



تحلیل عددی نفوذ گلوله به مخزن حاوی سوخت و مقایسه با روش تجربی

حسن منصوری¹، حمیدرضا زارعی^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا (ص)، تهران

2- دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

* صندوق پستی 1384673411، zarei@ssau.ac.ir، تهران

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1396

پذیرش: 26 بهمن 1396

ارائه در سایت: 24 اسفند 1396

کلید واژگان:

اویلری-لاگرانژی

برخورد

گلوله فوق سریع

مخزن حاوی سیال

چکیده

در این تحقیق، اثرات برخورد گلوله به یک مخزن سوخت، با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در اثر نفوذ گلوله یک فشار داخلی بزرگ از جانب سوخت به دیوارهای مخزن وارد می‌آید که به نوبه خود می‌تواند آسیب‌های ساختاری شدیدی را به آن متحمل سازد. مسئله برهم‌کنش سازه و سیال در نظر گرفته شده با استفاده از دیدگاه اویلری-لاگرانژی و توسط نرم‌افزار ال‌اس-داینا حل شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های انجام شده با نتایج تجربی نشان داده است که نرم‌افزار ال‌اس‌داینا با دقت مناسبی قادر است تا فازهای مختلف برخورد را مدل‌سازی نماید. در تحقیقات پیشین انجام شده، بیشتر مرحله نفوذ گلوله و فاز کاویتاسیون به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق کلیه مراحل شامل نفوذ گلوله، فاز کاویتاسیون، تنش‌های وارده به مخزن و خروج گلوله بررسی شده است. مقایسه کانتورهای تنش و منیسمز دیوارهای مخزن خالی و مخزن حاوی سیال نشان از ازدیاد 30 درصدی ماکزیمم تنش و منیسمز ایجاد شده در دیواره مخزن حاوی سیال نسبت به مقدار آن در مخزن خالی دارد. همچنین در این پژوهش علاوه بر آنچه در پژوهش-های عددی قبل انجام شده است، مد خرابی مخزن حاوی مایع بصورت عددی تعیین شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که به دلیل وجود تنش‌های وارد شده از جانب سیال بر جداره‌های مخزن حاوی سیال، مد خرابی ایجاد شده در آن با مد خرابی مخزن خالی کاملاً متفاوت است.

Numerical simulation of projectile penetration on fuel filled tank and comparing with experimental method

Hassan Mansoori¹, Hamidreza zarei^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Khatam-ol-anbia University, Tehran, Iran.

2- Graduate Center, Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran

* P.O.B. 1384673411 Tehran, Iran, zarei@ssau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 November 2017

Accepted 15 February 2018

Available Online 15 March 2018

Keywords:

Eulerian-Lagrangian

Impact

Hyper Velocity Projectile

Tank

ABSTRACT

In this study, the effects of impact of a projectile on a fuel tank are studied using the finite element method and compared with experimental method. Due to penetration of the bullet into the tank, large internal pressures from the fluid are imposed on the tank's walls which can damage it. The considered fluid structure interaction (FSI) problem is solved in an Eulerian-Lagrangian reference frame by using the LS-Dyna software. By comparing of the results obtained from the simulations and the experimental data, it can be seen that the LS-Dyna software is able to model the different phases of event accurately. In previous researches mostly the penetration and cavitation phases are investigated numerically. In this paper all phases namely penetration, cavitation, stresses applied to tank's walls and bullet exit are investigated. The comparison between the Von Mises stress of walls in the fluid-filled tank and the empty one signifies 30 percent growth of the maximum Von Mises stress in the wall of the fluid-filled tank compared to the walls of the empty tank. Also in addition to what has been done in previous numerical works, the failure mode of fluid-filled tanks are determined numerically. The numerical results show that because fluid-filled tank walls are pre-stress due to the fluid shock waves, the failure mode of fluid-filled tank is quite different with the failure mode of the empty one.

1- مقدمه

رام هیدروپنایمیک¹ پدیده مخربی است که در اثر نفوذ یک گلوله فوق سریع در یک محفظه حاوی سوخت روی می‌دهد. در این پدیده، در اثر نفوذ گلوله یک فشار داخلی بزرگ از جانب سوخت به دیوارهای مخزن وارد می‌آید که به نوبه خود می‌تواند آسیب‌های ساختاری شدیدی را به آن متحمل سازد.

از جمله صدمات رام هیدروپنایمیک به مخزن سوخت می‌توان به سوراخ شدن و

گسیختگی مخزن در اثر برخورد و نفوذ گلوله و یا منفجر شدن آن در اثر ایجاد جرقه و افزایش هوای اضافی در مخزن به دلیل ایجاد پدیده کاویتاسیون اشاره نمود. به منظور طراحی مخازن سوخت مقاوم در برابر اثرات مخرب پدیده رام هیدروپنایمیک لازم است در ابتدا با استفاده از تکنیک‌های مناسب میزان خسارت‌های وارده به مخازن را بدرستی پیش‌بینی نمود. به طور مثال درک اثرات امواج فشاری تولید شده توسط سوخت بر دیوارهای مخزن می‌تواند منجر به ارائه روش‌هایی کارا جهت کاهش و تضعیف اثرات مخرب نفوذ گلوله در مخزن سوخت و پدیده رام هیدروپنایمیک گردد. تست‌های آتش و یا دیگر تست‌های تجربی برای انجام

¹ Hydrodynamic ram

Please cite this article using:

H. Mansoori, H. zarei, Numerical simulation of projectile penetration on fuel filled tank and comparing with experimental method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 51-61, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

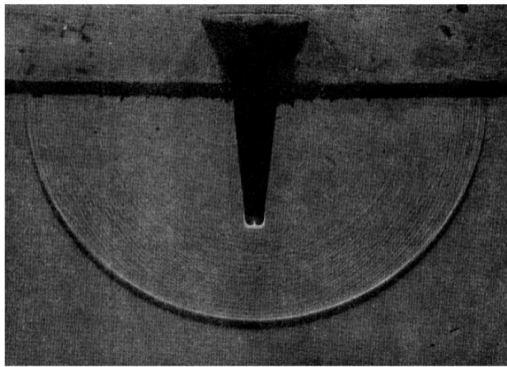


Fig. 2 Pressure wave shadowgraph in the shock phase of the hydrodynamic ram event, taken from the experiments of McMillen [2]

شکل 2 سایه‌نگاری موج فشاری در مرحله شوک پدیده رام هیدرودینامیکی، بر گرفته شده از آزمایش‌های ام‌سی‌میلن [2]

1073 متر بر ثانیه به مخزن برخورد می‌کند، از تکنیک سایه‌نگاری استفاده شده است. جبهه شوک از نقطه برخورد شروع به انتشار در سیال کرده و با دور شدن از این نقطه و حرکت در داخل سیال بتدریج قدرت اولیه خود را از دست می‌دهد.

در آزمایش‌های اخیر انجام شده توسط دیسیمیله و همکاران [4]، مطالعات متعددی به منظور تعیین نحوه برخورد اولیه گلوله به مخزن و فشار موج شوک ناشی از آن با استفاده از ترانس‌دوسرهای فشار نصب شده در مکان‌های مختلف مخزن انجام شده است. برای فاز شوک، دیسیمیله و همکاران برای نخستین بار کشف کردند که انتشار امواج شوک ناشی از برخورد گلوله به مخزن، موجب افزایش شدید فشار سیال در مدت زمانی بسیار کوتاه می‌شود. همچنین تست‌های تجربی انجام شده با گلوله‌های ساچمه‌ای هم‌اندازه با جنس‌های مختلف نشان داده‌اند که میزان فشار و زمان پیدایش اولین موج شوک ربطی به جنس گلوله ندارد. فشار موج شوک در راستای خط شلیک گلوله به مخزن بیشترین مقدار را داراست و با افزایش زاویه از خط شلیک مقدارش کاهش می‌یابد.

2-1- فاز درگ

هنگامی که گلوله در داخل سیال به حرکت در می‌آید، به واسطه وجود نیروی درگ ویسکوز انرژی خود را به انرژی جنبشی سیال تبدیل کرده و باعث حرکت آن می‌شود. به محض جابجاشدن سیال در اثر حرکت گلوله، یک میدان فشار در جهت پیشروی گلوله در طول مسیر ایجاد می‌گردد. از آنجایی که بر خلاف فاز شوک، در فاز درگ سیال بتدریج شتاب می‌گیرد، حداکثر مقدار فشار در بازه زمانی بزرگتری نسبت به فاز شوک روی می‌دهد [2]. در آزمایش دیسیمیله و همکاران [4]، فشار ناحیه درگ با استفاده از ترانس‌دوسرهای فشار و مکان گلوله متحرک در داخل سیال در هر لحظه توسط عکسبرداری‌های خیلی سریع ثبت و ضبط شده‌اند.

