



شبیه سازی عددی و بررسی تجربی حرکت یک جسم پرسرعت زیرسطحی

حسن فروزانی^{۱*}، بهادر سرانجام^۲، رضا کمالی^۳ و عطاله ربیعی^۴^۱ مربی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شیراز^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز^۴ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

چکیده

در این تحقیق، نحوه شکل‌گیری و سیر تکامل حباب سوپرکاویتاسیون و تأثیر آن بر کاهش نیروی مقاوم برای یک جسم متحرک زیرسطحی بصورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. به منظور شبیه‌سازی عددی جسم متحرک زیرسطحی، از معادلات میانگین‌گیری شده ناویر استوکس زمانمند چندفازی، همراه با مدل شش درجه آزادی حرکت جسم صلب استفاده شده است. با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در مورد پرتابه‌های پرسرعت زیر سطحی، در ابتدا به کمک کد عددی در دسترس موجود، حل عددی زمانمند برای پرتابه‌ای با سرعت حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه انجام و نتایج آن در راستای تنظیم کد عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از حصول اطمینان از دقت مناسب الگوریتم انتخاب شده، حل عددی زمانمند حرکت پرتابه پرسرعت با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه مورد تحلیل قرار گرفت. آزمایش‌ها برای یک پرتابه با دماغه نیم‌کروی در آزمایشگاه هیدرودینامیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز انجام شده و مسیر جسم توسط دوربین پرسرعت ثبت شده است. نتایج حاصل از حل عددی نشان می‌دهد که حباب سوپرکاویتاسیون در زمانی کمتر از ۲ میلی‌ثانیه، پرتابه پرسرعت را بطور کامل احاطه کرده، نیروی پسی وارد بر پرتابه را ۶۶٪ کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: کاویتاسیون؛ سوپرکاویتاسیون؛ پرتابه زیرسطحی؛ کاهش نیروی پسا.

Numerical Simulation and Experimental Investigation of an Underwater High-Speed Moving Body

H. Forouzani^{1,*}, B. Saranjam², R. Kamali³, A. Rabiee⁴¹ Lect., Naval Eng., Malek Ashtar Univ. of Tech., Shiraz, Iran.² Assoc. Prof., Naval Eng., Malek Ashtar Univ. of Tech., Shiraz, Iran.³ Prof. Mech. Eng., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.⁴ Assis. Prof. Mech. Eng., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

Abstract

In this study, significant features of supercavitation including formation, evolution and their effects on drag reduction for an underwater moving body are both experimentally and numerically investigated. To simulate the flow field of the underwater moving body, the multiphase Reynolds averaged Navier–Stokes equations (RANS) are coupled to a six-degree-of-freedom (6DOF) rigid body motion model. Due to the lack of high-speed underwater projectile experimental results, first, the lower-speed unsteady numerical simulation of the projectile with velocity 100 m/sec has been carried out and compared with the experimental data for tuning the available code. Then, the numerical simulation has been taken place for the high-speed underwater projectile with velocity 200 m/sec using the adjusted numerical algorithm. The experiments were performed for a spherical-nose projectile at Shiraz MUT Hydrodynamics Laboratory Cavitation Tank, and the projectile trajectory was recorded with a high-speed camera. Numerical results show that the supercavitation around the high speed projectile generates at less than 2 msec and drag force is reduced by 66%.

Keywords: Supercavitation; Cavitation; Underwater Projectile; Drag Reduction.

۱- مقدمه

حداکثر سرعت وسایل نقلیه در زیر آب در اثر نیروی پسای ناشی از اصطکاک سطح بدنه، بسیار محدود است. آب تقریباً یک سیال تراکم‌ناپذیر بوده، خواص آن حتی در اثر افزایش فشار شدید، بسیار کم تغییر می‌کند؛ اما با کاهش فشار، هنگامی که فشار میدان جریان کمتر از فشار بخار در دمای کاری شود، پدیده کاویتاسیون رخ می‌دهد. هنگامی که یک جسم با سرعت زیاد در زیر آب حرکت کند، در صورتیکه اطراف آن فشار کمتر از فشار بخار اشباع گردد، روی سطوح آن حباب‌های بخار آب تشکیل می‌شود. این پدیده، کاویتاسیون نام دارد. با افزایش سرعت، ابعاد این حباب‌ها بزرگتر شده، با پیوستن به یکدیگر جسم را بطور کامل در بر می‌گیرند. در اثر وقوع این پدیده که سوپرکاویتاسیون نام دارد، نیروی پسای اصطکاک ششیداً کاهش یافته و جسم می‌تواند در زیر آب با سرعت بالاتری به حرکت خود ادامه دهد.

در طول دهه گذشته، محققان زیادی، پدیده سوپرکاویتاسیون را بصورت تجربی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. اغلب این تحقیقات روی موضوعاتی مانند، شکل حباب سوپرکاویتاسیون، توزیع سرعت و فشار میدان جریان، کنترل و پایداری اجسام متحرک زیرآبی متمرکز بوده است. ساوچنکو^۱ و همکارانش [۱] در سال ۱۹۹۹، نتایج آزمایشگاهی روی حرکت اجسام با سرعت زیاد در آب را به نمایش گذاشته، یک رابطه تجربی برای تخمین شکل حباب سوپرکاویتاسیون متقارن محوری ارائه کردند. لینداو^۲ و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۳، حرکت سه بعدی یک جسم سوپرکاویتاسیونی را با کوپل روش حل معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس زمانمند چند فاز^۳ و مدل شش درجه آزادی حرکت جسم صلب^۴، به صورت عددی بررسی کردند. در این مطالعه، نشان داده شده که نتایج عددی بطور مستقل از این اصل حمایت می‌کند که حرکت رو به جلوی جسم، حتی در غیاب سطوح کنترل، در حباب

سوپرکاویتاسیون توسعه یافته، پایدار بوده و در برابر بعضی مقدار اغتشاشات محدود مصون است. وانگ^۵ و همکارانش [۳] در سال ۲۰۰۵، ارتباط بین شکل حباب سوپرکاویتاسیون و پارامترهای یک کویتیتور نمونه را بررسی کرده، یک رابطه تجربی جهت محاسبه طول و ضخامت حباب سوپرکاویتاسیون طبیعی ناشی از آزمایش‌های پرتابه ارائه کردند. پینگ^۶ و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۶، با استفاده از کد دینامیک سیالات محاسباتی تجاری فلوئنت، به شبیه‌سازی عددی شکل حباب سوپرکاویتاسیون همراه با تزریق هوا و نیروی پسای یک جسم زیرآبی پرداخته، یک رابطه تجربی بین شکل حباب سوپرکاویتاسیون همراه با تزریق هوا و نرخ تزریق بدست آوردند. ژانگ^۷ و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۷، با انجام یک سری آزمایش‌هایی روی پرتابه‌ها در آزمایشگاه تونل آب بسته، به مطالعه مشخصات شکل حباب سوپرکاویتاسیونهای طبیعی و همراه با تزریق هوا پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در اعداد کاویتاسیون کم، شکل حباب سوپرکاویتاسیون طبیعی و همراه با تزریق هوا شبیه هستند و با کاهش عدد فرود، عدم تقارن شکل حباب سوپرکاویتاسیون ناشی از گرانش، واضح‌تر می‌شود.

نوری و اسلام‌دوست [۶] در سال ۲۰۰۹ با فرض جریان پتانسیل، جریان سوپرکاویتاسیونی را با روش المان مرزی بصورت عددی مطالعه کرده، نشان دادند که این روش قادر است، رفتار و مرز حباب سوپرکاویتاسیون را به خوبی تخمین بزند. وانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۰، نرخ تزریق گاز در یک جسم سوپرکاویتاسیونی همراه با تزریق هوای زمانمند را بررسی کردند. آنها نرخ تغییر حجم حباب سوپرکاویتاسیون را بر اساس اصل لاگونیویچ و روابط تجربی محاسبه کرده، نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. آنها نشان دادند که مدل فوق قادر است، طول ناحیه کاویتاسیون محدود و ابعاد آن را پیش‌بینی کند.

