شبیه سازی سه درجه آزادی یک پرتابه سوپرکاویتاسیونی سرعت بالا

زهرا الهامیان1، جلال محمدی 2، جلیل فریدونی 3

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

2- استادیار، مجتمع هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- استادیار، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده

یکی از شاخه­های علوم مهندسی بررسی برخورد و نفوذ دو جسم در یکدیگر است، که معمولا در علوم نظامی دریایی مهمترین کاربرد آن ورود پرتابه­ها با کاربرد­های مختلف به آب و حرکت به سمت اهداف مورد نظر می‌باشد. در این مقاله، مقدمه­ای بر جسم برخوردکننده به آب، هم چنین بررسی پدیده‌هایی همچون کاویتاسیون و یا سوپرکاویتاسیون که ممکن است اتفاق بیفتد انجام شده است. در ادامه، به نیروی وارد به پرتابه در فاز­های مختلف، و روابط حاکم بر پرتابه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه اعتبار سنجی انجام می­شود، که در آن محاسبات انجام شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می­گردد. و در آخر شبیه سازی سه درجه آزادی پرتابه سوپرکاویتاسیونی که در آن پرتابه با شرایط ورودی مختلف به آب مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلی**د‌واژگ**ان**

پرتابه، سوپرکاویتاسیون،کاویتاسیون، کویتی، پلنینگ

1. مقدمه

مطالعه اثر هیدرودينامیک بین يک جسم در حال حرکت و سطح آزاد آب دارای کاربردهای بسیاری از جمله حوزه­های هوانوردی و فرود فضاپیما در دريا، برخورد پرتابه­هایی نظیر راکت، موشک و نیز مین­ریزی در دريا دارد. دراین مقاله، به موضوع شبیه سازی حرکت پرتابه در ورود به آب پرداخته شده است. این شبیه سازی از نظر دانستن مسیر حرکت، حداقل و حداکثر مقدار فروروی پرتابه به داخل آب و مقدار نیروی وارد بر پرتابه اهمیت دارد. مسئله به صورت سه درجه آزادی شبیه سازی می­شود.

با حرکت جسم درون آب سیال و با سرعت گرفتن ذرات، فشار سیال به صورت محلی کاهش می­یابد. هنگامی که فشار محلی کمتر از فشار سیال گردد، بخار آب درون سیال پدیدار می­شود. در این وضعیت اصطلاحا کاویتاسیون رخ می­دهد.

کاویتاسیون یک کلمه‌ی انگلیسی است که از ریشه‌ی کاویتی به معنی حفره یا حباب گرفته شده است. در زمینه نظامی کشور روسیه از حدود سال 1960 میلادی موضوع ساخت یک پرتابه زیردریایی را در دستور کار خود قرار داد که با استفاده از پدیده کاویتاسیون بتواند با کاهش نیروی مقاومت به سرعت‌های بالایی برسد. آمریکا نیز با ساخت گلوله‌هایی که با استفاده از سوپر کاویتاسیون، پس از شلیک از بالگرد، با سرعت گرفتن در آب، مین‌های دریایی را منهدم می­کردند، حضور خود را در صحنه این رقابت حفظ کرد[1].

سوپرکاویتاسیون، حالتی است که در آن پرتابه زیرسطحی به صورت کامل (به جز کاویتاتور) درون حباب سوپرکاویتاسیون قرار دارد. از آنجایی که سطح خیس پرتابه سوپرکویتی، تنها به بخش کوچکی در جلوی پرتابه (کویتاتور) منحصر می­شود و از آنجایی که نیروی وارد بر کویتاتور، (در قیاس با سایر نیروی­های وارد بر پرتابه) بسیار قدرتمند است، بر این اساس، چنین وضعیتی سبب می­شود، مرکز فشار پرتابه در ناحیه­ای بسیار نزدیک به کویتاتور تشکیل گردد.

به سبب ناپایداری حرکتی که نوعا در فاز حرکت اتمسفری پرتابه­های سوپرکاویتاسیون 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 دیوار کویتی برخورد می­کند. برخورد پرتابه با دیوار کویتی سبب بروز حالت ارتجاعی و بازگشت و برخورد آن با منتهی الیه متضاد دیواره کویتی می­شود.

