

بررسی تاثیر ورودی تر در ضرایب هیدرودینامیکی شناور پشتیبان با انجام مطالعات عددی و آزمایشگاهی

محمد شاه آبادی فراهانی^۱، شهریار منصورزاده^۲، احمدرضا زمانی^۳

shahabadi_mohammad@yahoo.com

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان
 ۲و۳- استادیار پژوهشکده زیردریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

مون پول یک حفره در کف شناور است که برای پایین بردن ابزار به داخل آب در یک محیط امن تر به محققان کمک می کند. در این مقاله جهت بررسی اثرات وجود مون پول بر روی مقاومت شناور پشتیبان با ساخت یک مدل با مقیاس ۱:۳۷/۲ آزمون هایی در محدوده فرود ۰/۱۳۹ تا ۰/۳۷۰ در حوضچه کشش پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریای دانشگاه صنعتی اصفهان انجام گرفته است. آزمون ها در این دو حالت انجام شده است: در حالت اول ورودی مون پول در کف شناور باز، و در حالت دوم ورودی مون پول بسته شده است. افزایش مقاومت مدل با بررسی نتایج تست در این دو حالت محاسبه گردیده است. نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط موسسه حوضچه کشش هامبورگ که مطالعه مشابهی بر روی مدلی با مقیاس ۱:۱۷/۲ انجام داده است مقایسه شده است. پس از این مرحله با استفاده از نرم افزار انسیس سی اف اکس شبیه سازی عددی در حالت سیال دوفازی آب و هوا انجام شده و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده گردیده است. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه مقاومت کشتی در اثر وجود مون پول می باشد.

واژگان کلیدی: مقاومت شناور، حوضچه کشش، مون پول، شبیه سازی عددی، جریان دوفازی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۰۲/۲۴

۱- مقدمه

در طراحی شناورهای سطحی مهمترین مسئله تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و نیروهای وارد بر شناور است. بر اساس تئوری فرود نیروهای وارد شده به شناور را می توان به دو دسته اصلی مقاومت اصطکاکی که وابسته به عدد رینولدز حرکت شناور و مقاومت موج سازی که مستقل از عدد رینولدز و وابسته به عدد فرود حرکت شناور است تقسیم کرد. در این پژوهش با استفاده از امکانات حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان و همچنین استفاده از نرم افزار انسیس-سی اف اکس به بررسی مقاومت شناور کاسپین ۳ پرداخته و با استفاده از امکانات نرم افزار، کانتورهای مهم و نحوه حرکت سیال داخل مون پول مورد بررسی قرار می گیرد. از پژوهش های انجام شده در زمینه بررسی مقاومت شناور و تحلیل سیال اطراف آن می توان به پژوهشی که توسط تودا، استرن و لانگو در سال ۱۹۹۲ انجام شده اشاره کرد [۱].

در این کار توصیه هایی در مورد روش کارهای آزمایشگاهی ارائه شد، که در آن اثرات میدان موج بر روی جریان لایه مرزی یک مدل کشتی سری ۶۰ با ضریب بلوکی 0.6 بررسی شده بود. در پژوهشی که با همکاری سه موسسه تحقیقاتی اینسین^۲، دیوید تیلور^۳ و آیوا^۴ در سال ۲۰۰۱ انجام شد، الیویری و همکارانش در مورد آزمایش های قابل انجام در حوضچه های کشش همراه با نتایج تست های مقاومت، درجه فرورفتگی و شیب، جریان لایه مرزی و ویک برای مدل شناور سطحی اینسین-۲۳۴۰ تحقیق کردند [۲]. در پژوهشی دیگر کومار و سابرامانیا در سال ۲۰۰۵ بر روی اثرات دیواره حوضچه کشش بر مقدار درگ و بهترین نسبت هندسی بین عرض مدل و عرض حوضچه کشش تحقیق کردند. آنها بیان داشتند که حداقل نسبت پنج برابر عرض حوضچه تست به عرض مدل برای به حداقل رسیدن اثرات دیواره ها کافی می باشد [۳]. احمدی به بررسی عددی و تجربی ضرایب هیدرودینامیکی مدل شناور دی تی ام بی-۵۴۱۵ که یک شناور رزمی در ناوگان دریایی امریکا و از مدل های نمونه کنفرانس حوضچه

کشش^۵ می باشد با مقیاس ۱:۷۱ پرداخت [۴]. در زمینه شناورهای مجهز به مون پول می توان به واحد شناور تولید، ذخیره سازی و تخلیه^۶ اشاره کرد که یک شناور جهت استخراج، نگهداری و تخلیه نفت و گاز می باشد اولین نوع آن به نام شل کستلون^۷ در سال ۱۹۷۵ در اسپانیا مورد استفاده قرار گرفت و در حال حاضر ۲۰۰ عدد از این شناور در سرتاسر دنیا مورد استفاده است [۵]. در زمینه بررسی اثرات مون پول، فوکودا در ۱۹۹۷ موفق به تهیه عکس هایی از گردابه های تشکیل شده داخل مون پول شد [۶]. مولن (۲۰۰۰) به بررسی دو نوع نوسان اصلی طولی^۸ و عمودی در مون پول پرداخت و اثرات هر کدام را بررسی نمود [۷-۸]. ونتویر و تولن در ۲۰۰۸ با آزمایش بر روی دو نوع شناور، دریافتند که استفاده از مون پول در سرعت های گوناگون بین ۱۰٪ تا ۶۰٪ به مقاومت کل شناور اضافه میکند. آنها همچنین اثرات افزایش نسبت طول مون پول به آبخور شناور در میزان نوسانات طولی و نسبت طول به عرض مون پول در دو نوع نوسانات عمودی و طولی را بررسی کردند [۹]. در زمینه پژوهش های عددی از مهمترین کارهای انجام شده می توان به موفقیت هرت و نیکولز در ۱۹۸۱ به دستیابی روش حجم سیال^۹ جهت تحلیل مسائل سطح آزاد اشاره کرد که در آن، جهت تحلیل سیال اطراف شناور هر دو سیال آب و هوا در معادلات همزمان در نظر گرفته می شوند. قبلا معادلات حاکم فقط برای سیال آب و هوا بطور جداگانه حل می شد [۱۰]. روش حجم سیال برای محاسبه جریان سطح آزاد حول بدنه کشتی ویگلی، در سال ۱۹۹۹ توسط چن مورد استفاده قرار گرفت [۱۱]. همچنین در سال ۱۹۹۹ آپوتا جهت تحقیق در مورد شکست موج در جلوی یک کشتی و محاسبات سطح آزاد حول یک هیدروفویل از آن بهره گرفت [۱۲]. در زمینه مطالعات عددی روی اثرات مون پول در سال ۲۰۰۸ صدیق و ژبانگ به بررسی ضریب فشار در مون پول های با مقطع دایره و مستطیل در حالت های مختلف نسبت طول مون پول به عرض لبه جلویی شناور پرداختند. این پژوهش برای اولین بار برای حفره در شرایط دوقازی انجام شد و نشان داد رفتار

⁵ ITTC⁶ FPSO (Floating Production, Storage and Offloading)⁷ Shell Castellon⁸ Sloshing⁹ VOF (Volume of Fluid)¹ Block Coefficient² INSEAN³ DTMB⁴ IIHR

