

بررسی عددی و آزمایشگاهی حرکت یک شناور زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد

سید خلیل شریعتی، سید حسین موسوی زادگان*

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ فروردین ۱۳۹۷
پذیرش: ۲ اردیبهشت ۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۹ اردیبهشت ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

زیرسطحی جوبرت
آزمایش مدل
سطح آزاد
ضریب مقاومت
دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده: مقاومت و شکل موج تولیدی بر روی سطح آزاد آب در اثر حرکت یک مدل زیرسطحی با انجام آزمایش و محاسبات عددی تعیین گردیده است. آزمایش‌ها بر روی مدل در آزمایشگاه ملی خلیج فارس انجام و جسم در سرعت و عمق‌های مختلف در حوضچه آزمایش، توسط ارباب کشیده شده است. مدل زیر سطحی از جنس پلی اتیلن ساخته شده و توسط یک بازو در انتها به ارباب متصل گردیده است. قرارگیری بازوی اتصال در انتهای جسم، اندازه‌گیری شکل موج بدنه جسم را میسر می‌نماید، اما اندازه‌گیری‌ها، مقاومت مجموع مدل و بازو را با هم نشان می‌دهد. تأثیرات متقابل بازو و جسم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی و تعیین شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اثر بازوی اتصال بر روی نیروی مقاومت غیرخطی بوده و روش جمع آثار معتبر نمی‌باشد. مقاومت خالص بدنه با تعیین ضریب تصحیح بازو و حذف اثر آن تعیین شده است. شکل موج تولیدی توسط چهار حسگر که در عرض حوضچه و در یک محل ثابت نصب گردید، ثبت شده است. شکل موج تولیدی هم‌چنین با مدل‌سازی جریان اطراف جسم و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج تجربی اندازه‌گیری شده و عددی محاسبه شده از تطابق خوبی برخوردار هستند. نتایج تجربی حاصل می‌تواند برای معتبر سازی و تنظیم روش‌های عددی مورد استفاده قرار گیرند.

۱- مقدمه

مقاومت یک متحرک دریایی را می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی و فیزیکی تعیین نمود. مدل‌های ریاضی جهت تعیین مقاومت یک متحرک دریایی متنوع بوده و بر مبنای معادلات حاکم بر جریان واقعی و یا جریان پتانسیل توسعه داده شده‌اند. در مدل‌های مبتنی بر جریان پتانسیل از ویسکوزیته سیال صرف نظر شده که باعث ساده شدن معادلات می‌گردد. این روش تنها برای محاسبه مقاومت موج‌سازی شناور کارایی داشته و مولفه‌های ویسکوز مقاومت را نمی‌تواند بدست آورد. با توجه به رشد روز افزون ظرفیت محاسباتی و همچنین توسعه نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی، استفاده از حل عددی مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس در تعیین مولفه‌های مقاومت به صورت یک روش معمول درآمده است. در این روش معمولاً از معادلات میانگین‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس (رنز)^۱ استفاده می‌شود. در این حالت تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند با استفاده از یک مدل آشفتگی مدل‌سازی می‌شوند. سپس این معادلات به روش‌های مختلف عددی مانند حجم محدود، تفاضل محدود و یا اجزا محدود حل می‌گردد. انتخاب هر مدل آشفتگی و حل عددی محاسبات باعث بروز خطاهایی در محاسبات می‌گردد. لذا اطمینان از روند حل و نتایج

نیروی وارد از طرف سیال آب و هوا بر یک متحرک دریایی در حال حرکت در امتداد یک مسیر مستقیم الخط با سرعت ثابت مقاومت نامیده می‌شود. مقاومت یک متحرک دریایی معمولاً حاصل اثر ویسکوزیته سیال آب و هوا و تشکیل موج بر روی سطح آزاد (فصل مشترک هوا و آب) است. مقاومتی که در اثر ویسکوزیته سیال بوجود می‌آید به عنوان مقاومت ویسکوز شناخته شده و حاصل اثر تنش برشی و اختلاف فشار در اثر ویسکوزیته است. مقاومت حاصل در اثر تنش برشی اطراف جسم، مقاومت اصطکاکی نامیده می‌شود. وجود ویسکوزیته باعث تشکیل یک لایه مرزی در اطراف جسم و احتمالاً پدیده جدایش در انتهای جسم می‌گردد. تشکیل لایه مرزی و پدیده جدایش باعث ایجاد یک ناحیه کم فشار در انتهای جسم می‌گردد. نیروی حاصل در اثر اختلاف فشار ناشی از اثر ویسکوزیته، مقاومت ویسکوز فشاری است. بخش دیگر مقاومت وارد بر بدنه به عنوان مقاومت موج‌سازی شناخته می‌شود که متناسب با انرژی جذب شده از جسم برای ایجاد موج بر روی سطح آزاد است. مجموع مقاومت‌های موج‌سازی و ویسکوز فشاری بعنوان مقاومت باقیمانده نامیده می‌شود.

¹Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hmousavi@aut.ac.ir

بدست آمده از تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، یکی از مراحل بسیار مهم در فرایند تحلیل می‌باشد و باید این روش حل توسط نتایج آزمایشگاهی و تجربی معتبر صحت‌سنجی و کالیبره گردد.

استفاده از مدل فیزیکی در محاسبه مقاومت شناور سطحی یک موضوع متداول و مرسوم می‌باشد. آزمایش بر روی یک مدل کوچک شده یک شناور در حوضچه کشش انجام می‌گردد. در این آزمایش مدل کوچک شده شناور در امتداد مسیر مستقیم با سرعت ثابت در داخل حوضچه کشیده و مقاومت کل آن اندازه‌گیری می‌شود. به علت اثرات همزمان ویسکوزیته سیال و تشکیل موج بر روی سطح آزاد آب باید اعداد رینولدز و فرود مدل و شناور یکسان باشند که امکان پذیر نیست مگر اینکه ابعاد مدل و شناور با هم برابر باشد. آزمایش مقاومت مدل شناور سطحی بر مبنای برابری اعداد فرود مدل و شناور انجام می‌گردد با این محدودیت که جریان اطراف مدل باید متلاطم باشد تا نتایج حاصل از اندازه‌گیری قابل تعمیم به شناور اصلی باشد. برای شناورهای سطحی اطلاعات متعدد و فراوانی از نتایج تست به عنوان نتایج معیار^۱ توسط مؤسسات بین‌المللی ارائه گردیده است [۱]. از این نتایج می‌توان برای صحت‌سنجی و کالیبراسیون آزمایش‌های مقاومت در حوضچه کشش و همچنین روش‌های عددی استفاده کرد.

در حوزه زیر سطح با توجه به محدوده حرکت شناور از سطح تا اعماق دور از آن، شرایط پیچیده‌تر می‌باشد. در حالت کاملاً مغروق و دور از سطح آزاد آب برای آزمایش مدل تنها برقراری برابری عدد رینولدز کافی است. برقراری برابری عدد رینولدز در حالتی به دست می‌آید که سرعت مدل به نسبت ضریب مقیاس افزایش یابد. این افزایش عملاً غیر ممکن می‌باشد. لذا با معشوش سازی جریان در اطراف بدنه و رسیدن به اعداد رینولدزی که ضریب مقاومت مستقل از عدد رینولدز می‌گردد، اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. این آزمایش می‌تواند هم در تونل باد و هم در حوضچه کشش انجام گردد و هرچه ابعاد مدل بزرگتر باشد دقت آزمایش افزایش می‌یابد. انجام آزمایش مدل با ابعاد بزرگ در تونل‌های باد، یک روش معمول برای اندازه‌گیری ضریب مقاومت در حالت مغروق می‌باشد. برای شناورهای زیر سطحی در حال حرکت بر روی سطح آزاد آب و یا در نزدیکی آن شرایط همانند آزمایش مدل شناورهای سطحی است و اعداد فرود و رینولدز بطور همزمان موثر هستند. در زمینه بررسی حرکت شناور زیرسطحی در سطح آزاد کارهای متعددی با موضوعات متفاوت موجود است از جمله جواد و همکاران [۲] اثر شکل دماغه بر مقاومت موج سازی در یک شناور زیرسطحی در حال حرکت بر روی سطح آزاد آب مورد بررسی قرار داده‌اند. در آزمایش حرکت شناور زیرسطحی در حالت غوطه‌ور و نزدیک سطح آزاد، بازوی اتصال مدل به ابراه باعث تولید یک مقاومت اضافی می‌شود که باید به نحوی از نتایج حاصل حذف شود.

انجام آزمایش مدل یک شناور زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد اولین بار توسط وینبلوم انجام شد [۳ و ۴]. او با انجام آزمایش، نسبت به بررسی تأثیر

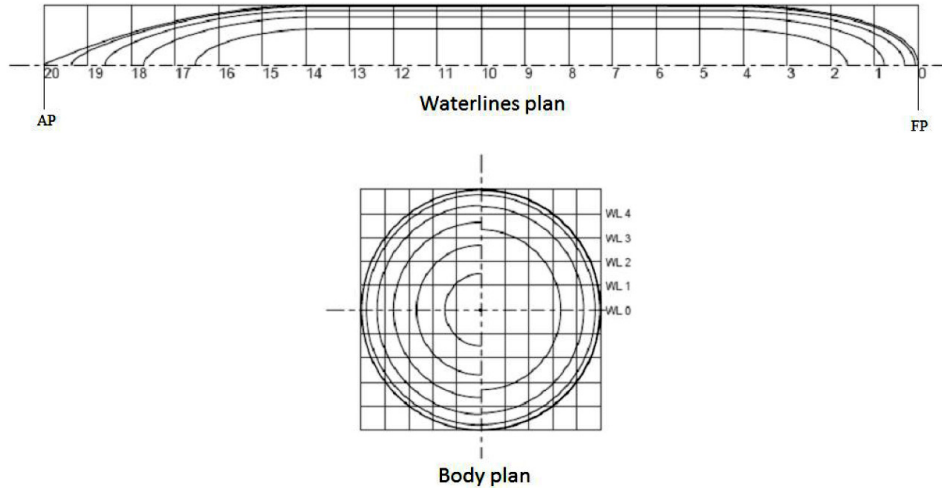
¹Test case

پارامترهای شکل جسم، عمق غوطه‌وری و عدد فرود بر مقاومت پرداخت. برای این منظور او پنج مدل را در اعماق و اعداد فرود مختلف مورد آزمایش قرار داد و مقاومت اضافی اعمال شده به جسم را در هر حالت اندازه‌گیری کرد و سپس در چهار نمودار ضریب مقاومت اضافی در اثر وجود سطح آزاد را برای اعداد فرود و عمق‌های غوطه‌وری مختلف رسم کرد. بر اساس نتایج ارائه شده، با کاهش عمق و افزایش سرعت این مقاومت به شدت افزایش می‌یابد. هورنر [۵] بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط وینبلوم بیان کرد که مقاومت اضافی ناشی از حرکت در نزدیکی سطح به شدت وابسته به عمق غوطه‌وری بوده و هنگامی که یک زیردریایی سریع در عمقی معادل یک یا دو برابر قطر خود حرکت کند مقاومت موج آن از مرتبه مقاومت اصطکاکی آن می‌باشد و از مقاومت موج سازی زیردریایی هنگامی که شناور در عمقی بیشتر از پنج برابر قطر خود حرکت می‌کند می‌توان صرف نظر کرد.

