

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.7.3

درصد همانندی: ۴٪

مدل‌سازی عددی ورود به آب مایل یک پرتابه پرسرعت استوانه‌ای و بررسی اثر حرکت چرخش محوری بر رفتار دینامیکی آن

محمد امین اکبری^۱، جلال محمدی^{۲*}، جلیل فریدونی^۳

moak89@gmail.com

mohammadijalal@mut.ac.ir

j.fereidooni@gmail.com

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی دریا، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^{۲*} نویسنده مسئول، استادیار، مجتمع هوا فضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ استادیار، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶

چکیده

اصلی‌ترین کاربرد تحقیقات موضوع ورود به آب اجسام پرسرعت، در توسعه محصولات نظامی است. این پژوهش در ابتدا مدل عددی ورود به آب مایل پرسرعت، یک پرتابه سوپر کاویتاسیونی را ارائه کرده است. به لطف توسعه فناوری سخت‌افزاری موجود، این مدل عددی می‌تواند تصویری مطلوب از دینامیک شش درجه آزادی پرتابه در حضور سه فاز هوا، آب و بخار آب، در قالب یک میدان حل سه‌بعدی و ناپایا ارائه نماید. در این پژوهش، ابعاد حباب سوپرکاویتاسیون با استفاده از روش اشتر سائر و جریانات چند فازی حاکم در میدان حل با استفاده از روش کسر حجمی سیال مدل‌سازی شده است. نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات، راستی آزمایی شده است و نتایج در تطابق مطلوب قرار دارد. در ادامه، ورود به آب مایل یک پرتابه در دو وضعیت دارای چرخش محوری و بدون وجود چرخش محوری، شبیه‌سازی شده و نتایج با هم مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، در فرایند ورود به آب مایل، وجود حرکت چرخش محوری، تأثیر بسزایی بر رفتار دینامیکی و سینماتیکی پرتابه استوانه‌ای نخواهد داشت؛ بنابراین نتایج این پژوهش نشان داد، در فرایند ورود به آب مایل پرتابه‌های چرخش پایدار سوپرکاویتاسیونی، با تقریب دقیقی فرض حرکت صفحه‌ای پرتابه برقرار است. لازم به یادآوری است، اثبات این فرضیه سبب می‌شود ساده‌سازی‌های قابل توجهی در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی مسائل آتی روی دهد.

واژه‌های کلیدی: ورود به آب مایل، پرتابه سوپرکاویتاسیونی، چرخش محوری

۱. مقدمه

ورود به آب^۱، به مفهوم ورود یک سازه صلب به درون آب، از طریق سطح آزاد است [۱]. سیستم مین‌روبی هوایی سریع^۲ مثالی از سیستم‌های طراحی شده بر اساس ورود به آب مایل پرتابه‌های پرسرعت چند محیطه^۳، از محیط هوا به زیرسطح است [۲]. اساساً ورود به آب پدیده‌ای غیرخطی است که می‌تواند با فعل و انفعالات چند فازی^۴ همراه شود [۳].

پس از ورود به آب و با حرکت جسم در درون فاز مایع و سرعت گرفتن ذرات آب، فشار سیال به صورت محلی کاهش می‌یابد. هنگامی که فشار محلی کمتر از فشار بخار مایع شود، بخار آب در درون سیال پدیدار می‌شود. در این وضعیت کاویتاسیون رخ می‌دهد [۴]. سوپر کاویتاسیون، حالتی است که در آن پرتابه^۵ زیرسطحی به صورت کامل (به جز کویتاتور) در درون حباب سوپر کاویتاسیون قرار دارد [۵]. در هنگام رخداد سوپر کاویتاسیون، تنها بخش کوچکی از پرتابه در تماس با آب قرار می‌گیرد که این موضوع سبب می‌شود، نیروی پسای وارده بر پرتابه به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد و دستیابی به سرعت‌های بالا و عمق زیاد، امکان‌پذیر شود [۶].

یکی از چالش‌های اساسی در طراحی پرتابه‌های چند محیطه، حفظ پایداری حرکت پرتابه در محیط‌های مختلف است. از میان طراحی‌های موجود، پرتابه‌های بالک پایداری^۶ سوپر کاویتاسیونی به خوبی می‌تواند شرایط پایداری حرکت در هوا و درون کویتی را لحاظ نماید. این نوع پرتابه در سیستم مین‌روبی هوایی سریع به کار رفته است [۲]. باید در نظر آورد، اساساً این نوع پرتابه‌ها با توجه به ساختار طراحی، بسیار گران‌قیمت بوده و به کارگیری آن نیازمند طراحی پرتابگر متناسب خواهد بود. شکل ۱، نمایی از یک پرتابه سوپر کاویتاسیونی بالک پایداری را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۱. نمایی از یک پرتابه سوپر کاویتاسیونی بالک پایداری [۷]

قیود مختلف حاکم در طراحی، تولید و کاربری پرتابه‌های بالک پایداری و موضوعات اقتصادی سبب گشته، طراحی و

ساخت پرتابه‌های چرخش پایداری سوپر کاویتاسیونی، حائز مزیت شوند. این نوع پرتابه‌ها در مقایسه با پرتابه‌های بالک پایداری، ساختار به نسبت ساده دارند و مکانیزم شلیک آن می‌تواند مبتنی بر پرتابگرهای متداول باشد؛ بنابراین پرتابه‌های سوپر کاویتاسیونی چرخش پایداری جایگزینی اقتصادی برای پرتابه‌های بالک پایداری به شمار می‌روند. اخیراً شرکت دی اس جی^۶ در وب‌گاه خود، اطلاعات مربوط به چند پرتابه چرخش پایداری سوپر کاویتاسیونی را ارائه نموده است [۸]. در هر حال طرح‌های ارائه شده، بدون هیچ توصیفی از جزئیات طراحی است؛ بنابراین اطلاعات کافی در این خصوص در دسترس نیست. در شکل ۲، نمایی از یک پرتابه سوپر کاویتاسیونی چرخش پایداری شرکت دی اس جی ارائه شده است.



شکل ۲. نمایی از یک پرتابه چرخش پایداری شرکت دی اس جی [۸]

از منظر طراحی، حفظ پایداری حرکتی پرتابه‌های چرخش پایداری در درون کویتی با چالش اساسی مواجه است. پایداری حرکت چنین پرتابه‌هایی به کمک مکانیزم برخورد دمی^۷ امکان‌پذیر می‌شود. رویداد مؤثر برخورد دمی و حفظ پایداری در درون کویتی خود از متأثر پارامترهای طراحی و عملیاتی گوناگون است [۹]. بنابراین در طراحی پرتابه‌های چرخش پایداری سوپر کاویتاسیونی بررسی شیوه ارتباط پارامترهای مختلف نقش کلیدی خواهد داشت.