بیشتر ابزار و وسایل خود را در شرایط دریایی سخت وارد دریا کرد. در شکل (۱) مقطع برش خورده یک کشتی مشاهده می‌شود که مون پول در آن نشان داده شده است. نوسانات آب داخل مون پول می‌تواند توسط مکانیزم‌های مختلفی انجام شود. این نوسانات را میتوان به شکل زیر تفکیک کرد:

۱. در حرکت رو به جلو و ۲. نوسان آب در مون پول در حالت شناور ساکن در مسیر امواج حرکت آب درون مون پول به صورت نوسانات طولی و عمودی ظاهر می‌شوند. نوسانات عمودی موقعی اتفاق می‌افتد که ستون آب یک حرکت عمودی داخل مون پول انجام دهد و نوسان طولی زمانی اتفاق می‌افتد که حرکت آب بین دیواره‌های مون پول در راستای طولی رخ دهد. در حرکت شناور در آب آرام در سرعت رو به جلو، نوسانات، به دلیل گردابه‌های ایجاد شده در لبه جلویی مون پول و بخاطر جدایش جریان ایجاد می‌شود. گردابه‌های ایجاد شده بدلیل جدایش با لبه پشتی مون پول و سطح آزاد برخورد می‌کند. همزمان این گردابه‌ها به بالای حفره حرکت می‌کنند و نوسان طولی سطح آزاد رخ می‌دهد. نمونه این نوسان در شکل (۲) نمایش داده شده است.

طبق تحقیقات صدیق و ژبانگ در مون پول‌های مربعی که شکل مون پول مورد پژوهش حاضر نیز تقریباً از این نوع است، در اعداد فرود کم وقتی فرکانس طبیعی ایجاد شده توسط حرکت غیر چرخشی جریان داخل مون پول و فرکانس نوسانی ایجاد شده بدلیل جدایش جریان با هم برابر باشند نوسانات عمودی ایجاد می‌شود. زمانی که عدد فرود افزایش می‌یابد فرکانس جدایش جریان و نوسانات سطح آزاد برابریستند و نوسانات عمودی بدلیل پخش انرژی گردابه‌های ایجاد شده در لبه جلویی مون پول بوجود می‌آیند [۱۳]. این نوسانات در شکل (۳) نمایش داده شده است. مون پول شناور کاسپین ۳ دارای ابعاد $4/3 \times 4/4$ متر می‌باشد که در وسط شناور قرار دارد.

۳- آماده‌سازی و انجام فاز آزمایشگاهی

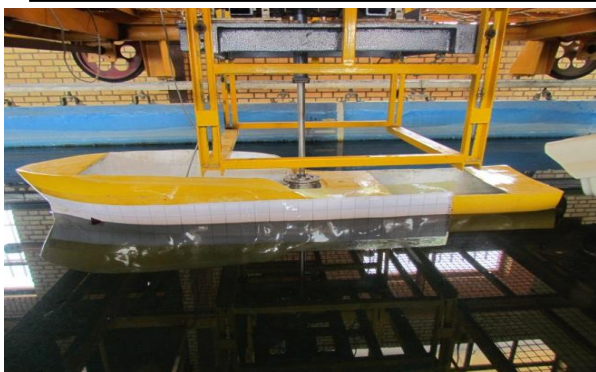
راه حل ساخت و انجام تست‌های حوضچه کشتی:
۱- استفاده از قالب گچی جهت بدست آوردن پروفیل بدنه کشتی.

سطح آزاد در شکل‌های گوناگون مون پول متفاوت است [۱۳]. در سال ۲۰۱۰ آلسگارد نوسانات عمودی در چهار مدل گوناگون از مون پول را توسط نرم‌افزار اپن فوم^۱ بررسی کرد. او برای دو نوع خاص از این مون پول‌ها مطالعات آزمایشگاهی انجام داد. نتایج بدست آمده از فرکانس تشدید شده بدلیل نوسانات داخل مون پول اختلافی تا حد ۲۰٪ را بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد [۱۴]. هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر وجود مون پول بر روی مقاومت شناور کاسپین ۳ و همچنین بررسی رفتار سیال داخل مون پول می‌باشد. تست‌های حوضچه کشتی در پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریایی دانشگاه صنعتی اصفهان صورت گرفته است. حوضچه کشتی فوق بتریب دارای طول، عرض و عمقی برابر با ۱۰۸، ۳ و ۲/۲ متر است. همچنین این پژوهش در سال ۲۰۱۰ در موسسه حوضچه کشتی هامبورگ که دارای حوضچه کشتی با ابعاد طول، عرض و عمقی برابر با ۳۰۰، ۶ و ۳ متر می‌باشد، انجام شده است که در انتها مقایسه ای بین نتایج آزمایشگاهی و عددی با نتایج منتشر شده توسط این موسسه انجام شده است.

۲- معرفی مدل

شناور کاسپین ۳ از مجموعه شناورهای پشتیبان می‌باشد که به سفارش شرکت نفت خزر ساخته شده است. از اصلی-ترین اهداف ساخت این شناور پشتیبان می‌توان به عملیات یدک‌کشی سکوه‌های حفاری اشاره کرد. مهمترین تفاوت این شناور با سایر شناورهای پشتیبان مجهز بودن آن به عرشه هلی کوپتر، جرثقیل پاشنه و مون پول می‌باشد. مون پول یک ورودی تر در کف یا ته بدنه کشتی یا سکو می‌باشد که به متخصصان و محققان اجازه پایین بردن ابزار و وسایل خود به زیر آب را می‌دهد. مون پول همچنین به غواصان و قایق‌های کوچک اجازه می‌دهد در یک محیط امن تر وارد آب شوند. از جمله شناورهای مجهز به مون پول: شناورهای حفاری، شناورهای لوله‌گذاری، شناورهای جهت شکستن صخره‌ها در کف دریا، شناورهای تحقیقاتی، غواصی و پشتیبان می‌باشند. بهترین محل قرارگیری مون پول در قسمت میانی شناور است که حرکت‌های چرخشی شناور حداقل است و باعث می‌شود بتوان در یک محیط با امنیت

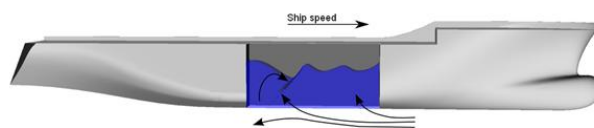
¹ OpenFoem



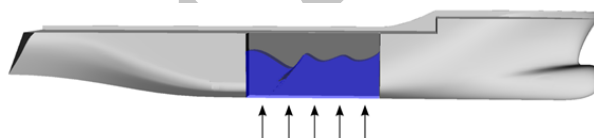
شکل (۴) مدل کشتی کاسپین ۳ متصل به دینامومتر در حوضچه کشش.



شکل (۱) کشتی با مقطع میانی برش خورده مجهز به مون پول.



شکل (۲) نوسانات طولی ایجاد شده در مون پول.



شکل (۳) نوسانات عمودی ایجاد شده در مون پول.

- پس از انجام هر تست به مدت ۲۰ الی ۴۰ دقیقه جهت ساکن شدن آب نیاز به توقف در انجام آزمون‌ها می‌باشد.
- اندازه‌گیری نیروی مقاوم در برابر حرکت مدل به صورت پوسته برهنه (بدون پروانه و دیگر متعلقات مانند سکان) انجام می‌گیرد.
- دمای آب حوضچه کشش پژوهشکده ۱۸ درجه سانتی گراد می‌باشد و از خواص آب در این دما استفاده می‌شود. بدیهی است که در محاسبات کشتی واقعی از خواص آب دریا در دمای واقعی بایستی استفاده کرد.
- در انجام تست، کنترل ارابه کشش از راه دور می‌باشد بدین معنی که اگر کنترل بصورت دستی و توسط اپراتور بر روی ارابه انجام شود بدلیل لرزش‌های بوجود آمده در نتایج خطا ایجاد می‌شود.

