



## تحلیل تجربی و عددی تأثیر استفاده از صفحه‌های سوراخ‌دار در جلوی صفحه هدف در برابر ضربه بالستیک

جواد نیک‌زارع<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲\*</sup>، حامد احمدی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶ Ghlia530@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۸ مهر ۱۴۰۱  
داوری اولیه: ۱۳ آبان ۱۴۰۱  
پذیرش: ۲۹ آبان ۱۴۰۱

### کلیدواژگان:

صفحه زرهی سوراخ‌دار  
صفحه زرهی پایه  
ضربه سرعت بالا  
تحلیل تجربی و عددی  
پرتابه با نوک اجابو

پیشتر به منظور حفاظت از افراد و تجهیزات، از صفحه‌های زرهی یکپارچه استفاده می‌گردید. امروزه بهره‌مندی از صفحه‌های زرهی با طراحی‌های منحصر به فرد (ترکیبی از صفحه‌های سوراخ‌دار و پایه) مورد توجه می‌باشد. این طراحی جدید، سازه‌ای است متشکل از حداقل دو صفحه که یکی سوراخ‌دار و دیگری یکپارچه (فاقد سوراخ) بوده و نحوه قرارگیری آنها بدین صورت است که صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه یکپارچه (صفحه پایه) قرار گرفته و این ترکیب در مجموع مانع از نفوذ و آسیب‌رسانی پرتابه‌ها به هدف تحت حفاظت می‌گردد. مطالعات تجربی و عددی که بر روی این سازه‌ها صورت پذیرفت مشخص نمود این ترکیب از صفحه‌ها در مقایسه با صفحه‌های زرهی یکپارچه دارای قابلیت حفاظت بالستیک یکسان، تا ۳۱٪ وزن کمتری دارند. در آزمایش‌های انجام پذیرفته مشخص گردید اثر لبه موجب ایجاد انحراف در مسیر پرتابه و ایجاد سایش در نوک نیز پرتابه می‌گردد که در مجموع مانع نفوذ پرتابه در صفحه پایه و عبور از آن می‌شود. فاصله بین دو صفحه سوراخ‌دار و پایه نیز مورد مطالعه قرار گرفت که در آن مشخص گردید به منظور اثرگذاری مناسب صفحه سوراخ‌دار می‌بایست حداقل فاصله‌ای به اندازه بیش از طول پرتابه بین دو صفحه لحاظ گردد. این فاصله موجب می‌گردد ضمن داشتن اثر لبه، صفحه سوراخ‌دار کمترین آسیب ممکن را در برخورد پرتابه با آن به‌همراه داشته باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به کمک نرم‌افزار LS-DYNA، همگرایی مناسبی بین نتایج مشاهده شده است.

## Experimental and numerical analysis of the effect of using perforated plates in front of the target against ballistic impact

Javad Nikzare, Gholamhosein Liaghat\*, Hamed Ahmadi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B.1411713116, Tehran, Iran, Ghlia530@modares.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 30 September 2022  
First Decision: 4 November 2022  
Accepted: 20 November 2022

### Keywords:

Perforated Armor Plate  
Base Armor Plate  
Ballistic Impact  
Experimental and numerical analysis  
Ogive head projectile

### Abstract

In the Past, monolithic armor plates were used to protect people and equipment. Today, the use of armored plates with unique designs (a combination of base plate & perforated plate) is considered. This new design is a structure consisting of at least two plates, one with a hole and the other monolithic (without holes), and they are placed in such a way that the perforated plate is placed in front of the monolithic plate (base plate) and this combination generally prevents the projectiles from penetrating and damaging the protected target. Experimental and numerical studies performed on these structures showed that this combination of plates has up to 31% less weight compared to integrated armored plates with the same ballistic protection capability. In the performed experiments, it was found that the edge effect causes deviation in the projectile path and erosion in the projectile sharp point, which in total prevents the projectile from penetrating the base plate and passing through it. The distance between the perforated & base plate was also studied, in which it was found that in order to have a proper effect of perforated plate, at least a distance greater than the length of the projectile between the two plates should be considered. This distance causes while having the edge effect, the least damage should occur in the perforated plate. By comparing the results obtained from experimental and numerical studies performed using LS-DYNA software, a good convergence between the results has been observed.

### ۱- مقدمه

همواره در حال تغییر بوده است و به تبع افزایش تنوع در تجهیزات مورد استفاده بشر، ابزار محافظت از این تجهیزات نیز تنوع بیشتری پیدا نموده و روز به روز با پیشرفت‌های تکنولوژی، متالوژی،

از ابتدای تاریخ بشریت، همواره انسان‌ها به دنبال محافظت از جان و اموال خود بوده‌اند. شیوه این محافظت به موازات تغییر نوع خطرات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

J. Nikzare, Gh. Liaghat, H. Ahmadi, Experimental and numerical analysis of the effect of using perforated plates in front of the target against ballistic impact, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 7, pp. 9- 21, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.163348>

مکانیزم‌های شکست توضیح داده شود. همچنین در این پژوهش نشان داده شده است که می‌بایست هسته پرتابه با صفحه درگیر گردد تا شکست القا شود.

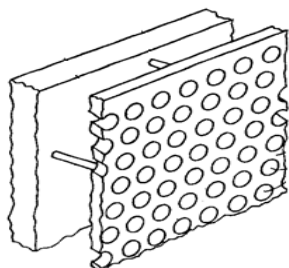


Fig. 1 Arrangement of arm or plates (perforated plate in front of base plate)  
شکل ۱ چیدمان صفحه‌های زرهی (صفحه سوراخ‌دار در جلو صفحه پایه) [۵]

روزنبرگ و همکاران [۶] در پژوهشی سعی نمودند تا مکانیزم‌های مهم برای شکست پرتابه ضدزره را با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان دهند. آنها چندین جنبه شکست پرتابه را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که همه جنبه‌های شکست پرتابه بر پایه دو اصل ساده یعنی ماده با استحکام بالا و نیروهای نامتقارن وارده بر مهمات ضربه زننده می‌باشد. راوید و هیرشبرگ [۷] یک راهکار بالستیک با استفاده از یک صفحه کمکی سوراخ‌دار فولادی با سختی بالا که کل سطح سوراخ‌ها در آن حدود ۴۰ تا ۵۰٪ می‌باشد را پیشنهاد نمودند. بالوس و همکاران [۸] کارایی جرمی صفحه‌های سوراخ‌دار را در مقابل پرتابه با بررسی تأثیر هندسه، خواص مکانیکی، ضخامت، شیب و فاصله نشان دادند. نوریس و اسمیت [۹] صفحه زره‌پوشی با سوراخ شکاف شکل که در آن شکاف‌ها نسبت به اضلاع صفحه زاویه‌دار بودند را ابداع نمودند. کیلیچ و همکاران [۱۰] با بررسی حالت‌های مختلف برخورد پرتابه زره‌پوش سوراخ‌کن  $7/62$  mm به صفحه زرهی سوراخ‌دار پرداختند و چهار حالت ممکن برخورد پرتابه با صفحه سوراخ‌دار را که عبارت بود از الف) مرکز سوراخ، ب) وسط دو سوراخ، پ) مرکز هندسی سه سوراخ و ت) لبه سوراخ، مورد پژوهش قرار دادند. میشر او همکاران [۱۱] طی پژوهشی به بررسی تأثیر حضور سوراخ‌ها بر روی رفتار ضربه بالستیک فولادهای با استحکام بالا به روش تجربی پرداختند. آنها یافتند که عملکرد یک صفحه زرهی با ایجاد یک الگوی منظم از سوراخ‌ها بر روی آن، به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. میشر او همکاران [۱۲] با انجام یک سلسله آزمایش‌های تجربی به بررسی تأثیر اندازه و شکل سوراخ‌ها بر روی آسیب وارده و میکروساختار صفحه‌های زره‌پوش فولادی تحت ضربه بالستیک پرداختند. آنها نشان دادند که کارایی بالستیک صفحه فولادی با سختی بالا حدود ۱۶٪ بیشتر از آلومینیوم ۷۰۱۷ به عنوان مرجع می‌باشد. این مقدار

تاکتیک‌های نظامی و ... بهبود یافته است. در این راستا یکی از پرکاربردترین روش‌های حفاظت، بهره‌مندی از انواع مختلف صفحه‌های محافظ و یا به اصطلاح صفحه‌های زرهی می‌باشد که دارای طیف وسیعی بوده و می‌توان آغاز آن را استفاده از زره‌پوش‌ها توسط افراد حاضر در جنگ دانست. در سال‌های گذشته، عملیات‌های حفظ امنیت نیازمندی خود به تحرک‌پذیری تاکتیکی را نشان داده‌اند. بنابراین تجهیزات و ماشین‌آلات حمل‌ونقل افراد و یا اشیاء می‌بایست کاهش وزن قابل ملاحظه‌ای به خصوص در زمینه زره‌های غیرفعال داشته باشند تا این صفحه‌ها باعث تحمیل هزینه و وزن مضاعف به سیستم نشوند [۱]. هدف از مطالعات در زمینه طراحی صفحه‌های زرهی، دستیابی به محافظت در برابر تهدید مشخص با سبک‌ترین و ساده‌ترین ساختار است. مکانیزم‌های اصلی ایجاد شکست توسط صفحه‌های زرهی بر اساس دو اصل استفاده از مواد با مقاومت بالا برای افزایش مقاومت در برابر نفوذ و همچنین استفاده از عدم تقارن در تعامل بین تهدید و صفحه زره‌پوش می‌باشد. راه حل صفحه زرهی ترکیبی مشتمل بر یک صفحه سوراخ‌دار ساخته شده از فولاد با سختی بالا، هر دو مکانیزم شکست مذکور را به همراه خواهد داشت [۲].