3-1- فاز کاویتاسیون

فاز کاویتاسیون پیچیده‌ترین و در عین حال ناشناخته‌شده‌ترین فاز پدیده رام هیدرودینامیکی می‌باشد. هنگامی که گلوله در داخل سیال به حرکت در می‌آید، ناحیه‌ای با فشار کم در ناحیه خیز پشت گلوله ایجاد می‌گردد. در این ناحیه کم‌فشار، سوخت تبخیر شده و هوای ورودی از سوراخ ایجاد شده در جداره مخزن جای آن را پر می‌کند. در نتیجه تشکیل کاواکی (حفره هوا) در

مطالعات پارامتریک، قطعا بر هزینه و در برخی موارد غیر عملی هستند. لذا در تازه‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه، تاکید بیشتری بر توسعه روش‌های عددی برای شبیه‌سازی این مسئله پیچیده که شامل برهم‌کنش توپا سازه (مخزن) و سیال (سوخت) می‌باشد، شده است. برای شبیه‌سازی نفوذ یک گلوله کوچک به داخل یک مخزن پر از مایع، حلگر المان محدود لاگرانژی کلاسیک به تنهایی نمی‌تواند تغییر شکل‌های بزرگ در فاز مایع (محیط پیوسته) را بدرستی نشان دهد. اعوجاج زیاد در محیط مایع می‌بایست با استفاده از دیدگاه اویلری مدل‌سازی شده و با استفاده از حلگرهای اویلری مورد تحلیل قرار گیرد. برای ایجاد ارتباط بین دیدگاه لاگرانژی و اویلری لازم است تا یک کوپلینگ مناسب بین فازهای مایع و جامد برقرار شود. برای مثال نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا از دو نوع تکنیک کوپلینگ متفاوت با نام‌های کوپلینگ عمومی و کوپلینگ دلخواه اویلری-لاگرانژی برای ارتباط بین سازه و سیال استفاده می‌کند.

هدف غایی پژوهش‌های انجام شده در زمینه تجزیه و تحلیل پدیده رام هیدرودینامیکی، ارائه راهکارهایی مناسب جهت حذف و یا کاهش اثرات مخربی است که به واسطه برخورد، نفوذ و خروج گلوله از مخزن سوخت به وجود می‌آیند. در اغلب برخوردهای غیر انفجاری و در اثر نفوذ و حرکت گلوله در یک مخزن سوخت، پدیده رام هیدرودینامیکی را می‌توان طبق شکل 1 در چهار فاز مجزا به شرح زیر طبقه‌بندی نمود [1]:

1) فاز شوک: ایجاد امواج شوک در اثر برخورد اولیه گلوله به جداره مخزن سوخت.

2) فاز درگ: حرکت گلوله در داخل مخزن سوخت.

3) فاز کاویتاسیون: توسعه کاواکی در ناحیه پشت گلوله هنگامی که گلوله در داخل مخزن سوخت حرکت می‌کند.

4) فاز گسیختگی: گلوله به دیواره خروجی برخورد کرده و در صورت وجود انرژی کافی از آن عبور می‌کند.

در ادامه می‌توان فازهای مختلف پدیده رام هیدرودینامیکی را با جزئیات بیشتر معرفی نمود.

1-1- فاز شوک

پدیده رام هیدرودینامیکی با فاز شوک آغاز می‌شود که در آن گلوله برای اولین بار به جداره مخزن برخورد کرده و به داخل آن نفوذ می‌کند. آن گونه که در آزمایش‌های ام‌سی‌میلن [2] و ام‌سی‌میلن وهاروی [3] نشان داده شده است، در اثر انتقال سریع انرژی جنبشی از گلوله به سیال یک موج شوک نیم‌کروی از نقطه برخورد بتدریج منتشر شده و در داخل سیال به حرکت در می‌آید. در شکل 2 برای نمایش امواج شوک ناشی از یک ساچمه فولادی دارای قطر 3.2 میلی‌متر که با سرعت

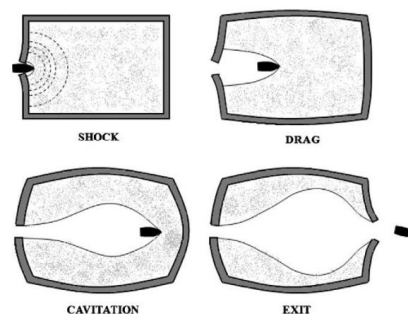


Fig. 1 Four different phases of hydrodynamic ram event [1]

شکل 1 چهار فاز مختلف پدیده رام هیدرودینامیکی [1]

¹ LS-DYNA

داخل مخزن، سیال موجود در آن به دلیل تمایل به برگشت به حالت پایدارش (حالت قبل از تشکیل حفره هوا) دچار حرکاتی نوسانی در داخل مخزن می‌گردد. به این حرکات نوسانی سیال و تشکیل حفره هوا در داخل مخزن در اصطلاح پدیده کاویتاسیون گفته می‌شود [4]. علاوه بر افزایش فشار سیال درون مخزن، فروپاشی حفره‌های ناشی از کاویتاسیون نیز می‌تواند موجب تخلیه شدید سوخت از سوراخ‌های موجود در جداره‌های ورودی و خروجی مخزن شده و در نتیجه خطر انفجار و آتش‌سوزی را افزایش دهد.

1-4- فاز خروج از مخزن

در این فاز گلوله پس از درنوردیدن سیال، دیواره مخزن را سوراخ کرده و از آن عبور می‌کند. بسته به اندازه و ابعاد مخزن، این فاز می‌تواند قبل و یا بعد از ظهور کاویتاسیون در سیال رخ دهد. روشن است که اگر نیروی درگ وارد شده از طرف سیال به گلوله از میزان انرژی جنبشی آن بیشتر شود، بالطبع دیگر این فاز رخ نخواهد داد و گلوله در نهایت در داخل مخزن توقف خواهد کرد. تفاوتی که دیواره‌های ابتدایی و انتهایی هدف برخورد دارند این است که به هنگام اصابت گلوله به دیواره ابتدایی هیچ تنش از پیش فعالی بر روی این دیواره وجود ندارد، در حالیکه موقع برخورد گلوله به دیواره انتهایی مخزن، مقداری تنش به واسطه امواج سیال به دیواره انتهایی وارد می‌شود. لذا این تنش انباشت شده موجب متفاوت شدن شکل سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن پر خواهد شد.

با عنایت به اهمیت فراوان موضوع، مدتی است که پدیده رام هیدرودینامیکی مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است. از آنجایی که اخیراً روش‌های محاسباتی پیشرفت مناسبی کرده‌اند، برخی از محققان سعی کرده‌اند تا این پدیده را به صورت عددی مدل‌سازی نمایند. فریتاس [5] طی یک بررسی جامع، طیف وسیعی از انواع روش‌های محاسباتی مورد استفاده را در ارتباط با شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی ارائه کرده است.

اولین شبیه‌سازی مربوط به پدیده رام هیدرودینامیکی توسط بال در سال 1976 انجام شده است [6]. این کد ترکیبی، دارای محدودیت‌هایی بوده و قادر به شبیه‌سازی تغییر حالات پلاستیک نبود همین امر، موجب رها شدن این کد در شبیه‌سازی‌های آتی پدیده رام هیدرودینامیکی گردید. در ادامه روش تحلیل تصویر دگرگون‌پذیر در سال 1977 توسط لاندستروم توسعه داده شد [7]. البته پس از چندی تحقیقات جدیدتر مشخص کرد که این روش توانایی لازم برای حل مسائل گوناگون را ندارد، پس از آشکار شدن ناتوانی‌های روش تحلیل تصویر دگرگون‌پذیر، برخی از کدهای دیگر بسرعت توسعه یافتند. یکی از این کدها، کدی موسوم به کد یواچ‌آراس¹ بود که در سال 1977 توسعه یافت. البته پس از گذشت مدت زمانی، این کد با کد بی‌آر-وان ترکیب شد. علاوه بر این، کدهای مشتق شده دیگری نظیر کد ای‌رام² از کد یواچ‌آراس¹ استخراج شدند. کد ای‌رام اولین کدی بوده است که اثرات کاویتاسیون را در مایع به‌درستی مدل‌سازی کرده است. اگرچه برخی از این کدها، فازهای مختلف پدیده رام هیدرودینامیکی را بخوبی مدل‌سازی کرده‌اند، اما هیچ‌کدام قادر به پیش‌بینی دقیق آسیب‌های ساختاری وارده به مخزن در اثر پدیده رام هیدرودینامیکی نبوده‌اند. لذا با وجود همه تلاش‌ها، تمامی کدهای مذکور استانداردهای لازم را برای شبیه‌سازی موفق برهم‌کنش سازه و سیال در پدیده رام هیدرودینامیکی نداشته‌اند.