بن^۸ و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۰، با استفاده از یک مدل سه مولفه‌ای بر اساس معادلات انتقال جرم به بررسی کاویتاسیون طبیعی و همراه با تزریق هوا پرداختند. آنها

⁵ Wang

⁶ Ping

⁷ Zhang

⁸ Bin

¹ Savchenko

² Lindau

³ Multiphase Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations – URANS

⁴ 6DOF Dynamics Model

در مطالعه حاضر تلاش شده است که به کمک ظرفیت‌های آزمایشگاهی و توانمندی‌های عددی موجود، بتوان به بررسی و شبیه‌سازی عددی یک پرتابه پرسرعت زیرسطحی با سرعتی حدود ۲۰۰ متر بر ثانیه پرداخت. شایان ذکر است که این سرعت حدود دو برابر سرعت‌های تحلیل شده موجود است. با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در مورد پرتابه‌های پرسرعت زیر سطحی، در ابتدا حل عددی زمانمند همراه با آزمایش‌های تجربی برای پرتابه‌ای با سرعت کمتر انجام شده، پس از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی و حصول اطمینان از دقت مناسب الگوریتم انتخاب شده، حل عددی زمانمند حرکت پرتابه پرسرعت انجام شده است. از اینرو ویژگی‌های مهم پدیده سوپرکاویتاسیون شامل، تشکیل، توسعه و تخریب کاویتاسیون برای یک پرتابه زیرسطحی با سرعت حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه بصورت تجربی و عددی و برای پرتابه‌ی پرسرعت زیرسطحی با سرعت حدود ۲۰۰ متر بر ثانیه بصورت عددی، با لحاظ کردن اثرات زمانمند بودن و رفتار دینامیکی پرتابه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و ثبت اطلاعات

همانطور که در بخش قبل گفته شد، بررسی‌های آزمایشگاهی پدیده سوپرکاویتاسیون، اساساً در تونل‌های بسته آب با یک مدل ساکن انجام می‌شود و از اثرات غیردائمی و رفتار دینامیکی وسیله نیز صرف‌نظر می‌شود. در مقایسه با آزمایش‌های تجربی تونل آب، در آزمایش اجسام متحرک پرسرعت (پرتاب جسم به درون آب) به راحتی سوپرکاویتاسیون طبیعی تشکیل شده، مسیر حرکت جسم نیز به وضوح مشاهده می‌شود؛ بنابراین این روش برای بررسی پدیده سوپرکاویتاسیون طبیعی زمانمند مناسب است. از اینرو به منظور انجام آزمایش‌های سوپرکاویتاسیون زمانمند، در دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز یک حوضچه آب طراحی و ساخته شد. ابعاد این حوضچه به نحوی انتخاب شده که اثر دیواره‌ها بر میدان جریان ناچیز باشد. طول این حوضچه، ۹ متر و سطح مقطع آن، $۱/۲ \times ۱/۲$ مترمربع است. نمایی شماتیک از این آزمایشگاه در شکل ۱ ارائه شده است. تجهیزات این آزمایشگاه شامل، پرتابگر پنوماتیکی، دوربین پرسرعت، رایانه‌ی پردازش تصویر، حوضچه آزمایش و سیستم نورپردازی است. در این آزمایشگاه مسیر حرکت

تطابق خوبی بین مشخصات کاویتاسیونی پیش‌بینی شده مانند، طول، قطر و شکل حباب سوپرکاویتاسیون و نتایج آزمایشگاهی مشاهده کردند.

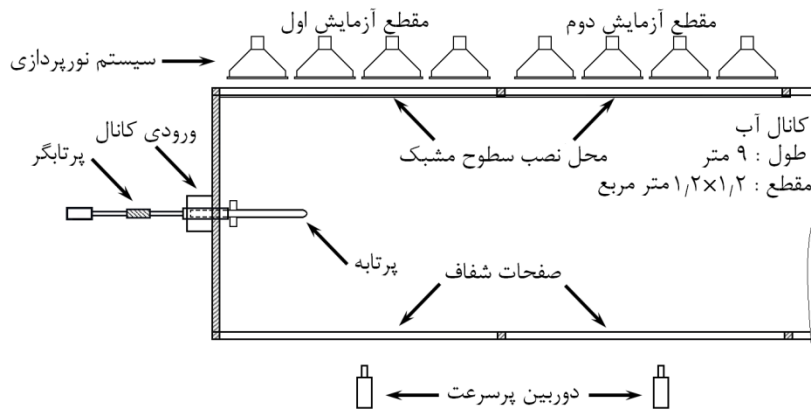
ربیعی و همکارانش [۹-۱۱] در سال ۲۰۱۱، به بررسی آزمایشگاهی و عددی پدیده سوپرکاویتاسیون یک جسم متحرک شتاب‌دار پرداختند. آنها نشان دادند که نرم‌افزار در دسترس موجود فلونت، قابلیت مدل‌سازی میدان جریان سوپرکاویتاسیونی را داشته، نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد.

اینگ^۱ و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۲، روشی برای طراحی شکل هندسی پرتابه‌های زیرسطحی پرسرعت بر اساس تئوری جریان پتانسیل ارائه کرده، با شبیه‌سازی عددی تاثیر شکل پرتابه روی حباب سوپرکاویتاسیون را بررسی کردند. آنها نشان دادند که در اینگونه پرتابه‌ها با افزایش ضریب لاغری، ضریب درگ کاهش می‌یابد.

سرانجام [۱۳] در سال ۲۰۱۳، نحوه‌ی تشکیل، تکامل و تخریب زمانمند پدیده‌ی سوپرکاویتاسیون حول یک جسم متحرک زیرآبی را به صورت تجربی و عددی، مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد که استفاده از معادلات میانگین زمانمند ناویر استوکس چند فازی در کنار مدل شش درجه آزادی حرکت جسم صلب در تحلیل عددی، می‌تواند مسیر و سرعت جسم و شکل حباب سوپرکاویتاسیون تشکیل شده را به خوبی تخمین بزند.

اغلب بررسی‌های آزمایشگاهی روی پدیده سوپرکاویتاسیون با یک مدل ثابت در تونل بسته آب انجام شده، محققان کمی اجسام سوپرکاویتاسیونی متحرک را بصورت تجربی مطالعه کرده‌اند؛ همچنین روش‌های عددی استفاده شده در شبیه‌سازی حباب سوپرکاویتاسیون، اغلب بر اساس جریان پتانسیل یا مدل‌های چندفازی دینامیک سیالات محاسباتی بوده، در این تحقیقات شکل حباب کاویتاسیون و توزیع سرعت و فشار جریان‌ها در شرایط دائمی در سرعت‌های پروازی تا حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه بررسی شده، از اثرات زمانمند بودن رفتار دینامیکی وسیله، صرف‌نظر شده است.

^۱ Ying



شکل ۱- نمایی شماتیک از آزمایشگاه سوپرکاویتاسیون زمانمند و تجهیزات آن (نمای از بالا)

تصویربرداری است؛ بنابراین در آزمایش‌های متفاوت دقت آزمایش‌ها بسته به سرعت و وضوح دوربین تصویربرداری متفاوت است.

ثبت تصویرهای جریان از طریق پنجره‌های شیشه‌ای واقع در دیواره حوضچه انجام شده است. به منظور پردازش داده‌ها، پارامترهای مختلف از تصویرهای ثبت شده توسط دوربین پرسرعت استخراج می‌شود. این کمیت‌ها شامل، موقعیت جسم در جهت‌های افقی و عمودی و جهت آن است. پس از پردازش داده‌ها، با استفاده از اختلافات ابعادی، مولفه‌های سرعت در زمان‌های مختلف و در نتیجه عدد کاویتاسیون قابل محاسبه است.

در این تحقیق، آزمایش‌ها توسط پرتابه‌ای با سر کروی انجام شده است. در ابتدا جسم به تدریج در اثر هوای پرفشار شتاب گرفته و در زمان خروج از پرتابگر به بیشترین سرعت خود می‌رسد، سپس در حوضچه آب به تدریج متوقف



شکل ۲- نمایی از آزمایشگاه و تجهیزات آن

جسم در عمق ۰/۴ متری از سطح آزاد آب و هوا قرار دارد. پرتابه روی پرتابگر نصب شده و از محل ورود پرتابگر، دهانه پرتابگر به همراه پرتابه به درون آب وارد می‌شود. در نهایت پرتابه به درون آب پرتاب می‌شود.

