



تجزیه و تحلیل رفتار دینامیکی پرتابه پرسرعت سوپرکاویتاسیون، مبتنی بر داده‌های یک پژوهش آزمایشگاهی

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

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

^۲ استادیار مجتمع هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

^۳ استادیار مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

یادداشت پژوهشی؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶

چکیده

در مقاله حاضر، با استفاده از اطلاعات یک پژوهش آزمایشگاهی انجام شده قبلی، نیروها و ممان وارده بر یک پرتابه سوپرکاویتاسیون استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته است. به جرات می‌توان این آزمایش را با توجه به سرعت بالای پرتابه و تکنیک تصویرنگاری، از نمونه‌های کم نظیر در شمار آورد. در آزمایش پیش گفته، پرتابه بعد از خروج از پرتاب‌گر و پیمایش مسیری کوتاه در هوا، با زاویه‌ای اندک نسبت به سطح آزاد سیال (آب)، بدان ورود می‌یابد. با توجه به در اختیار بودن فیلم سرعت بالای این آزمایش و به کمک تکنیک‌های پردازش تصویر انجام شده در ابتدا، مقادیر سرعت و شتاب پرتابه در هر لحظه از زمان، استخراج گردید. در مرحله بعد، نیروها، ممان و متعاقب آن ضرایب هیدرودینامیکی وارده بر پرتابه، حاصل گردید. نتایج برازش اطلاعات در این پژوهش نشان می‌دهد، مقدار ضریب درگ (C_D) با پیش‌بینی‌های موجود همخوانی نسبی دارد؛ اما نتایج مرتبط با مقادیر ضرایب برآ و گشتاور پیچشی (C_M و C_L)، حاوی اطلاعات کم نظیری است که سبب تغییر برخی از فرضیات قبلی موجود در ادبیات پرتابه‌های سوپرکاویتاسیونی خواهد شد. پژوهش حاضر همچنین اطلاعات سودمندی در ارتباط با نحوه‌ی تغییرات سرعت زاویه‌ای پرتابه، ارائه می‌نماید که در موضوع بررسی رفتار پایداری این وسایل کاربرد دارد.

کلمات کلیدی: پرتابه؛ سوپرکاویتاسیون؛ فیلم سرعت بالا.

Analysis of a High-Speed Underwater Supercavitating Projectile Dynamics, Based on an Experiment

M.A. Akbari¹, J. Mohammadi^{2,*}, J. Fereyduni³

¹ Ph.D. Student, Marine. Eng., MUT Univ., Isfahan, Iran.

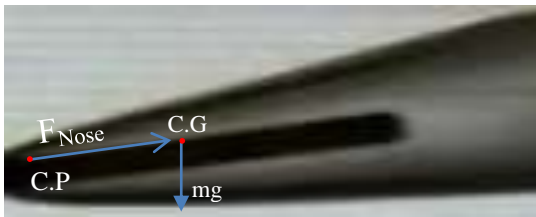
² Assoc. Prof., Aero space. Eng., MUT Univ., Teharn, Iran.

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., MUT Univ., Isfahan, Iran.

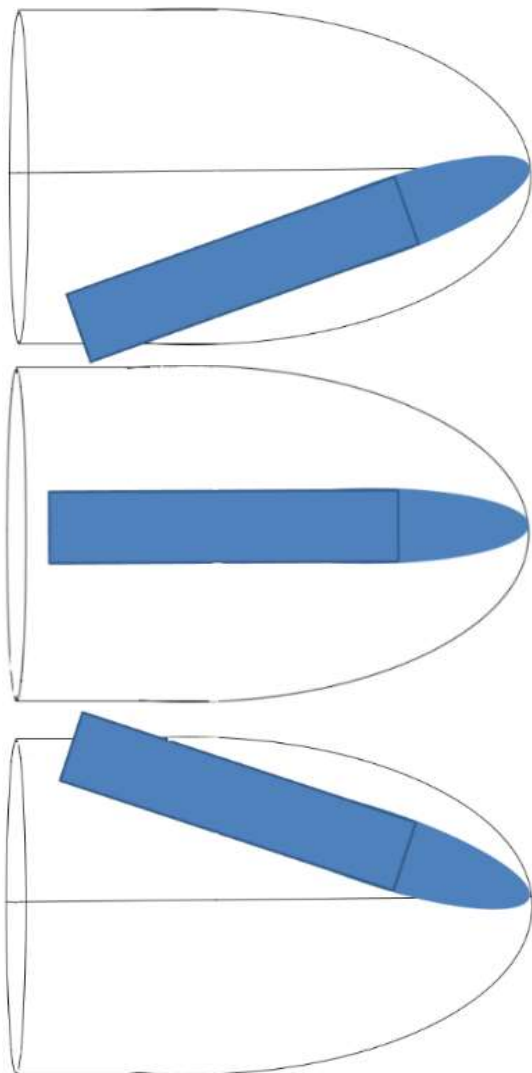
Abstract

In this article, we extracted the forces and moment of a supercavitation projectile according to the former experimental work that is exist within literature. regards to the projectile high-speed and the illustration technique, it's safe to say that this experiment is one of the most attractive examples which is exists in the literature. In this test, projectile after leaving the launcher and moving a short path in the air, enters at a low angle to the free surface of the fluid (water). Due to the availability of the experiment test multimedia and thank to the image processing techniques in this paper, speed and acceleration values of the projectile were extracted. In the next step, forces, moments and hydrodynamic coefficients of the projectile were evaluated. The results in this study show that the value of the drag coefficient (C_D) are in good agreement with existing predictions, but the results related to the values of the lift and moment coefficients (C_L and C_M), contain new and important information in which it will change some of the former assumptions in the literature. The present study also provides useful information about projectile angular velocity which is used in the study of the stability of motion of such devices

Keyword: Projectile; Supercavitation; High-Speed Multimedia.



شکل ۱- نمایی شماتیک از محل تشکیل مرکز فشار پرتابه سوپرکاویتاسیون و پدید آمدن گشتاور ناپایدار کننده



شکل ۲- وضعیت نوسانی حرکتی یک پرتابه پرسرعت سوپرکاویتاسیون (نوسان نسبت به محور کویتی) که سبب بروز برخورد دمی می‌گردد

۱- مقدمه

با حرکت جسم درون سیال و با سرعت گرفتن ذرات، فشار سیال به صورت محلی کاهش می‌یابد. هنگامی که فشار محلی کمتر از فشار بخار سیال گردد، بخار آب درون سیال پدیدار می‌شود. در این وضعیت اصطلاحاً کاویتاسیون رخ می‌دهد. سوپرکاویتاسیون، حالتی است که در آن پرتابه زیرسطحی به صورت کامل (به جز کویتاتور) درون حباب سوپرکاویتاسیون قرار دارد [۱].

از آنجایی که سطح خیس پرتابه سوپرکویتی، تنها به بخش کوچکی در جلوی پرتابه (کویتاتور) منحصر می‌شود و از آنجا که نیروی وارده بر کویتاتور، (در قیاس با سایر نیروهای وارده بر پرتابه) بسیار قدرتمند است، براین اساس و مطابق با شکل ۱، چنین وضعیتی سبب می‌شود، مرکز فشار پرتابه در ناحیه‌ای بسیار نزدیک به کویتاتور تشکیل گردد [۲].