با توجه به تکامل روش‌های المان محدود در دهه هشتاد میلادی، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها به تدریج به نتایج واقعی نزدیک شدند. به تازگی، روش اویلری-لاگرانژی و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (اس‌پی‌هاش³) نشان داده‌اند که می‌توانند مسائل مربوط به برخورد و برهم‌کنش سازه و سیال را بخوبی حل کنند. به همین دلیل است که در حال حاضر بسیاری از محققین از این روش‌ها برای شبیه‌

سازی مسائل پیچیده برهم‌کنش سازه و سیال استفاده می‌کنند. احتمالاً یکی از اولین موارد استفاده از روش اس‌پی‌هاش در شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی را می‌توان در مقاله راندلس و همکاران [8] یافت که در سال 1998 به چاپ رسیده است. هرچند آن‌ها به نتایج جالبی دست یافته‌اند، اما به دلیل عدم صحت‌سنجی نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی عملاً نمی‌توان دقت روش مورد استفاده آن‌ها را به طور کامل تأیید نمود. با این حال در سال 2002 و 2008 دو شبیه‌سازی بسیار جالب در این زمینه انجام شد، که در هر دوی آن‌ها کیفیت نتایج با استفاده از داده‌های تجربی مورد بررسی دقیق قرار گرفت. اولین شبیه‌سازی توسط وینزویچ و همکاران [9] در سال 2002 انجام شد. در این مقاله مخزن و مایع با استفاده از روش دینامیک ذرات هموار مدل‌سازی شده و هدف نویسندگان نشان دادن توانایی روش اس‌پی‌هاش در شبیه‌سازی مسئله برخورد گلوله به مخزن سوخت بود. تنها فشار سیال، در طی شبیه‌سازی‌های عددی اندازه‌گیری گردید و نتایجی مشابه با نتایج آزمایش‌های انجام شده به دست آمد. هرچند این مقاله در آن زمان یک شروع خوب برای نشان دادن توانایی روش اس‌پی‌هاش در شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی بود، اما یک مطالعه کامل تر توسط وارس و همکاران [10] در سال 2008 در این زمینه انجام شد. آن‌ها برخورد یک گلوله فولادی را به یک مخزن آلومینیومی پر از مایع شبیه‌سازی کردند. مسئله در نظر گرفته شده توسط آن‌ها با دو فرمولاسیون مختلف اویلری-لاگرانژی و اس‌پی‌هاش حل شد. پس از آن آزمایش‌هایی جهت بررسی فشار در نقاط مختلف مخزن و نحوه رشد و توسعه کاواکی در داخل آن انجام گردید. سپس نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. هدف از این مطالعه بررسی توانایی روش المان محدود مبتنی بر دیدگاه اویلری-لاگرانژی و روش اس‌پی‌هاش در بازتولید نتایج آزمایشگاهی مربوط به پدیده رام هیدرودینامیکی بود. لازم به ذکر است که مخزن و گلوله با استفاده از روش المان محدود لاگرانژی مدل‌سازی شدند و فقط مایع با استفاده از دو روش المان محدود اویلری و اس‌پی‌هاش مدل‌سازی شد. نتایج به دست آمده از دو روش مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند. آن‌ها با مقایسه نتایج نشان دادند که هرچند دقت روش اس‌پی‌هاش در مقایسه با روش المان محدود اویلری-لاگرانژی کمی بیشتر است، اما اجراهای این روش نسبت به اجراهای روش المان محدود اویلری-لاگرانژی به طرز چشمگیری زمان‌برتر هستند. در سال 2012، وارس و همکاران [11] یک مقاله مشابه در مورد پدیده رام هیدرودینامیکی در یک مخزن نیمه‌پر را منتشر کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی در این مقاله نشان دادند که نرم‌افزار الاس‌داین این توانایی را دارد که بتواند نتایج مربوط به پدیده رام هیدرودینامیکی را در داخل یک مخزن سوخت با دقت مناسبی ارائه دهد. اخیراً، در مورد پدیده رام هیدرودینامیکی در مخازن سوخت کامپوزیتی نیز مقالاتی منتشر شده است. لیانگ و همکاران [12] مسئله برخورد گلوله بر مخزن سوخت فولادی و کامپوزیتی را شبیه‌سازی کرده و نتایج آن‌ها را با هم مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داده است که مخزن کامپوزیتی خیلی آسان‌تر از مخزن فولادی تخریب می‌گردد. همچنین وارس و همکاران [13] مسئله رام هیدرودینامیکی را در یک مخزن آلومینیومی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیقات عددی پیشین انجام شده بیشتر مرحله نفوذ گلوله و فاز کاویتاسیون شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق کلیه مراحل شامل نفوذ گلوله، فاز کاویتاسیون، تنش‌های وارده به مخزن در حالت پر و خالی و خروج گلوله بررسی شده است. همچنین در این تحقیق مد خرابی مخزن حاوی مایع و تفاوت آن با مخزن خالی برای اولین بار بصورت عددی تعیین شده است.

از آنجایی که در حوزه پدیده رام هیدرودینامیکی، کار آزمایشگاهی دیسپیمبل و همکاران [4] یکی از برجسته‌ترین و در عین حال یکی از پرستادترین مقالات در سال‌های اخیر بوده است، لذا تحقیق حاضر قصد دارد تا ضمن بازتولید نتایج آزمایشگاهی که عمدتاً در مورد قسمت سیالاتی پدیده رام هیدرودینامیکی هستند، با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده ابعاد تازه‌ای از تحلیل سازه‌ای پدیده رام هیدرودینامیکی را نیز روشن سازد.

¹ UHRSR code² ERAM code³ SPH

2- تعریف مسئله و معرفی روش حل

2-1- تعریف مسئله

در کار حاضر سعی می‌شود تا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داینما مسئله آزمایشگاهی رام هیدرودینامیکی که توسط دیسیمیله و همکاران [4] مورد بررسی قرار گرفته، به صورت عددی شبیه‌سازی گردد. لذا مدل المان محدود متناظر با مسئله آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] در شکل 3 ارائه شده است. همان‌طور که در شکل پیداست، مسئله حاضر از نوع مسائل برهم‌کنش سازه و سیال می‌باشد که در آن سازه شامل گلوله و سیال شامل مایعی است که مخزن را به طور کامل پر نموده است. فاصله دیواره هدف و دیواره عقبی مخزن برابر با 1.168 متر و فاصله هر یک از دیواره‌های بالایی و پایینی و دو دیواره دیگر مخزن برابر با 1.829 متر می‌باشند. همچنین ضخامت همه دیواره‌های مخزن برابر با 1.587 میلی‌متر است. همچنین قطر گلوله کروی فولادی 12.7 میلی‌متر است و با سرعت تقریبی 341 متر بر ثانیه به سمت مخزن شلیک می‌شود.

2-2- انتخاب مدل ماده

با توجه به اینکه در مقالات [10] و [14] مشخص شده است که گلوله به هنگام برخورد به مخزن تغییر شکل چندانی پیدا نمی‌کند، لذا می‌توان از مدل ماده صلب (مت_020) در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما برای شبیه‌سازی آن استفاده نمود. گلوله از فولاد ساخته شده و خواص فیزیکی آن مطابق با جدول 1 است. از آنجایی که در پدیده رام هیدرودینامیکی، تغییرات نرخ کرنش مخزن به دلیل برخورد گلوله به آن و همچنین فشارهای وارده از طرف سیال بسیار زیاد است؛ لذا استفاده از مدل ماده جانسون-کوک (مت_015) برای شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار مناسب به نظر می‌رسد. مدل ماده جانسون-کوک یک

مدل ماده بسیار دقیق مبتنی بر آزمایش‌های تجربی است. در این مدل مقدار تنش معادل به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک (ϵ)، نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد ($\dot{\epsilon}'_{nd} = \dot{\epsilon}'/\epsilon'$)، دمای بدون بعد T^* و تعدادی ضرایب ثابت شامل A', B', C', m و n به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود [15].

$$\sigma = [A' + B' \epsilon'^n][1 + C' \ln \dot{\epsilon}'_{nd}][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

در رابطه فوق دمای بدون بعد T^* به صورت رابطه (2) است:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

که در آن به ترتیب T دمای ماده، T_r دمای اتاق و T_m دمای ذوب ماده هستند. لازم به ذکر است که در این مدل مقادیر ضرایب ثابت برای فلزات مختلف، متفاوت بوده و از طریق آزمایش‌ها و تست‌های تجربی به دست می‌آیند.

تمامی ثابت‌های موجود در مدل جانسون-کوک برای ماده سازنده مخزن در جدول 2 آورده شده‌اند.

مدل‌سازی سیال به خاطر اینکه موج‌های فشاری و رخداد واقعه کلویتاسیون در آن بروز پیدا می‌کند و تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر شکل مخزن دارد از اهمیت بالایی در شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی برخوردار است. در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما به منظور شبیه‌سازی سیال از مدل ماده مت_نول³ (مت_009) استفاده می‌شود. در این مدل ماده، فشار سیال داخل مخزن با توجه به دانسیته سیال و به کمک یک معادله حالت⁴ به دست می‌آید. غالباً به منظور شبیه‌سازی سیال از دو معادله حالت مختلف استفاده می‌شود که این دو عبارتند از: معادله حالت چند جمله‌ای خطی و معادله حالت گرانیسن⁶. معادله حالت چند جمله‌ای خطی بر اساس رابطه (3) تعریف می‌شود [10].