1-1- بررسی سوپرکاویتاسیون

اخیراً کاربرد سوپرکاویتاسیون در ساخت جنگ‌افزارهای زیر سطحی بسیار سریع و حتی مافوق صوت، نظر دانشمندان را به خود جلب کرده است. با استفاده از این پدیده، جنگ‌افزار زیر سطحی در داخل حبابی قرار می‌گیرد و در نتیجه درگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

هدف مهندسان در حال حاضر این است که با شیوه‌های نوین، آب دقیقاً در نوک دماغه شناور زیر سطحی، به بخار تبدیل گردد و همچنین با تزریق مصنوعی بخار، کاویتاسیون به مرحله سوپرکاویتاسیون برسد و حباب‌های کوچک منبسط شده و یک حباب بزرگ به صورت هاله‌ای شناور را احاطه نماید.

در یک شناور قرینه باریک، شکل این هاله به صورت یک بیضی‌گون کشیده شده در جهت حرکت است که از شناور درازتر می‌باشد. در این حالت دیگر شناور با آب تماسی ندارد و در نتیجه نیروی پسآ به شدت کاهش می‌یابد و با نیروی محرکه‌ای متعارف می‌توان به سرعت‌های بسیار بالا و حتی مافوق صوت دست پیدا کرد. با تزریق مصنوعی هوا یا گاز، که در اصطلاح سوپرکاویتاسیون تهویه نامیده می‌شود، نیز می‌توان ضمن افزایش حجم و پایداری حباب محیط بر شناور، نوعی مکانیزم کنترلی را برای کنترل این فرآیند و هدایت آن طراحی نمود. مزیت سوپرکاویتاسیون بر کاویتاسیون این است که پایدارتر و رفتار آن از نظر هیدرودینامیکی قابل پیش‌بینی‌تر می‌باشد[2].

1. نیروهای وارد برپرتابه در ورود به آب

در هنگام ورود پرتابه به آب، نیرویی به آن وارد می­شود که نه تنها بر حرکت پرتابه در آب تاثیر می­گذارد بلکه می­تواند منجر به ایجاد صدمه به بدنه به پرتابه شود. ورود پرتابه و یا موشک به آب در منابع به شش فاز تقسیم می‌شود که عبارتند از:

1- فاز شوک موجی: در این فاز، که برای پرتابه با نوک پخ و ورود عمودی اهمیت دارد، تراکم‌پذیری اهمیت دارد و یک شوک موجی در آب ایجاد می‌شود. اگرچه نیروهای ایجاد شده قابل توجه هستند ولی غالباً به دلیل زمان کوتاه ایجاد شدن نیروها، تأثیر زیادی بر روی پرتابه نخواهد گذاشت

2- فاز تشکیل جریان : در این فاز، پرتابه باید یک الگوی از جریان را در آب که در ابتدا ساکن است ایجاد کند. در زمانی که این جریان در حال ایجاد شدن است، پرتابه بیشترین کاهش شتاب را تحمل می‌کند و نیروها غالباً خرد کننده است و تأثیر قابل توجه بر روی مسیر حرکت می‌گذارند.

3- فاز کویتی‌باز

4- فاز کویتی بسته

5- فاز کویتی برخورد شده

6- فاز کاملا مرطوب

در این مقاله فقط دو فاز شوک موجی و فاز تشکیل جریان مورد بررسی قرار می­گیرند[3].

2-1- روابط حاکم

در شکل 1 پرتابه و نیروی وارد بر پرتابه در صفحه حرکت نشان داده شده است و فرض شده است که حرکت دارای سه درجه آزادی و در صفحه می­باشد. با توجه به شکل، 𝜃 زاویه راستای سرعت با محور Y ، 𝛾 زاویه راستای پرتابه با محور Y ، 𝛼 زاویه حمله و 𝛽 زاویه راستای نیروی وارد بر پرتابه با محور Y است.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 1** دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر پرتابه |

با نوشتن معادله نیرو در دو جهت X و Y و معادله گشتاور حول مرکز جرم، معادلات حرکت بدست می­آیند.