#### ۱-۱- صفحه زرهی سوراخ‌دار

یکی از انواع صفحه‌های زرهی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، صفحه زرهی سوراخ‌دار<sup>۱</sup> می‌باشد. این نوع صفحه‌های زرهی که اولین بار توسط بن-موشه پیشنهاد شده است، بر پایه سوراخ‌های ایجاد شده بر روی یک صفحه فولادی با سختی بالا می‌باشد [۲]. این صفحه سوراخ‌دار به طور عمده به عنوان یک زره افزودنی در جلوی صفحه زرهی اصلی (پایه) نصب می‌گردد. نحوه قرارگیری مجموعه صفحه زرهی به صورت شکل ۱ می‌باشد.

استفاده از صفحه زرهی سوراخ‌دار در اساس، برای شکستن یک پرتابه ورودی یا حداقل برای منحرف کردن آن از مسیرش است و در نتیجه قابلیت نفوذ باقیمانده آن را از طریق صفحه زرهی پایه کاهش می‌دهد. وزن کلی چنین سیستم زرهی به طور قابل توجهی کمتر از وزن یک صفحه زرهی یکپارچه با همان قابلیت ضد بالستیک است. معمولاً سوراخ‌ها (شکاف‌ها) برای رویارویی با قطر مشخصه تهدید (کالیبر پرتابه) طراحی شده‌اند [۳]. اولین مطالعه عددی انجام پذیرفته در زمینه برخورد پرتابه با لبه و اثرات آن توسط چکرون و همکارانش [۴] انجام پذیرفته است. در این پژوهش، ضربه پرتابه زره‌پوش سوراخ‌کن  $7/62$  mm به لبه یک هدف فولادی مورد مطالعه قرار گرفته بود تا در خصوص

<sup>۱</sup> Perforated Armor Plate

بورین و همکاران [۱۸] یک مدل احتمالی برای بهینه‌سازی صفحه‌های سوراخ‌دار فولادی با استحکام بالا برای مقاومت ضربه‌ای سیستم‌های زرهی معرفی نمودند. آنها در این تحقیق نتیجه‌گیری نمودند که مدل احتمالی برای بهینه‌سازی الگوی هندسی سوراخ‌ها در یک طراحی مهندسی می‌تواند مفید باشد و اینکه این مدل به گسترش دامنه ضخامت و خواص مکانیکی صفحه سوراخ‌دار نیاز دارد. موباشیر و همکاران [۱۹] مطالعاتی بر روی پاسخ بالستیک پرتابه ۱۲/۷ mm ضدزره در برابر صفحه زرهی سوراخ‌دار که از فولاد سازه‌ای توسعه یافته است مشاهده نمودند که پرتابه زمانیکه در حال عبور از صفحه زرهی سوراخ‌دار می‌باشد از مسیر مستقیم خود منحرف می‌گردد. بورین و همکاران [۲۰] با پژوهش بر روی کارایی حفاظتی صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته شده از فولادهای با استحکام بالا، فرآیند نفوذ پرتابه ضدزره در صفحه زرهی سوراخ‌دار که از جنس فولاد باینیتیک نانوساختار تولید شده بود را توصیف نمودند. آنها در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تأثیر تکه‌تکه شدن و یا انحراف هسته پرتابه زمانی که پرتابه به سطحی نزدیک به اطراف سوراخ برخورد می‌نماید (اثر لبه) را مکرر مشاهده نمودند.

نکته حائز اهمیت در پژوهش انجام پذیرفته آن است که با توجه به اینکه در فناوری‌هایی که جنبه نظامی دارند معمولاً تحقیقات انجام گرفته توسط کشورهای مختلف به ندرت در دسترس عموم قرار می‌گیرند و از آنجاییکه بررسی و تحقیق در خصوص صفحه‌های زرهی سوراخ‌دار در کشورمان تا کنون انجام پذیرفته است روشن است که نیاز مبرمی وجود دارد تا تحقیقات در زمینه صفحه‌های زرهی که در آنها از صفحه سوراخ‌دار بهره‌گیری شده است انجام پذیرد تا بتوان این سیستم زرهی را به خوبی شناسایی کرد و آن را بهبود بخشید تا بتوان از آن در تجهیز سازه‌ها، پلت‌فرم‌ها، خودروها، انواع ماشین‌آلات حمل و نقل و ... که نیازمند حفاظت بالستیک می‌باشند بهره‌مند گردید.

در پژوهش حاضر ابتدا تأثیر استفاده از صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه نشان داده شده است. سپس اثرگذاری پارامتر فاصله بین دو صفحه سوراخ‌دار و پایه با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی در فواصل مختلف مورد مقایسه، بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

## ۲- روش تجربی

### ۲-۱- جنس و خواص مواد

در آزمایش‌های تجربی انجام پذیرفته جنس مواد مورد استفاده برای پرتابه، صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه و همچنین جنس مواد مورد استفاده به منظور ساخت فیکسچرها و پین‌های تثبیت موقعیت

تا ۹۰٪ بهبود می‌یابد زمانیکه فولاد با سختی بالا به شکل سوراخ‌دار آن هم با سوراخ‌های مربعی با اندازه ضلع ۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار گیرد. آنها همچنین نشان دادند که انحراف و تکه‌تکه شدن پرتابه در حضور سوراخ‌ها بوقوع می‌پیوندد.

پاریس و همکاران [۱۳] با انجام یک سری آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی تکه تکه شدن پرتابه‌های ضدزره که به طور مایل و با زوایای مختلف به صفحه‌های فولادی برخورد می‌نمایند و در آنها نفوذ می‌کنند پرداختند؛ آنها در پژوهش خود نشان دادند که میزان (تعداد) تکه‌های ایجاد شده از برخورد پرتابه با صفحه زرهی به ضخامت صفحه و زاویه برخورد وابسته است. رادیساولجیویچ و همکارانش [۱۴] با بررسی اندازه قطر سوراخ و فاصله لبه سوراخ‌ها به طراحی یک صفحه زرهی سوراخ‌دار پرداختند که در آن به این نتیجه دست یافتند که با بزرگتر نمودن اندازه سوراخ‌ها آسیب وارده به صفحه پایه کاهش می‌یابد که دلیل آن خرد شدن کامل هسته پرتابه نفوذ کننده است.

کیلیچ و همکاران [۱۵] به بررسی رفتار بالستیکی صفحه‌های زرهی سوراخ‌دار با سختی بالا در مقابل پرتابه ضدزره ۷/۶۲ mm با دو روش آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداختند. آنها نشان دادند که مکانیسم‌های تقابل با پرتابه شامل: الف) نیروی نامتقارن وارده به پرتابه که موجب انحراف پرتابه از خط سیر برخورد آن می‌گردد، ب) شکست هسته پرتابه و پ) ایجاد ساییش در نوک پرتابه است.

بالوس و همکاران [۱۶] در پژوهش خود به بررسی هندسه، خواص مکانیکی و بالستیکی صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته شده از ماده آهن شکل‌پذیر آستِمپرد شده<sup>۱</sup> در دو وضعیت، یکی با استحکام بالا و دیگری با شکل‌پذیری بالا پرداخته‌اند. آنها نشان دادند که صفحه سوراخ‌دار ساخته شده از آهن شکل‌پذیر آستِمپرد شده در مقایسه با سایر صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته شده از مواد فولادی، کارایی جرمی مشابه، سطح آسیب بیشتر و قیمت ساخت کمتری دارد. کیلیچ و همکاران [۲] با پژوهش بر روی بهینه‌سازی صفحه‌های زرهی سوراخ‌دار از جنس فولاد با سختی بالا و با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی دریافتند که قطر سوراخ و فاصله بین لبه سوراخ‌ها تأثیر غیرخطی در عملکرد بالستیک این صفحه‌ها دارند. پالووسکی و همکاران [۱۷] با انجام یک پژوهش به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به بررسی تماس نامتقارن بین یک صفحه فولادی و یک پرتابه ضدزره پرداختند که طی آن به این نتیجه رسیدند که بین نقطه برخورد پرتابه به صفحه سوراخ‌دار و شکست پرتابه وابستگی وجود دارد.