وین [۶] به بررسی اثر نسبت طول به قطر بر مقاومت باقی مانده پرداخت. او در یک حوضچه کشش سه مدل با نسبت‌های طول به قطر (l/D) برابر با ۵ و ۷ و ۱۰ را در سرعت‌هایی بین ۰/۸ تا ۱/۸ متر بر ثانیه در عمق‌هایی بین ۱ تا ۳ برابر قطر بدنه مورد آزمایش قرار داد و بیان کرد که افزایش نسبت طول به قطر باعث کاهش در مقاومت موج سازی می‌شود. با معرفی بدنه معیار سابوف^۲ توسط رودی [۷]، این بدنه در حالت‌های گوناگون و توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفت. که در این میان بررسی اثر سطح آزاد بر مشخصات هیدرودینامیکی این بدنه معیار در حالت بدون ضامئ توسط کروک [۸] انجام گردید. پس از او نیز محققین مختلفی نسبت به آزمایش مقاومت یک جسم مغروق در نزدیکی سطح پرداختند که در این میان می‌توان به فعالیت‌های برادی [۹]، شی [۱۰]، مکای [۱۱]، ویلسون هافندن [۱۲] و دوسون [۱۳] اشاره کرد. کارهای عددی زیادی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه مقاومت شناورهای زیر سطحی انجام شده است. شریعتی و موسوی زادگان [۱۴] اثرات ملحقات شامل برجک و سطوح کنترل پاشنه را بر روی مقاومت و موج تشکیل شده یک زیر سطحی مدل سابوف را در نزدیکی سطح آزاد مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. آنها نشان داده‌اند که این ملحقات باعث افزایش متوسط مقاومت به میزان ۱۶٪ می‌گردد و در ضمن این ملحقات اثری در افزایش مقاومت موج سازی و الگوی موج تشکیل شده در سطح آزاد ندارد.

با توجه به بررسی‌های بعمل آمده حذف اثر بازو در نتایج آزمایش یکی از مشکلات موجود در آزمایش مدل‌های زیرسطحی در حالت مغروق و نزدیک سطح می‌باشد. یکی از روش‌های مورد استفاده در این زمینه قرار گیری نیروسنج‌های اندازه‌گیری نیرو در داخل مدل بین بازو و مدل می‌باشد که در این روش نیاز به وجود نیروسنج‌های آب‌بند و خاص می‌باشد که به علت گرانی معمولاً در دسترس نمی‌باشد. لذا در این مقاله با استفاده از تلفیق روش دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایش، یک روش جهت حذف اثر بازو در نتایج آزمایش ارائه شده است. بعلاوه مطالعات محدودی در خصوص استخراج

²Suboff



شکل ۱: خطوط بدنه زیردریائی مدل مورد آزمایش [۱۳]

Fig. 1. Body lines of the tested submarine model

حداکثر سرعت آزمایش در این آزمایشگاه به شرح جدول ۲ می‌باشد. ارابه این آزمایشگاه از نوع سرنشین دار با ابعاد $6/7 \times 7$ متر و دارای دو سامانه حرکتی است. ارابه در سامانه حرکتی اول دارای سرعت مابین $0/5$ تا 5 متر بر ثانیه و در سامانه حرکتی دوم دارای سرعت مابین $4/5$ تا 19 متر بر ثانیه است. ارابه قابلیت تجهیز به سامانه تست حرکت صفحه‌ای افقی^۲ را دارد که با آن می‌توان تست‌های مانور را نیز انجام داد.

برای انجام آزمایش مقاومت و ثبت موج شناور زیرسطحی نیاز به ساخت بازوهای اتصال مدل به ارابه آزمون حرکت صفحه‌ای است. معمولاً از دو روش برای اتصال مدل به ارابه شامل:

جدول ۱: مشخصات و ابعاد زیردریائی مدل مورد آزمایش

Table 1. Specifications and dimensions of the tested submarine model

مقدار	علامت	T
طول	L	$1/955$ متر
قطر	D	$0/230$ متر
سطح خیس شده	S	$1/238$ متر مربع
ضریب منشوری بدنه	C_p	$0/815$
فاصله شروع بدنه موازی از دماغه	—	$0/383$ متر
فاصله اتمام بدنه موازی از دماغه	—	$1/425$ متر

و اندازه‌گیری موج تولیدی در سطح بر اثر حرکت یک مدل زیرسطحی در نزدیکی سطح آزاد انجام شده است. بر این اساس مقاومت و مشخصات موج تولیدی در اثر حرکت یک مدل زیردریایی جوبرت^۱ در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. طول و قطر مدل زیردریایی مورد آزمایش به ترتیب $1/955$ و $0/230$ متر است که در شکل ۱ پروفیل منحنی مقاطع طولی و عرضی آن و در جدول ۱ مشخصات کامل هندسی مدل زیردریایی نشان داده شده است. مدل زیردریایی در حالت کاملاً مغروق و در عمق غوطه‌وری $2/2D$ و $H=1/3D$ و در سرعت‌های $0/88$ الی $3/1$ متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفته است. خواص آب $\rho=996/5 \text{ kg/m}^3$ و $\mu=9/96 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$ در نظر گرفته شده است. اندازه طول مینا انتخاب گردید که در کمترین سرعت عدد رینولدز بزرگتر از رینولدز بحرانی ($Re_{Cr}=5 \times 10^5$) و جریان اطراف جسم معشوش باشد.

تأثیر متقابل بازو و جسم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. جریان اطراف جسم و بازو بطور مستقل و هم‌چنین جسم به همراه بازو در نرم‌افزار استار سی‌سی‌ام پلاس در تمام سرعت‌ها و دو عمق مختلف مدل شده و نتایج مقاومت و شکل موج محاسبه شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج تحلیل مدل به همراه بازو با نتایج تست، با مقایسه نتایج تجربی و محاسباتی، اثر بازو بر روی مقاومت حذف و نتایج تجربی معتبر برای جسم تنها تعیین گردیده است.

۲- آزمایش مدل

برای انجام آزمایش مدل، آزمایشگاه ملی خلیج فارس انتخاب شده است. این آزمایشگاه، یک مرکز مجهز برای آزمایش‌های هیدرودینامیکی کشتی، قایق‌های پروازی و سازه‌های دریایی است. مشخصات ابعادی و

²Horizontal planar motion mechanism

¹Joubert

جدول ۲: مشخصات آزمایشگاه ملی دریایی شهیدای خلیج فارس
Table 2. Dimensions of National Iranian Marine Laboratory

مقدار	مشخصه ابعادی
۶ متر	عرض حوضچه
۴/۵ متر	ارتفاع حوضچه
۴ متر	عمق آب حوضچه
۱۹ متر بر ثانیه	سرعت حداکثر ارابه

قسمت دماغه، استوانه میانی و مخروط عقب بطور مجزا ساخته شده است. دماغه و مخروط عقب دارای دنده‌های پیچی بوده و با استفاده از اورینگ برای آب‌بندی بر روی دنده‌های تراشکاری شده روی قسمت استوانه میانی بسته می‌شوند. این ساختار و نحوه مونتاژ که در شکل ۳ نشان داده شده است، امکان اضافه کردن وزنه برای تنظیم جرم و توزیع آن را فراهم می‌کند. بر اساس بررسی‌های بعمل آمده یکی از گزینه‌های مناسب جنس بدنه مدل، پلی اتیلن با نام تجاری تفلون می‌باشد. پلی اتیلن علاوه بر قابلیت ماشین‌کاری مناسب دارای جذب آب صفر بوده که باعث عدم تغییر وزن مدل در داخل آب می‌گردد. بعلاوه چگالی آن برابر ۹۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که در حدود چگالی آب است و در نتیجه وزن مدل و نیروی بویانسی وارد به آن از طرف آب در حالت کاملاً مغروق تقریباً یکسان می‌شوند و نیاز به تنظیمات وزنی حداقل می‌گردد.

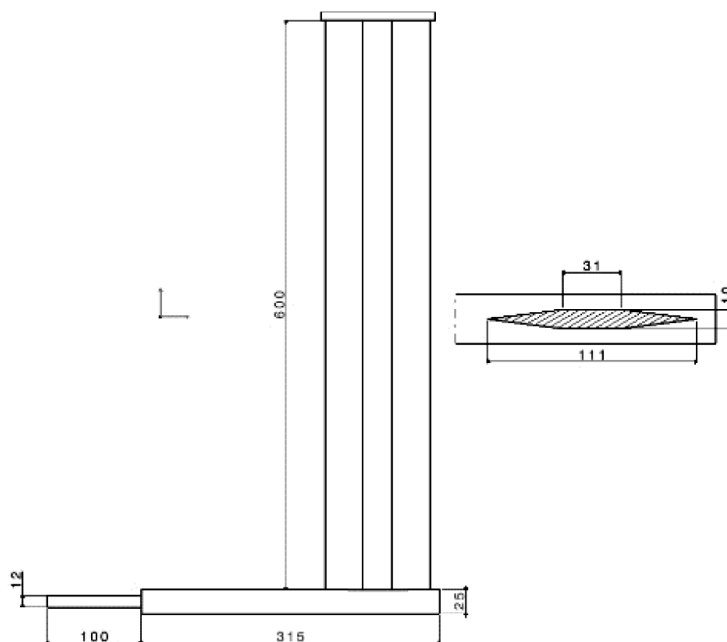
مدل با استفاده از دستگاه تراش سی ان سی ساخته و ابعاد آن با رواداری^۱ بر اساس رویه‌های مؤسسه آی‌تی‌تی‌سی^۲ کنترل شده است. در جدول ۳ مشخصات جرمی مدل ساخته شده و در شکل ۴ مدل و نحوه اتصال آن به بازو و ارابه نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری نیروی وارد به مدل از یک نیروسنج دو جزیی^۳ با ظرفیت حداکثر ۵ کیلوگرم استفاده شده است. این نیروسنج براساس دستورالعمل شرکت سازنده و با استفاده از میز کالیبراسیون برحسب گرم کالیبره گردید.

- اتصال از کنار توسط دو عدد بازوی متقارن نسبت به مرکز ثقل؛
- اتصال از پشت با استفاده از یک بازوی اتصال؛

استفاده می‌شود که برای اطلاع از جزئیات آن به رنیلسن [۱۵] مراجعه شود. شرایط آزمون تعیین کننده نوع انتخاب اتصال مدل به ارابه می‌باشد. با توجه به اینکه یکی از اهداف آزمون اندازه‌گیری منحنی موج تولیدی بر روی سطح آزاد است از اتصال نوع دوم استفاده شده است. بر این اساس یک بازو طراحی و ساخته شد که ابعاد آن بر اساس مشخصات ارابه و عمق‌های تست مورد نظر انتخاب گردیده است. در شکل ۲ مشخصات هندسی بازوی اتصال نشان داده شده است.

