حل عددی کویتی و پدیده تیل اسلپ یک پرتابه سوپرکاویتاسیون

زهرا الهامیان1، جلال محمدی 2، جلیل فریدونی3

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

مساله ورود به آب اجسام صلب به آب بسیار اهمیت دارد. برخورد اجسام با سطح آب را می‌توان به طور کلی بر اساس نحوه تشکیل حفره به دو گروه (ایجاد حفره توسط کشش هوا و تبخیر آب) تقسیم کرد. حرکت یک پرتابه در آب با سرعتی بیشتر از 50 متر بر ثانیه منجر به تشکیل حباب‌‌‌‌های بخار روی سطح آن می‌شود. با افزایش سرعت، بر تعداد و اندازه این حباب‌‌‌‌ها افزوده می‌شود. این حباب‌‌‌‌ها از اولین نقطه تماس پرتابه با آب یعنی دماغه شروع شده، در نهایت با پیوستن به یکدیگر به طور کامل پرتابه را در بر گرفته و آن را از تماس با آب جدا می‌سازند. در این مقاله به بررسی مسیر حرکت کویتی تشکیل شده بعد از برخورد پرتابه به آب و دسته بندی کویتی تشکیل شده با توجه به سرعت پرتابه پرداخته شده است. و نیز مدلی مناسب برای ایجاد شکل کویتی با توجه به شرایط پرتابه تحقیق ارائه شده است. سپس اعتبار سنجی انجام گرفته را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. و درآخر شبیه سازی حل عددی کویتی و پدیده تیل اسلپ پرتابه را مشاهده خواهیم کرد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

پرتابه، سوپرکاویتاسیون، کویتی، تیل اسلپ

1-مقدمه

هنگام برخورد یک جسم صلب با سرعت بسیار زیاد با سطح آب و نفوذ در آن، غلبه بر نیروی مقاوم هیدرودینامیکی هم در مرحله ابتدایی نفوذ جسم به درون آب و هم در مرحله حرکت جسم در اعماق آب، از اهمیت ویژه­ای برخوردار است. برخورد اجسام با سطح آب را می‌توان به طور کلی بر اساس نحوه تشکیل حفره به دو گروه (ایجاد حفره توسط کشش هوا و تبخیر آب) تقسیم کرد.

گروه اول شامل، برخورد جسم با سطح آب به صورت سقوط آزاد و یا برخورد جسم با سطح آب با سرعت‌های کم است. این تحلیل معمولا در طراحی شناورها، پرتابه‌های سرعت پایین و ... مورد استفاده قرار می­گیرند. در این تحلیل، آب کاملا تراکم ناپذیر و جسم معمولا صلب فرض می‌شود. با برخورد جسم جامد با سطح آب، مقداری هوا به دنبال جسم وارد آب شده، حفره­ای به شکل ساعت شنی ایجاد می‌شود[1].

گروه دوم شامل، برخورد جسم با سطح آب در سرعت‌های زیاد است. این نوع تحلیل، معمولا برای طراحی پرتابه‌های پر سرعت از اهمیت فراوانی برخوردار است. با افزایش سرعت جسم، آب به صورت یک ماده تراکم پذیر رفتار می­کند. از طرفی تغییر شکل پرتابه در برخورد با سرعت زیاد بیش تر شده، لذا فرض صلب بودن آن همیشه صحیح و مناسب نیست. در این حالت فشار منفی ایجاد شده در پشت پرتابه ، سبب تبخیر آب و ایجاد حفره می‌شود[1]**.**

حرکت یک پرتابه در آب با سرعتی بیشتر از 50 متر بر ثانیه منجر به تشکیل حباب‌‌‌‌های بخار روی سطح آن می‌شود. با افزایش سرعت، بر تعداد و اندازه این حباب‌‌‌‌ها افزوده می‌شود. این حباب‌‌‌‌ها از اولین نقطه تماس پرتابه با آب یعنی دماغه شروع شده، در نهایت با پیوستن به یکدیگر به طور کامل پرتابه را در بر گرفته و آن را از تماس با آب جدا می‌سازند. این امر، مقاومت هیدرودینامیکی در مقابل حرکت را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. این پدیده، سوپر کاویتاسیون یا کاویتاسیون توسعه یافته نام دارد. قسمت دماغه به شکل یک صفحه تخت، کویتاتور موثری است که سبب حرکت جسم در آب در رژیم سوپر کاویتاسیون می‌شود.

تحلیل نتایج آزمایش­های و بررسی‌های نظری نشان می‌دهد که در قسمت دماغه یک پرتابه متحرک در آب، ناحیه بسیار پرفشاری وجود دارد که تنش در آن می‌تواند حتی از مقاومت تسلیم پرتابه نیز بالاتر رفته، منجر به تغییر شکل پلاستیک و یا حتی تخریب پرتابه شود.

