یادداشت فنی

شبیه‌سازی سه‌بعدی برخورد پرتابه استوانه‌ای به سطح آب به منظور پیش‌بینی رفتار پرتابه و تنش‌های وارده به اجزای آن

محمدحسین مقدم[۱*]، محمدمهدی جلیلی[۲]، اصغر دشتی رحمت آبادی[۳] و علیرضا شفیعی[۴]

[۱] کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد؛ mh.moqaddam@gmail.com
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد؛ jalili@yazd.ac.ir
[۳] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد؛ dashti@yazd.ac.ir
[۴] دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد؛ arshafiei@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

کلمات کلیدی:
پرتابه
برخورد
روش اویلری-لاگرانژی
LS-DYNA

چکیده

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر برخورد اجسام به سطح آب در طراحی سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. نیروی برخورد با آب در شناورهای تندرو و ضربه امواج به سکوها از نمونه های متداول این پدیده هستند. بررسی پدیده برخورد با استفاده از روشهای تحلیلی به علت پیچیدگی فراوان آن عملاً امکان‌پذیر نیست. همچنین ساخت مدل و انجام آزمایش به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. تحقیقات متعددی در زمینه برخورد سازه‌های مختلف به سطح آب صورت پذیرفته است که تعامل بین سازه و سیال با توجه به تغییر شکل زیاد سیال، تحلیل مسائل را با مشکل مواجه می‌نماید. در این پروژه برخورد یک پرتابه استوانه‌ای شکل با سطح آب در سرعت‌ها و زاویه‌های مختلف با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی توسط نرم‌افزار LS-DYNA بررسی شده است. برای مدل‌سازی، ابتدا مدل سه‌بعدی پرتابه بوسیله نرم‌افزار SolidWorks تهیه شده و سپس در محیط نرم‌افزار LS-DYNA شبکه بندی و تکمیل شده و مدل آب و هوا نیز در همین محیط ایجاد گردیده است. شبیه‌سازی با تعریف شرایط مرزی صورت پذیرفته است که نتایج آن نشان‌دهنده تاثیرات زیاد تغییر سرعت پرتابه در افزایش تنش، کرنش پلاستیک و همچنین کاهش سرعت پرتابه در اثر برخورد با آب است.

Dimensional Impact Simulation of Cylindrical Projectile with Water Surface to Predict Projectile's Behavior and the Stresses Induced in it

Mohammad Hossein Moghaddam[1*], Mohammad Mahdi Jalili[2], Asghar Dashti[3], Alireza Shafiei[4]

[1] MSc, Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, mh.moqaddam@gmail.com
[2] Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, jalili@yazd.ac.ir
[3] Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, dashti@yazd.ac.ir
[4] Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, arshafiei@yazd.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 7 Sep. 2017
Accepted: 31 Jan. 2018

Keywords:
Projectile
Impact
Euler–Lagrange method
LS-DYNA

ABSTRACT

Prediction of hydrodynamic loads during water impact has great significance in the structural design of vehicle. Impact load of fast crafts with water surface and the slam force of waves on the members of offshore structure is common examples of this phenomenon. There is not any available theoretical tool to exactly handle this complicated phenomenon and the experimental procedures in the laboratory are both time-consuming and expensive. Several studies has been done on impact to various structures from the water. Dependence of the solution of the problem to the change in the boundary shape of the water surface, makes the problem extremely complex and difficult to solve analytically. In this project, impact of a cylindrical projectile on the water surface at different entry velocities and entry angles is examined using Euler–Lagrange method in LS-DYNA software. Three-dimensional simulation and meshing of the body has been perform in LS-DYNA and then the water and the air model has been created. Simulation results with Specified boundary conditions indicate significant effect of velocity changes on the stress, plastic strain and reduce the velocity of the projectile on water impact.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

۱ - مقدمه

امروزه با پیشرفت روش‌های عددی و ظرفیت سخت‌افزاری سیستم‌های محاسباتی، دستیابی به پیش‌بینی‌های جامع‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر از شبیه‌سازی‌های عددی مسائل مهندسی رو به افزایش است. با توجه به گستره وسیع دانش مهندسی مکانیک، انتظار می‌رود که بخش قابل توجهی از کاربردها و توسعه‌های مطالعات عددی نیز در این حوزه صورت پذیرد. یکی از مسائل پیچیده مهندسی مکانیک که عموماً با روش‌های عددی حل می‌گردد، پدیده‌های برخورد سیال با سازه[1] است.

تحلیل برخورد دینامیک اجسام جامد با سطح آب قدمتی بیش از ۷۰ سال دارد. پیش‌بینی صحیح نیروهای برخورد با آب، به ویژه در لحظات بحرانی برخورد که نیرو می‌تواند منجر به آسیب دیدگی و تخریب جسم گردد، از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در سه دهه اخیر محققین زیادی با استفاده از روش‌های مختلف به بررسی مسائل ورود جسم به آب پرداخته‌اند. پژوهش‌های انجام شده را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود: پژوهش‌های آزمایشگاهی، حل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی [۱].

پدیده ورود یک جسم در سیال به فازهای برخورد جسم با سیال در لحظه تماس اولیه، آغاز نفوذ در سیال به همراه پاشش، تشکیل کاواک[2]، از بین رفتن کاواک و پیدایش جت تقسیم می‌گردد [۲].