با توجه به آنکه پایداری حرکت پرتابه‌های چرخش پایداری در هوا، در حضور حرکت چرخشی محوری (اسپین)، امکان‌پذیر می‌شود، بنابراین پرتابه‌های چرخش پایداری چند محیطه سوپر کاویتاسیونی در فرایند ورود به آب و حرکت زیرسطح، با حرکت چرخش محوری مواجه خواهند بود [۸]. بنابراین از منظر طراحی، این سؤال مطرح است که حرکت چرخش محوری پرتابه چه تأثیری بر دینامیک فرایند ورود به آب و حرکت پرتابه در درون کویتی خواهد داشت؟ پاسخ به این پرسش می‌تواند از دو منظر حائز اهمیت باشد. در وهله نخست بررسی تأثیر چرخش محوری، نقش مهمی در چرخه

انجام شده است؛ بنابراین در آن اثرات ورود به آب پرسرعت و وجود چرخش محوری لحاظ نشده است. تروسکات و همکاران، در یک مطالعه آزمایشگاهی ورود به آب مایل تعدادی پرتابه، با وجه منظری و شکل کویتاتور مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. این پژوهش در راستای تعیین وضعیت پایداری دینامیکی پرتابه در زوایای ورود مختلف انجام شده است، به نحوی که در نهایت با استفاده از روش آزمایشگاهی، توانسته است حدود زوایای حرکت پایدار در درون کویتی را تعیین نماید. در این پژوهش مکانیزم پرتابگر، مبتنی بر تولید اسپین بوده است، اما در حال پژوهش پیش گفته، به بررسی اثرات اختصاصی وجود چرخش محوری پرداخته است و این موضوع خارج از زاویه دید آن بوده است. ربیعی و همکاران به صورت آزمایشگاهی رفتار نوسانی یک پرتابه استوانه‌ای بدون چرخش محوری با شکل‌های کویتاتور گوناگون را در زوایای ورود مختلف، مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. چن و همکاران به صورت آزمایشگاهی اثر شکل کویتاتور و زاویه ورود پرتابه باریک را بر مسیر حرکت پرتابه مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش نیز ورود به آب بدون چرخش محوری و با استفاده از شلیک با تیوب تحت فشار انجام شده است [۱۸].

بخش عمده‌ای از مطالعات عددی پیشین، مرتبط با مدلسازی ورود به آب عمودی و گذرا است [۱۹، ۲۰]. به لطف توسعه سخت‌افزارهای رایانه‌ای، اخیراً مدلسازی ورود به آب با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی امکان‌پذیر شده است. ایران منش و پسندیده فرد ره‌ایش ثقلی و بدون چرخش محوری یک استوانه در میدان حل سه‌بعدی را مدلسازی کردند [۱۹]. کی و همکاران، ورود به آب یک زیردریایی خودکار پرتاب شده از هواپیما را با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، مدلسازی کردند [۲۱]. آن‌ها نشان دادند زاویه ورود به آب، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی برخورد پرتابه با سطح آزاد خواهد داشت.

هو و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی، دینامیک کویتی و شیوه توسعه جریان چرخشی در ورود به آب مایل را مورد بررسی قرار دادند [۳]. در حال پژوهش

طراحی خواهد داشت. در مرحله بعد تأثیر گذاری یا عدم تأثیر گذاری چرخش محوری بر دینامیک پرتابه می‌تواند به کاهش یا افزایش قیود حاکم در مدلسازی موضوعات عددی آتی مانند تعیین درجات آزادی مدلسازی، کاهش یا افزایش امکانات مورد نیاز در مطالعات آزمایشگاهی پرتابه برای تصویربرداری از حرکت پرتابه از سه جهت یا دو جهت، منجر خواهد شد.

در پی پاسخ به پرسش پیش گفته و با بررسی پژوهش‌های پیشین مشخص می‌شود، اطلاعات انتشار یافته در زمینه ورود به آب سرعت بالای مایل، بسیار اندک است و بخش اعظم مطالعات انجام شده جنبه آزمایشگاهی داشته است [۱]. اساساً مطالعه آزمایشگاهی پرتابه‌های پرسرعت سوپرکاویتاسیون در ورود به آب، با استفاده از روش تصویرنگاری امکان‌پذیر می‌شود. برای اجرای آزمایش‌های ورود به آب، تجهیزات تصویربرداری پرسرعت، مورد نیاز است [۱]. بخش عمده‌ای از پژوهش‌های آزمایشگاهی قبلی، ورود به آب عمودی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰-۱۲]. ورود به آب افقی نیز در برخی پژوهش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳]. در حال پژوهش‌های اندکی به صورت آزمایشگاهی ورود به آب مایل پرسرعت را مورد بررسی قرار داده‌اند. ژائو و همکاران به صورت آزمایشگاهی، ورود به آب مایل پرتابه‌های سوپرکاویتاسیونی، با شکل کویتاتور مختلف را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. پژوهش پیش گفته، به صورت خاص رویداد پدیده‌های مرتبط با تشکیل کویتی و تغییرات سرعت پرتابه پس از ورود به آب را کاویده است. در این پژوهش شلیک پرتابه با استفاده از گاز تحت فشار انجام شده و ورود به آب پرتابه بدون وجود چرخش محوری است؛ بنابراین، بررسی اثر پیش گفته خارج از زاویه دید این پژوهش بوده است. وی و همکاران به صورت آزمایشگاهی ورود به آب مایل استوانه فلزی در عدد فرود پایین را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در پژوهش پیش گفته، تأثیر زاویه ورود بر نیروی پسای وارده بر پرتابه و مسیر حرکت پرتابه در درون آب، مورد بررسی قرار گرفته است. در حال در این آزمایش ورود به آب با ره‌ایش ثقلی پرتابه و بدون چرخش محوری

هوا، به صورت مایل وارد آب می‌شود. یوان و همکاران نشان دادند که در فرایند ورود به آب مایل، کویتی تشکیل شده، از نوع باز خواهد بود [۲۳]. در چنین شرایطی هوا به عنوان یک فاز مستقل امکان اضافه شدن به دو فاز بخار و آب (ایجاد شده در جریان تشکیل سوپرکاویتاسیون) را خواهد یافت. بنابراین در چنین شرایطی انتظار می‌رود مقادیر معتدلی هوا به درون کویتی کشیده شود. بر این اساس مدل‌سازی ورود به آب مایل با سه فاز هوا، آب و بخار آب، منطبق بر فیزیک حاکم خواهد بود.

معادله‌های حاکم بر مسئله شامل معادله ناویر استوکس، کسر حجم سیال و معادله‌های جریان مغشوش است که به صورت معادله ۱ قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla V + \nabla V^T)] + \rho g + B_F \quad (1)$$

در جریانات چند فازی بررسی تغییرات سطح تعاملی بین فازی، با حل معادله پیوستگی برای فاز ثانویه امکان‌پذیر است. بر این اساس برای q امین فاز، معادله‌ها به صورت معادله ۲ قابل بیان است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_q \alpha_q) + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q V_q) = \sum_{k=1}^n (\dot{m}_{kq} - \dot{m}_{qk}) \quad (2)$$

که در معادله‌های بالا، ρ چگالی سیال، α کسر حجمی سیال، \dot{m}_{qk} انتقال جرم از فاز q به فاز k و V بردار سرعت سیال است. معادله‌های بالا در روش URANS^{۱۳}، با استفاده از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای SST-k- ω بسته خواهد شد و قابلیت حل خواهد یافت.

با نگاهی به مطالعات قبلی موجود در ادبیات مشخص می‌شود، در جریانات کاویتاسیونی روش کسر حجمی سیال (VOF)، با دقت مطلوبی می‌تواند فیزیک و ابعاد کویتی را مدل‌سازی نماید [۲۴]. این مدل به توصیف کسر حجمی هریک از فازهای حاضر در میدان جریان می‌پردازد و فرض می‌کند سیالات مخلوط نشدنی حاضر در میدان حل، میدان‌های سرعت و فشار را به اشتراک می‌گذارند. پسندیده

پیش گفته به بررسی ورود به آب یک پرتابه به صورت ثقلی و در عدد فرود کم و بدون وجود چرخش محوری پرداخته است. در پژوهش پیش گفته، مدل‌سازی عددی با استفاده از کد تجاری استار سی سی ام پلاس^۸، انجام شده است.