به سبب ناپایداری حرکتی که نوعاً در فاز حرکت اتمسفری پرتابه‌های سوپرکاویتاسون بروز می‌نماید و وجود عوامل اغتشاشی (ناشی از فاز ورود به آب)، پرتابه‌های سوپرکاویتاسیون، اغلب به هنگام حرکت رو به جلو درون کویتی، نوسان خواهند نمود (زاویه‌ی راستای پرتابه نسبت به محور کویتی تغییر می‌کند). در اثر نوسان‌های پدید آمده، انتهای پرتابه با دیواره کویتی برخورد می‌کند. برخورد پرتابه با دیواره کویتی سبب بروز حالت ارتجاعی و بازگشت و برخورد آن با منتهی‌الیه متضاد دیواره کویتی می‌شود. این رخداد با عنوان برخورد دمی نامگذاری می‌شود و در شکل ۲ به صورت شماتیک به تصویر درآمده است [۳]. هدف اصلی در بررسی پرتابه‌های سوپرکاویتاسیون را می‌توان در سه حوزه تخمین هندسه کویتی، آنالیز نیروهای وارده بر کویتاتور و کم و کیف بروز نیروهای برخوردی دسته‌بندی نمود [۴].

شفچنکو^۲ و همکاران [۵]، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حرکت اجسام با سرعت زیاد در آب، یک رابطه تجربی برای تخمین شکل حباب سوپرکاویتاسیون متقارن محوری ارائه کرده‌اند.

^۱ Tail-Slap
^۲ Savchenko

حاصل از حل عددی نشان می‌دهد که حباب سوپرکاویتاسیون در زمانی کمتر از ۲ میلی ثانیه، پرتابه سرعت بالا را به طور کامل احاطه کرده و نیروی پسای وارد به پرتابه را به اندازه ۶۶ درصد کاهش می‌دهد.

همچنین، مسئله ورود به سیال (آب) پرتابه‌های پرسرعت و با زاویه کم دارای کاربردهای عملیاتی بسیاری است. با بررسی سیستم‌های عملیاتی طراحی شده، می‌توان چنین بیان نمود که تاکنون تحقیقات بسیاری در راستای ماهیت-شناسی رفتاری چنین پرتابه‌های انجام شده است؛ اما به جرات می‌توان گفت، تاکنون انتشار دستاوردهای تحقیقاتی بسیاری از پژوهش‌هایی از این دست (به سبب ماهیت کاربرد حوزه‌ی فناوری)، از حوزه نشر دور مانده است [۱۲].

فروزانی و همکاران [۱۳]، برخورد زمانمند الاستوپلاستیک پرتابه پرسرعت، با سطح آب را به صورت عددی و با استفاده از روش اختیاری لاگرانژ-اولر، شبیه‌سازی نموده‌اند. در این پژوهش پرتابه یک جامد الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده و شبکه آن به روش لاگرانژی ایجاد شده است. آب نیز یک سیال تراکم پذیر فرض شده است و شبکه آن با روش اولر تولید می‌شود. در این کار، شبیه‌سازی در سه گام تحلیل تنش استاتیکی، دینامیکی و تحلیل برخورد پرتابه با درجات آزادی کامل به سطح آب، انجام شده است. به منظور صحت‌گذاری نتایج، انتشار موج تنش ایجاد شده در پرتابه ناشی از برخورد با آب، با نتایج تحلیل مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین خطا در مقایسه با نتایج تحلیل حدود ۵ درصد است. تطابق خوب بین مقادیر پیش‌بینی شده، آزمایشگاهی و تحلیلی نشان‌دهنده دقت این الگوریتم عددی است. در این پژوهش، برخورد پرتابه با سطح آب با زوایای مختلف نیز شبیه‌سازی شده است و محدوده ایمن زاویه پرتاب ارائه شده است.

زی تائو^۳ و همکاران [۱۴]، ورود به آب افقی دو پرتابه استوانه‌ای با طول‌های متفاوت را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند، پرتابه استوانه‌ای با کویتاتور سر تخت از پایداری مناسب و ضریب درگ نسبتاً

وانگ^۱ و همکاران [۶]، ارتباط بین شکل حباب سوپرکاویتاسیون و پارامترهای یک نمونه کویتاتور را بررسی کرده و یک رابطه تجربی جهت محاسبه طول و ضخامت حباب سوپرکاویتاسیون طبیعی ناشی از شلیک، ارائه نمودند. پینگ^۲ و همکاران [۷]، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، به شبیه‌سازی عددی شکل حباب سوپرکاویتاسیون (همراه تزریق هوا) پرداخته و نیروی پسای پرتابه را محاسبه کردند.

ربیعی و همکاران [۸، ۹] به بررسی آزمایشگاهی و عددی پدیده سوپرکاویتاسیون یک جسم متحرک شتابدار پرداختند. آنها نشان دادند که نرم‌افزار فلوئنت، قابلیت مدل‌سازی میدان جریان سوپرکاویتاسیون را داشته و نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی، تطابق خوبی دارند. آنها همچنین چندین نمونه آزمایشگاهی را جهت مطالعه پدیده سوپرکاویتاسیون حاصل از ورود و حرکت پرتابه سرعت بالا به داخل آب، مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آزمایش‌های انجام شده روی چندین پرتابه با شکل کویتاتور مختلف و برای سرعت و زاویه ورود گوناگون انجام شده است. آنها مشاهده نمودند، با افزایش سرعت دهانه و کاهش زاویه ورود پرتابه به آب، در پرتابه‌های با نوک نیم کره‌ای، تغییر در جهت حرکت به وجود نخواهد آمد و این در حالی است که برای پرتابه‌های سر تخت، تغییرات پر شدت در مسیر حرکت، مشاهده شد.

فروزانی و همکاران [۱۱]، در پژوهشی جداگانه، نحوه شکل‌گیری و سیر تکامل حباب سوپرکاویتاسیون و تاثیر آن بر کاهش نیروی مقاوم برای یک جسم متحرک زیرسطحی را به صورت عددی و آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار دادند. به منظور شبیه‌سازی عددی جسم متحرک زیرسطحی، از معادلات میانگین‌گیری شده ناویراستوکس زمانمند و چند فازی، همراه با مدل شش درجه آزادی استفاده شده است. با توجه به عدم وجود نتایج آزمایشگاهی در مورد پرتابه‌های پر سرعت زیرسطحی، حل عددی زمانمند برای پرتابه‌ای با سرعت ۱۰۰ متر بر ثانیه انجام و نتایج آن در راستای تنظیم کد عددی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج

¹ Wang

² Ping

³ Zi-tao

مناسب بهره‌مند است. در این پژوهش ضریب درگ برای هر دو پرتابه (در مسیر حرکت) تقریباً برابر با ۰/۷ محاسبه گردید.

چانگ زو^۱ و همکارانش [۱۵]، بر پایه روش تجربی و با استفاده از فیلم برداری سرعت بالا، ورود به آب مایل چندین پرتابه با سرهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که درحالت‌های ورود به آب با سرعت بالا (بیشتر از ۵۰ متر بر ثانیه) کویتی تشکیل شده متقارن بوده و اثر جاذبه بر آن دیده نمی‌شود. آنها همچنین نشان دادند، ضریب درگ وارده به هنگام ورود به آب، کم بوده و با بسته شدن کویتی رو به افزایش می‌گذارد.

زو یو وی^۲ و همکاران [۱۶]، به مطالعه تجربی اثر پدیده سوپرکاویتاسیون، بر چند سیلندر دایره‌ای سه بعدی در اعداد فرود کوچک پرداخته‌اند. تاکید مطالعات زو یو وی روی اثر زاویه‌های ورود مایل است؛ همچنین آنها اثرات نسبت تراکم و نسبت طول به قطر پرتابه را مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است، در پژوهش پیش گفته، نیروی برآ، نیروی پسا و گشتاور وارد به پرتابه توسط تجزیه و تحلیل نتایج تجربی، تخمین زده شده است.

