

آنالیز عددی هیدرودینامیکی الگوی موج تولید شده ناشی از حرکت ربات خودکار زیرآبی Suboff 5470 نزدیک سطح آزاد

مسیح هنرمند^۱، امیر هنریار^۲، محمود غیائی^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه اصفهان؛ honarmand.masih@yahoo.com

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ yarehonar@aut.ac.ir

^{۳*} استادیار، دانشکده‌ی مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ mghiasi@aut.ac.ir

چکیده

الگوی موج ایجاد شده ناشی از حرکت ربات خودکار زیرآبی نزدیک سطح آزاد سیال، یکی از فاکتورهای مهم در شناسایی شناور به شمار می‌آید. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D در ابتدا پس از شبیه‌سازی حرکت جریان با سرعت ثابت در اطراف کشتی Wigley، با مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی موجود، صحت نتایج نرم‌افزار در تخمین الگوی موج ایجاد شده ناشی از وجود مانع صلب در مسیر جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس الگوی موج ایجاد شده در سطح آزاد جریان در اثر حرکت متحرک Suboff 5470 نزدیک سطح آزاد با سرعت‌های مختلف به همراه نیروهای لیفت و درگ وارد بر بدنه‌ی آن مورد بررسی قرار گرفتند. از موارد نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیق‌های قبلی صورت گرفته در زمینه‌ی بررسی الگوی موج ایجاد شده ناشی از حرکت ربات خودکار آبی نزدیک سطح آزاد آب می‌توان به حرکت جسم متحرک درون آب به جای حرکت جریان با سرعت ثابت اطراف ربات خودکار ثابت اشاره کرد. نتایج نشان می‌دهند، در صورت ثابت بودن عمق حرکت متحرک، با افزایش سرعت حرکت متحرک از ۱/۳ به ۶/۵ متر بر ثانیه، نیروی درگ خودکار زیرآبی نزدیک سطح آزاد آب به صورت الگوی موج کلونین با امواج واگرا و عرضی می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

کلمات کلیدی:

الگوی موج

ربات خودکار زیرآبی

Flow 3D

Suboff 5470^۱

کشتی Wigley

Hydrodynamic Numerical Analysis of Wave Pattern Due to the Motion of Suboff 5470 Underwater Vehicle Near the Free Surface

Masih Honarmand¹, Amir Honaryar², Mahmoud Ghiasi^{3*}

¹ Postgraduate Student in Water and Hydraulic Structures, Department of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan; honarmand.masih@yahoo.com

² PhD Candidate Student in Marine Engineering, Department of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; yarehonar@aut.ac.ir

^{3*} Assistant professor, Department of Marine Engineering, Amirkabir University of Technology; mghiasi@aut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 13 Mar. 2018

Accepted: 13 Feb. 2019

Keywords:

Wave Pattern

Autonomous Underwater

Vehicle

Flow 3D

Suboff 5470

Wigley Hull

ABSTRACT

The wave pattern generated by motion of autonomous underwater vehicle (AUV) near the water free surface is one of the significant factors in order to identify the AUV. In this research, firstly simulating the flow with constant velocity around the Wigley hull body by using Flow 3D computational fluid dynamics software has been carried out. In this stage, the numerical simulation results were compared with experimental datasets. The validity of Flow 3D software in estimating of wave pattern generated by the rigid obstacle which sets in the flow path was investigated. Then, the wave pattern due to the motion of Suboff 5470 AUV at different depths, moreover, the lift and drag forces applied on the AUV body were investigated. The results reveal that in constant depth of AUV motion, when the speed of AUV is increasing from 1.3 to 6.5 m/s, the drag and lift forces are increasing up to 57.17 and 48.97 percent respectively. Also the wave pattern generated by motion of autonomous underwater vehicle (AUV) near the water free surface is kelvin wave pattern with divergent and transverse waves system.

۱ - مقدمه

اهمیت بالای منابع اقیانوسی، نیاز به وسایل زیرآبی با کاربردهایی نظیر اکتشافات بستر دریا، بازرسی و حفاظت زیست محیطی شامل نقشه‌برداری از بستر دریا و نیز کاربردهای تجاری همچون لوله‌گذاری و تعمیر سازه‌های فراساحلی را افزایش داده است. بنابراین بهبود کارایی متحرک‌ها و بررسی دقیق‌تر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه‌ی وسیله‌ی زیرآبی در عمق‌های نزدیک به سطح آزاد حائز اهمیت است. به دلیل اهمیت بسیار زیاد ربات‌های زیرآبی، افراد بسیاری به بررسی شناخت رفتار این شناورها در برابر جریان سیال و همچنین محاسبه‌ی نیروهای وارد بر آنها پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد. کاجیتانی و همکاران (۱۹۸۳)، با شبیه‌سازی آزمایشگاهی انتشار جریان با سرعت ثابت اطراف کشتی Wigley، تغییرات سطح آزاد آب اطراف کشتی را برای سرعت جریان‌های مختلف ارائه نمودند [۱]. کروک (۱۹۹۴)، تأثیر سطح آزاد جریان بر روی بدنه‌ی متحرک Suboff 5470 را توسط روش المان محدود مرزی مورد مطالعه قرار داد که نتایج این تحقیق مبنای اعتبارسنجی کار حاضر قرار گرفته است [۲]. بیکر (۲۰۰۴)، با استفاده از نرم‌افزارهای عددی به تخمین نیروی درگ وارد بر بدنه‌ی یک متحرک پرداخته است [۳]. ایوب و همکاران (۲۰۰۵)، در مرکز بین‌المللی تحقیقات مهندسی اسلام آباد، به کمک نرم‌افزار Fluent جریان اطراف شناور زیر آبی DARPA-2 را تحلیل کردند. آنها با در نظر گرفتن سه هندسه‌ی متفاوت برای این شناور با سه طول مختلف، اثر افزایش یا کاهش طول شناور را بر نیروهای وارد بر آن بررسی کردند [۴]. آدرسینا (۲۰۰۹)، با استفاده از مانورهای نوسانی بر روی یک مدل رونده‌ی زیرسطحی و انجام تجربی مانورها، نیروهای دینامیکی وارد بر رونده را نسبت به زمان ثبت نمود و با استفاده از روابط دینامیک، اقدام به استخراج ضرایب دینامیک رونده کرد و نشان داد که مانورهای دینامیک مختلف لزوماً ضرایب یکسانی را برای یک وسیله ارائه نمی‌دهند [۵]. تانگ (۲۰۰۹)، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی ۲۸ ضریب هیدرودینامیکی یک ربات زیرآبی خودکار با هندسه‌ی غیر آیرودینامیک^۱ را استخراج نمود [۶]. حسینی (۲۰۰۹)، به بررسی ضریب درگ برای یک نمونه‌ی ربات زیرآبی خودکار به روش آزمایشگاهی و عددی پرداخت. وی برای بدست آوردن جواب‌های عددی از مدل‌سازی و شبکه‌بندی در نرم‌افزار Ansys استفاده نمود. همچنین نتایج آزمایشگاهی از آزمایش مدل شناور در حوضچه‌ی کشش بدست آمده‌اند. در این تحقیق نیروی درگ برای ربات زیرآبی در حالتی که شناور در عمق غوطه‌وری متفاوت می‌باشد به روش آزمایشگاهی محاسبه شده است. همچنین تأثیر سرعت حرکت شناور و زاویه‌ی حمله‌ی شناور بر نیروی درگ ربات زیرآبی به روش آزمایشگاهی محاسبه شده