اخیراً چن و همکاران با دو روش آزمایشگاهی و عددی، برخی از پارامترهای ورود به آب مانند زاویه و سرعت ورود به آب پرتابه را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۲]. لازم به یادآوری است در پژوهش پیش گفته، مدل‌سازی ورود به آب با استفاده از کد تجاری فلوئنت^۹ و شلیک با استفاده از لوله تحت فشار و بدون چرخش محوری انجام شده، لذا بررسی اثر پیش گفته خارج از زاویه دید این پژوهش بوده است.

بر اساس آخرین اطلاعات نویسندگان در هیچ یک از پژوهش‌های انتشار یافته آزمایشگاهی و عددی پیشین، بررسی تأثیر چرخش محوری در فرایند ورود به آب مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر این اساس، این پژوهش در ابتدا با استفاده از مدل‌سازی عددی مسئله، به توسعه ابزاری برای بررسی دقیق‌تر فیزیک حاکم در ورود به آب مایل پرسرعت پرتابه سوپرکاویتاسیونی، پرداخته است. مدل عددی بر پایه روش رنژ^{۱۰} و در بستر کد تجاری استار سی سی ام پلاس، توسعه یافته است و تصویری از دینامیک شش درجه آزادی پرتابه ارائه می‌نماید. در مدل عددی، فعل و انفعالات محیط چند فازی، با استفاده از مدل کسر حجمی سیال^{۱۱} و بر اساس دیدگاه اویلری و حرکت پرتابه نیز با استفاده از میدان محاسباتی دینامیک و شبکه‌بندی هم‌پوشان^{۱۲} مدل‌سازی شده است. در این پژوهش صحت سنجی نتایج با استفاده از نتایج پرتابه استوانه‌ای شماره ۲۲، در آزمایش‌های ورود به آب مایل پرسرعت تروسکات انجام شده است [۱۶]. در انتها ورود به آب پرتابه پیش گفته در دو وضعیت دارای چرخش محوری و بدون وجود آن، شبیه‌سازی شده و نتایج با هم مقایسه شده است.

۲. مدل‌سازی عددی

۲-۱. معادلات حاکم

با توجه به فیزیک مسئله، پرتابه پس از طی مسیر کوتاهی در

اختلاف فشار درون کویتی و محیط سیال به اندازه کافی زیاد خواهد بود. در این شرایط نرخ رشد حباب با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\dot{R} = \sqrt{\frac{2p(R) - p_\infty}{3\rho_l}} \quad (7)$$

لازم به ذکر است مدل اشتر و سائر یکی از مدل‌های پیش‌فرض در کدهای تجاری موجود است که به خوبی می‌تواند فیزیک جریانات سوپرکاویتاسیونی را مدل‌سازی نماید. بر این اساس اخیراً معدود مدل‌سازی‌های انجام شده از این مدل بهره برده‌اند [۳، ۲۲].

با استفاده از قانون دوم نیوتن، ارتباط بین دینامیک پرتابه و نیروهای وارده بر آن قابل انطباق خواهد بود. بر این اساس معادله‌های حرکت پرتابه به صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

$$\frac{d\mathbf{V}}{dX} = \frac{\sum \mathbf{F}}{m_p} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\sum \mathbf{M}}{I} \quad (9)$$

$$\dot{X} = V_x, \quad \dot{Y} = V_y, \quad \dot{Z} = V_z \quad (10)$$

$$\dot{\gamma} = \omega_z, \quad \dot{\varphi} = \omega_y, \quad \dot{\psi} = \omega_x \quad (11)$$

که در معادله‌های بالا $[X, Y, Z]$ و $V=[V_x, V_y, V_z]$ به ترتیب موقعیت مرکز ثقل پرتابه و بردار سرعت پرتابه است. FM به ترتیب بردار گشتاور و نیروی وارده بر پرتابه و m و I بیانگر جرم و ممان اینرسی پرتابه است. در معادله بالا $[\gamma, \varphi, \psi]$ زوایای پرتابه نسبت به محور مختصات است.

۲-۲. برخی جزئیات شبیه‌سازی عددی

هو و همکاران نشان دادند، به منظور افزایش دقت نتایج عددی مدل‌سازی ورود به آب، بهتر آن است که عدد کورانت جریان در محدوده یک باشد [۳]. این محدوده عدد کورانت، در حضور شبکه محاسباتی حاضر و سرعت پرتابه، به گام زمانی 2×10^{-7} در حل منجر شد.

بر اساس نتایج جانسن، مدل عددی جریان تقسیم شده^{۱۴} تنها بر پایه مدل گذرای ضمنی^{۱۵} قابل حل است [۲۸]. بر این اساس در مدل حاضر از مدل ضمنی گذاری با گسسته سازی با دقت مرتبه اول استفاده شده است. در مدل حاضر در کنار

فرد و روحی نشان دادند روش VOF، دقیق‌ترین روش در مدل‌سازی کویتاسیون طبیعی است [۲۵]. بنابراین به منظور تعقیب سطح مشترک بین فازی از روش VOF استفاده شده است [۲۶]. در این روش لزجت دینامیکی و چگالی سیال با استفاده از معادله‌های زیر بیان می‌شود.

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v + \mu_a \alpha_a \quad (3)$$

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v + \rho_a \alpha_a \quad (4)$$

$$\alpha_l + \alpha_v + \alpha_a = 1 \quad (5)$$

در معادله‌های بالا ρ_l ، ρ_v و ρ_a به ترتیب چگالی فاز مایع، بخار و هواست و α_l ، α_v و α_a نیز، بیانگر کسر حجمی فازهای مایع، بخار و هواست.

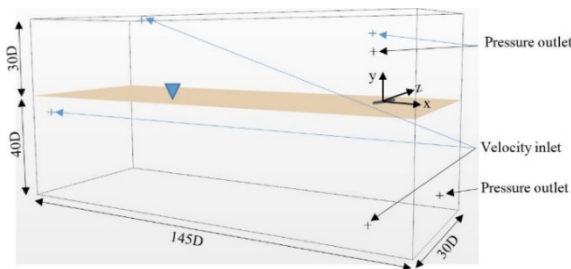
در مدل‌سازی حاضر کویتاسیون با استفاده از مدل اشتر و سائر مدل‌سازی شده است [۲۷]. مدل پیش‌گفته، یکی از مدل‌های محبوب در مدل‌سازی ابعاد کویتی به شمار می‌رود. محبوبیت این روش مدل‌سازی بیشتر به سبب توانایی به کارگیری مستقیم آن در مدل‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی است. در این روش کویتاسیون بر اساس فرایند رشد و متلاشی شدن حباب‌های درون سیال مدل‌سازی می‌شود. در این روش فرض می‌شود، حباب‌ها، از هسته‌های کاویتاسیونی که قبلاً درون سیال حضور داشته‌اند؛ حاصل می‌شود که رشد و متلاشی شدن آن‌ها بر اساس شرایط محیطی درون سیال همانند فشار و دما کنترل می‌شود. در این روش همچنین فرض شده است که می‌توان از لغزش بین حباب و سیال صرف‌نظر کرد. مدل اشتر و سائر در حقیقت با استفاده هم‌زمان از معادله‌های ریلی-پلست و معادله انرژی رشد حباب را با استفاده از مدل زیر پیش‌بینی می‌کند:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p(R) - p_\infty}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l R} - 4 \frac{\mu}{\rho_l R} \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

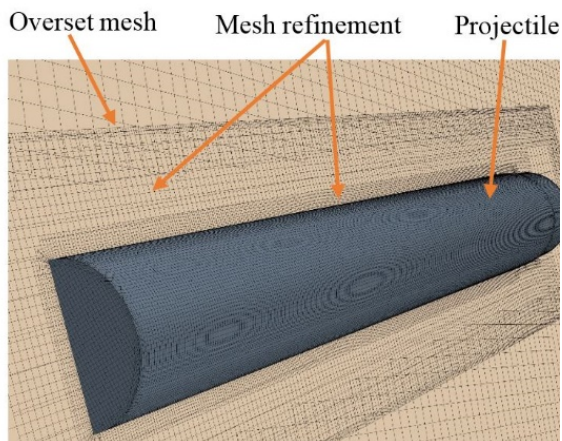
در معادله‌های بالا R شعاع کویتی، $p(R)$ فشار سیال در مرز کویتی که برابر با فشار بخار سیال، p_∞ فشار در ناحیه دور دست از کویتی، σ عدد کاویتاسیون و μ لزجت سینماتیک سیال است.