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
| (2) |  |
| (3) |  |

2-2- نیروی وارد به پرتابه از دیواره کویتی (پلنینگ)

برای محاسبه نیروهای پلنینگ از تئوری حسن استفاده می­شود ]4[ این مدل مطابقت خوبی با داده­های تجربی دارد و معمولاً این مدل برای محاسبه نیروهای انتهایی وسیله سوپرکاویتاسیون انتخاب می‌شود. فرمول­های بدست آمده از این تئوری براساس کار لاگوینوویچ برای جریان غیرلزج و به وسیله جمع کردن نیروهای اصطحکاک پوسته‌ای وارد بر جسم توسط جریان ویسکوز بوده است.

این مدل، پلنینگ یک جسم باریک بلند را در حرکت رو به جلوی ثابت و در سطح آزاد بدون اغتشاش در نظر می­گیرد. فرض بر این است که نسبت عمق غوطه‌وری به شعاع جسم کوچک و همچنین عدد فرود بزرگ باشد. نیروی عمودی ویژه برای پلنینگ صفحه‌ای در طول سطح آزاد غیر آشفته به صورت زیر می‌تواند بیان شود. بنابراین بایستی نیروهای پلنینگ را که از معادلات زیر بدست می­آید، در معادلات لحاظ نمود[4].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (4) |  | |
| (5) |  | |
| (6) |  | |
| (7) |  | |
| (8) | |  |
| (9) | |  |
| (10) | |  |

2-3-نیروی دیواره وارد کویتاتور

نیروی وارد بر کویتاتور یا همان نیروی درگ از رابطه (11) محاسبه می­شود،

(𝛼=0) نیروی وارد بر کاویتاتور در زاویه حمله صفر:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

نیروی وارد بر کاویتاتور در زاویه حمله مختلف:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

: تابع زاویه حمله است.

نیروی وارد بر کاویتاتور تخت همواره عمود بر سطح کاویتاتور است و مقدار آن نیز با ضریب نسبت به زاویه حمله تغییر می‌کند.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

2-4- معادلات حاکم بر کویتی

معادله ابعاد کویتی برای کاویتاتور تخت طبق مدل ارائه شده مانزر-ریچارد از معادله زیر بدست می­آید:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (14) |  |  |
| (15) |  |  |

که در رابطه بالا شعاع کویتاتور و شعاع کویتی می­باشد، همچنین عدد کاویتاسیون است.

3-اعتبارسنجی

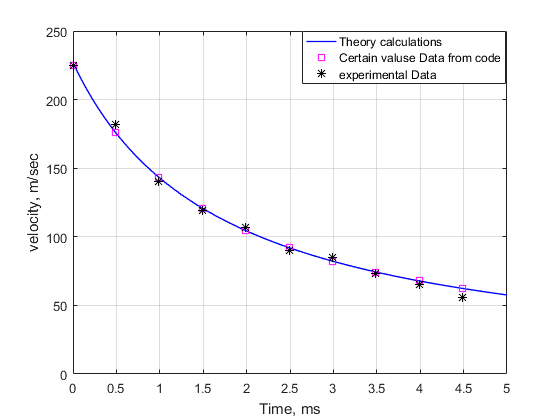
در این قسمت با توجه به ورودی­ها و شرایط آزمایشگاهی مرجع]5[ را وارد کدکامپیوتری نموده و نمودارهای سرعت بر حسب زمان و نیز عمق بر حسب زمان بدست آمده است. همچنین نمودارهای بدست آمده از کد کامپیوتری با نمودارهای مرجع] 5[ مقایسه شده و خطا را محاسبه نموده است. داده­های مرجع] 5[ در جدول زیر آورده شده است. در این مقاله ضریب درگ 0.8 می‌باشد.

**جدول 1** مشخصات تست آزمایشگاهی نمونه]5[

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **پارامتر** | **مقدار** | **واحد** |
| جرم پرتابه | 66/2 | گرم |
| شعاع پرتابه | 28/0 | سانتی­متر |
| طول پرتابه | 4 | سانتی­متر |
| شعاع کویتاتور | 28/0 | سانتی­متر |
| سرعت محوری اولیه | 225 | متر بر ثانیه |
| زمان پایانی | 5 | میکروثانیه |
| زاویه پیچ اولیه | 11 | درجه |

