ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir



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

## حسن منصوری<sup>1</sup>، حمیدرضا زارعی<sup>2\*</sup>

1– کارشناس ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص) ، تهران 2– دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران \* تهران، صندوق پستی zarei@ssau.ac.ir،1384673411

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 26 مرداد 1396 پذیرش: 26 بهمن 1396 ادائه د سابت: 24 سفند 1396	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 می تواند آسیبهای ساختاری شدیدی را به آن متحمل سازد. مسئله برهم کنش سازه و سیال در نظر گرفته شده با استفاده از دیدگاه اویلری–لاگرانژی و توسط نرمافزار الاس-
<i>کلید واژگان:</i> اویلری–لاگرانژی	داینا حل شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیهسازیهای انجام شده با نتایج تجربی نشان داده است که نرمافزار ال[سداینا 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
برخورد گلوله فوق سریع	صورت عددی شبیهسازی شده است. در این تحقیق کلیه مراحل شامل نفوذ گلوله، فاز کاویتاسیون، تنش.های وارده به مخزن وخروج گلوله بررسی شده است. مقایسه کانتورهای تنش ونمیسز دیوارههای مخزن خالی و مخزن حاوی سیال نشان از ازدیاد 30 درصدی ماکزیمم تنش
مخزن حاوی سیال	ون میسز 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 تبیین شده است. نتایج عددی نشان میدهند که به دلیل وجود تنش های ماید شده از جانب سال بر جدارههای مخنن جامی سال مد خراب ایجاد شده در آن با مد خراب مخنن خال کاملاً متفاعت است.

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

#### Hassan Mansoori<sup>1</sup>, Hamidreza zarei<sup>2\*</sup>

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	ABSTRACT
Original Research Paper Received 22 November 2017 Accepted 15 February 2018 Available Online 15 March 2018	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
Keywords: Eulerian-Lagrangian Impact Hyper Velocity Projectile Tank	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

### 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 هیدرودینامیکی 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 دیوارههای مخزن میتواند منجر به ارائه روشهایی کارا جهت کاهش و تضعیف اثرات مخرب نفوذ گلوله در مخزن سوخت و پدیده رام هیدرودینامیکی گردد. تستهای آتش و یا دیگر تستهای تجربی برای انجام

Please cite this article using:

رام هیدرودینامیکی<sup>۱</sup> پدیده مخربی است که در اثر نفوذ یک گلوله فوقسریع در یک محفظه حاوی سوخت روی میدهد. در این پدیده، در اثر نفوذ گلوله یک فشار داخلی بزرگ از جانب سوخت به دیوارههای مخزن وارد میآید که به نوبه خود میتواند آسیبهای ساختاری شدیدی را به آن متحمل سازد.

از جمله صدمات رام هیدرودینامیکی به مخزن سوخت می توان به سوراخ شدن و

mode of fluid-filled tank is quite different with the failure mode of the empty one.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

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)

<sup>1</sup> Hydrodynamic ram

مطالعات پارامتریک، قطعا پر هزینه و در برخی موارد غیر عملی هستند. لذا در تازه-ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه، تاکید بیشتری بر توسعه روشهای عددی برای شبیهسازی این مسئله پیچیده که شامل برهم کنش تواما 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<sup>۱</sup> از دو نوع تکنیک کوپلینگ متفاوت با نامهای کوپلینگ معومی و کوپلینگ دلخواه اویلری–لاگرانژی برای ارتباط بین سازه و سیال استفاده

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 می توان 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 می کند. آن گونه که در آزمایشهای ام-سیمیلن [2] و امسیمیلن وهاروی [3] نشان داده شده است، در اثر انتقال سریع انرژی جنبشی از گلوله به سیال یک موج شوک نیم کروی از نقطه برخورد بتدریج منتشر شده و در داخل سیال به حرکت در می آید. در شکل 2 برای نمایش امواج شوک ناشی از یک ساچمه فولادی دارای قطر 3.2 میلی متر که با سرعت



Fig. 1 Four different phases of hydrodynamic ram event [1] ([1] شكل 1 چهار فاز مختلف پديده رام هيدروديناميكي



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 می کند، 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 می دهد.

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 ترانسدیوسرهای 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.

#### 1-2- 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 ترانسدیوسرهای فشار و مکان گلوله متحرک در داخل سیال در هر لحظه توسط عکسبرداریهای خیلیسریع ثبت و ضبط شدهاند.