<sup>۱</sup> Austempering

جدول ۳ خواص مکانیکی آلومینیوم 6061-T6 [۲۱]

Table 3 Mechanical properties of Al 6061-T6

عنوان	نماد	مقدار	واحد
چگالی	$\rho$	۲۷۰۰	$kg / m^3$
استحکام کششی نهایی	UTS	۳۱۰	Mpa
استحکام تسلیم	$\sigma_y$	۳۲۴	Mpa
مدول الاستیک (یانگ)	E	۶۹	Gpa
مدول برشی	G	۲۶	Gpa

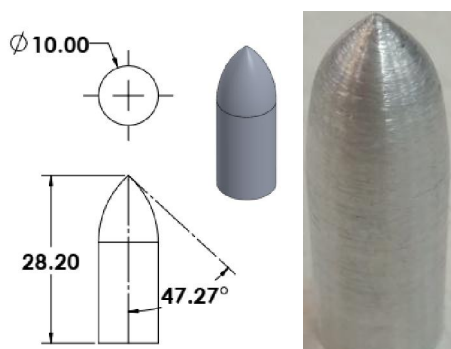


Fig. 2 The projectile used in experiments

شکل ۲ پرتابه مورد استفاده در آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر با توجه به شبیه‌سازی‌های اولیه هر دو صفحه سوراخ‌دار و پایه با ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. پارامتر مهم دیگر در صفحه سوراخ‌دار قطر سوراخ می‌باشد که این پارامتر در اغلب مقاله‌ها و به عنوان نمونه در مقاله‌های [۱۴، ۱۵] کمی کوچک‌تر و نزدیک به قطر هسته پرتابه ورودی انتخاب شده است و در مقاله [۱۸] و بر اساس داده‌های تجربی مقدار قطر سوراخ به صورت آمده در رابطه (۱) انتخاب گردیده است:

$$d = D - 0.2 \quad (1)$$

که در رابطه فوق D قطر هسته پرتابه ورودی و d قطر سوراخ در صفحه سوراخ‌دار می‌باشد.

بر همین مبنا قطر سوراخ‌ها در صفحه‌های سوراخ‌دار در این پژوهش با توجه به قطر پرتابه ورودی که ۱۰ میلی‌متر می‌باشد برابر با ۹/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ صفحه سوراخ‌دار و در شکل ۴ صفحه پایه نشان داده شده است.

در طراحی و ساخت صفحه سوراخ‌دار، پارامتر تأثیرگذار دیگر چیدمان سوراخ‌ها نسبت به یکدیگر و فاصله سوراخ‌ها از هم می‌باشد که در این زمینه نیز در پژوهش حاضر از چیدمان مثلثی که در مقاله مرسوم می‌باشد و در شکل ۵ نشان داده شده استفاده شده است. همچنین فاصله بین سوراخ‌ها ۱۳/۸ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه تفنگ گازی<sup>۱</sup> استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Gas Gun

صفحه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ فهرست اتصالات مورد نیاز برای مونتاژ نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم 6061-T6 در جدول ۳ آورده شده است.

## ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت پرتابه‌ها از میله آلومینیوم 6061-T6 به قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. فرآیند ساخت پرتابه‌ها بدین ترتیب بوده است که میل‌گردها با توجه به طول مورد نیاز (طول پرتابه که ۲۸/۲ میلی‌متر بوده است) در اندازه‌های ۳۰ میلی‌متر برشکاری گردیده، سپس با استفاده از دستگاه تراش، به شکل مورد نظر درآورده شده است. پرتابه‌های ساخته شده همگی با نوک دوکی‌شکل بوده و جرم آنها برابر با ۵ گرم می‌باشد.

جدول ۱ مواد اولیه ساخت نمونه‌ها و فیکسچرها

Table 1 Materials for making samples and fixtures

عنوان	متریال مورد استفاده	مشخصه متریال
پرتابه	میله آلومینیوم به قطر ۲۰ mm	آلومینیوم 6061-T6
صفحه سوراخ‌دار	ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ mm	آلومینیوم 6061-T6
صفحه پایه	ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ mm	آلومینیوم 6061-T6
فیکسچرهای اصلی	ورق فولادی به ضخامت ۱۵ mm	فولاد St37
فیکسچرهای واسط	ورق فولادی به ضخامت ۳ mm	فولاد St37
پین‌های موقعیت‌دهنده	گرده فولادی به قطر ۲۰ mm	فولاد St37

جدول ۲ اتصالات برای مونتاژ نمونه‌ها

Table 2 Joints for assembling samples

عنوان	مشخصه	تعداد (عدد)
پیچ	M16 به طول ۱۱۰ mm	۴
مهره	M16	۱۶
مهره	M10	۸

در شکل ۲ پرتابه ساخته شده جهت انجام آزمایش‌های تجربی نشان داده شده است. به منظور طراحی و ساخت صفحه‌های سوراخ‌دار و پایه یکی از پارامترها انتخاب ضخامت مناسب این صفحه‌ها جهت ایجاد حفاظت بالستیک مناسب و در عین حال به حداقل رساندن مجموع وزن این دو صفحه در مقایسه با وزن یک صفحه یکپارچه که دارای همان میزان حفاظت بالستیک می‌باشد است.

یکی از کدهای متداول به اصطلاح صریح<sup>۱</sup> که به صورت موفقیت آمیزی برای شبیه‌سازی ضربه پرتابه به یک صفحه زرهی مورد استفاده قرار گرفته است ال‌اس‌دینا<sup>۲</sup> می‌باشد [۱۵].

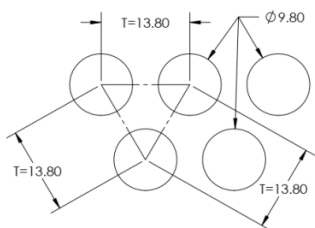


Fig. 5 Holes layout (60° arrangement) and distance between them

شکل ۵ چیدمان سوراخ‌ها (چیدمان ۶۰°) و فاصله آنها در صفحه سوراخ‌دار

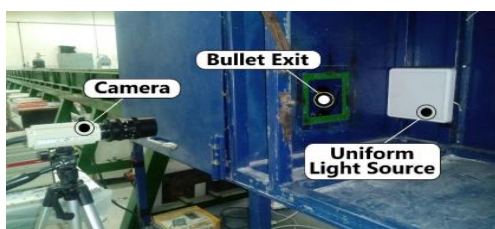


Fig. 6 High speed camera and how to deploy it

شکل ۶ دوربین سرعت بالا و نحوه استقرار آن

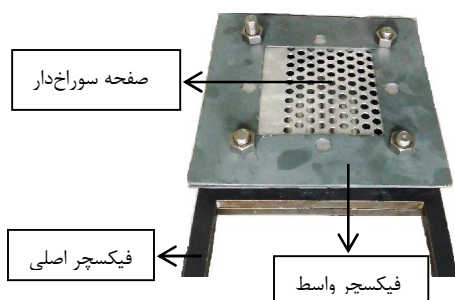


Fig. 7 Target plates layout (base + perforated plates)

شکل ۷ چیدمان مجموعه صفحه‌های هدف (صفحه پایه + سوراخ‌دار)

نرم‌افزار ال‌اس‌دینا یک کد اجزا محدود بسیار قوی می‌باشد که توانمندی بالایی در حل مسائل دینامیکی غیرخطی دارد. قابلیت این بسته نرم‌افزاری در تحلیل مسائل ضربه، انفجار، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، امواج شوک و ... و دارا بودن بیش از ۲۰۰ نوع مدل ماده گوناگون و ۱۴ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح، این کد را به یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مهندسی مبدل کرده است. بنا به توضیحات فوق و از آنجاکه پژوهش انجام پذیرفته نیازمند شبیه‌سازی پدیده‌هایی بوده است که در آنها علاوه بر تغییر شکل‌های بزرگ، نرخ کرنش‌های بالا نیز وجود داشته، بنابراین از کد غیرخطی LS-DYNA 971 R11 در تحلیل عددی این پژوهش بهره‌گیری شده است.

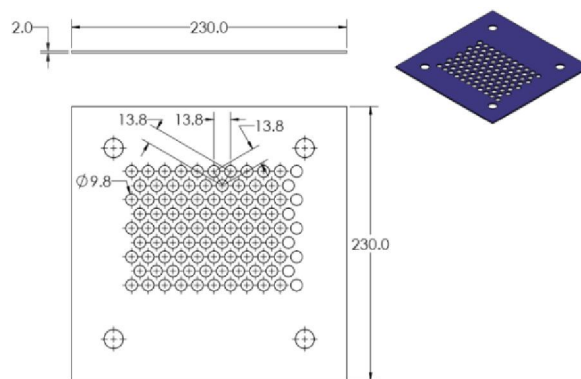


Fig. 3 Perforated plate used in experiments

شکل ۳ صفحه سوراخ‌دار مورد استفاده در آزمایش‌ها

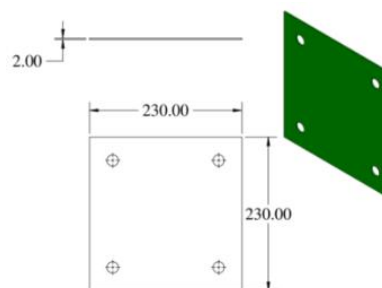


Fig. 4 Base plate used in experiments

شکل ۴ صفحه پایه مورد استفاده در آزمایش‌ها

جهت ثبت سرعت ورودی پرتابه (سرعت برخورد با صفحه هدف) از یک سیستم سرعت‌سنج لیزری استفاده شده و سرعت خروجی (باقیانده) پرتابه در صورت عبور از صفحه هدف، توسط یک کرومگراف سنجیده می‌شود. راه دیگر اندازه‌گیری سرعت خروجی پرتابه و نیز ثبت تصویر پرتابه خروجی از هدف استفاده از دوربین سرعت بالا می‌باشد که تصاویر مربوطه و نحوه قرارگیری آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مونتاژ صفحه‌های پایه و سوراخ‌دار در کنار یکدیگر جهت انجام آزمایش‌های سرعت بالا به صورت شکل ۷ می‌باشد.