اگر فشار درون کویتی به اندازه کافی کم باشد، بنابراین

مثلث معکوس و شرایط مرزی در نمای قابل رؤیت، با بردارهای سیاه و شرایط مرزی در نماهای دیگر با بردارهای آبی به نمایش گذاشته شده است. در شکل ۴ نحوه شبکه بندی میدان حل، به همراه اصلاحات صورت گرفته در راستای افزایش دقت مدل سازی، به تصویر در آمده است. لازم به ذکر است ابعاد میدان حل محاسباتی، بر اساس پیشنهاد های ارائه شده در منابع به نحوی انتخاب شده است که اثرات حضور مرز تأثیری در نتایج نداشته باشد [۲۹].



شکل ۳. میدان حل و شرایط مرزی و تعریف محورهای مختصات (D قطر کویلتور است)



شکل ۴. شبکه محاسباتی، شبکه هم پوشان و جزئیاتی در خصوص اصلاحات صورت گرفته در میدان حل در نمای صفحه ای

۲-۴. استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

استقلال نتایج از شبکه محاسباتی با استفاده از ۳ شبکه محاسباتی با تعداد به ترتیب، ۱/۵، ۲/۱ و ۲/۷۵ میلیون سلول محاسباتی، مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار سرعت افقی، ممان وارده بر پرتابه در فرایند ورود به آب و سرعت زاویه ای پیچشی ایجاد شده در پرتابه طبق شکل ۵ تا ۷ است. با توجه به نتایج می توان گفت، با افزایش تعداد سلول های محاسباتی از ۲/۱ میلیون گره به سوی مقادیر بیشتر، حجم

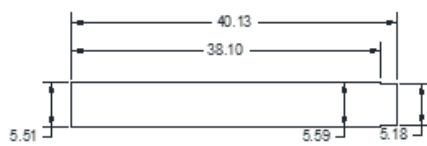
مدل عددی جریان تقسیم شده از الگوریتم سیمپل نیز به منظور حل استفاده شده است. قابلیت تعریف مکانیزم انتقال فاز در کد تجاری استار سی سی ام پلاس، به صورت پیش فرض وجود دارد. بر این اساس سوپر کاویتاسیون به عنوان عامل انتقال فاز بین مایع و سیال تعریف شد. شکل کوییتی حاصل شده در جریان سوپر کاویتاسیون با استفاده از مدل اشتر-سائر مدل سازی شده است. لازم به ذکر است، مدل حاضر با استفاده از یک ابررایانه، با قدرت پردازشی ۶۱/۴ گیگا فلاپس و حجم حافظه موقت ۱۲۸ گیگابایت و در مدت زمان ۷۲ ساعت حل شد.

۲-۳. شرایط مرزی و تولید شبکه

مدل سازی حاضر با استفاده از بستر کد تجاری استار سی سی ام پلاس انجام شده است. شرایط مرزی حاکم بر مسئله در شکل ۳ نشان داده شده اند. در کد پیش گفته مدل سازی سطح آزاد، با استفاده از روش موج تخت^{۱۶}، انجام شده است. مقدار سرعت در شرط های مرزی ورودی سرعت برابر صفر و فشار در شرط مرزی فشار خروجی، برابر با فشار هیدرواستاتیک و تابع عمق جریان سیال است. حرکت شش درجه آزادی پرتابه با استفاده از محیط شبکه هم پوشان، مدل شده است. در مدل سازی دینامیکی و با توجه به ماهیت گذرای حل، نوع شبکه مورد استفاده نقش بسزایی در همگرایی، دقت و سرعت حل ایفا می کند. بر اساس نتایج جانسن [۲۸]، در جریانات چند فازی و در حضور سطح آزاد، استفاده از شبکه محاسباتی مبتنی بر تولیدگر شبکه^{۱۷}، به سبب توانایی توصیف هموار سطح آزاد، می تواند بهترین نتایج ممکن را حاصل نماید. بر این اساس در مدل سازی حاضر، تولیدگر شبکه^{۱۸} پیش گفته با مدل های اصلاح گر باز تولید شبکه^{۱۹} استفاده شده است. به منظور افزایش دقت حل، شبکه محاسباتی در سه ناحیه: ۱- مسیر حرکت پرتابه و در ناحیه تولید کوییتی ۲- محل ورود به آب در سطح آزاد ۳- و ناحیه شبکه هم پوشان، با استفاده از قیود حجمی و سطحی اصلاح و ریز شده اند. شکل ۳ میدان حل و شرایط مرزی و تعریف محورهای مختصات را به نمایش می گذارد. لازم به ذکر است در این شکل سطح آزاد سیال با

۲-۵. صحت‌سنجی مدل عددی

صحت‌سنجی نتایج با استفاده از اطلاعات آزمایش پرتابه شماره ۲۲ تروسکات انجام شده است [۱۶]. اکبری و همکاران، با استفاده از روش تصویرنگاری به تجزیه و تحلیل اطلاعات این آزمایش پرداختند و اطلاعات دینامیکی آن را استخراج نموده‌اند [۳۰]. در آزمایش پیش‌گفته، پرتابه بعد از خروج از پرتابگر و پیمایش مسیری کوتاه در هوا، با زاویه‌ای اندک نسبت به سطح آزاد سیال (آب)، بدان ورود می‌یابد. ابعاد هندسی پرتابه مورد استفاده در آزمایش و شبیه‌سازی حاضر مطابق با شکل ۸ است.



شکل ۸ ابعاد پرتابه شماره ۲۲ مورد استفاده در آزمایش‌های تروسکات [۱۶]، ابعاد برحسب میلی‌متر است.

مقادیر پارامترهای مختلف شبیه‌سازی به شرح جدول است:

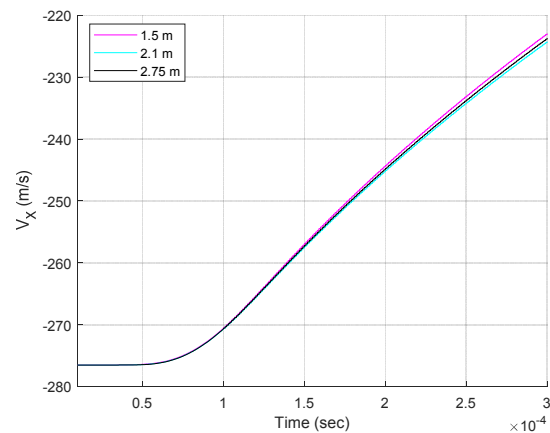
جدول ۱. پارامترهای مختلف مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

| پارامتر | تعریف | اندازه | واحد |
|----------|--------------------------------|---------|-------------------|
| V_{0x} | سرعت افقی اولیه | -۲۷۳ | m/s |
| V_{0y} | سرعت قائم اولیه | -۵۸ | m/s |
| γ | زاویه اولیه پرتابه نسبت به افق | ۹ | deg |
| spin | چرخش محوری اولیه | -۳۵۹۰ | rad/s |
| g | شتاب گرانش | ۹/۸۱ | m ² /s |
| m | جرم | ۰/۰۰۲۵۸ | kg |
| I_y | ممان اینرسی | ۳/۵ e-۷ | kg.m ² |