#### 1-3- فاز كاويتاسيون

فاز کاویتاسیون پیچیدهترین و در عین حال ناشناختهشدهترین فاز پدیده رام هیدرودینامیکی میباشد. هنگامی که گلوله در داخل سیال به حرکت در می-آید، 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

<sup>1</sup> 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 می-گردد. به این حرکات نوسانی سیال و تشکیل حفره هوا در داخل مخزن در اصطلاح پديده كاويتاسيون گفته مىشود [4]. علاوهبر افزايش فشار سيال 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 مى كند. بسته به اندازه و ابعاد مخزن، اين فاز مى تواند قبل و يا 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 مى شود. لذا اين تنش انباشت شده موجب متفاوت شدن شكل سوراخ ايجاد شده در ديواره 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 اخیرا 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 شبیه-سازی تغییر حالات پلاستیک نبود همین امر، موجب رها شدن این کد در شبیه-سازیهای آتی پدیده رام هیدرودینامیکی گردید. در ادامه روش تحلیل تصویر دگرگون پذیر 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 دگرگون پذیر، برخی از کدهای دیگر بسرعت توسعه یافتند. یکی از این کدها، کدی موسوم به کد يواچآراسآر ابود كه در سال 1977 توسعه يافت. البته پس از گذشت مدت زماني، این کد با کد بیآر- وان ترکیب شد. علاوهبراین، کدهای مشتق شده دیگری نظیر کد ای رام<sup>۲</sup> از کد یواچ آراس آر استخراج شدند. کد ای رام 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 شبیه سازی موفق برهم کنش سازه و سیال در پدیده رام هيدروديناميكي نداشتهاند.

با توجه به تكامل روشهای المان محدود در دهه هشتاد میلادی، نتایج حاصل از مدلسازی ها به تدریج به نتایج واقعی نزدیک شدند. به تازگی، روش اویلری-لاگرانژی و روش هیدرودینامیک ذرات هموار (اس پیهاش ؓ) نشان دادهاند که می-توانند مسائل مربوط به برخورد و برهم کنش سازه و سیال را بخوبی حل کنند. به همین دلیل است که در حال حاضر بسیاری از محققین از این روشها برای شبیه-

<sup>1</sup> UHRSR code

موارد استفاده از روش اس پیهاش در شبیه سازی پدیده رام هیدرودینامیکی را می توان 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 عملا نمیتوان دقت روش مورد استفاده آنها را به طور كامل تاييد نمود. با اين حال در سال 2002 و 2008 دو شبيهسازى بسيار 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 وینژویچ 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 اس پیهاش در شبیه سازی مسئله برخورد گلوله به مخزن سوخت بود. تنها فشار سیال، در طی شبیه-سازیهای عددی اندازه گیری 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 اس پی هاش در شبیه سازی پدیده رام هیدرودینامیکی بود، اما یک مطالعه کامل تر توسط واراس 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 اس پی هاش حل شد. پس از آن آزمایش هایی جهت بررسی فشار در نقاط مختلف مخزن و نحوه رشد و توسعه کاواکی در داخل آن انجام گردید. سپس نتایج عددی با نتايج أزمايشگاهي مقايسه شدند. هدف از اين مطالعه بررسي توانايي روش المان محدود مبتنی بر دیدگاه اویلری-لاگرانژی و روش اس پیهاش 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 اس پی هاش مدل سازی شد. نتایج به دست آمده از دو روش مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند. آنها با مقایسه نتایج نشان دادند که هرچند دقت روش اس پی هاش 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، واراس و همکاران [11] یک مقاله مشابه در مورد پدیده رام هیدرودینامیکی در یک مخزن نیمه پر را منتشر کردند. آن ها با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیهسازیهای عددی در این مقاله نشان دادند که نرمافزار ال اس داینا این توانایی را دارد که بتواند نتایج مربوط به پدیده رام هیدرودینامیکی را در داخل یک مخزن سوخت با دقت مناسبی ارائه دهد. اخیرا، 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 آسان تر از مخزن فولادی تخریب می گردد. همچنین واراس 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 شبیه سازی شده است. در این تحقیق کلیه مراحل شامل نفوذ گلوله، فاز کاویتاسیون، تنشهای وارده به مخزن در حالت پر وخالی و خروج گلوله بررسی شده است. همچنین در این تحقیق مد خرابی مخزن حاوی مایع و تفاوت آن با مخرن خالی برای اولین بار بصورت عددی تعیین شده است.