مدل زیردریایی برای سهولت در امر ساخت، مونتاژ و حمل و نقل، در سه



شکل ۲: مشخصات هندسی و ابعادی بازوی اتصال مدل به ارابه

Fig. 2. Geometrical specifications and dimensions of the strut

¹Tolerance

²ITTC

³Two component load cell

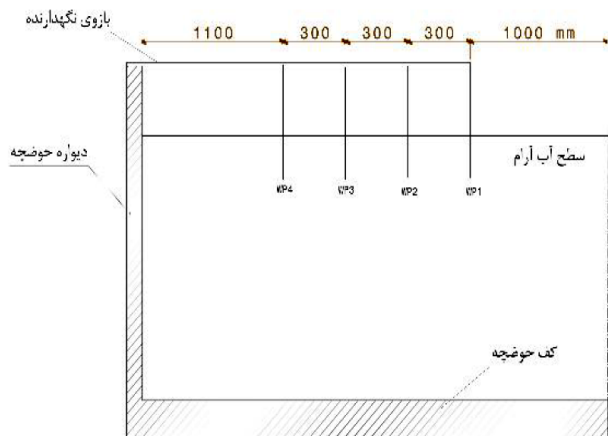


شکل ۴: زیردریائی مدل متصل به سامانه آزمایش مقید

Fig. 4. Submarine model connected to the captive model test system

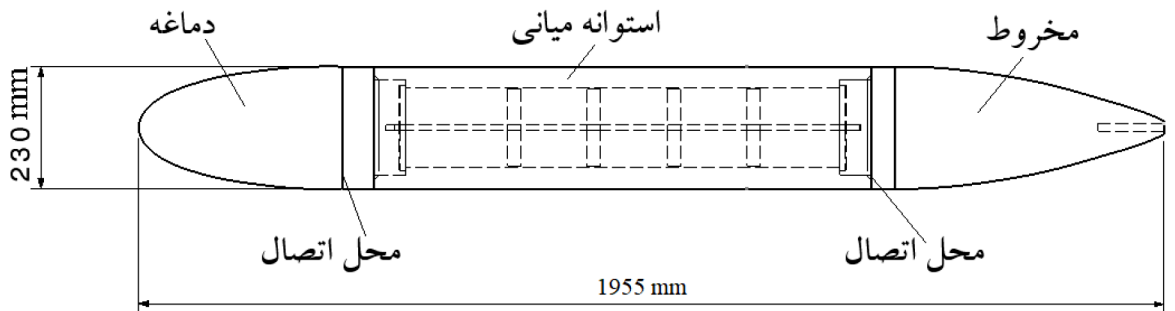
عمق آزمایش بر اساس نسبت بی بعد طول به قطر $D^*=H/D$ انتخاب شده است. این نسبت، قطر مدل، عمق آزمایش و ارتفاع مخزن در شکل شماره ۷ نشان داده شده است.

در هر یک از این عمق‌ها مدل در شش سرعت مورد آزمایش قرار گرفته است. در جدول ۴ سرعت‌های انجام تست و عدد فرود متناظر با آن آورده



شکل ۵: فواصل نصب حسگرهای اندازه‌گیری ارتفاع موج

Fig. 5. Distances of the wave height sensors



شکل ۳: ساختار زیردریائی مدل مورد آزمایش

Fig. 3. Structure of the submarine model

جدول ۳: مشخصات وزنی و حجمی زیردریائی مدل مورد آزمایش
Table 3. Weight and volume specifications of the tested submarine model

مقدار	پارامتر
۵۰/۲ کیلوگرم	وزن کل مدل بدون وزنه‌ها
۱۶/۲۵ کیلوگرم	وزن وزنه‌های تنظیم کننده
$x=972/3$ mm	مرکز ثقل از جلو
۶۶/۵ کیلوگرم	بویانسی
$x=973$ mm	مرکز بویانسی

لازم به ذکر است که با توجه به عدم آب‌بندی نیروسنج، این حسگر باید در خارج از آب بین بازوی اتصال مدل و اربابه قرار گیرد. در این حالت در حین انجام آزمایش این نیروسنج، نیروی وارد به بازو و مدل را ثبت می‌نماید.

برای اندازه‌گیری منحنی موج تولیدی از چهار عدد حسگر ارتفاع موج استفاده شده است. این حسگر از دو میله تشکیل گردیده که تغییر ارتفاع آب در اطراف آن باعث تغییر میزان مقاومت الکتریکی آن می‌گردد. این حسگر در ابتدا با استفاده از میکرومتر و بر حسب میلی‌متر کالیبره گردید.

این حسگرها توسط یک بازو به صورت عرضی و به طور ثابت در حوضچه مستقر شده‌اند. در این حالت با عبور اربابه از کنار آن میزان تغییرات سطح آزاد بر حسب زمان اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۵ موقعیت و فواصل نصب این حسگرها و در شکل ۶ محل نصب آنها در مقطع حوضچه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به علت حرکت اربابه در مقطع عرضی حوضچه امکان قرارگیری حسگر در مرکز حوضچه وجود ندارد و اولین حسگر برای جلوگیری از برخورد با اربابه باید در فاصله ۱ متری خط مرکزی حوضچه قرار گیرد.

جدول ۴: سرعت‌های انجام آزمایش و عدد فرود متناظر

Table 4. The model test speeds and the corresponding Froude number

سرعت (متر بر ثانیه)	عدد فرود
۰/۸۸	۰/۲
۱/۱	۰/۲۵
۱/۳	۰/۳
۱/۵۳	۰/۳۵
۲/۱۹	۰/۵
۳/۱	۰/۷



شکل ۶: روش نصب حسگرهای اندازه‌گیری ارتفاع موج

Fig. 6. Installation of the wave height sensors

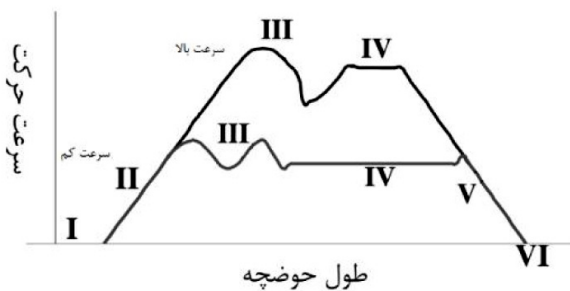
شده است.

ثبت اطلاعات آزمایش باید در سرعت ثابت و یکنواخت انجام شود. در آزمایشگاه ارابه در ابتدا دارای یک حرکت شتابدار بوده تا از سرعت صفر به سرعت آزمایش برسد. پس از آن نیز جهت حذف اثرات حرکت شتابدار در نتایج آزمون، مدتی با سرعت ثابت حرکت کرده و سپس نسبت به ثبت اطلاعات اقدام نمود. هرچه سرعت انجام آزمایش بیشتر باشد مدت زمان ثبت اطلاعات کمتری در اختیار قرار دارد. در شکل ۸ این مراحل نشان داده شده است:

هر آزمایش براساس محدودیت‌های موجود در ساخت، نصب و انجام آزمایش دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها باید دقیقاً

بررسی و محاسبه شده تا بتوان در خصوص اطلاعات استخراج شده از تست اظهار نظر نمود. در آزمایش‌های انجام شده عدم قطعیت کل آزمایش به دو بخش عدم قطعیت نصب مدل و عدم قطعیت آزمایش تقسیم بندی شده است. عدم قطعیت نصب مدل براساس حداکثر زاویه انحراف نصب مدل در راستای جریان (۳ درجه) محاسبه می‌شود. بر این اساس با انجام تحلیل دینامیک سیال محاسباتی برای مدلی با زاویه ۳ درجه نسبت به راستای جریان، میزان خطای مقاومت محاسبه گردید و مشاهده شد این مقدار حداکثر ۳ درصد میزان نیروی مقاومت می‌باشد پس:

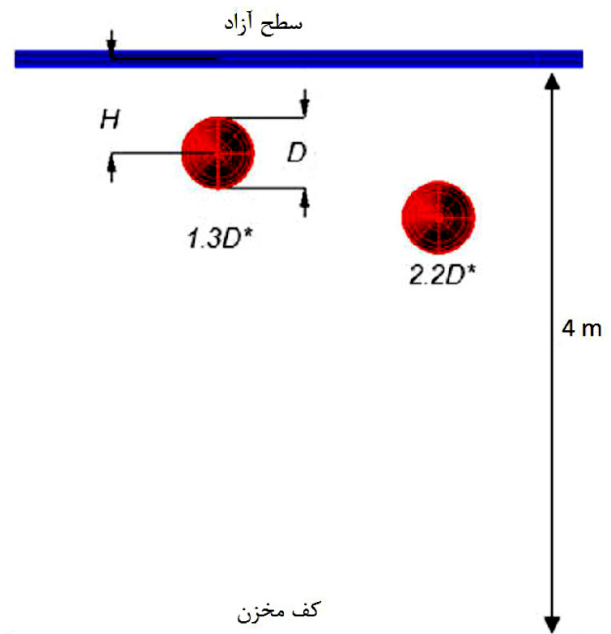
نیروی اندازه‌گیری شده $\pm 0.03 \times$ عدم قطعیت نصب مدل



- I طول ارابه
- II ناحیه شتاب گیری
- III ناحیه تنظیم سرعت
- IV ناحیه اندازه گیری
- V ناحیه کاهش سرعت
- VI ناحیه توقف

شکل ۸: نواحی مختلف سرعت ارابه در آزمایش مقاومت مدل یک متحرک دریایی [۱۶]

Fig. 8. Different areas of the carriage speed in the resistance test of a marine vehicle [16]



شکل ۷: قطر و عمق غوطه‌وری زیردریایی مدل و ارتفاع حوضچه آزمایش

Fig. 7. The diameter and submergence depth of the submarine model and the towing tank height

اغتشاش می‌باشد و آن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$G = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (5)$$

که در آن، $v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$ به عنوان ویسکوزیته ادی معروف است. ارتباط بین تنش رینولدز $\overline{u_i u_j}$ انرژی جنبشی اغتشاش k و اتلاف اغتشاش ε و ویسکوزیته ادی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$-\overline{u_i u_j} = v_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (6)$$

مقادیر ضرایب ثابت C_μ و $C_{\varepsilon 1}$ و $C_{\varepsilon 2}$ و σ_k و σ_ε به ترتیب برابر است با ۰/۰۹ و ۱/۴۴ و ۱/۹۲ و ۱/۰ و ۱/۳. ویسکوزیته موثر R_k و R_ε از رابطه $1/R_k = (1/Re) + (v_t + \sigma_k)$ و $1/R_\varepsilon = (1/Re) + (v_t + \sigma_k)$ بدست می‌آید.

موضوع مورد بحث تحلیل حرکت اجسام مغروق نزدیک سطح آزاد است و بنابراین باید اثر وجود سطح آزاد مورد بررسی قرار گیرد که برای این کار از روش حجم سیال^۱ برای مدل سازی رفتار مرز بین دو سیال استفاده شده است. در روش حجم سیال مرز بین دو فاز مختلف سیال با محاسبه α_1 ، حجم کسر اشغال شده توسط فاز سنگین (مایع) و α_2 ، حجم کسر اشغال شده توسط فاز سبک‌تر در بالای سطح آزاد (هوا) بازسازی می‌شود. به طوری که جمع این دو کسر باید قانون بقاء را ارضاء کند یعنی $\sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1$. در این حالت ویسکوزیته (μ) و دانسیته (ρ) در هر نقطه توسط متوسط حجمی فاز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \\ \mu &= \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن اندیس های w و a بیان کننده آب و هوا می‌باشند. سپس یک معادله مومنتوم واحد برای کل دامنه حل شده و در نتیجه یک میدان سرعت مشترک برای هر دو فاز بدست می‌آید. سپس تابع پله α به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{اگر سلول پر از آب باشد} \\ 0 & \text{اگر سلول پر از هوا باشد} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{اگر سلول حاوی فصل مشترک دو سیال باشد} \end{cases} \quad (8)$$

و ردیابی سطح مشترک بین دو سیال توسط حل معادله پیوستگی کسر حجمی زیر انجام می‌شود.