تاکنون مطالعات فراوانی به صورت تجربی، تحلیلی و عددی روی مسئله ورود به آب و مشکلات آن انجام شده، مستندات بسیاری در این زمینه منتشر شده است. اولین تحقیق تجربی در این زمینه به سال­های 1897 تا 1900 باز می­گرددکه ورتینگتون و کول با استفاده از دوربین­های عکاسی ابتدایی به یررسی حفره­های هوایی ناشی از ورود عمودی یک کره به درون آب پرداختند و بدین ترتیب، تحقیقات علمی در زمینه برخورد جامد-مایع آغاز شد. در مطالعات بعدی نیز مالوک و بل، برخی توصیفات کیفی را برای شکل حفره و مسیر کره در ورود به آب ارائه کردند

هرچند که بعدها تحقیقات بیش تری در زمینه ورود به آب و میدان جریان اطراف آن توسط دانشمندانی چون بیرخوف و کی وود، بیرخوف و آیزاکز، بیرخوف و زارلنتونلو، و آبلسون انجام شد، اما اولین پژوهش­های مدرن در حوزه برخورد یک پرتابه به سطح آب توسط می و وودهال در سال 1948 انجام شد. پس از آن نیز تا سال 1975 برخورد اجسام مختلفی مانند، گوی، موشک و سطح آب توسط می، مورد بررسی قرار با گرفت[1].



**شکل 1** برخورد پرتابه با سطح آب و تشکیل حفره کپسولی و پیوسته[1]

2- مسیر حرکت کویتی

در اين قسمت، به موضوع مسيرپرتابه در فاز کویتی با پيشران اينرسي پرداخته شده است. شرايط حركت در فاز كويتي به طور خاص در بعد از ورود به آب وجود دارد. با توجه به اینکه، كويتي ورود آب با هوا پر مي‌شود، پرتابه به طور کلی، در زمان قابل توجه فاز كويتي كامل را طي می­کند. فاكتورهايي كه بر مسير حركت در فاز كويتي و فاز كاملاً مستغرق اثر می­گذارند، كاملاً مختلف است. براي فاز كويتي، پايداري وابسته به ضرايب هيدروديناميكي نيست اما بيشتر به ممنتوم نوک و دم به دليل برخورد دم پرتابه و ديوار كويتي وابسته است.

در لحظه برخورد با آب و زمان بعد از آن، معمولاً فقط نوك پرتابه با آب در تماس است (شکل2–A ). غالباً به دليل نابالانسي، پرتابه دچار چرخش مي‌شود و دم پرتابه به ديوار كويتي برخورد می­کند. (شکل2، C و A). نيروي ضربه باعث ايجاد سرعت زاويه اي مي‌شود كه ویپ[[1]](#footnote-1) ناميده مي‌شود. ویپ براي نوك­های نازك و خط جرياني مثبت بالا است. فقط براي نوك­های تخت (مانند ديسك)، ویپ به سمت پايين است.

2**-1-برخورد دم بعد از ورود مایل**

اولين برخورد دم پرتابه با ديوار كويتي يك رخداد مهم مي‌باشد زيرا كه آن بر مسير حركت تأثير قابل توجهی می­گذارد زمان اولین برخورد به فاكتورهاي زيادي وابسته است كه در ادامه بحث مي‌شود. اگر یک پرتابه با نوک دیسکی و بدون زاویه حمله به آب برخورد کند، آن دچار یک ویپ کوچک منفی (نوک سمت پایین) می‌شود، (شکل2–C). یک نوک نیم کروی (شکل2-D)، یک ویپ مثبت نسبتا بزرگی دارد و دم به دیوارکویتی پایینی برخورد می‌کند]21[. (شکل2–B را ببینید).

غالباً، وقتي دم پرتابه به ديوار كويتي برخورد می‌کند، مقداري به داخل آب فرو می­رود و سپس از داخل آب جدا مي‌شود. در اين فرآيند، سرعت زاویه­ای ورود به آب و خروج از آب يكي است و به اين دليل پرتابه در داخل كويتي يك حركت نوساني خواهد داشت. اگر ممنتوم دم براي كاهش سرعت زاويه به صفر كافي نباشد، دم به نفوذ بيشتر به داخل ديوار كويتي ادامه می‌دهد. تا اينكه سمت جانبي رخ دهد. عموماً پرتابه در اين حالت، پايدار است و به صورت جانبي با نيروي درگ زياد و كويتي بزرگ حركت می‌کند.

2-2- مسیر حرکت کویتی

حركت روي نوك به طور خاص امکان دارد که پرتابه بر روي نوك حركت كند، و در كل مسير حركت، دم با ديوار كويتي برخورد نمی‌کند.