است [۷]. رای و ژانگ (۲۰۱۰)، به محاسبه‌ی ضرایب هیدرودینامیکی متحرک در عمق زیاد با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند [۸]. جگادیش و همکاران (۲۰۱۰)، تأثیر سطح آزاد روی ضرایب هیدرودینامیکی متحرک را با استفاده از نرم‌افزار Fluent بررسی نمودند [۹]. رنیلسون (۲۰۱۰)، کار آزمایشگاهی روی تأثیر عمق بر نیروی درگ متحرک Suboff 5470 انجام دادند [۱۰]. قاسمی و همکاران (۲۰۱۰)، با شبیه‌سازی حرکت بدنه‌ی کشتی Wigley در سطح آزاد آب با استفاده از روش المان مرزی، تغییرات سطح آزاد آب اطراف این کشتی را بدست آورده و صحت روش عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی موجود بررسی نمودند [۱۱]. ساوت و همکاران (۲۰۱۱)، جریان اطراف یک ربات زیرآبی را به روش آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی نمودند و تغییرات سطح آزاد سیال اطراف شناور و نیروی درگ وارد بر شناور را محاسبه نمودند [۱۲]. ژینکسین (۲۰۱۱)، اثر نیروی درگ وارد بر یک ربات زیرآبی خودکار را مورد بررسی قرار داده است [۱۳]. رنیلسون و همکاران (۲۰۱۲)، مطالعات عددی برای یافتن نسبت طول به قطر بهینه متحرک را با توجه به درگ وارده بر آن در نزدیکی سطح آزاد انجام دادند [۱۴]. شریعتی و موسوی‌زادگان (۲۰۱۷)، با شبیه‌سازی حرکت متحرک Suboff 5470 نزدیک سطح آزاد جریان با سرعت ثابت با استفاده از روش حجم محدود، تغییرات سطح آزاد جریان در اثر حرکت متحرک را به همراه نیروهای وارد به متحرک محاسبه نمودند و نتایج روش عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و صحت‌سنجی نموده‌اند [۱۵]. ثقفیان و فروغی (۱۳۸۵)، جریان تراکم‌ناپذیر اطراف یک شناور زیر آبی کنترل شونده در دو حالت دائم و غیر دائم را به کمک نرم‌افزار Fluent به صورت عددی تحلیل نمودند. در این شبیه‌سازی ضرایب نیروی هیدرودینامیکی با استفاده از معادله‌ی موریسون^۲ در محدوده‌ی حرکت‌های تعریف شده‌ی آن محاسبه شده است. این حرکات شامل حرکت افقی و عمودی شناور به صورت شتابدار و بدون شتاب است [۱۶]. عابدی و همکاران (۱۳۸۸)، با شبیه‌سازی عددی حرکت جریان اطراف متحرک DREA با استفاده از نرم‌افزار Fluent، نیروی درگ وارد بر متحرک با اثر سطح آزاد را محاسبه نمودند [۱۷]. نوری و همکاران (۱۳۹۲)، با شبیه‌سازی عددی جریان اطراف ربات زیرآبی Suboff 5470 ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر این شناور را در مانور نوسانی برای این شناور محاسبه نمودند. در این تحقیق از نرم‌افزار Fluent استفاده گردیده است [۱۸]. انصاری‌فرد و همکاران (۱۳۹۲)، با شبیه‌سازی عددی حرکت جریان اطراف متحرک Suboff 5470 با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D، نیروی درگ وارد بر متحرک با اثر سطح آزاد را محاسبه نمودند [۱۹]. شادلاقانی و همکاران (۱۳۹۳)، با شبیه‌سازی عددی جریان اطراف

گرفته به صورت، شرط مرزی Specified velocity برای مرز تولید جریان، شرط مرزی symmetry برای مرز سطح آزاد سیال، شرط مرزی wall برای سطح جسم در مسیر جریان و شرط مرزی Outflow برای کلیه سطوح دیگر می‌باشد.

۳- مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی جریان اطراف کشتی Wigley

به منظور صحت‌سنجی نتایج نرم‌افزار Flow 3D در تخمین تغییرات سطح آزاد آب هنگام شبیه‌سازی تقابل جریان سطح آزاد با سرعت ثابت و جسم صلب، از آزمایش طراحی شده توسط کاجیتانی (۱۹۸۳) استفاده شده است. در این آزمایش با قرار دادن کشتی Wigley در مقابل جریان با سرعت ثابت، تغییرات سطح آزاد آب در طول کشتی برای سرعت جریان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. بدنه‌ی کشتی Wigley برای قسمتی از کشتی که درون آب قرار می‌گیرد، دارای معادله‌ای به صورت رابطه‌ی (۳) می‌باشد.

$$y = \pm \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{z}{T} \right)^2 \right] \quad (3)$$

در این رابطه، B عرض کشتی و برابر ۰/۱ متر، L طول کشتی و برابر ۱ متر و T عمق مستغرق کشتی و برابر ۰/۰۶۲۵ متر می‌باشند. همچنین شکل بدنه‌ی کشتی در تراز بالاتر از سطح آزاد آب، مشابه مقطعی از کشتی که در تراز سطح آزاد آب قرار می‌گیرد، می‌باشد و ارتفاع آن نیز برابر عمق مستغرق کشتی است [۱]. در این تحقیق، بدنه‌ی کشتی Wigley به صورت سه‌بعدی و به صورت جسم جامد در نرم‌افزار AutoCAD 3D ترسیم گشته است و با استفاده از خروجی stl. به نرم‌افزار Flow 3D معرفی گردیده است. جهت شبیه‌سازی عددی آزمایش کاجیتانی (۱۹۸۳)، ابعاد فضای شبیه‌سازی عددی به همراه محل قرارگیری محورهای مختصات و همچنین شرایط مرزی معرفی شده به نرم‌افزار Flow 3D مطابق شکل (۱) می‌باشند. برای معرفی مشخصات آب به نرم‌افزار، مقدار چگالی برابر $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ و مقدار لزجت آب به $\mu = 0.001 Pa.s$ در نظر گرفته شده‌اند. جهت شبیه‌سازی جریان اطراف کشتی Wigley در هر دو نرم‌افزار، پس از حساسیت‌سنجی تعداد مش در هر راستا به منظور دستیابی به تعداد کمترین مش در مقابل هم‌خوانی مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی موجود، از تعداد ۱۰۰۰۰ مش در راستای x و ۱۰۰۰ مش در راستای y و ۱۰۰۰ مش در راستای z استفاده گردیده است. همچنین جهت حل معادلات حاکم بر جریان مغشوش به دلیل آنکه ماهیت مسئله از نوع جریان پتانسیل است و نیروهای فشاری بر نیروهای ویسکوز غالب هستند، از روش معمول و ساده‌ی $k - \varepsilon$ استفاده گردیده است.