۴- انجام مطالعات عددی

در سال‌های اخیر محاسبات سیال لزج به‌همراه اثرات سطح آزاد به یکی از مهمترین موضوعات در زمینه هیدرو دینامیک کشتی تبدیل شده است. این موضوع چالش بزرگی برای سال‌های متمادی بوده است. محاسبات عددی کشتی در سال‌های اخیر در چارچوب معادلات حلگر ناویر-استوکس رینولدز^۱ متوسط برای سیال لزج پیشرفت بسیاری داشته است. همانطور که در قسمت‌های ابتدایی گفته شد مدل مورد نظر در کار حاضر، مدل یک شناور سطحی می‌باشد که در دوفاز هوا و آب بطور همزمان قرار دارد. در این تحلیل آب و هوای تراکم‌ناپذیر، در دمای تست با خواص ترمودینامیکی ثابت فرض می‌شوند. جریان سطح

- ۲- ساخت بدنه مدل از جنس فایبرگلاس و انجام مراحل تکمیلی در آماده‌سازی بدنه.
- ۳- مدرج‌سازی بدنه برای تعیین خط آب و سایر اندازه‌گیری‌های مورد نظر.
- ۴- طراحی و ساخت تکیه‌گاه‌های مناسب جهت نصب ابزارهای دقیق.

از موارد مهم دیگر جهت انجام تست‌ها می‌توان به سنگین‌سازی مدل توسط قالب‌های سربی همچنین کالیبره کردن ابزار و وسایل اندازه‌گیری و همچنین استفاده از کاغذ سمباده جهت ایجاد آشفستگی در جریان و برقراری تشابه دینامیکی اشاره کرد. در شکل (۴) مدل نهایی بسته شده به دینامومتر جهت انجام تست‌ها نشان داده شده است. ضمناً در زمان انجام تست‌ها نکات زیر مورد توجه قرار گرفته است:

تست‌ها در محدوده اعداد فرود ۰/۱۳۹ تا ۰/۳۷۰ انجام می‌شوند. اعداد فرود بر اساس عمق آبخور شناور محاسبه شده‌اند. زمان داده‌برداری در هر تست پس از شتاب‌گیری اولیه و قبل از دستور توقف ارابه کشش می‌باشد. در این بازه زمانی سرعت ثابت بوده و نیروی مقاوم وارد بر مدل را می‌توان استخراج کرد.

^۱ RNANS

مخلوط (توده سیال) مجموع خواص مؤثر تمامی فازهاست. کمیت کسر حجمی سیال i ام با α_i نشان داده شده و به صورت نسبت حجم فاز مطلوب به حجم کل در نظر گرفته می شود:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad i=1, N_p \quad (1)$$

N_p برای جریان سطح آزاد برابر ۲ است. در معادلات هیدرودینامیک مدل همگن برای انتقال مومنتوم در کل دامنه فرض می شود:

$$V_i = V \quad i=1,2 \quad (2)$$

معادله پیوستگی برای هر یک از فازها جداگانه ارضا می گردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i v) = 0 \quad i=1,2 \quad (3)$$

معادلات مومنتوم برای توده سیال حل شده و ضرایب خواص سیال نظیر چگالی و لزجت به صورت توده ای در آن لحاظ می شوند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m v) + \nabla \cdot (\rho_m v \otimes v) = \nabla \cdot (-p + \mu_m ((\nabla v) + (\nabla v)^T)) \quad (4)$$

معادله بقاء حجم در هر المان شبکه به صورت زیر می باشد:

$$\sum \alpha_i = 1 \quad (5)$$

همانطور که عنوان شد جهت مدل سازی آشفتگی جریان از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ بهره گرفته شده است. مدل های دیگری همچون مدل اغتشاشی LES بدلیل وجود گردابه در اطراف شناور نیز برای تحلیل مناسب است اما به دلیل تحلیل مساله در حالت دوفاز مدل $k-\varepsilon$ کارایی بهتری جهت تحلیل دارد. از آنجا که برای مدل سازی جریان سطح آزاد از مدلی همگن استفاده شد، می بایست شکل همگن معادلات $k-\varepsilon$ نیز استفاده شود؛ از این رو این معادلات که برای توده سیال با خواص مخلوط حل می گردد عبارتند از:

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v k) = \nabla \cdot (\mu_m + \frac{\mu_{tm}}{\sigma_k}) \nabla k - \rho_m \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v \varepsilon) = \nabla \cdot ((\mu_m + \frac{\mu_{tm}}{\sigma_k}) \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} ((C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho_m \varepsilon)) \quad (7)$$

P_k تولید آشفتگی به دلیل نیروهای لزجت و بویانسی است. مقادیر ضرایب ثابت معادلات فوق در جدول (۱) نشان داده شده است.

• مدل و دامنه حل:

همانطور که گفته شد مدل کشتی کاسپین ۳ در دو حالت موبول باز وبسته تحلیل می شود.

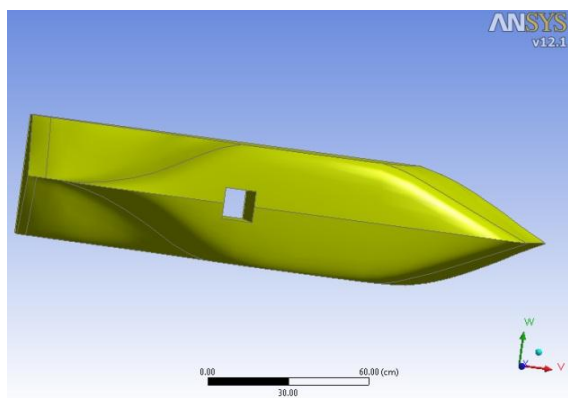
آزاد که پرکاربردترین جریان دوفازی است با توجه به پیوسته و تراکم ناپذیر بودن هر دو سیال آب و هوا اغلب از دیدگاه اوپلری همگن و از روش حجم سیال یا کسر حجمی تحلیل می شود. این روش برای اولین بار توسط هرت و نیکولز (۱۹۸۱) مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. تا قبل از این، معادلات فقط برای سیال آب یا سیال هوا بطور جداگانه حل می شد. در روش حجم سیال برای کلیه فازها تنها یک دسته معادلات همبسته در تمام دامنه با یک سری شرط مرزی حل می گردد. برای تشخیص نوع فاز از کمیتی به نام کسر حجمی استفاده می شود. در حل جریان های دوفازی اعمال نیروی شناوری به لحاظ وجود اختلاف چگالی ذاتی در دامنه حل، در معادلات مومنتوم الزامی است. از اثر کشش سطحی در دامنه حل صرف نظر شده و سطح مشترک دو فاز یک پارچه و غیر قابل اختلاط فرض می گردد. برای مدل سازی آشفتگی در جریان از مدل توربولانس $k-\varepsilon$ اسپیلون^۱ استفاده شده است. این مدل در بسیاری از کدهای عمومی دینامیک سیالات محاسباتی به کار رفته و در جریان سطح آزاد جواب های مطلوبی را فراهم می آورد. همچنین بدلیل شبیه سازی کشتی که در حالت واقعی در محیطی کاملاً توربولانت فعالیت می کند این مدل مناسب است. برای مدل سازی جریان نزدیک بدنه کشتی نیز از تقریب تابع دیوار مقیاس پذیر^۲ بهره گرفته شده است، که صحت و دقت حل را برای شبکه به هر اندازه ریز در نزدیک دیوار حفظ می نماید. یکی از مشکلات بزرگ توابع دیوار پیش بینی وابسته به ظرافت شبکه و موقعیت اولین گره نزدیک دیوار است، طوری که ریز کردن شبکه ضرورتاً جواب واحد با دقت بیشتر را نمی دهد. این مشکل عدم سازگاری، مستقل از عدد رینولدز جریان با استفاده از فرمولاسیون تابع دیوار مقیاس پذیر مرتفع می گردد. برای مدل سازی جریان سطح آزاد از دیدگاه اوپلری- اوپلری همگن، کمیت های انتقالی در میدان جریان به کمک پارامتر کسر حجمی تقسیم شده و تنها کافی است دسته معادلات انتقالی برای توده سیال حل گردد. بنابراین کلیه فازها تنها از یک میدان سرعت، فشار، دما و همچنین توربولانس سهم می برند. هر معادله انتقال توده ای با جمع زدن معادلات انتقال ابتدایی بر روی کلیه فازها بدست می آید. هر خاصیت