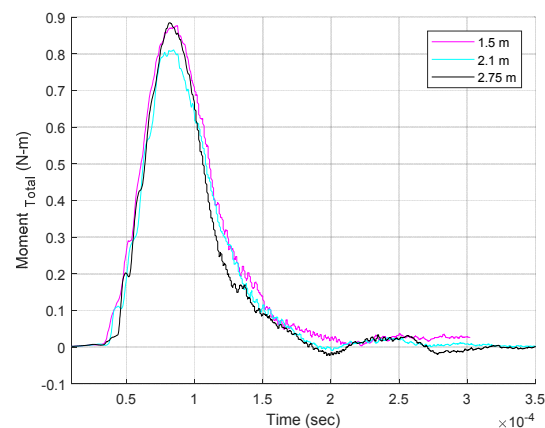
لازم به توضیح است از منظر طراحی، سرعت زاویه‌ای چرخشی پرتابه متأثر از پارامترهایی مانند کالیبر، سرعت دهانه پرتابگر و گام خان است که با مراجعه به مقررات از پیش تعیین شده استاندارد مقدار آن قابل تعیین است. بر این اساس سرعت چرخش محوری برای پرتابه مورد بررسی در این پژوهش ۳۵۹۰ رادیان بر ثانیه تعیین شده است [۳۱].

برخورد پرشده با سطح آزاد، طبیعتاً زمینه‌ساز بروز فعل و انفعالات پر شدت خواهد بود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد،

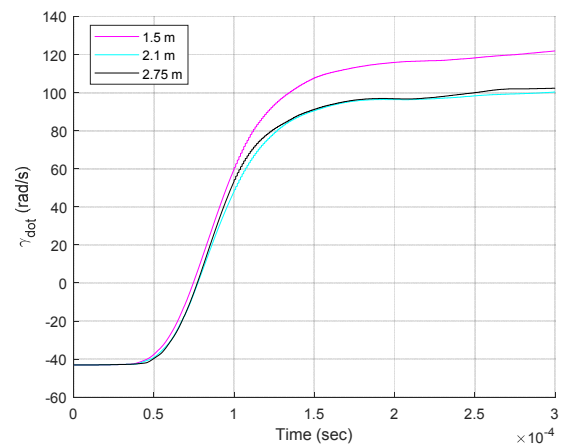
تغییرات رو به کاهش می‌گذارد. در نتیجه با توجه به دقت و هزینه محاسباتی، شبکه محاسباتی با تعداد ۲/۱ میلیون سلول به‌عنوان شبکه نهایی انتخاب شد.



شکل ۵. بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی با استفاده از سرعت افقی پرتابه



شکل ۶. بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی با استفاده از گشتاور وارده بر پرتابه در فرایند ورود به آب

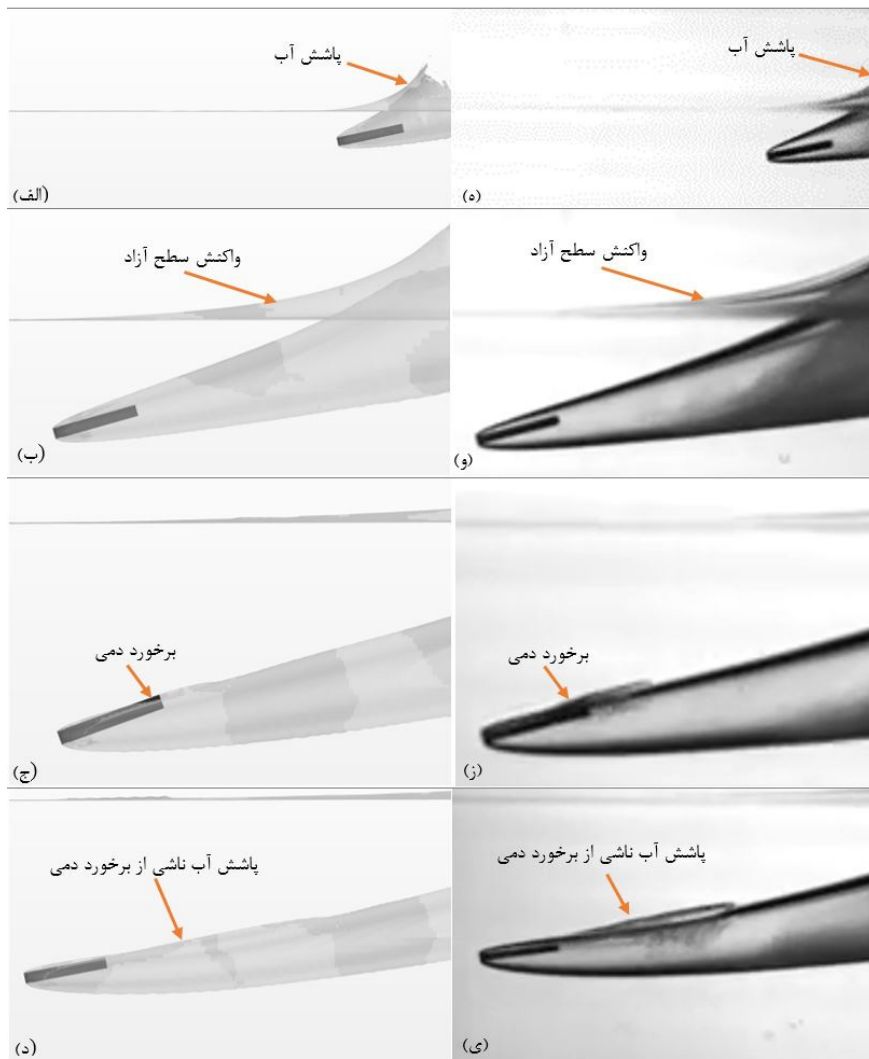


شکل ۷. بررسی استقلال نتایج عددی از شبکه محاسباتی با استفاده از سرعت زاویه‌ای پیچشی پرتابه

می تواند رویدادهای فیزیکی فرایند ورود به آب پرسرعت مایل را مدل نماید.

در شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به ترتیب، نتایج عددی سرعت پرتابه در راستای افقی، سرعت زاویه‌ای پیچشی و نیروی محوری وارد بر پرتابه، با نتایج استخراج شده از پژوهش آزمایشگاهی تروسکات [۳۰] مقایسه شده است. با دقت در نتایج، انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت مدل عددی ارائه شده در این پژوهش با دقت مناسبی می تواند دینامیک ورود به آب مایل پرتابه استوانه‌ای را شبیه‌سازی نماید.