ریات زیرآبی Suboff 5470 در آب عمیق، ضرایب میرایی و جرم‌افزوده را برای این شناور محاسبه نمودند [۲۰]. مونسان (۱۳۹۳)، سه سری ربات زیرآبی ایرانی IHSS را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق به ابعاد هندسی سه نمونه متحرک ایرانی به همراه ارائه‌ی ضریب درگ در سرعت‌های مختلف برای جریان اشاره گردیده است [۲۱]. امینی و همکاران (۱۳۹۴)، با شبیه‌سازی عددی جریان اطراف ربات زیرآبی Suboff 5470 ضرایب نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر این شناور را در مانور نوسانی برای این شناور محاسبه نمودند [۲۲]. زارع‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵)، با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان اطراف ربات زیرآبی Remus 100 با استفاده از نرم‌افزار Ansys ضرایب هیدرودینامیکی را با استفاده از تست کشش محاسبه نمودند [۲۳]. هنریار و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر فرم هندسی دم بر روی نیروهای درگ و لیفت و مانورپذیری ربات خودکار زیرآبی پرداختند. از نتایج این تحقیق می‌توان بدین موضوع اشاره کرد که طول دم و زاویه‌ی مخروطی دم به ترتیب مانورپذیری را افزایش و کاهش می‌دهند [۲۴]. مطابق آنچه در این قسمت ارائه گردید، با توجه به اهمیت بسیار زیاد بررسی رفتار شناورهای زیرسطحی خودکار در مقابل جریان، افراد زیادی به این بررسی پرداخته‌اند. در این تحقیق نیز با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی Flow 3D، الگوی موج ایجاد شده در سطح آزاد جریان در اثر حرکت متحرک 5470 Suboff با سرعت‌های مختلف نزدیک سطح آزاد آب مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال در نرم‌افزار Flow 3D

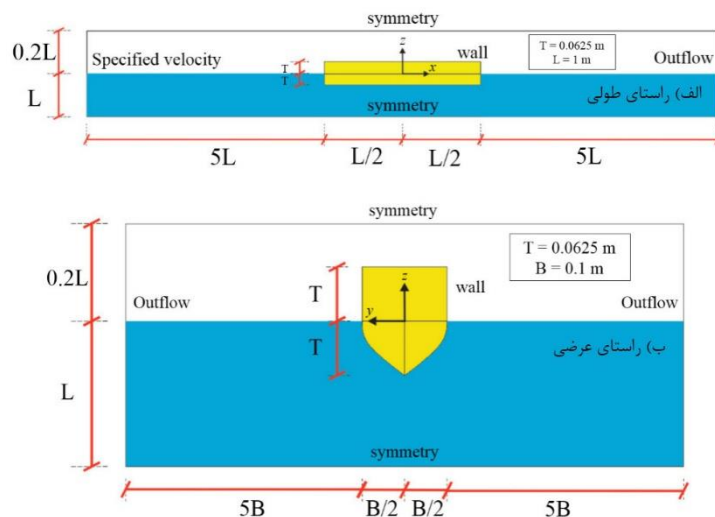
در حالت کلی معادلات حاکم بر جریان سیالات شامل معادله‌ی پیوستگی و معادلات ناویر-استوکس^۳ می‌باشند. معادله‌ی پیوستگی به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۵].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه $\vec{U} = \langle u \ v \ w \rangle^T$ میدان سرعت و ρ چگالی سیال می‌باشند. معادلات ناویر-استوکس هم در فرم برداری به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + g \vec{\nabla} h + \nu \nabla^2 \vec{U} \quad (2)$$

در این رابطه p تابع توزیع فشار پیرومتریک، ν لزجت سینماتیکی سیال، g شتاب گرانش زمین و h ارتفاع سیال از خط مبنا می‌باشند. روش عددی مورد استفاده جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم در نرم‌افزار Flow 3D روش حداقل باقیمانده‌ی تعمیم یافته می‌باشد. شرایط مرزی حاکم بر شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی انجام



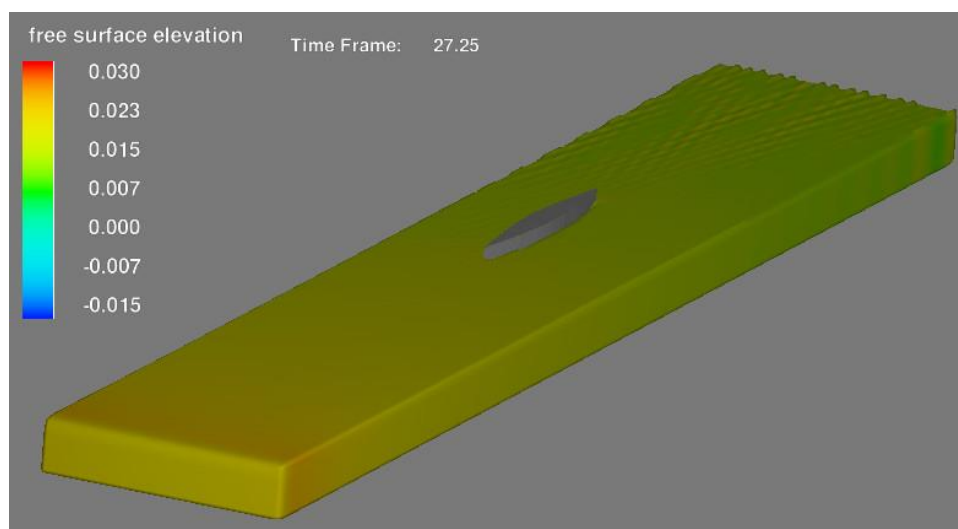
شکل ۱- فضای شبیه‌سازی جریان اطراف کشتی Wigley و شرایط مرزی در نرم‌افزار (الف) راستای طولی (ب) راستای عرضی

همچنین نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی صورت گرفته توسط کاجیتانی (۱۹۸۳)، برای دو عدد فرود 0.289 و 0.408 و معادل سرعت‌های جریان به ترتیب 0.905 و 1.277 متر بر ثانیه و در نظر گرفته شده برای جریان آب توسط کاجیتانی (۱۹۸۳)، به صورت نمودار نسبت بی‌بعد تغییرات سطح آزاد آب در طول کشتی (η) به طول کشتی (L)، نسبت به فاصله‌ی هر نقطه روی محور x از مبدأ مختصات در فاصله‌ی طول کشتی، پس از یکنواخت شدن جریان در کانال جریان، ترسیم گشته و با یکدیگر مقایسه گشته‌اند. همان‌گونه که از نمودارهای شکل (۳) ملاحظه می‌گردد، نتایج شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی موجود، هم‌خوانی بسیار مناسبی دارند و این هم‌خوانی نشان می‌دهد نرم‌افزار از توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد برخوردار است.

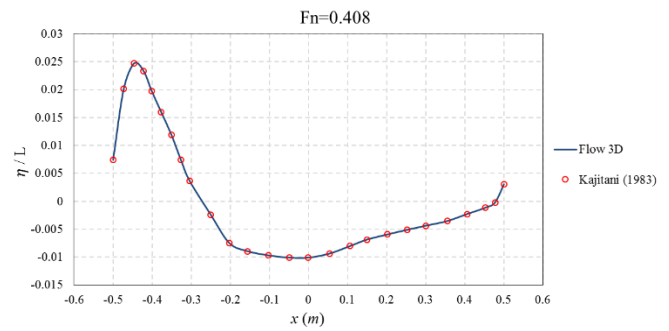
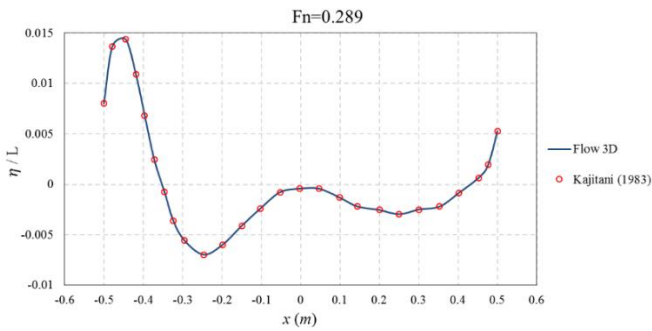
در کانال مستطیلی عدد فرود به صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌گردد [۲۶]. در این رابطه U سرعت جریان، g شتاب گرانش زمین و d عمق آب در کانال می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مرحله، عمق آب برابر طول کشتی که برابر ۱ متر می‌باشد در نظر گرفته شده است. بنابراین با قرار دادن عددی ۱ برای عمق آب و عدد $9/81$ برای شتاب گرانش زمین، رابطه‌ی (۴) تکمیل می‌گردد.

