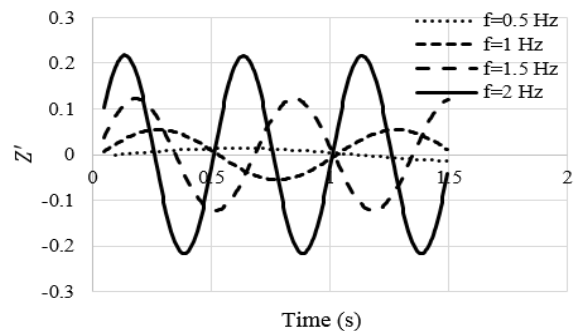
شکل ۲۳: اثر تغییرات دامنه روی ضریب $M'_{W'}$



شکل ۲۴: اثر تغییرات دامنه روی ضریب $M'_{W'}$

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 ۲۵ 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 ۲۶ نشان می‌دهد

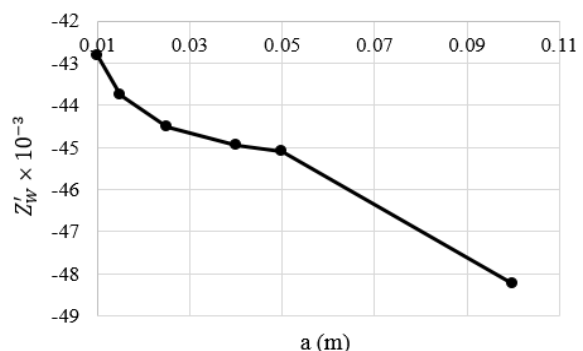
افزون بر اینکه دامنه ضریب را افزایش می‌دهد، بسامد تغییرات ضریب را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین دیگر نقاط بیشینه و کمینه ضریب در بسامدهای مختلف در زمان مشابه اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۲۰: ضریب نیروی Z نسبت به زمان

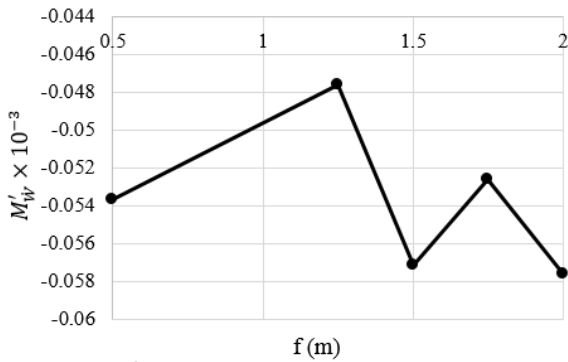
برای دامنه ۱۰ cm و بسامدهای مختلف حرکت هیو خالص

شکل ۲۱ تغییرات ضریب $Z'_{W'}$ را برحسب دامنه نمایش می‌دهد. مقدار قدرمطلق ضریب $Z'_{W'}$ با افزایش دامنه نوسانات افزایش یافته است. مقدار دامنه از ۰/۵ cm به مقدار ۱۰ cm افزایش یافته (حدود ۲۰ برابر) که در این صورت افزایش ضریب حدود ۱۳ درصد است. با افزایش مقدار دامنه نوسانات از مقدار اولیه شیب تغییرات نیز تندتر شده است. روند تغییرات ضریب $Z'_{W'}$ برحسب دامنه در شکل ۲۲ آمده است. در این حالت تغییر دامنه نوسانات مدل تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی این ضریب ندارد و در مقدار این ضریب با افزایش دامنه نوسانات نیز تغییر چندانی ندارد.