^۱ $k-\varepsilon$

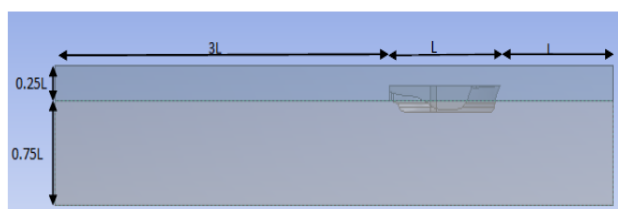
^۲ Scalable Wall Function

• شرایط مرزی

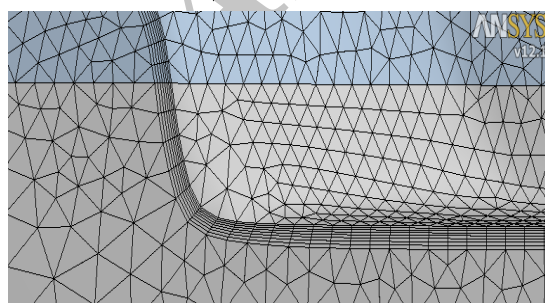
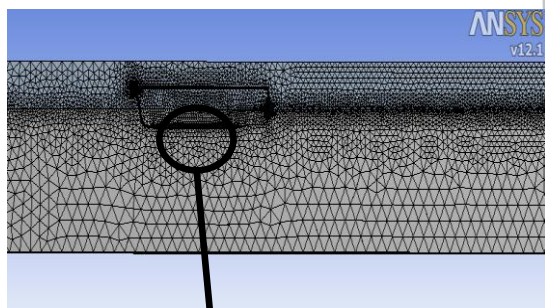
شرایط مرزی در مسئله زیر بصورت زیر در نظر گرفته شده است:



شکل (۵) مدل کاسپین ۳ در حالت مون پول باز.



شکل (۶) دامنه حل در اطراف مدل از نمای روبرو.



(ب)

شکل (۷) شبکه بندی ظریف سطح آزاد و لایه مرزی اطراف بدنه در حالت بدون مون پول، الف) نمای کلی شبکه اطراف مدل، ب) تصویر بزرگ نمایی شده از ناحیه منتخب.

جدول (۱) ضرایب ثابت معادله k-ε.

ثابتهای معادلات k-ε	cε1	cε2	σk	εσ	cμ
مقدار	۱/۴۵	۱/۹	۱	۱/۳	۰/۰۹

در شکل (۵) مدل مورد استفاده در حالت مون پول باز نشان داده شده است. همچنین جهت تحلیل از یک دامنه مکعب مستطیل در اطراف مدل استفاده شده است که ابعاد آن در جدول (۲) آمده است.

• شبکه بندی دامنه حل

بعد از آماده کردن هندسه مدل و قرار دادن آن در یک دامنه مناسب نیاز به شبکه بندی آن جهت تحلیل عددی می باشد. بدین منظور از یک شبکه بندی بی سازمان حول بدنه مدل و دامنه حل استفاده می شود. دلیل انتخاب شبکه بی سازمان وجود انحناهای فراوان در بدنه مدل می باشد که امکان استفاده از شبکه بندی منظم برای آن وجود ندارد. در نواحی ذکر شده در اطراف بدنه مدل و بویژه محل های با شیب تند و همچنین نقاط نوک تیز با استفاده از امکانات محیط شبکه بندی نرم افزار، از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. همچنین بر روی بدنه مدل به دلیل تشکیل لایه مرزی از یک شبکه چند لایه بهره گرفته شده است ضخامت لایه مرزی (δ)، با توجه به رابطه (۸) و با استفاده از مقدار Y^+ در محدوده ۳۰ تا ۷۰ حاصل شده است. دلیل انتخاب این محدوده از Y^+ استفاده از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ می باشد. بهترین محدوده انتخاب Y^+ در این مدل اغتشاشی کمتر از ۳۰۰ می باشد که با توجه به نتایج بدست آمده و بررسی کانتور آن در محیط نتایج نرم افزار مقادیر قابل قبولی از Y^+ مشاهده می شود.

$$\delta = 0.035 * L * Re^{-13/14} \quad (۸)$$

در شکل (۷) یک نمونه از شبکه بندی استفاده شده جهت تحلیل مسئله نشان داده شده است. در شکل ۶ دامنه حل نشان داده شده است.

جدول (۲) ابعاد دامنه در نظر گرفته شده جهت تحلیل عددی.

مرزهای دامنه حل	مرز فوقانی	مرز کف	دیوار جانبی	پایین دست کشتی	بالادست کشتی
طول مدل L=2(m)	0.25L	0.75L	1L	3L	L

روش کامل کننده نظریه فرود می باشد که مقاومت های اصلی وارد شده به کشتی را دو مقاومت اصطکاکی و موج-سازی در نظر میگیرد و هم اکنون این دستورالعمل در اکثر حوضچه های کشتی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش مقاومت کل کشتی^۲ بصورت زیر بدست می آید:

ضریب مقاومت کل کشتی اصلی (CT_S) از رابطه (۹) بدست می آید:

$$CT_S = (1+k)CF_S + CR_S + C_{AA} + \Delta C_F + C_A \quad (9)$$

در این رابطه k ضریب شکل شناور است. در پژوهش حاضر مطابق با آزمون های HSVA، $1+k=1$ در نظر گرفته می شود. CF_S نیز ضریب مقاومت اصطکاکی است و از رابطه (۱۰) که به رابطه ITTC-1957 موسوم است بدست می آید:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (10)$$

این رابطه در واقع فرمول محاسبه ضریب مقاومت اصطکاکی صفحه تختی است که دارای همان طول و سطح خیس شده کشتی است.

بر اساس تشابه عدد فرود ضریب مقاومت باقی مانده کشتی اصلی CR_S با ضریب مقاومت باقی مانده مدل کوچک شده CR_m برابر است، بنا بر این:

$$CR_S = CR_m = CT_m - CF_m \quad (11)$$

در روابط فوق زیر نویس s مربوط با پارامترهای شناور اصلی و زیر نویس m مربوط به پارامترهای مدل کوچک شده مورد آزمایش میباشد. در این رابطه CR_m ضریب مقاومت باقی مانده مدل کشتی است که از تفاضل مقاومت کل مدل کشتی (CT_m) و مقاومت اصطکاکی مدل کشتی (CF_m) بدست می آید.

