



مدلسازی عددی آزمایشهای هیدرودینامیکی، روابط حاکم و معتبر سازی

روزبه پناهی^۱، ابراهیم جهان بخش^۲، محمد سعید سیف^۳

تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه دریا

Roozbeh_Panahi@yahoo.com

چکیده

در این مقاله الگوریتم عددی شبیه سازی حرکات شناورها و زیر سطحی ها به اختصار بیان گردیده و گام های لازم برای تهیه و تایید توانایی حوضچه عددی آزمایشهای هیدرودینامیکی (Numerical Hydrodynamics Tank) ارائه شده است.

مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، بیانگر صحت و دقت هر یک از بخش های الگوریتم ارائه شده و همچنین ترکیب آنها می باشد. بدین ترتیب، می توان از نرم افزار تهیه شده در بررسی توزیع سرعت، توزیع فشار و مجموع حرکات غیر خطی شناورها و زیرسطحی ها - به خصوص در مراحل اولیه طراحی - استفاده نمود.

کلمات کلیدی :

شبیه سازی حرکات، روش گام جزئی، روش حجمی مدلسازی سطح آزاد، گسسته سازی حجم محدود

۱- کارشناس ارشد، آزمایشگاه دریا دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد، آزمایشگاه دریا دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف



۱- مقدمه

بررسی حرکات در مراحل اولیه طراحی در بسیاری از مسائل صنعتی مثل بررسی رفتار شناورها، زیر دریایی ها و سکوهاى نیمه مغروق کاربرد دارد. در این حالت، معمولا جریان اطراف جسم ماهیت گذرای دو فازى (آب و هوا) غیر قابل تراکم داشته و امکان حل تحلیلی معادلات پیچیده حاکم بر آن وجود ندارد. اگرچه انجام آزمایش مطمئن ترین راه به منظور بررسی چنین مسائلی می باشد، اما هزینه بالا و محدودیت در جزئیات اطلاعات حاصل از آن همراه با پیشرفت توان رایانه ها، مسیر تحقیقات را به سوی استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (Computational Fluid Dynamics) پیش برده است.

با توجه به پیچیدگی های فراوان، مساله پیش رو را می توان به سه بخش اصلی تقسیم نمود که عبارتند از: محاسبه توزیع سرعت و فشار (حل معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی)، مدل سازی سطح آزاد و حل معادلات حرکت جسم صلب.

روشهای مختلفی برای حل همزمان و غیر هم زمان معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی وجود دارد. روشهای حل همزمان با هزینه بالای محاسباتی روبرو هستند. از این رو حل غیر همزمان مذکور بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش به دو دسته اصلی رویکرد تخمین- اصلاح (Predictor-Corrector) مثل SIMPLE [۱] و PISO [۲] و رویکرد گام جزئی (Fractional Step) [۳] تقسیم می شود. در تحقیق حاضر از رویکرد گام جزئی استفاده شده است که با یک بار حل معادله فشار در هر گام زمانی، شرط پیوستگی را ارضا نموده و بر این اساس انتخاب مناسبی برای مسائل گذرا محسوب می شود. جزئیات بیشتر در رابطه با این روش در مرجع [۴] وجود دارد.

زیر مساله مهم دیگر مدل سازی سطح آزاد بوده و روشهای اصلی آن عبارتند از: روشهای سطحی یا تعقیب سطح آزاد (Surface Tracking) و روشهای حجمی یا تسخیر سطح آزاد (Surface Capturing) [۵و۶]. در این تحقیق،

با توجه به لزوم شبیه سازی تغییر شکل های پیچیده مثل شکست امواج، از روش حجمی استفاده شده است [۷].

با حل دو زیر مساله بیان شده امکان شبیه سازی جریان همراه با سطح آزاد (توزیع سرعت و فشار در جریان دو فازى) بوجود می آید. اگرچه برای مدل سازی حرکت زیر سطحی ها در شرایطی که سطح آزاد اهمیت نداشته باشد، جریان به صورت تک فاز در آمده (مغروق درون آب) و مساله ساده تر خواهد شد. تحقیقات بسیاری در این زمینه به



خصوصاً با استفاده از روشهای حجمی مدل‌سازی سطح آزاد انجام شده است که از آن جمله می‌توان به شبیه‌سازی شکست امواج [۸ و ۹]، خیس شدن عرشه شناورها [۱۰ و ۱۱]، جابجایی آب درون مخازن [۱۲] و اثر متقابل سیال و سازه‌های دریایی [۱۳] اشاره نمود.

ذکر این نکته لازم است که برای شبیه‌سازی حرکات از روشهای مبتنی بر تئوری جریان پتانسیل نیز استفاده می‌شود [۱۴]. اگرچه این روشها در مقایسه با روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی جریان واقعی (رویکرد تحقیق حاضر)، در زمان بسیار کوتاهی جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌دهند، اما در مسائلی که لزجت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و یا شکست موج نقش مهمی ایفا می‌نماید با خطای بالایی همراه هستند. از طرف دیگر شبیه‌سازی حرکات بر اساس جریان واقعی از پیچیدگی‌های بالایی برخوردار بوده و تنها در سالهای اخیر تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. این تحقیقات از شبیه‌سازی‌های ساده و با درجات آزادی محدود [۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸]، تا شبیه‌سازی شش درجه آزادی حرکات با برخی محدودیت‌ها [۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲] پیش رفته است.

در تحقیق حاضر، ترکیب جدیدی متشکل از زیرمساله‌های یاد شده برای شبیه‌سازی شش درجه آزادی حرکات اجسام شناور و غوطه‌ور ارائه گردیده است. روابط حاکم به اختصار طرح شده و بر این اساس نرم‌افزاری تهیه شده است. در ادامه مراحل لازم برای بررسی صحت و دقت رویه عددی پیشنهادی بیان گردیده و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مقایسه گردیده‌اند.

۲- الگوریتم عددی و معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی حرکات به صورت عددی، رویکرد‌های مختلفی در شبکه بندی و استفاده از دستگاه‌های مختصات وجود دارد [۲۳]. در تحقیق حاضر از شبکه‌های شش وجهی که سطوح آنها با یکدیگر منطبق هستند، استفاده شده است. با حل معادلات حرکت در هر گام زمانی، شبکه متصل به بدنه جابجا شده و معادلات حاکم بر جریان در گام زمانی بعد، بر روی میدان محاسباتی جدید حل می‌شوند. به علاوه، همگی معادلات در دستگاه مرجع نیوتنی نوشته شده‌اند که این انتخاب معادلات حاکم بر جریان را ساده‌تر می‌نماید. البته با توجه به حرکت سلول‌های محاسباتی، باید از شار نسبی روی سطح $\vec{c} = \vec{U}_f - v_{f-mesh}$ ، که در شکل گسسته معادله انتقال نسبت حجمی و جمله جابجایی معادلات ناویر-استوکس ظاهر می‌شود، استفاده نمود [۲۴]. در این رابطه v_{f-mesh} سرعت شبکه محاسباتی روی



سطح سلول و \bar{U}_f سرعت سیال روی این سطح است. شکل ۱ بیانگر ارتباط زیر مساله های مختلف شبیه سازی عددی حرکات می باشد.