سرعت زیاد و هندسه‌های تیز، فرایند ورود به آب را مستعد بروز پاشش آب و تشکیل کویتی خواهد نمود. در شکل ۹ شبیه‌سازی چهار رویداد فیزیکی فرایند ورود به آب پرسرعت، با نتایج تصاویر آزمایش‌های پرتابه شماره ۲۲ تروسکات مقایسه شده است [۱۶]. این چهار رویداد عبارت‌اند از ۱- حجم پاشش آب ناشی از ورود نامتقارن پرتابه به درون آب، ۲- اثرگذاری حرکت زیر سطح پرتابه در درون کویتی بر سطح آزاد، ۳- بروز برخورد دمی و رفتار ارتجاعی و بازگشت انتهای پرتابه به درون کویتی و ۴- پاشش آب ناشی از برخورد دمی است. با توجه به تصاویر شکل ۹ می توان گفت، انطباق قابل قبولی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی در مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی ورود به آب پرسرعت، برقرار است؛ بنابراین مدل عددی به خوبی



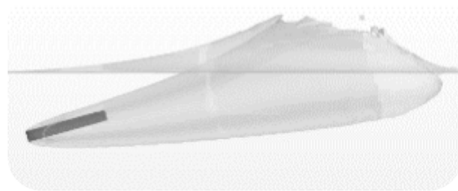
شکل ۹. تشکیل کویتی و پدیده‌های فیزیکی ناشی از ورود به آب پرسرعت (الف-د):

نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر و (ه-ی) نتایج آزمایشگاهی [۱۶]

۳. بررسی تأثیر چرخش محوری (اسپین) پرتابه بر دینامیک ورود به آب مایل پرتابه استوانه‌ای

به منظور بررسی اثر چرخش محوری، نتایج شبیه‌سازی ورود به آب پرتابه استوانه‌ای شکل ۸ (آزمایش شماره ۲۲ تروسکات [۱۶])، در دو وضعیت دارای چرخش محوری و بدون وجود چرخش محوری، با هم مقایسه شده است. لازم به یادآوری است هندسه پرتابه مورد استفاده در این بخش، همان هندسه قبلی مورد استفاده در بخش صحت‌سنجی (شکل ۸) است. به منظور کاهش هزینه محاسباتی در این قسمت، بخش مدلسازی حرکت در هوا کوتاه شده است و شروع حرکت پرتابه با شرایط مشابه با وضعیت نتایج آزمایشگاهی و از نقطه‌ای در نزدیکی سطح آزاد آغاز شده است. بنابراین زمان‌بندی نتایج در این بخش با نتایج ارائه شده در بخش صحت‌سنجی، اندکی تفاوت دارد. در شکل ۱۳ شبیه‌سازی حرکت پرتابه در درون کویتی در دو وضعیت حرکت با چرخش محوری و بدون وجود چرخش محوری، در زمان ۱/۲ میلی‌ثانیه از ابتدای حرکت با هم مقایسه شده است. در شکل ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب، اثر چرخش محوری بر مسیر حرکت پرتابه در صفحه X-Y و مؤلفه‌های سرعت و شتاب پرتابه در راستای محورهای مختصات اینرسیال، مورد بررسی قرار گرفته است.

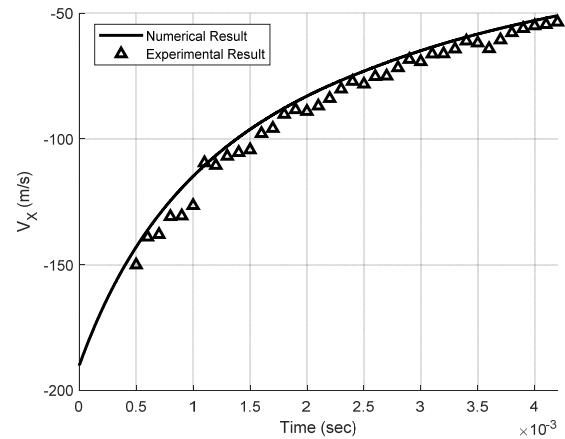
(الف)



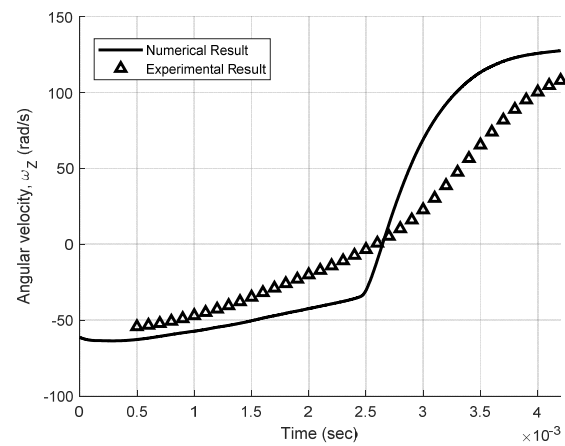
(ب)



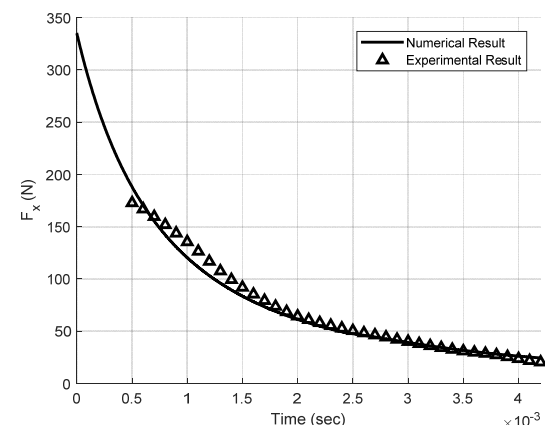
شکل ۱۳. شبیه‌سازی حرکت پرتابه در درون کویتی در دو وضعیت الف: بدون چرخش محوری، ب: بدون چرخش محوری در زمان ۱/۲ میلی‌ثانیه از شروع حرکت



شکل ۱۰. نتیجه شبیه‌سازی سرعت افقی پرتابه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۶]



شکل ۱۱. نتیجه شبیه‌سازی سرعت پیچشی پرتابه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۶]



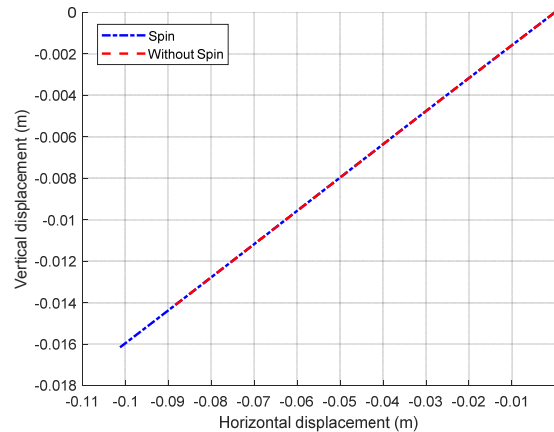
شکل ۱۲. نتیجه شبیه‌سازی نیروی محوری وارده بر پرتابه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی [۱۶]

نیروهای وارده بر پرتابه از سوی آب خواهد بود. در پژوهش حاضر مشاهده شد، چرخش محوری پرتابه تأثیری بر اندازه نیروها و به تبع آن دینامیک حرکت پرتابه در درون آب ندارد.

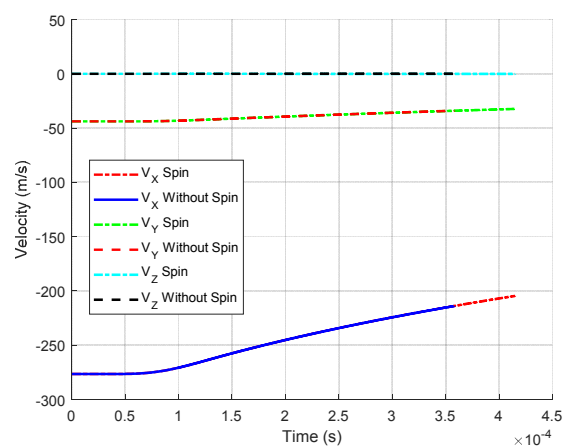
نمودارهای شکل ۱۷ و ۱۸ به ترتیب به مقایسه ممان وارده بر پرتابه در اثر برخورد با سطح آزاد و به دنبال آن تغییر در سرعت زاویه‌ای پرتابه می‌پردازد. با توجه به توضیحات پیش گفته و اطلاعات نمودار شکل ۱۷، تحت تأثیر چرخش پرتابه، تغییرات محسوسی در ممان وارده بر پرتابه به وجود نخواهد آمد. بر این اساس و مطابق با نمودارهای شکل ۱۸، اثر چرخش پرتابه، بر اندازه سرعت زاویه‌ای پیچشی پرتابه در جهت محور Z نیز، کمتر از ۲ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، حرکت پرتابه چرخش پایدار سوپرکاویتاسوینی یک حرکت صفحه‌ای است. یافته‌های این پژوهش در حالی است که چرخش یک تأثیر شاخص بر پایداری پرتابه در درون هوا دارد. علت این موضوع را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