2-2-1-حرکت نوسانی

اگر ممنتوم وارده بر دم پرتابه براي برگرداندن پرتابه به داخل ديوار كويتي كافي باشد، حركت نوساني پرتابه درون كويتي رخ می‌دهد.

2-2-2-حرکت دایروی

تحت بعضي شرايط، بعد از برخورد دم يك پرتابه با دیوار کویتی، ديگر دم پرتابه به ديوار مقابل نمي رود و روي همان ديواري كه اولين بار با آن برخورد كرده بوده است باقي می‌ماند.(شکل2 -C) ليفت وارد بر نوك و دم پرتابه در يك جهت مي‌باشند. ممنتوم آن­ها نسبت به مركز جرم برابر و در خلاف يكديگر هستند. مسير حركت منحني ايجاد مي‌شود كه تقريباً دايروي هست[2].

2-2-3-حرکت جانبی

اگر ممنتوم ناشي شده از برخورد دم پرتابه براي از بين بردن سرعت ‌ زاويه‌اي كافي نباشد، دم به ديوار كويتي نفوذ می‌کند و غالباً بر روي جهتي تقريباً عمود بر مسير حركت قرار مي‌گيرد. اين حالت باعث ايجاد درگ خيلي زيادي مي‌شود.

معمولاً غير قابل قبول است. اما اين پديده را مي توان براي كاهش سرعت براي جلوگيري از صدمه خوردن در برخورد با كف به كار بست و همچنين از اين پديده مي توان براي كاهش عمق فرو روي در پرتاب پرتابه در آب­های كم عمق استفاده كرد[2].

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 2** مسیر حرکت در فاز حرکت کویتی[21] |

2-3- متلاشی شدن کویتی

اندازه کويتي پرتابه پيشران اينرسي بعد از ورود به آب به طور پيوسته كاهش می‌یابد تا اينكه اندازه كويتي از اندازه پرتابه كوچكتر ‌شود. موقعي كه اين وضعيت پيش آيد، قسمت عقب كويتي بر روي دم پرتابه فرود می‌آید. تأثير اين پديده وابسته به طبيعت پايداري پرتابه است. اگر پرتابه بدون سطوح پايدار كننده باشد، آن عموماً ناپايدار مي‌شود و پرتابه در جهت جانبي نسبت به مسير حركت قرار می‌گیرد[2].

2-4-طراحی مسیر حرکت

موارد زيادي از طراحي پرتابه بر روي مسير حرکت و رفتار پرتابه اثر می­گذارند که عبارتند از : شکل نوک، شکل دم، طول پرتابه، موقعيت مرکز جرم، جرم پرتابه و ممان اينرسي[2].

2-5-وابستگی مسیر حرکت به شرایط ورود به آب

مسير حركت پرتابه در ورود به آب نه تنها به طراحي پرتابه وابسته است، بلكه به شرايط آزمايشگاهي نيز وابسته است كه عبارتند از:

* زاويه ورود
* سرعت ورود
* زاويه حمله در ورود به آب (شامل هر دو مورد پيچ و ياو)
* سرعت ياو و پيچ
* فشار و جرم حجمي اتمسفر بالاي آب

2-5-1-زاویه ورود

ويپ و فشار زيرين در تعيين مسير حركت پرتابه نقش مهمي دارد و در مواقعي كه زاويه ورود نسبت به افق كم باشد، هر دو آن ­ها تأثير بزرگتري دارند.

اگر شكل كلي پرتابه يك سيلندر با يك نوك نيمه كروي باشد، پرتابه ممكن است در معرض يك ويپ بزرگ قرار گيرد و کله ملاقی رخ دهد.

همانطور كه زاويه ورود افزايش يابد شانس (برگشت پرتابه از سطح آب بدون فرو رفتن در آن) كم مي‌شود اما (فرو رفتن پرتابه در آب ولي خارج شدن از آن بعد از طي مسافتي) ممكن است هنوز اتفاق بيفتد [2].

2-5-2-سرعت ورود

سرعت ورودي زياد بيشتر به دليل صدمه ديدن نوك و بال­های پرتابه بر روي مسير حركت تأثير می‌گذارد. اما در مورد تأثير مستقيم سرعت می‌توان گفت که سرعت زياد باعث ساده شدن مسئله مسير حركت با كاهش اهميت جاذبه و نيروي فشار زيرين مي‌شود[2].

### **3-تحلیل حرکت رونده سوپر کاویتاسیون**

اساسا معادلات دینامیکی حرکت یک وسیله سوپرکاویتاسیون ماننده معادلات حرکت یک هواپیما فرموله می‌شود، با این تفاوت که وسیله سوپرکاویتاسیون در یک محیط دو فازی که دارای مشخصه­های ناهمگن و غیر یکنواخت است،کار می‌کند، در شرایط کارکرد طبیعی، سطوح کنترل جسم سوپرکاویتاسیون تنها اندکی در آب غوطه ور بوده که موجب محدود شدن نیروهای کنترلی می‌شود و ممکن است مانورینگ وسیله را با مشکل روبرو کند.