عرفانیان و همکاران [۱۷]، مسئله ورود به آب یک پرتابه با کویتاتور کروی را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. شبیه‌سازی حرکت، توسط یک مدل ۳ بعدی با ۶ درجه آزادی انجام شده است. آنها نشان دادند، نتایج شبیه‌سازی در قیاس با نتایج تجربی، از همخوانی قابل قبول برخوردار است.

به منظور تجزیه و تحلیل حرکت پرتابه‌های سوپرکاویتاسیونی در ابتدا لازم است، به هنگام استقرار پرتابه درون کویتی، نیروها و گشتاورهای وارد بر آن محاسبه شوند. محاسبه این نیروها به علت سرعت بالای پرتابه و عدم وجود شناخت کافی از ماهیت دقیق پدیده سوپرکاویتاسیون، با دشواری‌های بسیار همراه است.

یکی از نخستین مدل‌های ریاضی ارائه شده در خصوص آنالیز رفتار حرکتی پرتابه‌های پرسرعت سوپرکاویتاسیون

توسط رند و همکاران^۳ ارائه گردید [۲]. محاسبات ارائه شده توسط رند بر پایه انتقال ممنوم سیال انجام گرفته است. حرکت پرتابه مقید و مستقیم الخط فرض شده است و در این حالت پرتابه فاقد هرگونه حرکت نوسانی است. کولکارنی و همکاران^۴ [۳]، بر پایه مفروضاتی همچون بررسی حرکت پرتابه به صورت صفحه‌ای، نوسان پرتابه حول دماغه و صرف نظر اثر جاذبه مدل ریاضی-تحلیلی خود را ارائه نمودند.

لاگوینوویچ [۱۸] در سال ۱۹۸۰ مدل نیمه تجربی خود را جهت مدل‌سازی نیروهای برخوردی وارده بر پرتابه پرسرعت زیر سطحی ارائه نمود. زیسکی برخی پارامترهای نیمه تجربی تاثیرگذار در روش لاگوینوویچ را بهینه نمود [۱۹].

تروسکات و همکاران^۵ [۲۰]، در یک مطالعه آزمایشگاهی و بدنبال صحت سنجی مدل‌های تحلیلی تخمین رفتار حرکتی پرتابه سوپرکاویتاسیونی قبلی، ورود به آب تعدادی از پرتابه‌های مرسوم را مورد بررسی قرار دادند. پرتابه مورد استفاده، دارای کالیبر ۲۲ و زاویه‌های ورود در این آزمایش، بین ۵ تا ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است. تروسکات در این مطالعه نشان داد، ورود موفق پرتابه به آب، تابع شکل هندسی کویتاتور و نسبت طول به قطر پرتابه است. وی مشاهده کرد که با کاهش نسبت طول به قطر پرتابه، احتمال ورود به آب پرتابه کاهش می‌یابد.

بر اساس آخرین اطلاعات مولفین، در ادبیات مرتبط با بررسی رفتار دینامیکی پرتابه‌های سوپرکاویتاسیون، تاکنون در هیچ یک از پژوهش‌های انتشار یافته قبلی (و مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی)، ماهیت حرکت نوسانی پرتابه درون کویتی و به صورت خاص، سرعت زاویه‌ای پرتابه و ممان‌های ناشی از آن، استخراج و ارزیابی نگردیده است، لذا مبنای فعالیت‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر، بررسی موضوعات پیش گفته است. لازم به ذکر است، موضوع پیش گفته در بررسی

³ Rand et al.

⁴ Kulkarni et al.

⁵ Truscott

¹ Chenggong Zhao

² Zhaoyu Wei

در روش تصویر نگاری، کلیه فریم‌های محتوای چند رسانه‌ای آزمایش، توسط نرم افزارهای تجاری موجود استخراج شده و در محیط اتوکد^۱، مورد آنالیز قرار گرفته است. از آنجا که ابعاد پرتابه مورد نظر و حاضر در آزمایشات مشخص است، وجه منظری فریم‌ها، چنان تغییر می‌یابند تا ابعاد تصویر، با ابعاد اصلی پرتابه مورد آزمایش، یکسان شوند (تصاویر به مقیاس یک به یک می‌رسند). شکل ۵ موقعیت دستگاه مختصات و نحوه‌ای اندازه‌گیری موقعیت مکانی پرتابه در محیط اتوکد را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۱- مشخصات پرتابه شماره ۲۲

مقدار	واحد	کمیت
0.0026	(kg)	جرم
5.2×10^{-7}	(kg.m ²)	ممان اینرسی
40.13	(mm)	طول پرتابه
5.51	(mm)	قطر کویتاتور

از آنجا که ابعاد پرتابه مورد نظر و حاضر در آزمایشات مشخص است، وجه منظری فریم‌های استخراج شده و مورد ارزیابی در نرم‌افزار اتوکد، چنان تغییر می‌یابند تا ابعاد تصویر پرتابه با ابعاد اصلی پرتابه مورد آزمایش یکسان شوند (تصاویر به مقیاس یک به یک می‌رسند). در مرحله بعدی در محیط اتوکد، نقشه پرتابه در موقعیت تصویر پرتابه قرار داده می‌شود (منطبق می‌گردد) و متعاقب آن، مقادیر زاویه پرتابه نسبت به افق (γ)، مختصات افقی و عمودی (x و y) آن نسبت به یک مرجع مشخص، اندازه‌گیری گردید. در نهایت با توجه به فاکتور زمان که توسط سرعت فیلمبرداری (ده هزار فریم بر ثانیه) مشخص می‌شود، مقادیر پیش‌گفته، در هر مرحله زمانی اندازه‌گیری شده است. از آنجا که فاصله زمانی هر فریم

پایداری حرکتی پرتابه سوپرکاویتاسیون نقش اساسی ایفا می‌کند.

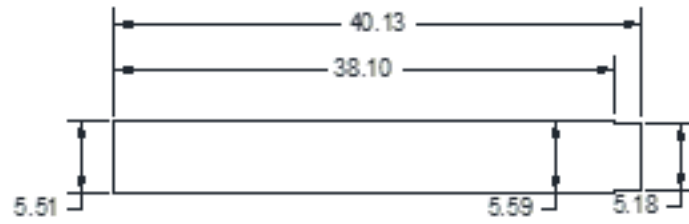
با توجه به آنکه محتوای چندرسانه‌ای آزمایش انجام شده توسط تروسکات و همکاران، در حال حاضر در دسترس قرار دارد و با توجه به آنکه زیرساخت‌های لازم برای انجام تست‌های شلیک و تصویرنگاری فوق سریع (و در این سطح از کیفیت)، منحصرأ در اختیار آزمایشگاه‌های انگشت شمار در سطح جهان است، این پژوهش نتایج آزمایشات تروسکات را مبنای تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، قرار داده است.

در ادامه، در ابتدا به چگونگی استخراج موقعیت مکانی و زاویه‌ای پرتابه در زمان‌های مختلف پرداخته شده است، سپس با مشتق‌گیری از منحنی‌های منطبق شده بر نتایج آزمایش، سرعت و شتاب پرتابه استخراج شده‌اند. در مرحله بعد، نیروها و ممان‌های وارده بر پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است و بر اساس آن، برخی از ضرایب هیدرودینامیک پرتابه استخراج شد. در انتها نتایج بدست آمده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است، نتایج حاصله در این پژوهش، سبب اصلاح برخی فرضیات و نگرش‌های علمی گذشته، در این حوزه می‌شود.