$$Fn = \frac{U}{\sqrt{gd}} \xrightarrow{d=L} Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}} \xrightarrow{L=1m, g=9.81 \frac{m}{s^2}} Fn = \frac{U}{3.132} \quad (4)$$

بنابراین برای هر عدد فرود، مطابق رابطه‌ی (۴) سرعت جریان متناظر آن محاسبه شده و به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در شکل (۲) تصویری از محیط شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Flow 3D برای جریان با عدد فرود 0.408 نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۳)، نتایج شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار Flow 3D و



شکل ۲- محیط شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow 3D برای جریان اطراف کشتی Wigley



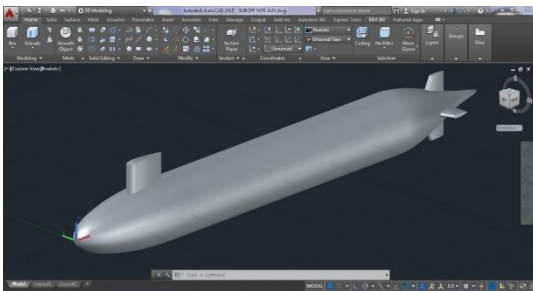
شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی موجود برای جریان اطراف کشتی Wigley

مشخصات آب به نرم‌افزار، مقدار چگالی برابر $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ و مقدار لزجت آب برابر $\mu = 0.001 Pa.s$ در نظر گرفته شده‌اند. هندسه بدنه‌ی این متحرک به صورت جسم صلب در نرم‌افزار AutoCAD 3D ترسیم گردیده و در شکل (۴) نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۶) فضای مش‌بندی اطراف متحرک زیرآبی Suboff 5470 نمایش داده شده است.

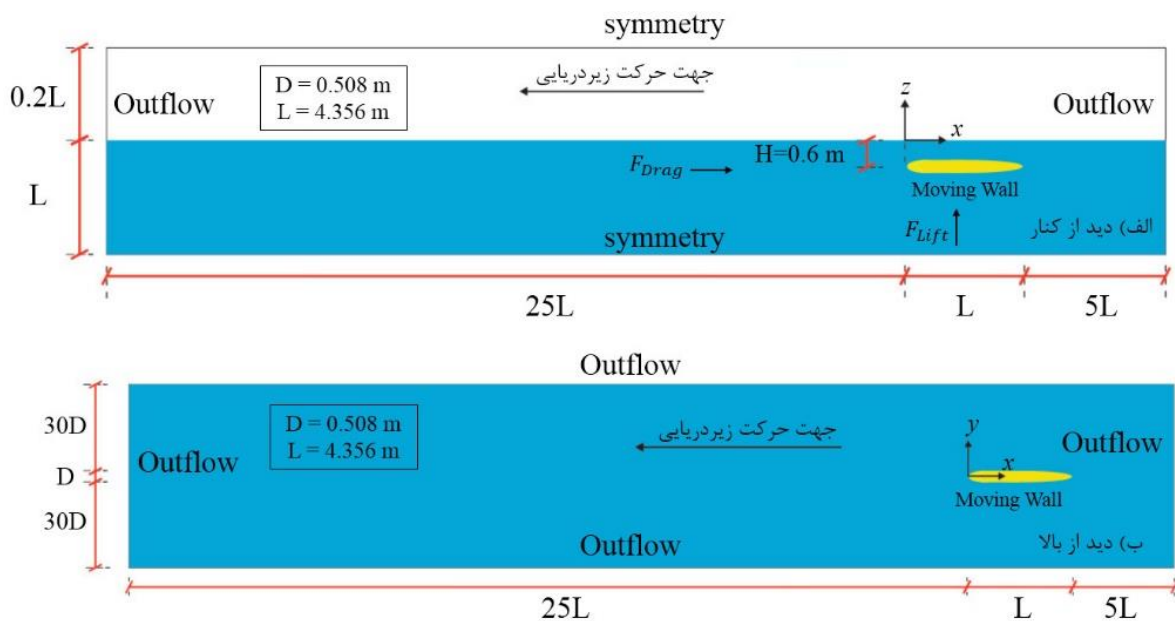
همان‌گونه که از نمودارهای شکل (۳) ملاحظه می‌گردد، بین نتایج نرم‌افزار و نتایج آزمایشگاهی موجود، هم‌خوانی بسیار مناسبی وجود دارد و این هم‌خوانی نشان می‌دهد نرم‌افزار از توانایی بسیار بالایی در شبیه‌سازی جریان با سطح آزاد برخوردار است.

۴- شبیه‌سازی عددی حرکت متحرک Suboff 5470 نزدیک سطح آزاد آب

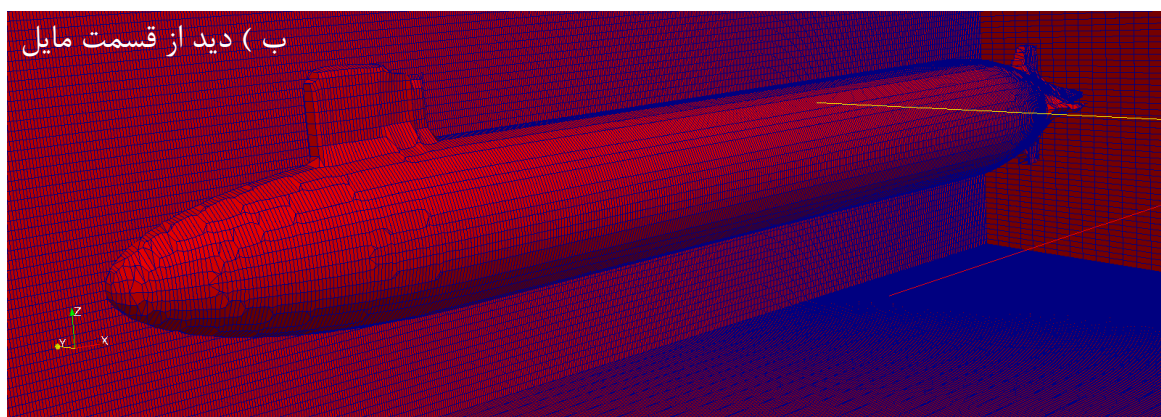
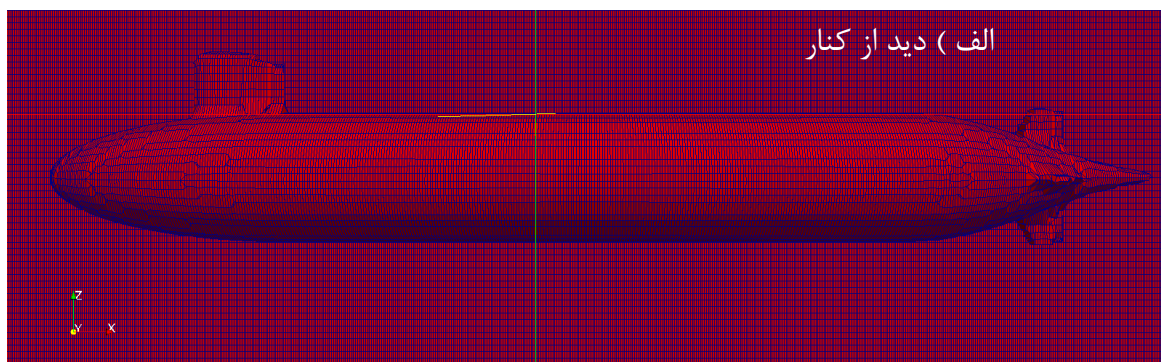
متحرک Suboff 5470 در سال ۱۹۹۰ در پژوهشکده‌ی کشتی‌سازی در آمریکا، طراحی و ساخته شد. این متحرک قادر است تا عمق ۵۴۷۰ متری زیر سطح آزاد آب حرکت نماید. ابعاد بدنه‌ی این متحرک، دارای مقادیر ثابت و مشخص، از جمله طول ۴۳۵۶ متر و بیشترین قطر ۰/۵۰۸ متر می‌باشند [۲۷]. شبیه‌سازی عددی حرکت متحرک Suboff 5470 با سرعت ثابت نزدیک سطح آزاد آب، ابعاد فضای شبیه‌سازی عددی به همراه محل قرارگیری محورهای مختصات و همچنین شرایط مرزی معرفی شده در نرم‌افزار Flow 3D مطابق شکل (۵) می‌باشند. برای معرفی