سازی مسائل پیچیده برهم کنش سازه و سیال استفاده میکنند. احتمالا یکی از اولین

از أنجایی که در حوزه پدیده رام هیدرودینامیکی، کار آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] یکی از برجستهترین و در عین حال یکی از پراستنادترین مقالات در سال های 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 شبیه سازی های انجام شده ابعاد تازهای از تحلیل سازهای پدیده رام هیدرودینامیکی را نیز روشن سازد.

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.14.7 ]

53

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ERAM code <sup>3</sup> SPH

#### 2- تعريف مسئله و معرفي روش حل

#### 1-2- تعريف مسئله

در کار حاضر سعی می شود تا با استفاده از نرمافزار المان محدود ال اس داینا مسئله آزمایشگاهی رام هیدرودینامیکی که توسط دیسیمیله و همکاران [4] مورد بررسی قرار گرفته، به صورت عددی شبیه سازی گردد. لذا مدل المان محدود متناظر با مسئله آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] در شکل 3 ارائه شده است. همان طور که در شکل پیداست، مسئله حاضر از نوع مسائل برهم کنش سازه و سیال می باشد 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 1.86 متر و فاصله هر یک از دیواره های بالایی و پایینی و دو دیواره دیگر مخزن برابر با 1.828 متر می باشند. همچنین ضخامت همه دیواره های مخزن برابر با 1.587 میلی متر است. همچنین قطر گلوله کروی فولادی 12.7 میلی متر است و با سرعت تقریبی 341 متر بر ثانیه به سمت مخزن شلیک می شود.

#### 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\_220<sup>(</sup>) در نرمافزار ال|سداینا 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 شبیه-سازی آن در نرمافزار مناسب به نظر میرسد. مدل ماده جانسون-کوک یک



Fig. 3 Physical model considered in the present study شکل 3 مدل فیزیکی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر

<b>جدول 1</b> خواص فیزیکی مربوط به گلوله				
Table 1 Physical properties of the projectile				
V	E (MPa)	ho (t/mm <sup>3</sup> )	مادہ	
0.28	207000	7.83×10 <sup>-9</sup>	فولاد	

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> MAT\_020

<sup>2</sup> MAT\_015

مدل ماده بسیار دقیق مبتنی بر آزمایش های تجربی است. در این مدل مقدار تنش معادل به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک (٤)، نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد ( $\mathcal{E}'$ ام =  $\mathcal{E}'/\mathcal{E}'$ )، دمای بدون بعد  $T^*$  و تعدادی ضرایب ثابت شامل بدون می شود[15].

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

$$T^* = \frac{1-r}{T_m - T_r}$$
(2)  
که در آن به ترتیب *T* دمای ماده، *T*<sub>r</sub> دمای اتاق و *T*<sub>m</sub> دمای ذوب ماده هستند.

ک در آن به تریب ۲ تعنای محاف ۲۰ تعنای اتاق و ۲۰ تعنای توب محاف مستند. لازم به ذکر است که در این مدل مقادیر ضرایب ثابت برای فلزات مختلف، متفاوت بوده و از طریق آزمایش ها و تست های تجربی به دست می آیند.

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 کاویتاسیون در آن بروز پیدا میکنند و تاثیر قابل ملاحظهای بر تغییر شکل مخزن دارد از اهمیت بالایی در شبیهسازی پدیده رام هیدرودینامیکی برخوردار است. در نرمافزار الاسداینا به منظور شبیهسازی سیال از مدل ماده مت\_نول<sup>7</sup> (مت\_<sup>000</sup>) استفاده میشود. در این مدل ماده، فشار سیال داخل مخزن با توجه به دانسیته سیال و به کمک یک معادله حالت<sup>6</sup> به دست می-آید. غالبا به منظور شبیهسازی سیال از دو معادله حالت مختلف استفاده می-شود که این دو عبارتند از: معادله حالت چند جملهای خطی و معادله حالت گرانیسن<sup>2</sup>. معادله حالت چند جملهای خطی و اساس رابطه (3) تعریف می-شود [10].