نیروهای هیدرودینامیکی به شدت تحت اثر برهمکنش بین کاویتی و جسم قرار دارند که باعث غیرخطی شدن این نیروها می‌شود. همچنین به علت نقش قابل توجه کاویتاتور در تولید نیروی لیفت مورد نیاز وسیله مرکز فشار وسیله در قسمت جلو و عموما در جلوی مرکز ثقل وسیله قرار دارد]3[. بنابراین حرکت کنترل نشده، وسیله را به سوی ناپایداری سوق می‌دهد. ساچنکو به اختصار سه مدت ممکن حرکت وسیله سوپرکاویتاسیون را که در اثر سرعت وسیله و گسترش سوپرکاویتاسیون به وجود می­آید را به صورت زیر تعریف کرده است.

3-1-حرکت داخل یک جریان با دو کاویتی(سرعت کمتر از 70 متر بر ثانیه)

به دلیل سرعت کم، دو کاویتی جزئی در لبه حمله و لبه انتهایی وسیله تولید می‌شود. شکل 3. تمام قسمت­های غوطه ور در آب می­توانند یک نیروی شناوری تولید کنند که به همراه نیروهای لیفت فین و کاویتاتور، اثر نیروی وزن جسم را خنثی می‌کنند. افزایش تماس جسم با جریان منجر افزایش شدید نیروی درگ می‌شود.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 3** حرکت با دو جریان کاویتی[4] |

3-2-حرکت در داخل یک سوپرکاویتی کاملا توسعه یافته(سرعت در حدود 50 تا 200 متر بر ثانیه)

اساساً یک وسیله سوپرکاویتاسیون در این مد حرکتی، به علت نبود نیروهای شناوری بدنه، دارای دو حالت متفاوت است. حالت اول زمانی اتفاق می‌افتد که جسم دارای سطوح کنترلی از قبیل فین‌هایی در قسمت انتهایی جسم است که می‌تواند حرکت پرتابه را در یک سطح ثابت و بدون تماس انتهای بدنه با بدنه کاویتی نگه دارد

حالت دوم زمانی رخ می‌دهد که وسیله ‌نتواند لیفت مورد نیاز برای غلبه بر نیروی وزن پرتابه را فراهم کند که در این حالت یک قسمت جزئی از بدنه وسیله از سطح پایینی کاویتی خارج شده و اصطلاحاً پلنینگ رخ می‌دهد. در این حالت، چگونگی شبیه سازی وسیله به شدت وابسته به درجه دقت پیشگویی شکل کاویتی و دینامیک وسیله است[4].

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 4** حرکت در داخل یک سوپر کاویتی کاملا توسعه یافته[4] |

3-3-حرکت با تیل اسلپ در داخل سوپرکاویتی کاملا توسعه یافته(سرعت در حدود 300 تا 900 متر بر ثانیه)

در سرعت‌های بالا، یک وسیله سوپرکاویتاسیون برخوردهای متوالی را با بدنه کاویتی تجربه می‌کند. برخورد­های متوالی که تیل اسلپ نام دارد، بواسطه اغتشاشات اولیه در زاویه پیچش و سرعت به وجود می‌آید و ممکن است که نوسان حرکت به تدریج ثابت یا میرا شود

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 5** حرکت با تیل اسلپ در داخل سوپرکاویتی کاملا توسعه یافته[4] |

4-روابط حاکم

4-1-مدل­های ارائه شده برای شکل کویتی

هنگامي که يک جسم داخل يک جریان ثابت قرار مي‌گيرد، اين مطلب منطقي است که فرض شود شکل کاويتي ثابت و نسبت به محورها متقارن است. شکل کاويتي به صورت کلي با يک طول L و ماکزيمم قطر کاويتي و يا نسبت اين دو مشخص مي‌گردد. قطر کاويتي به صورت تابعي از طول کمان موازي با خط مرکزي کاويتي مي‌باشد.

مدل‌هاي متفاوتي (تحليلي، تجربي و عددي) در طي سال‌هاي اخير براي بدست آوردن پارامترهاي مختلف کاویتی بيان شده است. واید فرمولي براي شکل کاويتاتور ديسکي و بر حسب اندازه‌گيري‌هايي که بر روي کاويتي‌هاي مختلف انجام داده بود، بدست آورده است[5]. مِي نيز مدل‌هاي مختلفي را براي کاويتاتورهاي مختلف (ديسکي، مخروطي، کره‌اي و ...) و با استفاده از داده‌هاي آزمايشگاهي بدست آورده است[5].