شکل ۴- ترسیم بدنه‌ی متحرک Suboff 5470 در نرم‌افزار AutoCAD 3D



شکل ۵- فضای شبیه‌سازی حرکت متحرک Suboff 5470 و شرایط مرزی در نرم‌افزار (الف) دید از کنار (ب) دید از بالا



شکل ۶- فضای مش‌بندی اطراف متحرک Suboff 5470 (الف) دید از کنار (ب) دید از قسمت مایل

بنابراین برای هر عدد فرود، مطابق رابطه‌ی (۵) سرعت حرکت متحرک متناظر آن محاسبه شده و به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در جدول (۱) سرعت حرکت متحرک متناظر با سرعت جریان با عدد فرود مشابه در نظر گرفته شده، گزارش گردیده است.

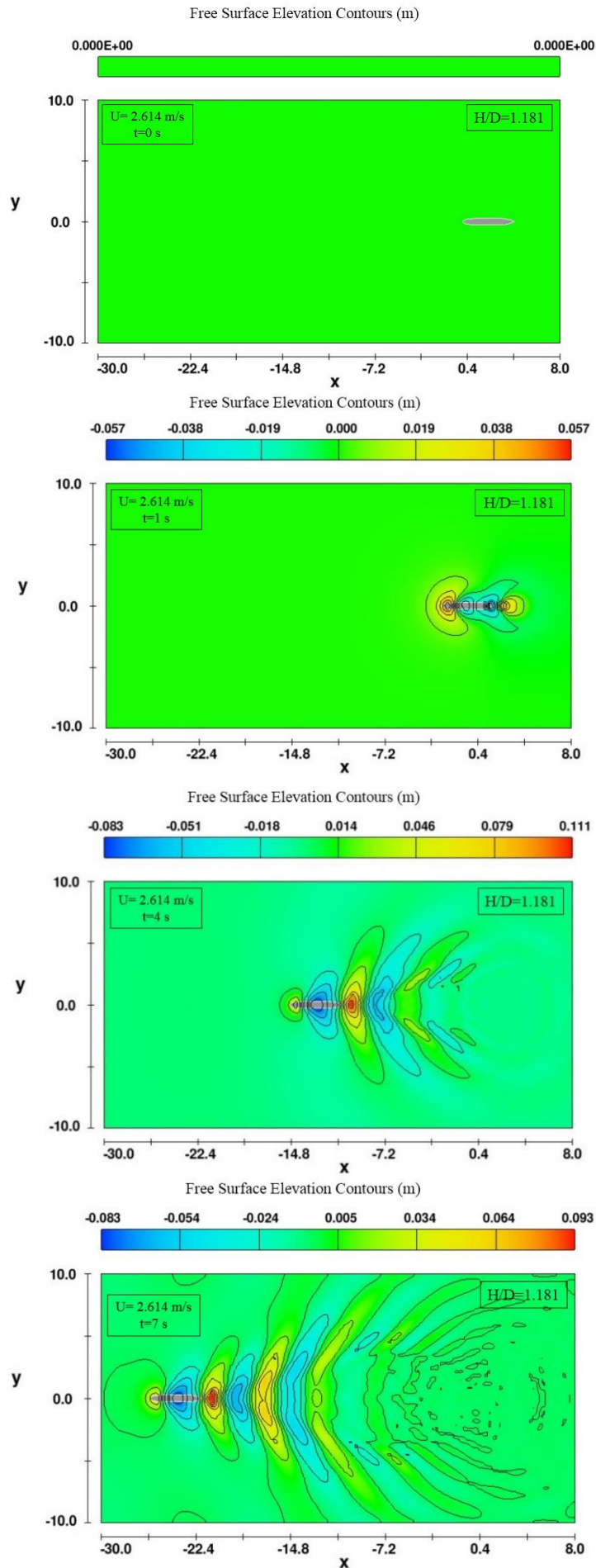
جدول ۱- سرعت حرکت متحرک Suboff 5470 مطابق با سرعت جریان با عدد فرود مشابه آن

عدد فرود (Fn)	سرعت حرکت متحرک (U (m/s ²))
۰/۲	۱/۳۰۷
۰/۴	۲/۶۱۴
۰/۶	۳/۹۲۱
۰/۸	۵/۲۲۸
۱	۶/۵۳۶

برای همهی ۵ حالت در نظر گرفته شده، الگوی موج تولید شده پس از ۷ ثانیه حرکت متحرک در عمق ۰/۶ متر از سطح آزاد آب، مطابق شکل (۵) بدست آمده است. لازم به ذکر است، محدوده‌ی نمایش نتایج، به دلیل واضح‌تر بودن پروفیل سطح آزاد آب در اطراف متحرک، در ناحیه‌ی کوچک‌تر از فضای شبیه‌سازی نمایش داده شده است. برای شبیه‌سازی حرکت متحرک با سرعت ۲/۶۱۴ متر بر ثانیه، مطابق نمودارهای شکل (۷) روند شکل‌گیری الگوی موج روی سطح آزاد آب نمایش داده شده‌اند.

جهت شبیه‌سازی حرکت متحرک Suboff 5470 در نرم‌افزار Flow 3D، پس از حساسیت‌سنجی تعداد مش در هر راستا به منظور دستیابی به تعداد کمترین مش در مقابل همگرایی نتایج شبیه‌سازی به عددی مشخص، از تعداد ۱۲۰۰۰ مش در خارج از ناحیه‌ی متحرک و ۴۵۰۰ مش در ناحیه‌ی متحرک در راستای x و ۴۰۰۰ مش در خارج از ناحیه‌ی متحرک و ۱۸۰۰ مش در ناحیه‌ی متحرک در راستای y و ۳۰۰۰ مش در ناحیه‌ی سیال و ۱۵۰۰ مش در ناحیه‌ی هوا در راستای z استفاده گردیده است. همچنین جهت حل معادلات حاکم بر جریان مغشوش به دلیل آنکه ماهیت مسئله از نوع جریان پتانسیل است و نیروهای فشاری بر نیروهای ویسکوز غالب هستند، از روش $k - \epsilon$ استفاده گردیده است. لازم به ذکر است، در همهی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته سطح آزاد اولیه‌ی آب در ارتفاع صفر قرار داده شده است. همان‌گونه که در قسمت ۳ ذکر گردید، در کانال مستطیلی عدد فرود به صورت رابطه‌ی (۵) تعریف می‌گردد. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مرحله، عمق آب برابر طول متحرک که برابر ۴/۳۵۶ متر می‌باشد، در نظر گرفته شده است. بنابراین با قرار دادن عددی ۴/۳۵۶ برای عمق آب و عدد ۹/۸۱ برای شتاب گرانش زمین، رابطه‌ی (۵) حاصل می‌گردد.