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

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

Table 2 K	equired paran	leters in the Johnson	-Cook model [15]
واحد	مقدار	نماد در الاسداینا	نام كميت
t/mm <sup>3</sup>	2.77×10 <sup>09</sup>	RO	چگالی
MPa	73080	Ε	مدول يانگ
-	0.33	PR	نسبت پواسن
MPa	265	Α	ضريب ' A
MPa	426	В	ضريب ' B
-	0.34	Ν	ضریب n
_	0.015	С	C' ضريب
-	1	М	ضریب <i>m</i>
Κ	775	TM	دمای ذوب
Κ	294	TR	دمای محیط
S <sup>-1</sup>	1	EPSO	نرخ کرنش مؤثر
Nmm/tK	8.75×10□	СР	گرمای ویژه
-	0.13	D1	$D_1$ ضريب
-	0.13	D2	ضريب D <sub>2</sub>
-	□1.5	D3	ضريب D <sub>3</sub>
-	0.011	<i>D</i> 4	ضريب D <sub>4</sub>
-	0	D5	ضريب D <sub>5</sub>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> MAT\_NULL <sup>4</sup> MAT\_009

Equation of state

6 Gruneisen equation of state

که در آن  $1 - (\rho/\rho_0) - \mu$  مىباشد. همچنين E معرف انرژى داخلى سيال بر واحد حجم و  $(\rho_1, \rho_0)$ ،  $(\rho_1, \rho_2)$  و  $(\rho_2, \rho_1)$  معادله حالت براى بر واحد حجم و  $(\rho_1, \rho_2)$ ،  $(\rho_2, \rho_2)$  و  $(\rho_2, \rho_2)$  مىبال مورد نظر هستند.

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

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

که در آن C،  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_2$ ،  $\delta_1$  و B ضرایب معادله حالت برای سیال مورد نظر هستند. صرفنظر 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 چند جمله ای از مراجع [01]، [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:

 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 میشود. برای اندازه گیری سرعت جبهه موج فاز شوک، ابتدا مقدار زمان لازم بین دو قله فشار مربوط به دو موج متوالی در فاصلههای 10 و 20 میلیمتری از دیواره مخزن محاسبه می گردند. در ادامه با تقسیم فاصله بین دو نقطه در نظر گرفته شده بر مقدار زمان به دست آمده میتوان مقدار سرعت جبهه موج را تعیین نمود.

نتایج به دست آمده با استفاده از سه معادله حالت مختلف و میزان خطای هرکدام از آنها 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 شبیهسازی سیال عامل در پدیده رام هیدرودینامیکی

Table 3	Comparison	of	different	equations	of	state	for	fluid
simulatio	on in the hydro	odyr	namic ran	n event				

سرعت جبهه موج و درصد خطای تقریبی	سرعت پسماند و درصد خطای تقریبی	نوع معادله حالت
روبين 1955 متر بر ثانيه (5 ( م ( )	145 متر بر ثانیه (4 د مد)	گرانيسن نوع 1
(1773 درصد) 1773 متر بر ثانیه	(4 درصد) 141 متر بر ثانیه	گرانىسى نوع 2
(14 درصد) 1896 متر بر ثانیه	(7 درصد) 140 متر بر ثانیه	
(8 درصد)	(7 درصد)	چند جمنوری خطی تاونسند و همکاران
2061 متر بر ثانيه (-)	151 متر بر ثانیه (-)	[18]

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

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

#### 2-3- انتخاب نوع تماس و مش بندی

برای شبیهسازی 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 گونهای که در آن دو سطح پایه<sup>۱</sup> و پیرو<sup>۲</sup> تعریف شده و نرمافزار ال-اس داینا در ابتدا امکان نفوذ نودهای پیرو را در المانهای پایه بررسی کرده و پس از آن همین فرایند را برای نفوذ نودهای پایه در المانهای پیرو تکرار می کند. با توجه رفتار متفاوت سیالات در مقایسه با جامدات و تفاوتهای موجود در نحوه مدلسازی عددی این دو پدیده، در بحث شبیهسازی با توجه به وجود در هم کنش بین گلوله و سیال، شبیهسازی گلوله با استفاده ار المانهای لاگرانژی و برای شبیهسازی 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 بسشتر موارد هر چه قدر اندازه مش کوچکتر شود دقت حل مسئله بالاتر میرود، اما به تبع آن هزینه محاسبات و زمان لازم برای حل نیز افزایش مییابد. 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 میلیمتر به عنوان اندازه مش مناسب انتخاب شده است.

