



تحلیل تجربی و عددی تحلیل تجربی و عددی تاثیر استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی

صفحه هدف در برابر ضربه بالستیک

جواد نیک زارع^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، حامد احمدی^۳

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

چکیده

بهره‌گیری از صفحه‌های سوراخ‌دار به عنوان جزئی از یک مجموعه صفحه زرهی به منظور حفاظت از افراد و تجهیزات در جلوی صفحه هدف مدتی است که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بدین منظور تاکنون بررسی در خصوص استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه هدف مورد توجه بوده و مشخص گردیده که استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در مجموعه صفحه‌های زرهی دارای مزیت‌های متعددی است. اما این مجموعه صفحه، قابلیت ایجاد حفاظت بالستیک ۱۰۰٪ را نخواهد داشت. به همین دلیل ایده استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه مطرح گردیده و در این پژوهش پیامدهای این نوع چیدمان با انجام مطالعات تجربی و عددی مختلف بررسی شده است. مشاهدات حاکی از آن است که استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه اگرچه موجب افزایش ضخامت و وزن آنها می‌گردد، در عین حال حفاظت بالستیک مجموعه صفحه‌های زرهی را در مقابل پرتابه ورودی به خصوص در نقاط ضعف استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه بهبود می‌بخشد. با مقایسه تغییر شکل‌های حاصله در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده به کمک نرم‌افزار LS-DYNA، همگرایی مناسبی بین نتایج مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: صفحه زرهی سوراخ‌دار؛ ضربه سرعت بالا؛ حفاظت بالستیک؛ نقاط ضعف صفحه سوراخ‌دار؛ تحلیل تجربی و عددی.

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

J.Nikzare¹, Gh.Liaghat^{2*}, H.Ahmadi³

¹ M.s.c. Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

² Professor., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

³ Assistant. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

Abstract

The use of perforated plates as part of an armored plate set to protect people and equipment in front of the target plate has long been considered by researchers. For this purpose, the use of one perforated plate in front of the target plate has been considered so far and it has been found that using a perforated plate in a set of armored plates has several advantages. But this plate set will not be able to provide 100% ballistic protection. For this reason, the idea of using two perforated plates in front of the base plate has been proposed and in this research, the consequences of this kind of arrangement have been analyzed by performing experimental and numerical studies. Observations show that the use of two perforated plates in front of the base plate, although it increases their thickness and weight, at the same time, it improves the ballistic protection of the set of armored plates against the incoming projectile, especially in the weaknesses of using one perforated plate in front of the base plate. By comparing deformations obtained experimental experiments and numerical simulations performed using LS-DYNA software, a good convergence between the results has been observed.

Keywords: Perforated Armor Plate; High speed impact; Ballistic protection; Weakness of perforated plate; Experimental and numerical analysis.

۱- مقدمه

بررسی هندسه، خواص مکانیکی و بالستیکی صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته شده از ماده آهن شکل‌پذیر آستِمپرِدشده^۷ در دو وضعیت، یکی با استحکام بالا و دیگری با شکل‌پذیری بالا پرداخته‌اند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته‌شده از ماده آهن شکل‌پذیر آستِمپرِدشده با سختی بالا و شکل‌پذیری پایین در مقایسه با آهن شکل‌پذیر آستِمپرِدشده نرم‌تر و دارای شکل‌پذیری بیشتر، برتری دارد. کیلیچ^۸ و همکاران [۵] حالت‌های ممکن برخورد پرتابه با نقاط مختلف صفحه سوراخ‌دار را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این حالات می‌تواند شامل چهار وضعیت ممکن برخورد پرتابه با مرکز سوراخ، برخورد به وسط دو سوراخ، برخورد با مرکز هندسی سه سوراخ و برخورد با لبه سوراخ‌ها باشد. کیلیچ و همکاران در پژوهشی دیگر [۶] به مطالعه رفتار بالستیکی صفحه‌های زرهی سوراخ‌دار با سختی بالا در مقابل پرتابه ضدزره 7/62 mm با دو روش آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداختند. آنها در پژوهش خود 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 سایش در نوک پرتابه است. کیلیچ و همکاران در مقاله مرجع [۷] نیز طی پژوهشی 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؛ بنابراین می‌بایست مقدار بهینه داشته باشند. میشر^۹ و همکاران [۸] به بررسی تأثیر حضور سوراخ‌ها بر روی رفتار ضربه بالستیک فولادهای با استحکام بالا پرداختند و نشان دادند که ایجاد یک الگوی منظم از سوراخ‌ها بر روی این صفحه، عملکرد صفحه زرهی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. میشر^۹ و همکاران در پژوهشی [۹] با انجام یک سلسله آزمایش‌های تجربی به بررسی تأثیر اندازه و شکل سوراخ‌ها بر روی آسیب وارده بر صفحه‌های زره‌پوش فولادی تحت ضربه بالستیک پرداختند. آنها نشان دادند که کارایی بالستیک صفحه فولادی با سختی