در آزمایشگاه‌های دریایی معتبر مانند مرکز تحقیقاتی NUWC در ایالات متحده و یا آزمایشگاه جامع دریایی آکادمی ملی علوم اوکراین به منظور ثبت اطلاعات و تعیین موقعیت مکانی پرتابه، یک سطح که با خطوط افقی و عمودی مدرج شده، در پشت پرتابه قرار می‌دهند تا در حین تصویربرداری، با توجه به ثابت بودن وضعیت دوربین و سطح مدرج، موقعیت پرتابه تعیین شود. این سطح مانند کاغذ میلیمتری بوده که ابعاد مربع‌های آن مقدار مشخصی است؛ بنابراین با تعیین موقعیت پرتابه و در دست داشتن فاصله زمانی تصویربرداری، با بکارگیری معادلات مشتقات زمانی، سرعت و شتاب پرتابه استخراج می‌شود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در این آزمایشگاه نیز با ایده‌برداری از آزمایشگاه‌های معتبر از سطح مدرجی با مربع‌هایی به مساحت ۵×۵ سانتیمتر مربع در پشت پرتابه و روبروی دوربین استفاده شده است تا با تعیین فواصل پرتابه در زمان‌های مختلف، سرعت و شتاب آن استخراج شود.

در این آزمایشگاه با توجه به سرعت پرتابه می‌توان از دوربین‌های پرسرعت با سرعت‌های تصویربرداری متفاوت استفاده کرد. خطای اندازه‌گیری در نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه موقعیت پرتابه در هر لحظه از زمان در جهت‌های افقی و عمودی عمدتاً ناشی از کیفیت تصویر و سرعت

معادلات شش درجه آزادی حاکم بر حرکت جسم صلب، شتاب وارد بر جسم محاسبه شده، در نهایت با انتگرال گیری از ترم شتاب، سرعت و جابجایی جسم در گام زمانی بعد حاصل می شود. سپس با استفاده از ظرفیت شبکه دینامیک نرم افزار و موقعیت جدید جسم، شبکه جدیدی تولید شده، دوباره این فرایند تکرار می شود. این روال برای کلیه گام های زمانی بکار می رود. لازم به ذکر است که با توجه به سرعت زیاد پرتابه دوم، مسیر حرکت در بازه زمانی مورد ارزیابی به صورت حرکت مستقیم الخط بوده، قاعدتا تعداد درجات آزادی جسم کاهش می یابد.

به منظور حل میدان جریان سوپرکاویتاسیونی، این معادلات در دامنه محاسباتی بر اساس روش حجم محدود^۱ حل شده، برای شبیه سازی دو فاز آب و بخار از مدل مخلوط همگن چند فازی و به منظور تفکیک دو فاز از ضریب کسر حجمی بخار همراه با شبکه بندی دینامیک استفاده شده است. اصولا در مدل مخلوط همگن چندفازی خواص میدان جریان به صورت مخلوطی از چند فاز به کمک ضریب کسر حجمی محاسبه شده، برای کل میدان جریان یک دسته معادله حل می شود. برای مشخص کردن میزان نسبت فازها نیز با استفاده از یک معادله اضافی، کسر حجمی هر فاز محاسبه می شود. به منظور کوپل فشار و سرعت نیز، از الگوریتم سیمپل سی^۲ استفاده شده است.

معادلات پیوستگی و مومنتوم عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho_m g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

در این رابطه u_j و x_j به ترتیب بیانگر، مولفه سرعت و محور مختصات، t معرف زمان، p بیانگر فشار محلی، ρ_m چگالی مخلوط، μ_m لزجت مخلوط و μ_t لزجت اغتشاش^۳ است.

همچنین یک معادله جابجایی برای تعیین نرخ جرمی بین فازها به این معادلات اضافه می شود:

می شود. مسیر حرکت جسم و شکل حباب سوپرکاویتاسیون تشکیل شده در اطراف جسم، بوسیله یک دوربین پرسرعت با سرعت ۳۶۰۰۰ تصویر در ثانیه ثبت شده است. در این آزمایش ها سعی شده با انتخاب یک دوربین پرسرعت با وضوح مناسب، تصاویری با وضوح بالا ثبت شود تا خطای مربوط به تصویربرداری ناچیز باشد. با انجام مطالعات مربوط به محاسبه انحراف معیار استاندارد مربوط به ابزار اندازه گیری موقعیت پرتابه و تکرار، خطایی در حدود ۱٪ برای این سیستم اندازه گیری حاصل شده است [۱۲].

۳- مدل محاسباتی

۳-۱- معادلات حاکم و شبیه سازی جریان سیال

همانطور که در بخش قبل گفته شد، هنگامی که فشار میدان جریان کمتر از فشار بخار سیال در دمای کاری شود، پدیده کاویتاسیون رخ می دهد. عدد کاویتاسیون، یک پارامتر بدون بعد بوده که معیار مناسبی برای تعیین پتانسیل جریان در ایجاد کاویتاسیون است. این عدد بصورت نسبت اختلاف فشار جریان آزاد (p_k) و فشار بخار (p_v) سیال به انرژی جنبشی واحد حجم سیال ($\frac{1}{2} \rho V^2$) تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{p_k - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

بطور معمول هنگامی که یک جسم صلب با سرعتی بیشتر از ۵۰ متر بر ثانیه در آب حرکت می کند، پدیده کاویتاسیون رخ می دهد [۱۴] و بطور کلی زمانی سوپرکاویتاسیون رخ می دهد که $\sigma < 0.1$ باشد [۱۵].

در این تحقیق، به منظور شبیه سازی و تخمین شکل کاویتاسیون زمانمند، رفتار دینامیکی و مسیر حرکت و نیروهای وارد بر جسم، در تحلیل عددی از کوپل مدل معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس زمانمند و مدل حرکت شش درجه آزادی جسم صلب استفاده شده است.

جهت تحلیل حرکت جسم داخل میدان جریان در هر لحظه به کمک معادلات میانگیری شده ناویر استوکس در حالت زمانمند، پارامترهای میدان جریان شامل، فشار، سرعت و سایر پارامترهای میدانی مانند، تنش های برشی و در نهایت میزان نیروی وارد بر جسم ناشی از ترم های مختلف فشاری و تنش های برشی، در هر لحظه محاسبه می شود. حال برای محاسبه میدان جریان در گام زمانی بعدی با کمک حل

¹ Finite Volume

² SIMPLEC

³ Turbulent viscosity

شعاع اولیه این هسته‌ها 10^{-6} و کسر حجمی آنها 5×10^{-5} و ضرایب F_v و F_c به ترتیب برابر با ۵۰ و ۰.۰۱ است.

شبیه‌سازی آشفته‌گی جریان نیز با استفاده از مدل اغتشاش دو معادله‌ای SST $k-\omega$ صورت گرفته است. تجربه نویسندگان در انجام شبیه‌سازی میدان‌های چندفازی نشان داده است که مدل اغتشاشی فوق در کنار معادلات میدان شامل، پیوستگی و مومنتوم، توانایی و کارایی مناسبی در پیش‌بینی نقطه آغاز و میزان مقدار جدایش جریان تحت گرایان فشار معکوس را داشته، در جریان‌های کاویتاسیونی از دقت و همگرایی بهتری برخوردار است. معادلات حاکم عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(Y_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(Y_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (10)$$

در این روابط Y_k و Y_ω به ترتیب بیانگر، ضریب پخش موثر برای k و ω هستند.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\xi_k} \quad (11)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\xi_\omega} \quad (12)$$

ξ_k و ξ_ω به ترتیب، اعداد پراوتل مغشوش برای k و ω بوده، μ_t لزجت اغتشاش است [۱۶].