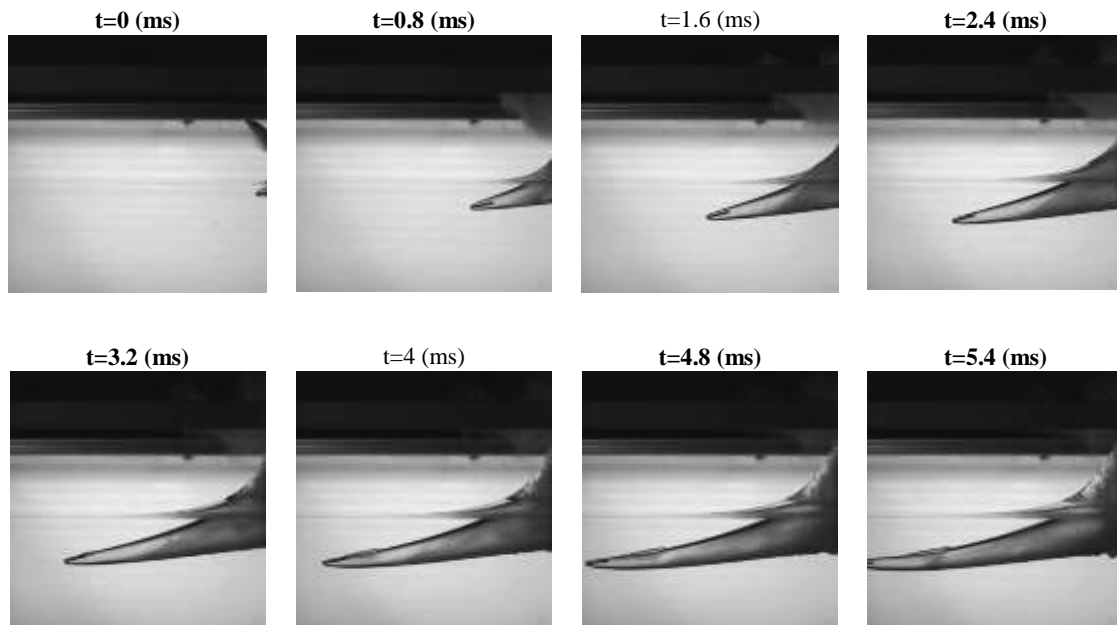
۲- استخراج موقعیت پرتابه در هر لحظه با

استفاده از تحلیل فیلم سرعت بالای شلیک پرتابه همانگونه که پیشتر بیان گردید، این پژوهش در راستای اهداف خود در تجزیه و تحلیل رفتار حرکتی پرتابه سوپرکاویتاسیون، از نتایج آزمایشگاهی تروسکات و همکاران استفاده نموده است [۲۰]. شکل ۳ و جدول ۱، ابعاد هندسی دقیق پرتابه استوانه‌ای شماره ۲۲ (کالیبر ۵/۵۱ میلی‌متر) مورد استفاده در آزمایشات تروسکات را به تصویر کشیده است که در تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است. لازم به ذکر است، ابعاد ارائه شده در این تصویر بر حسب میلی‌متر است و نقشه پرتابه دارای تقارن محوری است.

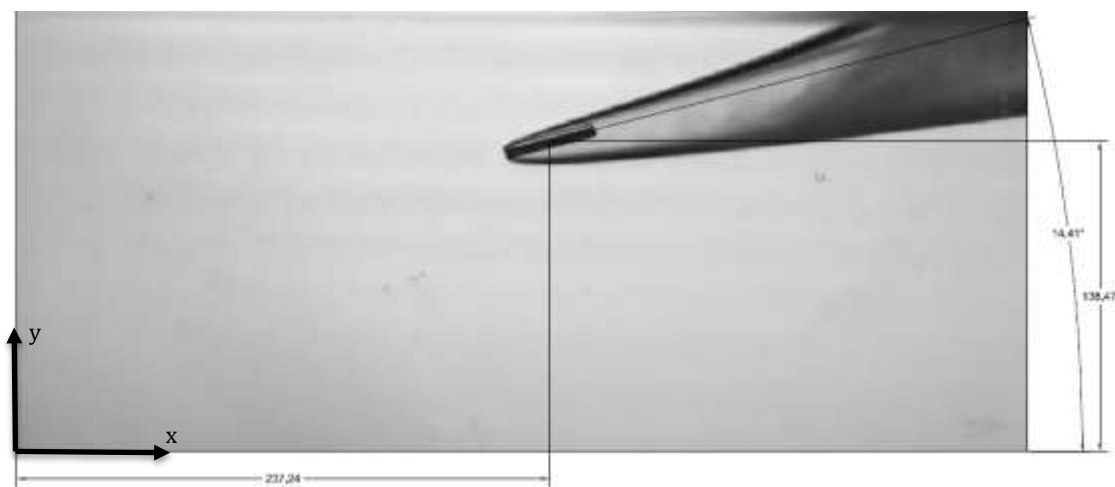
¹ Autocad



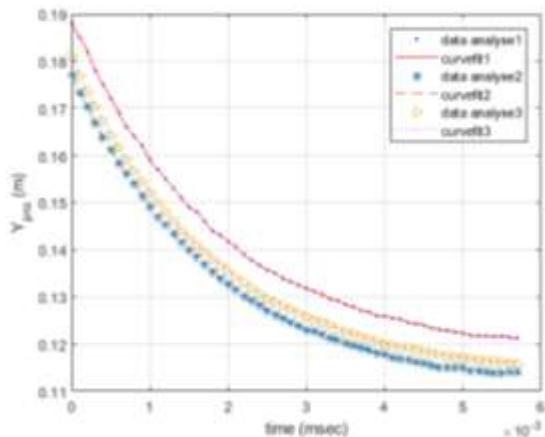
شکل ۳- ابعاد پرتابه شماره ۲۲ مورد استفاده در آزمایشات تروسکات [۲۰]، ابعاد بر حسب میلی متر است



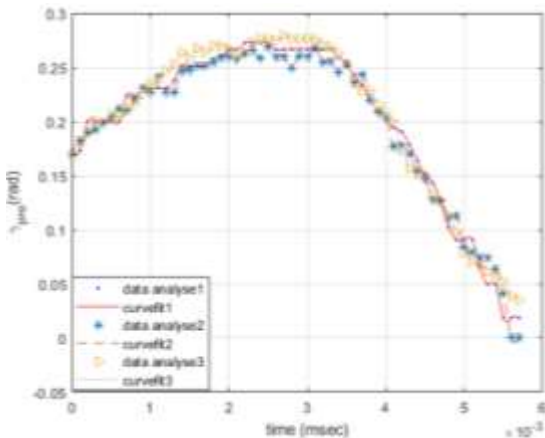
شکل ۴- نمونه فریم‌های استخراج شده از محتوای چند رسانه‌ای سرعت بالا [۲۰]



شکل ۵- نمونه‌ای از نحوه‌ی اندازه‌گیری موقعیت مکانی پرتابه در محیط اتوکد



شکل ۷- جابجایی قائم پرتابه بر حسب زمان بر اساس سه مرحله اندازه گیری به همراه نمودارهای منطبق شده بر نتایج



شکل ۸- زاویه‌ی پیچش پرتابه بر حسب زمان به همراه نمودارهای منطبق شده بر نتایج

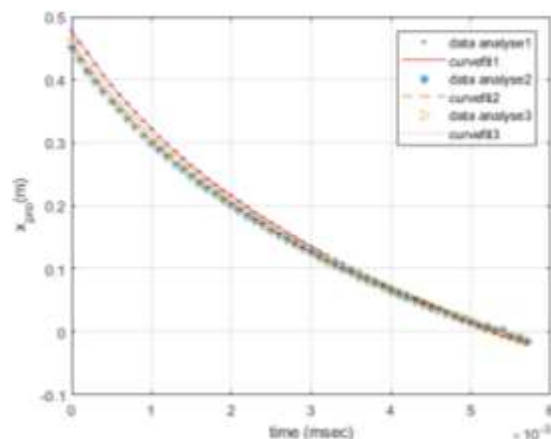
۳- استخراج سرعت و شتاب پرتابه

همانگونه که در بخش قبل بیان شد، تا این مرحله، موقعیت و وضعیت زاویه‌ای پرتابه در هر فریم به روش تصویرنگاری قابل تعیین گردید. با یک مرحله مشتق‌گیری از موقعیت پرتابه نسبت به زمان، سرعت پرتابه قابل محاسبه خواهد بود. نمودارهای شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب سرعت و شتاب پرتابه را به نمایش می‌گذارد.