در کاربردهای دفاعی به منظور مقابله با نفوذ پرتابه‌های مختلف، ایجاد حفاظت بالستیک به کمک صفحه‌های زرهی یکی از مقوله‌های چالش‌برانگیز برای پژوهشگران بوده است. در این زمینه ابتدا بررسی و تحلیل بر روی صفحه‌های زرهی یکپارچه^۱ مد نظر بوده و تلاش‌ها در راستای بهبود قابلیت ایجاد حفاظت بالستیک مناسب توسط این صفحه‌ها انجام شده است. در ادامه با توجه به نیازمندی به تاکتیکی شدن تجهیزات نظامی و همچنین کاهش هزینه‌های ایجاد حفاظت بالستیک چه برای کاربردهای شهری (غیرنظامی) و چه برای بهره‌برداری در خودروها و نفربرهای نظامی، بهره‌مندی از صفحه‌های سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه مد نظر پژوهشگران در این زمینه قرار گرفته است. در این رابطه پژوهشگران تلاش نموده‌اند تا با بررسی نحوه تأثیرگذاری استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه به بهبود پارامترهای موثر در کاهش وزن مجموعه صفحه‌های زرهی (متشکل از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه) و به موازات آن، افزایش حفاظت بالستیک این مجموعه صفحه‌ها بپردازند. در این راستا روزنبرگ^۲ و همکاران [۱] در پژوهش خود مکانیزم‌های مهم برای شکست پرتابه ضدزره را با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان دادند. آنها چندین جنبه شکست پرتابه را بررسی نمودند که منجر به بازده بالستیک بالا در برابر میله‌های بلند، پرتابه‌های ضدزره و خرج‌گودها^۳ گردید. راولد^۴ و هیرشبرگ^۵ [۲] یک راهکار بالستیک با استفاده از یک صفحه کمکی سوراخ‌دار فولادی با سختی بالا را پیشنهاد نمودند که کل سطح سوراخ‌ها در آن حدود ۴۰ تا ۵۰٪ است. سوراخ‌های این صفحه کمکی سوراخ‌دار، با فاصله مرکز تا مرکز سوراخ ۱/۲ تا ۱/۹ برابر قطر سوراخ‌ها در نظر گرفته شده بود تا مهمات سلاح‌های با کالیبر کوچک را دچار شکست نماید. بالوس^۶ و همکاران [۳] با بررسی تأثیر هندسه، خواص مکانیکی، ضخامت، شیب و فاصله صفحه‌های سوراخ‌دار در مقابل پرتابه 12.7mm API، کارایی جرمی این مجموعه صفحه‌ها را نشان دادند. بالوس و همکاران [۴] همچنین در پژوهشی دیگر به

^۷ Austempering^۸ Kilic^۹ Mishra^۱ Monolithic Armor Plates^۲ Rosenberg^۳ Shaped Charges^۴ Ravid^۵ Hirschberg^۶ Balos

نتیجه مجموعه صفحه‌های زرهی قابلیت خود در ایجاد حفاظت بالستیک کامل را از دست بدهند. این نقاط حالت‌های ۱ و ۳ و ۴ آمده در شکل ۱ می‌باشند؛ بنابراین ایده بهره‌گیری از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه به منظور مرتفع نمودن نقاط ضعف استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار به تنهایی مطرح گردیده است.

در پژوهش حاضر سعی گردیده تا با انجام آزمایش‌های مختلف تجربی و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی، موارد ضعف حفاظت بالستیک در حالتی که از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه استفاده می‌گردد (که شامل برخورد پرتابه با ۱- مرکز سوراخ، ۲- وسط دو سوراخ و ۳- مرکز هندسی سه سوراخ در صفحه سوراخ‌دار است) تا حدی مرتفع گردیده و با حفاظت بالستیک در این حالت‌ها بهبود یابد؛ بنابراین در آزمایش‌های تجربی سعی گردیده است تا نحوه قرارگیری مجموعه صفحه زرهی در دستگاه تفنگ گازی به شکلی باشد که پرتابه به این نقاط در صفحه سوراخ‌دار جلویی برخورد نماید و در واقع نتایج حاصل از این نوع برخورد مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تجربی

۲-۱- جنس و خواص مواد

در هفت آزمایش تجربی انجام شده جنس مواد مورد استفاده برای صفحه پایه، صفحه‌های سوراخ‌دار و پرتابه در جدول ۱ ارائه شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم 6061-T6 در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

فرآیند ساخت پرتابه‌ها بدین صورت بوده است که از میله آلومینیوم 6061-T6 به قطر ۲۰ میلی‌متر و با استفاده از فرآیند ماشین‌کاری و طبق مشخصات هندسی آمده در شکل ۲ و با نوک دوکی شکل ساخته شده‌اند. جرم پرتابه‌ها نیز برابر با ۵ گرم است.