### **3-1-** **مقایسه نمودار سرعت-زمان مرجع] 5[ با کد کامپیوتری**

با توجه به نمودارهای **Error! Reference source not found.**، نتایج بدست آمده از کد کامپیوتری با مقادیر ارائه شده از مرجع] 5[ بسیار نزدیک به هم بوده و ماکزیمم خطای آن 2.2 % می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که محاسبات انجام شده در این مقاله با دقت بسیار بالایی انجام شده و اعتبار آن را تایید می­کند.



|  |
| --- |
| **شکل 2** رسم همزمان نموارهای سرعت-زمان بدست آمده از کد کامپیوتری با داده­های مرجع] 5[  3-2- مقایسه نمودار عمق-زمان مرجع ] 5[ با کد کامپیوتری  با توجه به مقایسه‌ی نمودارهایی که از کد کامپیوتری به دست آمدند با |
| **شکل 3** مقایسه نموارهای عمق-زمان بدست آمده از کد با داده­های مرجع] 5[  نموار­های ارائه شده از مرجع] 5[ دیده می‌شود که مقادیر آن­ها بسیار نزدیک به هم بوده و ماکزیمم خطای 9.7% را دارد. پس محاسبات انجام شده با دقت بسیار بالایی انجام شده است. |

4- شبیه سازی سه درجه آزادی پرتابه سوپر کاویتاسیون

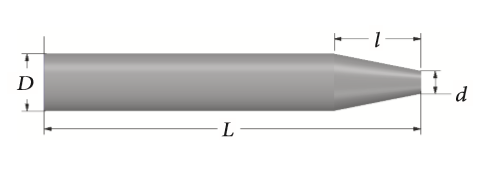
در این تحقیق پرتابه با ابعاد مشخصی (**شکل 4** را ببینید) و با سرعت اولیه 800 متر بر ثانیه با شرایط داده شده­ای (زاویه پیچ، نرخ زاویه پیچ، زاویه حمله) بر سطح آب برخورد نموده و تا عمق معینی در آب نفوذ می­کند.

همچنین به دلیل سرعت بالا­ی پرتابه پدیده سوپر کاویتاسیون رخ داده است. علاوه بر آن تاثیر زاویه ورود و تاثیر سرعت ورود، و نیز تاثیر قطرکویتاتور پرتابه بر عمق فروروی، مورد بررسی قرار گرفته است.

ضریب درگ را از رابطه زیر بدست می‌آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |

که با توجه به رابطه 16 ضریب درگ 8/0 به دست می‌آید.



**شکل 4** نمایی از پرتابه شبیه سازی شده در تحقیق [6]

4-1 تاثیر زاویه ورود

1-در این قسمت، ورود پرتابه با سه زاویه 0 درجه ،30 و60 درجه شبیه سازی و با هم مقایسه می­شود.

2-نیروی مربوط به ابتدای ورود (فاز تشکیل جریان) بسیار زیاد است و ورود زاویه دار پرتابه به سطح آب باعث کاهش پیک نیروی وارد بر پرتابه می­شود.

3-ورود پرتابه با زاویه 30 درجه نسبت به خط عمود بر سطح باعث کاهش عمق زیرروی می­شود. مثلا پرتابه برای کاهش سرعت و رسیدن به سرعت 120m/s در ورود 30 درجه به عمق 1.1m و در ورود عمود به عمق 1.5m می رسد.

4-انرژی جنبشی پرتابه متناسب با توان دوم سرعت آن است، بنابراین وقتی سرعت پرتابه از مقدار 800m/s به مقدار 20m/s می­رسد. انرژی آن (800/20)^2=1600 برابر کمتر می‌شود.

**4-1-1 برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و**

در شکل زیر برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و (یعنی بدون سرعت زاویه­ای را نشان می‌دهد.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| **شکل 5** نمودار عمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و | |
|  | |
| **شکل 6** نمودار سرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و | |
|  |
| **شکل 7** نمودار عمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

**4-1-2 برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و**

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 8** نمودار عمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل 9** نمودار سرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل 10** نمودارسرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

**4-1-3 - برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و**

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 11** لحظه بسته شدن کویتی با زاویه ورود و و |
|  |
| **شکل 12** نمودارسرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل 13** نمودار عمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

4-2 -تاثیر سرعت ورود

نکات زیر با مقایسه نتایج مربوط به سرعت ورود 800m/s با نتایج مربوط به سرعت ورود 1500m/s قابل مشاهده است:

1-موقیت اولین برخورد دم پرتابه به دیوار کویتی در هر دو سرعت 1500m/s و 800m/s تقریبا یکی است و حدود 5/7 متر صورت می­گردد.