#### 2-4- شبيەسازى كاويتاسيون

در حین فرایند رام هیدرودینامیکی، کاویتاسیون زمانی اتفاق میافتد 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 شبیهسازی 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 شبیهسازی برابر با 0.1013 مگاپاسکال در نظر گرفته می شود. در ابتدای شبیهسازی برابر با 10.103 مگاپاسکال در نظر گرفته می شود. در وا ایتدای شبیه سازی  $\mu = 0$  می دادن MPa والیه سیال برابر با ابتدای شریه سیال می داده حالت گرانیسن، مقدار انرژی اولیه سیال برابر با وا 0.921 MJ در معادله حالت گرانیسن، مقدار انرژی اولیه سیال برابر با عامل، افزایش فشار جداره های مخزن را نیز در پی دارد و این در حالی است

**جدول 4** پارامترهای مورد نیاز در معادله حالت گرانیسن 1 [10]

Table 4 Required parameters for Gruneisen 1 equation of state			
واحد	مقدار	نام پارامتر	
mm/s	$1.448 \times 10^{6}$	С	
_	1.979	$S_1$	
_	0	$S_2$	
_	0	$S_3$	
_	0.11	<b>%</b>	
_	3	а	

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.14.7 ]





که میبایست فشار جدارههای مخزن در لحظه ابتدایی برابر با صفر باشند. برای تحقق این امر میتوان با استفاده از گزینه لود\_شل\_ست<sup>۱</sup> در نرمافزار ال اس داینا 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 ال اس داینا در بحث شبیه سازی موفق پدیده رام هیدرودینامیکی، محاسبه دقیق فشار سیال در نقاط مختلف مخزن و مقایسه آن ها با نتایج آزمایشگاهی منتشر شده از اهمیت فراوانی برخوردار است. برای محاسبه فشار سیال در نواحی مختلف می توان موقعیت قرارگیری ترانسدیوسرهای فشار را در نرمافزار ال اس داینا تعیین نمود.

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

#### 3- صحتسنجي و بحث در مورد نتايج

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 قرار گیری ترانسدیوسرهای فشار

 Table 5 The placement positions of pressure transducers

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

<sup>1</sup> LOAD\_SHELL\_SET

می شود. شکل 5 نمونه ای از این امواج را در داخل مخزن نشان میدهد.

در اثر حرکت این امواج شوکی در داخل سیال و برخورد آنها با دیواره-های مخزن، مقداری تنش در دیوارههای مخزن ایجاد می گردد. برای روشن شدن این مطلب تنش ناشی از برخورد گلوله به مخزن خالی و مخزن پر مورد مقایسه قرار می گیرند. شکل 6 کانتور تنش ون میسز<sup>۲</sup> ناشی از برخورد و نفوذ گلوله را در داخل یک مخزن خالی نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود ماکزیمم مقدار تنش وارده بر دیواره مخزن برابر با 3965 مگاپاسکال می باشد. 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 ونمیسز 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 ونمیسز وارد بر دیواره مخزن پر برابر با 512.7 مگاپاسکال میباشد. بنابراین با مقایسه شکلهای 7 و 6 نتیجه میشود:

ماکزیمم تنش ونمیسز ایجاد شده در دیواره مخزن حاوی سیال تقریباً 30 درصد بیشتر از مخزن خالی می باشد که این امر تاثیر قابل ملاحظه امواج شوک را در ایجاد تنش های 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 ونمیسز (مگاپاسکال) دیواره مخزن خالی در لحظه 25 میکروثانیه پس از برخورد

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.14.7

 $<sup>^{\</sup>rm 2}$  Von Mises stress



Fig. 7 Von Mises stress contour (MPa) of the fluid filled tank wall at the 25 microseconds after the impact 25 شكل 7 كانتور تنش ونميسز (مگاپاسكال) ديواره مخزن پر در لحظه ميكروثانيه پس از برخورد