C_{AA} نیز ضریب مقاومت هوا است که از رابطه (۱۲) محاسبه می شود:

$$C_{AA} = 0.001 A_T / S \quad (12)$$

در این رابطه A_T مساحت تصویر شده سطح جلو بدنه (عمود بر جهت حرکت کشتی) در خارج از آب و S مساحت سطح خیس شده است. ΔC_F نیز ضریب تصحیح ناشی از اختلاف زبری پوسته کشتی و مدل می باشد و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\Delta C_F = [105 \left(\frac{K_s}{L_{WL}} \right) 1/30.64] \times 10^{-3} \quad (13)$$

مرز ورودی: در مسئله حاضر دیوار جلویی دامنه و مرز بالادست مدل، مرز ورودی مسئله می باشد. سرعت سیال در این محیط مشخص می گردد. درصد حجمی آب و هوای ورودی بصورت یک تابع استپ^۱ در این ناحیه تعیین می شود.

مرز خروجی: دیواره پشتی دامنه حل و مرز پایین دست مدل، مرز خروجی مسئله می باشد. سیال از این مرز خارج می شود. شرط مرزی فشار استاتیک برای این ناحیه در نظر گرفته می شود.

مرز سطح مشترک: این سطح که در قسمت طراحی نرم افزار ایجاد شده است به منظور تفکیک بین محیط آب و هوا می باشد. حالت سیال-سیال را برای نوع دوفاز جریان و همچنین عدم انتقال جرم بین دو فاز را در نظر می گیریم. لازم به ذکر است دلیل این انتخاب وجود سطح مشترک زیاد بین این دوفاز و عدم اختلاط آب و هوا بین این دو محیط می باشد.

مرز تقارن: این مرز که بر صفحه تقارن مدل منطبق است بعنوان شرط تقارنی در نظر گرفته می شود و تمام گرادیان های سرعت، فشار و... در راستای عمود بر آن صفر در نظر گرفته می شود. استفاده از این شرط مرزی زمان تحلیل مسئله را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

دیواره ها: منظور از دیواره ها مرز کف، مرز بالایی و دیواره های جانبی می باشد که برای همه این موارد از شرط دیواره با لغزش آزاد و بدون اصطکاک استفاده شده است. این انتخاب بدین دلیل است که در شرایط واقعی نیز کشتی در یک محیط با دامنه بی نهایت قرار دارد و با انتخاب این حالت برای دیواره ها تنش برشی بر روی آن ها صفر خواهد بود و سرعت مماسی سیال روی دیواره برابر سرعت سیال در نزدیک ترین نقطه به دیوار می باشد. همچنین سرعت عمودی بر دیواره صفر می باشد.

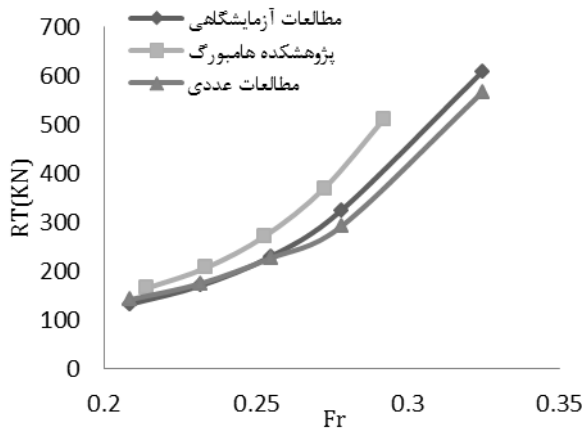
بدنه مدل: برای این ناحیه مدل از دیواره بدون لغزش استفاده می کنیم. با استفاده از این مدل سرعت سیال بر روی بدنه مدل صفر می باشد.

۵- تخمین مقاومت به کمک استاندارد ITTC78

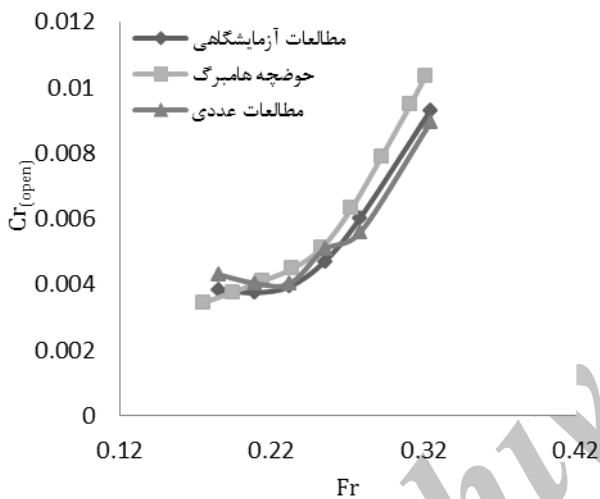
روش تجربی مرسوم محاسبه مقاومت کشتی، روش کنفرانس حوضچه کشتی سال ۱۹۷۸ می باشد [۱۵]. این

² Total Resistance

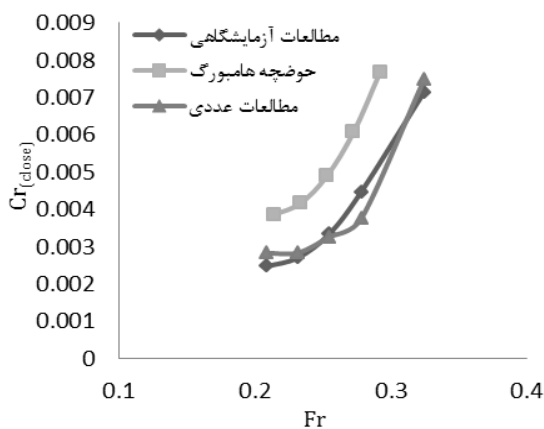
¹ Step Function



شکل (۹) مقایسه نیروی مقاومت شناور در حالت مون پول بسته در سه حالت نتایج تجربی پژوهشکده، پژوهشکده هامبورگ و حل عددی.



شکل (۱۰) مقایسه ضرایب مقاومت باقی مانده در حالت مون پول باز در سه حالت نتایج تجربی پژوهشکده، پژوهشکده هامبورگ و حل عددی.



شکل (۱۱) مقایسه ضرایب مقاومت باقی مانده در حالت مون پول بسته در سه حالت نتایج تجربی پژوهشکده، پژوهشکده هامبورگ و حل عددی.