۳-۲- هندسه مدل و تولید شبکه

در این مطالعه حرکت یک پرتابه پرسرعت زیرسطحی در درون آب و نحوه تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف آن با استفاده از حل عددی به کمک نرم‌افزار تجاری در دسترس انسیس-سی‌اف‌ایکس^۱ بررسی شده است. با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در تحقیقات قابل دسترس در مورد پرتابه‌های پرسرعت زیر سطحی، در ابتدا نتایج حل عددی پرتابه‌ای با سرعت کمتر با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده، پس از اطمینان از دقت مناسب الگوریتم

$$\frac{\partial \alpha_n \rho_n}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_n \rho_n u_j)}{\partial x_j} = \Gamma_n \quad (4)$$

Γ_n نرخ انتقال جرم در سطح میانی است. معادلات حاکم بر فرآیند دو فازی با سه مولفه مجزا ارائه می‌شوند که در آنها شرط عدم لغزش بین فازها در نظر گرفته شده است. بخار v آب w و گاز غیرقابل میعان nuc سه مؤلفه تأثیرگذار در پدیده کاویتاسیون هستند. رابطه بین کسرهای حجمی این مولفه‌ها عبارتست از:

$$(\alpha_w + \alpha_{nuc}) + \alpha_v = 1 \quad (5)$$

در بسیاری از مدل‌های کاویتاسیونی فرض می‌شود که گاز غیرقابل میعان با کسر حجمی ثابت به خوبی در فاز مایع حل می‌شود. بر این اساس کسرهای حجمی α_w و α_{nuc} می‌توانند به خوبی با هم ادغام شده، به عنوان یک پارامتر α_l تعریف شود. از اینرو معادله حاکم برای تعیین نرخ جرم بین فازها عبارتست از:

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_l \rho_l u_j)}{\partial x_j} = \Gamma = \dot{m}_v - \dot{m}_c \quad (6)$$

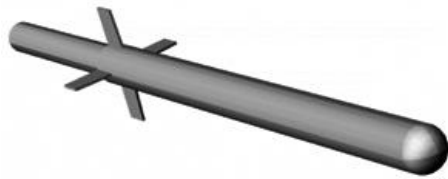
که در آن ترم‌های چشمه \dot{m}_v و \dot{m}_c به ترتیب، نرخ جرمی تولید بخار و نرخ جرمی میعان در پدیده کاویتاسیون هستند. محققان جهت شبیه‌سازی پدیده کاویتاسیون، مدل‌های انتقال جرم متفاوتی ارائه کرده‌اند. در کد موجود در دسترس از مدل انتقال جرم رایلی-پلست استفاده شده است. این مدل بر اساس استفاده از معادله رشد حباب رایلی-پلست برای تعیین نرخ تولید بخار پیاده‌سازی شده است. با چشم‌پوشی از ترم لزجت و کشش سطحی، نرخ انتقال جرم از هر فاز عبارتست از:

$$\dot{m}_v = -F_v \frac{3\alpha_{nuc}\alpha_l\rho_v}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \max\left(\frac{p_v - p}{\rho_l}, 0\right)} \quad (7)$$

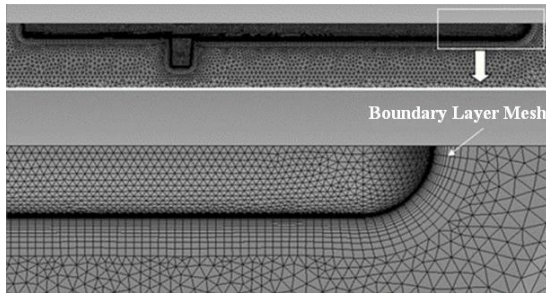
$$\dot{m}_c = F_c \frac{3(1-\alpha_l)\rho_v}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \max\left(\frac{p_v - p}{\rho_l}, 0\right)} \quad (8)$$

در این روابط p_v فشار بخار، R_{nuc} شعاع اولیه هسته‌های گازی، ρ_l چگالی مایع و ρ_v چگالی بخار است. از آنجا که فرآیندهای تبخیر و میعان از مقیاس‌های زمانی متفاوتی برخوردارند، از ثابت‌های تجربی F_c و F_v در این رابطه استفاده شده است. گازهای غیرقابل میعان که بصورت حباب‌های کروی فرض شده‌اند، مکان‌های هسته‌سازی برای فرآیند کاویتاسیون بشمار می‌روند. در این شبیه‌سازی اندازه

^۱ Ansys-CFX



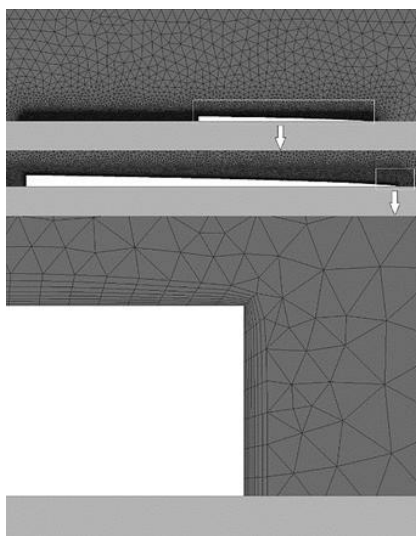
شکل ۳- نمای هندسی پرتابه اول



شکل ۴- نحوه شبکه‌بندی و شبکه لایه مرزی در اطراف پرتابه اول



شکل ۵- نمای هندسی پرتابه دوم



شکل ۶- شبکه‌بندی و شبکه لایه مرزی پرتابه دوم

انتخاب شده، حل عددی پرتابه پرسرعت برای سرعت‌های بالاتر به کمک شبیه‌سازی عددی پیش‌فرض انجام شده است. در شبیه‌سازی انجام شده از روش شبکه‌بندی دینامیک استفاده شده، جسم درون شبکه سیال حرکت می‌کند. به منظور تخمین دقیق ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون، یک ناحیه استوانه‌ای شکل در اطراف پرتابه تعریف شده است. تراکم شبکه در این ناحیه، زیادتر از نقاط دیگر است. ابعاد این ناحیه بر اساس طول حباب سوپرکاویتاسیون ایجاد شده در آزمایشگاه است. علاوه بر این، در این ناحیه شبکه دچار تغییر شکل نشده، تغییر شکل‌های ایجاد شده به خارج از این ناحیه منتقل می‌شود. این عمل باعث شده که تغییر شکل‌ها به المان‌های با ابعاد بزرگتر منتقل شده، شبکه‌بندی مجدد کمتری در طول زمان حل صورت گیرد.

پرتابه مورد آزمایش (پرتابه اول) شامل، یک بدنه استوانه‌ای به همراه دماغه‌ای به شکل نیم کره است. جهت انجام یک حرکت پایدار تعداد ۴ پره در قسمت نزدیک به انتهای آن نصب شده است. نمای هندسی این پرتابه در شکل ۳ و شبکه‌بندی اطراف دماغه و بدنه آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز، مشخصات هندسی این پرتابه ارائه شده است.

هندس پرتابه پرسرعت (پرتابه دوم)، در شکل ۵ و مشخصات هندسی آن، در جدول ۲ ارائه شده است. از پرتابه اول برای سرعت‌های تا حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه و از پرتابه دوم برای سرعت‌های بیشتر استفاده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، به دلیل تفاوت ماهیت رفتاری، هندسه پرتابه دوم بطور کامل با هندسه پرتابه اول متفاوت است. در شکل ۶، نحوه شبکه‌بندی میدان جریان برای پرتابه دوم نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، برای شبکه‌بندی از ترکیب المان‌های هرمی و مکعبی شکل استفاده شده است. با توجه به تقارن پرتابه‌ها، جهت کاهش حجم محاسباتی، برای پرتابه اول به دلیل وجود پره‌ها یک قطاع ۹۰ درجه و برای پرتابه دوم، یک قطاع ۱۰ درجه از دامنه محاسباتی سیال برای انجام شبیه‌سازی‌ها مدل‌سازی شده است.