### ۳- تحلیل عددی

ضربه سرعت بالا و مسائل نفوذ در برگیرنده تغییر شکل‌های بزرگ، فرسایش، نرخ کرنش بالا وابسته به رفتار غیرخطی و تکه‌تکه شدن می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی نفوذ به صورتی که تأثیرات ذکر شده در آن لحاظ شده باشد مهم است. روش‌های عددی و تکنولوژی محاسبات متناظر با آن به اندازه‌ای تکامل یافته که تغییر شکل‌های پیچیده و الگوهای نفوذ در فرآیند ضربه بالستیک، می‌تواند با دقت خوبی پیش‌بینی شود. مرور مقاله‌های چاپ شده در این زمینه نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌ها با هیدروکدها انجام پذیرفته است [۲۲-۲۶].

<sup>1</sup> Explicit  
<sup>2</sup> LS-Dyna

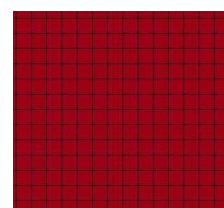
## ۳-۱- هندسه مدل و مش‌بندی

به منظور مدل‌سازی صفحه‌های پایه و سوراخ‌دار و از آنجاکه بتوان این صفحه‌ها را به صورت مناسب طراحی نمود و پیش از ساخت این صفحه‌ها الزامات مونتاژپذیری آنها را مورد بررسی قرار داد، این صفحه‌ها ابتدا با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس<sup>۱</sup> مدل‌سازی و مونتاژ گردید. در ادامه به منظور انجام حل عددی شبیه‌سازی‌ها، صفحه‌های پایه و سوراخ‌دار در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا مدل‌سازی و مش‌زنی گردید. نکته قابل ذکر در اینجا این است که صفحه‌های پایه و سوراخ‌دار به طور کامل مدل‌سازی و مش‌زنی گردیده است. در شکل ۸ نحوه مدل‌سازی و مش‌زنی پرتابه و در شکل ۹ نیز مدل‌سازی و مش‌زنی صفحه‌های هدف که همه در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا انجام پذیرفته، نشان داده شده است. در پژوهش حاضر وابستگی حل به ابعاد المان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابعاد المان از ۰/۵ میلی‌متر تا ۰/۳ میلی‌متر تغییر داده شده و سرعت خروجی پرتابه، در یکی از شبیه‌سازی‌ها بدست آمد و مشخص گردید از اندازه المان ۰/۳۵ میلی‌متر به پایین، میزان سرعت خروجی تغییرات چندانی نداشته، بنابراین کوچکترین اندازه المان مناسب، مقدار ۰/۳۵ میلی‌متر می‌باشد.

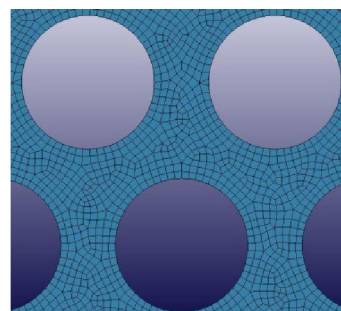


Fig. 8 Projectile meshing in numerical simulation

شکل ۸ مش‌زنی پرتابه در شبیه‌سازی عددی



(الف)



(ب)

Fig. 9 Target plate meshing (a- base plate , b- perforated plate)

شکل ۹ مش‌زنی صفحه هدف (الف- صفحه پایه، ب- صفحه سوراخ‌دار)

## ۳-۲- مدل مواد

به منظور حصول پیش‌بینی صحیح رفتار مواد در شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب درست مدل‌ماده برای مواد مختلف بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از پرکاربردترین مدل‌ماده‌ها برای توصیف رفتار ویسکوپلاستیک اجسام در گستره وسیعی از نرخ کرنش، مدل جانسون-کوک<sup>۲</sup> می‌باشد که در مقاله‌های مختلف از ورژن‌های مختلف آن که در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا وجود دارد استفاده گردیده است [۲۷، ۲۸].

مزیت استفاده از مدل‌ماده جانسون-کوک نسبت به سایر مدل‌ماده‌ها همچون کوپر-سیمونز، لحاظ نمودن کار سختی و همچنین اثرات دمایی در مدل‌ماده جانسون-کوک می‌باشد. نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا چند نسخه مختلف از مدل‌ماده جانسون-کوک ارائه داده است [۲۹]. با توجه به بهره‌مندی از ماده آلومینیوم برای ساخت پرتابه، صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار و به منظور پیش‌بینی صحیح رفتار آنها از مدل‌ماده موجود در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا MAT-JOHNSON-COOK (AMT-15) استفاده شده است. دلیل استفاده از نسخه مذکور در میان سایر نسخه‌های جانسون-کوک، در نظر گرفته شدن اثرات دمایی، کار سختی و نرخ کرنش در این نسخه است. بعلاوه اینکه این نسخه از مدل‌ماده جانسون-کوک از معادلات ساده‌تری در مقایسه با سایر نسخه‌ها استفاده نموده است. فرمول‌بندی این مدل‌ماده به صورت رابطه (۲) می‌باشد [۳۰]:

$$\sigma_y = [A + B \varepsilon_p^n][1 + C L_n \varepsilon_p^*][1 - T_H^m] \quad (2)$$

که در رابطه (۲)،  $\sigma_y$  تنش ایجاد شده و  $A$  تنش تسلیم می‌باشد.  $B$  و  $n$  پارامترهای سخت‌شوندگی بوده و  $C$  ضریب اعمال نرخ کرنش می‌باشد؛  $\varepsilon_p$  نیز کرنش پلاستیک موثر می‌باشد.  $\varepsilon_p^*$  نسبت نرخ کرنش (نرخ کرنش بی‌بعد شده) در رابطه (۳) آورده شده است که در آن  $\varepsilon_p$  نرخ کرنش پلاستیک موثر و  $\varepsilon_0$  نرخ کرنش پلاستیک موثر مرجع است، لذا طبق تعریف:

$$\varepsilon_p^* = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

همچنین در رابطه (۲)،  $T_H$  به صورت رابطه (۴) بدست می‌آید که در این رابطه  $T$ ،  $T_r$  و  $T_m$  به ترتیب دمای کاری آزمایش، دمای اتاق و دمای ذوب در واحد کلونین می‌باشند:

$$T_H = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (4)$$

در مدل تنش جریان جانسون-کوک،  $\varepsilon$  ثابت ماده  $A$ ،  $B$ ،  $n$ ،  $C$  و  $m$  می‌بایست تعیین گردند.

در رابطه (۲) کروشه اول تنش را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک در نرخ کرنش مرجع و دمای اتاق می‌دهد؛ کروشه دوم و

<sup>2</sup> Johnson-Cook

<sup>1</sup> SolidWorks

معادله حالت می-گرونایزن مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی ارائه گردیده است.

جدول ۴ پارامترهای ماده و مدل ماده جانسون-کوک صفحه‌های هدف و پرتابه ساخته‌شده از جنس آلومینیوم 6061-T6 [۳۴، ۳۳]

Table 4 Material parameters and Johnson-Cook material model of target plates and projectile made of Al 6061-T6 [33, 34]

عنوان	نماد	یکا	پرتابه یا صفحه زرهی
چگالی	$\rho$	$\frac{Kg}{m^3}$	۲۷۰۰
مدول الاستیک	E	MPa	۶۹۰۰۰
مدول برشی	G	MPa	۲۶۰۰۰
ضریب پواسون	$\nu$	—	۰/۳۳
کرنش سختی	A	MPa	۳۲۴
	B	MPa	۱۱۴
	n	—	۰/۴۲
نرخ کرنش سختی	C	—	۰/۰۰۲
نرم شوندگی دمایی	$C_p$	$\frac{J}{KgK}$	۸۹۰
	$T_r$	K	۲۹۳
	$T_m$	K	۹۲۵
	m	—	۱/۳۴
گسیختگی جانسون-کوک	$D_1$	—	-۰/۷۷
	$D_2$	—	۱/۴۵
	$D_3$	—	-۰/۴۷
	$D_4$	—	۰
	$D_5$	—	۱/۶

جدول ۵ پارامترهای معادله حالت صفحه‌های هدف و پرتابه ساخته شده از جنس آلومینیوم 6061-T6 [۲۱]

Table 5 Equation of state parameters of target plates and projectile made of Al 6061-T6 [21]

عنوان	نماد	یکا	پرتابه یا صفحه زرهی
سرعت موج الاستیک	C	$\frac{m}{s}$	۵۳۵۰
مقادیر شیب	$S_1$	—	۱/۳۴
	$S_2$	—	۰
	$S_3$	—	۰
ضریب گرونایزن	$\gamma$	—	۱/۹۷

### ۳-۴-۲ آورگلس<sup>۲</sup>

در المان‌های مکعبی که از فرمولاسیون انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده می‌کنند، ممکن است موده‌های تغییرشکل با انرژی صفر<sup>۳</sup> رخ دهد. در این صورت المان‌ها دچار تغییرشکل نامتعارف شده که ممکن است ادامه حل را مختل و یا جواب نهایی را با خطا مواجه

سوم نیز به ترتیب ارائه دهنده اثر نرخ کرنش و نرم شوندگی حرارتی می‌باشند.