از آنجا که در اندازه‌گیری موقعیت و وضعیت پرتابه خطاهایی وجود دارد، مشتق‌گیری مستقیم از داده‌های اندازه‌گیری شده، منجر به تغییرات شدید و گسستگی در نمودار سرعت و شتاب پرتابه خواهد شد. بدین منظور مقادیر

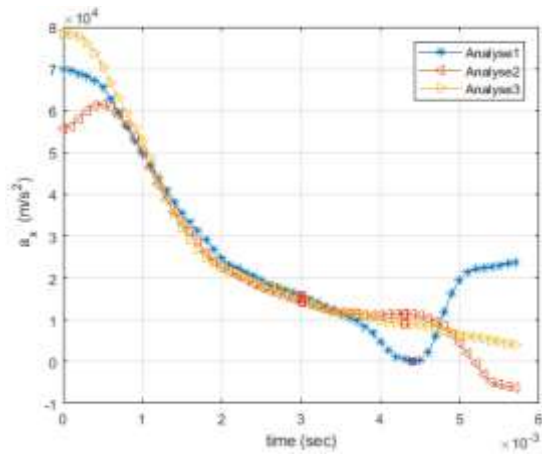
مشخص است [۲۰]، می‌توان نمودارهای جابجایی پرتابه، نسبت به زمان را ترسیم نمود. دیاگرام‌های ۶ تا ۸ موقعیت مکانی و زاویه‌ای پرتابه را به همراه نمودارهای برازش خط و منطبق بر نقاط را در هر لحظه از زمان به نمایش می‌گذارد. به منظور اندازه‌گیری و تحلیل خطای تصادفی، تمامی اندازه‌گیری‌های انجام شده طی سه مرحله (توسط سه نفر) و به صورت کاملاً مجزا انجام شده است. به منظور افزایش دقت نتایج در مراحل بعدی، با استفاده از تکنیک‌های برازش خط، منحنی منطبق بر نقاط در فضای متلب^۱ استخراج و ترسیم گردیده است.

همانگونه که از تصاویر شکل ۴ و نمودار ۸ مشخص است، پرتابه با زاویه ۱۱ درجه (۰/۱۹ رادیان) وارد آب می‌شود. با حرکت روبه جلوی پرتابه درون کویتی و به سبب وجود سرعت زاویه‌ی پیچشی در شروع حرکت (در فاز ورود به آب)، زاویه پرتابه با افق زیاد می‌شود. در اثر ازدیاد زاویه پرتابه، انتهای آن در محدوده زمانی ۳ تا ۴/۵ میلی ثانیه، با جداره کویتی برخورد می‌کند. برخورد دمی سبب تغییر سرعت زاویه‌ای پرتابه، در جهت عکس حرکت اولیه می‌شود که این موضوع در ادامه حرکت منجر به کم شدن زاویه‌ی پرتابه می‌شود.

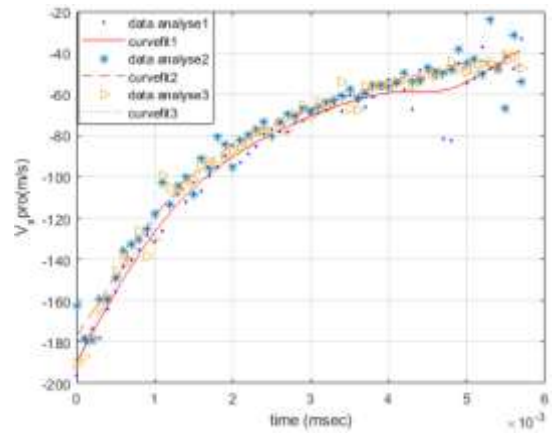


شکل ۹- جابجایی پرتابه در راستای افقی بر حسب زمان و بر اساس سه مرحله اندازه‌گیری متفاوت به همراه نمودارهای منطبق شده بر نتایج

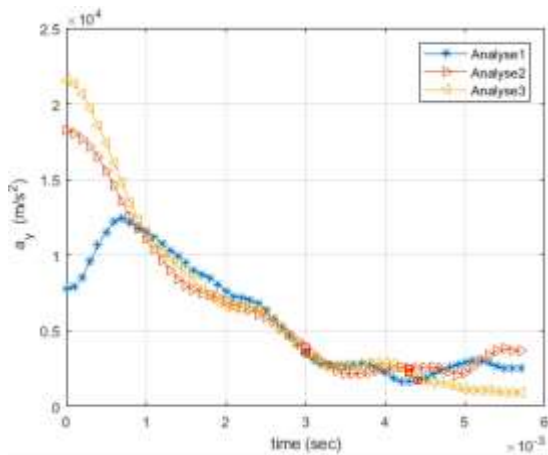
^۱ Matlab



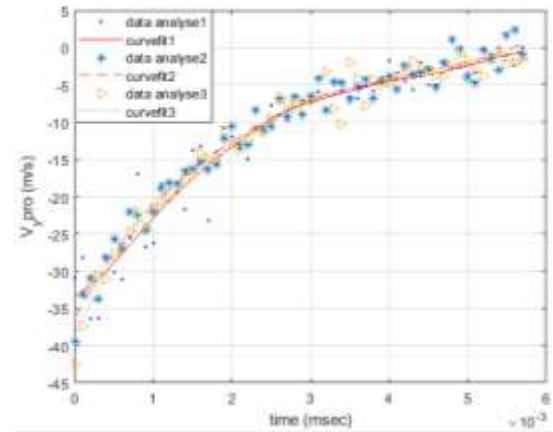
(الف)



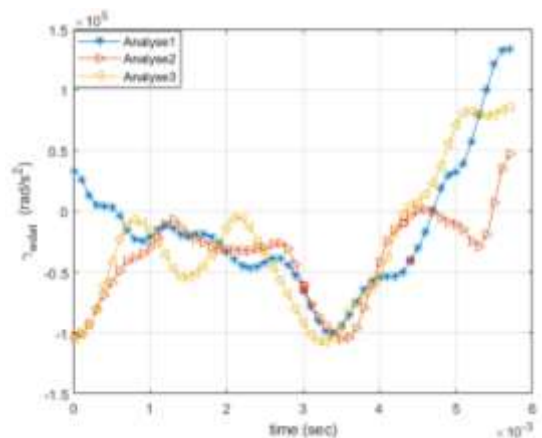
(الف)



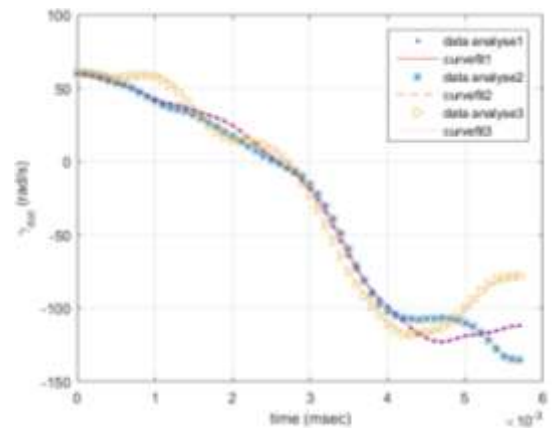
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