تعداد المان‌ها بر اساس همگرایی شبکه، مقدار Y^+ و نرخ رشد المان‌ها و بررسی استقلال از شبکه تعیین گردیده است. با توجه به هندسه پرتابه‌ها، در مدل‌سازی پرتابه اول حدود

۴- نتایج

در این تحقیق به منظور شناسایی سوپرکاویتاسیون ایجاد شده روی اجسام متحرک زیرسطحی، از تحلیل عددی استفاده شده و به منظور صحت‌گذاری بر حل عددی، از داده‌های آزمایش‌های انجام شده روی پرتابه‌ای بنام پرتابه اول استفاده شده است. در شکل ۸ نحوه تشکیل، توسعه و تخریب حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف پرتابه اول در زمان‌های مختلف بصورت عددی و تجربی ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، از ابتدای حرکت پرتابه، شکل‌گیری حباب سوپرکاویتاسیون آغاز می‌شود. در ابتدای حرکت، بخش انتهایی پرتابه درون پرتابگر قرار داشته، در مدت زمان کمتر از ۳ میلی ثانیه بطور کامل از پرتابگر خارج می‌شود؛ لذا در این فاصله زمانی سرعت پرتابه افزایش یافته تا به بیشترین مقدار خود در زمان خروج کامل از دهانه پرتابگر برسد. تا این لحظه پرتابه یک حرکت با شتاب مثبت را تجربه کرده، از این لحظه به بعد با حذف شدن نیروی پرتابگر، در اثر اعمال نیروی پسا سرعاً از سرعت آن کاسته می‌شود. بعد از تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون، تقریباً تماس بین پرتابه و آب از بین رفته و فقط کوبیتیتور و پرها با آب در تماس هستند. با کاهش سرعت پرتابه، بالطبع ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون نیز کوچک شده، در نهایت از بین می‌رود. در این شکل حباب سوپرکاویتاسیون حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی در یک زمان یکسان، به منظور مقایسه در کنار یکدیگر قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود تا زمان حدود ۱۲ میلی‌ثانیه شبیه‌سازی عددی با دقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطابق داشته و از این زمان به بعد از دقت نتایج شبیه‌سازی عددی کاسته می‌شود. در این آزمایش‌ها با تصویربرداری پرسرعت و تحلیل اختلاف‌های ابعادی، سرعت پرتابه و در نهایت عدد کاویتاسیون محاسبه شده است. بیشترین سرعت پرتابه حدود ۸۵ متر بر ثانیه بوده، عدد کاویتاسیون متناظر با آن با توجه به فشار محلی حدود ۰٫۲۵ است. در جدول ۳، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی انجام شده است. در این جدول نسبت طول حباب سوپرکاویتاسیون به قطر پرتابه (L/D)، ناشی از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی و اختلاف آنها ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در کل نتایج شبیه‌سازی عددی

جدول ۱- مشخصات هندسی پرتابه اول

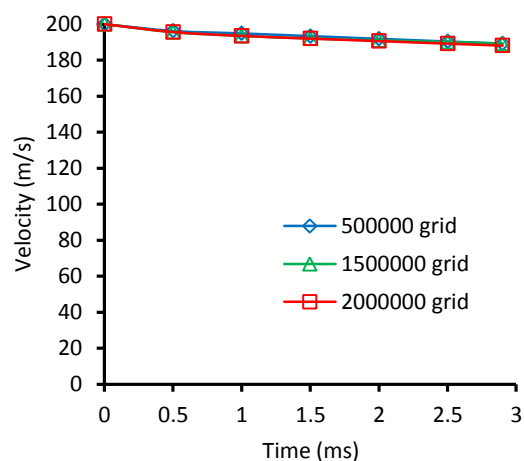
جرم (گرم)	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	تعداد پره	مرکز جرم (میلی‌متر)
۲۳۲	۴۸۰	۲۶	۴	۲۲۰ میلی‌متر از دماغه

جدول ۲- مشخصات هندسی پرتابه دوم

جرم (گرم)	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	تعداد پره	مرکز جرم (میلی‌متر)
۴۸	۱۵۰	۱۰	۰	۱۰۰ میلی‌متر از دماغه

۱۰۰۰۰۰۰ المان و در مدل‌سازی پرتابه دوم، حدود ۵۰۰۰۰۰ المان بکار رفته است. در انجام این محاسبات، از سیستم پردازش موازی استفاده شده است.

برای هر دو پرتابه بحث استقلال حل از شبکه بررسی شده، در شکل ۷ استقلال حل از شبکه برای حل عددی پرتابه دوم ارائه شده است. با توجه به زمان‌بر بودن حل عددی فوق، در سه میلی‌ثانیه ابتدایی حرکت، برای پرتابه پرسرعت، سه حالت شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به افزایش تصاعدی زمان محاسباتی نسبت به افزایش تعداد سلول‌ها و از طرف دیگر تفاوت ناچیز خطای شبکه‌ها، از شبکه با ۵۰۰ هزار المان برای انجام محاسبات استفاده شده است. لازم به ذکر است که بیشترین خطای این شبکه، با شبکه ۲ میلیون المانی حدود ۰٫۷٪ است.



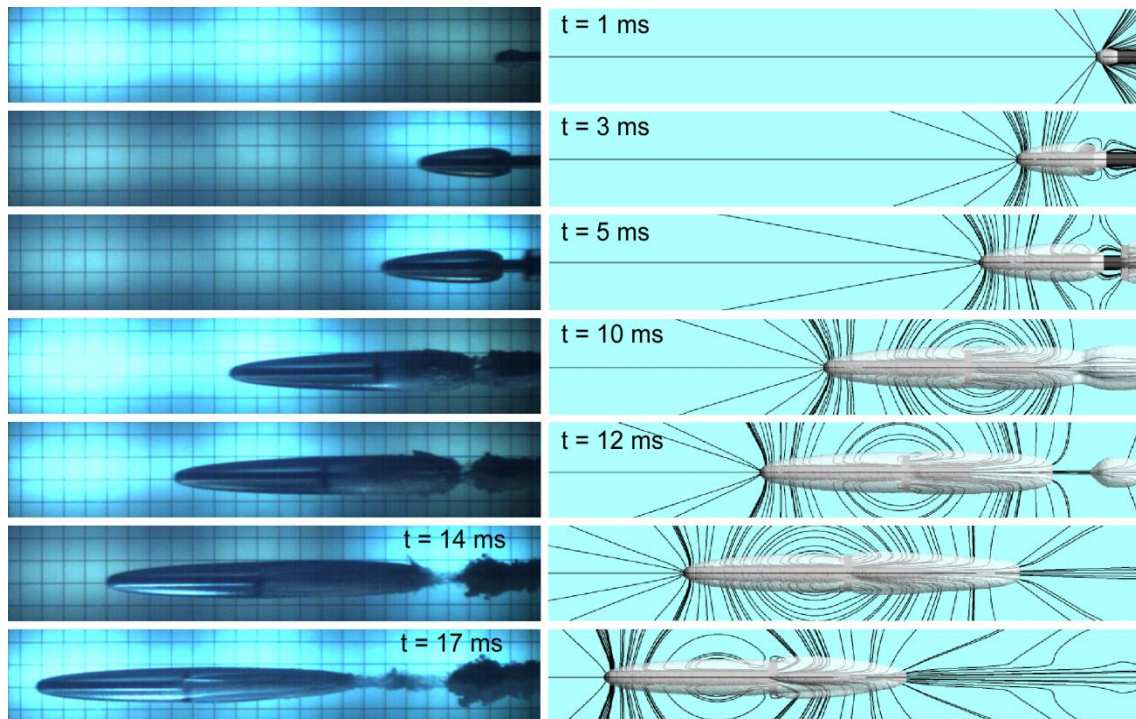
شکل ۷- بررسی استقلال حل از شبکه برای پرتابه دوم

در شکل ۹، تغییرات سرعت پرتابه اول نسبت به زمان حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. سرعت پرتابه در حین پرتاب به شدت افزایش یافته و در زمانی کمتر از ۳ میلی‌ثانیه به بیشترین میزان خود یعنی، حدود ۸۵ متر بر ثانیه می‌رسد و سپس با یک سیر نزولی پس از گذشت ۱۷ میلی‌ثانیه به حدود ۵۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. در ادامه با افزایش زمان و کاهش هرچه بیشتر سرعت، حباب سوپرکاویتاسیون از بین رفته، پرتابه سریعاً متوقف می‌شود. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت پیش‌بینی شده حاصل از شبیه‌سازی عددی با سرعت ثبت شده در آزمایش‌های تجربی تطابق خوبی دارد. از آنجا که پس از خروج پرتابه از پرتابگر، هنوز حباب سوپرکاویتاسیون بطور کامل پرتابه را پوشش نداده است، بخشی از پرتابه با آب در تماس بوده، کاهش سرعت شدید خواهد بود؛ اما پس از گذشت زمان حدود ۶ میلی‌ثانیه، تقریباً حباب سوپرکاویتاسیون پرتابه را بطور کامل پوشانده و در ادامه با کاهش نیروی پسا، سرعت پرتابه با نرخ کمتری کاهش می‌یابد.