برخورد اجسام با آب پدیده‌ای است با تاریخچه طولانی، که بشر از قدیم با آن آشنا بوده است. نمونه‌ای از آن، برخورد یک پرتابه با سطح آب می‌باشد که در لحظات اولیه حداکثر شوک به‌واسطه نیروی ضربه‌ای به بدنه آن وارد می‌شود. مدت زمان این نیرو که در یک نقطه روی سازه اندازه‌گیری می‌شود کسری از میلی‌ثانیه می‌باشد و با زمان در حال تغییر است. از طرفی مقدار نیرو به چگونگی زاویه برخورد سازه به سطح آب نیز بستگی دارد [۳].

هنگامی که جسمی با سرعت معین با سطح آب برخورد می‌نماید، یک شتاب منفی از طرف آب به جسم وارد شده و باعث کاهش سرعت و هم‌زمان با آن، اعمال نیروی هیدرودینامیکی به جسم می‌شود. این شتاب که در کسری از میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد باعث ایجاد ضربه به اجزاء و تجهیزات داخلی شده که در صورت عدم پیش‌بینی آن می‌تواند در لحظه برخورد باعث آسیب جدی و چه بسا منجر به از کار افتادگی مجموعه گردد. علاوه بر آن نیروها می‌توانند باعث به هم‌خوردن وضعیت آب‌بندی مجموعه و در نتیجه موجب نشتی آب به داخل محفظه شوند که موجب از کار افتادگی سیستم‌های داخلی می‌شود [۴].

معادله حرکت جسم در حین ورود به سیال که از لحظه تماس جسم با سیال شروع می‌شود به صورت رابطه (۱) خواهد بود [۲]:

$$\frac{Mdv}{dt} = -\frac{1}{2}c_x\rho A v^2 - m\frac{dv}{dt} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، M جرم پرتابه، v سرعت آن، t زمان، c_x ضریب درگ، ρ چگالی سیال، A مساحت بخش میانی بدنه و m جرم افزوده می‌باشد. حرکت بدنه یک بعدی فرض شده است. حتی با در نظر گرفتن این فرض ساده، c_x ضریب درگ و m متغیر بوده و تابعی از هندسه بخش تحت تاثیر برخورد، شکل سطح آزاد سیال و هندسه حرکت می‌باشد. علاوه بر این، برخورد پرتابه به سطح آب با زاویه پیچ، باعث بوجود آمدن حرکتی چرخشی علاوه بر حرکت انتقالی آن در آب می‌گردد. بنابراین حل تحلیلی موضوع غیر ممکن می‌شود [۵] و باید از روش‌های عددی همچون روش اجزای محدود بهره گرفت. اخیرا تحلیل‌های اجزای محدود به طور گسترده‌ای برای تحلیل مسائل دینامیک گذرا مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]. این روش بویژه برای بررسی برخورد پرتابه‌های سرعت‌بالا در آب مورد توجه می‌باشد [۷].

با ایجاد نرم‌افزارهای کاربردی و پیشرفته در علوم کامپیوتر و ریاضی، حل عددی مسائل و علوم مهندسی توسعه فراوانی یافته و روش‌های گوناگونی برای حل این‌گونه مسائل ابداع شده است. با این روش‌ها مسائلی با معادلات ریاضی پیچیده قابل تحلیل شدند. هر چند که در روش شبیه‌سازی عددی، محاسبات به صورت دستی وقت‌گیر بود، اما با کمک رایانه می‌توان تعداد زیاد مراحل محاسبات را در زمان کوتاه انجام داد [۸]. با در نظر گرفتن نوع مسئله و فرضیاتی که برای ساده‌سازی آن در نظر گرفته می‌شود، مدل‌های ریاضی گوناگونی برای بررسی اثر متقابل سیال-سازه بوجود می‌آید. تمامی این مدل‌های ریاضی از معادله حاکم ناویر-استوکس (معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم) حاصل می‌گردد و با صرف‌نظر از برخی از عبارات، دسته‌بندی می‌گردند. همچنین تعریف مسائل مقدار مرزی برای هریک از مدل‌ها متفاوت می‌باشد [۳].

سیال، پایه و رکن اصلی تحلیل‌های FSI می‌باشد و حل آن نیاز به دامنه حل مناسب دارد، بنابراین انواع مدل‌سازی‌های مختلف تاکنون برای آن ارائه شده است. این مدل‌سازی‌ها به سه دیدگاه کلی لاگرانژی، اویلری و مدل ترکیبی لاگرانژی و اویلری با عنوان ALE[3] تقسیم می‌شوند.

در روش آنالیز لاگرانژی، گره‌ها نسبت به ماده در جای خود ثابت هستند و المان‌ها همانطور که ماده تغییر شکل پیدا می‌کند دچار تغییر شکل می‌شوند. المان‌های لاگرانژی همواره صد در صد از یک ماده تشکیل شده‌اند، بنابراین شرایط مرزی ماده، منطبق بر محدوده المان است[۱]. قدرت بالای این روش در پیش‌بینی مرزهای ماده و همچنین سرعت و جابجایی مواد و حفظ تاریخچه حرکت در طول زمان حل از محاسن آن می‌باشد [۳].