در گسسته سازی معادلات ناویر- استوکس برای جمله نفوذ (Diffusion Term) از میانبایی Over-Relaxed [۲۵] استفاده شده است. جمله جابجایی (Convection Term) نیز به کمک میانبایی گاما (Gamma Interpolation) [۲۵] که طرحی محدود است (Bounded Scheme)، گسسته شده است. برای گسسته سازی زمانی جملات نفوذ و جابجایی نیز از طرح کرنک - نیکلسون (Crank-Nicholson) استفاده شده است. به علاوه، گسسته سازی جمله انتگرال فشار، در هنگامی که دو فاز سیال با اختلاف جرم حجمی زیاد مثل آب و هوا در میدان محاسباتی وجود داشته باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است. به بیان دیگر، استفاده از میانبایی خطی برای تقریب فشار روی سطح در ناحیه سطح آزاد با خطای زیادی روبرو بوده و جوابهای نوسانی در میدان سرعت ایجاد خواهد نمود. برای رفع این مشکل در تحقیق حاضر میانبایی جدید خط شکسته مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶].

برای بالا بردن توانایی شبیه سازی سطح آزاد، در تحقیق حاضر رویکرد حجمی با حل معادله انتقال نسبت حجمی به کار برده شده است. با محاسبه توزیع دو فاز سیال در میدان محاسباتی، می توان فرض نمود که تنها یک سیال موثر وجود دارد. بدین ترتیب، معادلات ناویر- استوکس و پیوستگی برای سیال موثری با لزجت و جرم حجمی متغیر مطابق رابطه (۱) حل می گردد.

$$\rho_{eff} = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \text{ و } v_{eff} = \alpha v_1 + (1 - \alpha) v_2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، زیر نویس های ۱ و ۲ بیانگر دو فاز سیال (آب و هوا) هستند. α نسبت حجمی و به عبارت دیگر درصد حضور دو سیال درون هر سلول می باشد و توزیع آن در میدان محاسباتی به صورت صفر (برای یک فاز مثل هوا)، یک (برای فاز دیگر مثل آب) و اعدای بین صفر و یک در ناحیه فصل مشترک دو فاز خواهد بود. توزیع α با حل معادله انتقال نسبت حجمی بدست می آید که گسسته سازی آن نیازمند توجه خاصی است [۲۷]. به بیان دیگر، استفاده از میانبایی های ساده برای تقریب نسبت حجمی روی سطح سلول باعث بوجود آمدن مقادیر غیر فیزیکی (بیشتر از یک و کمتر از صفر) و تغییر شکل های غیر واقعی سطح آزاد می شود. برای رفع این مشکل از میانبایی های ترکیبی مرتبه بالا استفاده می گردد که یکی از مناسب ترین آنها میانبایی



این طرح با استفاده از (Convection Boundedness Criteria) CBC [۲۸] و (ULTIMATE QUICKEST) UQ [۲۹]، ترکیبی از آن دو را با توجه به جهت جریان و موقعیت سطح آزاد برای محاسبه نسبت حجمی روی سطح سلول بر اساس مقادیر مرکز سلول ها ارائه می دهد [۷].

توزیع سرعت و فشار اطراف بدنه باعث جابجایی آن می شود. محاسبه این حرکات با حل معادلات تغییر اندازه حرکت خطی و زاویه ای امکان پذیر است که برای شش درجه آزادی حرکت عبارتند از:

$$\sum \bar{F} = m\bar{a} \quad (۲)$$

$$\sum \bar{M}_G = I_G \bar{\alpha} + \bar{\omega} \times I_G \bar{\omega} \quad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳)، F بردار نیروهای وارد بر بدنه، m جرم بدنه، \bar{a} بردار شتاب خطی، \bar{M}_G بردار گشتاور حول مرکز جرم بدنه، I_G تانسور ممان اینرسی بدنه، $\bar{\alpha}$ بردار شتاب زاویه ای و $\bar{\omega}$ بردار سرعت زاویه ای هستند. لازم به ذکر است که تمامی بردار ها در دستگاه مرجع نیوتنی بیان می شوند (شکل ۲).

نیرو و گشتاور موجود در روابط (۲) و (۳) به کمک روابط (۴) و (۵) بدست می آیند:

$$\bar{F} = \bar{F}_{ext} + \bar{W} + \bar{F}_{flow} = \bar{F}_{ext} + m\bar{g} + \sum_{j=1}^n (-P_j \bar{n}_j + \bar{\tau}_j) A_j \quad (۴)$$

$$\bar{M}_G = \bar{M}_{G-ext} + \bar{M}_{G,flow} = \bar{M}_{G-ext} + \sum_{j=1}^n (\bar{r}_j - \bar{r}_G) \times (-P_j \bar{n}_j + \bar{\tau}_j) A_j \quad (۵)$$

در این روابط، \bar{F}_{flow} بردار نیروهای وارد بر بدنه از طرف سیال در دستگاه مرجع نیوتنی و $\bar{M}_{G,flow}$ بردار گشتاورهای وارد بر بدنه حول مرکز جرم از طرف سیال می باشند. به علاوه \bar{F}_{ext} و \bar{M}_{G-ext} می توانند بیانگر نیروهای خارجی مثل سکان، پروانه و ... در دستگاه مرجع نیوتنی باشند. لازم به ذکر است که در رابطه (۴)، نیروی وزن $\bar{W} = m\bar{g}$ با توجه به نوشتن نیروها در دستگاه مرجع نیوتنی، تنها در جهت محور Z مقدار خواهد داشت. همچنین در رابطه (۵)، \bar{r}_j بردار مکان مرکز سطوح سلول های تشکیل دهنده بدنه و \bar{r}_G بردار مکان مرکز جرم بدنه می باشند.

نتیجه حل معادلات (۲) و (۳) ماتریس انتقالی خواهد بود که شبکه محاسباتی متصل به بدنه را با توجه به حرکات خطی و زاویه ای آن در هر گام زمانی جابجا می نماید. شکل ۲ بیانگر استراتژی شبیه سازی حرکات می باشد.



۲-۲- الگوریتم حل میدان سرعت و فشار

در تحقیق حاضر از رویکرد گام جزئی کیم (Kim) [۳۰] برای حل میدان سرعت و فشار استفاده شده است. بر این اساس، در ابتدا سرعت های میانی بدست آمده و در ادامه با حل معادله فشار، سرعت های فیزیکی که شرط پیوستگی را ارضا می نمایند، محاسبه می شوند. نکته دیگر استفاده از میانمایی های معمول برای تقریب سرعت مطلق سیال روی سطح سلول در چیدمان هم مکان - که تمامی متغیرهای اصلی جریان در مرکز سلول محاسبه و نگهداری می شود - می باشد. این کار موجب بوجود آمدن نوسانات غیر فیزیکی در میدان فشار شده و برای جلوگیری از آن باید از میانمایی های خاصی استفاده نمود. بر این اساس، آنگونه که ژانگ (Zang) و همکارانش پیشنهاد نموده اند، مقدار سرعت مطلق روی سطح با وارد کردن اثر گرادیان فشار محاسبه می شود [۳۱]. بدین ترتیب میدان سرعت و فشار با یکدیگر کوپل شده و امکان محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد بر بدنه بوجود می آید.

۳- بررسی نتایج عددی

همانگونه که بیان گردید، مساله پیش رو از بخشهای مختلفی تشکیل شده است که هر یک نیاز به بررسی جداگانه دارند. از این رو، در بخش حاضر مسائل مناسب برای بررسی صحت و دقت رویه عددی پیشنهادی و نتایج حاصل مطابق شکل ۳ به اختصار ارائه گردیده اند.