با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. کمترین خطا برابر با ۱/۳۳٪ در زمان ۱۲ میلی‌ثانیه و بیشترین خطا، برابر با ۱۴/۰۳٪ متناظر با زمان ۱۷/۱ میلی‌ثانیه است. در زمان‌های میانی نیز نتایج شبیه‌سازی عددی تا زمان ۱۲ میلی‌ثانیه از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده، از این زمان به بعد از دقت آن کاسته می‌شود.

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

زمان (ms)	عدد کاویتاسیون	L/D تست آزمایشگاهی	L/D شبیه‌سازی عددی	خطا (%)
۱/۰	۰/۰۳۸	۳/۰۴	۲/۹۰	۴/۵۴
۲/۳	۰/۰۲۶	۶/۵۴	۶/۳۶	۲/۸۱
۳/۴	۰/۰۲۵	۹/۸۷	۹/۷۳	۱/۴۰
۴/۶	۰/۰۳۰	۱۳/۶۰	۱۳/۲۸	۲/۳۷
۱۲/۰	۰/۰۴۵	۳۱/۰۸	۳۰/۶۷	۱/۳۳
۱۴/۳	۰/۰۵۳	۳۴/۵۴	۳۱/۵۹	۸/۵۴
۱۶/۶	۰/۰۵۴	۳۴/۲۲	۲۹/۷۰	۱۳/۲۰
۱۷/۱	۰/۰۵۵	۳۴/۱۷	۲۹/۳۸	۱۴/۰۳

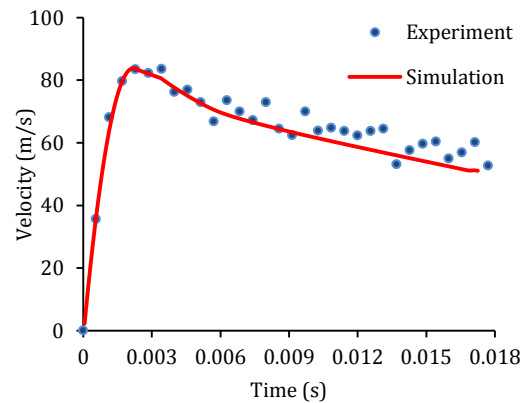


شکل ۸- مقایسه شکل حباب سوپرکاویتاسیون در شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در زمان‌های یکسان

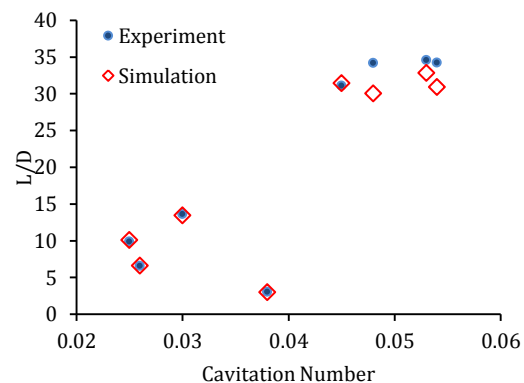
حال با توجه به تنظیم کد عددی در دسترس با داده‌های آزمایش‌های موجود در ادامه تلاش شده است، از این کد برای تحلیل یک پرتابه پرسرعت (مدل دوم) استفاده شود. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نحوه تشکیل، توسعه و تخریب حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف پرتابه دوم در زمان‌های مختلف، حاصل از حل عددی نشان داده شده است. در این شکل پرتابه با سرعت اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه داخل آب شروع به حرکت نموده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مدت زمان ۲ میلی‌ثانیه حباب سوپرکاویتاسیون بطور کامل پرتابه را احاطه کرده است. با توجه به اینکه در این پرتابه فقط کویتیتور با آب در تماس است (پره وجود ندارد)، انتظار می‌رود که در شرایط هندسی یکسان، از نرخ کاهش سرعت کمتری نسبت به پرتابه اول برخوردار باشد. با کاهش سرعت ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون نیز کاهش یافته تا اینکه در زمان ۱۲ میلی‌ثانیه طول حباب سوپرکاویتاسیون از طول پرتابه کمتر شده، قسمت انتهایی پرتابه با آب تماس پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که در طراحی اینگونه پرتابه‌ها زمان تماس آب با بدنه پرتابه، یکی از پارامترهای بسیار مهم در روند طراحی اینگونه پرتابه‌ها به شمار می‌آید. زیرا پرتابه از ابتدا تا انتهای مسیر در نظر گرفته شده برای آن، باید درون حباب سوپرکاویتاسیون قرار گیرد.

در شکل ۱۳، تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است، در ابتدای حرکت از آنجا که حباب سوپرکاویتاسیون بطور کامل تشکیل نشده و هنوز قسمت‌های زیادی از پرتابه با آب در تماس است، کاهش سرعت از شدت بالایی برخوردار بوده، پس از تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون و قرار گرفتن پرتابه بطور کامل درون آن، نرخ کاهش سرعت تقریباً ثابت می‌شود. برای این پرتابه حباب سوپرکاویتاسیون در زمانی کمتر از ۲ میلی‌ثانیه تقریباً تمام بدنه را در بر می‌گیرد. سرعت پرتابه در این زمان، حدود ۱۹۳ متر بر ثانیه است. با پیشروی پرتابه و کاهش سرعت، ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون نیز کوچکتر شده، سرانجام در زمان حدود ۱۲ میلی‌ثانیه انتهای پرتابه با آب تماس پیدا می‌کند. در این زمان سرعت پرتابه حدود ۱۷۲ متر بر ثانیه تخمین زده شده است. با محاسبه سطح زیر نمودار سرعت-زمان مسافت طی شده توسط پرتابه محاسبه

در شکل ۱۰ نیز، تغییرات نسبت طول حباب سوپرکاویتاسیون به قطر پرتابه بر حسب عدد کاویتاسیون حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تا عدد کاویتاسیون ۰٫۰۴۵ نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی داشته، از این حد به بالا از دقت آنها کاسته می‌شود؛ بنابراین با اطمینان می‌توان گفت که الگوریتم عددی حاضر در تخمین شکل حباب سوپرکاویتاسیون در اعداد کاویتاسیون کم و یا به عبارت دیگر در سرعت‌های زیاد از دقت بسیار خوبی برخوردار است و با کاهش سرعت و افزایش عدد کاویتاسیون، از دقت آن کاسته می‌شود.