در روش اویلری، برخلاف روش لاگرانژی، گره‌ها در جای خود ثابت هستند و ماده در میان شبکه حرکت می‌کند یا تغییر شکل می‌دهد. المان‌های اویلری ممکن است که صد در صد از یک ماده تشکیل نشده باشند و ممکن است که از چندین ماده و یا کاملا از فضای خالی تشکیل

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

شده باشند. بنابراین شرایط مرزی هر ماده اویلری باید در هر بازه زمانی حل، محاسبه شود و مرز هر ماده مشخص گردد [۹].

برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های لاگرانژ و اویلر، روشی براساس تلفیق آن‌ها با نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش هرگاه تغییر فرم المان‌های لاگرانژی بیش از حد مجاز باشد با استفاده از روش اویلری، ماده در درون سلول جابجا شده و شبکه‌بندی جدید لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی، ایجاد می‌گردد. تفاوت این روش با روش اویلر در این است که شبکه در فضا ثابت نیست. به عبارت دیگر در گام دوم حل، شبکه لزوماً به موقعیت اولیه خود باز نمی‌گردد بلکه در موقعیت بهینه قرار می‌گیرد [۱۰ و ۱۱]. بدین ترتیب میزان تغییر شکل المان‌ها و همچنین میزان جابجایی مواد در بین المان‌ها حداقل خواهد بود. در این روش در هر المان تنها یک ماده می‌تواند وجود داشته باشد [۳].

اولین پژوهشی که در مورد تعیین تحلیل نیروهای برخورد به آب منتشر شده است به سال ۱۹۲۹ باز می‌گردد. ون کارمن با استفاده از اصول ساده همچون بقای مومنتوم و مفهوم جرم افزوده، نیروهای برخوردی را که به هنگام ورود به آب شناورها به آن‌ها اعمال می‌شوند، محاسبه کرده است. بر مبنای نظریه او، تعیین نیروی حداکثر برخورد وابسته به تعیین جرم افزوده و مشتق آن است [۱۲]. واگنر در سال ۱۹۳۲ این روش را توسعه داد و باعث ایجاد یک تئوری مناسب برای حل این‌گونه مسائل شد [۱۳].

هاگی وارا و یوهارا در سال ۱۹۷۶ آزمایشی برای بدست آوردن حداکثر فشار در خط مرکزی سیلندر جهت تحلیل کرنش در یک صفحه معادل انجام دادند [۱۴]. کمبل و وینبرگ در سال ۱۹۸۰ یک مقدار ضریب کوبش را به صورت تجربی بدست آوردند [۱۵].

در سال ۱۹۹۱، میلو مسئله ورود به آب کره‌های صلب را بررسی کرد. او یک حل تحلیلی برای تعیین نیروهای برخورد در حین ورود زاویه‌دار کره به آب را توسعه داد [۱۶ و ۱۷]. در همین سال هویسون نتایج تحلیلی گذشته در مورد برخورد اجسام دوبعدی با سطح آب را خلاصه کرد و گسترش داد [۱۸].

آریستوف و همکاران در سال ۲۰۰۹، مطالعاتی تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد ورود به آب کره‌های آب‌گریز[۴] و استوانه‌های عمودی انجام دادند [۱۹]. تئوری کوبش[۵] باعث شد که مسائل، بدون محاسبات پر زحمت دینامیکی به راحتی حل شوند ضمن آن‌که از تاثیر نیروهای شناوری، درگ و لزجت دینامیکی نیز صرف‌نظر شده است. اما مشکل عمده این روش زمانی است که جسم از شناوری[۶] قابل توجهی برخوردار باشد [۱۲و۱۳].

گرچه تاکنون حل‌های تحلیلی مختلفی برای مسئله ورود به آب اجسام گوناگون ارائه شده است، اما این روش‌ها با گسترش قدرت رایانه‌های امروزی جای خود را به شبیه‌سازی‌های عددی داده‌اند [۱].

امروزه در مسائل ضربه به دلیل تقابل جسم جامد با سیال، روش دیگری به نام روش شبکه‌بندی اویلری-لاگرانژی ابداع شده است. این روش مشکلات روش المان محدود که به دو صورت مجزای اویلری و لاگرانژی ارائه می‌شده است را ندارد و می‌توان مسائل تأثیر متقابل سازه و سیال را با آن حل نمود. به عنوان مثال می‌توان به تحلیل برخورد پوسته کپسول سرنشین‌دار فضایی با سطح آب که توسط تات و همکاران در سال ۲۰۰۴ انجام پذیرفته است، اشاره کرد. در این بررسی، مسئله با روش ALE حل و آن‌گاه با نتایج تجربی حاصل از آزمایشات مقایسه شده است [۲۰].

اکیولت در سال ۲۰۰۲ تئوری کوبش دو بعدی و روش ALE را در نرم افزار LS-DYNA در مسائل برخورد با آب برای یک جسم با سطح مقطع گوه‌ای شکل مقایسه کرد. در این مقاله مقایسه‌ای بین نتایج تئوری و نتایج نرم‌افزار ارائه شده است [۲۱].