عدم قطعیت آزمایش با استفاده از رویه‌های موسسه آی‌تی‌سی‌سی و بر اساس شرایط و دقت اندازه‌گیری تجهیزات آزمایشگاه شامل سرعت $(\pm 2 \text{ mm/s})$ نیروسنج (RT ۰/۰۲٪)، اندازه‌گیری چگالی (۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و ... محاسبه گردیده است. این مقدار حداکثر برابر ۰/۰۶۳ نیوتن می‌باشد. پس:

$$\text{نیروی اندازه‌گیری شده} = \pm (0.063 \text{ N} + 0.03 \times \text{عدم قطعیت کل})$$

۳- مدل سازی جریان

۳-۱- معادلات حاکم

جریان در اطراف یک جسم می‌تواند آرام یا مغشوش باشد که بر هر دو حالت معادلات ناویراستوکس صادق است. اما در شبیه سازی جریان متلاطم با استفاده از معادلات ناویر استوکس به تعداد زیادی شبکه با ابعاد بسیار کوچک نیاز می‌باشد که حل آن زمان بر خواهد بود. مدل مرسوم در تحلیل جریان متلاطم معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس (رنز) است.

$$\frac{\partial (\rho \overline{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i u_j} + \rho \overline{u_i' u_j'}) = \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \overline{u_i})}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

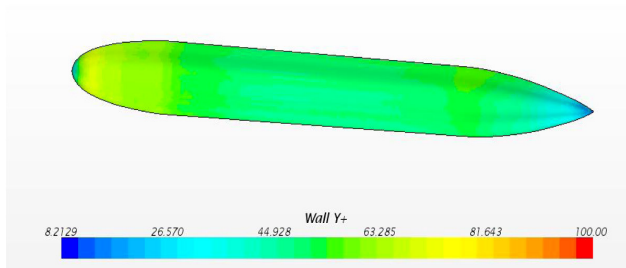
که در آن، ρ چگالی، g_i مولفه شتاب گرانش و μ ویسکوزیته دینامیکی است. عبارت $\overline{\rho u_i' u_j'}$ تانسور تنش رینولدز است که اجزاء آن با مدل‌های توربولانسی به متغیرهای میدان ارتباط داده می‌شود. در میان مدل‌های توربولانسی یکی از پرکاربردترین مدل‌ها، مدل استاندارد توربولانسی $k-\varepsilon$ می‌باشد که بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف [۱۷ و ۱۸]، برای شبیه سازی جریان در این گونه مسائل مناسب است، لذا از این مدل در تحلیل استفاده شده است. معادلات میدان جریان و شرح ریاضی مدل استاندارد توربولانسی $k-\varepsilon$ به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \left(U_j - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{R_k} \nabla^2 k - G + \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \left(U_j - \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial v_t}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{R_\varepsilon} \nabla^2 \varepsilon + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (4)$$

که در آن، U_i معرف مولفه سرعت متوسط، P فشار و G عبارت تولید کننده

^۱Volume of Fluid Method (VOF)



شکل ۹: مقدار متوسط y^+ روی مدل زیردریائی

Fig. 9. The average of y^+ for the submarine model

در نظر گرفته شد. بر این اساس در شبکه درشت اندازه پایه مش برابر با $3/5$ سانتی متر، در شبکه متوسط برابر با $2/4$ سانتی متر و در شبکه ریز برابر با $1/7$ سانتی متر با انتخاب گردید.

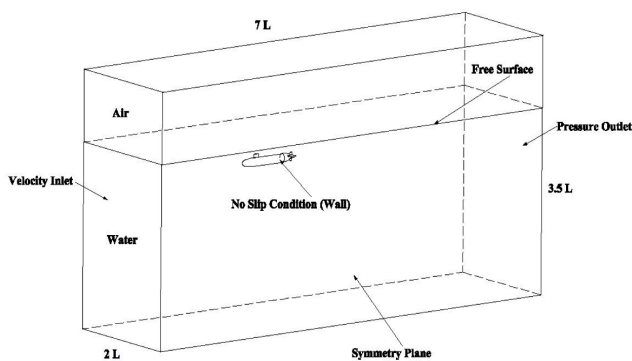
برای مطالعه شبکه، تحلیل مقاومت در سرعت 0.547 متر بر ثانیه انجام شده است. تعداد مش بکار برده شده و ضریب بی بعد مقاومت در جدول ۵ نشان داده شده است. در این جدول نیروهای مقاومت با چگالی ρ ، سرعت جریان V و سطح خیس شده مدل S به صورت زیر بی بعد شده است:

$$C_T = \frac{R}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (10)$$

نسبت همگرایی به صورت:

$$R = \frac{\varepsilon_{i,i+1}}{\varepsilon_{i-1,i}} \quad (11)$$

تعریف می شود که $\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$ اختلاف بین حل شبکه متوسط و شبکه ریز و $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$ و اختلاف بین حل شبکه درشت و متوسط است. حالت های ممکن برای همگرایی به سه صورت $R > 1$ (شبکه واگرا)، $R < 0$ (شبکه با همگرایی نوسانی) و $0 < R < 1$ (شبکه با همگرایی یکنواخت)



شکل ۱۰: شرایط مرزی جریان اطراف مدل زیردریائی

Fig. 10. Boundary conditions of the flow around the submarine model

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

شرح کامل روش حجم سیال توسط هیرت و نیکولز [۱۹] ارائه شده است.

۳-۲- روش حل عددی

برای حل معادلات حاکم بر مسأله از روش حل عددی و با استفاده از مجموعه نرم افزاری دینامیک سیالات محاسباتی استار سی سی ام پلاس^۱ که بر مبنای روش گسسته سازی حجم محدود است، استفاده شده است [۲۰]. با در نظر گرفتن نقطه محاسباتی در مرکز هر سلول، کلیه متغیرهای میدان در این نقطه محاسبه می شود که این روش باعث مستقل شدن میدان سرعت و فشار از یکدیگر می گردد که برای حل این مشکل از الگوریتم میانابایی ری و چاو [۲۱] استفاده می شود. از الگوریتم سیمپل برای کوپل کردن میدان سرعت و فشار استفاده شده است.

برای شبکه بندی محدوده محاسباتی از روش ساختار نیافته تریمر استفاده شده است. با کمک این روش شبکه ای با کیفیت بالا و کمترین عدم تقارن ایجاد خواهد شد [۲۰]. در محدوده ای از سطح آزاد که احتمال تشکیل موج وجود دارد شبکه محاسباتی با کوچک تر کردن ابعاد شبکه بندی اصلاح گردیده است.

برای افزایش دقت محاسبات در ناحیه لایه مرزی از فن اصلاح شبکه لایه منشوری استفاده شده است. جریان مغشوش در این ناحیه با توابع دیواره تخمین زده می شود. این توابع بر مبنای روابط تجربی به دست آمده اند. برای قابل قبول بودن استفاده از این توابع باید کمیت بی بعد y^+ بین ۳۰ تا ۱۰۰ باشد [۱۲]. در شکل ۹ توزیع این کمیت روی سطح بدنه مدل نشان داده شده است. مقدار متوسط y^+ بر روی مدل تقریباً برابر ۵۰ است.

شرایط مرزی مورد استفاده در تحلیل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای شرط مرزی ورودی مقدار سرعت ثابت از مقدار 0.188 تا $3/15$ متر بر ثانیه و برای خروجی فشار نسبی برابر صفر در نظر گرفته شده است. برای بدنه مدل نیز دیواره با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

۳-۳- بررسی استقلال از شبکه

برای حساسیت سنجی نتایج به شبکه بندی، متداول ترین روش تعیین مرتبه خطای گسسته سازی مکانی در شبیه سازی عددی است. به عبارت دیگر، نتایج عددی زمانی قابل اعتماد هستند که مستقل از شبکه بندی باشند. برای مطالعه استقلال نتایج از شبکه بندی سه شبکه درشت، متوسط و ریز با نسبت اصلاح ثابت تولید گردید. بر اساس تجربه، مطلوب است که نسبت گسسته سازی r کمتر از $1/3$ نباشد. نسبت گسسته سازی به صورت $r = h_{i+1} / h_i = \sqrt{2}$

¹Star CCM+

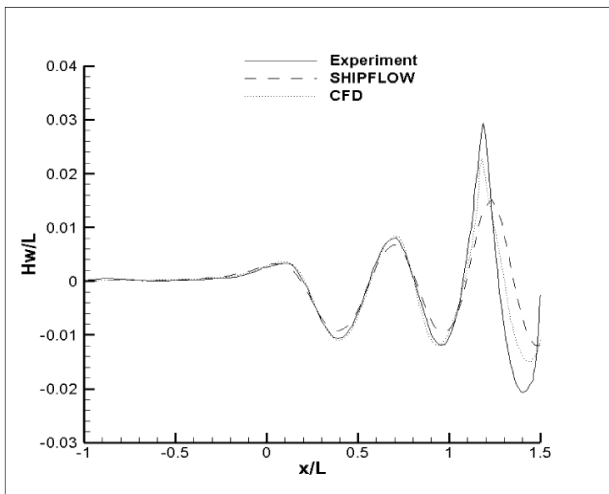
همانطور که مشاهده می‌شود، حالت متوسط با ۱۵۴۷۰۶۳ تعداد اجزا، نتایج مناسبی بدست می‌دهد. کلیه محاسبات با همین تعداد اجزا انجام شده است.

۳-۴- بررسی دقت روش تحلیل

برای بررسی دقت نتایج تحلیل مقایسه‌ای بین نتایج تحلیل این بدنه و نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط داوسون [۱۳] در شکل ۱۱ ارائه شده است. علاوه بر این شکل مقایسه‌ای بین نتایج دینامیک سیالات محاسباتی و نتایج استخراج شده توسط نرم افزار شیب فلو^۲ که مبتنی بر تئوری پتانسیل است نیز انجام شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج دینامیک سیالات محاسباتی در حدود ۱۲ درصد می‌باشد که در مقایسه با نرم‌افزار شیب فلو که در حدود ۳۰ درصد می‌باشد نتایج بهتری ارائه شده است. علاوه بر ناحیه نزدیک مدل اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی کمتر از ۳ درصد می‌باشد.