مدل ماده جانسون-کوک برای محاسبه کرنش گسیختگی از یک فرمول‌بندی به شکل رابطه (۵) استفاده می‌نماید که شامل اثرات تنش سه‌محوری، دما و نرخ کرنش در کرنش شکست می‌باشد. این مدل شکست، یک مدل آسیب تجمعی است که تاریخچه بارگذاری را مدنظر قرار می‌دهد. این مدل فرض می‌نماید که آسیب در ماده در طی کرنش پلاستیک جمع می‌گردد و درست زمانی که آسیب به مقدار بحرانی خود برسد، شکست به یکباره رخ می‌دهد.

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}_p^*][1 + D_5 T_H^m] \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\sigma^*$  تنش سه‌محوری است و برای یک نمونه گرد بریده‌شده مقدار آن از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$\epsilon^* = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln \left( 1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)  $\sigma_H$  تنش هیدرواستاتیک است،  $\sigma_{eq}$  تنش موثر یا معادل می‌باشد و  $a$  و  $R$  به ترتیب شعاع کوچک‌ترین سطح مقطع و شعاع انحنا در گلوبی شدن است.

ضرایب  $D_1$  تا  $D_5$  در رابطه (۵) ضرایب گسیختگی می‌باشند که از آزمون‌های تجربی بدست می‌آیند. گسیختگی در ماده زمانی رخ خواهد داد که پارامتر آسیب (D) که در رابطه (۷) آورده شده برابر یک شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^f} \quad (7)$$

مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی جنس آلومینیوم در جدول ۴ ارائه شده است.

### ۳-۳-۳ معادله حالت

معادله حالت مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار ال‌اس‌داینما معادله حالت می-گرونایزن<sup>۱</sup> بوده است. معادله حالت می-گرونایزن به صورت آورده شده در رابطه (۸) می‌باشد [۳۱]:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left( 1 + \left( 1 - \frac{\gamma}{2} \right) \mu - \left( \frac{\alpha}{2} \right) \mu^2 \right)}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - \frac{S_2 \mu^2}{(\mu + 1)} - \frac{S_3 \mu^3}{(1 + \mu)^2} \right]} + (\gamma + \alpha \mu) E_0 \quad (8)$$

که در رابطه فوق  $E_0$  انرژی درونی بر واحد حجم، C نقطه تقاطع منحنی سرعت شوک و ذره،  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  ضرایب شیب منحنی سرعت شوک و ذره و  $\gamma$  ضریب گرونایزن می‌باشد. پارامتر  $\alpha$  ضریب تصحیح حجم و  $\mu$  ضریب تراکم می‌باشند. در جدول ۵ پارامترهای

<sup>2</sup> Hourglass

<sup>3</sup> Zero Energy Deformation Mode

<sup>1</sup> Mie-Gruneisen

مشخص گردید میزان سرعت خروجی پرتابه (راستای نفوذ)، ۸۲ متربرثانیه بدست آمده که در مقایسه با سرعت خروجی پرتابه در آزمایش تجربی انجام گرفته (مقدار ۶۹ متربرثانیه) در حدود ۱۹٪ اختلاف مشاهده می‌شود که این میزان خطا برای انجام آزمایش‌های سرعت بالا قابل قبول می‌باشد. با بهره‌گیری از آزمایش‌های عددی مشخص گردید که حداقل ضخامت صفحه پایه به منظور ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در مقابل پرتابه ورودی برابر با ۴/۵ میلی‌متر می‌باشد.

#### ۴-۲- صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه

در این آزمایش به منظور بررسی و مقایسه تأثیر استفاده از صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه با وضعیتی که از صفحه سوراخ‌دار استفاده نشده، صفحه سوراخ‌دار در فاصله ۴۵ میلی‌متری از صفحه پایه قرار داده شد. پرتابه با سرعت اولیه ۲۱۲ متربرثانیه به مجموعه صفحه‌های هدف اصابت نمود. با بررسی نتایج مشخص گردید که در اثر برخورد پرتابه با لبه یکی از سوراخ‌ها و القای نیروی نامتقارن به آن، پرتابه از مسیر مستقیم خود منحرف شده است. از سوی دیگر در اثر این برخورد سرعت اولیه پرتابه کاهش یافته است. انحراف ایجاد شده در مسیر پرتابه موجب گردیده تا پرتابه به صورت مایل به صفحه پایه برخورد نماید. در مجموع تمامی پارامترهای ذکر شده موجب گردیده تا پرتابه قادر به نفوذ و عبور از صفحه پایه نگردد. با بررسی صفحه پایه مشخص گردید که پرتابه موجب تغییر شکل پلاستیک صفحه پایه شده است. همچنین با بررسی نوع تغییر شکل ایجاد شده بر روی صفحه پایه مشخص می‌گردد نحوه برخورد پرتابه به صفحه پایه به صورت مایل بوده است. در واقع این‌طور می‌توان بیان نمود که پرتابه تحت تأثیر صفحه سوراخ‌دار از مسیر مستقیم خود خارج شده و به صورت مایل به مسیر خود ادامه داده است و در برخورد به صفحه پایه ابتدا نوک فرسایش یافته آن به صفحه پایه برخورد نموده و در ادامه با توجه به اینکه پرتابه به صورت مایل در حال حرکت بوده است در برخورد به صفحه پایه این انحراف افزایش یافته و موجب گردیده که بدنه جانبی پرتابه نیز با صفحه پایه برخورد نماید و در نهایت سرعت پرتابه به صفر رسیده و متوقف گردد. در شکل ۱۱ تصویر صفحه سوراخ‌دار و در شکل ۱۲ تصویر صفحه پایه در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. در شکل ۱۳ تصویر صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه باهم نشان داده شده است. در این تصویر محل برخورد پرتابه به صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه مقایسه گردیده و قابل مشاهده است که پرتابه در اثر اعمال نیروی خمشی و در نتیجه اعمال نیروی نامتقارن به آن از سوی صفحه سوراخ‌دار، از مسیر مستقیم حرکتی خود دچار

سازد. برای حل این مشکل از گزینه اورگلس برای المان‌ها استفاده گردیده است. در این صورت با اعمال مقدار بسیار پایینی از انرژی به المان‌ها، از بروز مدهای تغییرشکل نامتعارف جلوگیری می‌شود. در شبیه‌سازی‌های عددی در این پژوهش از اورگلس نوع ۱ (اورگلس استاندارد تعریف شده در ال‌اس‌داین) با توجه به توصیه به استفاده از آن در مقاله‌های مختلف [۱۵، ۳۲] و با توجه به دستورالعمل نرم‌افزار استفاده شده است.

#### ۳-۵- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به فیزیک مسئله و از آنجایی که در آزمایش‌های تجربی از فیکسچر برای تثبیت موقعیت هر یک از صفحه‌های هدف استفاده شده است لذا شرایط مرزی گیردار برای المان‌های واقع در چهار طرف صفحه‌های هدف تعریف گردیده است. از سوی دیگر به عنوان شرط اولیه برای تمامی المان‌های پرتابه در راستای Z (جهت نفوذ)، سرعت اولیه تعریف شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش با استفاده از آزمایش‌های تجربی که تعداد آنها ۵ آزمایش بوده و شبیه‌سازی‌های عددی انجام پذیرفته، نتایج حاصل از بکارگیری و عدم بکارگیری صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه ارائه گردیده‌است. سپس به بررسی تأثیر پارامتر فاصله بین دو صفحه پایه و سوراخ‌دار پرداخته شده است.

۴-۱- صفحه پایه به تنهایی (عدم بکارگیری صفحه سوراخ‌دار)  
در آزمایش اول، صفحه پایه به ضخامت ۲ میلی‌متر به تنهایی در مقابل پرتابه قرار داده شد و پرتابه با سرعت اولیه ۲۱۲ متربرثانیه شلیک گردیده و مشاهده شد که صفحه پایه به تنهایی قادر به ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در مقابل پرتابه ورودی نبوده است. نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی تغییر شکل‌های بوجود آمده در نمای جلو صفحه پایه مشاهده می‌گردد که پدیده توسعه سوراخ نرم به دلیل استفاده از پرتابه با نوک مخروطی شکل بوجود آمده است. با بررسی پرتابه قبل و پس از آزمایش سرعت بالا مشخص گردید که پرتابه دچار تغییر شکل زیادی نشده است. با بررسی سرعت پرتابه در برخورد با صفحه پایه در آزمایش تجربی، سرعت خروجی پرتابه ۶۹ متر بر ثانیه بدست آمد که این موضوع نشان‌دهنده آن است که صفحه پایه با ضخامت ۲ میلی‌متر به تنهایی قادر به ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در مقابل پرتابه ورودی نبوده است. همچنین با بررسی نمودار سرعت پرتابه در شبیه‌سازی عددی



آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی متناظر با آن انجام پذیرفته است. بررسی پارامتر فاصله بین صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار از آن جهت حائز اهمیت می‌باشد که هرچه این فاصله کاهش یابد ابعاد تمام شده مجموعه صفحه‌های هدف کاهش خواهد یافت. در واقع ابعاد هندسی به خصوص ضخامت در ابعاد تمام‌شده یک تجهیز بسیار اثرگذار است و هر میزان از اندازه ضخامت کاهش یابد در ساخت و مونتاژ مجموعه صفحه‌های هدف که به عنوان یک تجهیز افزوده حفاظت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند محدودیت کمتری وجود خواهد داشت.