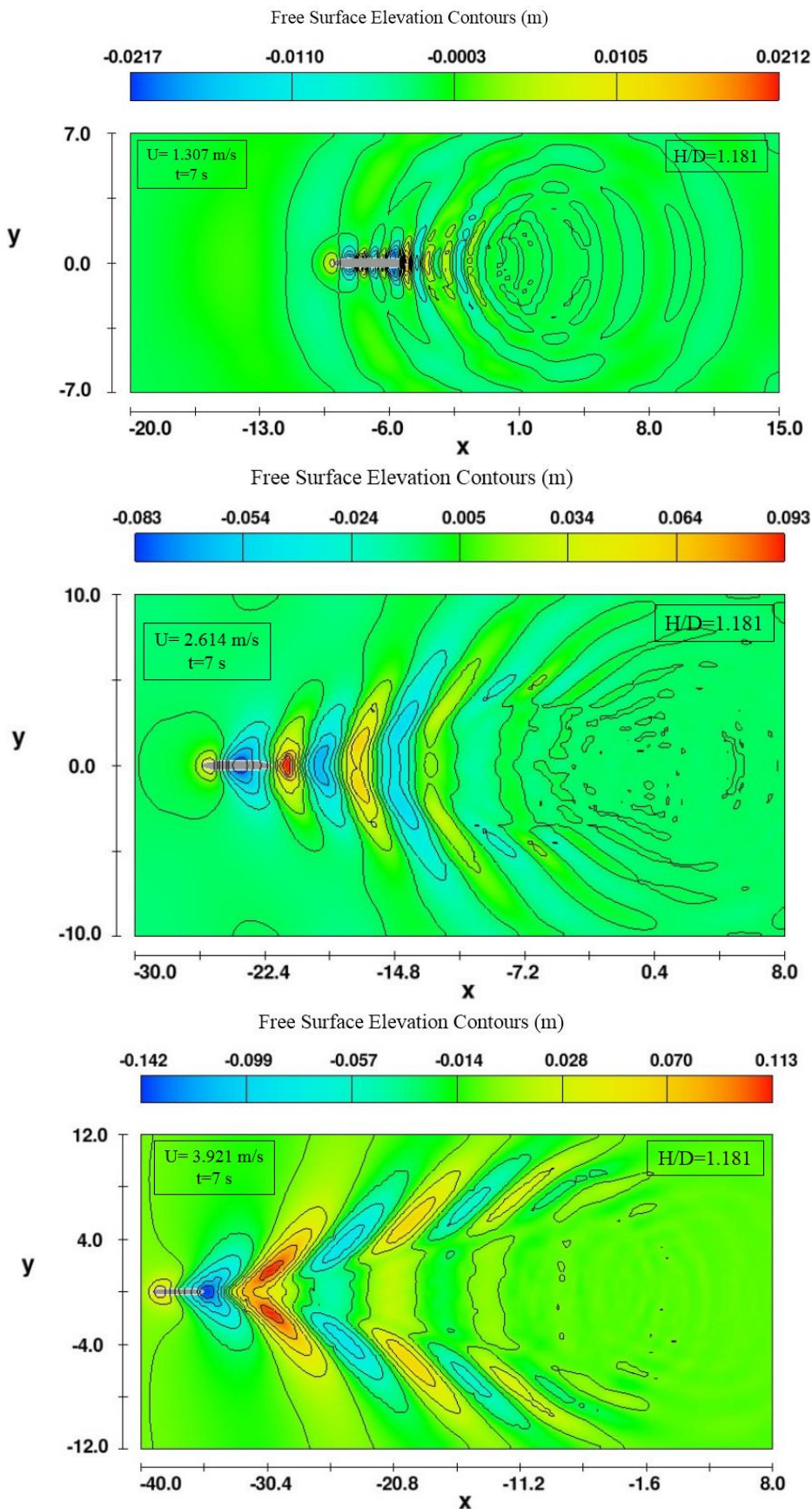
$$Fn = \frac{U}{\sqrt{gd}} \xrightarrow{d=L} Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}} \xrightarrow{L=4.356m, g=9.81\frac{m}{s^2}} Fn = \frac{U}{6.536} \quad (5)$$

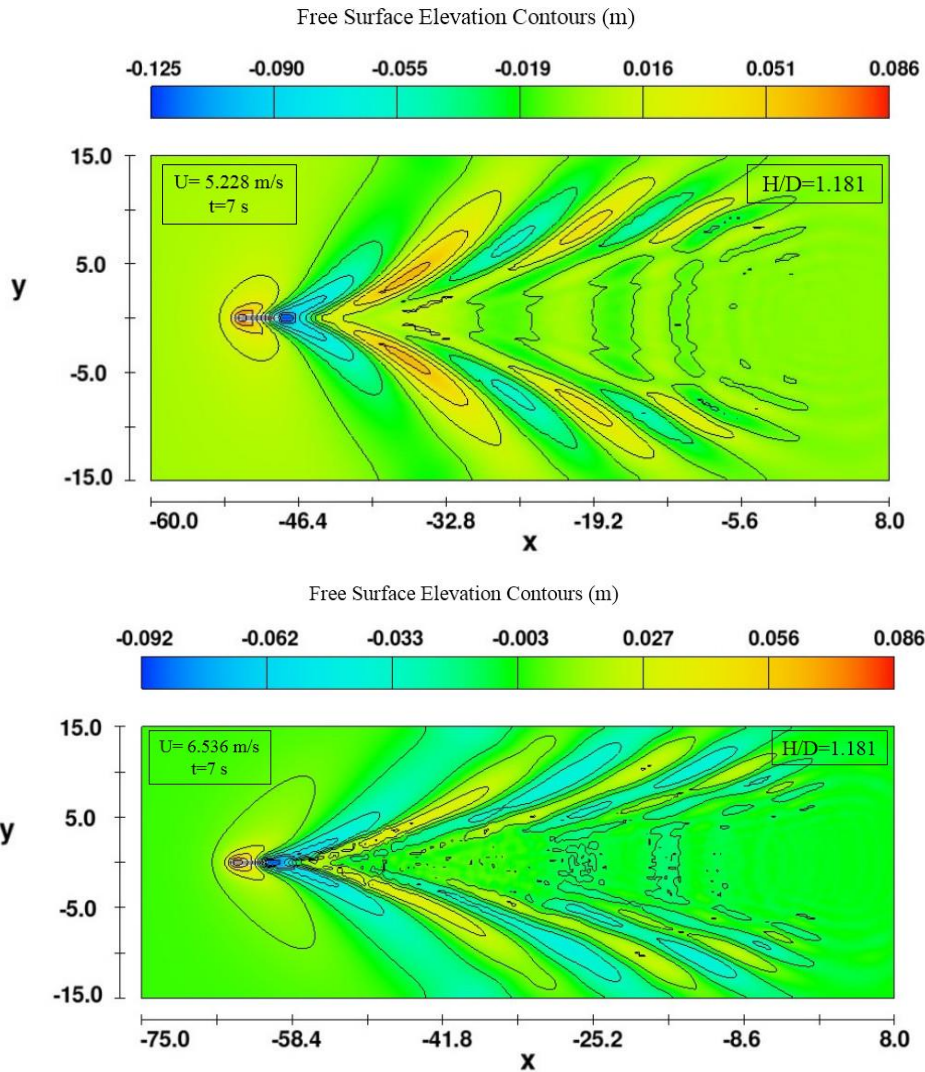


شکل ۷- الگوی موج تولید شده روی سطح آزاد آب در شبیه‌سازی حرکت متحرک Suboff 5470 با سرعت ثابت ۲/۶۱۴ متر بر ثانیه