۴- نتایج

نیروی مقاومت و شکل موج حاصل از حرکت جسم در دو عمق بی‌بعد ۱/۳ و ۲/۲ و در شش سرعت، از سرعت ۰/۸۸ الی ۳/۱ متر بر ثانیه (عدد فرود ۰/۲ الی ۰/۷)، در آزمایشگاه اندازه گیری شده است. در انجام آزمایش ضروری است که جسم توسط یک بازو در زیر آب نگهداری شود که بنابراین نتایج حاصل اثر مجموع بدنه و بازو است. برای حذف اثر بازو از محاسبات عددی استفاده شده و نتایج بدنه جسم به طور مستقل تعیین شده است.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج تحلیل سی اف دی با نتایج تست و تحلیل ارائه شده توسط داوسون [۱۳]

Fig. 11. Comparison of CFD results with test results and the result of Dawson [13]

جدول ۵: ضریب درگ برای تعداد گرید مختلف

Table 5. Drag coefficient for different grid numbers

گرید	تعداد گرید	$C_D \times 10^2$
درشت	۶۷۶۲۵۵	۴/۹۶۲۵۷
متوسط	۱۵۴۷۰۶۳	۴/۹۵۱۴۸
ریز	۳۶۹۶۲۹۳	۴/۹۵۰۸۹

می‌تواند رخ دهد. برای حالت همگرایی، از برون‌یابی ریچاردسون^۱ برون‌یابی h_2 نیز نامیده می‌شود [۲۲]، برای تعیین نرخ همگرایی استفاده می‌گردد. مرتبه گسسته سازی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i-1,i}}{\varepsilon_{i,i+1}}\right)}{\ln r} \quad (12)$$

و اندیس همگرایی شبکه عبارت است از:

$$GCI_{i,i+1} = F_S \frac{|e_{i,i+1}|}{r^P - 1} \quad (13)$$

که F_S ضریب ایمنی برابر با مقدار ۱/۲۵ که توسط روچ [۲۲] برای حالت مطالعه شبکه با حداقل سه شبکه پیشنهاد شده است. عبارت اندیس همگرایی شبکه نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده چه مقدار از حل دقیق دور هستند. به عبارت دیگر، اندیس همگرایی شبکه، معیاری برای اندازه‌گیری تغییرات حل با ریزتر کردن شبکه است. مقدار کم این کمیت نشان دهنده آن است که نتایج شبیه‌سازی‌ها در محدوده جواب دقیق مسئله است. نسبت همگرایی، مرتبه گسسته سازی و اندیس همگرایی شبکه در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. مقدار تئوری برای مرتبه همگرایی برابر ۲ است. اختلاف موجود ناشی عدم تعامد شبکه، ترم‌های غیرخطی، مدل‌سازی اغتشاش و غیره است.

جدول ۶: مقادیر نسبت همگرایی، مرتبه گسسته سازی و اندیس همگرایی

Table 6. Convergence ratio, degree of discretization and convergence index

نسبت همگرایی	۰/۵۲۰۰۷
مرتبه گسسته‌سازی	۱/۸۸۶۴۷
اندیس همگرایی	۰/۰۳۰۳

^۲SHIPFLOW

^۱Richardson extrapolation

جدول ۷: نتایج حاصل از آزمایش مدل در عمق و سرعت‌های مختلف

Table 7. Result of tests in various depths and speeds of the model

مقدار						عنوان	
۰/۷	۰/۵	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲	عدد فرود	D^*
۳۶/۲۵	۲۱/۱	۵/۸۶	۵/۵۵	۳/۰۴	۱/۸۹	مقاومت N	۱/۳
۵/۷۰	۲/۹۱	۱/۴۵	۱/۰۸	۰/۸۶	—	مقاومت بازو N	
±۱/۱۵	±۰/۷	±۰/۲۴	±۰/۲۳	±۰/۱۵	±۰/۱۲	عدم قطعیت آزمایش N	
۳۱/۹۵	۱۵/۵۸	۶/۱۸	۴/۶۰	۳/۱۵	۲/۰	مقاومت N	۲/۲
۷/۶۰	۳/۸۲	۱/۵۸	۱/۳۶	۰/۹۹	—	مقاومت بازو N	
±۱/۰۲	±۰/۵۳	±۰/۲۵	±۰/۲۰	±۰/۱۶	±۰/۱۲	عدم قطعیت آزمایش N	

۴-۱- نیروی مقاومت

نیروی مقاومت با استفاده از یک حسگر مابین بازو اتصال و ارباب اندازه‌گیری شده است. بنابراین اعداد ثبت شده مجموع مقاومت جسم و بازوی اتصال را نشان می‌دهد. برای بررسی تأثیر بازو، مقاومت بازو نیز در هر دو عمق و در کلیه سرعت‌های حرکتی نیز اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری در هر دو حالت در جدول ۷ نشان داده شده است. باید توجه داشت که مقاومت بازو در پشت جسم تحت تأثیر جریان اطراف جسم است و جریان در کلیه سرعت‌ها متلاطم خواهد بود در حالیکه جریان در اطراف بازوی تنها کاملاً متفاوت و در قست عمده‌ای از آن به صورت لایه‌ای است. بنابراین نمی‌توان با کم کردن مقاومت بازو از مجموع جسم و بازو مقدار مقاومت جسم را بدست آورد.

برای بررسی نتایج فوق و تعیین اثر بازو از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است و جریان اطراف بدنه و بازو و هم چنین بدنه تنها مدل شده است. این نتایج در جدول ۸ ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول‌های ۷ و ۸ برای حالت بدنه بانضمام بازو با استفاده از رابطه $C_T = 2R / (\rho S V^2)$ بدون بعد شده و برای مقایسه در شکل ۱۲ در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. در تعیین ضریب مقاومت C_T از سطح در تماس بدنه جسم با آب استفاده شده است. اختلاف مابین نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل عددی مابین ۰/۵ تا ۸/۵ درصد خطا را نشان می‌دهد که در محدوده عدم قطعیت‌های آزمایش قرار دارد و این معرف دقت روش تحلیل انتخاب شده در استخراج نیروی وارد بر جسم متحرک در نزدیکی سطح آزاد است. در شکل ۱۲ و در عمق بی بعد ۱/۳ نمودار ضریب مقاومت بسیار نوسانی می‌باشد. این پدیده به علت

اثر غالب مقاومت موج سازی در مقاومت کل در حالت نزدیک به سطح می‌باشد. قله‌های این نمودار معرف حالتی است که سیستم سامانه امواج تشکیل شده در نقاط متفاوت جسم همدیگر را تقویت و باعث تولید موج با ارتفاع زیاد می‌شود و در نتیجه انرژی بیشتری مصرف می‌شود. در حالت فرورفتگی، امواج در نقاط مختلف اثر یکدیگر را خنثی و باعث کاهش ارتفاع موج حاصل و در نتیجه کاهش انرژی مصرف شده است. با افزایش عمق غوطه‌وری در عمق بی بعد ۲/۲، سهم مقاومت موج‌سازی در مقاومت کل کاهش یافته و این اثرات در نمودار ضریب مقاومت کل با شدت کمتری مشاهده می‌شود.

ضریب مقاومت بدنه جسم حاصل از محاسبات عددی با مقدار حاصل از کم کردن مقاومت بدنه با بازو از مقاومت بازو در شکل ۱۳ باهم مقایسه شده‌اند. اختلاف این مقادیر نسبتاً زیاد و بین ۸/۵ تا ۳۴/۵ درصد است. با توجه به اینکه نتایج مقاومت جسم با بازو در آزمایش و تحلیل هم‌خوانی دارند که نشان از دقت تحلیل‌های انجام شده است، می‌توان نتیجه‌گیری کرد اثر بازو در پشت جسم خطی نیست و با کم کردن مقاومت بازو نمی‌توان مقدار مقاومت بدنه را بدست آورد و باید نیروسنج‌های اندازه‌گیری نیرو در داخل مدل و بین مدل و بازو قرار گیرد تا در آزمایش تنها نیروی مقاومت وارد بر مدل اندازه‌گیری شود و اثر بازو از نتایج حذف گردد. این با امکانات موجود آزمایشگاه در حال حاضر عملی نیست.

علت اصلی عدم برقراری اصل برهم نهی^۱ بین نیروی مقاومت بازو به تنهایی و بدنه به همراه بازو یکسان‌نبودن رژیم جریان بر روی بازو در این دو حالت می‌باشد. با توجه به ابعاد بازو، رژیم جریان بر روی بازو به تنهایی در

^۱Superposition

جدول ۸: نتایج حاصل از تحلیل سی‌افدی در عمق و سرعت متفاوت

Table 8. CFD Results in various depths and speeds of the model

مقدار						عنوان	
۰/۷	۰/۵	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲	عدد فرود	D^*
۳۳/۵۳	۲۰/۲۶	۵/۸۷	۵/۴۸	۲/۹۳	۱/۹۴	مقاومت بدنه N	۱/۳
۳۵/۸۸	۲۱/۰۲	۶/۳۴	۵/۸۲	۳/۲۱	۲/۰۵	مقاومت بدنه با بازو N	
۲۷/۴۱	۱۳/۴۸	۵/۱۶	۳/۹۸	۲/۷۱	۱/۹۴	مقاومت بدن N	۲/۲
۳۰/۴۰	۱۵/۱۸	۶/۰۷	۴/۶۸	۳/۳۶	۲/۱۷	مقاومت بدنه با بازو N	

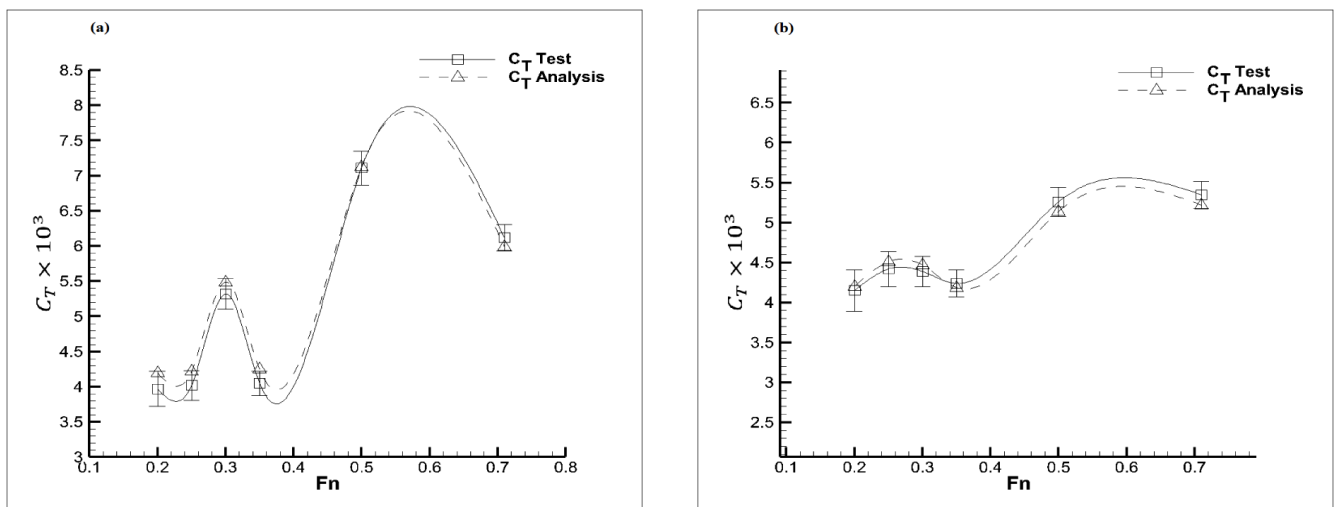
کل بدنه مدل استفاده شده است. اختلاف مقدار ضریب مقاومت اندازه‌گیری شده بازو در تست آزمایش و ضریب مقاومت بدست آمده از اختلاف ضریب مقاومت بدنه با بازو از بدنه بدون بازو بین $۰/۰۰۰۶۴$ تا $۰/۰۰۰۷۷$ متغیر است. مقدار متوسط آنها معادل $۰/۰۰۰۷$ است. در این صورت، اگر ضریب مقاومت مدل به همراه بازو در آزمایش با C_T ، ضریب مقاومت اندازه‌گیری شده بازو با C_{TS} و ضریب تصحیح با C مشخص شوند، ضریب مقاومت مدل C_{Tm} را از رابطه زیر بدست می‌آید. مقدار ضریب تصحیح C را برابر $۰/۰۰۰۷$ است.