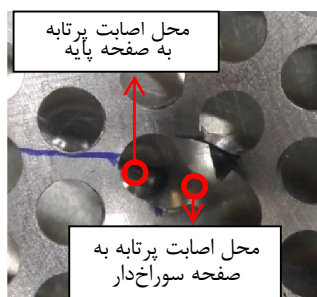


Fig. 13 Comparison of the impact point of the projectile on the perforated and base plate - perforated plate spaced from base plate

شکل ۱۳ مقایسه محل اصابت پرتابه به صفحه سوراخ‌دار و پایه - صفحه سوراخ‌دار با فاصله از صفحه پایه

#### ۴-۳-۱- فاصله دو صفحه برابر صفر

در این آزمایش فاصله بین دو صفحه برابر صفر قرار داده شده است. با برخورد پرتابه به لبه یکی از سوراخ‌ها در صفحه سوراخ‌دار و ثابت نگهداشتن سایر پارامترها، نتایج بدست آمده از تأثیر به صفر رساندن فاصله بین دو صفحه مورد تحلیل قرار گرفته است. سرعت برخورد پرتابه با صفحه‌های هدف ۲۱۲ متر بر ثانیه بوده است. در این آزمایش مشاهده گردید که پرتابه به طور تقریبی به لبه یکی از سوراخ‌های صفحه سوراخ‌دار برخورد نموده و موجب ایجاد شکست در صفحه پایه شده و با سرعت باقیمانده ۱۵ متر بر ثانیه از پشت مجموعه صفحه‌های هدف خارج گردیده است. در شبیه‌سازی عددی مقدار سرعت خروجی برابر با  $12/3$  متر بر ثانیه بوده است که میزان خطا برابر با  $18\%$  بدست می‌آید. با بررسی تصویر ضبط شده پرتابه توسط دوربین سرعت بالا در لحظه خروج پرتابه از مجموعه صفحه‌های هدف که در شکل ۱۴ نشان داده شده است مشخص می‌گردد که صفحه سوراخ‌دار تأثیر خود را بر روی پرتابه گذاشته و موجب انحراف آن از مسیر مستقیم شده و در نتیجه موجب گردیده است، پرتابه به صورت مستقیم با صفحه پایه برخورد ننماید ولی این میزان انحراف به دلیل فرصت کم پرتابه برای انحراف از مسیر مستقیم خود، به اندازه‌ای نبوده که صفحه پایه قادر به ایجاد

انحراف گردیده است. جرم واحد سطح مجموع صفحه سوراخ‌دار و پایه که قابلیت ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در مقابل پرتابه ورودی داشته برابر با  $8426$  گرم بر مترمربع بوده است. جرم واحد سطح صفحه یکپارچه با حفاظت بالستیک یکسان در مقابل همان پرتابه ورودی نیز برابر با  $12150$  گرم بر مترمربع می‌باشد. بنابراین در صورت استفاده از مجموعه صفحه سوراخ‌دار و پایه به جای صفحه یکپارچه، به میزان حدود  $31\%$  کاهش وزن مشاهده می‌گردد.

#### ۴-۳- بررسی تأثیر فاصله بین دو صفحه پایه و سوراخ‌دار

به منظور بررسی و تحلیل چگونگی تأثیر پارامتر فاصله بین دو صفحه سوراخ‌دار و پایه در فرآیند برخورد پرتابه با مجموعه صفحه هدف در سه وضعیت ممکن (فاصله دو صفحه کمتر و بیشتر از طول پرتابه و همچنین فاصله دو صفحه برابر با صفر)

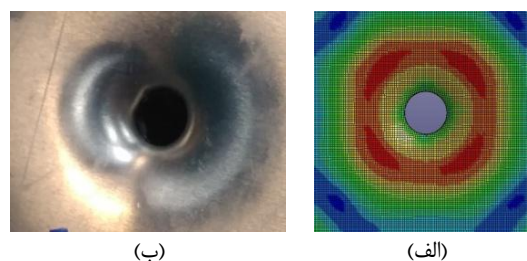


Fig. 10 Base plate - front view [absence of perforated plate] (a- experimental study, b- numerical study)

شکل ۱۰ صفحه پایه - نمای جلو [عدم حضور صفحه سوراخ‌دار] (الف - آزمایش تجربی، ب - شبیه‌سازی عددی)

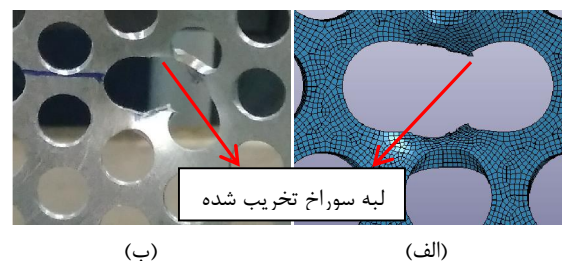


Fig. 11 perforated plate - perforated plate spaced from base plate (a- experimental study, b- numerical study)

شکل ۱۱ صفحه سوراخ‌دار - صفحه سوراخ‌دار با فاصله از صفحه پایه (الف - آزمایش تجربی، ب - شبیه‌سازی عددی)

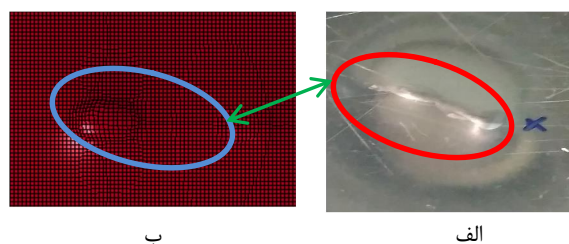


Fig. 12 Base plate - perforated plate spaced from base plate (a- experimental study, b- numerical study)

شکل ۱۲ صفحه پایه - صفحه سوراخ‌دار با فاصله از صفحه پایه (الف - آزمایش تجربی، ب - شبیه‌سازی عددی)

پرتابه با سرعت اولیه ۲۰۹ متربرثانیه به سمت مجموعه صفحه هدف شلیک گردید. در بررسی صفحه‌ها و پرتابه پس از انجام این آزمایش مشاهده گردید که مجدد با توجه به برخورد پرتابه به لبه یکی از سوراخ‌ها، صفحه سوراخ‌دار اثرات خود را که عبارت است از ایجاد سایش در نوک پرتابه و همچنین اعمال نیروی نامتقارن ناشی از اثر خمشی وارده به پرتابه، را همچنان داشته است. بنابراین مجموعه صفحه‌های هدف از نفوذ پرتابه ممانعت نموده است. تصاویر مربوط به صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که از نمای جلویی صفحه سوراخ‌دار مشخص است در این آزمایش به تعداد پنج عدد از سوراخ‌ها در تقابل با پرتابه دچار تغییر شکل و شکست شده‌اند که این بدان معنی است که سطح شکست در صفحه سوراخ‌دار در این آزمایش بیشتر بوده است که دلیل آن کم بودن فاصله صفحه سوراخ‌دار با صفحه پایه در مقایسه با طول پرتابه می‌باشد. در واقع پرتابه پس از برخورد با صفحه سوراخ‌دار دچار انحراف گردیده و ضمن عبور از صفحه سوراخ‌دار در حال چرخش می‌باشد. بنابراین در زمانیکه هنوز پرتابه به طور کامل از صفحه سوراخ‌دار خارج نگردیده، نوک پرتابه به صفحه پایه می‌رسد و این انحراف تشدید می‌گردد و از آنجاییکه هنوز انتهای پرتابه با صفحه سوراخ‌دار در تماس است این چرخش بیشتر منجر به تحت تأثیر قرار دادن تعداد سوراخ بیشتر توسط پرتابه گردیده و در نهایت پرتابه متوقف می‌شود.

#### ۴-۳-۳- فاصله دو صفحه بیش از طول پرتابه

در این آزمایش فاصله بین دو صفحه از یکدیگر مقدار ۵۸ میلی‌متر قرار داده شد که این مقدار فاصله نسبت به طول پرتابه که برابر با ۲۸/۲ میلی‌متر است، بیشتر می‌باشد. پرتابه با سرعت اولیه ۲۰۵ متربرثانیه به مجموعه صفحه‌های هدف اصابت نمود. در این آزمایش نیز سعی گردیده که پرتابه به لبه سوراخ برخورد نماید. بنابراین با ثابت نگهداشتن همه پارامترها مجدد تأثیر فاصله بین دو صفحه مورد بحث و بررسی دقیق قرار گرفت.