۳-۱- بررسی حل میدان سرعت و فشار

بررسی صحت پیاده سازی رویکرد گام جزئی در نرم افزار تهیه شده، گسسته سازی معادلات در شبکه محاسباتی نامتعامل (با توجه به شبکه بندی اطراف بدنه که معمولاً نامتعامل خواهد بود) و بررسی استقلال حل از شبکه بندی میدان محاسباتی سه مساله مورد بررسی در این بخش می باشند. بر این اساس از مساله کاویته (Cavity) مطابق شکل ۴ در دو حالت متعامد و نامتعامل استفاده شده که در آن سیال درون مخزن با حرکت صفحه بالایی به چرخش در می آید. با ثابت نگه داشتن ابعاد و سرعت کشیدن صفحه افقی برابر 1 m/s و تغییر جرم حجمی و لزجت، عدد رینولدز مساله تعیین می شود. شکل های ۵ و ۶ بیانگر توزیع مولفه های افقی و عمودی سرعت u و v در رینولدز های ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ به ترتیب در کاویته متعامد و نامتعامل می باشند که با کارهای مشابه انجام شده



[۳۳، ۳۴ و ۳۴] مقایسه گردیده اند. برای بررسی استقلال حل از شبکه بندی دامنه محاسباتی نیز توزیع سرعت u در مساله کاویتی متعامد در رینولدز ۱۰۰۰ مطابق شکل ۷ برای شبکه های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳-۲- بررسی گسسته سازی معادله انتقال نسبت حجمی

نتیجه حل معادله انتقال سطح آزاد، محاسبه نسبت حجمی هر یک از سلولهای میدان محاسباتی می باشد. برای گسسته سازی این معادله انتقال باید از میانمایی مناسبی استفاده نمود. در این قسمت میانمایی های موجود با هم مقایسه گردیده و توانایی آنها در انتقال میدان اسکالر بررسی شده است. بدین منظور یک توزیع اسکالر و میدان سرعت مشخص در میدان محاسباتی در نظر گرفته می شود [۶]. شکل ۸ بیانگر انتقال میدان اسکالر دایره ای شکل در یک میدان سرعت برشی توسط معادله انتقال و استفاده از میانمایی های مختلف می باشد. در این حالت، میدان سرعت برشی مفروض مطابق شکل ۸ - الف در جهت عقربه های ساعت بر میدان اسکالر اولیه (توزیع دایره ای اسکالر که درون دایره مقدار یک و خارج آن مقدار صفر برای اسکالر در نظر گرفته می شود) اعمال شده و بعد از زمان مشخص جهت آن معکوس می شود. در حالت ایده آل توزیع میدان اسکالر باید به شکل اول خود (توزیع دایره ای) بازگردد، اما خطای عددی مانع این کار می شود. بدین ترتیب و با اندازه گیری خطای موجود، می توان میانمایی های مختلف را با یکدیگر مقایسه نمود. خطای مورد نظر با مقایسه نتیجه انتقال توسط معادله اسکالر و توزیع ایده آل اسکالر قابل محاسبه است [۶]. با توجه به توانایی های CICSAM، در تحقیق حاضر از این میانمایی استفاده شده است. جزئیات بیشتر در رابطه با بررسی میانمایی های مختلف در مرجع [۲۷] وجود دارد.

۳-۳- بررسی توانایی شبیه سازی جریان همراه با سطح آزاد

در دو قسمت گذشته، دقت و صحت حل معادلات اساسی حاکم بر جریان (معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی) و معادله انتقال نسبت حجمی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به هدف نهایی تحقیق، کوپل معادلات بیان شده از اهمیت بالایی برخوردار است. به علاوه، پیچیدگی ها موجود توجه خاصی را به خصوص در زمانیکه اختلاف خواص فیزیکی دو فاز سیال موجود در میدان محاسباتی زیاد باشد (مثل آب و هوا) می طلبد. در این بخش، نتایج حاصل از نرم افزار تهیه شده با نتایج انتشار یافته مقایسه گردیده و نشان داده شده است که هدف بیان شده به گونه مناسبی برآورده می شود. بدین منظور شکستن دیواره آب درون مخزن در حالت های دو بعدی و سه



بعدی مطابق شکل ۹ مدل‌سازی شده است. شبکه محاسباتی مورد استفاده در حالت های دو بعدی و سه بعدی به ترتیب 40×160 و $40 \times 50 \times 160$ بوده و از شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت و گرادیات قائم صفر برای فشار استفاده شده است. پیش روی و کاهش ارتفاع آب در نمودار های شکل ۱۰ با نتایج تجربی [۳۵] مقایسه گردیده است. مساله مناسب دیگر نوسان مایع درون مخزن می باشد. در این حالت، سیال با شکل سطح آزاد اولیه موج دار مطابق شکل ۱۱- الف در اثر گرانش درون مخزن نوسان خواهد نمود. نمودار شکل ۱۱- ب بیانگر ارتفاع نوسان سیال درون مخزن در دیواره سمت راست آن می باشد که با نمودار تحلیلی موجود [۳۶] تطابق مناسبی دارد. ناپایداری رایلی - تیلور نیز از دیگر مسائل مناسب در این زمینه می باشد. توضیحات بیشتر در رابطه با مسائل یاد شده در مرجع [۲۶] وجود دارد.

۳-۴- بررسی توانایی تولید موج و شرط مرزی خروجی

همانگونه که پیش تر نیز بیان گردید، هدف از تهی نرم افزار حاضر ایجاد یک حوض آزمایش هیدرودینامیک عددی می باشد. در این حالت، تولید موج مناسب، توانایی حفظ و خروج آن از محیط محاسباتی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. در این قسمت موج آیری (Airy) با دامنه 0.01 و طول موج 0.2 متر با شرط مرزی دیریکله در دامنه محاسباتی نمایش داده شده در شکل ۱۲- الف تولید شده و در سایر مرزها از شرط مرزی گرادیان عمود بر سطح صفر برای سرعت استفاده شده است. به علاوه گرادیان عمود بر سطح صفر برای فشار در تمامی سطوح اعمال گردیده است. نکته مهم استفاده از ناحیه میرایی در مرز خروجی می باشد که برای به حداقل رساندن سرعتها در این مرز استفاده می گردد [۳۷]. شکل ۱۲- ب موج تولیدی توسط نرم افزار را با موج تحلیلی آیری مقایسه نموده است.

۳-۵- بررسی استفاده از استراتژی شبکه متصل به بدنه

در تحقیق حاضر، شبیه سازی حرکات با حل معادلات شش درجه آزادی حرکت و جابجایی شبکه محاسباتی در هر گام زمانی انجام می پذیرد. برای استفاده از این استراتژی باید ملاحظاتی در استفاده از معادلات حاکم بر جریان سیال انجام شود. این بخش به بررسی صحت اعمال ملاحظات مذکور می پردازد.



۳-۵-۱- برخورد استوانه با سطح آزاد آب

هندسه مساله یک درجه آزادی ورود استوانه به درون آب و شبکه محاسباتی شامل ۱۸۹۰۰ سلول در شکل ۱۴ نشان داده شده است. دایره با جرم حجمی برابر با آب درست در بالای سطح آزاد قرار گرفته و با سرعت $4 \frac{m}{s}$ با آن برخورد می نماید. در این محاسبات، شرایط مرزی بکار رفته برای سرعتها عبارتند از: شرط عدم لغزش برای سطح استوانه، شرط سرعت صفر برای مرز پایین و شرط گرادیان صفر برای سایر سطوح. همچنین گرادیان عمود بر سطح صفر برای فشار در تمامی سطوح مرزی اعمال شده است. نمودارهای شکل ۱۵ جابجایی مقطع دایره ای درون آب را نمایش داده و بیانگر تغییر سرعت آن پس از برخورد می باشد. در این شکل، نتایج بدست آمده با نتایج تجربی [۳۸] و عددی [۲۲] مشابه مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود، نتایج عددی بدست آمده در مقایسه با شبیه سازی عددی مشابه انجام شده از دقت بیشتری برخوردار می باشد. به علاوه، تغییر شکل سطح آزاد در سه گام زمانی با نتایج تجربی موجود [۳۸] مقایسه گردیده است که از تطابق مناسبی نیز برخوردار می باشد. هر چند می توان انتظار داشت که با تغییر شبکه بندی اطراف جسم و ریز نمودن آن در گوشه های بالایی استوانه جوابهای دقیق تری بدست آید.