می سازد. در برخورد گلوله به مخزن خالی قسمت اعظمی از دیواره مخزن هیچ تنشی را تجربه نکرده و کانتورهای تنش غیر صفر عموما در نواحی مجاور به محل برخورد تمرکز یافتهاند در حالی که در حالت برخورد گلوله به مخزن پر، کانتورهای تنش غیر صفر تقریباً تمامی مساحت دیواره مخزن را در بر می-گیرند. بنابراین از این موضوع می توان گسترش و پخش شدگی 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 تنش های اضافی در مخزن حاوی سیال در نهایت می تواند موجب ایجاد کرنش بیشتر و تغییر شکل قابل توجه دیواره های مخزن گردد که این خود نشان دهنده 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. دیسیمیله و همکاران [4] مطابق با شکل 8 یک رابطه تجربی را برای نشان دادن این کاهش فشار به صورت رابطه (5) معرفی کردهاند:

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

که در آن heta زاویه نقطه واقع بر جبهه موج، p فشار نقطه مذکور و  $p_{00}$  فشار نقطه واقع بر محل تقاطع کمان جبهه موج و امتداد شلیک میباشد که طبق شکل 7 در زاویه 90 درجه قرار میگیرد.



Fig. 8 Representation of the transducer angle from the shot line [4]
[4] [4] شکل 8 نمایش زاویه قرارگیری ترانسدیوسر فشار نسبت به امتداد شلیک [4]

همچنین نسبت فشارهای اندازه گیری شده توسط ترانسدیوسرهای P4 و و P3 و P4 و P7 به فشار اندازه گیری شده توسط ترانسدیوسر P3 در کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] در شکل 9 با هم مقایسه شده اند. همان طور که ملاحظه می شود تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده و نتایج آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] برقرار است.

همانطور که در شکل 10 مشاهده می شود 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 می شوند. از طرف دیگر، فشارهای وارده از طرف این امواج بر دیوارههای مخزن موجب انباشته شدن تنشهای اضافی در آنها می شوند.

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 می گردد 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 می باشد. البته لازم به ذکر است که اندازه گیری 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 می تواند مورد قبول واقع گردد.



**Fig. 9** Variations of transduser pressure P4, P5 and P6 to P3 P3 و P3 نسبت به فشار ترانسدیوسر های P4، P4 و P7 نسبت به فشار ترانسدیوسر P3





(c) t = 1.5 ms (d) t = 2.0 ms Fig. 10 Created waves in the fluid due to penetration of the projectile in it



Fig. 11 Comparison between experiment [4] and numerical simulation of pressure time history (1) متايسه تغييرات زماني فشار حاصله از روشهاي تجربي [4] و عددي

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 می دهد. در نرمافزار ال|س داینا معادله حالتی که قادر باشد این تغییر فاز را در نظر بگیرد، وجود ندارد. لذا برای حل این مشکل می بایست راهکار مناسبی ارائه شود. یک روش ساده برای غلبه بر این مشکل تعریف یک فشار حدی است، به طوریکه در هیچ مکانی از مخزن فشار سیال به پایین تر از این فشار حدی است، به طوریکه در هیچ حدی همان فشار بخار مایع است که مقدار آن برای سیالات گوناگون متفاوت است. به وسیله این روش می توان 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 می شود، یعنی جایی که فشار مایع به تدریج کم و کمتر شده تا به فشار بخار آن

شکل 12 کاواکی ناشی از فاز کاویتاسیون را که از آزمایش های دیسیمیله 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 می-توان ماکزیمم مقدار قطر کاواکی را از نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نیز به

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 می-دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می گردد، ماکزیمم شعاع کاواکی برابر با 44 میلیمتر و در نتیجه ماکزیمم مقدار قطر کاواکی برابر با 88 میلیمتر می باشند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از آزمایش-های دیسیمیله و همکاران [4] و نتایج حاصل از شبیه سازی حاضر تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

دیسیمیله 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. همان طور که در این شکل مشاهده می شود ماکزیمم مقدار قطر کاواکی در این حالت تقریباً برابر با 161 میلی متر می باشد.

شکل 15 به طور مشابه، رشد کاواکی در داخل مخزن را به صورت عددی به تصویر می کشد. با توجه به این شکل، ماکزیمم شعاع کاواکی برابر با 80 میلیمتر و در نتیجه ماکزیمم قطر آن برابر با 160 میلیمتر می باشند. با مقایسه این مقدار با مقدار به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی دیسیمیله و همکاران [4] ملاحظه می شود که نتایج عددی و آزمایشگاهی با تقریب خوبی به هم نزدیک هستند. طبیعتا می توان نتیجه گرفت که این مطابقت نتایج، نشان دهنده استفاده از راهبرد مناسب به منظور شبیه سازی پدیده رام هیدرودینامیکی در کار حاضر است.