هیوز و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش المان محدود به پیش‌بینی تنش‌های وارد شده به سازه یک هلیکوپتر فلزی در اثر سقوط در آب با استفاده نرم‌افزار LS- DYNA3D پرداخته است [۲۲].

وی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثرات تغییر سرعت و زاویه برخورد یک اژدر با آب بر روی پارامترهایی همچون تراژکتوری، جابجایی و سرعت پرتابه و ضریب درگ با استفاده از نرم‌افزار MSC-DYTRAN پرداختند [۴].

هیوز و همکاران در سال ۲۰۱۳ چارچوب ترکیب روش اجزای محدود و روش هیدرودینامیک ذرات نرم[۷] را مورد بررسی قرار دادند [۲۳].

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر برخورد یک پرتابه به سطح آب به منظور پیش‌بینی تنش‌های وارده به اجزای آن به کمک روش ALE با ایجاد هندسه‌ی کامل، شبیه‌سازی دقیق شرایط مرزی، برهم‌کنش بین اجزا و تولید شبکه‌ی اجزای محدود با کیفیت با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA می‌باشد. همانطور که در مقالات و پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود، تأثیر تغییر سرعت و زاویه برخورد، در تنش‌های وارد شده به سازه بررسی نگردیده است، بنابراین در این پژوهش تأثیر این تغییرات در تنش اعمالی به پرتابه بررسی می‌گردد.

۱- ایجاد مدل

۱-۲- تولید هندسه پرتابه

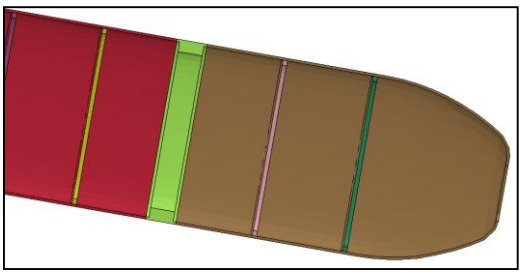
سازه پرتابه از سه قسمت اصلی دماغه، بدنه و عقبه تشکیل شده است که پوسته بیرونی استوانه‌ای هریک از بخش‌ها توسط رینگ‌های داخلی تقویت شده‌اند و بخش‌ها توسط فلانج‌های وصل شده به پوسته‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند. برای تهیه هندسه پرتابه، ابتدا مطابق با ابعاد اندازه‌گیری شده پوسته و سایر اجزا، مدل اولیه هر یک از آن‌ها تهیه شده و سپس در موقعیت اصلی مونتاژ می‌گردند. مشخصات اصلی پرتابه در جدول ۱ و هندسه آن در شکل ۱ نشان داده می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

جدول ۱- مشخصات پرتابه

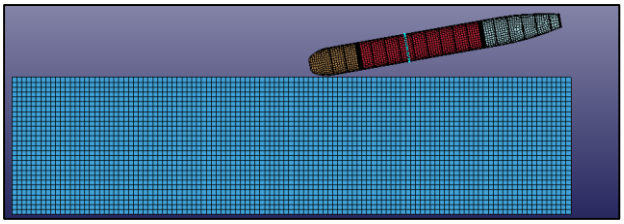
مشخصه	مقدار
طول [mm]	۴۰۰۰
قطر [mm]	۴۰۰
ضخامت پوسته [mm]	۴
وزن [kg]	۳۰۰
جنس	آلومینیوم



شکل ۱- هندسه پرتابه

۲-۲- تولید شبکه[۸]

هدف از تولید شبکه‌ی اجزای محدود، توزیع مناسب المان‌ها و گره‌ها روی مرز و درون مدل‌های هندسی است؛ به گونه‌ای که کمترین خطای محاسباتی را به‌دنبال داشته باشد [۲۴]. مدل نهایی مساله برخورد در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل۲- مدل نهایی مساله

۳- شبیه سازی و نتایج آن

۳-۱- استقلال از شبکه

یکی از ویژگی‌های روش اجزای محدود، تقریبی بودن نتایج آن است که ارزیابی دقت نتایج را امری اجتناب‌ناپذیر می‌کند. اندازه و یا تعداد المان‌هایی که برای ایجاد شبکه‌ی اجزای مدل به‌کار می‌رود، بر میزان انطباق نتایج با مقدار واقعی آن تأثیرگذار است. با افزایش تعداد المان‌ها، زمان محاسبات افزایش می‌یابد. بنابراین، لازم است مصالحه‌ای بین زمان محاسبات و دقت نتایج در نظر گرفته شود. برای این‌کار از آزمون هم‌گرایی استفاده می‌شود. در این آزمون، مدل تحت شرایط بارگذاری خاصی قرار گرفته و حل با تعداد المان‌های مختلف برای آن انجام می‌گیرد. سپس نتایج با یکدیگر مقایسه شده و بزرگترین اندازه المان از بین دو مقداری که اختلاف نتایج آن‌ها قابل قبول است، به‌عنوان انتخاب نهایی برای تعیین تعداد المان در شبکه‌بندی‌بندی مدل استفاده می‌شود.