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3)$$

جدول 2 پارامترهای لازم در مدل جانسون-کوک [15]

Table 2 Required parameters in the Johnson-Cook model [15]

نام کمیت	نماد در ال‌اس‌داینما	مقدار	واحد
چگالی	RO	2.77×10^{-9}	t/mm ³
مدول یانگ	E	73080	MPa
نسبت پواسن	PR	0.33	-
ضریب A'	A	265	MPa
ضریب B'	B	426	MPa
ضریب n	N	0.34	-
ضریب C'	C	0.015	-
ضریب m	M	1	-
دمای ذوب	TM	775	K
دمای محیط	TR	294	K
نرخ کرنش مؤثر	EPSO	1	s ⁻¹
گرمای ویژه	CP	$8.75 \times 10^{\square}$	Nmm/tK
ضریب D ₁	D1	0.13	-
ضریب D ₂	D2	0.13	-
ضریب D ₃	D3	$\square 1.5$	-
ضریب D ₄	D4	0.011	-
ضریب D ₅	D5	0	-

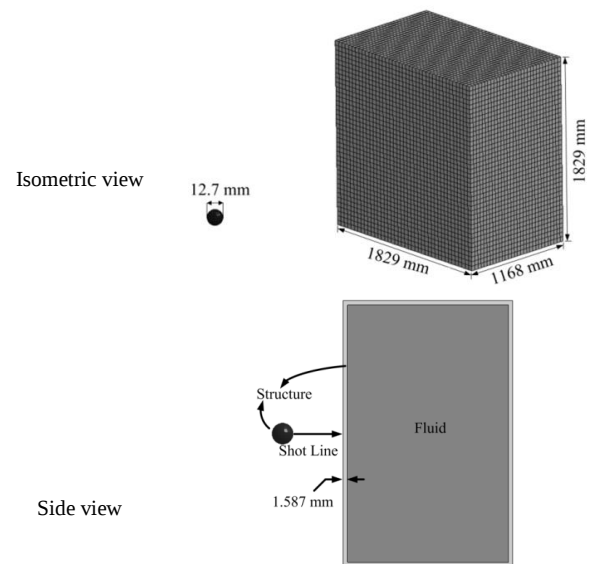


Fig. 3 Physical model considered in the present study

شکل 3 مدل فیزیکی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

جدول 1 خواص فیزیکی مربوط به گلوله

Table 1 Physical properties of the projectile

ماده	ρ (t/mm ³)	E (MPa)	ν
فولاد	7.83×10^{-9}	207000	0.28

³ MAT_NULL

⁴ MAT_009

⁵ Equation of state

⁶ Gruneisen equation of state

¹ MAT_020

² MAT_015

واضح است که با مقایسه سه معادله حالت فوق الذکر نتیجه می شود که معادله حالت گرانیسن 1 از عملکرد بهتری در شبیه سازی رفتار سیال عامل برخوردار بوده و نتایج نزدیکتری را در قیاس با نتایج تاونسند و همکاران [18] به ارمغان آورده است.

خصوصیات و داده های لازم برای معادله حالت گرانیسن 1 در جدول 4 آمده است.

3-2- انتخاب نوع تماس و مش بندی

برای شبیه سازی برخورد بین گلوله و مخزن از الگوریتم تماس سطح به سطح اتوماتیک استفاده می شود. این الگوریتم تماس، کارکردی دوگانه را ایجاد می کند؛ به گونه ای که در آن دو سطح پایه¹ و پیرو² تعریف شده و نرم افزار ال-اس داینا در ابتدا امکان نفوذ نودهای پیرو را در المان های پایه بررسی کرده و پس از آن همین فرایند را برای نفوذ نودهای پایه در المان های پیرو تکرار می کند. با توجه رفتار متفاوت سیالات در مقایسه با جامدات و تفاوت های موجود در نحوه مدلسازی عددی این دو پدیده، در بحث شبیه سازی با توجه به وجود برهم کنش بین گلوله و سیال، شبیه سازی گلوله با استفاده از المانهای لاگرانژی و برای شبیه سازی محیط پیوسته سیال از روش اویلری استفاده شده است.

اندازه مش مناسب برای شبکه بندی مخزن و مایع از جمله موارد مهم دیگری است که باید مورد بررسی قرار گیرد. واضح است که در بیشتر موارد هر چه قدر اندازه مش کوچکتر شود دقت حل مسئله بالاتر می رود، اما به تبع آن هزینه محاسبات و زمان لازم برای حل نیز افزایش می یابد. لذا همگرایی مش بندی برای سرعت پسماند گلوله در برخورد به مخزن بررسی شده است و با توجه به شکل 4 اندازه مش 1.25 میلی متر به عنوان اندازه مش مناسب انتخاب شده است.

4-2- شبیه سازی کاویتاسیون

در حین فرایند رام هیدرودینامیکی، کاویتاسیون زمانی اتفاق می افتد که فشار سیال عامل به فشاری کمتر از فشار بخار آن تنزل یابد. بنابراین فشار اولیه سیال عامل نمی تواند صفر باشد. به همین دلیل است که برای منطبق شدن نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی، لازم است تا مقدار فشار اولیه سیال عامل را برابر با فشار اتمسفر در نظر گرفت. بنابراین فشار سیال عامل در ابتدای شبیه سازی برابر با 0.1013 مگاپاسکال در نظر گرفته می شود. در ابتدای شبیه سازی $\mu = 0$ است، لذا با قرار دادن $p = 0.1013 \text{ MPa}$ و $\gamma_0 = 0.11$ در معادله حالت گرانیسن، مقدار انرژی اولیه سیال برابر با $E_0 = 0.921 \text{ MJ}$ می باشد. باید توجه کرد که افزودن فشار اتمسفر به سیال عامل، افزایش فشار جداره های مخزن را نیز در پی دارد و این در حالی است

که در آن $\mu = (\rho/\rho_0) - 1$ می باشد. همچنین E معرف انرژی داخلی سیال بر واحد حجم و $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ و C_6 ضرایب معادله حالت برای سیال مورد نظر هستند.

معادله حالت گرانیسن به کمک رابطه (4) بیان می گردد [10].

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu+1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (4)$$

که در آن C, S_1, S_2, S_3 و γ_0 و a ضرایب معادله حالت برای سیال مورد نظر هستند. صرف نظر از اینکه از کدام معادله حالت استفاده شود، ضرایب ثابت موجود در هر یک از معادلات حالت باید به صورت دقیق و منطبق بر نتایج آزمایشگاهی باشند تا بتوانند رفتار سیال مورد نظر را به نحو شایسته و صحیح شبیه سازی نمایند. به منظور شبیه سازی سیال عامل در کار حاضر، معادلات حالت به کار رفته در پژوهش های گذشته مورد بررسی قرار گرفته و سه معادله حالت پرکاربرد شامل دو معادله گرانیسن و یک معادله چندجمله ای از مراجع [10]، [16] و [17] استخراج می شوند. برای ارزیابی توانایی هر یک از این سه معادله حالت در شبیه سازی مؤثر رفتار سیال عامل در کار حاضر دو معیار تصمیم گیری زیر لحاظ می شوند:

1) سرعت پسماند گلوله پس از نفوذ به داخل مخزن در زمان 25 میکروثانیه پس از برخورد محاسبه شده و با نتایج تحقیقات پیشین مورد مقایسه قرار می گیرد.

2) سرعت جبهه موج ناشی از شوک وارد شده در اثر برخورد گلوله به جداره مخزن تعیین شده و با مقادیر گزارش شده توسط تاونسند و همکاران [18] مقایسه می شود. برای اندازه گیری سرعت جبهه موج فاز شوک، ابتدا مقدار زمان لازم بین دو قله فشار مربوط به دو موج متوالی در فاصله های 10 و 20 میلی متری از دیواره مخزن محاسبه می گردند. در ادامه با تقسیم فاصله بین دو نقطه در نظر گرفته شده بر مقدار زمان به دست آمده می توان مقدار سرعت جبهه موج را تعیین نمود.

نتایج به دست آمده با استفاده از سه معادله حالت مختلف و میزان خطای هر کدام از آن ها نسبت به نتایج تاونسند و همکاران [18] در جدول 3 ارائه شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می گردد هر سه مدل مقدار سرعت پسماند گلوله را با خطای زیر ده درصد گزارش می دهند، اما در بحث محاسبه سرعت جبهه موج ناشی از فاز شوک، استفاده از معادله حالت گرانیسن 2 در بدترین حالت منجر به خطای تقریبی چهارده درصدی می شود.