Fig. 12 Cavity formed in the experiments of Disimile et al [4] (4] شکل 12 کاواکی تشکیل شدہ در آزمایش های دیسیمیله و همکاران



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 دیسیمیله و همکاران [4]

r = 80 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 شبیهسازی-های 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 تنشی را در آن ایجاد نمی-کند. 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 می توان نتیجه گرفت که زمانی که گلوله به سمت مخزن خالی شلیک می شود، شکل سوراخ ایجاد شده در دیوارههای مخزن همسان و به فرم لوزی می باشد.



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

حال این سوال پیش می آید 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 می توان به شکل 18 مراجعه نمود. جالب است که زمانی که گلوله از دیواره مخزن حاوی سیال خارج می شود، 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 دیگر لوزی شکل نبوده و فرمی علت امواج شوک قوی وارد شده از طرف سیال، دیواره های مخزن حاوی سیال شدیدا موج برداشته و مد خرابی آنها نسبت به دیوارههای مخزن خالی به مراتب بیشتر است. نمونه این مد خرابی را در تست تجربی می توان در شکل 19 که توسط واران و همکاران [13] آزمایش شده است، مشاهده کرد.

#### 4- نتیجه گیری

پدیده رام هیدرودینامیکی یک اتفاق مخرب در مخازن سوخت است که میتواند منجر به صدمات زیانباری شود. به دلیل هزینهبربودن 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. عمدتا 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]

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 حدودا 30 درصد بیشتر از مقدار ماکزیمم تنش ونميسز ايجاد شده در مخزن خالى مىباشد كه اين امر تاثير 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 كاهش بيشتر سرعت آن مىشوند.

- 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 می-شود، 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 علايم

پارامتر ثابت در معادله نرخ رشد کاواکی	Α
ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک	A'

- $(m^{\Box})$  مساحت سطح مقطع گلوله  $A_p$
- پارامتر ثابت در معادله نرخ رشد کاواکی В
- ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک B'
- ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک C'
- ضریب درگ در نبود پدیده کاویتاسیون  $C_0$ 
  - ضریب در گ
    - $C_D$ CI
  - سرعت صوت در سیال (<sup>10</sup>ms) حداکثر قطر کاواکی (m)  $d_{\rm max}$ 
    - قطر گلوله (m)  $d_p$
    - مدول یانگ (MPa) E
      - نیروی درگ (N)  $F_D$
    - شتاب گرانش (ms<sup>□2</sup>) g
  - ارتفاع سوخت در داخل مخزن (m) h
    - پارامتر كاويتاسيون k
- ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک т
- ثابت ماده در مدل ماده جانسون-کوک п

فشار برخورد (MPa)

p

 $p_0$ 

 $r_c$ 

Т

t

 $u_s$ 

ν

- فشار اوليه سيال (MPa)
- فشار بخار مايع (MPa)  $p_v$ 
  - شعاع کاواکی (m)
- ضريب شيبهاگونيوت سيال SI
  - دمای مطلق ماده (K)
    - زمان (s<sup>3</sup>)
  - دمای ذوب ماده (K)  $T_m$  $T_r$ 
    - دمای اتاق (K)
- (ms<sup> $\Box$ </sup>) سرعت گلوله قبل از برخورد به مخزن (ms<sup> $\Box$ </sup>  $u_0$
- سرعت گلوله پس از برخورد به مخزن (<sup>0</sup> ms))  $u_{n}$ 
  - سرعت پیشروی جبهه موج (<sup>00</sup>ms)

#### علايم يوناني

- كرنش پلاستيك ε
- نرخ کرنش (s<sup>□1</sup>) ε' كرنش شكست
- Ef ضريب معادله حالت گرانيسن 10
  - ضريب پواسون
- زاويه شعاعي نقطه واقع بر جبهه موج θ
  - چگالی سیال (kgm<sup>□3</sup>)  $\rho_l$
  - چگالی گلوله (kgm<sup>□3</sup>)  $\rho_p$
  - تنش هيدرواستاتيک (MPa)  $\sigma_h$

#### زيرنويسها

ماكزيمم max

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 izn 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.
- P. W. Randles, D. R. Seemann, T. C. Carney, L. D. Libersky, Numerical [8] 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

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.4.14.7

- [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
- [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 the survivability of the structure of the s
- [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.
- 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.