شکل ۲۱: اثر تغییرات دامنه روی ضریب $Z'_{W'}$

افزایش دامنه نوسانات مدل مقدار ضریب $M'_{W'}$ را کاهش می‌دهد. شکل ۲۳ نشان می‌دهد که با افزایش ۲۰ برابری دامنه، مقدار ضریب $M'_{W'}$ حدود ۱۸ درصد کاهش پیدا



شکل ۲۸: اثر تغییرات بسامد روی ضریب M'_W

جدول ۹: اثر تغییرات دامنه و فرکانس روی ضرایب حرکت هیو خالص

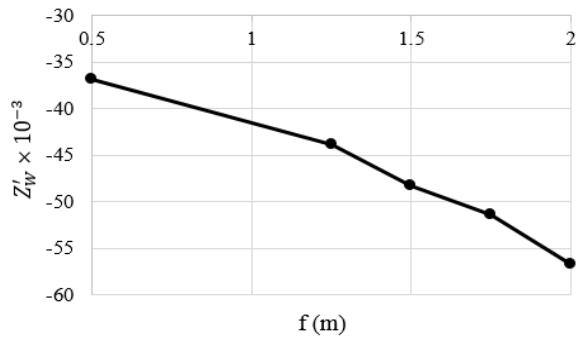
ضریب	بیشینه تغییر ضریب در اثر تغییرات دامنه (درصد)	بیشینه تغییر ضریب در اثر تغییرات بسامد (درصد)
Z'_W	۱۳	۳۵
Z''_W	۰/۳	۰/۴
M'_W	۳۳	۸
M''_W	۲۱	۱۷

۵. نتیجه گیری

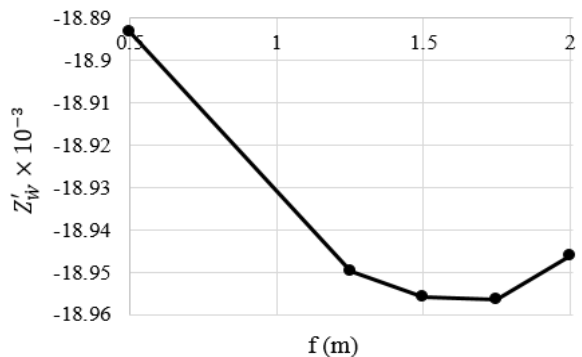
با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود و به کارگیری شبکه پیوندی تأثیر بسامد و دامنه نوسان مدل روی ضرایب دینامیکی بررسی شد. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- ۱- مقایسه نتایج مربوط به آزمایش کشش با داده‌های تجربی [۱] 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- با تغییر بسامد و دامنه نوسان مدل، مقدار ضریب Z'_W تقریباً ثابت می‌ماند؛
- ۳- با افزایش دامنه و بسامد مقدار قدرمطلق ضریب Z'_W افزایش می‌یابد؛
- ۴- تغییر دامنه و بسامد نوسان مدل موجب تغییر ضرایب M'_W ، Z'_W و M''_W تا حدود ۳۵ درصد می‌شود.

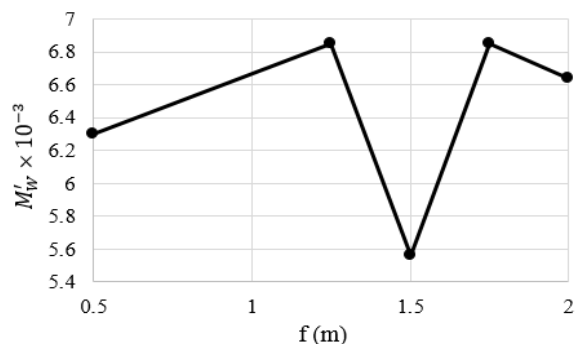
که تغییرات ضریب Z'_W برحسب بسامد کمتر از ۱ درصد است. شکل‌های ۲۷ و ۲۸ به ترتیب روند تغییرات ضرایب M'_W و M''_W را برحسب بسامد نوسان مدل نشان می‌دهد. در این حالت رفتار مشخصی بین تغییر ضرایب برحسب بسامد دیده نمی‌شود. با افزایش بسامد مقدار تغییرات بیشینه ضرایب M'_W و M''_W به ترتیب ۸ و ۱۷ درصد است.