جدول 3 مقایسه معادلات حالت مختلف برای شبیه سازی سیال عامل در

پدیده رام هیدرودینامیکی

Table 3 Comparison of different equations of state for fluid simulation in the hydrodynamic ram event

نوع معادله حالت	سرعت پسماند و درصد خطای تقریبی	سرعت جبهه موج و درصد خطای تقریبی
گرانیسن نوع 1	145 متر بر ثانیه (4 درصد)	1955 متر بر ثانیه (5 درصد)
گرانیسن نوع 2	141 متر بر ثانیه (7 درصد)	1773 متر بر ثانیه (14 درصد)
چند جمله ای خطی	140 متر بر ثانیه (7 درصد)	1896 متر بر ثانیه (8 درصد)
تاونسند و همکاران [18]	151 متر بر ثانیه (-)	2061 متر بر ثانیه (-)

جدول 4 پارامترهای مورد نیاز در معادله حالت گرانیسن 1 [10]
Table 4 Required parameters for Gruneisen 1 equation of state

نام پارامتر	مقدار	واحد
C	1.448×10^6	mm/s
S_1	1.979	—
S_2	0	—
S_3	0	—
γ_0	0.11	—
a	3	—

¹ Master

² Slave

می‌شود. شکل 5 نمونه‌ای از این امواج را در داخل مخزن نشان می‌دهد. در اثر حرکت این امواج شوکی در داخل سیال و برخورد آن‌ها با دیواره‌های مخزن، مقداری تنش در دیواره‌های مخزن ایجاد می‌گردد. برای روشن شدن این مطلب تنش ناشی از برخورد گلوله به مخزن خالی و مخزن پر مورد مقایسه قرار می‌گیرند. شکل 6 کانتور تنش ون میسز² ناشی از برخورد و نفوذ گلوله را در داخل یک مخزن خالی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم مقدار تنش وارده بر دیواره مخزن برابر با 396.5 مگاپاسکال می‌باشد. در ادامه برای مشخص شدن اثر وجود سیال بر میزان تنش ایجاد شده در دیواره مخزن لازم است تا کانتور تنش به طرز مشابه برای حالت مخزن پر هم رسم گردد.

کانتور تنش ون میسز ناشی از برخورد و نفوذ گلوله در داخل یک مخزن پر از سیال در شکل 7 نشان داده شده است. طبق این شکل ماکزیمم تنش ون میسز وارد بر دیواره مخزن پر برابر با 512.7 مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین با مقایسه شکل‌های 7 و 6 نتیجه می‌شود:

ماکزیمم تنش ون میسز ایجاد شده در دیواره مخزن حاوی سیال تقریباً 30 درصد بیشتر از مخزن خالی می‌باشد که این امر تاثیر قابل ملاحظه امواج شوک را در ایجاد تنش‌های مازاد بر تنش ناشی از برخورد صرف را نمایان

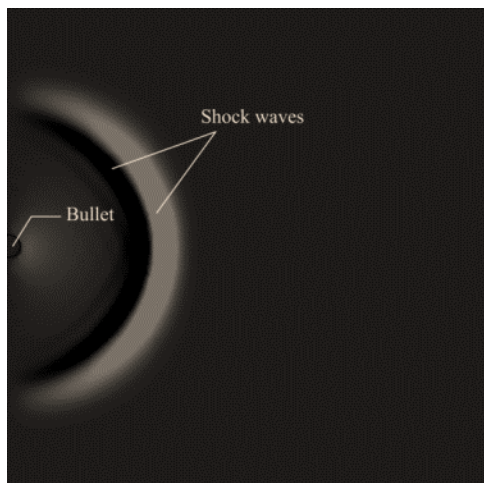


Fig. 5 Shock waves caused by the impact and the bullet penetration inside the tank

شکل 5 امواج شوک ناشی از برخورد و نفوذ گلوله در داخل مخزن

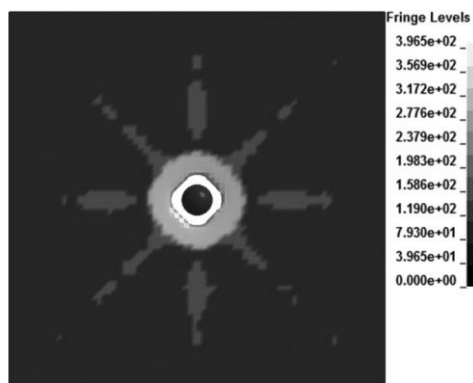


Fig. 6 Von Mises stress contour (MPa) of the empty tank wall at the 25 microseconds after the impact

شکل 6 کانتور تنش ون میسز (مگاپاسکال) دیواره مخزن خالی در لحظه 25 میکروثانیه پس از برخورد

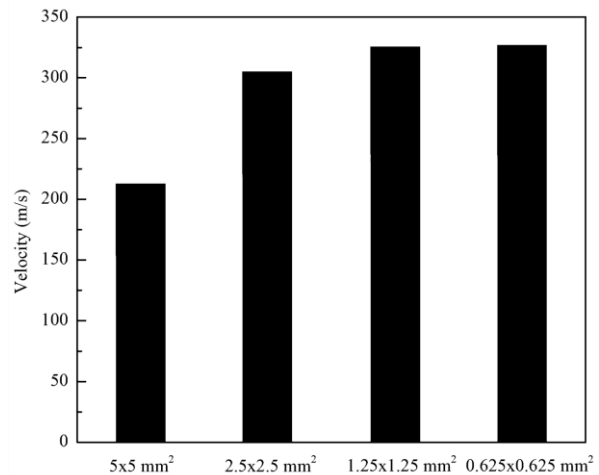


Fig. 4 Variation of residue velocity bullet for sizing meshes

شکل 4 تغییرات سرعت پسماند گلوله در اندازه مش‌های مختلف

که می‌بایست فشار جداره‌های مخزن در لحظه ابتدایی برابر با صفر باشند. برای تحقق این امر می‌توان با استفاده از گزینه لود شل¹ در نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا فشاری معادل با فشار اتمسفر ولی در جهت معکوس به جداره‌های مخزن اعمال نمود. در مرجع [10] نیز مشابه این روش رشد کاواکی بصورت عددی بدست آمده است.

2-5- اندازه گیری فشار سیال عامل در نقاط مختلف مخزن

برای اثبات توانایی نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا در بحث شبیه‌سازی موفق پدیده رام هیدرودینامیکی، محاسبه دقیق فشار سیال در نقاط مختلف مخزن و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی منتشر شده از اهمیت فراوانی برخوردار است. برای محاسبه فشار سیال در نواحی مختلف می‌توان موقعیت قرارگیری ترانسدوسرهای فشار را در نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا تعیین نمود.

در آزمایش‌های انجام شده توسط دیسیمیله و همکاران [4] هفت ترانسدوسر با موقعیت‌های مختلف در داخل مخزن تعبیه شده‌اند. مطابق با جدول 5 در کار حاضر نیز دقیقاً مشابه با نمونه آزمایشگاهی، تعداد هفت ترانسدوسر جهت ذخیره تغییرات زمانی فشار سیال عامل در موقعیت‌های مختلف تعریف می‌شوند. سرانجام با طی کردن سلسله مراتب فوق، مسئله رام هیدرودینامیکی در نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا آماده حل می‌شود.

3- صحت‌سنجی و بحث در مورد نتایج

بدیهی است که در اثر برخورد و نفوذ گلوله فوق‌سریع، انرژی جنبشی و تکانه گلوله به سیال ساکن محبوس در مخزن منتقل گردند. این امر موجب پیدایش تعدادی موج در داخل مخزن می‌شود. به این امواج که به طور ناگهانی و در عرض چند هزارم ثانیه به وجود می‌آیند، امواج شوکی گفته

جدول 5 موقعیت قرارگیری ترانسدوسرهای فشار

Table 5 The placement positions of pressure transducers

نام ترانسدوسر	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	0	301	37
2	0	215	215
3	37	0	301
4	74	0	602
5	111	0	903
6	0	0	1167
7	0	143	1167

² Von Mises stress

¹ LOAD_SHELL_SET

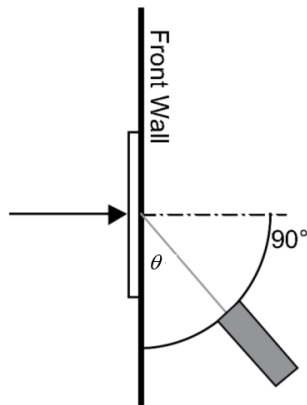


Fig. 8 Representation of the transducer angle from the shot line [4]

شکل 8 نمایش زاویه قرارگیری ترانسدیوسر فشار نسبت به امتداد شلیک [4]

همچنین نسبت فشارهای اندازه‌گیری شده توسط ترانسدیوسرهای P4، P5 و P7 به فشار اندازه‌گیری شده توسط ترانسدیوسر P3 در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی دیسیمله و همکاران [4] در شکل 9 با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی دیسیمله و همکاران [4] برقرار است.

همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود در پدیده رام هیدرودینامیکی، از طرفی موج‌های ناشی از شوک وارده به سیال پس از برخورد به دیواره‌های مخزن در جهت عکس حرکت گلوله به حرکت درآمده و به دلیل مقاومت در برابر حرکت آن موجب کاهش سرعت گلوله می‌شوند. از طرف دیگر، فشارهای وارده از طرف این امواج بر دیواره‌های مخزن موجب انباشته شدن تنش‌های اضافی در آن‌ها می‌شوند.

تاریخچه تغییرات زمانی فشار در فاز درگ پدیده رام هیدرودینامیکی که از دو دیدگاه عددی و تجربی [4] به دست آمده‌اند، در شکل 11 با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تطابق خوبی بین نتایج حاصل از دو دیدگاه عددی و تجربی وجود دارد. تفاوت اندک مشاهده شده بین نتایج، به دلیل وجود نویزهای ناشی از حرکت گلوله در سیال می‌باشد. البته لازم به ذکر است که اندازه‌گیری این نویزها و ثبت تغییرات بسیار سریع فشار نیاز به ترانسدیوسرهای بسیار حساس با دقت کالیبراسیون بالا دارد. بنابراین به دلیل وجود خطاهای آزمایشگاهی و تقریب‌های موجود در روش عددی، این میزان از نزدیکی جواب‌ها می‌تواند مورد قبول واقع گردد.

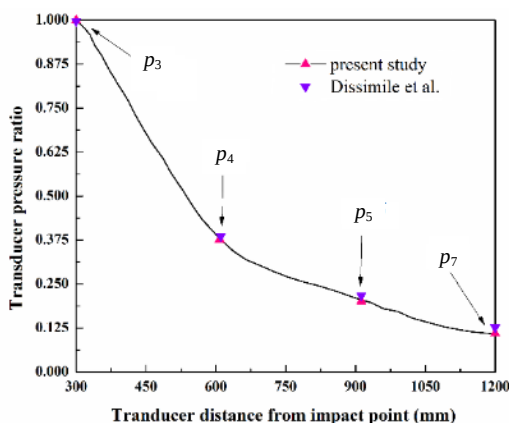


Fig. 9 Variations of transducer pressure P4, P5 and P6 to P3

شکل 9 تغییرات فشار ترانسدیوسرهای P4، P5 و P7 نسبت به فشار ترانسدیوسر P3

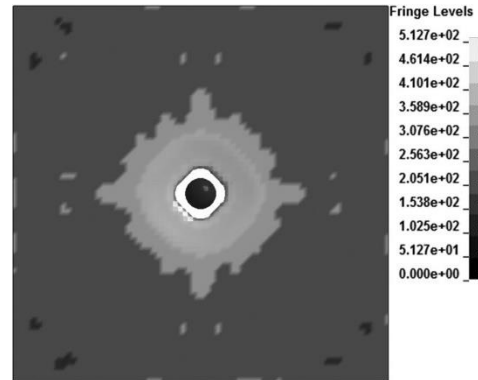


Fig. 7 Von Mises stress contour (MPa) of the fluid filled tank wall at the 25 microseconds after the impact

شکل 7 کانتور تنش ون‌میسز (مگاپاسکال) دیواره مخزن پر در لحظه 25 میکروثانیه پس از برخورد

می‌سازد. در برخورد گلوله به مخزن خالی قسمت اعظمی از دیواره مخزن هیچ تنشی را تجربه نکرده و کانتورهای تنش غیرصفر عموماً در نواحی مجاور به محل برخورد تمرکز یافته‌اند در حالی که در حالت برخورد گلوله به مخزن پر، کانتورهای تنش غیرصفر تقریباً تمامی مساحت دیواره مخزن را در بر می‌گیرند. بنابراین از این موضوع می‌توان گسترش و پخش‌شدگی بیشتر تنش در دیواره مخزن حاوی سیال را نسبت به مقدار تنش ایجاد شده در دیواره مخزن خالی نتیجه گرفت. البته لازم به ذکر است که وجود تنش‌های اضافی در مخزن حاوی سیال در نهایت می‌تواند موجب ایجاد کرنش بیشتر و تغییر شکل قابل توجه دیواره‌های مخزن گردد که این خود نشان‌دهنده آسیب‌های ساختاری پدیده رام هیدرودینامیکی بر مخازن حاوی سوخت است.

در فاز شوک پدیده رام هیدرودینامیکی و بر روی یک جبهه موج منحصر به فرد با افزایش زاویه از امتداد شلیک، فشار نقاط واقع بر مرز جبهه موج کاهش می‌یابد. دیسیمله و همکاران [4] مطابق با شکل 8 یک رابطه تجربی را برای نشان دادن این کاهش فشار به صورت رابطه (5) معرفی کرده‌اند:

$$p = p_{90} \sin(\theta + 7) \quad (5)$$

که در آن θ زاویه نقطه واقع بر جبهه موج، p فشار نقطه مذکور و p_{90} فشار نقطه واقع بر محل تقاطع کمان جبهه موج و امتداد شلیک می‌باشد که طبق شکل 7 در زاویه 90 درجه قرار می‌گیرد.

برای مقایسه نتایج کسب شده از شبیه‌سازی حاضر با رابطه پیشنهادی دیسیمله و همکاران [4] در ابتدا لازم است تا زاویه قرارگیری ترانسدیوسرهای P1 و P2 مشخص شوند. ترانسدیوسر P1 در زاویه 7 درجه و ترانسدیوسر P2 در زاویه 45 درجه قرار دارند. از طرفی تمامی ترانسدیوسرهای P1، P2 و P3 بر روی یک جبهه موج بوده و ترانسدیوسر P3 محل تلاقی کمان جبهه موج با امتداد شلیک است. لذا در رابطه پیشنهادی دیسیمله و همکاران [4] می‌توان به جای p_{90} فشار مربوط به ترانسدیوسر P3 یعنی p_3 را جایگزین نمود. با جایگذاری مقادیر مناسب در رابطه 16 مقادیر $p_2/p_3 \approx 0.79$ و $p_1/p_3 \approx 0.24$ به دست می‌آیند. این در حالی است که نسبت‌های فشار مذکور در شبیه‌سازی حاضر برابر با 0.8 و 0.25 بوده و تفاوت اندکی با مقادیر گزارش شده دیسیمله و همکاران [4] دارند. بنابراین واضح است که شبیه‌سازی حاضر علاوه بر تایید کیفی نتایج مربوط به فاز شوک پدیده رام هیدرودینامیکی قادر است تا به صورت کمی نیز نتایج مطلوبی را در قیاس با یافته‌های آزمایشگاهی ارائه دهد.

دست آورد و با مقدار ذکر شده مقایسه نمود. شکل 13 کاواکی به وجود آمده در فاز کاویتاسیون پدیده رام هیدرودینامیکی را به صورت عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، ماکزیمم شعاع کاواکی برابر با 44 میلی‌متر و در نتیجه ماکزیمم مقدار قطر کاواکی برابر با 88 میلی‌متر می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از آزمایش‌های دیسیمیل و همکاران [4] و نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

دیسیمیل و همکاران [4] با توجه به آزمایش‌های که انجام داده‌اند، رشد کاواکی در سرتاسر مخزن را در داخل مخزن به صورت شکل 14 ارائه کرده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم مقدار قطر کاواکی در این حالت تقریباً برابر با 161 میلی‌متر می‌باشد.

شکل 15 به طور مشابه، رشد کاواکی در داخل مخزن را به صورت عددی به تصویر می‌کشد. با توجه به این شکل، ماکزیمم شعاع کاواکی برابر با 80 میلی‌متر و در نتیجه ماکزیمم قطر آن برابر با 160 میلی‌متر می‌باشند. با مقایسه این مقدار با مقدار به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی دیسیمیل و همکاران [4] ملاحظه می‌شود که نتایج عددی و آزمایشگاهی با تقریب خوبی به هم نزدیک هستند. طبیعتاً می‌توان نتیجه گرفت که این مطابقت نتایج، نشان‌دهنده استفاده از راهبرد مناسب به منظور شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی در کار حاضر است.