بالا حدود ۱۶٪ بیشتر از آلومینیوم ۷۰۱۷ به عنوان مرجع است. این مقدار 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. رادیساولجیویچ^۱ و همکارانش [۱۰] با بررسی اندازه قطر سوراخ و همچنین فاصله لبه سوراخ‌ها به طراحی یک صفحه زرهی سوراخ‌دار موثر 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. پالووسکی^۲ و همکاران [۱۱] با انجام یک پژوهش به روش تجربی و شبیه‌سازی عددی به بررسی تماس نامتقارن بین یک صفحه فولادی و یک پرتابه ضدزره پرداختند و وجود وابستگی بین نقطه برخورد پرتابه به صفحه سوراخ‌دار و شکست پرتابه را نشان دادند. بورین^۳ و همکاران [۱۲] یک مدل احتمالی برای بهینه‌سازی صفحه‌های سوراخ‌دار فولادی با استحکام بالا برای مقاومت ضربه‌ای سیستم‌های زرهی معرفی نمودند. بورین و همکاران در پژوهشی دیگر [۱۳] با پژوهش بر روی کارایی حفاظتی صفحه‌های سوراخ‌دار ساخته شده از فولادهای با استحکام بالا، فرآیند نفوذ پرتابه ضدزره در صفحه زرهی سوراخ‌دار را توصیف نمودند. آنها در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی تاثیر تکه‌تکه شدن و یا انحراف هسته پرتابه زمانیکه پرتابه به سطحی نزدیک به اطراف سوراخ برخورد می‌نماید (اثر لبه) را مکرر مشاهده نمودند. موباشر^۴ و همکاران [۱۴] با انجام مطالعاتی بر روی صفحه زرهی سوراخ‌دار در برابر پرتابه وروردی، مشاهده نمودند که پرتابه زمانیکه در حال عبور از صفحه زرهی سوراخ‌دار است، از مسیر مستقیم خود منحرف می‌گردد.

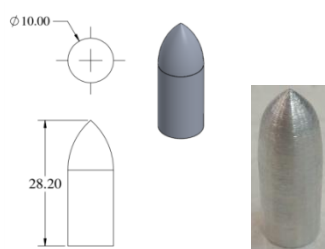
کارایی مجموعه صفحه‌های زرهی شامل صفحه سوراخ‌دار و صفحه پایه در ایجاد حفاظت بالستیک مناسب در عین وزن به مراتب کمتر آنها، در مقایسه با صفحات یکپارچه توسط پژوهشگران مختلف به اثبات رسیده است؛ اما برخورد پرتابه به برخی نقاط در صفحه سوراخ‌دار موجب می‌گردد، صفحه سوراخ‌دار مکانیزم‌های عملکردی خود را از دست بدهد و در

³ Burian

⁴ Mubashar

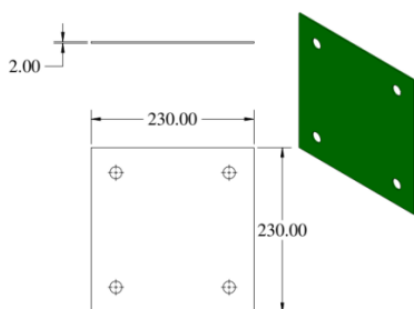
¹ Radisavljevic

² Pawlowski



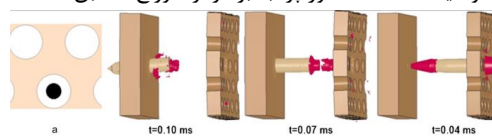
شکل ۲ - پرتابه

ضخامت صفحه پایه و صفحه‌های سوراخ‌دار مورد استفاده در جلوی صفحه پایه برابر با دو میلی‌متر انتخاب گردیده است. قطر سوراخ‌ها در صفحه‌های سوراخ‌دار در این پژوهش با توجه به قطر پرتابه ورودی که ۱۰ میلی‌متر بوده برابر با ۹/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب صفحه پایه، صفحه سوراخ‌دار پشتی و صفحه سوراخ‌دار جلویی به‌مراه مشخصات هندسی آنها نمایش داده شده است. نکته قابل توجه در خصوص تفاوت دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی این است که محل قرارگیری سوراخ‌ها در این دو صفحه متفاوت بوده و باعث می‌گردد، زمانی که این صفحه‌ها رو به روی یکدیگر قرار می‌گیرند، سوراخ‌ها در دو صفحه نسبت به یکدیگر خروج از مرکزی داشته باشند. سرعت خروجی آن با استفاده از دوربین سرعت بالا اندازه‌گیری شده است.