که K_s زبری پوسته و L_{WL} طول خیس شده کشتی واقعی است. مقدار K_s برای کشتی مورد نظر بر اساس اطلاعات موسسه HSVA مقدار 150 میکرون در نظر گرفته می شود. C_A نیز ضریب اصلاح^۱ می باشد و اثراتی که در این روش پیش بینی در نظر گرفته نشده و همچنین عدم قطعیت های موجود در انجام تست را پوشش می دهد و مقدار آن 0.00044 در نظر گرفته شده است. محاسبه مقاومت کل و توان رانش کشتی با رابطه زیر انجام می شود:

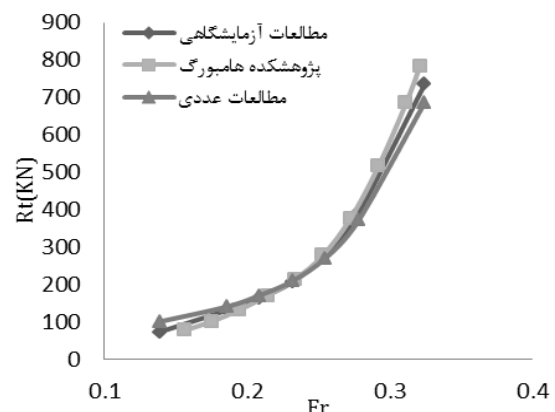
$$RT_s = CT_s \left(\frac{1}{2} \rho V_s^2 S_s \right) \quad (14)$$

که در این رابطه RT_s مقاومت کل کشتی و CT_s ضریب مقاومت کل، S_s سطح خیس شده کشتی، V_s سرعت کشتی و ρ چگالی آب دریا است.

۶- نتایج

در شکل های (۸) و (۹) مقایسه نیروی مقاوم وارد به کشتی اصلی بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی حاضر و نیز نتایج آزمایشگاهی پژوهشکده هامبورگ برای هر دو حالت مون پول باز و بسته بر مبنای عدد فرود انجام شده است. در شکل (۱۰) و (۱۱) نیز همین روند برای ضریب مقاومت باقی مانده کشتی اصلی انجام شده است.

در گزارشات حوضچه کشش هامبورگ به صراحت شکل بدنه و مدل مورد آزمون در حالت مون پول بسته مشخص نگردیده است و بر اساس مفاد گزارشات دریافتی از این موسسه امکان مقایسه دقیق در حالت مون پول بسته میسر نیست.



شکل (۸) مقایسه نیروی مقاومت شناور در حالت مون پول باز در سه حالت نتایج تجربی، پژوهشکده هامبورگ و حل عددی.

¹ Correlation Factor

همچنین در جداول (۵) و (۶) افزایش مقاومت اعمال شده در حالت مون پول باز نسبت به حالت بسته آن با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داده شده است. R_{tClose} نشان دهنده مقاومت کل در حالت مون پول بسته و R_{tOpen} نشان دهنده مقاومت کل در حالت مون پول باز است. با توجه به جداول (۳) و (۴) مشاهده می شود میانگین اختلاف نتایج بین مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در پژوهشکده و نتایج عددی در حدود ۶٪ می باشد. همچنین میانگین اختلاف نتایج بین نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر و موسسه حوضچه مدل کشتی هامبورگ در حالت مون پول باز در حدود ۱۰٪ می باشد.

اثر وجود مون پول در مقاومت کل شناور کاسپین ۳ بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل آزمایشگاهی و عددی بترتیب در جداول (۵) و (۶) نشان داده شده است.

جدول (۵) درصد افزایش مقاومت کل شناور در حالت مون پول باز نسبت به حالت بسته با استفاده از تحلیل آزمایشگاهی.

Difference%	RTclose (KN)	RTOpen (KN)	V(KTS)	Froude
۲۳/۷۱	۱۳۳	۱۶۳	۱۰/۷۱۶	۰/۲۰۸۵
۲۱/۷۷	۱۷۱	۲۰۸	۱۱/۹۰۴	۰/۲۳۱۶
۲۱/۴۹	۲۳۱	۲۷۹	۱۳/۰۹۶	۰/۲۵۴۸
۲۰/۷۵	۳۲۵	۳۹۳	۱۴/۲۸۸	۰/۲۷۸۰
۲۰/۸۹	۶۰۹	۷۳۶	۱۶/۶۶۷	۰/۳۲۴۳

جدول (۶) درصد افزایش مقاومت کل شناور در حالت مون پول باز نسبت به حالت بسته با استفاده از تحلیل عددی.

Difference%	RTclose (KN)	RTOpen (KN)	V(KTS)	Froude number
۱۹/۲۰	۸۶	۱۰۲	۷/۱۴۳	۰/۱۳۹
۱۷/۲۶	۱۲۱	۱۴۱	۹/۵۲۳	۰/۱۸۵۳
۲۰/۸۲	۱۴۲	۱۷۲	۱۰/۷۱۶	۰/۲۰۸۵
۲۰/۴۳	۱۷۵	۲۱۱	۱۱/۹۰۴	۰/۲۳۱۶
۱۹/۵۷	۲۲۷	۲۷۲	۱۳/۰۹۶	۰/۲۵۴۸
۲۷/۴۶	۲۹۲	۳۷۲	۱۴/۲۷۴	۰/۲۷۸۰
۲۱/۱۹	۵۶۷	۶۸۷	۱۶/۶۵۳	۰/۳۲۴۰
۱۸/۴۶	۸۷۸	۱۰۴۱	۱۹/۰۱۸	۰/۳۷۰

با توجه به جداول (۵) و (۶) مشاهده می شود افزایش مقاومت شناور در حالت مون پول باز نسبت به مون پول بسته تابعی از عدد فرود بوده و میانگین آن در حدود ۲۱٪ است.

اختلاف قابل توجه در نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام شده در مطالعه حاضر با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط حوضچه کشش هامبورگ در این حالت، احتمالاً بدلیل اختلاف در شکل بدنه مورد مطالعه می باشد. لازم به ذکر است وجود برخی از محدودیت های اندازه گیری و روش های به کار رفته در دو حوضچه مورد بررسی، امکان تطابق یک به یک بین اعداد فرود مدل های مورد بررسی وجود نداشته و به همین دلیل محدوده اعداد فرود بکار رفته در اشکال (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) با یکدیگر کاملاً منطبق نیست. هر چند محدوده اعداد فرود آزمون های انجام شده به یکدیگر نزدیک می باشند. با توجه به اشکال انطباق خوبی بین نتایج مشاهده می شود.

در جداول (۳) و (۴) درصد اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی انجام شده در حوضچه کشش پژوهشکده علوم و تکنولوژی هسته ای در دو حالت مون پول باز و بسته نشان داده شده است. R_{tExp} نشان دهنده مقاومت کل بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و R_{tNum} نشان دهنده مقاومت کل بدست آمده از نتایج عددی می باشد.

جدول (۳) درصد اختلاف بین نتایج تجربی پژوهشکده و تحلیل عددی در حالت مون پول باز.

Difference%	RTNum (KN)	RTExp (KN)	V(KTS)	Froude
۶/۶۵	۱۴۱	۱۳۲	۹/۵۲۳	۰/۱۸۵۳
۴/۳۲	۱۷۲	۱۶۴	۱۰/۷۱	۰/۲۰۸۵
۱/۳۶	۲۱۱	۲۰۸	۱۱/۹۰	۰/۲۳۱۶
۳/۰۱	۲۷۲	۲۸۰	۱۳/۰۹	۰/۲۵۴۸
۵/۱۵	۳۷۲	۳۹۳	۱۴/۲۷	۰/۲۷۸۰
۶/۶۵	۶۸۷	۷۳۶	۱۶/۶۵	۰/۳۲۴۰
۶/۰۵	۱۰۴۱	۱۱۰۸	۱۹/۰۱	۰/۳۷۰

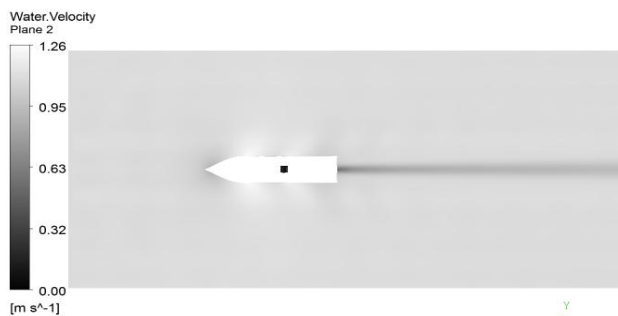
جدول (۴) درصد اختلاف بین نتایج تجربی پژوهشکده و تحلیل عددی در حالت مون پول بسته.