۳-۵-۲- مقاومت هیدرودینامیکی شناور بارج

در اندازه گیری مقاومت هیدرودینامیکی شناورها با استفاده از روشهای عددی، اغلب شناور را مقید (بدون امکان تغییر در زاویه و موقعیت شناور نسبت به سطح آب) شبیه سازی می کنند. حال آنکه در هنگام حرکت، زوایای شناور نسبت به سطح آب در مقایسه با حالت سکون تغییر یافته و همین مساله باعث وجود اختلاف در پیش بینی های انجام شده می گردد. در این شبیه سازی، نخست مقاومت شناور بارج با مشخصات اشاره شده در جدول ۱ و شکل ۱۶ در آزمایشگاه دریا دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف اندازه گیری شده است. در جریان این اندازه گیری، شناور در دو درجه آزادی حرکت قائم (Heave) و غلتش طولی (Pitch) آزاد بوده و در بقیه درجات آزادی مقید بوده است. شبیه سازی عددی توسط نرم افزار تهیه شده در دو حالت انجام شده است. در حالت مقید، شناور با سرعت $0.807 \frac{m}{s}$ در راستای محور X کشیده شده و اجازه هر نوع حرکت دیگری از آن گرفته شده است. در حالت



آزاد که با شرایط آزمایش تطابق دارد، اجازه جابجایی قائم در راستای محور Z و غلتش طولی حول محور Y به شناور داده شده است.

شکل ۱۷ تغییر شکل سطح آزاد در جلوی بارج را نشان می دهد که با آزمایش تجربی انجام شده مقایسه گردیده است. نتیجه تطابق مناسب این دو شکل، محاسبه مناسب مولفه مقاومت موج ساز و در نتیجه مقاومت هیدرودینامیکی کل توسط نرم افزار تهیه شده می باشد، اگرچه با ریز نمایی بیشتر شبکه محاسباتی، امکان پیش بینی دقیق تر سطح آزاد بوجود می آید. نتایج بدست آمده در جدول ۲ نمایش داده شده است. بدیهی است که عوامل دیگری مثل جریان مغشوش اطراف شناور در دقت مقاومت پیش بینی شده تاثیر گذار می باشند، اما هدف تحقیق حاضر نشان دادن اهمیت شبیه سازی حرکت شناور در محاسبه مقاومت آن بوده است. همانگونه که در جدول ۲ دیده می شود، با برداشتن محدودیت در دو درجه آزادی حرکت قائم و غلتش طولی و به عبارت دیگر، نزدیک شدن به شرایط اندازه گیری آزمایشگاهی، خطای محاسباتی به حدود ۵/۹ درصد کاهش یافته است.

۴- نتیجه گیری

مدلسازی حرکات کشتی ها و زیر دریائیهها، کاربرد بسیاری در مسائل مهندسی دریایی داشته و با پیشرفت توان رایانه ها، دینامیک سیالات محاسباتی ابزار مناسبی را بدین منظور در اختیار گذاشته است. بر این اساس، در تحقیق حاضر توزیع سرعت و فشار یک سیال موثر (به جای دو سیال آب و هوا) در اطراف جسم صلب، با استفاده از رویکرد گام جزئی در حل معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی، بدست آمده است. به علاوه، با توجه به وجود تغییر شکل های بزرگ و پیچیده سطح آزاد مثل شکست موج، برای محاسبه مشخصات جرم حجمی و لزجت سیال موثر، از رویکرد حجمی با حل معادله انتقال نسبت حجمی استفاده شده است. بدین ترتیب و با انتگرال گیری از تنش های قائم و مماسی بر روی بدنه، نیروها و گشتاورهای وارد بر آن محاسبه شده و در نتیجه جابجایی های آن بدست می آیند. این رویه با جابجایی شبکه محاسباتی متصل به بدنه در هر گام زمانی، تا رسیدن به زمان مورد نظر ادامه پیدا می کند. اگرچه در شبیه سازی های انجام شده در این تحقیق معادلات حرکت در یک و دو درجه آزادی حل شده اند، اما الگوریتم ارائه شده کلی بوده و توانایی مدلسازی حرکت های پیچیده را نیز دارد. بر این اساس و با توجه به دقت نرم افزار تهیه شده توانایی قابل توجهی در شبیه سازی هرگونه حرکات غیر خطی کشتی ها و زیردریائیهها در دسترس قرار می گیرد.



۵- مراجع

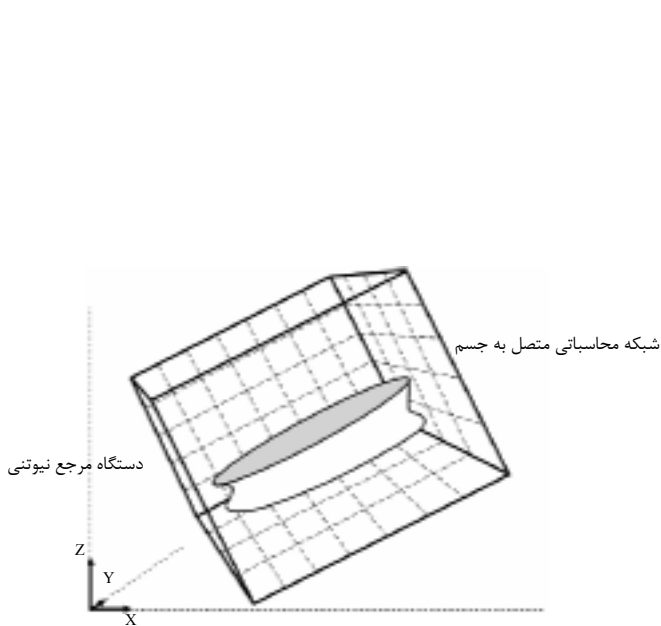
1. Patankar, S.V. and Spalding, D.B. "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three dimensional parabolic flows", Int. J. Of heat mass transfer, Vol. 15, p. 1787, 1972.
2. Issa, R.I. "Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting", J. Computational Physics, 62(1):40-65, 1986.
3. Brown, D.L., Cortez, R., Minion, M.L. "Accurate projection methods for the incompressible Navier-Stokes equations", J. of Computational Physics, 168:464-499, 2001.
۴. جهان بخش، ابراهیم، پناهی، روزبه، سیف، محمد سعید ((بکارگیری روش گام جزئی در شبیه سازی سطح آزاد))، مجله فنی مهندسی مدرس، ویژه نامه مکانیک، ۱۳۸۵.
5. Ferziger, J.H. and Peric, M. "Computational methods for fluid dynamics", 3rd Ed., Springer, 2002.
6. Panahi, R., Jahanbakhsh, E. and Seif, M.S. "Effect of interpolation in interface capturing methods", 8th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTs), Varna, 2-4 October, 2005.
7. Ubbink, O. and Issa, R.I. "A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes, J. of Comput. Phys., Vol.153, p.26-50, 1999.
8. Chen, G. and Kharif, C. "Two-Dimensional Navier-Stokes Simulation of Breaking Waves, Phys. of Fluids", Vol.11 (1), p.121-133, 1999.
9. Biausser, B., Fraunie, P., Grilli, S. and Marcer, R. "Numerical analysis of the internal kinematics and dynamics of three-dimensional breaking waves on slopes", Int. J. of Offshore and Polar Eng., Vol.14, No.4, 2004.
10. Fekken, G., Veldman, A.E.P. and Buchner, B. "Simulation of Green Water Loading Using the Navier-Stokes Equations", Proceeding of the 7th Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France, 1999.
11. Huijsmans, R.H.M., Van Gosen, E. "Coupling Freak Wave Effects with Green Water Simulations", Proceeding of the 14th ISOPE, Toulon, France, May 23-28, 2004.
12. Loots, E., Buchner, B., Pastoor, W. and Tveitnes, T. "The numerical solution of LNG sloshing with an improved Volume-of-Fluid method", In Proceeding of 23rd Int. Conference on Offshore Mech. And Arctic Eng. (OMAE2004-51085), Vancouver, 2004.