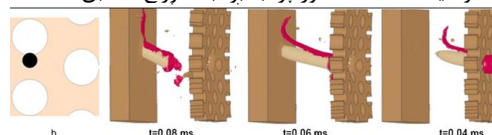


شکل ۳ - صفحه پایه

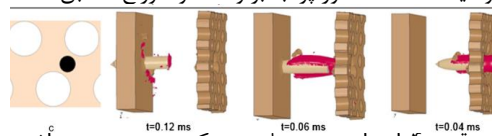
موقعیت ۱: امتداد محور پرتابه بر مرکز سوراخ منطبق است



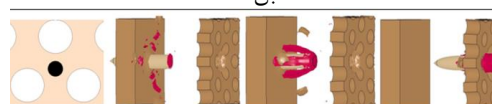
موقعیت ۲: امتداد محور پرتابه بر لبه سوراخ منطبق است



موقعیت ۳: امتداد محور پرتابه بر وسط دو سوراخ منطبق است



موقعیت ۴: امتداد محور پرتابه بر مرکز هندسی سه سوراخ منطبق است



شکل ۱- چهار وضعیت ممکن برخورد پرتابه با صفحه سوراخ‌دار [۶]

جدول ۱- مواد اولیه نمونه‌ها و فیکسچرها

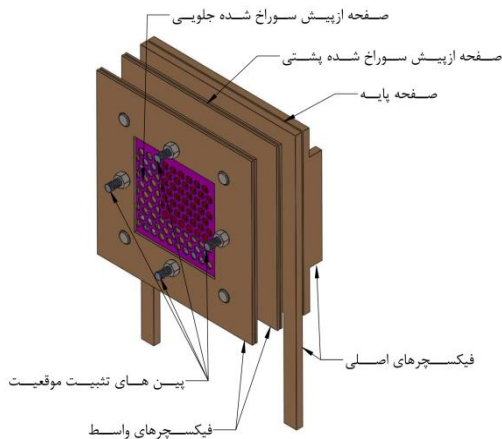
عنوان	متریال مورد استفاده	مشخصه متریال
پرتابه	میله آلومینیوم به قطر ۲۰ mm	آلومینیوم 6061-T6
صفحه سوراخ‌دار	ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ mm	آلومینیوم 6061-T6
صفحه پایه	ورق آلومینیوم به ضخامت ۲ mm	آلومینیوم 6061-T6

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم 6061-T6 [۱۵]

عنوان	نماد	مقدار	واحد
چگالی	ρ	۲۷۰۰	kg / m^3
استحکام کششی نهایی	UTS	۳۱۰	MPa
استحکام تسلیم	σ_y	۳۲۴	MPa
مدول الاستیک (یانگ)	E	۶۹	GPa
مدول برشی	G	۲۶	GPa

به منظور انجام آزمایش‌های تجربی از دستگاه تفنگ گازی^۱ استفاده شده است.

^۱ Gas Gun

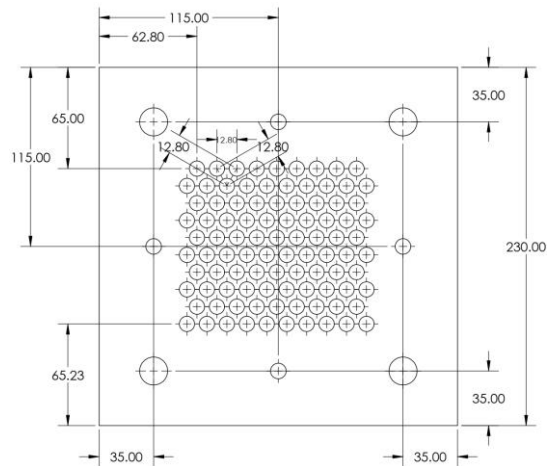


شکل ۷ - چیدمان مجموعه صفحه‌های هدف (صفحه پایه + صفحه‌های سوراخ‌دار جلویی و پشتی)