$$C_{Tm} = C_T - (C_{TS} - C) \quad (۱۴)$$

در شکل ۱۴ نمودار ضریب مقاومت مدل بدست آمده از آزمایش با در

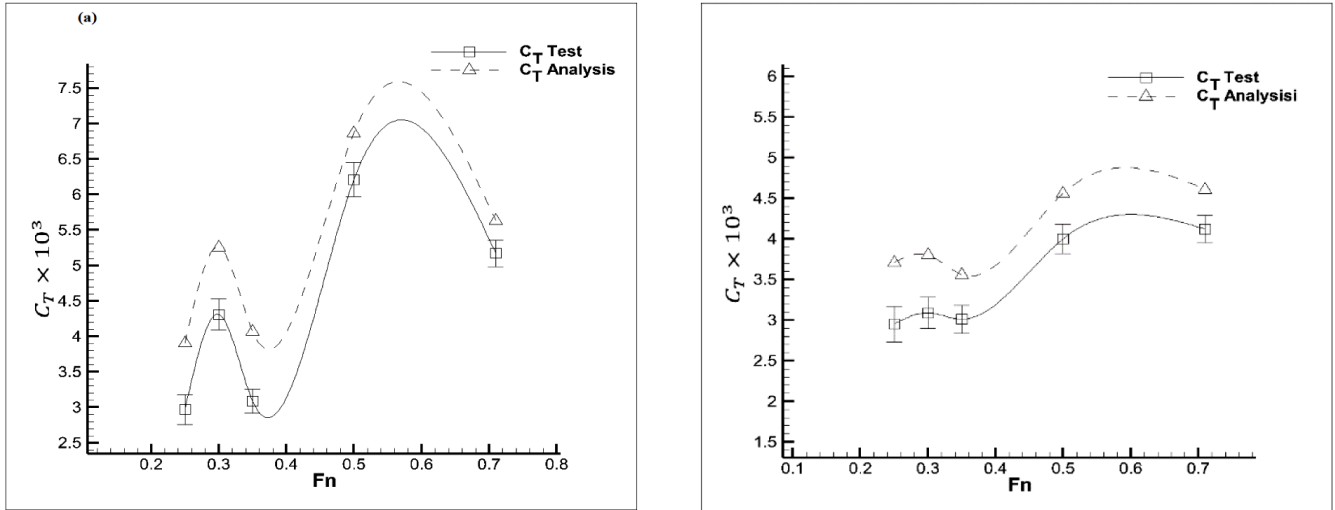
محدوده رژیم جریان آرام می‌باشد ولی هنگامی که این بازو در پشت جسم قرار گرفته، بخشی از بازو در محدوده و یک بدنه مدل قرار گرفته و رژیم جریان در آن بخش معشوش می‌گردد. در این حالت نیروی مقاومت وارد بر بازو به شکل بازو، سطح خیس بازو و رژیم جریان در اطراف آن بستگی دارد. در این حالت امکان ارائه یک ضریب تصحیح کلی برای تمامی حالات مقدور نبوده و باید برای هر بازو و مدل ضریب تصحیح خاص خود را استخراج نمود.

در جدول ۹ ضریب مقاومت بازو بدست آمده از آزمایش و ضریب مقاومت بازو از کم کردن ضریب مقاومت بدنه بدون بازو (بدست آمده از تحلیل) از ضریب مقاومت بدنه به همراه بازو (بدست آمده از آزمایش) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در محاسبه ضریب مقاومت بازو از مساحت



شکل ۱۲: ضریب مقاومت بدنه و بازو حاصل از حل عددی و آزمایش در عمق‌های بی بعد (a) ۱/۳ و (b) ۲/۲

Fig. 12. Resistance coefficient of the body with the strut obtained from numerical solution and model test in dimensionless depths a) 1.3 and b) 2.2



شکل ۱۳: ضریب مقاومت بدنه حاصل از تحلیل و مقدار بدست آمده از آزمایش از کم کردن مقاومت بدنه با بازو از مقاومت بازو در عمق‌های بی بعد ۲/۲ (b) و ۱/۳ (a)

Fig. 13. Resistance coefficient of the body obtained from the numerical solution and comparison with the experimental results obtained by subtracting the resistance coefficient of body with strut from the strut alone in dimensionless depths a) 1.3 and b) 2.2

در عمق حرکتی بی بعد ۱/۳ و دو سرعت ۲/۱۹ m/s و $v=1/3$ نشان داده شده است. برای ثبت تغییرات سطح آزاد آب از چهار عدد حسگر ارتفاع آب (W_{p1} و W_{p2} و W_{p3} و W_{p4}) مطابق شکل‌های ۷ و ۸ در یک مقطع ثابت در طول حوضچه استفاده شده است. مقادیر ثبت شده برای تغییرات سطح آزاد اندازه‌گیری شده توسط این چهار عدد سنسور حسگر در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ برای حالت‌های حرکتی جسم در در عمق‌های بی بعد ۱/۳ و ۲/۲ و

نظر گرفتن ضریب تصحیح بازو نشان داده شده است. این مقادیر در جدول ۱۰ نیز ارائه گردیده است.

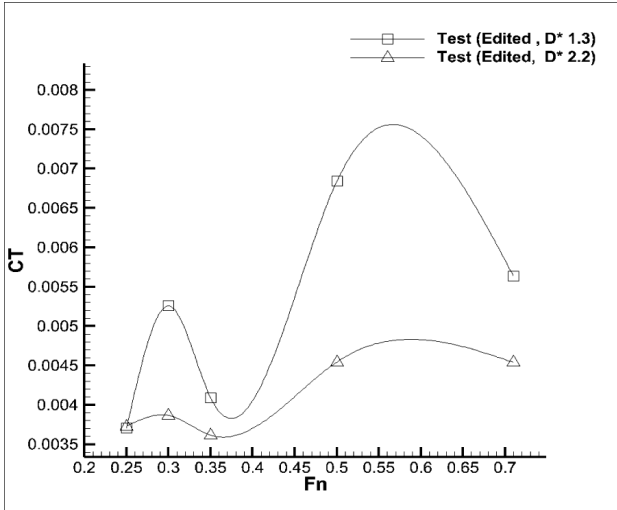
۴-۲- ارتفاع موج تولیدی در سطح آزاد

حرکت جسم در نزدیک سطح آزاد باعث ایجاد موج روی سطح آزاد آب گردیده است. امواج تولیدی در سطح آزاد حوضچه آزمایش در شکل ۱۵

جدول ۹: ضریب مقاومت بازوی اتصال مدل به ارايه

Table 9. Resistance coefficient of the strut

D^*	عدد فرود	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۷۱
۱/۳	ضریب مقاومت بازو بدست آمده از آزمایش	۰/۰۰۱۱۵	۰/۰۰۱۰۴	۰/۰۰۱۰۱	۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۹۶
	ضریب مقاومت بدست آمده از اختلاف ضریب مقاومت بدنه با بازو از بدنه بدون بازو	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۲۶
	اختلاف	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۷۳	۰/۰۰۰۰۷
۲/۲	ضریب مقاومت بازو بدست آمده از آزمایش	۰/۰۰۱۳۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۲۸	۰/۰۰۱۲۹	۰/۰۰۱۲۸
	ضریب مقاومت بدست آمده از اختلاف ضریب مقاومت بدنه با بازو از بدنه بدون بازو	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۵۵
	اختلاف	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۰۷۲	۰/۰۰۰۷۳



شکل ۱۴: ضریب مقاومت تصحیح شده زیردریائی مدل
 Fig. 14. The corrected resistance coefficient of the submarine model

سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نمودارهای محور طولی بیانگر فاصله از دماغه مدل است. طول امواج تولیدی با افزایش سرعت حرکتی جسم زیاد شده و با فاصله گرفتن از جسم ارتفاع امواج در عرض کم می‌شود. افزایش عمق غوطه‌وری باعث کاهش ارتفاع امواج اما بر روی طول امواج تولیدی تأثیر ندارد.

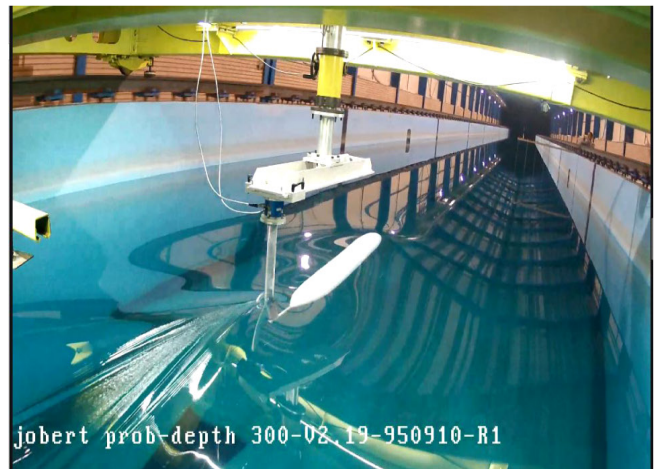
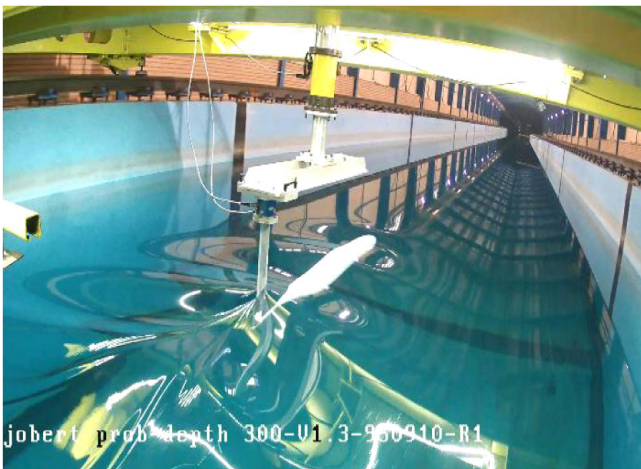
جهت تعیین اثر بازو در مشخصات موج تولیدی، تغییرات سطح آزاد آب در اثر حرکت جسم با دینامیک سیالات محاسباتی در دو عمق حرکتی و کلیه سرعت‌ها محاسبه شده است. محاسبات برای حالت‌های جسم تنها و جسم با بازو انجام شده که نمونه‌ای از فرم سطح آزاد محاسبه شده در دو سرعت $2/19$ m/s و $1/3$ در عمق غوطه‌وری بدون بعد $1/3$ در شکل ۱۸ نشان داده شده است. با افزایش سرعت جسم، طول و ارتفاع امواج تولیدی بزرگتر شده است که با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش تطابق دارند.