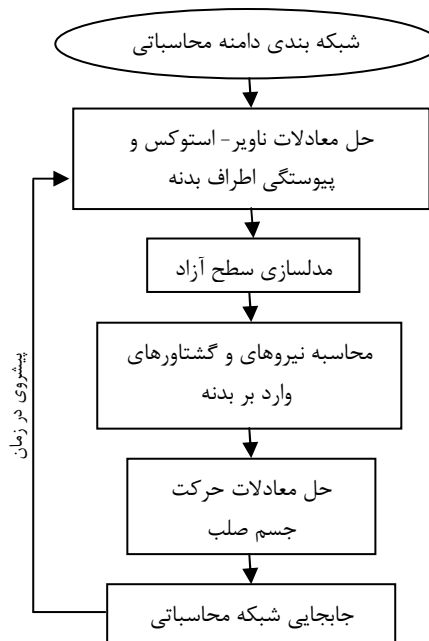
13. Yang, C., Lohner, R. and Yim, S.C. "Development of a CFD simulation method for extreme wave and structure interactions", In Proceeding of 24th Int. Conference on Offshore Mech. and Arctic Eng. (OMAE2005), Halkidiki, Greece, June 12-17, 2005.
 14. Bertram, V. "Practical ship hydrodynamics", Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
 15. Miyata H., Sato T. and Babo N. "Difference solution of a viscous flow with free-surface wave about an advancing ship", J. Comput. Phys., Vol.72, p.393-421, 1987.
 16. Hochbaum, C. "A finite volume method for turbulent ship flows", Ship Technology Research Schiffstechnik, Hamburg, Germany, 1994.
 17. Alessandrini B. and Delhommeau G. "Simulation of three-dimensional unsteady viscous free surface flow around a ship model", Int. J. of Numerical Math. Fluids, Vol.19, p.321-342, 1994.
 18. Kinoshita, T., Kagemoto, H. and Fujino, M. "A CFD application to wave-induced floating-body dynamics", 7th Int. Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France, 1999.
 19. Miyake R., Kinoshita T. and Kagemoto H. "Ship Motions and loads in large waves", 23rd ONR Symp. On Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, 2000.
 20. Azcueta R. "Computation of turbulent free surface flow around ships and floating bodies", PhD Thesis, Teschnichen Universitat Hamburg-Harburg, 2001.
 21. Vogt, M. and Hochbaum C. "Numerical simulation of ship motions in head waves with a RANSE method", HSVA Report 1649, Hamburg, Germany, 2002.
 22. Xing-Kaeding, Y. "Unified approach to ship seakeeping and maneuvering by a RANSE method", PhD Thesis, Teschnichen Universitat Hamburg-Harburg, 2004.
۲۳. پناهی، روزبه، جهان بخش، ابراهیم، سیف، محمد سعید ((دینامیک سیالات محاسباتی و مدل سازی عددی هیدرودینامیک شناورها، گذشته، حال و آینده))، هفتمین همایش صنایع دریایی، تهران، ۱۳۸۴.
24. White, F.M. "Fluid mechanics", Mc Graw-Hill, 4th Ed., 2001.
 25. Jasak, H. "Error analysis and estimation for finite volume method with application to fluid flows", PhD Thesis, University of London, 1996.
 26. Jahanbakhsh, E., Panahi, R. and M.S. Seif, "Numerical Simulation of Three-Dimensional Interfacial Flows", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, accepted for publication, 2006.



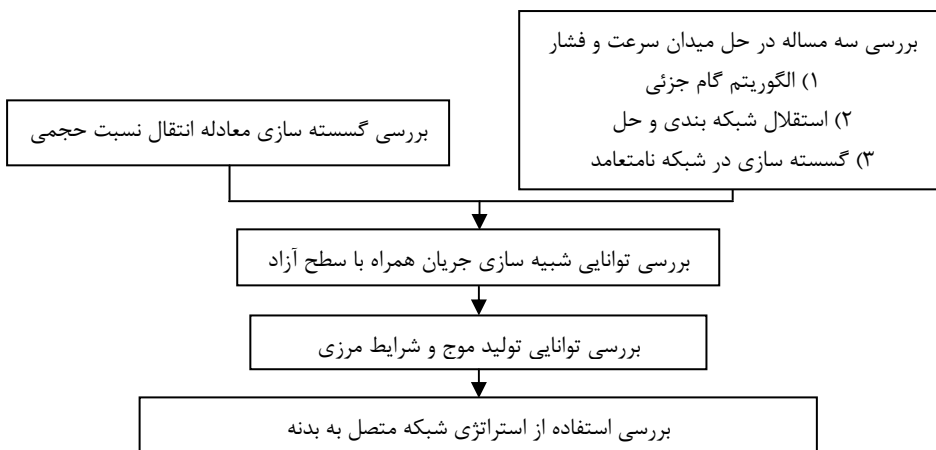
27. Panahi, R., Jahanbakhsh E. and Seif, M.S. "Comparison of Interface Capturing Methods in Two Phase Flow", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Technology, Vol.29, No. B6., 2005.
28. Gaskell, H. and Lau, A. K. C. "Curvature-compensated convective transport: SMART, a new boundedness-preserving transport algorithm", International Journal on Numerical Methods in Fluid, 8:617-641, 1988.
29. Leonard, B.P. "The ULTIMATE conservation difference scheme applied to unsteady one dimensional direction", Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 88:17-74, 1991.
30. Kim, D. and Choi, H. "A second-order time-accurate finite volume method for unsteady incompressible flow with hybrid unstructured grids", J. of computational physics, 162:411-428, 2000.
31. Zang, Y., Street, R.L. and Koseff, J.R. "A non-staggered fractional step method for time-dependent incompressible Navier-Stokes equations in curvilinear Coordinate", J. of computational physics, 114:18-33, 1994.
32. Ghia, U., Ghia, KN. and Shin, CT. "High-Re solution for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method", Int. J. computational physics, 48(3):387-411, 1982.
33. Norris, S.E., (2000), A Parallel Navier–Stokes Solver for Natural Convection and Free Surface Flow, PhD Thesis, department of mechanical engineering, University of Sydney.
34. Demirdzic, Z., Lilek, and Peri'c, M. "Fluid flow and heat transfer test problems for nonorthogonal grids: bench-mark solutions", Int. J. for numerical methods in fluids, 15:329–354, 1992.
35. Martin, J.C., Moyce, W.J. "An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane", Philos. Trans. Roy. Soc. London, Vol. A244, p.312-324, 1952.
36. Raad, P.E., Chen, S., Johnson, D.B. "The introduction of micro cells to treat pressure in free surface fluid flow problems", J. of fluids engineering, 117:683-690, 1995.
37. Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M, Park, J.C. and Tavassoli, A. "Fully Nonlinear Multidirectional Wave Simulations by 3D Numerical Wave Tanks", ASME, J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, accepted for publication, 2001.
38. Greenhow, M. and Lin, W. "Nonlinear free surface effects: experiments and theory", Report No. 83-19, Massachusetts Institute of Technology, 1983.