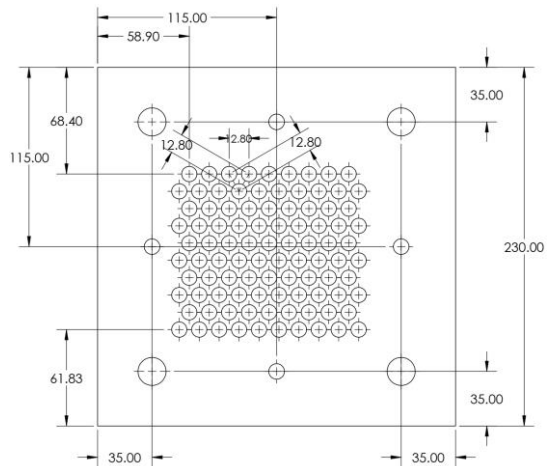
نکته حائز اهمیت در طراحی صفحه‌های سوراخ‌دار جلویی و پشتی و نحوه چیدمان آنها نسبت به یکدیگر آن است که سوراخ‌های تعبیه شده در این صفحات به گونه‌ای نسبت به یکدیگر در دو صفحه قرار گیرند که بتوانند پوشش‌دهنده یکدیگر در ایجاد اثر لبه بر روی پرتابه ورودی باشند. به عبارت دیگر می‌بایست تمهیداتی ایجاد گردد تا پرتابه ورودی به هر نقطه از صفحه سوراخ‌دار جلویی برخورد نماید یا خود آن صفحه اثر لبه را بر روی پرتابه اعمال نماید و یا در غیر این صورت و در شرایطی که پرتابه به یکی از آن سه نقطه ضعف صفحه سوراخ‌دار جلویی برخورد نمود، در ادامه مسیر خود و با برخورد به صفحه سوراخ‌دار پشتی، به لبه یکی از سوراخ‌ها در صفحه سوراخ‌دار پشتی اصابت نماید و اثرات مثبت در ایجاد حفاظت بالستیک مناسب توسط صفحه سوراخ‌دار پشتی اعمال گردد.

۳- روش شبیه سازی

از آنجاکه ضربه سرعت بالا و مسائل نفوذ در برگزیده تغییر شکل‌های بزرگ، فرسایش، نرخ کرنش بالا وابسته به رفتار غیرخطی و چندتکه شدن است، بنابراین مدل‌سازی نفوذ به صورتی که تأثیرات مذکور در آن لحاظ شده باشد، بسیار ضروری است. یکی از کدهای متداول به اصطلاح صریح که به صورت موفقیت‌آمیزی برای شبیه‌سازی ضربه و نفوذ پرتابه به یک صفحه زرهی مورد استفاده قرار گرفته است ال‌اس‌داینما است [۶]. نرم‌افزار ال‌اس‌داینما یک کد اجزا محدود بسیار قوی است که توانمندی بالایی در حل مسائل دینامیک غیرخطی دارد. قابلیت این بسته نرم‌افزاری در تحلیل مسائل ضربه،



شکل ۴ - صفحه سوراخ‌دار پشتی



شکل ۵ - صفحه سوراخ‌دار جلویی

مونتاژ صفحه‌های پایه و سوراخ‌دار در کنار یکدیگر جهت انجام آزمایش‌های سرعت بالای تجربی به صورت شکل ۶ بوده و جزئیات آن در شکل ۷ نامگذاری شده است.



شکل ۶ - چیدمان مجموعه صفحه‌های هدف (صفحه پایه + صفحه‌های سوراخ‌دار جلویی و پشتی)

یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای توصیف رفتار ویسکوپلاستیک اجسام در گستره وسیعی از نرخ کرنش، مدل جانسون-کوک است که در مقاله‌های مختلف از حالت‌های مختلف آن که در نرم افزار ال‌اس‌داین‌ا وجود دارد استفاده گردیده است [۱۶، ۱۷]. مزیت استفاده از مدل ماده جانسون-کوک نسبت به سایر مدل‌ها همچون کوپر-سیمونز، لحاظ نمودن کارسختی و همچنین اثرات دمایی در مدل ماده جانسون-کوک است. در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا چند نسخه مختلف از مدل ماده جانسون-کوک ارائه گردیده است [۱۸]. با توجه به بهره‌مندی از ماده آلومینیوم برای ساخت پرتابه، صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار و به منظور پیش‌بینی صحیح رفتار آنها از مدل ماده MAT-JOHNSON-COOK (AMT-15) موجود در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا استفاده شده است. دلیل استفاده از نسخه مذکور در میان سایر نسخه‌های جانسون-کوک، در نظر گرفته شدن اثرات دمایی، کارسختی و نرخ کرنش در این نسخه است. بعلاوه اینکه این نسخه از مدل ماده جانسون-کوک از معادلات ساده‌تری در مقایسه با سایر نسخه‌ها استفاده نموده است. فرمول‌بندی این مدل ماده به صورت رابطه (۱) است [۱۹]:

$$\sigma_y = [A + B \varepsilon_p^n][1 + C l_n \dot{\varepsilon}_p^*][1 - T_H^m] \quad (1)$$

که در رابطه فوق σ_y تنش ایجاد شده و A تنش تسلیم است. B و n پارامترهای سخت‌شوندگی بوده و C ضریب اعمال نرخ