شکل ۲۵: اثر تغییرات بسامد روی ضریب Z'_W



شکل ۲۶: اثر تغییرات بسامد روی ضریب Z'_W



شکل ۲۷: اثر تغییرات بسامد روی ضریب M'_W

unmanned underwater vehicle. Robot. 2007;29(2):145-50.

- [7] De Barros EA, Pascoal A, De Sá E. Progress towards a method for predicting AUV derivatives. Proc. IFAC Manoeuvring Control Marine Crafts. 2006 Sep.
- [8] Tang S, Ura T, Nakatani T, Thornton B, Jiang T. Estimation of the hydrodynamic coefficients of the complex-shaped autonomous underwater vehicle TUNA-SAND. Journal of marine science and technology. 2009 Sep 1;14(3):373-86.
- [9] Vaz G, Toxopeus S, Holmes S. Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers. ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; 2010 Jun; Shanghai, China. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2010.
- [10] Kim SE, Rhee BJ, Miller RW. Anatomy of turbulent flow around DARPA SUBOFF body in a turning maneuver using high-fidelity RANS computations. International Shipbuilding Progress. 2013 Jan 1;60(1-4):207-31.
- [11] Malik SA, Guang P. Transient numerical simulations for hydrodynamic derivatives predictions of an axisymmetric submersible vehicle. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013;5(21):5003-11.
- [12] Nouri NM, Mostafapour K, Hassanpour SH. CFD Modeling of Wing and Body of an AUV for Estimation of Hydrodynamic Coefficients. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016 Dec 1;9(6).
- [13] Shadlaghani A, Mansoorzadeh S. Calculation of Linear Damping Coefficients by Numerical Simulation of Steady State Experiments. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2016;9(2):653-60.

پی نوشت

1. Indian-Portuguese
2. Spalart-Allmaras
3. UK National Environment research Council
4. Simple
5. Turbulent Intensity
6. Turbulent Viscosity Ratio

۶. فهرست علائم و اختصارات

- **L** Length of Test-case Model
- **V** Free-stream Velocity
- **a₀** Amplitude of Sinusoidal Function
- **f** Frequency of Sinusoidal Function
- **t** Time
- **Z'** Z Force Coefficient
- **M'** Pitch Moment Coefficient
- **Z'_w** Z Force Coefficient Derivative with Z Velocity
- **M'_w** Pitch Moment Coefficient Derivative with Z Velocity
- **Z'_w** Z Force Coefficient Derivative with Z Acceleration
- **M'_w** Pitch Moment Coefficient Derivative with Z Acceleration
- **W'** Non-Dimensional Z velocity
- **W'_w** Non-Dimensional Z acceleration
- **W** Z velocity
- **W_w** Z acceleration

۷. پیوست

1-

```
#include "udf.h"
DEFINE_CG_MOTION(trans, dt, vel, omega,
time, dtime)
{
    vel[1] = a*omega*cos(omega*time);
}
```

مراجع

- [1] Kimber N, Marshfield W. Design and testing of control surfaces for the autosub demonstrator test vehicle. DRA Haslar Report F. 1993; 3.
- [2] Prestero TT. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle [dissertation]. Massachusetts institute of technology; 2001.
- [3] Wu BS, Xing F, Kuang XF, Miao QM. Investigation of hydrodynamic characteristics of submarine moving close to the sea bottom with CFD methods. 2005 Jun 1;9(3):19-28.
- [4] Tyagi A, Sen D. Calculation of transverse hydrodynamic coefficients using computational fluid dynamic approach. Ocean Engineering. 2006 Apr 1;33(5-6):798-809.
- [5] Broglia R, Di Mascio A, Amati G. A Parallel Unsteady RANS Code for the Numerical Simulations of Free Surface Flows. 2nd International Conference on Marine Research and Transportation; 2007 Jun; Ischia, Naples, Italy.
- [6] H Hu ZQ, Lin Y, Gu HT. On numerical computation of viscous hydrodynamics of