Fig. 16 Experimental study – distance of two plates less than the length of the projectile (a- base plate, b- perforated plate)

شکل ۱۶ آزمایش تجربی - فاصله دو صفحه کمتر از طول پرتابه (الف - صفحه پایه ، ب - صفحه سوراخ‌دار)

حفاظت بالستیک مناسب گردد. بنابراین پرتابه بلافاصله با صفحه پایه برخورد نموده و موجب تخریب کامل آن شده و از پشت صفحه پایه خارج گردیده است. در مجموع در این چیدمان مشاهده شده است که مجموعه صفحه هدف قابلیت ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در مقابل پرتابه ورودی را نداشته است. در شکل ۱۵ تصاویر مربوط به صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه نشان داده شده است.



Fig. 14 The image of the deviated projectile under effect of perforated plate (perforated plate spaced from base plate)

شکل ۱۴ تصویر پرتابه انحراف یافته تحت تأثیر صفحه سوراخ‌دار (صفحه سوراخ‌دار با فاصله صفر از صفحه پایه)

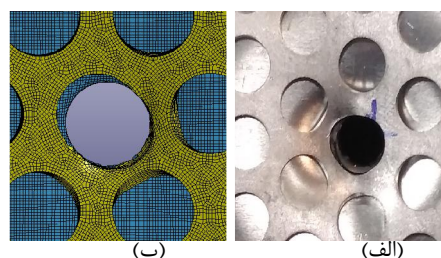


Fig. 15 Base plate and perforated plate – zero distance between two plates (a- experimental study, b- numerical study)

شکل ۱۵ صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار - (الف - آزمایش تجربی ، ب - شبیه‌سازی عددی)

با بررسی صفحه سوراخ‌دار در این آزمایش مشخص می‌گردد که در این آزمایش به دلیل هم‌زمانی برخورد پرتابه به صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار، سطح آسیب بر روی صفحه سوراخ‌دار بسیار اندک می‌باشد. در واقع به این دلیل که صفحه پایه بدون فاصله در پشت صفحه سوراخ‌دار قرار گرفته بنابراین به نحوی صفحه پایه موجب بالا رفتن استحکام صفحه سوراخ‌دار گردیده و در مجموع پرتابه توانسته فقط یکی از سوراخ‌های موجود بر روی صفحه سوراخ‌دار را اندکی دچار تغییر شکل نماید. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که در این نحوه چیدمان، صفحه سوراخ‌دار اثر خمشی خود را که منجر به اعمال نیروی نامتقارن به پرتابه می‌گردد از دست داده و بنابراین تأثیر چندانی در ایجاد حفاظت بالستیک توسط مجموعه صفحه‌های هدف ندارد.

#### ۴-۳-۲- فاصله دو صفحه کمتر از طول پرتابه

در ادامه با توجه به اینکه اندازه طول پرتابه برابر با ۲۸/۲ میلی‌متر بوده است، فاصله بین دو صفحه مقدار ۲۱ میلی‌متر قرار داده شد و

انجام پذیرفته، زاویه ایجاد شده ناشی از محل برخورد پرتابه بر روی صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه در آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در نتیجه آن نمودار آورده شده در شکل ۱۹ بدست آمد که نشان می‌دهد هرچه فاصله بین دو صفحه افزایش یابد انحراف پرتابه از مسیر مستقیم نیز افزایش خواهد داشت.



Fig. 18 Projectile output velocity in presence / absence situation of perforated plate

شکل ۱۸ سرعت خروجی پرتابه در وضعیت حضور (بر حسب فاصله دو صفحه) و عدم حضور صفحه سوراخ‌دار

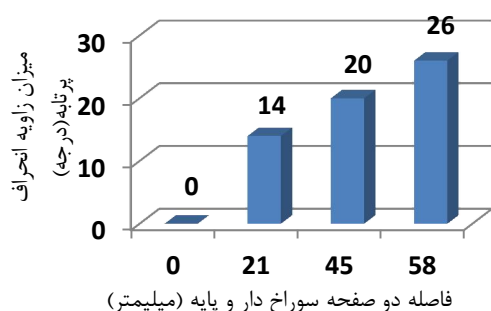


Fig. 19 The amount of projectile deviation angle in terms of the distance between two plates

شکل ۱۹ میزان زاویه انحراف پرتابه بر حسب فاصله بین دو صفحه

## ۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داده شد که استفاده از یک مجموعه صفحه زرهی متشکل از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه در مقایسه با صفحه زرهی یکپارچه ضمن ایجاد حفاظت بالستیک مناسب و ممانعت از نفوذ پرتابه، به دلیل سبک‌تر بودن ارجح‌تر می‌باشد. همچنین فاصله بین دو صفحه سوراخ‌دار و پایه نیز مورد مطالعه قرار گرفت که در آن مشخص گردید به منظور اثرگذاری مناسب صفحه سوراخ‌دار می‌بایست حداقل فاصله‌ای به اندازه بیش از طول پرتابه بین دو صفحه لحاظ گردد. از مقایسه نحوه تغییر شکل پرتابه و صفحه‌ها در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نیز مشخص گردید که مشابهت زیادی بین نتایج وجود دارد و بنابراین می‌توان از شبیه‌سازی عددی به جای انجام آزمایش‌های تجربی متعدد

از مشاهدات انجام گرفته بر روی صفحه‌های سوراخ‌دار و پایه نتیجه‌گیری می‌گردد که صفحه سوراخ‌دار در این آزمایش نیز اثرات خود را بر روی پرتابه گذاشته است و توانسته هم موجب ایجاد ساییش در نوک پرتابه و هم اعمال نیروی نامتقارن به پرتابه گردد و بنابراین پرتابه از مسیر مستقیم خود منحرف گردیده است. در نهایت صفحه سوراخ‌دار باعث گردیده تا پرتابه نتواند در صفحه پایه ایجاد شکست نموده و از آن عبور نماید. آنچه در این آزمایش بیشتر مشهود بود انحراف بیشتر پرتابه در مقایسه با آزمایش‌های دیگر می‌باشد که این موضوع در شکل ۱۷ به وضوح مشخص می‌باشد. دلیل آن هم این‌طور قابل بیان است که از آنجاکه پرتابه پس از برخورد با صفحه سوراخ‌دار و انحراف از مسیر خود، تا پیش از رسیدن به صفحه پایه، با توجه به افزایش فاصله دو صفحه، مسافت بیشتری را طی نموده است لذا مدت زمان بیشتری برای انحراف از مسیر خود داشته و بنابراین در لحظه‌ای که با صفحه پایه برخورد می‌نماید دچار انحراف بیشتری گردیده است.

## ۴-۴- مقایسه و بررسی نتایج آزمایش‌ها

### ۴-۴-۱- بررسی تأثیر استفاده از صفحه سوراخ‌دار

مقایسه سرعت خروجی (سرعت باقیمانده) پرتابه که در آزمایش‌ها بدست آمد در نمودار شکل ۱۸ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در صورت بهره‌گیری از صفحه سوراخ‌دار با فاصله از صفحه پایه، صفحه سوراخ‌دار اثرگذاری خود را داشته و مجموعه صفحه زرهی با ممانعت از نفوذ پرتابه، حفاظت بالستیک مناسبی را در مقابل پرتابه ایجاد می‌نماید.

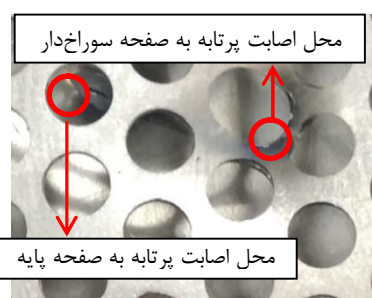


Fig. 17 Comparison of the impact point of the projectile on the perforated and base plate - distance of two plates more than the length of the projectile plate

شکل ۱۷ مقایسه محل اصابت پرتابه به صفحه سوراخ‌دار و پایه - فاصله دو صفحه بیش از طول پرتابه

### ۴-۴-۲- مقایسه میزان انحراف پرتابه

آن‌طور که در بررسی آزمایش‌ها مشاهده گردید فاصله بین دو صفحه تأثیر معناداری در میزان انحراف پرتابه از مسیر مستقیم خود دارد. به منظور مقایسه این میزان انحراف در آزمایش‌های مختلف

شعاع انحنای در گلوبی شدن	$R$
انرژی درونی	$E_0$
سرعت موج الاستیک	$C = \frac{m}{s}$
ضرایب شیب منحنی سرعت شوک و ذره	$S_1, S_2, S_3$
ضریب نرم‌شوندگی دمایی	$C_p$
<b>علائم یونانی</b>	
چگالی، $\frac{kg}{m^3}$	$\rho$
استحکام تسلیم، Mpa	$\sigma_y$
کرنش پلاستیک موثر	$\epsilon_p$
نسبت نرخ کرنش	$\dot{\epsilon}_p^*$
نرخ کرنش پلاستیک	$\dot{\epsilon}_p$
نرخ کرنش پلاستیک موثر مرجع	$\dot{\epsilon}_0$
کرنش شکست	$\epsilon^f$
تنش هیدرواستاتیک	$\sigma_H$
تنش موثر یا معادل	$\sigma_{eq}$
تنش سه محوری	$\sigma^*$
ضریب گرونایزن	$\gamma$
فاکتور تصحیح حجم	$\alpha$
فاکتور تراکم	$\mu$
ضریب پواسون	$\nu$

بهره‌مند گردید. در مجموع و با توجه به مطالعات تجربی و عددی انجام شده نتیجه‌گیری‌های زیر ارائه می‌گردد:

- مجموعه صفحه زرهی که در آن از صفحه سوراخ‌دار با ضخامت ۲ میلی‌متر در جلوی صفحه پایه با ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شود در مقایسه با زمانیکه که از یک صفحه زرهی یکپارچه (فاقد سوراخ) با ضخامت ۴/۵ میلی‌متر استفاده گردد تا ۳۱٪ وزن کمتری خواهد داشت درحالی‌که هر دو قادر به ممانعت از نفوذ پرتابه در شرایط مشابه می‌باشند.