ملاحظه می‌گردد، الگوی موج ایجاد شده به صورت الگوی موج کلوین با امواج واگرا و عرضی به صورت پی در پی با ارتفاع‌های مثبت و منفی می‌باشند [۲۸].

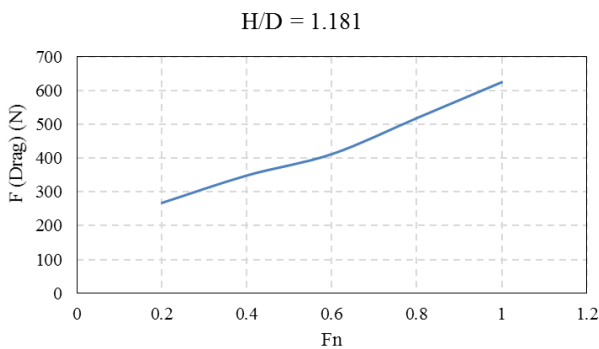
برای شبیه‌سازی حرکت متحرک با سرعت‌های مختلف، مطابق نمودارهای شکل (۸) شکل‌گیری الگوی موج روی سطح آزاد آب پس از ۷ ثانیه حرکت متحرک نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که





شکل ۸- الگوی موج تولید شده روی سطح آزاد آب در شبیه‌سازی حرکت متحرک Suboff 5470 با سرعت ثابت

در نرم‌افزار Flow 3D به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) گزارش گردیده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، هرچه سرعت متحرک افزایش می‌یابد، نیروهای درگ و لیفت وارد بر متحرک نیز افزایش می‌یابند.



شکل ۹- نمودار تغییرات نیروی درگ نسبت به عدد فرود جریان هم سرعت با سرعت حرکت متحرک Suboff 5470

مطابق شکل (۵) نیروهای وارد بر متحرک شامل نیروی درگ^۴ در راستای حرکت متحرک و نیروی لیفت^۵ در راستای عمود بر حرکت متحرک می‌باشند. مقدار نیروی درگ و لیفت وارد بر بالک‌های متحرک Suboff 5470 بسیار ناچیز می‌باشند. به عنوان مثال برای سرعت حرکت متحرک برابر ۶/۵۳۶ متر بر ثانیه و عمق متحرک ۰/۶ متر، مقدار نیروی درگ وارد بر بالک‌ها ۳/۴ نیوتن و مقدار نیروی لیفت وارد بر بالک‌ها برابر ۱/۱ نیوتن می‌باشند که نسبت به نیروی وارد بر بدنه‌ی متحرک بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشند. همچنین مقدار نیروی درگ و لیفت وارد بر برجک متحرک Suboff 5470 نیز بسیار ناچیز می‌باشند. به عنوان مثال برای سرعت حرکت متحرک برابر ۶/۵۳۶ متر بر ثانیه و عمق متحرک ۰/۶ متر، مقدار نیروی درگ وارد بر برجک ۵/۴ نیوتن و مقدار نیروی لیفت وارد بر برجک برابر ۲/۸ نیوتن می‌باشند که نسبت به نیروی وارد بر بدنه‌ی متحرک بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر می‌باشند. مقدار نیروهای درگ و لیفت وارد بر بدنه‌ی متحرک Suboff 5470 برای همه‌ی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته

موج کلون با امواج واگرا و عرضی به صورت پی در پی با ارتفاع‌های مثبت و منفی می‌باشند.

همچنین نیروهای لیفت و درگ وارد بر بدنه‌ی متحرک مورد بررسی قرار گرفتند. پس از رسم نمودار تغییرات نیروهای درگ و لیفت وارد بر متحرک نسبت به اعداد فرود جریان هم سرعت با سرعت حرکت متحرک نتیجه گرفته می‌شود که هرچه سرعت متحرک افزایش می‌یابد، نیروهای درگ و لیفت وارد بر متحرک نیز افزایش می‌یابند. نتایج نشان می‌دهند، در صورت ثابت بودن عمق حرکت متحرک، با افزایش سرعت حرکت متحرک از $1/3$ به $6/5$ متر بر ثانیه، نیروی درگ $57/17$ درصد و نیروی لیفت $48/97$ درصد افزایش می‌یابند.

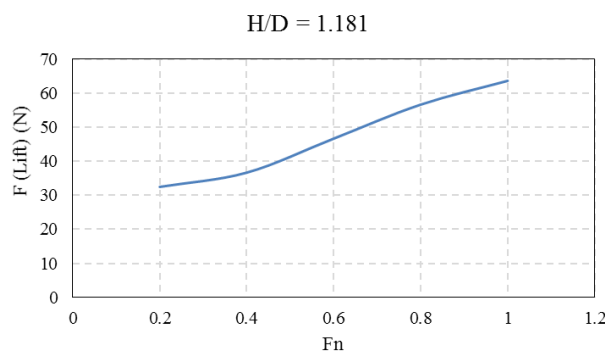
لازم به ذکر است، از موارد قابل توجه این پژوهش می‌توان به در نظر گرفتن اثر شتاب جسم در ابتدای حرکت خود ناشی از جرم افزوده در محاسبات اشاره نمود. مطابق این محاسبات برای مثال برای سرعت حرکت متحرک برابر $2/614$ متر بر ثانیه، در ابتدای حرکت جسم، نیروی درگ جسم برابر 3158 نیوتن می‌باشد و سپس به مقدار حدود $349/1$ نیوتن کاهش و همگرا می‌گردد.