2-پرتابه با سرعت ورود 1500m/s و در عمق 4.5m به سرعت m/s 250 می­رسد و با سرعت ورود 800m/s در عمق 3.5 متر به سرعت 250m/s می‌رسدکه نشان دهنده تاثیر کم سرعت ورود در عمق زیرروی پرتابه است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف-پرتابه با سرعت اولیه 800 متر بر ثانیه |
|  |
| شکل ب-پرتابه با سرعت اولیه 1500 متر بر ثانیه |

**شکل 14** مقایسه پرتابه با دو سرعت و با زاویه ورد به آب

4-2-1- حداکثر عمق فروروی پرتابه

حداکثر عمق فروروی پرتابه در حالتی رخ می‌دهد که پرتابه نسبت به سطح آب به صورت عمودی وارد شود و با دارا بودن زاویه حمله صفر و سرعت زاویه صفر، دم پرتابه دیرتر به دیوار کویتی برخورد کند. در این حالت به دلیل عدم حرکت پرتابه در جهت x ، سرعت کمتر میرا می‌شود. در این حالت، با توجه به پرتابه در عمق 7m به سرعت حدود 40m/s می­رسد که انرژی جنبشی پرتابه حدود (7/40)^2=0.05 برابر کمتر می‌شود که می­توان گفت عملا مقدار زیر روی پرتابه حدود 0.05m می­باشد.

4-2-2 - حداکثر عمق فروروی پرتابه

حداقل زیر روی پرتابه وقتی رخ می‌دهد که:

الف) زاویه ورود پرتابه نسبت به خط عمود بر سطح زیاد باشد.

ب) زاویه حمله پرتابه مثبت باشد.

حال اگر فرض کنیم که پرتابه بعد از برخورد به دیوار کویتی به درون کویتی باز نگردد، دم پرتابه به درون آب بیشتر فرو می‌رود و حتی چرخش پرتابه تا مرحله­ای که پرتابه به صورت عرضی به حرکت کند، ادامه پیدا خواهد کرد. که در این صورت، نیروی درگ زیادی به پرتابه وارد شده و سرعت پرتابه سریع کاهش می­یابد. این نوع حالت از حرکت، و یا حالتی بین حرکت روی نوک و حرکت عرضی احتمال رخ دادن وجود دارد.

## **4-3** **-تاثیر قطر کویتاتور بر عمق نفوذ پرتابه**

در این قسمت پرتابه با سه قطر کویتاتور متفاوت و شرایط ورود یکسان وارد آب شده­اند، با مقایسه میزان عمق طی شده پرتابه در آب، هر چه قطرکویتاتور پرتابه کمتر باشد، عمق بیشتری را طی می‌کند، در نمونه اول قطر کویتاتور نسبت به نمونه­های پرتابه شماره 2 و پرتابه شماره 3 بیشتر است. همچنین عمق طی شده کمتر می­باشد. با توجه به شکل 15 کویتی اطراف پرتابه در حال بسته شدن است.

در پرتابه شماره 2 قطرکویتاتور نسبت به پرتابه شماره 1 کمتر و نیز عمق طی شده توسط این پرتابه بیشتر می‌باشد، دراین پرتابه کویتی اطراف پرتابه بسته شده است، در آخر پرتابه شماره 3 کمترین قطر کویتاتور را نسبت به دو حالت قبل را دارد، عمق طی شده توسط این پرتابه نیز نسبت به دو حالت قبل بیشتر می‌باشد. همچنین کویتی اطراف پرتابه بسته شده است. در جدول زیر قطر پرتابه­هایی که مورد بررسی قرار گرفته­اند آورده شده است.