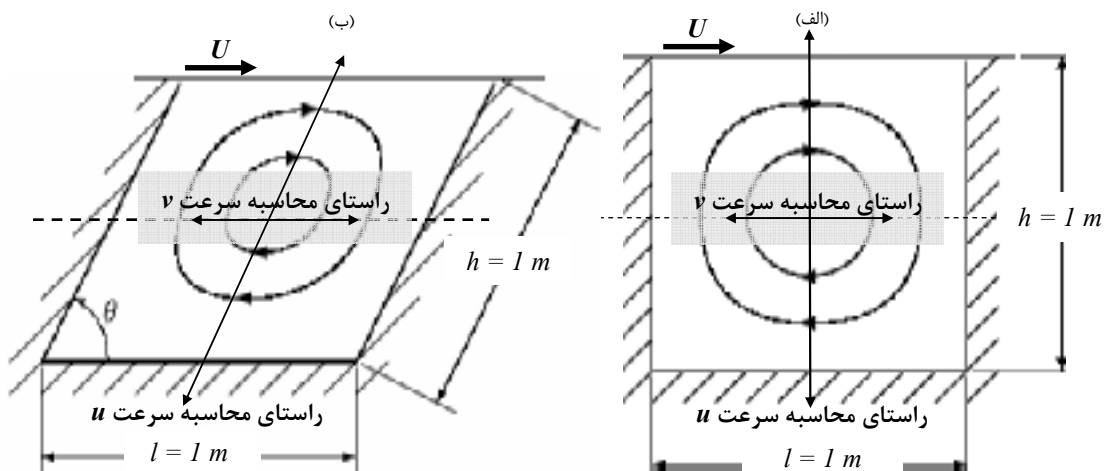
شکل ۲- استراتژی شبیه سازی حرکات



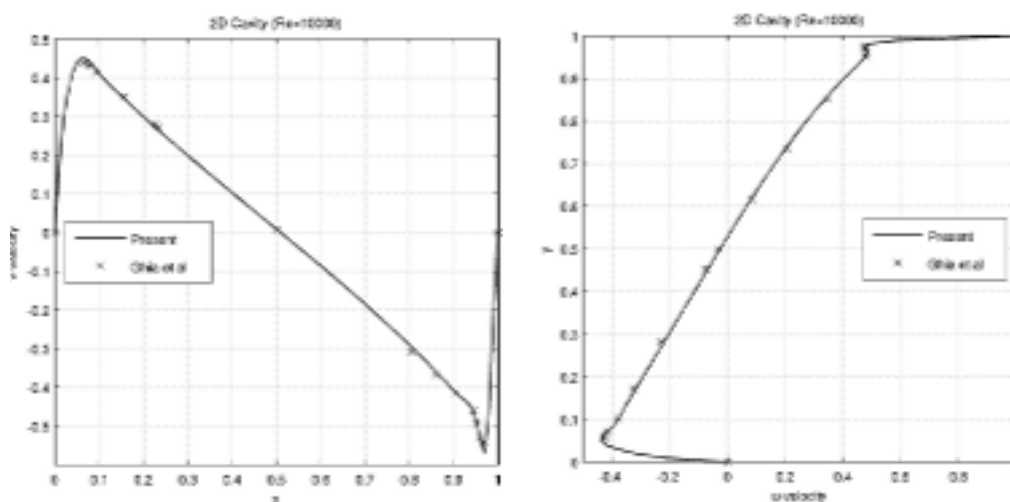
شکل ۱- الگوریتم عددی شبیه سازی حرکات



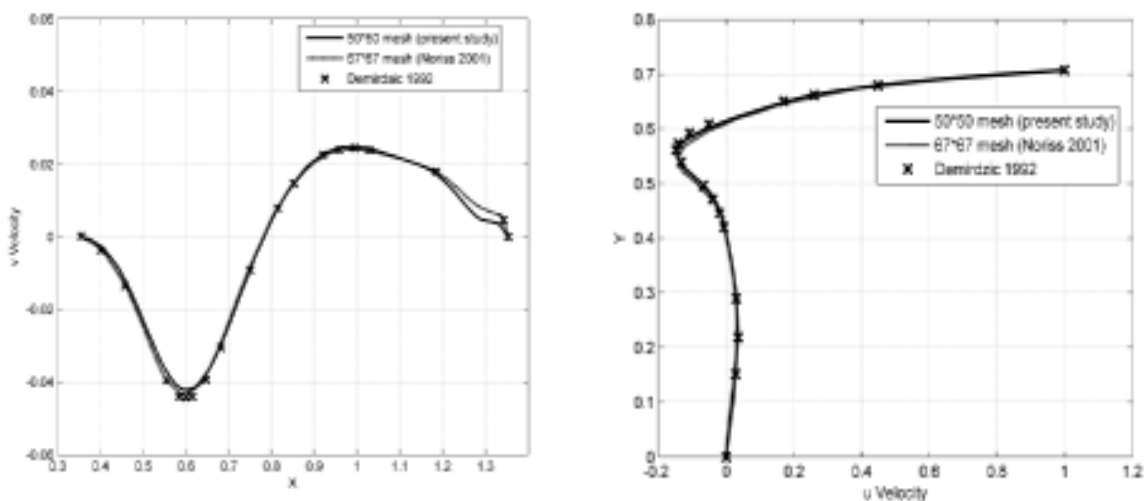
شکل ۳- مراحل تایید نرم افزار تهیه شده



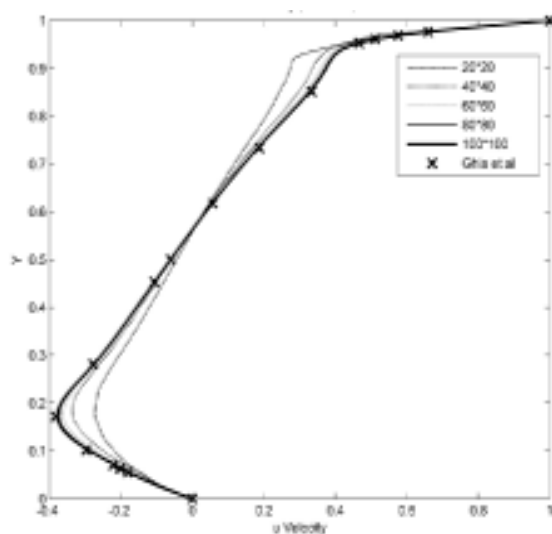
شکل ۴- مساله کاویتی: (الف): متعادل، (ب): نامتعادل



شکل ۵- توزیع سرعت u و v در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ در کاویتی متعامد