Difference%	RTNum (KN)	RTExp (KN)	V(KTS)	Froude
۶/۵۶	۱۴۲	۱۳۳	۱۰/۷۱۶	۰/۲۰۸۵
۲/۴۴	۱۷۵	۱۷۱	۱۱/۹۰۴	۰/۲۳۱۶
۱/۴۵	۲۲۷	۲۳۱	۱۳/۰۹۶	۰/۲۵۴۸
۱۰/۱۴	۲۹۲	۳۲۵	۱۴/۲۷۴	۰/۲۷۸۰
۶/۸۹	۵۶۷	۶۰۹	۱۶/۶۵۳	۰/۳۲۴۰

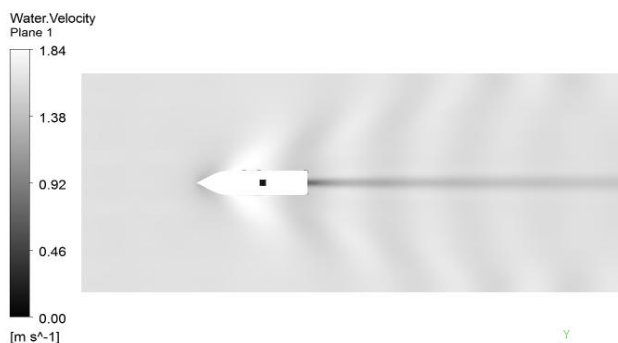
۱-۶- کانتورهای بدست آمده از تحلیل عددی

۱-۱-۶- کانتور سرعت در سطح آزاد

یکی از کانتورهای مهم کانتور سرعت در سطح مشترک بین آب و هوا می‌باشد. همانطور که در اشکال (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود بیشترین مقدار سرعت در اطراف قسمت میانی شناور در اعداد فرود مختلف حدوداً تا ۱۰ درصد از سرعت میانگین جریان سیال ورودی بیشتر شده است. همانگونه که در شکل‌های مذکور دیده می‌شود در اعداد فرود بزرگتر تشکیل امواج واگرا^۱ و متقاطع^۲ بخوبی دیده می‌شود. با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) دیده می‌شود که طول موج‌های ایجاد شده در عدد فرود 0.37 در حالت مون پول بسته از طول موج‌های نظیر آن در حالت مون پول باز بزرگتر است.

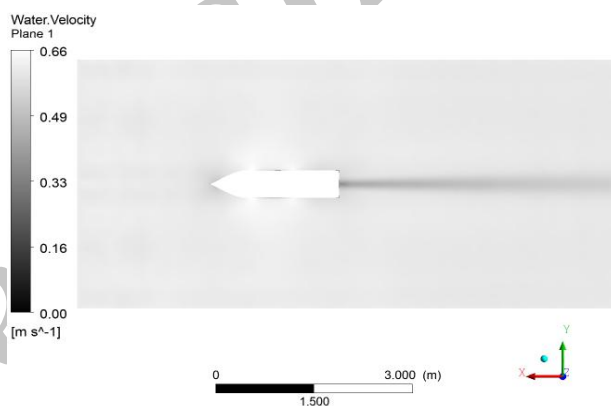


(الف)

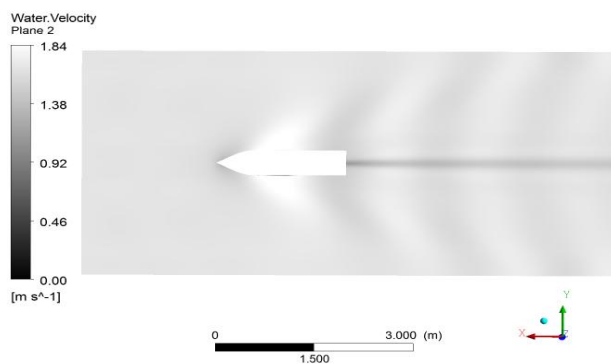


(ب)

شکل (۱۳) پروفیل سرعت سطح آزاد در حالت مون پول باز در اعداد فرود: (الف) $Fr=0.254$ و (ب) $Fr=0.370$



(الف)



(ب)

شکل (۱۲) پروفیل سرعت سطح آزاد در حالت مون پول بسته در اعداد فرود: (الف) $Fr=0.137$ و (ب) $Fr=0.370$

۱-۶-۳- خطوط جریان

جهت مشاهده نحوه حرکت جریان آب بر روی بدنه مدل اطلاعات کافی از کانتور خطوط جریان بدست می‌آید. در شکل (۱۶) خطوط جریان در اطراف و داخل مون پول مشاهده می‌شود. در داخل مون پول مکانیزم جدایش جریان

۱-۶-۲- کانتور فشار

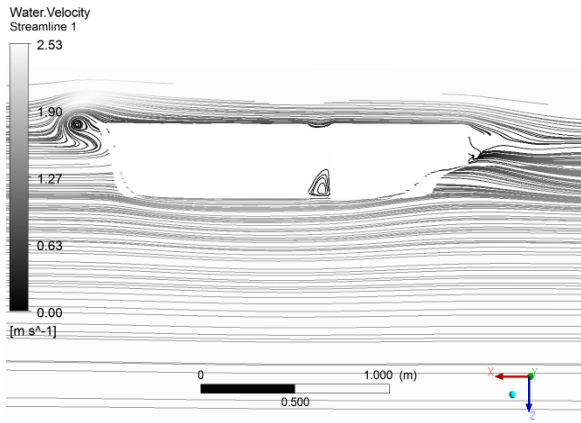
فشار وارده بر شناور شامل دو بخش استاتیکی و دینامیکی است که با افزایش عدد فرود و به طبع آن افزایش سرعت، سهم فشار دینامیکی بیشتر می‌شود. شکل (۱۴) فشار وارد بر مدل در حالت مون پول بسته و سرعت بیشینه $Fr=0.370$ نشان داده شده است. همچنین در حالت مون پول باز، همانگونه که انتظار میرفت، فشار وارد بر دیواره عقبی مون پول بیشتر از دیواره جلویی است که این موضوع در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این شکل کانتور فشار داخل مون پول در نیمه متقارن بدنه شناور نشان داده شده است.

¹ Divergent Waves² Transverse

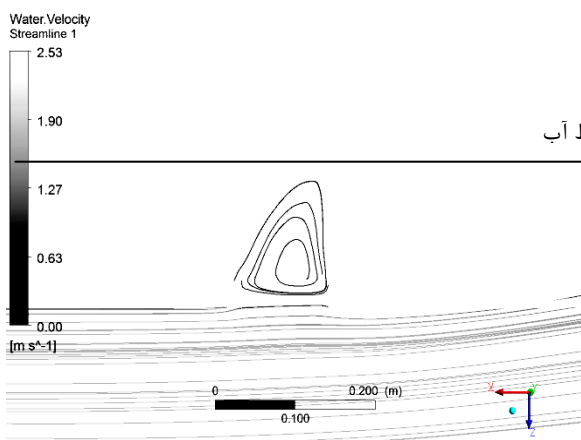
از لبه جلویی مون پول و همچنین جریان چرخشی که در قسمت (۲) توضیح داده شد، مشاهده می شود.