مک کوی نشان داد، اثر پایدارساز چرخش محوری با پارامتر ضریب پایداری ژيروسکوپی (S_g) قابل بیان است [۳۱]. در این بیان، S_g نسبت ممان پایدارکننده ناشی از چرخش به ممان ناپایدارکننده ناشی از جریان سیال است. مک کوی همچنین نشان داد، اثر پایدارساز چرخش محوری زمانی روی می‌دهد که مقدار S_g بیشتر از یک باشد. با برخورد پرتابه با سطح آب و حرکت آن در درون کویتی، ممان ناپایدارکننده به شدت زیاد می‌شود؛ بنابراین مقدار S_g به شدت کوچک خواهد شد. در نهایت انتظار می‌رود با کوچک شدن مقدار S_g اثر چرخش حذف شود که این موضوع منطبق بر نتایج پژوهش حاضر است.

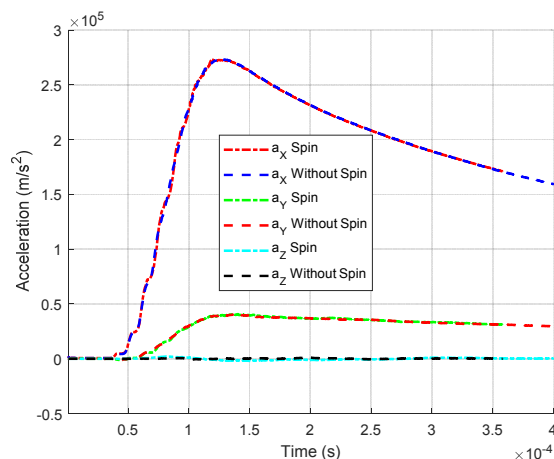
نکته حائز اهمیت است: (۱) حرکت چرخش محوری پرتابه چرخش پایدار سوپرکاویتاسوینی تأثیری بر دینامیک زیرسطحی پرتابه ندارد و (۲) مسائل موردبررسی در ورود به آب پرتابه‌های پیش گفته می‌تواند با فرض ساده‌ساز حذف اثرات چرخش محوری موردبررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر اثبات این فرضیه به کاهش درجات آزادی



شکل ۱۴. اثر چرخش محوری بر جابه‌جایی پرتابه در صفحه x-y



شکل ۱۵. اثر چرخش محوری بر سرعت پرتابه

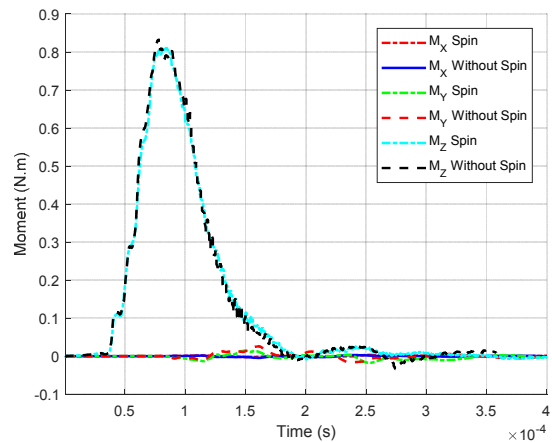


شکل ۱۶. اثر چرخش محوری بر شتاب پرتابه

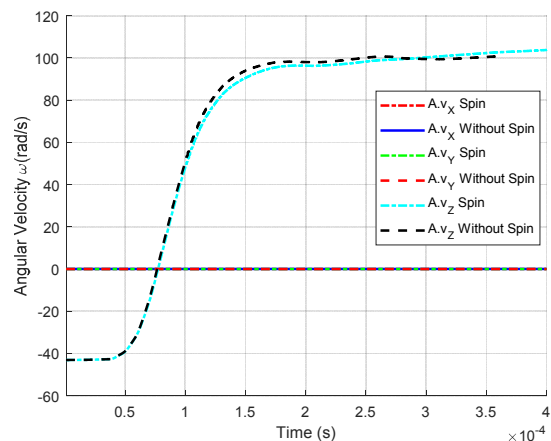
با توجه به شکل ۱۳ و اطلاعات نمودارهای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مشخص می‌شود، چرخش پرتابه سبب تغییر در نیروهای وارده، سرعت و در نهایت مسیر حرکت پرتابه نخواهد شد. به نظر می‌رسد عمده دلیل این موضوع، کوچک بودن نیروهای ژيروسکوپیک ناشی از چرخش محوری پرتابه، در مقایسه با

رویداد برخورد دمی را با دقت قابل قبولی مدل نماید. بنابراین این پژوهش در گام نخست توانسته است، مدل عددی مناسبی از ورود به آب مایل پرتابه‌های پرسرعت ارائه نماید. در ادامه اثر حرکت چرخشی پرتابه به عنوان یک پارامتر حائز اهمیت در طراحی پرتابه‌های سوپرکاویتاسوینی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی دقیق میزان اثرگذاری چرخش محوری بر دینامیک پرتابه، پارامترهای جابه‌جایی، سرعت، شتاب، گشتاور زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای ایجاد شده در پرتابه، در دو وضعیت وجود چرخش محوری و عدم وجود آن، شبیه‌سازی و مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان داد، در فرایند ورود به آب مایل سرعت بالا، وجود چرخش محوری تأثیر بسزایی بر رفتار دینامیکی و سینماتیکی پرتابه استوانه‌ای نخواهد داشت. عمده دلیل این موضوع، کوچک بودن نیروهای ژيروسکوپیک ناشی از چرخش محوری، در مقایسه با نیروهای وارده بر پرتابه از سوی آب است. به طور مشخص در حرکت هوایی، نیروی ژيروسکوپیک ناشی از حرکت چرخشی پرتابه، می‌تواند تأثیر خود را بر نیروهای آیرودینامیک و دینامیک پرتابه نشان دهد. اما با توجه به آنکه نیروی وارده بر پرتابه در حرکت زیرسطحی در تناسب با نیروهای وارده بر پرتابه در حرکت هوایی بسیار نیرومندتر هستند، نیروهای ژيروسکوپیک ناشی از چرخش محوری تأثیر بسزایی بر دینامیک پرتابه نخواهد داشت. بنابراین بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت، حرکت پرتابه چرخش پایدار سوپرکاویتاسوینی در محیط آب یک حرکت صفحه‌ای است. بر این اساس، مسائل مورد بررسی در ورود به آب پرتابه‌های چرخش پایدار می‌تواند با فرض ساده‌ساز، حذف اثرات چرخش محوری مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر اثبات این فرضیه به کاهش درجات آزادی مدلسازی‌های عددی آتی از ۶ درجه به ۳ درجه و کاهش امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز برای تصویربرداری از حرکت پرتابه از سه جهت به دو جهت منجر خواهد شد.

مدلسازی عددی آتی از ۶ درجه به ۳ درجه و کاهش امکانات آزمایشگاهی مورد نیاز جهت تصویربرداری از حرکت پرتابه از سه جهت به دو جهت، منجر خواهد شد.