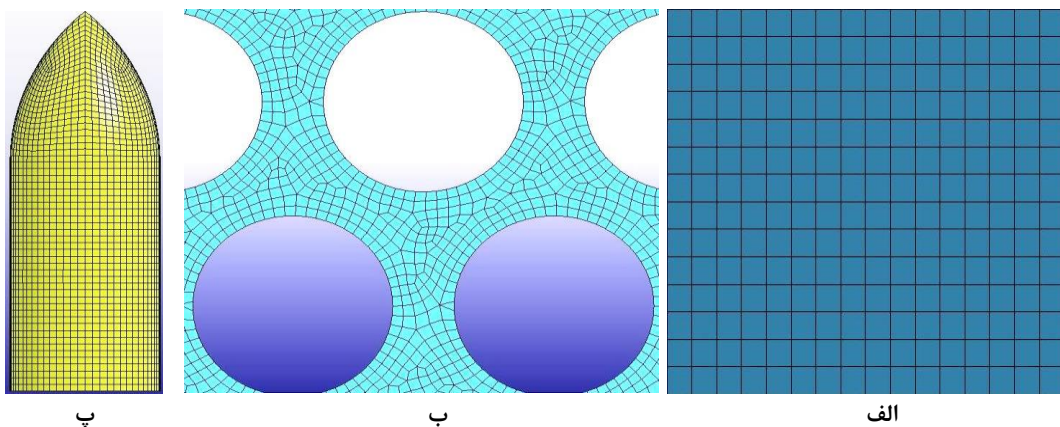
انفجار، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاد، امواج شوک و... و دارا بودن بیش از ۲۰۰ نوع مدل ماده گوناگون و ۱۴ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح، این کد را به یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مهندسی مبدل کرده است. برای انتخاب قطر سوراخ‌ها، فاصله بین سوراخ‌ها و ضخامت صفحه‌های سوراخ‌دار جلویی و پشتی و ضخامت صفحه پایه و همچنین نحوه قرارگیری موقعیت سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی، یک سلسله شبیه‌سازی‌های عددی انجام شد و پاسخ‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت تا بهترین حالت ممکن در میان حالت‌های مختلف، در ایجاد حداکثر حفاظت بالستیک ممکن و حداقل وزن ممکن در مجموعه صفحه‌های هدف بدست آید.

۳-۱- هندسه مدل و مش بندی

مدل‌سازی و مش‌زنی صفحه‌های مختلف هدف و پرتابه در نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا و به صورت نشان داده شده در شکل ۸ می‌باشد. اندازه المان‌های مورد استفاده ۰/۳۵ میلی‌متر بوده است.

۳-۲- مدل مواد

به منظور حصول پیش‌بینی صحیح رفتار مواد در شبیه‌سازی‌های عددی انتخاب درست مدل ماده برای مواد مختلف بسیار حائز اهمیت می‌باشد.



شکل ۸- نحوه مش‌زنی اجزا مختلف (الف- صفحه پایه ب- صفحه سوراخ‌دار پ- پرتابه)

است که در آن $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک موثر و ε_0 نرخ کرنش پلاستیک موثر مرجع است، لذا طبق تعریف:

کرنش است. ε_p نیز کرنش پلاستیک موثر می‌باشد. $\dot{\varepsilon}_p^*$ نسبت نرخ کرنش (نرخ کرنش بی‌بعدشده) در رابطه (۲) آورده شده

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu (1 + \frac{1-\mu}{2}) \mu - (\frac{\mu}{2}) \mu^2}{[1 - (S_1 - 1) \mu - \frac{S_2 \mu^2}{(\mu + 1)} - \frac{S_3 \mu^3}{(1 + \mu)^2}]} + (\gamma + \alpha \mu) E_0 \quad (7)$$

که در رابطه فوق E_0 انرژی درونی بر واحد حجم، C نقطه تقاطع منحنی سرعت شوک و ذره، S_1, S_2, S_3 ضرایب شیب منحنی سرعت شوک و ذره و γ ضریب گرونایزن است. پارامتر α ضریب تصحیح حجم و μ ضریب تراکم می‌باشند.