در این پژوهش همگرایی در دو مرحله انجام می‌شود که در مرحله اول تعداد المان‌های سازه و در مرحله دوم تعداد المان‌های محیط تغییر می‌کند. به منظور مقایسه نتایج از تنش فون مایسز وارد بر بدنه در نقطه تماس سازه با آب استفاده می‌شود. در جدول ۲ اندازه المان-های انتخاب شده و نتایج مربوط به تنش نشان داده شده است.

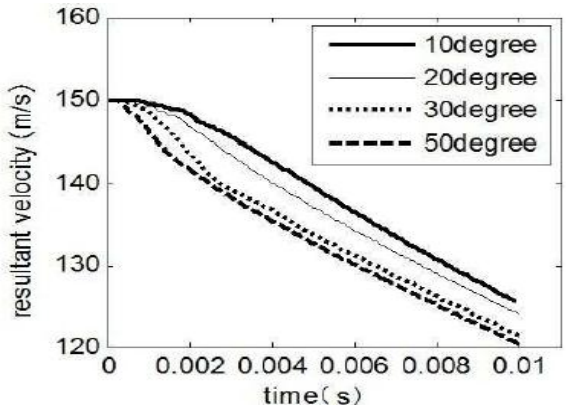
جدول ۲- اندازه المان-تنش وارد بر سازه

اندازه المان آب [mm]	اندازه المان سازه [mm]	تنش وارد بر سازه [MPa]	میزان تغییر [%]
۵۰	۲۰	۲۶۰	-
۵۰	۱۵	۲۹۳	۱۲/۷
۳۵	۱۵	۲۸۰	۵/۱
۲۵	۱۵	۲۷۰	۳/۵
۱۵	۱۵	۲۷۳	۱/۱

بنابراین با توجه به جدول ۲ اندازه ۱۵ میلی‌متر برای المان سازه و اندازه ۲۵ میلی‌متر برای المان محیط انتخاب می‌گردد.

۳-۲- صحه‌گذاری مدل

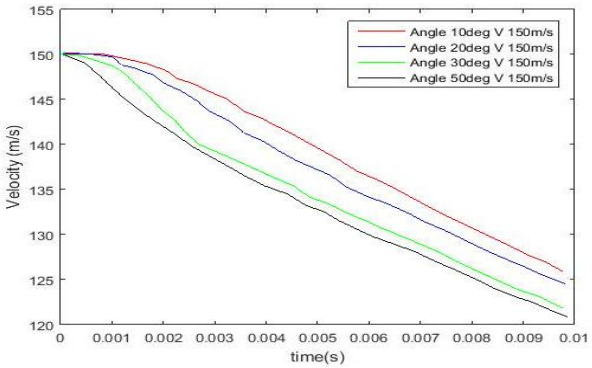
صحه‌گذاری مدل، برای حصول اطمینان از درستی اقدامات و فرضیات در نظر گرفته شده جهت آماده‌سازی مدل‌های اختصاص داده شده برای تحلیل انجام می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی، از نتایج شبیه‌سازی برخورد اژدر با آب استفاده گردید [۴]. با توجه به تفاوت بین مشخصات اژدر ارائه شده و پرتابه استوانه‌ای مورد بررسی در این پژوهش، در ابتدا مدلی از اژدر در نرم‌افزار LS-DYNA مطابق مرجع [۴] تهیه گردید و سپس فرضیات تعیین شده در پژوهش مطابق با روند تعیین شده در ایجاد مدل، در نظر گرفته شد تا مقایسه مدل‌سازی و شبیه‌سازی امکان‌پذیر گردد. در پژوهش انجام شده توسط وی، شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MSC-DYTRAN انجام گردیده است که در آن جرم سازه ۱۵۰ کیلوگرم و به صورت پوسته می‌باشد و رفتار اژدر با سرعت ۱۵۰ متر بر ثانیه با زوایای برخورد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درجه بررسی شده است. در ادامه به مقایسه رفتار اژدر مدل شده در نرم‌افزار LS-DYNA (شکل ۴) با نتایج ارئه شده توسط وی و همکاران (شکل ۳) پرداخته می‌شود.



شکل ۳- تغییرات سرعت برخورد با آب بر حسب زمان با تغییر در زاویه برخورد در نرم‌افزار MSC DYTRAN [۴]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

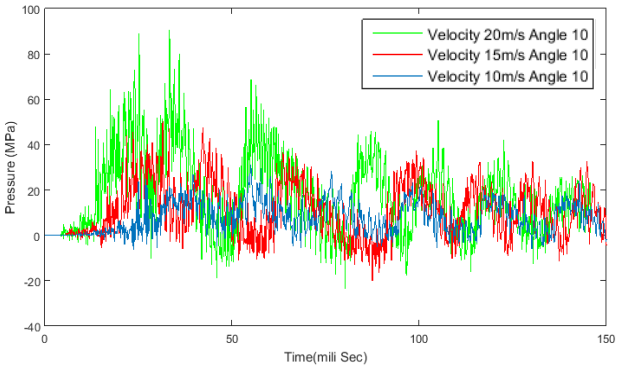


شکل ۴- تغییرات سرعت برخورد با آب بر حسب زمان با تغییر در زاویه برخورد در نرم‌افزار LS-DYNA