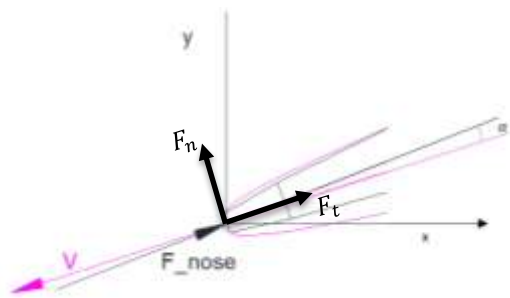
شکل ۱۰- به ترتیب از بالا به پایین نمودارهای شتاب پرتابه در راستای افقی (الف)، قائم (ب) و شتاب زاویه‌ای پیچشی (ج) نسبت به زمان بر اساس سه مرحله اندازه گیری متفاوت

شکل ۹- به ترتیب از بالا به پایین نمودارهای سرعت پرتابه در راستای افقی (الف)، قائم (ب) و سرعت زاویه‌ای پیچشی (ج) نسبت به زمان بر اساس سه مرحله اندازه گیری متفاوت

این پراکندگی در محدوده ابتدای حرکت به سبب سرعت بالای پرتابه و تغییرات پر شدت، در تصاویر ضبط شده است. در هر حال، متوسط مقادیر محاسبه شده در نمودارها را می‌توان با تقریب مناسب، بیانگر وضعیت پرتابه در هر لحظه از زمان، در نظر آورد. با این توصیف اختلاف بین نتایج هر اندازه‌گیری با متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، معرف خطای تصادفی اندازه‌گیری پارامتر مورد بررسی خواهد بود.

در نمودار شکل ۱۰-الف، با توجه به ارتباط نیروی پسا با سرعت پرتابه، تجربه حرکت با شتاب کاهشنده، پدیده‌ای است که پرتابه تجربه می‌نماید.

با توجه به شکل ۱۰-ج و با دقت در نتایج شتاب زاویه‌ای پرتابه می‌توان گفت، در محدوده‌ی زمانی ۱ تا ۳ میلی ثانیه که در آن، پرتابه بدون برخورد با جداره کویتی درون آن حرکت می‌کند، میانگین مقادیر شتاب زاویه‌ای محاسبه شده، دارای مقداری غیر صفر است. این وضعیت این نتیجه را همراه دارد که در این حالت، گشتاوری غیر صفر بر پرتابه اعمال می‌شود. اعمال گشتاور بر پرتابه درون کویتی در حالت بدون برخورد دمی، (با توجه به آنکه اثر این گشتاور در پژوهش‌های قبلی ناچیز فرض شده است و معمولاً در روند محاسباتی وارد نمی‌شد)، یکی از نتایج جالب توجه حاصل شده در این پژوهش است. لازم به ذکر است، اندازه این گشتاور به صورت تقریبی، برابر با ۳۰ درصد حداکثر گشتاور وارد شده بر پرتابه، در اثر برخورد دمی (در محدوده‌ی زمانی ۳ تا ۴/۵ میلی ثانیه) است.



شکل ۱۱- آنالیز نیرویی شماتیک وارده بر پرتابه

گشتاور پیچشی اعمال شده بر پرتابه، در فاز حرکت بدون برخورد در دورن کویتی، سبب تغییر در زاویه پرتابه شده است. بر این اساس و با توجه به نمودار شکل ۸، زاویه پرتابه

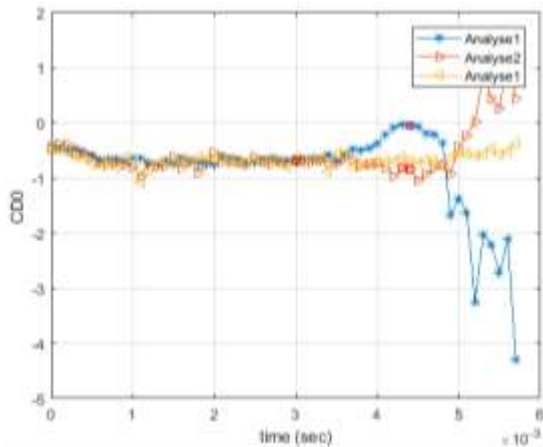
سرعت و شتاب پرتابه، با مشتق‌گیری از منحنی منطبق شده بر موقعیت و وضعیت پرتابه حاصل گردیده‌اند.

با توجه به نمودارهای شکل ۹، سرعت پرتابه در لحظه ورود به آب (m/s) ۱۸۶ برآورد می‌گردد که سهم مولفه افقی (m/s) ۱۸۵ و سهم مولفه قائم (m/s) ۳۵ متر بر ثانیه است. با توجه به حضور نیروی پسی پر شدت (وابستگی توان دومی نیروی پسا به سرعت پرتابه)، اندازه سرعت پرتابه به شدت رو به کاهش می‌گذارد که این موضوع مطابق با انتظارات قبلی است. همانطور که پیشتر شرح آن رفت، پرتابه به هنگام ورود به آب دارای سرعت زاویه‌ای پیچشی است که بر اساس نمودار ۹-۱ این مقدار (rad/s) ۶۰ برآورد می‌گردد.

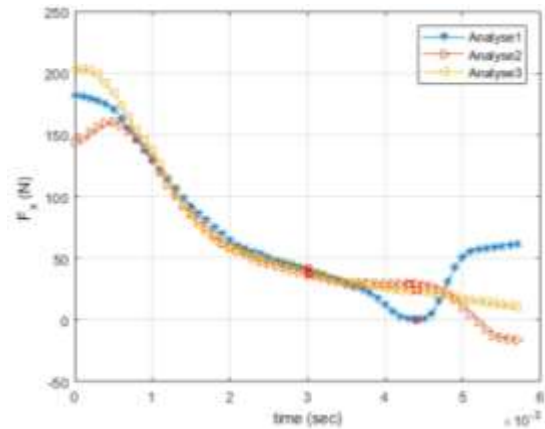
نتیجه جالب توجه در این بخش صفر شدن سرعت زاویه‌ای پرتابه قبل از برخورد با جداره کویتی و در محدوده‌ی زمانی صفر تا ۲/۵ میلی ثانیه است (یادآور می‌شود برخورد با جداره‌ی کویتی در محدوده‌ی زمانی ۳-۴/۵ میلی ثانیه رخ می‌دهد)؛ بنابراین با توجه به این نمودار به نظر می‌رسد، در طول حرکت پرتابه درون کویتی و تا قبل از بروز برخورد دمی (وضعیت حرکتی همانند آنچه در تصویر میانی شکل ۲ نمایش داده شده است)، بر پرتابه گشتاور پیچشی وارد می‌شود. همچنین بر اساس اطلاعات دریافتی از نمودار ۹-۱، مشخصاً پس از بروز برخورد دمی در بازه زمانی ۳-۴/۵ میلی ثانیه، اندازه سرعت زاویه‌ای، رو به ازدیاد می‌گذارد که بروز آن را می‌توان با توجه به بروز برخورد دمی، توجیه نمود. لازم به ذکر است، این موضوع در بخش بعدی، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

نکته حائز اهمیت بعدی در نتایج حاصله در این پژوهش، وضعیت سرعت ورود و خروج پرتابه در برخورد است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، پرتابه در محدوده‌ی سرعت زاویه‌ای (rad/s) ۲۰- به جداره کویتی برخورد می‌نماید و پس از برخورد با آن، با سرعت زاویه‌ای تقریبی (rad/s) ۱۰۰- از جداره کویتی جدا می‌گردد که مشخصاً می‌توان نتیجه گرفت، برخورد، ازدیاد اندازه (قدر مطلق) سرعت زاویه‌ای در پرتابه را به دنبال داشته است.