در جدول ۴ پارامترهای معادله حالت می-گرونایزن مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی ارائه گردیده است. قابل ذکر است که مقادیر ضرایب مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی که در جداول ۳ و ۴ آورده شده، با توجه به قرارگیری بازه نرخ

جدول ۳- پارامترهای ماده و مدل ماده جانسون- کوک صفحه هدف پرتابه از جنس آلومینیوم 6061-

T6 [۲۱, ۲۲]

عنوان	نماد	یکا	پرتابه یا صفحه زرهی
چگالی	ρ	$\frac{Kg}{m^3}$	۲۷۰۰
مدول الاستیک	E	MPa	۶۹۰۰۰
مدول برشی	G	MPa	۲۶۰۰۰
ضریب پواسون	ν	—	۰/۳۳
کرنش سختی	A	MPa	۳۲۴
	B	MPa	۱۱۴
	n	—	۰/۴۲
نرخ کرنش سختی	C	—	۰/۰۰۲
نرم شونده‌گی دمایی	C_p	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

کرنش آزمایش‌ها در محدوده نرخ کرنش مراجع مورد استفاده قابل قبول است.

$$\dot{\epsilon}_p^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \quad (2)$$

همچنین در رابطه (۱) T_H از رابطه (۳) جایگزین می‌شود که این رابطه T, T_r و T_m به ترتیب دمای کاری آزمایش، دمای اتاق و دمای ذوب در واحد کلون می‌باشند:

$$T_H = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

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

در رابطه (۱) کروشه اول تنش را به عنوان تابعی از کرنش پلاستیک در نرخ کرنش مرجع و دمای اتاق می‌دهد؛ کروشه دوم و سوم نیز به ترتیب ارائه دهنده اثر نرخ کرنش و نرم شونده‌گی حرارتی می‌باشند.

مدل ماده جانسون-کوک برای محاسبه کرنش گسیختگی از یک فرمول‌بندی به شکل رابطه (۴) استفاده می‌نماید که شامل اثرات تنش سه‌محوری، دما و نرخ کرنش در کرنش شکست است. 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.

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}_p^*][1 + D_5 T_H^m] \quad (4)$$

در رابطه (۴) σ^* تنش سه‌محوری است و برای یک نمونه گرد بریده‌شده مقدار آن از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\sigma^* = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} = \frac{1}{3} + \ln \left(1 + \frac{a}{2R} \right) \quad (5)$$

در رابطه (۵) σ_H تنش هیدرواستاتیک است، σ_{eq} تنش موثر یا معادل است و a و R به ترتیب شعاع کوچک‌ترین سطح مقطع و شعاع انحنا در گلوبی شدن است.

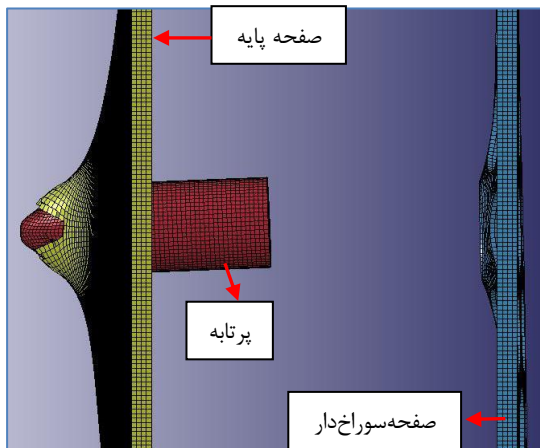
ضرایب D_1 تا D_5 در رابطه (۴) ضرایب گسیختگی می‌باشند که از آزمون‌های تجربی بدست می‌آیند. گسیختگی در ماده زمانی رخ خواهد داد که پارامتر آسیب (D) که در رابطه (۶) آورده شده برابر یک شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^f} \quad (6)$$

۳-۳- معادله حالت

معادله حالت مورد استفاده معادله حالت می-گرونایزن^۱ بوده است که به صورت آورده شده در رابطه (۷) است [۲۰]:

^۱ Mie-Gruneisen



شکل ۹ - تخریب و عبور پرتابه از صفحه پایه- شبیه‌سازی عددی آزمایش پرتابه در مرکز سوراخ - وضعیت بهره‌گیری از یک صفحه سوراخ‌دار

در چیدمانی دیگر از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه استفاده شده است. در این چیدمان مقدار فاصله بین صفحه پایه و صفحه سوراخ‌دار پشتی برابر ۴۳ میلی‌متر و فاصله بین صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی ۳۸ میلی‌متر قرار داده شد. سرعت اولیه پرتابه در لحظه برخورد با مجموعه صفحه هدف در این آزمایش برابر ۲۰۳ متر بر ثانیه بوده است. تمهیداتی در نظر گرفته شد تا پرتابه به مرکز یکی از سوراخ‌ها در صفحه سوراخ‌دار جلویی برخورد نماید. بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مربوط به این چیدمان که تصاویر مربوط به آنها در شکل ۱۰ نشان داده شده است، حاکی از آن است که پرتابه در اثر برخورد با صفحه سوراخ‌دار جلویی، با توجه به اینکه به مرکز یکی از سوراخ‌ها در این صفحه برخورد می‌نماید اثرپذیری بسیار اندکی از این صفحه داشته و تنها به دلیل قطر سوراخ که کوچکتر از قطر پرتابه است، صفحه سوراخ‌دار جلویی موجب کاهش انرژی جنبشی (سرعت) پرتابه می‌گردد. در ادامه با توجه به نحوه چیدمان سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی نسبت به یکدیگر، پرتابه با لبه یکی از سوراخ‌ها در صفحه سوراخ‌دار پشتی برخورد می‌نماید که در نتیجه آن، اثر خمشی وارده به پرتابه و در واقع نیروی ناتقارن وارده به پرتابه، موجب ایجاد انحراف در مسیر پرتابه گردیده و موجب می‌گردد پرتابه به طور مایل به صفحه پایه برخورد نماید. هرچند که پرتابه تا حدودی باعث تخریب صفحه پایه گردید، ولی نوک پرتابه قادر