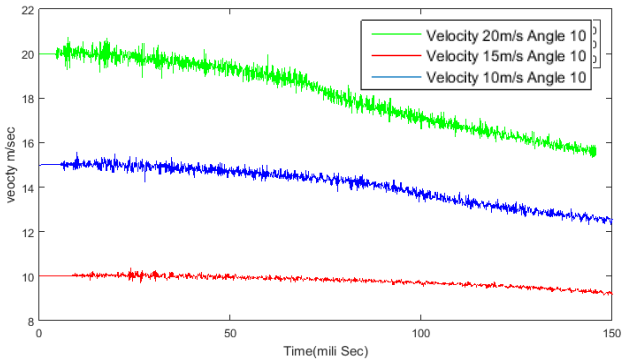
بنابراین با مشاهده نتایج ارائه شده و بررسی و مقایسه آن‌ها با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA که در شکل ۴ نشان داده شده است، نزدیک بودن نتایج مشهود بوده و در نتیجه روند مدل‌سازی صحیح می‌باشد.

۳-۳- اثرات تغییر سرعت اولیه

در این بخش به بررسی اثرات تغییر سرعت‌های اولیه بر فشار، سرعت، تنش و کرنش اجزای پرتابه پرداخته می‌شود. تغییرات فشار وارد بر بدنه در سرعت‌های اولیه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۱۰ درجه در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به افزایش سرعت اولیه، فشار وارد شده از طرف سیال به سازه نیز افزایش یافته و باعث کاهش زیادتر سرعت پرتابه پس از برخورد (شکل ۶) می‌گردد.

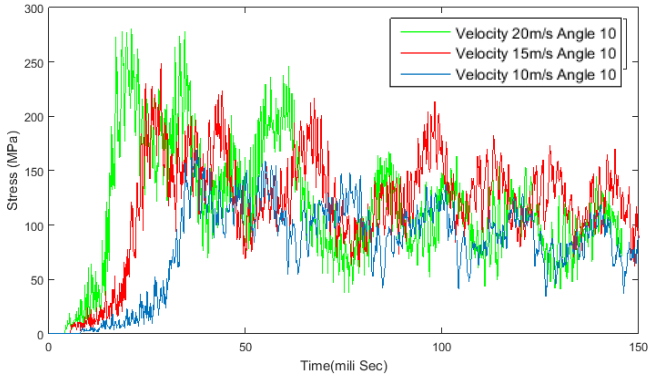


شکل ۵- تغییرات فشار وارد بر بدنه در سرعت‌های اولیه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۱۰ درجه



شکل ۶- تغییرات سرعت پرتابه در سرعت‌های اولیه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۱۰ درجه

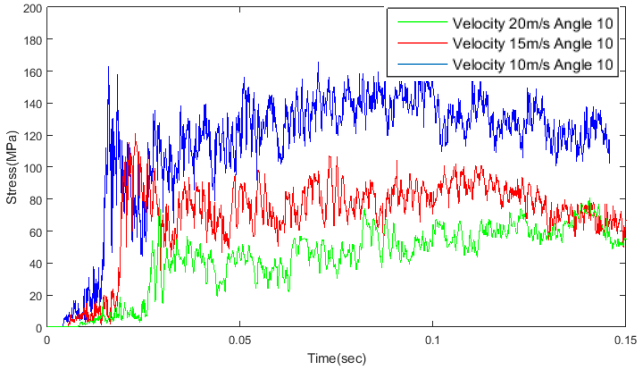
تغییرات تنش پوسته در سرعت‌های اولیه مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش سرعت اولیه، زمان برخورد نیز کاهش می‌یابد و تنش‌های پوسته با توجه به افزایش نیروی فشاری اعمالی از طرف سیال بیشتر می‌شود.



شکل ۷- تغییرات تنش پوسته در سرعت‌های اولیه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۱۰ درجه

تغییر کرنش پلاستیک در سرعت‌های اولیه مختلف تنها در سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه در پرتابه مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۸ با افزایش سرعت برخورد پرتابه به سطح آب، تنش در رینگ تقویت اول افزایش می‌یابد، اما مقدار آن نسبت به تنش وارد به پوسته بسیار کمتر می‌باشد و نشان‌دهنده جذب فشار برخورد توسط پوسته و انتقال کمتر فشار به رینگ می‌باشد.



شکل ۸- تغییرات تنش رینگ تقویت اول در سرعت‌های اولیه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه برخورد ۱۰ درجه

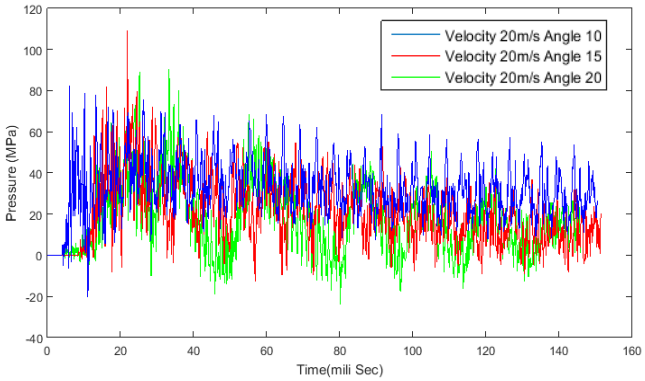
با افزایش سرعت برخورد پرتابه به سطح آب، تنش در رینگ تقویت دوم افزایش می‌یابد و مقدار در مقایسه با تنش وارد به پوسته و رینگ تقویت اول کمتر است و نیز مقدار تنش در رینگ فلنج، با افزایش سرعت برخورد پرتابه به سطح آب، افزایش یافته و مقدار آن نسبت به تنش وارد شده به پوسته و رینگ‌های تقویت اول و دوم کمتر است. ضمنا محدوده کرنش رینگ تقویت‌های اول، دوم و فلنج در تمامی سرعت‌های برخورد در ناحیه الاستیک است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