مدل‌هاي متفاوتي براي بررسي رفتار سوپرکاويتاسیون از جمله روش‌هاي المان مرزی[[2]](#footnote-2) و تئوری جسم باریک[[3]](#footnote-3) و ... وجود دارند. اما براي شبيه­سازي حوزه زمان ديناميک وسيله، مي­بايست ساده­ترين مدل­ها استفاده گردند، اين مطلب مخصوصاً براي موقعي که هدايت، کنترل و پايداري کل جسم مورد نظر است، حائز اهميت است.

دو نوع مدل برای کاويتي در شبيه‌سازي‌ها استفاده شده که به مدل کاويتي مانزر ریچارد و لانگینوویچ معروف می‌باشند. در هر دوي اين مدل‌ها فرض بر اين است که سطح مقطع کاويتي دايره‌اي است. شعاع کاويتي در اين حالات به صورت تابعي از طول کمان موازي با خط مرکزي کاويتي مي‌باشد. مد‌ل‌کردن کاويتي، براي اهداف شبيه‌سازي، شامل مدل‌هاي گفته شده براي کاويتي و نيز توصيف خط مرکزي کاويتي مي‌باشد.

4-1-1-مدل مانزر ریچارد

ریچارد نشان داد که نسبت طول به ماکزیمم قطر کاویتی تنها تابعی از عدد کاویتاسیون است. به عبارت دیگر نسبت فوق، مستقل از شکل کاویتاتور و تنها تابعی از می‌باشد. مدل مانزر ریچارد یک شکل متقارن محوری را برای کاویتی به واسطه روابط (1) و (2)، پیش بینی می‌کند[6]:

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

که در این جا شعاع کاویتی در مکان ζ در طول خط مرکزی کاویتی و ترتیب قطر ماکزیمم و طول ماکزیمم کاویتی است. مرکز مختصات طولی در دماغه وسیله قرار دارد.

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |
| (4) |  |

که قطر کاویتاتور و ضریب درگ کاویتاتور و عدد کاویتاسیون است. ضرایب هیدرودینامیک درگ، لیفت و گشتاور برای یک کاویتاتور دیسکی با زاویه حمله به صورت روابط(5) و (6)و (7) داده شده است[3]:

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |
| (6) |  |
| (7) |  |

ضریب درگ در زاویه حمله صفر و عدد کاویتاسیون صفر بر اساس فرمول تجربی موجود در [8] برابر 0.815 در نظر گرفته می‌شود. در مدل کاویتی مانزر – ریچارد از اثرات اعوجاج ناشی از جاذبه صرفنظر می‌شود. یک مثال از شکل کاویتی تولید شده توسط مدل مانزر – ریچارد در شکل 6 نشان داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 6** کاویتی محاسبه شده توسط مانزر ریچارد[4] |

4-2-قضیه انبساط مستقل لانگینوویچ

لانگینوویچ بيان مي‌کند که سطح مقطع‌ کاويتي به نسبت مسيري که مرکز جسم طي مي‌کند بزرگ مي‌شوند و این افزایش سطح مقطع مستقل از حرکت‌هاي قبلي و بعدي جسم مي‌باشد. معادلات کانتورهاي کاويتي لانگینوویچ نشان مي‌دهند که کاويتي به شکل بيضي مي‌باشد. روابط(8) و (9) براي شکل کاويتي لانگینوویچ بيان شده‌اند[7].

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |
| (9) |  |

در رابطه (9)، ماکزيمم شعاع کاويتي، و نشان دهنده شعاع کاويتي در يک نقطه معين در زمان روي خط مرکزي کاويتي، t زمان مصرف شده براي کاويتي از لحظه شروع تا کامل شدن، زمان لازم براي کاويتاتور براي اينکه طولي برابر با طول بدنه پرتابه را طي کند. نيز ضريب تصحيح و نيز مشتق در حوزه زمان مي‌باشد.

همان‌طور که از رابطه (8) مشاهده مي‌­شود براي حالتي که می‌باشد. همچنان محاسبه منحني کاويتي امکان‌پذير مي‌باشد. ولي براي حالتي که باشد آنگاه ديواره‌هاي کاويتي غيراستوار شده و شروع به متلاشي‌شدن و ايجاد کف مي‌نمايند. در لحظه ، کانتور بدست آمده از رابطه (8) با قسمت عمده‌اي از کاويتي تجربي در معادله (10) مطابقت دارد [7].