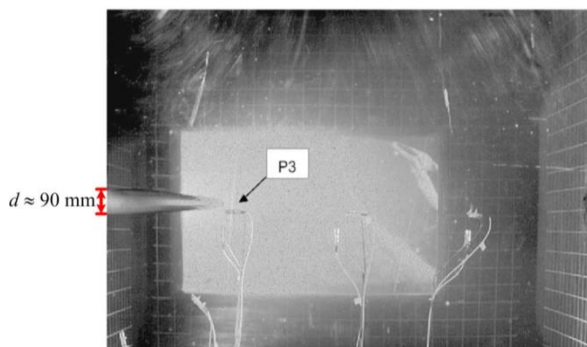


Fig. 12 Cavity formed in the experiments of Disimile et al [4]

شکل 12 کاواکی تشکیل شده در آزمایش‌های دیسیمیل و همکاران [4]



Fig. 13 Cavity formation in the numerical simulation

شکل 13 کاواکی ایجاد شده در شبیه‌سازی عددی

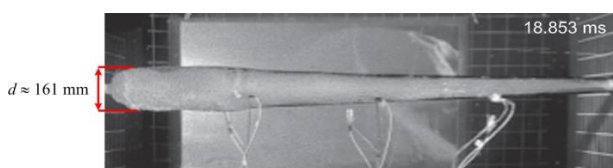


Fig. 14 Development of cavity in the experiments of Disimile et al. [4]

شکل 14 نمو کاواکی در کار آزمایشگاهی دیسیمیل و همکاران [4]

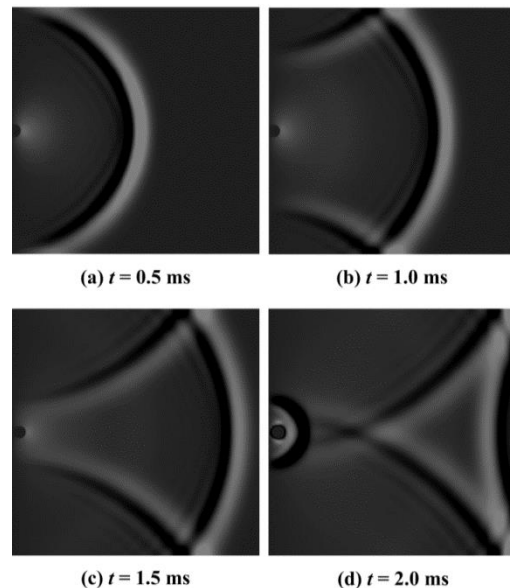


Fig. 10 Created waves in the fluid due to penetration of the projectile in it

شکل 10 موج‌های ایجاد شده در سیال به واسطه نفوذ گلوله در آن

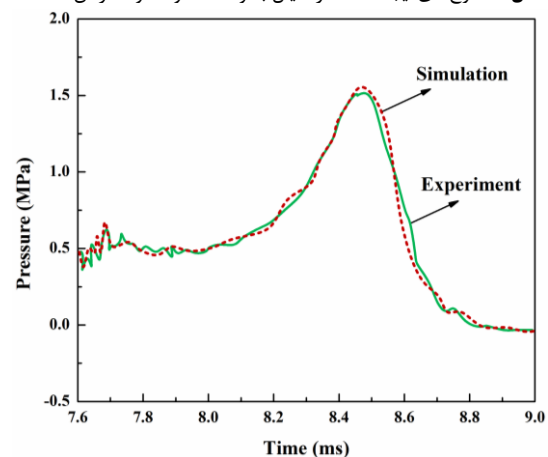


Fig. 11 Comparison between experiment [4] and numerical simulation of pressure time history

شکل 11 مقایسه تغییرات زمانی فشار حاصله از روش‌های تجربی [4] و عددی

در ادامه بررسی فازهای پدیده رام هیدرودینامیکی، نوبت به فاز کاویتاسیون می‌رسد. کاویتاسیون زمانی اتفاق می‌افتد که فشار در ناحیه خیز پشت گلوله به مقداری کمتر از مقدار فشار بخار مایع برسد. در این وضعیت مایع به بخار تبدیل شده و تغییر فاز روی می‌دهد. در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا معادله حالتی که قادر باشد این تغییر فاز را در نظر بگیرد، وجود ندارد. لذا برای حل این مشکل می‌بایست راهکار مناسبی ارائه شود. یک روش ساده برای غلبه بر این مشکل تعریف یک فشار حدی است، به‌طوری‌که در هیچ مکانی از مخزن فشار سیال به پایین‌تر از این فشار حدی نرسد. در واقع این فشار حدی همان فشار بخار مایع است که مقدار آن برای سیالات گوناگون متفاوت است. به وسیله این روش می‌توان مقاومت سیال به انبساط را از بین برده و به پدیده کاویتاسیون اجازه خودنمایی در داخل مخزن را داد. کاویتاسیون در دنباله پشتی گلوله ایجاد می‌شود، یعنی جایی که فشار مایع به تدریج کم و کمتر شده تا به فشار بخار آن برسد.

شکل 12 کاواکی ناشی از فاز کاویتاسیون را که از آزمایش‌های دیسیمیل و همکاران [4] استخراج شده است را در داخل مخزن نشان می‌دهد. طبق این شکل ماکزیمم مقدار قطر کاواکی تقریباً برابر با 90 میلی‌متر می‌باشد. در ادامه می‌توان ماکزیمم مقدار قطر کاواکی را از نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نیز به

حال این سوال پیش می‌آید که آیا هنگام خروج کامل گلوله از دیواره مخزن حاوی سیال نیز، سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن لوزی شکل است و یا خیر؟ برای روشن شدن این مطلب می‌توان به شکل 18 مراجعه نمود. جالب است که زمانی که گلوله از دیواره مخزن حاوی سیال خارج می‌شود، مطابق با شکل 18 سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن دیگر لوزی شکل نبوده و فرمی متفاوت با شکل سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن خالی دارد. همچنین به علت امواج شوک قوی وارد شده از طرف سیال، دیواره‌های مخزن حاوی سیال شدیداً موج برداشته و مد خرابی آن‌ها نسبت به دیواره‌های مخزن خالی به مراتب بیشتر است. نمونه این مد خرابی را در تست تجربی می‌توان در شکل 19 که توسط واران و همکاران [13] آزمایش شده است، مشاهده کرد.

4- نتیجه‌گیری

پدیده رام هیدرودینامیکی یک اتفاق مخرب در مخازن سوخت است که می‌تواند منجر به صدمات زیان‌باری شود. به دلیل هزینه‌بر بودن آزمایش‌های تجربی، هم‌اکنون استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی پدیده رام هیدرودینامیکی بسیار مؤثر به نظر می‌رسند. از آنجایی که مسائل مربوط به پدیده رام هیدرودینامیکی از جنس مسائل برهم‌کنش مستقیم سازه و سیال هستند، لذا استفاده از روش‌های مبتنی بر دیدگاه اویلری و لاگرانژی برای شبیه‌سازی اثرات سیال، گلوله و مخزن بر یکدیگر به شدت توصیه می‌شود. در این تحقیق از نرم‌افزار المان محدود ال‌اس‌داین‌ا برای شبیه‌سازی فازهای مختلف پدیده رام هیدرودینامیکی استفاده گردیده است. عمدتاً تحقیقات

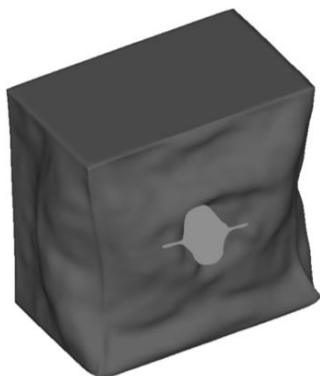


Fig. 18 Hole created in the fluid filled tank wall when the projectile leaves it

شکل 18 سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن پر به هنگام خروج گلوله از آن



Fig. 19 Failure mode in filled and empty aluminium tubes [13]

شکل 19 مد خرابی در مخزن پر و خالی [13]

$r = 80 \text{ mm}$

Fig. 15 Numerical simulation of cavity growth in the present study

شکل 15 شبیه‌سازی عددی رشد کاواکی در تحقیق حاضر

آخرین فاز پدیده رام هیدرودینامیکی، فاز خروج گلوله از دیواره مخزن است. اگرچه نتایج مربوط به این فاز در کار آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] نیامده است؛ اما می‌توان یکسری نتایج جالب را درباره این فاز از شبیه‌سازی‌های انجام شده استخراج نمود. بدیهی است آخرین فاز پدیده رام هیدرودینامیکی زمانی رخ می‌دهد که گلوله به طور کامل از دیواره مخزن خارج گردد. زمانی که گلوله به سمت یک مخزن خالی شلیک می‌شود، واضح است که تا زمان برخورد به دیواره خروجی هیچ تنش را در آن ایجاد نمی‌کند. اما در مورد مخزن پر به دلیل ایجاد امواج شوک ناشی از نفوذ گلوله در سیال و نیروهای ناشی از این امواج، طبق شکل 16 تا لحظه قبل از برخورد گلوله به دیواره مقداری تنش در آن ظاهر می‌شود.

طبق شکل 17، سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن خالی به هنگام خروج کامل گلوله از آن به شکل لوزی است. از طرفی طبق مشاهدات قبلی، سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن به هنگام برخورد اولیه و نفوذ گلوله در آن هم به شکل لوزی بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمانی که گلوله به سمت مخزن خالی شلیک می‌شود، شکل سوراخ ایجاد شده در دیواره‌های مخزن همسان و به فرم لوزی می‌باشد.