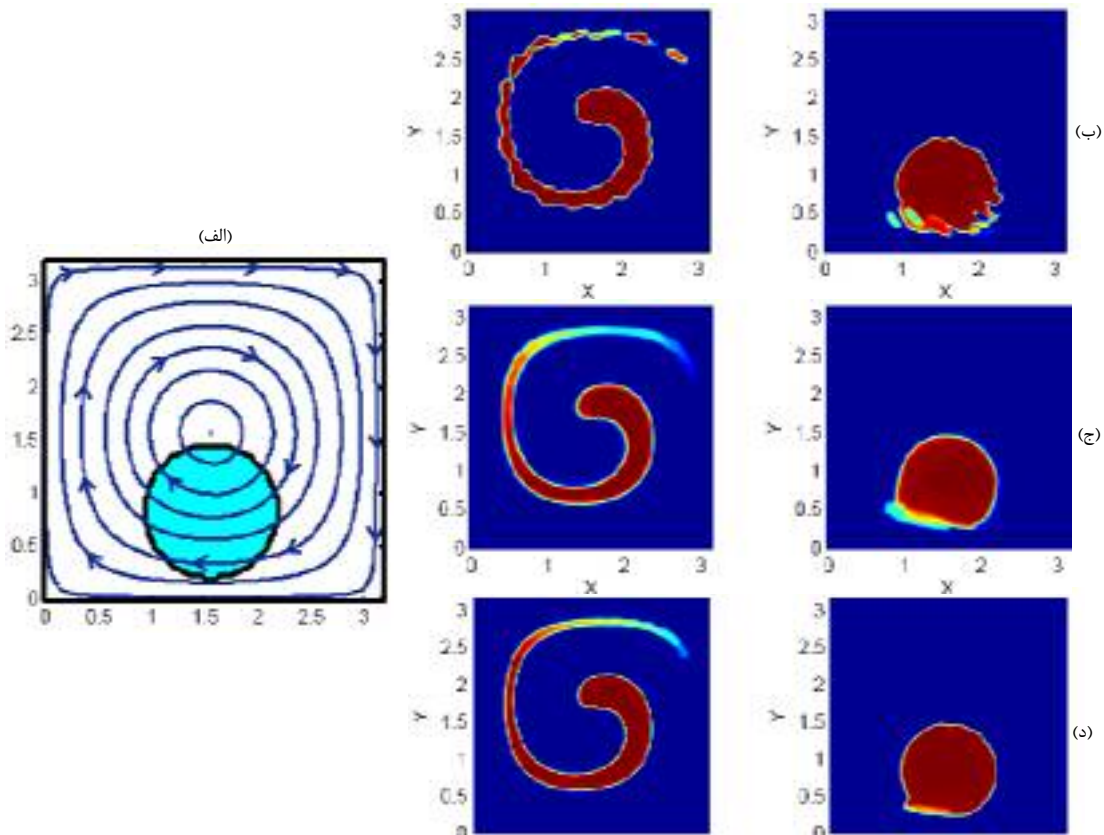


شکل ۶- توزیع سرعت u و v در عدد رینولدز ۱۰۰۰ در کاویتی نامتعامد با زاویه ۴۵ درجه



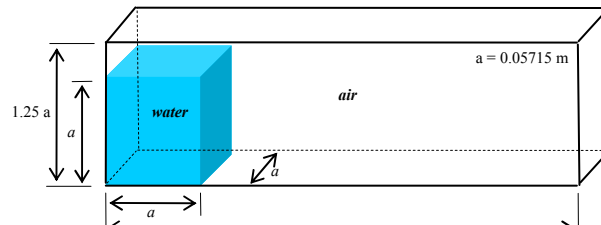
شکل ۷- بررسی استقلال حل از شبکه بندی میدان محاسباتی، توزیع سرعت u در عدد رینولدز ۱۰۰۰ در کاویتی متعامد

۲۰۰۰ گام زمانی در خلاف جهت عقربه های ساعت بعد از ۲۰۰۰ گام زمانی در جهت عقربه های ساعت

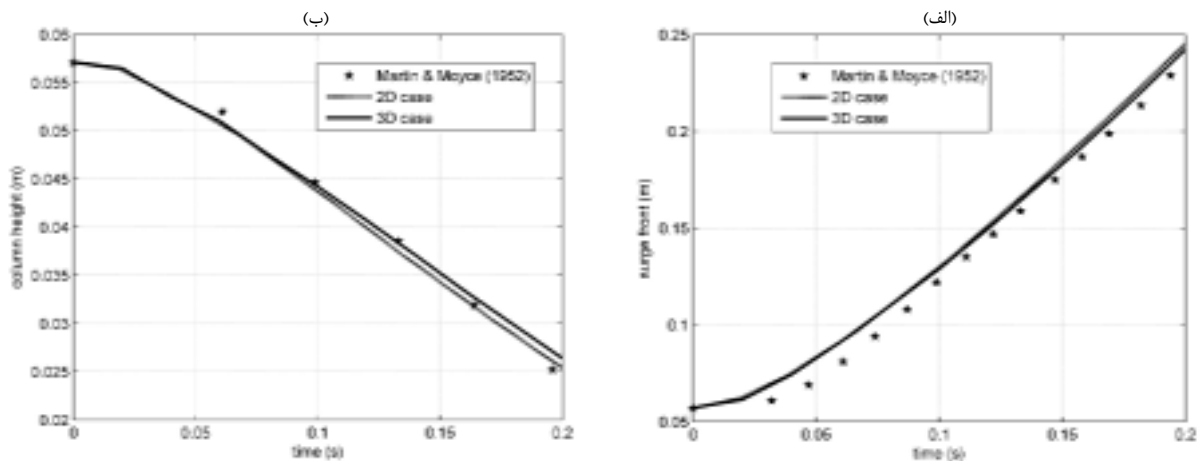


شکل ۸- توزیع اسکالر دایره: (الف): توزیع اولیه اسکالر و میدان سرعت ساعتگرد،

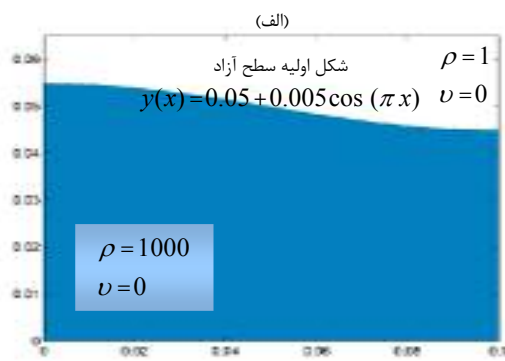
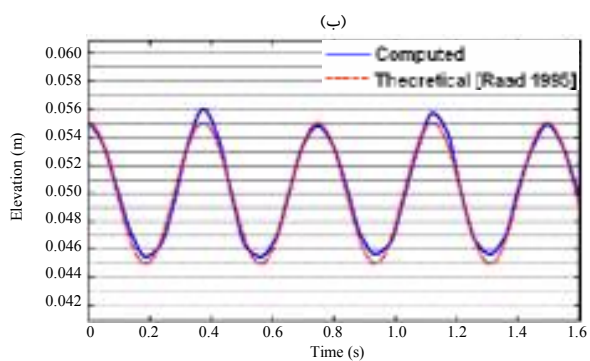
(ب): استفاده از میانبایی Hyper-C، (ج): استفاده از میانبایی HRIC، (د): استفاده از میانبایی CICSAM