شکل ۹- سرعت پرتابه اول بر حسب زمان

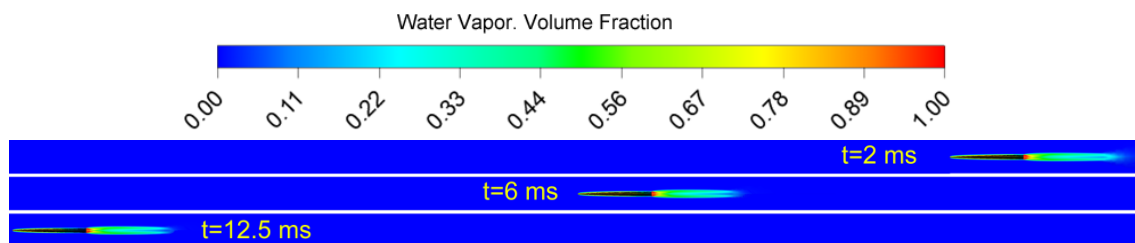


شکل ۱۰- نسبت طول حباب سوپرکاویتاسیون به قطر پرتابه بر حسب عدد کاویتاسیون

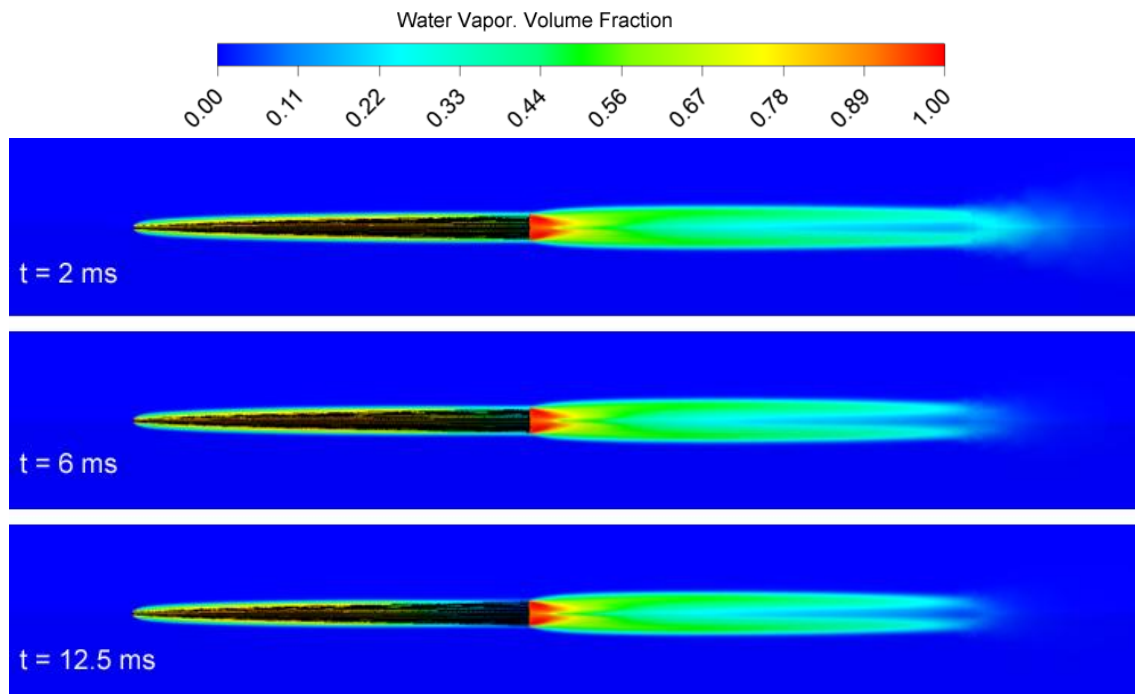
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶، سهم هر یک از مولفه‌های پسای فشاری و پسای اصطکاکی در نیروی پسای کل بر حسب زمان نشان داده شده است. اطلاعات هر دو مولفه بر حسب زمان تقریبی تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون ترسیم شده است. در ابتدای حرکت پس از تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف پرتابه، نیروی پسای فشاری از ۲۶/۵ نیوتن شروع شده، تا انتها به مقدار ۲۳/۴ نیوتن کاهش می‌یابد. این میزان کاهش را می‌توان ناشی از کاهش سرعت دانست؛ اما پسای اصطکاکی از مقدار حدودی ۷۰ نیوتن در ابتدای حرکت شروع شده، در انتها به مقدار ۷۴ نیوتن

خواهد شد که برای این پرتابه حدود ۲/۳ متر محاسبه شده است.

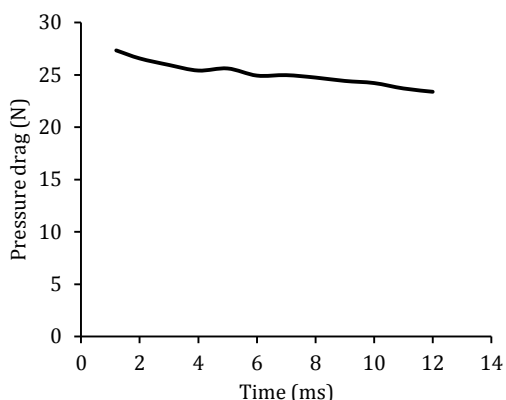
در شکل ۱۴، نحوه تغییرات نیروی پسای وارد بر پرتابه پرسرعت ارائه شده است. در این شکل نیز قبل از تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون نیروی پسای زیادی، حدود ۳۰۰ نیوتن به پرتابه وارد می‌شود و پس از گذشت ۲ میلی‌ثانیه نیروی پسا شدیداً کاهش یافته، به مقدار ۱۰۰ نیوتن می‌رسد. این مقدار تا پایان شکل‌گیری حباب سوپرکاویتاسیون (۹۷/۵ نیوتن)، تقریباً ثابت است؛ بنابراین با تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف پرتابه، نیروی پسای وارد بر پرتابه ۶۶٪ کاهش می‌یابد.



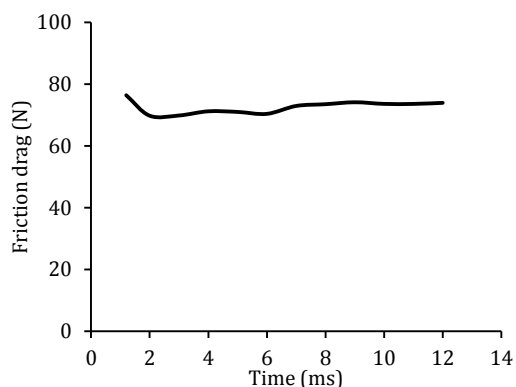
شکل ۱۱- تغییرات کسر حجمی آب و پوشش پرتابه توسط حباب سوپرکاویتاسیون در زمان‌های مختلف



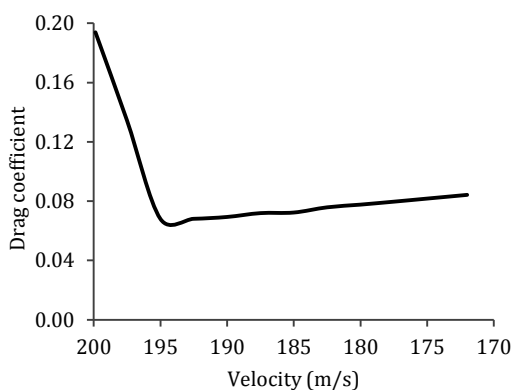
شکل ۱۲- بزرگنمایی از تغییرات کسر حجمی آب و پوشش پرتابه توسط حباب سوپرکاویتاسیون در زمان‌های مختلف