- به منظور ایجاد حفاظت بالستیک مناسب توسط مجموعه صفحه زرهی که مشتمل بر صفحه سوراخ‌دار و پایه می‌باشد می‌بایست فرصت کافی برای ایجاد انحراف در پرتابه از مسیر مستقیم خود مهیا گردد، بنابراین فاصله بین دو صفحه سوراخ‌دار و پایه می‌بایست حداقل بیش از طول پرتابه ورودی باشد و این فاصله هر مقدار که افزایش یابد انحراف پرتابه بیشتر خواهد شد.

- مدل‌سازی عددی انجام پذیرفته در نرم‌افزار ال‌اس‌داینایا به خوبی می‌تواند نحوه تغییر شکل‌ها، میزان سطح آسیب در صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار، تغییر شکل پرتابه و سایش در نوک آن را نشان دهد و در مجموع می‌توان از آن به منظور مشاهده چگونگی پروسه نفوذ پرتابه در صفحه‌های هدف استفاده کرد و تغییر شکل‌ها را پیش‌بینی نمود.

#### ۶- فهرست علائم

استحکام کششی نهایی، Mpa	$UTS$
مدول الاستیک (بانگ)، Mpa	$E$
مدول برشی، Mpa	$G$
قطر هسته پرتابه، mm	$D$
قطر سوراخ در صفحه سوراخ‌دار، mm	$d$
تنش تسلیم، Mpa	$A$
پارامتر سخت شونده	$B$
پارامتر سخت شونده	$n$
نرخ کرنش سختی	$C$
نسبت دمایی بی بعد	$T_h$
دما، K	$T$
دمای اتاق، K	$T_r$
دمای ذوب، K	$T_m$
ثابت ماده در مدل تنش جریان جانسون-کوک	$m$
ضرایب گسیختگی	$D_1-D_3$
پارامتر آسیب (در مدل جانسون-کوک)	$D$
شعاع کوچکترین سطح مقطع	$a$

#### ۷- مراجع

- [1] D. Heritier, E. Derassat, S. Fonlupt, Ballistic impact experiments on ultrahigh hard perforated add-on armor, in: 25th International Symposium on Ballistics, 2010, pp. 1501-1507.
- [2] N. Kılıç, B. Ekici, S. Bedir, Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 24(7) (2017) 615-624.
- [3] M. Ravid, Y. Hirschberg, Perforated armor plates, in, Google Patents, 2006.
- [4] S. Chocron, C.E. Anderson, D.J. Grosch, C.H. Popelar, Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target, International Journal of Impact Engineering, 25(5) (2001) 423-437.
- [5] D. Ben-Moshe, An armor assembly for armoured vehicles, in, 1986.
- [6] Z. Rosenberg, Y. Ashuach, Y. Yeshurun, E. Dekel, On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets, International Journal of Impact Engineering, 36(4) (2009) 588-596.
- [7] M. Ravid, Y. Hirschberg, Patent No.: 7,513,186 B2, Ballistic armor, (2009).

- [21] Y.Y. Émurlaeva, I.A. Bataev, Q. Zhou, D.V. Lazurenko, I.V. Ivanov, P.A. Riabinkina, S. Tanaka, P. Chen, Welding Window :Comparison of Deribas' and Wittman's Approaches and SPH Simulation Results, *Metals*, 9(12) (2019) 1323.
- [22] X. Teng, T. Wierzbicki, M. Huang, Ballistic resistance of double-layered armor plates, *International Journal of Impact Engineering*, 35(8) (2008) 87.۸۸۴-۰
- [23] T. Børvik, O.S. Hopperstad, T. Berstad, M. Langseth, Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part II: numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 2 (۱) ۷ .۶۴-۳۷ (۲۰۰۲)
- [24] D. Lenihan, W. Ronan, P.E. O'Donoghue, S.B. Leen, A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(1) (2019) 73-94.
- [25] S. Dey, T. Børvik, X. Teng, T. Wierzbicki, O.S. Hopperstad, On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation, *International Journal of Solids and Structures*, 44(20) (200.۶۷۲۳-۶۷۰۱) (۷
- [26] T. Børvik, S. Dey, A.H. Clausen, Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 36(7) (2009) 948-964.
- [27] E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards, Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, *International Journal of Impact Engineering*, 38(12) (2011) 1022-1032.
- [28] M. Becker, „Numerical Ricochet Model of a 7.62 mm Projectile Penetrating an Armor Steel Plate “, in: *Proceedings 15th International LS-DYNA Conference*, 2018.
- [29] B. Gladman, L.-D.K.U.s. Manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, CA, (2007.)
- [30] M. Buyuk, C.-D.S. Kan, N.E. Bedewi, A .Durmus, S. Ulku, Moving beyond the finite elements, a comparison between the finite element methods and meshless methods for a ballistic impact simulation, in: *8th International LS-DYNA users conference*, 2004.
- [31] J. Zukas, *Introduction to hydrocodes*, Elsevier, 2004.
- [32] M.W. Ali, A. Mubashar, E. Uddin, S.W.U. Haq, M. Khan, An experimental and numerical investigation of the ballistic response of multi-level armour against armour piercing projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, 110. 47-56 (2017).
- [33] D.R. Lesuer, G. Kay, M. LeBlanc, Modeling large-strain, high-rate deformation in metals, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States), 2001.
- [34] J. Jung, Y.J. Cho, S.-H. Kim, Y.-S. Lee, H.-J. Kim, C.-Y. Lim, Y.H .Park, Microstructural and mechanical responses of various aluminum alloys to ballistic impacts by armor piercing projectile, *Materials Characterization*, 159 (2020) 110033.
- [8] S. Balos, V. Grabulov, L. Sidjanin, M. Pantic, I. Radisavljevic, Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application, *Materials & Design*, 31(6) (2010) 2916-2924.
- [9] W. Norris, C. Smith, Perforated armor with geometry modified for lighter weight, WO2010036411, (2010.)
- [10] N. Kilic, Y. Erbil, B. Ekici, A. Erdik, D. Bircan, Ballistic behavior of perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile, in: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computing Science and Engineering*, 2011, pp. 720-726.
- [11] B. Mishra, P.K. Jena, B. Ramakrishna, V. Madhu, T.B. Bhat, N.K. Gupta, Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel, *International Journal of Impact Engineering*, 44 (2012) 17-28.
- [12] B. Mishra, B. Ramakrishna, P.K. Jena, K. Siva Kumar, V. Madhu, N.K. Gupta, Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact, *Materials & Design*, 43 (2013) 17-24.
- [13] V. Paris, A. Weiss, A. Vizel, E. Ran, F. Aizik, Fragmentation of armor piercing steel projectiles upon oblique perforation of steel plates, *EPJ Web of Conferences*, 26 (2012) 04032.
- [14] I. Radisavljevic, S. Balos, M. Nikacevic, L. Sidjanin, Optimization of geometrical characteristics of perforated plates, *Materials & Design*, 49 (2013) 81-89.
- [15] N. Kılıç, S. Bedir, A. Erdik, B. Ekici, A. Taşdemirci, M. Güden, Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62mm armor piercing projectile, *Materials & Design*, 63 (2014) 427-438.
- [16] S. Balos, I. Radisavljevic, D. Rajnovic, M. Dramacanin, S. Tabakovic, O. Eric-Cekic ,L. Sidjanin, Geometry, mechanical and ballistic properties of ADI material perforated plates, *Materials & Design*, 83 (2015) 66-74.
- [17] P. Pawlowski, T. Frasz, Numerical and experimental investigation of asymmetrical contact between a steel plate and armour-piercing projectiles, in: *11th European Ls-Dyna Conference*, 2017.
- [18] W. Burian, J. Marcisz, L. Starczewski, M. Wnuk, A probabilistic model of optimising perforated high-strength steel sheet assemblies for impact-resistant armour systems, *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 8 (2017). (
- [19] A. Mubashar, E. Uddin, S. Anwar, N. Arif, S. Waheed Ul Haq, M.A.K. Chowdhury, Ballistic response of 12.7mm armour piercing projectile against perforated armour developed from structural steel, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 233(10) (2018) 1993-2005.
- [20] W. Burian, P. Żochowski, M. Gmitrzuk, J. Marcisz, L. Starczewski, B. Juszczyk, M. Magier, Protection effectiveness of perforated plates made of high strength steel, *International Journal of Impact Engineering*, 126 (2019) 27-39.