شکل ۱۷. اثر چرخش محوری بر ممان وارده بر پرتابه



شکل ۱۸. اثر چرخش محوری بر سرعت زاویه‌ای پیشی پرتابه

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش در ابتدا با استفاده از مدلسازی عددی مسئله ورود به آب مایل پرسرعت یک پرتابه سوپرکاویتاسوینی، به توسعه ابزاری برای بررسی دقیق‌تر فیزیک حاکم، پرداخته است. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از نتایج یک پژوهش آزمایشگاهی پیشین انجام شده است. نتایج مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، نشان‌دهنده توانمندی این مدل در ارائه توصیفی دقیق از رفتار فیزیکی-دینامیکی، پرتابه پیش‌گفته است. مدل عددی ارائه شده می‌تواند جزئیات رفتاری فعل و انفعالات روی داده در فرایند ورود به آب همانند پاشش آب ناشی از ورود به آب، اثرات سطحی و

- [4] Mirzaei M, Alishahi MM, Egtesad M. High-speed underwater projectiles modeling: a new empirical approach. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2015;37(2):613-26.
- [5] Knapp R, Daily W, Hammitt F. Cavitation. New York: McGraw-Hill ;1970.
- [6] Truscott TT. Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles. 2009 May 21.
- [7] Available from: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Armour-piercing_fin-stabilized_discarding_sabot
- [8] Available from: www.dsg.com.\MEA
- [9] Kulkarni SS, Pratap R. Studies on the Dynamics of a Supercavitating Projectile. Applied Mathematical Modelling. 2000;24(2):113-29.
- [10] Gilbarg D, Anderson RA. Influence of atmospheric pressure on the phenomena accompanying the entry of spheres into water. Journal of Applied Physics. 1948;19(2):127-39.
- [11] Weiland C, Vlachos PP. Time-scale for critical growth of partial and supercavitation development over impulsively translating projectiles. International Journal of Multiphase Flow. 2012;38(1):73-86.
- [12] Shi HH, Itoh M, Takami T. Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry. Journal of fluids engineering. 2000;122(4):806-10.
- [13] Guo ZT, Zhang W, Wang C. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles. Journal of Hydrodynamics. 2012 Apr;24(2):217-25.
- [14] Zhao C, Wang C, Wei Y, Zhang X, Sun T. Experimental study on oblique water entry of projectiles. Modern Physics Letters B. 2016;30(28):1650348.
- [15] Wei Z, Hu C. Experimental study on water entry of circular cylinders with inclined angles. Journal of Marine Science and Technology. 2015;20(4):722-38.
- [16] Truscott T, Techet A, Beal D. Shallow angle water entry of ballistic projectiles. Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation; 2009 Aug 17-22; Michigan, USA.
- [17] Rabiee A, Alishahi M, Emdad H, Saranjam B. Experimental investigation of bounce phenomenon. Scientia Iranica. 2011;18(3):416-22.
- [18] Chen T, Huang W, Zhang W, Qi Y, Guo Z. Experimental investigation on trajectory stability

فهرست علائم

| | |
|---|--------------------------------|
| قطر کویلتاتور | D |
| نیروی وارده بر سیال | F |
| شتاب گرانش زمین | g |
| ممان اینرسی | I |
| طول پرتابه | L |
| جرم پرتابه | m_p |
| نرخ انتقال جرم از فاز q به فاز k | \dot{m}_{qk} |
| بردار ممان هیدرودینامیکی وارده بر پرتابه | M |
| ممان وارده بر پرتابه | M |
| فشار استاتیک | p |
| فشار اشباع | p_{sat} |
| فشار محیط | p_{∞} |
| شعاع کویلتاتور | R |
| بردار سرعت پرتابه | V |
| مؤلفه سرعت پرتابه نسبت به دستگاه مختصات اینرسال | (V_x, V_y, V_z) |
| موقعیت مرکز جرم پرتابه در دستگاه مختصات اینرسال | (X, Y, X) |
| زوایای دینامیکی پرتابه نسبت به محورهای مختصات | γ, φ, ψ |
| سرعت زاویه‌ای پرتابه | ω |
| کسر حجمی مایع، بخار و هوا | $\alpha_l, \alpha_v, \alpha_a$ |
| چگالی مایع، بخار و هوا | ρ_l, ρ_v, ρ_a |
| ویسکوزیته دینامیک | μ |

مراجع

- [1] Truscott TT, Epps BP, Belden J. Water entry of projectiles. Annual Review of Fluid Mechanics. 2014;46:355-78.
- [2] Available from: <http://www.northropgrumman.com/capabilities/RAMICS/page/default.aspx>.
- [3] Hou Z, Sun T, Quan X, Zhang G, Sun Z, Zong Z. Large eddy simulation and experimental investigation on the cavity dynamics and vortex evolution for oblique water entry of a cylinder. Applied Ocean Research. 2018;81:76-92.

past the axisymmetric body. Trudy Tsagi. 1980;2060:3-24.

[۳۰] اکبری محمد امین، محمدی جلال، فریدونی جلیل. تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی پرتابه پرسرعت سوپرکاویتاسیون، مبتنی بر داده‌های یک پژوهش آزمایشگاهی. مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها. ۲۰۱۹؛ ۹(۱):۹۱-۲۷۹.

[31] McCoy R. Modern exterior ballistics: The launch and flight dynamics of symmetric projectiles. Schiffer Pub; 1999.

پی‌نوشت

1. Water entry
2. Rapid Airborne Mine Clearance System (RAMICS)
3. Multi-Environment
4. Multi-phase
5. Armor-piercing fin-stabilized projectile (APFSDS)
6. DSG
7. Tail-Slap
8. Star-CCM+
9. Fluent
10. RANS
11. Volume of fluid
12. Overset Mesh
13. Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes
14. Segregated flow
15. Implicit unsteady
16. Flat wave
17. Trimmer
18. Surface remesher
19. Prism layer

of high-speed water entry projectiles. Ocean Engineering. 2019;175:16-24.

- [19] Iranmanesh A, Passandideh-Fard M. A three-dimensional numerical approach on water entry of a horizontal circular cylinder using the volume of fluid technique. Ocean Engineering. 2017;130:557-66.
- [20] Jiang CX, Shuai ZJ, Zhang XY, Li WY, Li FC. Numerical study on the transient behavior of water-entry supercavitating flow around a cylindrical projectile influenced by turbulent drag-reducing additives. Applied thermal engineering. 2016 Jul 5;104:450-60.
- [21] Qi D, Feng J, Xu B, Zhang J, Li Y. Investigation of water entry impact forces on airborne-launched AUVs. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2016;10(1):473-84.
- [22] Chen C, Yuan X, Liu X, Dang J. Experimental and numerical study on the oblique water-entry impact of a cavitating vehicle with a disk cavitator. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2019;11(1):482-94.
- [23] Yuan X, Chen C, Wang Y, Liu X, editors. On the cavity pressure during the water-entry of a supercavitating vehicle. OCEANS; 2017; Anchorage, USA. IEEE;2017. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8232310&isnumber=8232037>
- [24] Aus der Wiesche S. Numerical simulation of cavitation effects behind obstacles and in an automotive fuel jet pump. Heat and mass transfer. 2005;41(7):615-24.
- [25] Passandideh-Fard M, Roohi E. Transient simulations of cavitating flows using a modified volume-of-fluid (VOF) technique. International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2008;22(1-2):97-114.
- [26] Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of computational physics. 1981;39(1):201-25.
- [27] Schnerr GH, Sauer J, editors. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. Fourth international conference on multiphase flow; 2001 May27- June1 ; New Orleans, USA.
- [28] Johannessen SR. Use of CFD to Study Hydrodynamic Loads on Free-Fall Lifeboats in the Impact Phase: A verification and validation study. Institutt for marin teknikk; 2012.
- [29] Epshtein LA, Laptin VM. Approximate calculation of influence of flow boundaries on cavity length in two dimensional problem and