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

که شعاع کاويتاتور مي‌باشد. ماکزيمم شعاع کاويتاتور به صورت رابطه (11) قابل محاسبه مي‌باشد

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

همچنين در اين حالت طول نصف بدنه کاويتي به صورت رابطه (11) تقريب زده مي‌شود:

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

طول اشاره شده در رابطه (12) مي‌تواند براي محاسبه که برابر با مي‌باشد، استفاده گردد. با استفاده از فرمول‌هاي ارائه شده مي‌توان ابعاد اوليه کاويتي را محاسبه کرد. ولي براي شبيه‌سازي‌ها، مختصات خط مرکزي کاويتي نيز بايد بدست آيد. خط مرکزي کاويتي به منظور تعيين شکل کاويتي و نيز موقعيت آن نسبت به بدنه پرتابه مورد نياز است. نيروهايي مانند شناوري[[4]](#footnote-4) و دانواش[[5]](#footnote-5) به منظور تعيين شکل نهايي کاويتي بايد در نظر گرفته شوند[8].

4-3- نیروی دیواره کویتی به پرتابه (پلنینگ)

برای محاسبه نیروهای پلنینگ از تئوری حسن استفاده می­شود]9[ این مدل مطابقت خوبی با داده­های تجربی دارد و معمولاً این مدل برای محاسبه نیروهای انتهایی وسیله سوپرکاویتاسیون انتخاب می‌شود.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 7** چهار آرایش فضایی از پلنینگ وسیله و سطح مقطع خیس شده (همه نیروها و گشتاور­­ها برای مقدار مثبت تعریف شده است) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (13) |  | |
| (14) |  | |
| (15) | | |  |
| (16) | | |  |
| (17) | | |  |
| (18) | | |  |
| (19) | | |  |
| (20) | | |  |

با استخراج از رابطه نیروها می­توان سرعت لحظه­ای پرتابه را در رابطه زیر نشان داد.

|  |  |
| --- | --- |
| (21) |  |

5-اعتبارسنجی

در این بخش همه­ی محاسبات با توجه به ورودی­ها و شرایط آزمایشگاهی (مرجع]10[) انجام داده می­شود. و از آن شکل کویتی و موقعیت قرارگیری پرتابه تعیین می­گردد، سپس نتایج به دست آمده از این محاسبات با نمودار­های آزمایشگاهی موجود مقایسه می­شوند. مقادیر داده­های آزمایشگاهی در جدول 1 آورده شده است.

**جدول** 1مقادیر ورودی و شرایط آزمایشگاهی]10[

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| پارامتر | مقدار | واحد |
| جرم پرتابه | 0.00258 |  |
| ممان اینرسی |  |  |
| سرعت اولیه طولی | 159.20 |  |
| سرعت اولیه عرضی | 29.80 |  |
| وضعیت (زاویه)اولیه پرتابه | 0.1710 |  |
| سرعت (زاویه)اولیه پرتابه | 59.89 |  |
| طول پرتابه | 40.13 |  |
| قطربزرگ پرتابه | 5.51 |  |
| قطرکوچک پرتابه | 5.18 |  |

5-1-مقایسه اشکال کویتی بدست آمده ازکد کامپوتری با اشکال مرجع]10[

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل 8** الف) شکل بدست آمده از مرجع ]10[ ب) شکل بدست آمده از کد کامپیوتری

در شکل الف که از مرجع ]10[ آورده شده است، لحظه ورود به آب پرتابه و ایجاد کویتی را نشان می‌دهد و در شکل ب که با توجه به کد کامپیوتری می‌باشد پرتابه را در لحظه ورود به آب مشاهده می‌شود، با توجه به دو شکل بالا موقعیت پرتابه دقیقا در وسط کویتی می‌باشد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل 9** الف) شکل بدست آمده از مرجع ]10[ در زمان 0.8ms ب) شکل بدست آمده از کد کامپیوتری در زمان0.8 ms

درشکل الف که مربوط به مرجع ]10[ می‌باشد، موقعیت پرتابه در زمان 0.8ms را نشان می‌دهد و در شکل ب نیز موقعیت پرتابه در زمان 0.8ms بدست آمده است ، با توجه به دو شکل پرتابه از مرکز کویتی کمی به سمت راست دیواره کویتی در حرکت است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل 10 الف**) شکل بدست آمده از مرجع ]10[ در زمان 1.6ms ب) شکل بدست آمده از کد کامپیوتری در زمان تقریبا 1.6ms

با توجه به شکل الف، موقعیت پرتابه در زمان 1.6ms را نشان می‌دهد و در شکل ب نیز موقعیت پرتابه در زمان تقریبا 1.6ms بدست آمده است، با مقایسه این دو شکل، پرتابه همچنان به سمت راست دیواره کویتی در حرکت است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل** 11 الف) شکل بدست آمده از مرجع ]10[ در زمان 2.4ms ب)شکل بدست آمده از کد کامپیوتری در زمان تقریبا 2.4ms