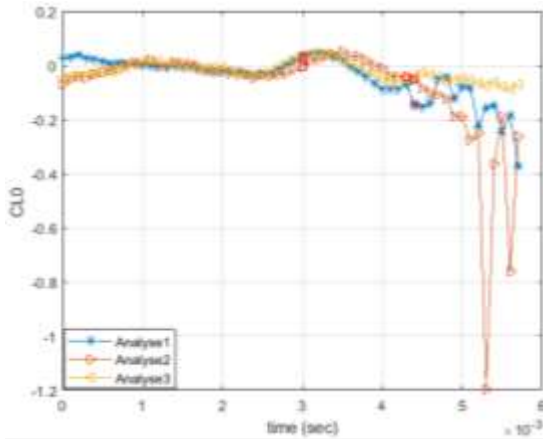
با توجه به نمودارهای شکل ۱۰، در محدوده‌ی زمانی صفر تا ۰/۷ میلی ثانیه و همچنین در بازه زمانی انتهایی ۵ تا ۵/۷ میلی ثانیه نتایج دارای پراکندگی است. بروز



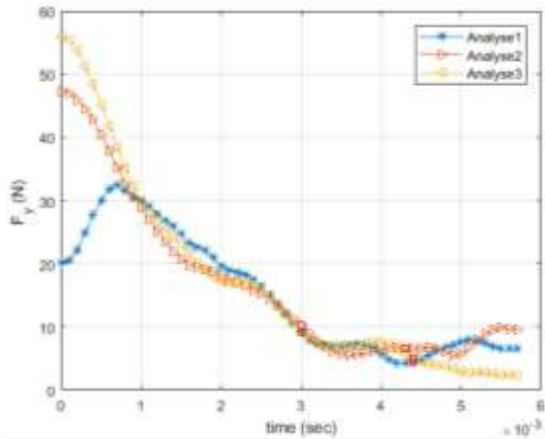
(الف)



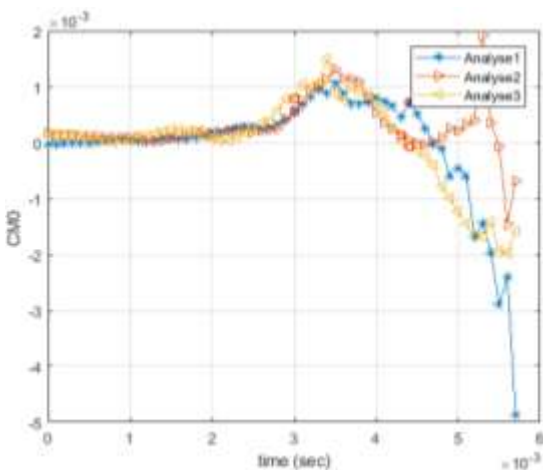
(الف)



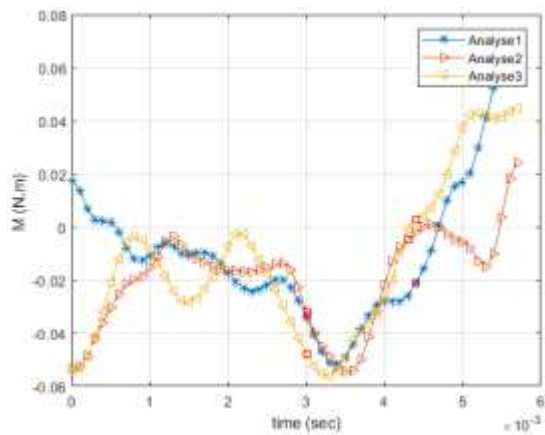
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۳- به ترتیب از بالا به پایین نمودارهای ضریب برآ (الف)، پسا (ب) و گشتاور پیچشی (ج) پرتابه بر اساس سه مرحله اندازه‌گیری متفاوت

شکل ۱۲- به ترتیب از بالا به پایین نمودارهای نیروی برآ (الف)، پسا (ب) و گشتاور پیچشی (ج) پرتابه بر اساس سه مرحله اندازه‌گیری متفاوت

جهت جسم وارد می‌شود، مناسب است نیروهای پسا و برا، در راستای جسم و عمود بر آن تعریف شوند.

$$\begin{aligned} F_n &= F_x \cos \gamma + F_y \sin \gamma \\ F_t &= -F_x \sin \gamma + F_y \cos \gamma \end{aligned} \quad (۴)$$

بدین ترتیب ضرایب هیدرودینامیکی وارده بر پرتابه با استفاده از (۵) تا (۷)، قابل محاسبه خواهند بود.

$$C_D = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho_w V^2 \left(\frac{\pi}{4} d_{ca}^2 \right) \cos \alpha} \quad (۵)$$

$$C_L = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \rho_w V^2 \left(\frac{\pi}{4} d_{ca}^2 \right) \cos \alpha} \quad (۶)$$

$$C_{M\alpha} = \frac{\sum M_z}{\frac{1}{2} \rho_w V^2 \left(\frac{\pi}{4} d_{ca}^2 \right) L_{pro} \cos \alpha} \quad (۷)$$

که در معادلات فوق C_L و $C_{M\alpha}$ ، به ترتیب ضریب برآ و ضریب گشتاور پیچشی است. در بخش‌های قبلی کم و کیف نیروهای وارده بر پرتابه به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. تنها ذکر این نکته در این بخش ضروری می‌نماید که ضریب پسای محاسبه شده در این پژوهش برای ورود به آب مایل پرتابه استوانه‌ای، در محدوده ۰/۷ پیش‌بینی می‌شود. بر اساس نتایج حاصله در پژوهش‌های قبلی مقدار ضریب پسا ۰/۸۵ برآورد گردیده است [۲۲]. چانگ زو و همکاران [۱۵] نشان دادند، مقدار ضریب درگ پرتابه، قبل از بسته شدن کویتی، در قیاس با حرکت پرتابه در حالت سوپر کاویتاسیون (با کویتی بسته)، کمتر است؛ لذا مقدار ضریب پسای اندازه‌گیری شده در این پژوهش (با توجه به عدم بسته شدن کویتی در آزمایشات مبنایی این پژوهش) در تناسب با اطلاعات قبلی موجود در ادبیات پرتابه‌های سوپر کاویتاسیونی است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر، تجزیه و تحلیل دینامیک ورود یک پرتابه سرعت بالا و با زاویه کم به سطح آب پرداخته شد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته، نتایج بدیع زیر حاصل شد که سبب اصلاح برخی فرضیات و نگرش‌های علمی گذشته، در این حوزه می‌شود.

۱- با دقت در نتایج شتاب زاویه‌ای پرتابه می‌توان گفت، در محدوده‌ی زمانی ۱ تا ۳ میلی ثانیه که در آن، پرتابه بدون برخورد با جداره کویتی درون آن حرکت می‌کند، میانگین مقادیر شتاب زاویه‌ای محاسبه شده، دارای مقداری غیر صفر است. این

در بدو ورود به آب و تا قبل از بروز برخورد دمی، به اندازه ۵ درجه زیاد شده است. وجود این گشتاور از آن جهت حائز اهمیت است که تغییر در زاویه پرتابه در اثر گشتاور پیش گفته، در نهایت منجر به انحراف پرتابه از مسیر حرکت مستقیم‌الخط، خواهد شد. لذا بررسی این موضوع به عنوان یک پژوهش جداگانه پیشنهاد می‌شود.