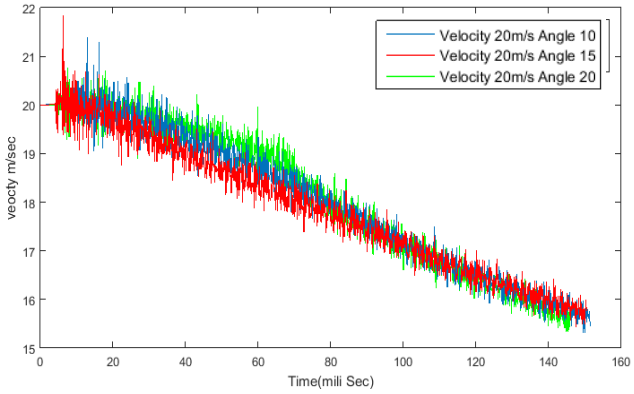
۳-۴- اثرات تغییر زاویه برخورد

اثرات تغییر زاویه برخورد بر سرعت، تنش و کرنش پرتابه در این بخش بررسی می‌شود. تغییرات فشار وارد بر بدنه در سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه‌های برخورد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.



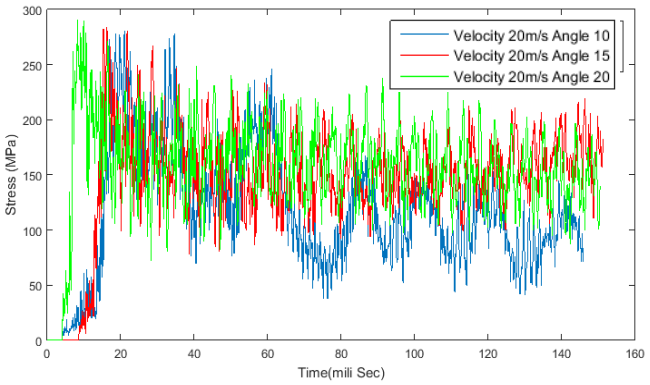
شکل ۹- تغییرات فشار وارد بر بدنه در سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه‌های برخورد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه

در شکل ۱۰ تغییرات سرعت پرتابه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییر زاویه برخورد تاثیر محسوسی بر کاهش سرعت پرتابه ندارد.



شکل ۱۰- تغییرات سرعت پرتابه در سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه‌های برخورد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه

تغییرات تنش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش زاویه برخورد، زمان اعمال تنش و مقدار آن با توجه به افزایش نیروی فشاری اعمالی از طرف سیال بیشتر می‌شود اما مقدار آن در زمان برخورد تقریباً یکسان است و نشان‌دهنده عدم تأثیر زاویه برخورد بر تغییر تنش‌های اعمالی به پوسته می‌باشد و در همه زوایا وجود تغییر شکل پلاستیک در پوسته مشاهده می‌شود. بنابراین تغییر زاویه برخورد تأثیر زیادی بر تغییر شکل سازه نداشته و و بوجود آمدن تغییر شکل در سازه متاثر از تغییر سرعت برخورد می‌باشد. ضمنا با افزایش زاویه برخورد پرتابه به سطح آب، تنش در رینگ‌های تقویت (نسبت به مساله تغییر سرعت اولیه) تغییر بسیار کمی دارد.



شکل ۱۱- تغییرات تنش پوسته در سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه در زاویه‌های برخورد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درجه

۴ - نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برخورد پرتابه استوانه‌ای به سطح آب با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA شبیه‌سازی گردید و سعی شد شرایطی فراهم آید تا نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود به‌کار گرفته شده، منطبق بر واقعیت باشد تا مبنای معتبری برای مقایسه تنش‌های اعمالی به اجزا باشد. در ادامه برخی از نتایج حاصل از این مقایسه آورده شده است:

- در زمان برخورد پرتابه به سطح آب، بیشترین مقدار فشار از سطح به سازه اعمال می‌گردد و بر روی آن تاثیر می‌گذارد.
- تنش اعمالی در اجزا با افزایش فاصله آن‌ها از محل برخورد، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد به طوری که مقدار تنش در پوسته بیشترین و در رینگ فلانج کمترین مقدار را دارا بود.
- فشار برخورد و تنش در اجزا با کاهش سرعت، کاهش می‌یابد و در نتیجه تعیین سرعت مناسب جهت عدم آسیب به سازه از اهمیت زیادی برخوردار است.
- تغییرات زاویه برخورد بر رفتار سازه بسیار کم، تاثیر می‌گذارد و این در حالی است که تغییرات سرعت برخورد به شدت در اعمال تنش به سازه تاثیر گذار می‌باشد.
- بیشترین مقدار تنش سازه در زمان برخورد، در پوسته پرتابه مشاهده می‌شود، بنابراین برای کاهش اثر نیروی برخورد و افزایش ایمنی در حین ورود به آب، بایستی آن‌را تقویت نمود.
- مقدار تنش در رینگ‌های تقویتی و رینگ فلانج به دلیل جلوگیری از تغییر شکل پوسته در اثر اعمال نیروی برخورد از طرف سیال، در تمامی بخش‌های آن مشاهده می‌شود.