برای بررسی دقیق‌تر، پروفیل منحنی موج تولیدی اندازه‌گیری شده در حسگر W_{p1} با پروفیل منحنی حاصل از محاسبات عددی در دو حالت جسم

جدول ۱۰: ضریب مقاومت تصحیح شده زیردریائی مدل

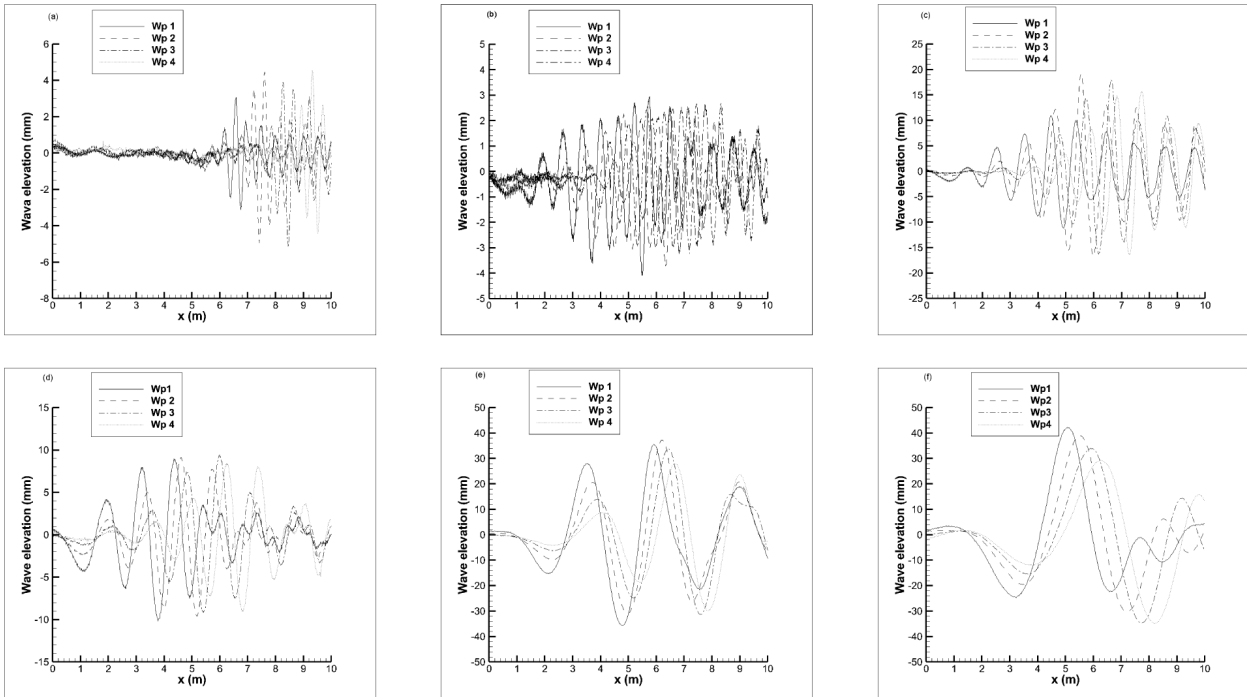
Table 10. The corrected resistance coefficient of the submarine model

عدد فرود					
۰/۷۱	۰/۵۰	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۵	D^*
۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۳۷	$1/3$
۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۳۷	$2/2$



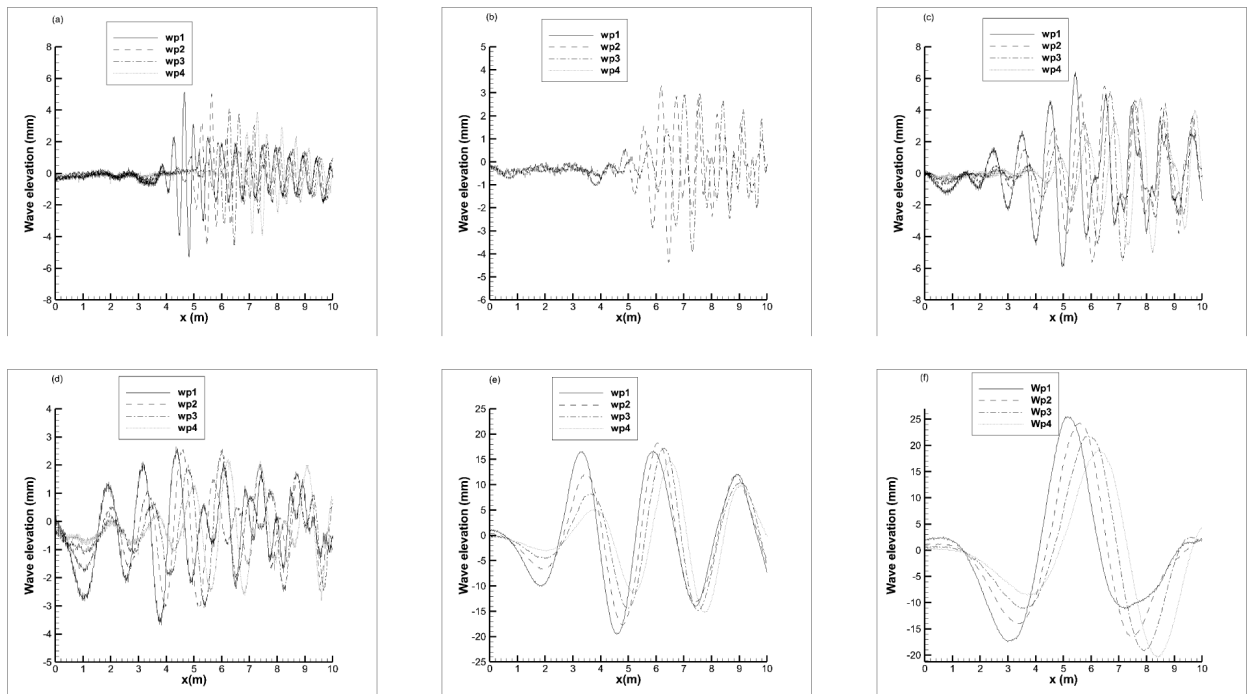
شکل ۱۵: امواج تولیدی در سطح آزاد در عمق بی بعد $1/3$ و سرعت $1/3$ متر بر ثانیه (شکل چپ) و سرعت $2/19$ متر بر ثانیه (شکل راست)

Fig. 15. The generated waves on free surface at the dimensionless depth of 1.3 and the model speed of 1.3 m/s (left) and a speed of 2.9 m/s (Right).



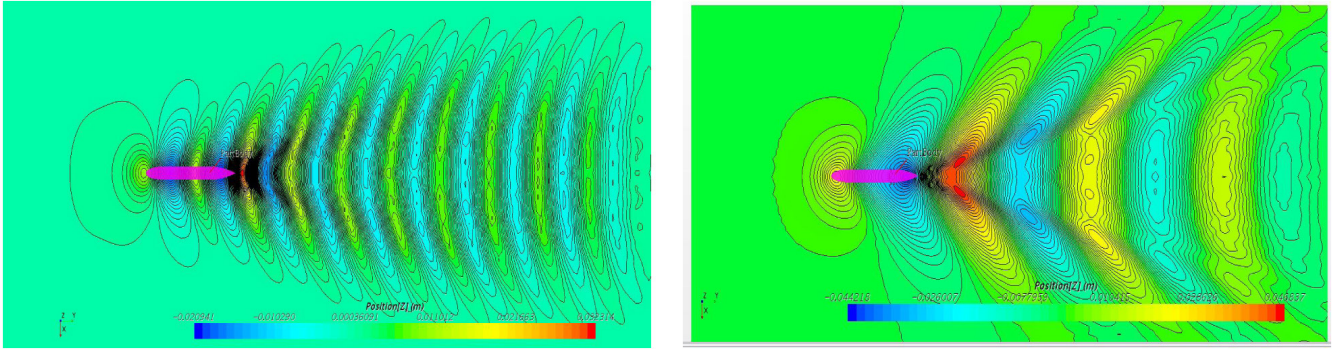
شکل ۱۶: تغییرات سطح آزاد اندازه‌گیری شده در آزمایش، توسط چهار عدد حسگر موج در سرعت‌های (a) ۰/۸۸، (b) ۱/۱، (c) ۱/۳ و (d) ۱/۵۳ و (e) ۲/۱۹ و (f) ۳/۱ متر بر ثانیه در عمق بی بعد ۱/۳

Fig. 16. The free surface elevations measured by four sensors in the towing tank at speeds of a) 0.88, b) 1.1, c) 1.3, d) 1.53, e) 2.19 and f) 3.1 m/s at the dimensionless depth of 1.3

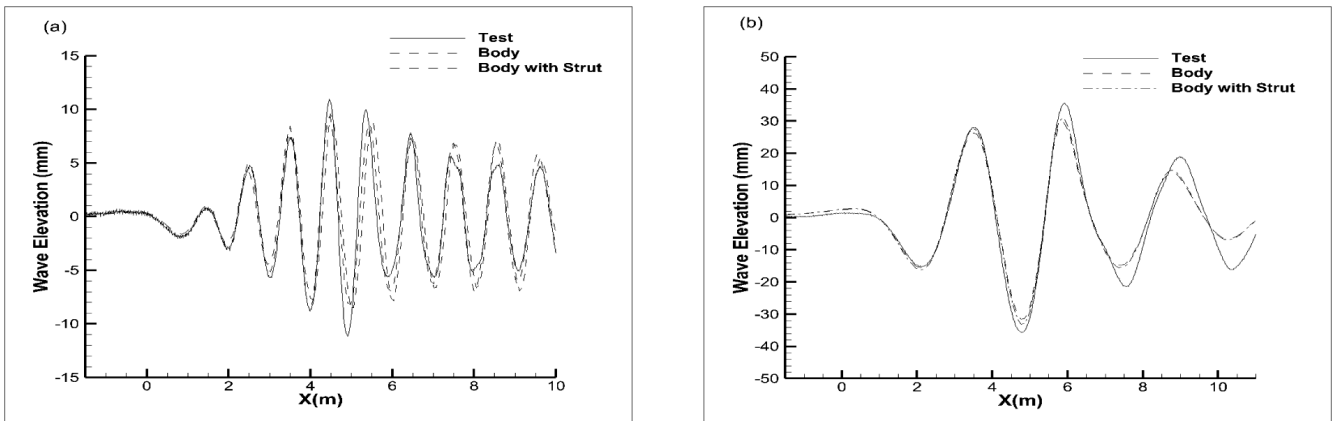


شکل ۱۷: تغییرات سطح آزاد اندازه‌گیری شده در آزمایش، توسط چهار عدد حسگر موج در سرعت‌های (a) ۰/۸۸، (b) ۱/۱، (c) ۱/۳ و (d) ۱/۵۳ و (e) ۲/۱۹ و (f) ۳/۱ متر بر ثانیه در عمق بی بعد ۲/۲