۶- کلید واژگان

- 1-Aerodynamic
- 2-Morison
- 3-Navier – Stokes
- 4-Drag
- 5-Lift

۷- مراجع

- 1- Kajitani, H., Miyata, H., Ikehata, M., Tanaka, H. & Adachi, H., (1983), *Summary of the cooperative experiment on Wigley parabolic model in Japan*, Proceedings of the Workshop on Ship Wave Resistance Computations, pp.5-35.
- 2- Crook, T., (1994), *an initial assessment of free surface effects on submerged bodies*, naval postgraduate school, United States Naval Academy.
- 3- Baker, C., (2004), *Estimating Drag Forces on Submarine Hulls*, University of New Brunswick, Canada, Atlantic.
- 4- Ayub, A. M., Sohaib, M., Bilal, S., Zahir, S., and Khan, M. A., (2005), *Estimation of Hydrodynamic Coefficient of DARPA-2 and their Geometry Dependence*, National Engineering and Scientific Commission Magazine, No. 43.
- 5- Azarsina, F., (2009), *Experimental hydrodynamics and simulation of manoeuvring of an axisymmetric underwater vehicle*, Doctor of Philosophy Thesis, Memorial University, Canada.
- 6- Tang, S., Ura, T., Nakatani, T., Thornton, B., Jiang, T., (2009), *Estimation of the Hydrodynamic Coefficients of the Complex-Shaped Autonomous*



شکل ۱۰- نمودار تغییرات نیروی لیفت نسبت به عدد فرود جریان هم سرعت با سرعت حرکت متحرک Suboff 5470

۵- بحث و نتیجه‌گیری

الگوی موج ایجاد شده ناشی از حرکت ربات زیرآبی خودکار نزدیک سطح آزاد سیال، یکی از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار در شناسایی شناور به شمار می‌آید و به همین دلیل، محاسبه‌ی دقیق الگوی موج ایجاد شده در سطح آزاد حائز اهمیت است. همچنین نیروهای وارد بر شناور در حال حرکت در نزدیکی سطح آزاد، در تخمین دقیق‌تر سرعت شناور در این وضعیت بسیار تعیین‌کننده است. روش‌های مختلفی برای محاسبه‌ی نیروهای هیدرودینامیکی وجود دارد که یکی از مهمترین آنها، روش‌های عددی است. سرعت بالا، دقت مناسب و همچنین ارزان بودن روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی باعث استفاده‌ی روزافزون این روش‌ها در محاسبات هیدرودینامیکی شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی Flow 3D الگوی موج ایجاد شده در سطح آزاد آب در اثر حرکت متحرک Suboff 5470 با سرعت ثابت در نزدیکی سطح آزاد آب به همراه نیروهای لیفت و درگ وارد بر بدنه‌ی آن مورد بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش در ابتدا نتایج شبیه‌سازی حرکت جریان با سرعت ثابت در اطراف بدنه‌ی کشتی Wigley، همراه با نمودارهای مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی صورت گرفته با نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی موجود، به منظور بررسی صحت نتایج نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش در تخمین الگوی موج ایجاد شده ناشی از وجود مانع صلب در مسیر جریان، گزارش گردیده‌اند. با مشاهده‌ی نمودارهای مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی موجود، مشاهده می‌شود نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش در تخمین الگوی موج ایجاد شده ناشی از وجود مانع صلب در مسیر جریان بسیار توانمند است. سپس الگوی موج ایجاد شده در سطح آزاد آب در اثر حرکت متحرک Suboff 5470 با سرعت ثابت در نزدیکی سطح آزاد آب برای ۵ نمونه شبیه‌سازی حرکت متحرک با سرعت‌های مختلف ارائه گردید. پس از مشاهده‌ی الگوی موج تولید شده، می‌توان نتیجه گرفت، الگوی موج ایجاد شده به صورت الگوی

- 17- Abedi, K., Ghasemi, M., Ghiasi, M., (2011), *Numerical Method For Calculating Submarine Drag With Free Surface Effect*, 11th Marine Industries Conference, Iran, Kish Island. (In Persian)
- 18- Nuri, A., Ashtari, A., Khodabandeh, A., (2013), *Calculation of the Hydrodynamic Coefficients of a Floating Subsurface Using Computational Fluid Dynamic*, 15th Marine Industries Conference, Iran, Kish Island. (In Persian)
- 19- Ansarifard, N., Kianejad, S., Mousavizadegan, H., (2013), *Investigating the Effect of Free Surface on Substructure body Using Computational Fluid Dynamic*, 15th Marine Industries Conference, Iran, Kish Island. (In Persian)
- 20- Shadlaghani, A., Mansourzadeh, S., Badri, M. A., (2014), *Numerical Simulation of Damping and Gravity Damping Coefficients of a Floating Subsurface in Deep Water*, Numerical Methods in Engineering Journal, Vol 2. (In Persian)
- 21- Moonesun, M., (2014), *Introduction to the Iranian Hydrodynamic Series of Submarine (IHSS)*, 16th Marine Industries Conference, Iran, Bandar Abbas. (In Persian)
- 22- Amini, J., Paknejad, A., Norouzi, H., Zamani, H., (2016), *Extracting the Dynamic Coefficients of a Subsurface Flow Using Computational Fluid Dynamic*, 17th Marine Industries Conference, Iran, Kish Island. (In Persian)
- 23- Zarenejad, S., Enferadi, J., Shurian, V., (2017), *Numerical Analysis around an AUV Sample to Calculate Hydrodynamic Coefficient Using Tensile Test*, 18th Marine Industries Conference, Iran, Kish Island. (In Persian)
- 24- Honaryar, A., Ghiasi, M., Mousavizadegan, S. M., (2017), *Investigation on the Effect of Tail Form on Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Maneuverability*, Marine Engineering Journal. (In Persian)
- 25- *FLOW-3D uTser manual (Version 9.3)*, Flow Science Inc, 2008.
- 26- Hosseini, S. M., Abrishami, (2010), *Open-Channel Hydraulics*, Astan Ghods Razavi Press. (In Persian)
- 27- Roddy, R., (1990), *investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the darpa suboff model (dtrc model 5470) from captive-model experiments*, Ship Hydromechanics Department, Bethesda, Maryland, September.
- 28- Moonesun, M., (2012), *Handbook of Naval Architecture Engineering*. (In Persian)
- Underwater Vehicle TUNA-SAND*, DOI. 10.1007/s00773-009-005-4, 29 April.
- 7- Husaini, M., Samad, Z., Arshad, M. R., (2009), *CFD simulation of cooperative AUV motion*, Indian Journal of Marine Sciences, Vol. 38(3), pp. 346-351.
- 8- Zhang, H., Xu, Y., (2010), *Using CFD Software to Calculate Hydrodynamic Coefficients of Autonomous Underwater Vehicle*, Key Laboratory of Science and Technology for National Defense, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, J. Marine. Sci. Appl.
- 9- Jagadeesh, P., (2010), *RANS prediction of free surface effect on axisymmetric underwater body*, Engineering Application of Computational Fluid Mechanics, India.
- 10- Renilson, M., (2010), *an experimental investigation into the effects of near-surface type submarines*, University of OPERATION ON THE WAVE-MAKING RESISTANCE OF SSK, Tasmania, Australia.
- 11- Ghassemi, H., Iranmanesh, M., Ardeshir, A., (2010), *simulation of free surface wave pattern due to the moving bodies*, Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering, Vol. 34, No. B2, pp. 117-134.
- 12- Saout, O., Ananthkrishnan, P., (2011), *Hydrodynamic and dynamic analysis to determine the directional stability of an underwater vehicle near a free surface*, Applied Ocean Research, Vol. 33, pp. 158-167.
- 13- Jinxin, Z., Yumin, S., Lei, J., and Jain, C., (2011), *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.
- 14- Renilson, M., Ranmuthugala, D., (2012), *The effect of proximity to free surface on the optimum length/diameter ratio for a submarine*, International Conference on Submarine Technology and Marine Robotics, ISBN 978-93-80689-08-1, University of Tasmania, Australia.
- 15- Shariati, S. K., Mousavizadegan, H., (2017), *The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface*, Applied Ocean Research, Vol. 67, pp. 31-43.
- 16- Saghafian, M., Foroughi Mehr, B., Madhkhan, M., (2008), *Numerical Simulation of Flow Around Floating Submarine and Calculation of Hydrodynamic Forces Coefficient Using the Morrison Equation*, Mechanic and Aerospace Engineering Journal, Vol 2, No, 3. (In Persian)