**جدول2** قطر پرتابه­های مورد بررسی

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **شماره پرتابه** | **قطر کویتاتور پرتابه** | **واحد** |
| **1** | 0045/0 | **متر** |
| **2** | 0025/0 | **متر** |
| **3** | 0015/0 | **متر** |

## **4-3-1 -پرتابه شماره­ی 1**

در این پرتابه قطر کویتاتور 0.0045متر می‌باشد، و با زاویه ورود به آب و وارد آب شده است.

|  |
| --- |
|  |

**شکل15** تاثیر قطر کویتاتور بر عمق فروروی پرتابه شماره 1

در شکل17 پرتابه نسبت به دو حالت پرتابه شماره 1 و پرتابه شماره 2 بیشترین قطر کویتاتور را دارد و کمترین عمق را نیز طی می­کند، همچنین پرتابه تقریبا 2.5 متر را طی کرده است.

## **4-3-2 -پرتابه شماره­ی 2**

در این پرتابه قطر کویتاتور 0.0025 متر می‌باشد، و همچنین با زاویه ورود به آب و وارد آب شده است.

|  |
| --- |
|  |

**شکل16** تاثیر قطر کویتاتور بر عمق فروری پرتابه شماره 2

پرتابه عمق تقریبا 2.95 متر را طی کرده است، در این پرتابه قطر کویتاتور نسبت به حالت قبل کمتر شده، وهمچنین عمق بیشتری را طی کرده است.

## **4-3-3- پرتابه شماره­ی 3**

در این پرتابه قطر کویتاتور 0.0015 متر می­باشد، و نیز با زاویه ورود به آب و وارد آب شده است.

|  |
| --- |
|  |

**شکل17** تاثیر قطر کویتاتور بر عمق فروروی پرتابه شماره3

پرتابه در عمق تقریبا 4.5 متر می‌باشد، نسبت به دو حالت قبل قطر کویتاتور پرتابه کمتر و پرتابه عمق بیشتری را طی کرده است.

در شکل17 کمترین قطر پرتابه در حالت پایدار می­باشد، با کمتر شدن قطر کویتاتور پرتابه از 0.0015 متر به دلیل برخورد سریع­تر پرتابه به دیواره کویتی، باعث ناپایداری پرتابه می­شود.

**5-5-برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و**

در شکل 18 دیده می‌شود که پرتابه به دیواره کویتی برخورد نموده است.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| **شکل 18**  نمایی کلی از حرکت پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل ب** |

**شکل 19** کویتی اطراف پرتابه با زاویه ورود به آب و

5**- فهرست علایم**

|  |  |
| --- | --- |
|  | عمق غوطه وری (m) |
|  | شعاع رونده (m) |
|  | شعاع کویتی (m) |
|  | سرعت کویتی (ms-1) |
|  | سرعت پرتابه (ms-1) |
|  | طول غوطه وری پرتابه (m) |
|  | مولفه نیروی عمودی پلنینگ(N) |
|  | نیروی پلنینگ ناشی از اصطکاک (N) |
|  | شعاع کویتاتور(m) |
| **علایم یونانی** |
|  | عدد کاویتاسیون |
|  | چگالی (kgm-3) |
|  | زاویه حمله (deg.) |
|  | زاویه راستای پرتابه با محور Y (deg.) |
|  | زاویه راستای نیرو با محور Y (deg.) |
|  | زاویه راستای پرتابه با محور Y (deg.) |

6- مراجع

[1]A.Ramyar, Cavitation and Super Cavitation, Malek Ashtar University of Technology,2008(in Persian)

[2]M. Moonesan, Comprehensive book of Marine Architecture Engineering, Esfahan Research Center,2010(in Persian)

[3]Albert May,” WATER ENTRY AND THE CAVITY-RUNNING BEHAVIOR OF MISSILES” NAVSEA Hydro ballistics Advisory Committee Silver Spring, Maryland 1975

[4]A. Mardani, analysis of projectile supercavitation with planning, Marine Science and Technology Complex, 2011(in Persian)

[5]H.Forouzani, B.Saranjam ,A Study on the Motion of High Speed Supercavitating Projectiles,Journal of Applied Fluid Mechanics, Voh.11,Ni.6,pp.1727,2018

[6] QingMu,YipinLv ,KangjianWang,TianhongXiong, Numerical Simulation on the Cavitation Flow of High Speed Oblique Water Entry of Revolution Body, Mathematical Problems in Engineering Volume 2019