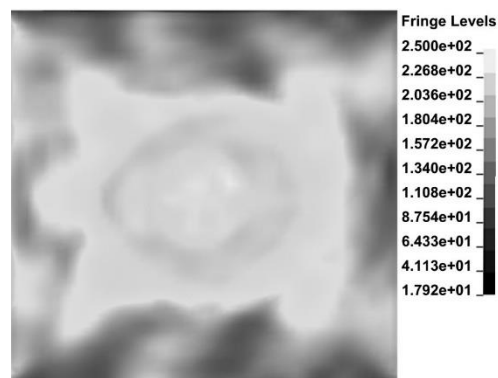


Fig. 16 Pre-stress (MPa) imposed on the fluid filled tank wall before the projectile hits on

شکل 16 تنش (مگاپاسکال) از پیش وارد شده به دیواره مخزن پر قبل از برخورد گلوله به آن

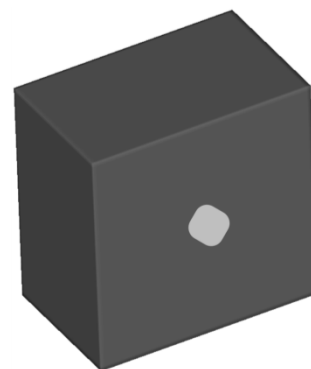


Fig. 17 Hole created in the empty tank wall when the projectile leaves it

شکل 17 سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن خالی به هنگام خروج گلوله از آن

p	فشار برخورد (MPa)
p_0	فشار اولیه سیال (MPa)
p_v	فشار بخار مایع (MPa)
r_c	شعاع کاواکی (m)
st	ضریب شیب هاگونیوت سیال
T	دمای مطلق ماده (K)
t	زمان (s^3)
T_m	دمای ذوب ماده (K)
T_r	دمای اتاق (K)
u_0	سرعت گلوله قبل از برخورد به مخزن (ms^{-1})
u_p	سرعت گلوله پس از برخورد به مخزن (ms^{-1})
u_s	سرعت پیشروی جبهه موج (ms^{-1})

علائم یونانی

ε	کرنش پلاستیک
ε'	نرخ کرنش (s^{-1})
ε_f	کرنش شکست
γ_0	ضریب معادله حالت گرانیسن
ν	ضریب پواسون
θ	زاویه شعاعی نقطه واقع بر جبهه موج
ρ_l	چگالی سیال (kgm^{-3})
ρ_p	چگالی گلوله (kgm^{-3})
σ_n	تنش هیدرواستاتیک (MPa)

زیر نویس ها

max	ماکزیمم
nd	بدون بعد

6- مراجع

- [1] D. Varas, J. Lopez-Puente, R. Zaera, Experimental analysis of fluid-filled aluminium tubes subjected to high-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 81-91, 2009.
- [2] J. H. McMillen, Shock wave pressures in water produced by impact of small spheres, *Physical Review*, Vol. 68, No. 9-10, pp. 198-209, 1945.
- [3] J. H. McMillen, E. N. Harvey, A spark shadowgraphic study of body waves in water, *Journal of Applied Physics*, Vol. 17, No. 7, pp. 541-555, 1946.
- [4] P. J. Disimile, L. A. Swanson, N. Toy, The hydrodynamic ram pressure generated by spherical projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 821-829, 2009.
- [5] C. J. Freitas, C. E. Anderson, J. D. Walker, D. L. Littlefield, Hydrodynamic ram: A benchmark suite, *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division*, Vol. 325, pp. 63-74, 1996.
- [6] R. E. Ball, *Structural Response of Fluid-Containing-Tanks to Penetrating Projectiles (Hydraulic Ram) - A Comparison of Experimental and Analytical Results*, Naval Postgraduate School NPS-57B p76051, 1976.
- [7] E. A. Lundstrom, *Structural Response of Flat Panels to Hydraulic Ram Pressure Loading*, Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, NWC TP 6770 Naval Weapons Center 1988, p. 12-15.
- [8] P. W. Randles, D. R. Seemann, T. C. Carney, L. D. Libersky, Numerical Simulations of Fragment Impact on Liquid Filled Containers, *American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 361, pp. 81-90, 1998.
- [9] R. Vignjevic, T. De Vuyst, J. C. Campbell, N. K. Bourne, *Modelling of Impact on a Fuel Tank Using Smoothed Particle Hydrodynamics*, United Kingdom: Cranfield University Press, 2005.
- [10] D. Varas, R. Zaera, J. Lopez-Puente, Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 363-374, 2009.
- [11] D. Varas, R. Zaera, J. Lopez-Puente, Numerical modelling of partially filled aircraft fuel tanks submitted to hydrodynamic ram, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 19-28, 2012.
- [12] C. Liang, S. Bifeng, P. Yang, Simulation analysis of hydrodynamic ram phenomenon in composite fuel tank to fragment impact, *Proceeding of Measuring Technology and Mechatronics Automation, Third International Conference*, pp. 241-244, 2011.
- [13] D. Varas, R. Zaera, J. Lopez-Puente, Experimental analysis of fluid-filled

آزمایشگاهی انجام شده بر روی بخش سیالاتی مسئله تمرکز کرده و نتایج ارزشمندی را ارائه کرده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ال‌اس‌داینا و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نرم‌افزار قادر است تا با دقت خوبی پدیده رام هیدرودینامیکی را مدل‌سازی نماید. در ادامه می‌توان تعدادی از نتایج و دستاوردهای مهم تحقیق حاضر را به شرح زیر بیان نمود:

- مقایسه کانتورهای تنش ناشی از برخورد و نفوذ گلوله در دیواره‌های مخزن خالی و مخزن حاوی سیال نشان می‌دهد که ماکزیمم تنش ون‌میسز ایجاد شده در دیواره مخزن حاوی سیال حدوداً 30 درصد بیشتر از مقدار ماکزیمم تنش ون‌میسز ایجاد شده در مخزن خالی می‌باشد که این امر تاثیر قابل ملاحظه امواج شوک را در ایجاد تنش‌های مازاد بر تنش ناشی از برخورد صرف را در مخزن حاوی سیال نمایان می‌سازد. همچنین پراکندگی و گسترش میدان تنش ون‌میسز ایجاد شده در دیواره مخزن حاوی سیال نسبت به میدان تنش ون‌میسز ایجاد شده در دیواره مخزن خالی بسیار وسیع‌تر است.

- در فاز درگ پدیده رام هیدرودینامیکی، مقدار سرعت گلوله به دلیل تاثیر نیروی درگ سیال بر آن به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین موج‌های ناشی از شوک وارده به سیال پس از برخورد به دیواره‌های مخزن در جهت عکس حرکت گلوله به حرکت درآمده و به دلیل مقاومت در برابر حرکت آن موجب کاهش بیشتر سرعت آن می‌شوند.

- یکسان بودن ماکزیمم مقادیر قطر کاواکی به دست آمده از شبیه‌سازی‌های فعلی با داده‌های آزمایشگاهی بیانگر درستی فرض فشار حدی در مراحل مدل‌سازی فاز کاویتاسیون در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا است.

- سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن خالی به هنگام خروج گلوله از آن به شکل لوزی است. اما زمانی که گلوله از دیواره مخزن حاوی سیال خارج می‌شود، شکل سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن با شکل سوراخ ایجاد شده در دیواره مخزن خالی متفاوت بوده و میزان آسیب‌های ساختاری وارده بر دیواره‌های مخزن حاوی سیال به مراتب بیشتر است.

5- فهرست علائم

A	پارامتر ثابت در معادله نرخ رشد کاواکی
A'	ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک
A_p	مساحت سطح مقطع گلوله (m^2)
B	پارامتر ثابت در معادله نرخ رشد کاواکی
B'	ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک
C'	ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک
C_0	ضریب درگ در نبود پدیده کاویتاسیون
C_D	ضریب درگ
c_l	سرعت صوت در سیال (ms^{-1})
d_{max}	حداکثر قطر کاواکی (m)
d_p	قطر گلوله (m)
E	مدول یانگ (MPa)
F_D	نیروی درگ (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h	ارتفاع سوخت در داخل مخزن (m)
k	پارامتر کاویتاسیون
m	ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک
n	ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک

- [16] X. Yang, Z. Zhang, J. Yang, Y. Sun, Fluid-structure interaction analysis of the drop impact test for helicopter fuel tank, *SpringerPlus*, Vol. 5, No. 1573, pp. 1-21, 2016.
- [17] Y. Pei, B. Shi, Method for analyzing the effect of projectile impact on aircraft fuel tank inerting for survivability design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 230, No. 13, pp. 2345-2355, 2015.
- [18] D. Townsend, N. Park, P. M. Devall, Failure of fluid filled structures due to high velocity fragment impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 29, No. 1-10, pp. 723-733, 2003.
- aluminium tubes subjected to high-velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 93, No. 10, pp. 2598-2609, 2009.
- [14] P. J. Disimile, J. Davis, N. Toy, Mitigation of shock waves within a liquid filled tank, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 2-3, pp. 61-72, 2011.
- [15] M. Buyuk, S. Kan, M. J. Loikkanen, Explicit finite-element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 287-295, 2009.