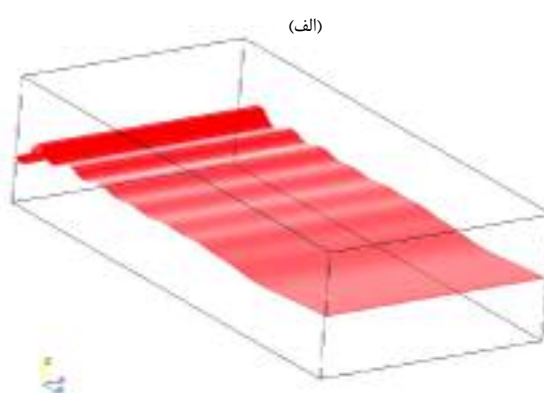
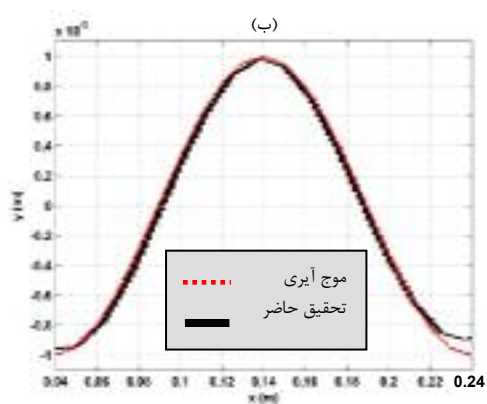
شکل ۹- مشخصات مساله شکست دیواره آب درون مخزن



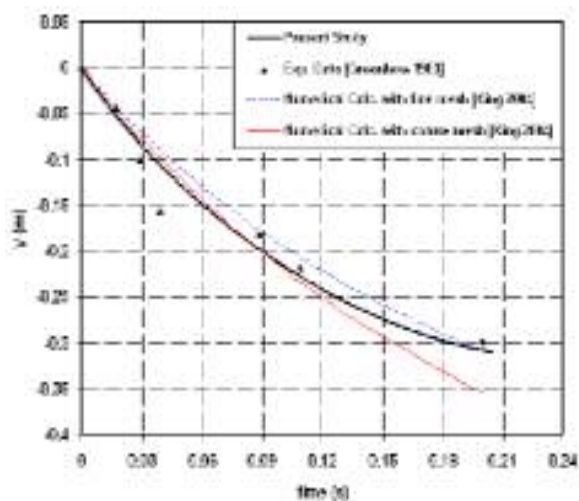
شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدلسازی شکست دیواره آب درون مخزن: (الف) پیشروی آب درون مخزن، (ب) کاهش ارتفاع آب درون مخزن



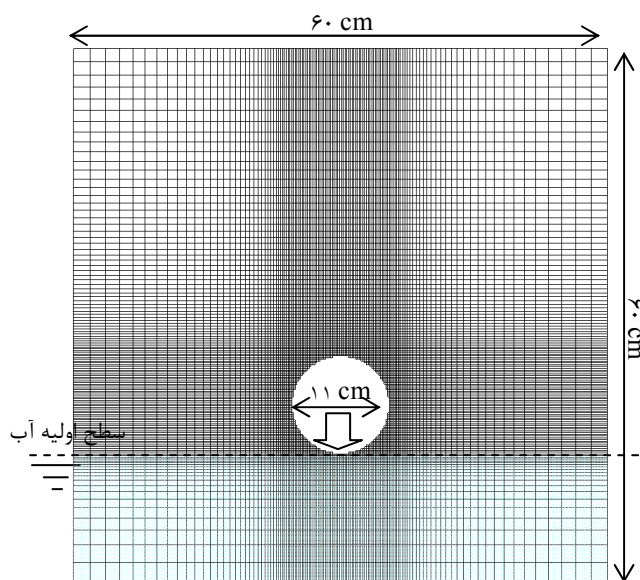
شکل ۱۱- مساله جابجایی آب درون مخزن: (الف) هندسه مساله، (ب) ارتفاع سیال در دیواره سمت راست مخزن



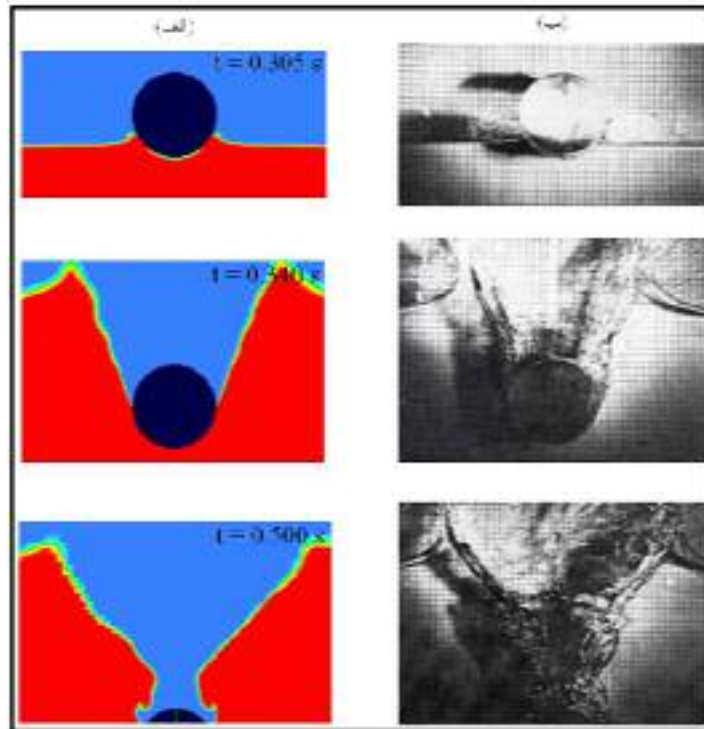
شکل ۱۲- تولید موج، حفظ و خروج آن: (الف): تولید موج در دامنه محاسباتی، (ب): مقایسه موج تولید شده و موج تحلیلی آیری



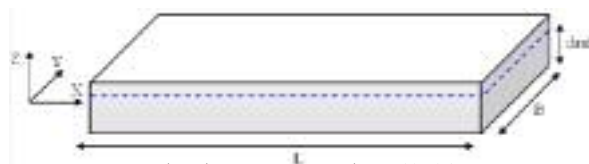
شکل ۱۵- جابجایی مقطع دایره ای درون آب



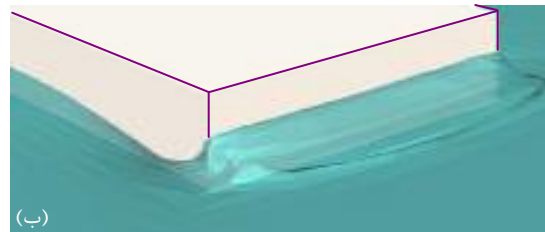
شکل ۱۴- هندسه مساله برخورد استوانه با سطح آب



شکل ۱۶- تغییر شکل سطح آزاد پس از برخورد استوانه با سطح آزاد: (الف) شبیه سازی عددی، (ب) کار تجربی [۳۸]



شکل ۱۷- تعاریف هندسه شناور بارج



شکل ۱۸- تغییر شکل سطح آزاد در جلوی شناور بارج (الف): کار تجربی، (ب): شبیه سازی عددی

جدول ۱- مشخصات شناور بارج

L	1.05 m
B	0.29 m
Draft	0.025 m
C_B	1.0
Mass	7.26 Kg
I_{yy}	0.7 Kg ²
KG	0.025 m

جدول ۲- مقاومت شناور بارج

مقاومت	مقدار (N)	خطا (%)
اندازه گیری آزمایشگاهی	۳/۵۳	-
محاسبه عددی در حالت مقید	۲/۷۱	٪۲۳/۲
محاسبه عددی در حالت دو درجه آزادی	۳/۳۲	٪۵/۹