۷- نتیجه گیری

در مقاله حاضر ضرایب نیروی مقاومت شناور کاسپین ۳ در دو حالت مون پول باز و مون پول بسته با امکانات حوضچه کشش دانشگاه صنعتی اصفهان و همچنین محاسبات عددی به کمک نرم افزار انسیس سی اف اکس مورد مطالعه قرار گرفت.



(الف)

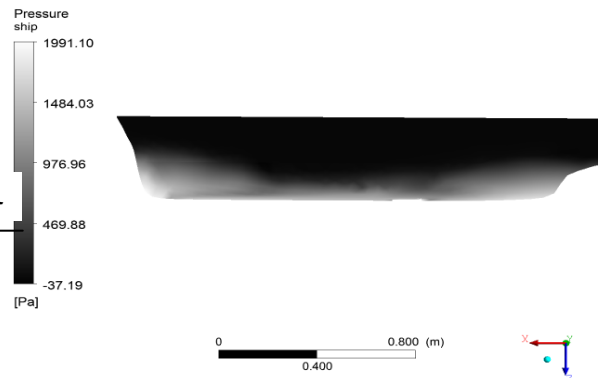


(ب)

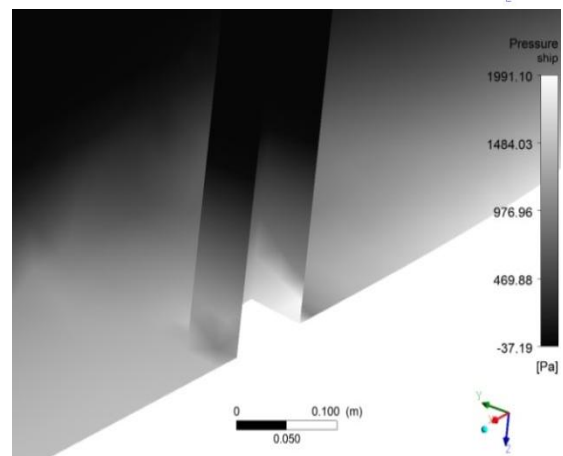
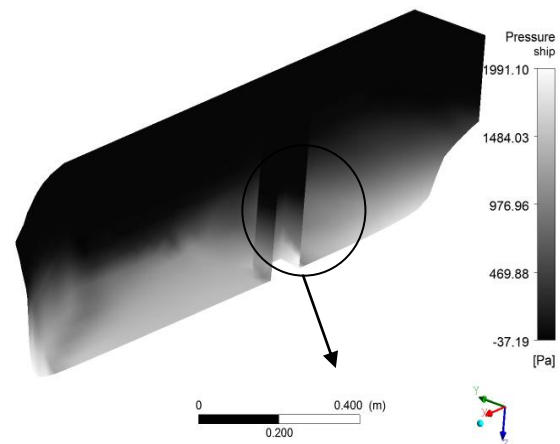
شکل (۱۶) خطوط جریان. الف) اطراف مدل ب) داخل مون پول.

نتایج حاصله که با نتایج تجربی آزمون های موسسه حوضچه مدل کشتی هامبورگ که آزمون های مشابهی را انجام داده است تطابق خوبی را نشان میدهد حاکی از این است که استفاده از مون پول مقاومت شناور را ۲۱٪ افزایش میدهد. اختلاف موجود در نتایج حاضر و نتایج ارائه شده توسط حوضچه کشش هامبورگ را می توان بدلیل اختلاف بین ابعاد دو حوضچه کشش و مقیاس مدل مورد استفاده در دو حالت تفسیر نمود. همچنین اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی در حدود ۶٪ می باشد که با توجه به تقریب های مختلفی که در شبیه سازی عددی مورد استفاده قرار میگیرد در محدوده قابل قبولی می باشد.

با توجه به افزایش قابل توجه مقاومت در اثر وجود مون پول بنظر میرسد با توجه به عدم امکان تغییر محل، شکل و



شکل (۱۴) کانتور فشار در حالت مون پول بسته در $Fr=0.370$.



شکل (۱۵) کانتور فشار در حالت مون پول باز.

numerical ship hydrodynamics", France , pp.1-7, 1999.

[13] Sadiq,S. Xiong-liang,Y. "Multi-Dimensional Numerical Free Surface VOF Modeling with Moon Pool Experiments", in Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, pp. 1-8, 2008.

[14] Alsgaard,J.A. "Numerical Investigations of Piston Mode Resonance in a Moonpool using OpenFoam", NTNU Department of Marine Technology, Trondheim, 2010.

[15] 15th ITTC, "Recommended Procedure Performance", Revision and Propulsion ,Final Release, 1978.

ابعاد مون پول، میتوان با ایجاد تغییراتی در سطح داخلی مون پول از مقاومت آن کاست.

۸ - مراجع

[1] Toda, Y, Stern, F. Longo, J., "Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake and Wave Field of a Series 60 CB=0.6 Ship Model-Part1: Froude Numbers 0.16 and 0.316", Journal of Ship Research No.36, pp. 360-77,1992.

[2] Olivieri, A. Pistani, F. Avanzini, A. Stern, F. "Towing Tank Experiments of Resistance, Sinkage and Trim, Boundary Layer, Wake, and Free Surface Flow Around a Naval Combatant INSEAN 2340 model", IIHR technical report No.421,2001.

[3] Kumar, M. Subramanian, V. "A Numerical and Experimental Study on Tank Wall Influences in Drag Estimation", J.Ocean Engineering No.34, pp. 192-205, 2007.

[۴] احمدی میلاد، بررسی تجربی و عددی محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی شناور سطحی رزمی در حوضچه کشش پژوهشکده زیر دریا، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.

[5] Robertson, S. Macfarlan, G. "Strong Growth Forecast in Floating Production Sector", Journal of Oil and Gas, Royal Belgian Institute of Marine Engineers, Vol. 34, No. 11, pp. 231-245, 2005.

[6] Fukuda, K. "Behaviour of Water in Vertical Well with Bottom Opening of Ship, and its Effect on Ship Motions", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 141, pp. 107-122,1977.

[7] Molin, B, "On the Piston Mode in Moon-Pools Proc". 14th Int. Workshop on Water Waves & Floating Bodies, Port Huron, R.F. Beek & W.W Schultz editor, 1999.

[8] Molin, B., "On the Sloshing Modes in Moonpools, or the Dispersion Equation for Progressive Waves in a Channel Through the Ice Sheet, Proc. 15th Int. Workshop on Water Waves & Floating Bodies", Caesarea, Israël, pp.122-125, 2000.

[8] Van't Veer, R. Tholen, H. "Added Resistance of Moonpools in calm", OMAE57246, Estroil, Portugal, 2008 .

[10] Hirt ,C.W. Nichols, B.D. "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," Journal of Computational Physics, Vol. 34, pp. 67-72, 1981.

[11] Chen ,Y.J. Chau,S.W. Kouh,J.S. Suen, J.B. "Computation of Free-Surface Flow around Wigley Hull Using VOF Method", Proceedings 6th National Computational Fluid Dynamics Conference, pp. 1-4, 1999.

[12] Acueta,R. Muzaferija,S. Peric,M. "Computation of Breaking Bow Waves for a very Full Hull Ship, proceeding 7th International conference on

Archive of SID