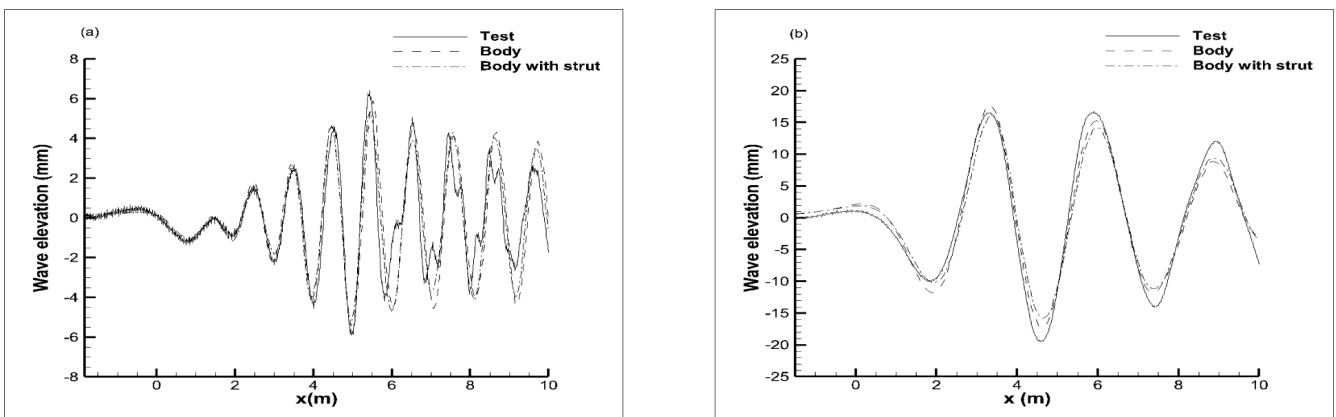
Fig. 17. The free surface elevations measured by four sensors in the towing tank at speeds of a) 0.88, b) 1.1, c) 1.3, d) 1.53, e) 2.19 and f) 3.1 m/s at the dimensionless depth of 2.2



شکل ۱۸: تغییرات سطح آزاد محاسبه شده در عمق بی بعد $1/3$ و سرعت $1/3$ متر بر ثانیه (شکل چپ) و سرعت $2/19$ متر بر ثانیه (شکل راست)
 Fig. 18. The calculated free surface elevation at the dimensionless depth of 1.3 and speeds of 1.3 m/s (left) and 2.19 m/s (right)



شکل ۱۹: مقایسه سطح آزاد اندازه گیری شده با نتایج حل عددی برای بدنه تنها و بدنه با بازو در سرعت های (a) $1/3$ متر بر ثانیه و (b) $2/19$ متر بر ثانیه در عمق بی بعد $2/2$
 Fig. 19. Comparison of free surface elevation measured in the towing tank with numerical solutions of the body alone and the body with the strut at speeds of a) 1.3 and b) 2.19 m/s at the dimensionless depth of 1.3



شکل ۲۰: مقایسه تغییرات سطح آزاد مشاهده شده در آزمایش، تحلیل بدنه و تحلیل بدنه با بازو در سرعت های (a) $1/3$ و (b) $2/19$ متر بر ثانیه در عمق بی بعد $2/2$
 Fig. 20. Comparison of free surface elevation measured in the towing tank with numerical solutions of the body alone and the body with the strut at speeds of a) 1.3 and b) 2.19 m/s at the dimensionless depth of 2.2

جدول ۱۱: طول امواج تولیدی برحسب متر حاصل از روش‌های مختلف

Table 11. The generated wave length obtained by different methods in meter

D^*	سرعت	آزمایش	تحلیل	تئوری پتانسیل
۱/۳	۱/۳	۱/۰۲	۱/۰۱	۱/۰۸
	۲/۱۹	۲/۹۶	۲/۹۲	۳/۰۷
۲/۲	۱/۳	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۸
	۲/۱۹	۲/۹۲	۲/۸۸	۳/۰۷

تنها و جسم با بازو در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ در دو عمق بی بعد $1/3$ و $2/2$ و سرعت‌های $1/3$ و $2/19$ متر بر ثانیه مقایسه شده است. در این نمودارهای محور طولی بیانگر فاصله از دماغه مدل است. طول موج حاصل در آزمایش و محاسبه با مقدار طول موج بر مبنای تئوری امواج خطی ($\lambda = 2\pi V^2/g$) در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند. طول موج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده با نرم‌افزار دارای تطابق خوبی هستند و اختلاف بین طول موج اندازه‌گیری شده با مقدار تئوریک بر مبنای امواج خطی در حدود ۴ درصد است. علت اختلاف عوامل متفاوت از جمله در نظر نگرفتن ویسکوزیته سیال در تئوری خطی موج می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ قابل مشاهده است بین منحنی پروفیل موج بدست آمده از تحلیل و آزمایش تطابق کاملی برخوردار است که نشان دهنده قابلیت روش انتخاب شده در شبیه‌سازی پروفیل منحنی سطح آزاد می‌باشد. بعلاوه با توجه به آنکه محل حسگر در فاصله ۱ متری از محور تقارن مدل قرار دارد، موج ناشی از بازو با تاخیر بسیار به محل حسگر رسیده و در محدوده نزدیک مدل عملاً اختلافی بین نتایج تحلیل مدل با بازو و بدون بازو مشاهده نمی‌شود. با این وجود در فواصل دور از مدل به علت رسیدن امواج بازو و امواج بازتاب شده از دیواره حوضچه به حسگر، بین نتایج آزمایش و تحلیل اختلاف وجود دارد.

بازو تحلیل شد. در تحلیل‌های انجام شده، جریان سیال در اطراف بدنه به صورت غیر قابل تراکم، ویسکوز، معشوش و دائم در نظر گرفته و برای شبیه‌سازی جریان متلاطم، از معادلات رنژ و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ و برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده شد.

نتایج نیروی مقاومت و منحنی‌های سطح آزاد اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به عنوان نتایج مرجع برای کالیبراسیون و صحت سنجی تحلیل‌های مدل مغروق متحرک در نزدیکی سطح آزاد ارائه گردید. مقایسه نتایج تجربی و عددی بدنه به همراه بازو نشان داد که روش تحلیل انتخاب شده توانایی تحلیل مقاومت یک شناور زیرسطحی در نزدیک سطح را دارا می‌باشد. اثر بازو در نیروی مقاومت مدل مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که اثر بازو غیر خطی بوده و روش جمع آثار بین مقاومت مدل و بازو به تنهایی و مدل با بازو برقرار نمی‌باشد. برای حذف اثر بازو در نتایج آزمایش، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ضریب تصحیح بازو تعیین و ضریب مقاومت مدل با استفاده از آن ارائه گردید. برای این مدل و بازوی مورد استفاده در آزمایش، ضریب تصحیح بازو به مقدار 0.0007 بدست آمد. در خصوص منحنی موج تولیدی در سطح تطابق بسیار خوبی بین نتایج تحلیل و آزمایش مشاهده شده و مشخص گردید که بازو در ناحیه نزدیک مدل، اثری در تغییرات شکل سطح آزاد ندارد. در فواصل دور از بدنه به علت وجود اثر بازو و بازتاب امواج از دیواره حوضچه شکل سطح آزاد کاملاً تغییر یافته و در این ناحیه بین نتایج آزمایش و تحلیل اختلاف کلی مشاهده می‌شود.

تشکر و قدردانی

از مساعدت و همکاری مسئولین و پرسنل آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس بخصوص جناب آقای مهندس هاشمی، دکتر نجفی و مهندسی مقدس تشکر و قدردانی داریم. بدون همکاری آنها انجام این کار امکان پذیر نبود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر (m)
D^*	عمق بی بعد
g_i	مولفه شتاب گرانش در جهت i
L	طول مدل (m)
H	عمق غوطه‌وری (m)

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نیروی مقاومت و پروفیل منحنی موج تولیدی یک مدل زیردریایی جوهرت به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در روش تجربی استفاده شده، مدل در شش سرعت و دو عمق در آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس آزمایش گردید. برای بررسی اثر تکرار پذیری آزمایش نیز، آزمایش‌ها تکرار شد. سپس برای بررسی اثر بازو در نتایج بدست آمده، بازو به تنهایی مورد آزمایش قرار گرفت. در روش عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و توسط نرم‌افزار استار سی سی ام پلاس، مدل با و بدون

College, Launceston, 1991.

- [7] R.F. Roddy, Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments, DTIC Document, 1990.
- [8] T.P. Crook, An initial assessment of free surface effects on submerged bodies, Monterey, California. Naval Postgraduate School, 1994.
- [9] L. Brady, Hydrodynamics of Autonomous Underwater Vechiles through CFD Investigations, Australian Maritime College, Launceston, 2007.
- [10] X. Shi, X.-q. Chen, J.-h. Tan, Study of resistance performance of vessels with notches by experimental and computational fluid dynamics calculation methods, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 15(3) (2010) 340-345.
- [11] M. Mackay, The standard submarine sodel: a survey of static hydrodynamic experiments and semiempirical predictions, Defence R&D Canada, Atlantic, 2003.
- [12] S. Wilson-Haffenden, M. Renilson, D. Ranmuthugala, E. Dawson, An Investigation into the Wave Making Resistance of a Submarine Travelling Below the Free Surface, (2010).
- [13] E. Dawson, An investigation into the effects of submergence depth, speed and hull length-to-diameter ratio on the near surface operation of conventional submarines, University of Tasmania, 2014.
- [14] S.K. Shariati, S.H. Mousavizadegan, The effect of appendages on the hydrodynamic characteristics of an underwater vehicle near the free surface, Applied Ocean Research, 67 (2017) 31-43.
- [15] M. Renilson, Submarine Hydrodynamics, Springer, 2015.
- [16] b. Sadeghzadeh Parapari, m.S. seif, h. Mahdigholi, Identification of Underwater Vehicle Hydrodynamic Coefficients Using Model Tests, Journal Of Marine Engineering, 7(14) (2012) 31-43.
- [17] T.-L. Liu, Z.-M. Guo, Analysis of wave spectrum for submerged bodies moving near the free surface, Ocean Engineering, 58(0) (2013) 239-251.
- [18] A. Nematollahi, A. Dadvand, M. Dawoodian, An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study, Ocean Engineering, 96 (2015) 205-214.
- [19] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of computational physics, 39 (1) (1981) 201-225

فشار p

مرتبه گسسته سازی P

نسبت همگرایی R

نسبت گسسته سازی r

مولفه سرعت در جهت i u_i

سرعت V

سطح خیس بدنه (m^2) S

زمان (s) t

علائم یونانی

چگالی (kg/m^3) ρ

ویسکوزیته ($kg/m.s$) μ

منابع و مراجع

- [1] R.P. ITTC, Guidelines: Testing and Extrapolation Methods: Resistance-Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test, in: ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Procedure 7.5-02-02, 2002.
- [2] M. Javadi, M.D. Manshadi, S. Kheradmand, M.Moonsun, Experimental investigation of the effect of bow profiles on resistance of an underwater vehicle in free surface motion, Journal of Marine Science and Application, 14 (1) (2015) 53-60.
- [3] G. Weinblum, H. Amtsberg, W. Bock, Tests on wave resistance of immersed bodies of revolution, Defense Technical Information Center, 1950, Washigton DC, 1936.
- [4] G.P. Weinblum, J. Blum, The wave resistance of bodies of revolution, Dept. of the Navy, David Taylor Model Basin, Washington, D.C. . 1951.
- [5] S.F. Hoerner, Fluid-dynamic drag: practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance, Publishe by the Author, Washigton D.C., 1965.
- [6] A.J. Vine, M.R. Renilson, S.A. Gottschalk, An Investigation into the drag forces acting on a submerged hull travelling close to a free surface, Australian Maritme

[22] P.J. Roache, Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics, *Annual review of fluid Mechanics*, 29(1) (1997) 123-160.

[20] User Guide, STAR-CCM+, Version 6, (2015)

[21] C. Rhie, W. Chow, Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, *AIAA journal*, 21(11) (1983) 1525-1532.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

S. Khalil Shariati, S. H. Mousavizadegan, Experimental and Numerical Study of a Submerged Submarine Moving Near the Free Surface, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 347-364.

DOI: 10.22060/mej.2018.14029.5782