۴- محاسبه نیروها، گشتاور و ضرائب هیدرودینامیکی

نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ نیروی وارده بر پرتابه و ضرایب هیدرودینامیکی (مرتبط با هر نیرو) را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، با مشخص بودن مقادیر جرم و ممان اینرسی وارده بر پرتابه و به کمک قانون دوم نیوتن، می‌توان مقادیر نیرو در راستای افقی، قائم و گشتاور پیچشی وارده بر پرتابه (به ترتیب F_x ، F_y و M_{cg}) را با توجه به دسته معادلات (۱) و مقادیر جدول ۱ محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} \sum F_x &= m\ddot{x} \\ \sum F_y &= m\ddot{y} \\ \sum M_{cg} &= I_{cg}\ddot{\gamma} \end{aligned} \quad (۱)$$

در حرکت پرتابه سوپر کاویتاسیون درون کویتی، کویتاتور همواره تحت اثر نیروی پسای مماس بر محور پرتابه، خواهد بود. شوچنکو و همکاران، مقدار این نیرو را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمودند [۲۱].

$$F_{nose} = \frac{1}{2} \rho_w V^2 C_D \left(\frac{\pi}{4} d_{cav}^2 \right) \cos \alpha \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} C_D &= C_{D0}(1 + \sigma) \\ \sigma &= (P_{\infty} - P_c) / \left(\frac{1}{2} \rho_w V^2 \right) \end{aligned} \quad (۳)$$

در معادله فوق، α زاویه حمله پرتابه، C_D ضریب پسا، d_{cav} قطر کویتاتور، σ عدد کاویتاسیون و ρ_w چگالی آب است. برای محاسبه ضریب پسا و برآ لازم است، نیروی وارده در راستای حرکت پرتابه و نیروی مماسی (عمود بر راستای حرکت پرتابه) با استفاده از (۴) محاسبه شوند. لازم به ذکر است، در تعاریف متداول، نیروهای پسا و برا به ترتیب در راستای حرکت و عمود بر آن تعریف می‌شوند، اما با توجه به این واقعیت که در حرکت سوپر کاویتاسیون، عموماً نیروها در

- [6] WANG H-b, ZHANG J-z, WEI Y-j, YU K-p, JIA L-p (2005) Study on relations between cavity form and typical cavitator parameters. *J Hydrodyn* 2.
- [7] JIA L-p, Cong W, WEI Y-j, WANG H-b, ZHANG J-z, YU K-p (2006) Numerical simulation of artificial ventilated cavity. *J Hydrodyn Ser B* 18(3): 273-279.
- [8] Rabiee A, Alishahi M, Emdad H, Saranjam B (2011) Part A: Experimental investigation of unsteady supercavitating flows. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering* 35(M1): 15.
- [9] Rabiee A, Alishahi M, Emdad H, Saranjam B (2011) Part B: Numerical investigation of unsteady supercavitating flows. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering* 35(M1): 31.
- [10] Rabiee A, Alishahi M, Emdad H, Saranjam B (2011) Experimental investigation of bounce phenomenon. *Scientia Iranica*. 18(3):416-22.
- [۱۱] فروزانی ح، سرانجام ب، کمالی ر (۲۰۱۶) تحلیل برخورد زمان‌مند الاستوپلاستیک پرتابه پرسرعت با سطح آب. *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۸۱-۹۸ (۳): ۶.
- [12] Truscott TT, Epps BP, Belden J (2014) Water entry of projectiles. *Annual review of fluid mechanics* 46: 355-378.
- [۱۳] فروزانی ح، سرانجام ب، کمالی ر، ربیعی ع (۲۰۱۷) شبیه سازی عددی و بررسی تجربی حرکت یک جسم پرسرعت زیرسطحی. *مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۳۰-۲۱۷ (۱): ۷.
- [14] GUO Z-t, Zhang W, Cong W (2012) Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles. *J Hydrodyn Ser B* 24(2): 217-225.
- [15] Zhao C, Wang C, Wei Y, Zhang X, Sun T (2016) Experimental study on oblique water entry of projectiles. *Mod Phys Lett B* 30(28): 1650348.
- [16] Wei Z, Hu C (2015) Experimental study on water entry of circular cylinders with inclined angles. *J Mar Sci Technol* 20(4): 722-738.
- [17] Erfanian MR, Anbarsooz M, Rahimi N, Zare M, Moghiman M (2015) Numerical and experimental investigation of a three dimensional spherical-nose projectile water entry problem. *Ocean Eng* 104: 397-404.
- [18] Mao X (2010) Nonlinear robust control design for a high-speed supercavitating vehicle.
- [19] Dzielski J, Kurdila A (2003) A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solutions. *Modal Anal* 9(7): 791-804.
- [20] Truscott TT (2009) Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles.

وضعیت این نتیجه را همراه دارد که در این حالت، گشتاوری غیر صفر بر پرتابه اعمال می‌شود. اعمال گشتاور بر پرتابه درون کویتی در حالت بدون برخورد دمی، (با توجه به آنکه اثر این گشتاور در پژوهش‌های قبلی ناچیز فرض شده است و معمولاً در روند محاسباتی وارد نمی‌شد)، یکی از نتایج جالب توجه حاصل شده در این پژوهش است. این گشتاور دارای مقدار قابل توجهی است و از نوع پایدار کننده است (کاهش دهنده سرعت زاویه‌ای پرتابه). نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد (برای یک پرتابه خاص موضوع این پژوهش)، مقدار این گشتاور تقریباً ۳۰ درصد حداکثر گشتاور حاصل از برخورد دمی پرتابه است. ۲- سرعت زاویه‌ای پرتابه، پس از بروز برخورد دم پرتابه به دیوار کویتی، زیاد شده است. این پدیده حائز اهمیت بسیار است؛ زیرا تاثیر بسزایی بر پایداری پرتابه سوپرکاویتاسیونی خواهد داشت. پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آینده، علت این موضوع با شبیه‌سازی حرکت پرتابه، مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد.

۳- ضریب درگ برای پرتابه موضوع پژوهش در محدوده ۰/۷ پیش‌بینی می‌شود که با اطلاعات قبلی ارائه شده در منابع هم‌خوانی دارد [۱۵].

۶- مراجع

- [۱] رامیار ع (۱۳۸۶) کلویتاسیون و سوپرکاویتاسیون. انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر.
- [2] Rand R, Pratap R, Ramani D, Cipolla J, Kirschner I (1997) Impact dynamics of a supercavitating underwater projectile. *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences (DETC'97)*, Sacramento, CA, Sept.
- [3] Kulkarni SS, Pratap R (2000) Studies on the Dynamics of a Supercavitating Projectile. *Appl Math Model* 24(2): 113-129.
- [4] Mirzaei M, Alishahi MM, Eghtesad M (2015) High-speed underwater projectiles modeling: a new empirical approach. *J Braz Soc Mech Sci* 37(2): 613-126.
- [5] Savchenko Y, Vlasenko Y, Semenenko V (1999) Experimental study of high-speed cavitated flows. *Int J Eng Fluid Mech* 251-257.

[22] Kiceniuk T (1954) An experimental study of the hydrodynamic forces acting on a family of cavity-producing conical bodies of revolution inclined to the flow.

[21] Savchenko YN, Vlasenko YD, Semenenko V (1999) Experimental studies of high-speed cavitated flows. Int J Fluid Mech Res 26(3).