در شکل الف موقعیت پرتابه در زمان 2.4ms و در شکل ب نیز موقعیت پرتابه در زمان تقریبا2.4ms می‌باشد، با مقایسه این دو شکل پرتابه همچنان به سمت راست دیواره کویتی در حرکت و تقریبا به دیواره رسیده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل 12 الف)** شکل بدست آمده از مرجع ]10[ در زمان3.2ms ب) شکل بدست آمده از کد کامپیوتری در زمان تقریبا 3.2ms

در شکل الف، موقعیت پرتابه در زمان3.2ms و در شکل ب نیز موقعیت پرتابه در زمان تقریبا 3.2ms را نشان می‌دهد، با مقایسه دو شکل پرتابه­ای که به سمت راست دیواره کویتی در حرکت بوده است اکنون به دیواره سمت راست کویتی رسیده و به دیواره برخورد نموده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل الف |
|  |
| شکل ب |

**شکل 13** الف) شکل بدست آمده از مرجع ]10[ در زمان 4msب) شکل بدست آمده از کد کامپیوتری در زمان تقریبا 4ms

شکل الف موقعیت پرتابه در زمان 4ms و شکل ب نیز موقعیت پرتابه در زمان تقریبا 4ms را نشان می‌دهد، با مقایسه و دقت به این دو شکل پرتابه بیشتر از حالت قبل یعنی زمان 4ms به دیواره سمت راست کویتی نفوذ کرده است.

با توجه به شکل کویتی و همچنین موقعیت پرتابه در داخل کویتی بدست آمده از کد کامپیوتری با شکل­های مرجع ]10[ شباهت بسیاری دارد و این اعتبار کد این پروژه را بیان می‌کند

6- حل عددی کویتی و پدیده تیل اسلپ

همانطور که دربخش­های قبل گفته شده است، در سرعت‌های بین 300 تا 900 متر بر ثانیه پرتابه در سرعت بالا قرار دارد، پرتابه سوپرکاویتاسیونی برخوردهای متوالی را با بدنه کاویتی تجربه می‌کند.که این برخورد­های متوالی تیل اسلپ نام دارد که بواسطه اغتشاشات اولیه در زاویه پیچش و سرعت به وجود می­آید و ممکن است نوسان حرکت به تدریج ثابت یا میرا شود.

6-1-برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 14** لحظه بسته شدن کویتی پرتابه با زاویه ورود و |
|  |
| **شکل15** نمودارسرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل 16** نمودارعمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

6-2-برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 17** لحظه بسته شدن کویتی پرتابه با زاویه ورود و |
|  |
| **شکل 18** نمودارسرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| **شکل 19** نمودارعمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

6-3-برخورد پرتابه به آب با زاویه ورود به آب و

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 20** لحظه بسته شدن کویتی پرتابه با زاویه ورود و |
|  |
| **شکل 21** نمودارسرعت-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |
|  |
| شکل 22 نمودارعمق-زمان پرتابه با زاویه ورود به آب و |

7-بررسی پدیده تیل اسلپ با وو

در این قسمت برای نشان دادن پدیده تیل اسلپ، تصاویری از پرتابه که ابتدا در مرکز کویتی قرار دارد و بعد به سمت راست دیواره کویتی حرکت می‌کند، و پس از برخورد به دیواره کویتی، قسمتی از پرتابه از کویتی خارج می‌شود، در ادامه پرتابه به سمت چپ دیواره کویتی حرکت می‌کند، و باز هم بعد از برخود پرتابه به دیواره کویتی، قسمتی از پرتابه از کویتی خارج شده است و دوباره به سمت مرکز کویتی در حرکت است را نشان داده شده است. در این قسمت عکس­های گرفته شده از شکل 23 تا شکل 36 مربوط به کویتی اطراف پرتابه می‌باشد.