کلید واژگان

1- FSI: Fluid Solid (Structure) Interaction
2- Cavity
3- Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method
4- Hydrophobic
5- Slamming
6- Buoyancy
7- Finite Element-Smooth Particle Hydrodynamic

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]

8- Mesh Generation

۵ - مراجع

1- Erfanian, M. R., Moghiman, M., (2015), *Numerical and Experimental Investigation of Projectile Water Entry Problem and Study of Velocity Effect on Time and Depth of Pinch-off*, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 53-60.

2- Bivin, K. Y., Glukhov, M. Y., Permyakov, V. Y., (1985), *Vertical entry of solid into water*, Journal of Fluid Dynamics, vol. 20, pp. 835-841.

3- Webster, K. G., (2007), *Investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on a Ship-Like Structure Using the Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method*, master of science, Virginia Polytechnic Institute.

4- Wei, Z., Shi, X., Wang, Y., (2012), *the oblique water entry impact of a torpedo and its ballistic trajectory simulation*, international journal of numerical analysis and modeling, vol. 9, pp. 312–325.

5- Aruk, F., Guven, A. F., Gencx, H. M., Okutan, C. C., (2012), *Modeling of an airborne torpedo attack and implementation on a simulation environment*, Journal of Defense Modeling and Simulation, vol. 9(2), pp. 113–128.

6- Seddon, C. M., Moatamedi, M., (2006), *Review of water entry with applications to aerospace structures*, International Journal of Impact Engineering, vol. 32, pp. 1045-1067.

7- Zhonghua, L., (2002), *Theoretical analysis and numerical simulation of ogive-nose projectiles penetrating into water and sand medium*, MSc Thesis, Institute of Structural Mechanics China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan.

8- Liu, G. R., (2013), *smoothed particle hydrodynamics a meshfree particle method*, world scientific publishing co. pte. Ltd.

9- *Abaqus 6.11 Documentation*, (2011), Volume II, Eulerian Analysis.

10- Benson, D.J., (2004), *Contact in multi-material Eulerian finite element formulation*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, pp. 4277-4298.

11- Benson, D.J., (1992), *Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 99, pp. 235-394.

12- Von Karman, T., (1929), *The impact of seaplane floats during landing*, National Advisory Committee for Aeronautics, NACA TN 321, USA.

13- Wagner, H., (1932), *Uber Stoss-und Gleitvorgange an der Oberflache von Flussigkeiten*. Z. angew. Math. Mech., vol. 12(4), PP. 193–215.

14- Hagiwara, K., Yuhara, T., (1976), *Fundamental study of wave impacts loads on ship bow*. Selected papers from the J. Soc. Nav. Arch. of Japan, vol. 14, pp. 73–85.

15- Campbell, I. M. C., Weynberg, P. A., (1980), *Measurement of parameters affecting slamming*. Final Report, Rep. No. 440, Technology Reports Center No. OT-R-8042. Southampton Univeristy: Wolfson Unit for Marine Technology.

16- Miloh, T., (1991), *On the initial stage slamming of rigid sphere in vertical water entry*, Applied Ocean Research, Vol. 8, pp. 13-43.

17- Miloh, T., (1991), *On the oblique water entry problem of rigid sphere*, Journal of Engineering Mathematics, Vol. 25, pp. 77-92.

18- Howison, S. D., Ockendon, J. R., Wilson, S. K., (1991), *Incompressible water-entry problems at small deadrise angles*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 222, pp. 215-230.

19- Aristoff, J. M., Bush, J. W. M., (2009), *Water entry of small hydrophobic spheres*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 619, pp. 45-78.

20- Tutt, A., (2004), *The use of Ls-Dyna to simulate the water landing characteristics of space vehicles*. 8th International LS-DYNA Conference.

21- Aquelet, N., (2002), *Fluid-structure coupling in a water-wedge impact problem*. UMR CNRS 8017, PP. 1-9.

22- Hughes, K., Campbell, J., Vignjevic, R., (2008), *Application of the finite element method to predict the crashworthy response of a metallic helicopter under floor structure onto water*. International Journal of Impact Engineering, vol. 35, pp. 347-362.

23- Hughes, K., Vignjevic, R., Campbell, J., (2013), *From aerospace to offshore: Bridging the numerical simulation gaps–Simulation advancements for fluid structure interaction problems*. International Journal of Impact Engineering, vol. 61, pp. 48-63.

24- Lotfi, P., Ashrafizadeh, M., Ckowsari Esfahan, R., (2015), *numerical investigation of a stepped planning hull in calm water*, ocean engineering, vol. 94, pp. 103-110.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1396.13.26.12.0]