شکل ۱۵- نیروی پسای فشاری وارد بر پرتابه دوم بر حسب زمان

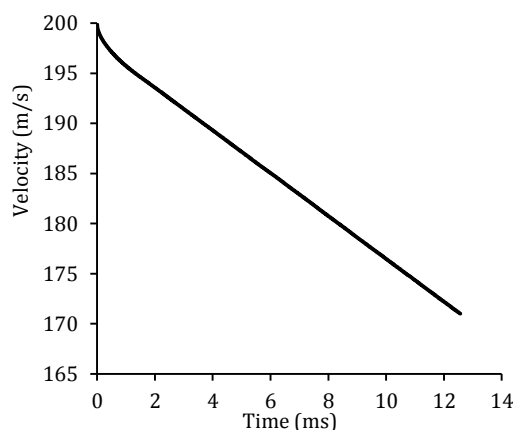


شکل ۱۶- نیروی اصطکاکی وارد بر پرتابه دوم بر حسب زمان

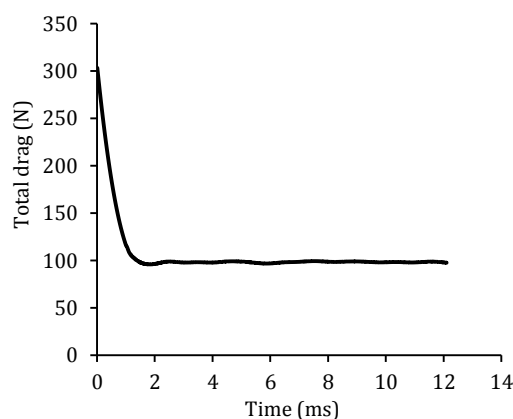


شکل ۱۷- ضریب پسای پرتابه دوم بر حسب سرعت

می‌رسد. این افزایش را می‌توان ناشی از افزایش سطح خیس پرتابه دانست؛ چرا که با کاهش سرعت و کوچک شدن حباب سوپرکاویتاسیون، بخش‌های انتهایی پرتابه با آب تماس پیدا می‌کنند؛ بنابراین کاهش پسای فشاری و افزایش پسای اصطکاکی، سبب می‌شوند که میزان نیروی پسای وارد بر پرتابه تقریباً ثابت بماند. با مقایسه این دو مولفه مشاهده می‌شود که علیرغم تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون در اطراف پرتابه، هنوز نیروی پسای اصطکاکی حدود ۳ برابر نیروی پسای فشاری است. در شکل ۱۷ نیز، ضریب نیروی پسای حسب سرعت ارائه شده است. دیده می‌شود که مقدار آن با یک سیر صعودی ملایم از ۰٫۰۷ تا ۰٫۰۸۵ متغیر است.



شکل ۱۳- منحنی سرعت پرتابه دوم بر حسب زمان



شکل ۱۴- نیروی پسای کل وارد بر پرتابه دوم بر حسب زمان

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، نحوه تشکیل حباب سوپرکاویتاسیون زمانمند روی یک جسم زیرسطحی و دینامیک حرکت آن بصورت عددی و آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌های سوپرکاویتاسیون زمانمند با پرتاب یک جسم به درون حوضچه آزمایش انجام شد و توسط یک دوربین پرسرعت از نحوه تشکیل، توسعه و تخریب سوپرکاویتاسیون و مسیر حرکت جسم عکسبرداری گردید. این فرآیند با استفاده از معادلات میانگین زمانی ناویر استوکس زمانمند و مدل شش درجه آزادی حرکت جسم صلب بصورت عددی نیز، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج عددی به وضوح نحوه تشکیل، توسعه و تخریب سوپرکاویتاسیون را روی جسم نشان داده، مشاهدات تجربی نیز صحت نتایج عددی حاصل را تأیید کردند.

در نهایت با بررسی‌های به عمل آمده مشخص شد که الگوریتم عددی حاضر در تخمین شکل سوپرکاویتاسیون در اعداد کاویتاسیون کم و یا به عبارت دیگر در سرعت‌های زیاد از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده است. از اینرو با استفاده از این الگوریتم به بررسی تشکیل، توسعه و تخریب سوپرکاویتاسیون حول یک پرتابه پرسرعت با سرعت اولیه ۲۰۰ متر بر ثانیه پرداخته شده است.

با بررسی انجام شده مشخص گردید که سوپرکاویتاسیون، در زمانی کمتر از ۲ میلی‌ثانیه پرتابه دوم را احاطه کرده، از این زمان به بعد نیروی پسای وارد به پرتابه حدود ۶۶٪ کاهش می‌یابد. با پیشروی پرتابه و کاهش سرعت، ابعاد سوپرکاویتاسیون کوچک شده، در نهایت انتهای پرتابه با سطح آب تماس پیدا می‌کند. در این حالت سرعت پرتابه حدود ۱۱٪ کاهش یافته، به مقدار ۱۷۲ متر بر ثانیه می‌رسد. مشاهده گردید از این زمان به بعد نیروی پسا بطور فزاینده افزایش یافته، پرتابه را دچار توقف می‌کند.

قابل جمع‌بندی است که شبیه‌سازی عددی انجام شده، قابلیت بررسی میدان جریان پرتابه‌های پرسرعت را تا زمانی که اثر تراکم‌پذیری سیال عامل مهمی نباشد، دارا بوده، می‌تواند با دقت مناسبی مورد استفاده قرار گیرد.

۶- فهرست علائم

F_c ثابت تجربی

F_v	ثابت تجربی
g	شتاب جاذبه
\dot{m}_c	نرخ جرمی میعان
\dot{m}_v	نرخ جرمی تولید بخار
p	فشار محلی
p_k	فشار جریان آزاد
p_v	فشار بخار
R_{nuc}	شعاع اولیه هسته‌های گازی
t	زمان
u_j	سرعت
V	سرعت جریان
x_j	محور مختصات

علائم یونانی

Γ_n	نرخ انتقال جرم در سطح میانی
μ_m	لزجت مخلوط
μ_t	لزجت اغتشاش
ρ	چگالی
ρ_l	چگالی مایع
ρ_v	چگالی بخار
ρ_m	چگالی مخلوط
σ	عدد کاویتاسیون
ξ	عدد پرانتل اغتشاش در مدل $k - \omega$
α_w	کسر حجمی آب
α_{nuc}	کسر حجمی گاز غیرقابل میعان
α_v	کسر حجمی بخار
α_1	کسر حجمی آب و گاز غیرقابل میعان ادغام شده
γ	ضریب پخش موثر در مدل $k - \omega$

۷- مراجع

- [1] Savchenko YN, Vlasenko YD, Semenenko VN (1999) Experimental study of high-speed cavitated flows. Inter J Fluid Mech Res 26(3): 365-374.
- [2] Lindau JW, Kunz RF, Mulherin JM, Dreyer JJ, Stinebring DR (2003) Fully coupled 6-DOF to URANS modeling of cavitating flows around a supercavitating vehicle. Proc. of the Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003). Osaka, Japan.
- [3] Wang HB, Zhang JZ, Wei YJ (2005) Study on relations between cavity form and typical cavitator parameters. J Hydrodynamics, Ser A 20(2): 251-257.

- supercavitation flows. IJST Trans Mech Eng 35(M1): 31-46.
- [11] Rabiee A, Alishahi MM, Emdad H, Saranjam B (2011) Experimental investigation of bounce phenomenon. Sci Iranica 18(3): 416-422.
- [12] Ying WJ, Hou J, Wei P, (2012) Numerical simulation of supercavity shape design of high-speed projectile. Adv Mat Res 466-467: 1041-1044.
- [13] Saranjam B (2013) Experimental and numerical investigation of an unsteady supercavitating moving body. Int J Ocean Eng 59: 9-14.
- [14] Ishchenko AN, et Al. (2014) Theoretical and experimental analysis of the high-velocity interaction of solid bodies in water. J Eng Phys Thermophys 87(2):399-408.
- [15] Truscott TT (2009) Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles. PHD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- [16] Menter FR (1994), Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA-J 32(8): 1598-1605.
- [4] Ping JL, Wang C, Wei YJ (2006) Numerical simulation of artificial ventilated cavity. J Hydrodynamics Ser B 18(3): 273-279.
- [5] Zhang WW, Wei YJ, Zhang JZ, Wang C, Yu KP (2007) Experimental research on the shape characters of natural and ventilated supercavitation. J Hydrodynamics Ser B 19(5): 564-571.
- [6] Nouri NM, Eslamdoost A (2009) An iterative scheme for two-dimensional supercavitating flow. Int J Ocean Eng 36: 708-715.
- [7] Wang Z, Yu KP, Wan XH (2010) Research on the gas-leakage rate of unsteady ventilated supercavity. J Hydrodynamics Ser B 22(5): 778-783.
- [8] Bin J, Lue XW, Peng XX, Zhang Y, Wu YL, Xu HY (2010) Numerical investigation of the ventilated cavitating flow around an under-water vehicle based on a three-component cavitation model. J Hydrodynamics Ser B 22(6): 753-759.
- [9] Rabiee A, Alishahi MM, Emdad H, Saranjam B (2011) Experimental investigation of unsteady supercavitation flows. IJST Trans Mech Eng 35(M1): 15-29.
- [10] Rabiee A, Alishahi MM, Emdad H, Saranjam B (2011) Numerical investigation of unsteady