|  |
| --- |
|  |
| **شکل 23** در شکل23 برای نشان دادن حرکت­های نوسانی پرتابه یا همان پدیده تیل اسلپ، ابتدا تصویر پرتابه را در مرکز کویتی نشان داده شده است را به عنوان مبدا حرکت پرتابه در نظر گرفته شده است. |
|  |
| **شکل 24** در شکل 24 حرکت پرتابه را از مرکز به سمت راست کویتی مشاهده می‌شود،که نشان دهنده پدیده تیل اسلپ می‌باشد. |
|  |
| **شکل 25** همانگونه که مشاهده می‌شود، پرتابه تقریبا به دیواره سمت راست کویتی رسیده است. |
|  |
| **شکل 26** در شکل 26 پرتابه که از مرکز به سمت راست کویتی در حرکت بوده، اکنون به دیوار کویتی برخود نموده است. |
|  |
| **شکل 27** همان طور که در شکل 27 مشاهده می‌شود، پرتابه که به سمت راست کویتی در حرکت بوده است، به دیواره کویتی برخورد نموده و همچنین قسمتی از پرتابه از دیواره کویتی در حال خارج شدن است**.** |
|  |
| **شکل 28** با توجه به شکل­ 28 که پرتابه به دیواره کویتی برخورد نموده و قسمتی از پرتابه از کویتی خارج شده است، این حداکثر مقداری است که از کویتی خارج شده است**.** |
|  |
| **شکل 29** در شکل 29 قسمتی از پرتابه که از کویتی خارج شده است در حال داخل شدن به کویتی می‌باشد. |
|  |
| **شکل 30** در اینجا می‌توان گفت تمام قسمت بدنه پرتابه به داخل کویتی بازگشته است و به سمت چپ دیواره کویتی در حرکت است. |
|  |
| **شکل 31** پرتابه که از مرکز کویتی گذشته است و به سمت چپ کویتی در حال حرکت است**.** |
|  |
| **شکل 32** پرتابه که به سمت چپ در حال حرکت بوده، تقریبا نزدیک به دیواره سمت چپ کویتی بوده است. |
|  |
| **شکل 33** با توجه به توضیحات شکل­های قبل پرتابه­ای که به سمت چپ کویتی در حرکت بوده و به دیواره برخورد کرده است اکنون با توجه به شکل 33 قسمتی از پرتابه از دیواره سمت چپ کویتی خارج شده است. |
|  |
| **شکل 34** با توجه به شکل­های قبل بعد از برخورد پرتابه به دیواره سمت چپ کویتی قسمتی از پرتابه از کویتی خارج شده بوده است، اکنون در شکل34 قسمتی از پرتابه خارج شده از کویتی در حال داخل شدن به کویتی است. |
|  |
| **شکل 35** در اینجا تمام قسمت بدنه پرتابه به داخل کویتی وارد شده است و اکنون به سمت راست کویتی در حال حرکت است. |
|  |
| **شکل36** پرتابه از سمت چپ دیواره کویتی به سمت راست در حرکت بوده و اکنون به مرکز کویتی که همان مبدا حرکت بوده است رسیده است. |

8**- فهرست علایم**

|  |  |
| --- | --- |
|  | ماکزیمم شعاع کاویتاتور(m) |
|  | عمق غوطه وری (m) |
|  | شعاع کویتاتور (m) |
|  | شعاع کویتی (m) |
|  | سرعت کویتی (ms-1) |
|  | سرعت پرتابه (ms-1) |
|  | مولفه نیروی عمودی پلنینگ(N) |
|  | نیروی پلنینگ ناشی از اصطکاک (N) |
| **علایم یونانی** | |
| ζ | مکان کویتی(m) |
|  | زاویه راستای پرتابه با محور Y (deg.) |
|  | سرعت زاویه­ای لحظه ای |
|  | زاویه راستای نیرو پرتابه با محور Y (deg.) |
|  | زاویه راستای سرعت پرتابه با محور Y (deg.) |
|  | زاویه حمله (deg.) |
|  | عدد کاویتاسیون |
|  | چگالی (kgm-3) |
| **زیرنویس­ها** | |
|  | آب |

9- مراجع

[1]H. Forozani, B.Saranjam, R.kamali, E.CHavoshi, Time-resolved elastoplastic impact analysis of high-speed projectiles with water surface, Shahroud University of Technology,2017(in Persian)

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

[3]Savchenko Yu. N., Vlasenko Yu. D., and semenenko V. N., experimental study of high-speed cavitated flows, Int. J. of fluid mechanics research, 1999, 26, N0.3 , pp. 365-364.

[4]Seong Sik Ahn,” AN INTEGRATED APPROACH TO THE DESIGN OF SUPERCAVITATING UNDERWATER VEHICLES, Georgia Institute of Technology, August 2007

[5]Savchenko, Y. N., \Control of Supercavitation Flow and Stability of Supercavitating Motion of Bodies," RTO AVT lecture series on supercavitating °ows, Von Karman Institute, Brussels Belgium, February 12-16 2001.

[6]R. L. Waid, “Cavity shapes for circular disks at angles of attack” CIT Hyd. Rpt. E-73.4, 1957.

[7]A. May, Water Entry and Cavity-Running Behavior of Missiles, Arlington, VA, SEAHAC TR 75-2, Naval Sea Systems Command, 1975.

[8]G. V. Logvinovich, Hydrodynamics of Flows with Free Boundaries, Kyiv, Trudy TsAGI, 1980.

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

[10]Tadd T.Truscott, David N,beah, Shallow Angle Water of Ballistic Projectiles,Proceedings of the 7th international Symposium on cavitation Preprint,2009

1. . whip [↑](#footnote-ref-1)
2. boundary-element [↑](#footnote-ref-2)
3. slender-body [↑](#footnote-ref-3)
4. Buoyancy [↑](#footnote-ref-4)
5. Downwash [↑](#footnote-ref-5)