جدول ۴- پارامترهای معادله حالت صفحه‌های هدف و پرتابه ساخته شده از جنس آلومینیوم 6061-T6 [۱۵]

عنوان	نماد	یکا	پرتابه یا صفحه زرهی
سرعت موج الاستیک	C	m/s	۵۳۵۰
مقادیر شیب	S_1	—	۱/۳۴
	S_2	—	۰
	S_3	—	۰
ضریب گرونایزن	γ	—	۱/۹۷

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از برخورد پرتابه با ۳ نقطه از ۴ نقطه ممکن در صفحه سوراخ‌دار که عبارتند از برخورد پرتابه با الف) مرکز سوراخ، ب) وسط دو سوراخ و پ) مرکز هندسی سه سوراخ، یکبار در حالتی که از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه استفاده شده است و بار دیگر در حالتی که از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه استفاده شده است، ارائه گردیده و نتایج مورد مقایسه، بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

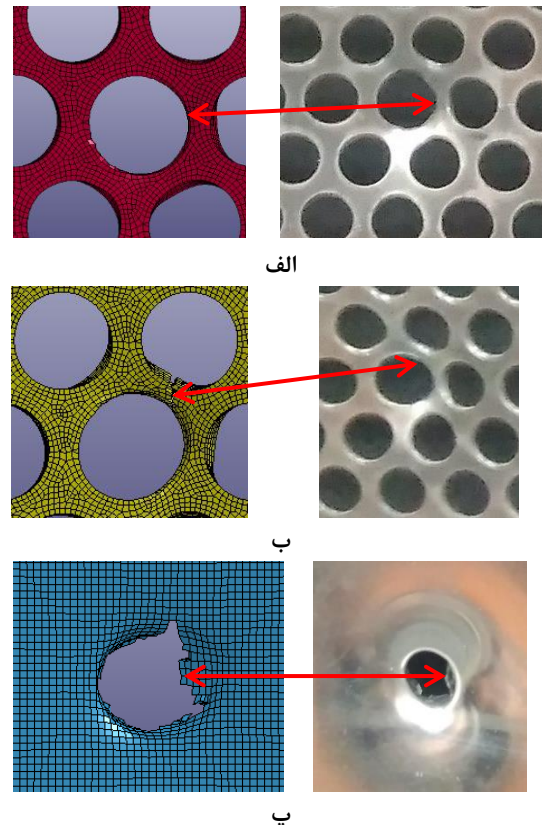
۴-۱- برخورد پرتابه با مرکز سوراخ

آزمایش در وضعیتی که یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه به فاصله ۳۸ میلی‌متر قرار داده شده و پرتابه با سرعت اولیه ۲۰۳ متر بر ثانیه به مجموعه صفحه هدف برخورد می‌نماید، انجام شد. طی آزمایش مذکور مشاهده گردید که پرتابه به دلیل اصابت با مرکز سوراخ در صفحه سوراخ‌دار، تحت تاثیر نیروی نامتقارنی قرار نگرفته چندان دچار انحراف نمی‌گردد. با توجه به اندازه قطر سوراخ در صفحه سوراخ‌دار که کمی کوچکتر از قطر کالیبر پرتابه است؛ بنابراین پرتابه در تقابل با صفحه سوراخ‌دار فقط اندکی دچار کاهش انرژی جنبشی (سرعت) شده و بدون هیچگونه انحرافی به صفحه پایه برخورد می‌نماید. این برخورد موجب تخریب و شکست صفحه پایه گردیده و نوک پرتابه از پشت صفحه پایه خارج می‌گردد. تصویر شبیه‌سازی عددی این آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است.

نیروی نامتقارنی قرار نمی‌گیرد، چندان دچار انحراف نگردیده است؛ همچنین مشاهده گردید پرتابه با ایجاد تغییر شکل پلاستیک و تخریب وسط دو سوراخ در صفحه سوراخ‌دار، فقط کمی کاهش انرژی جنبشی (سرعت) پیدا کرده و به صورت مستقیم (بدون انحراف) به صفحه پایه برخورد می‌نماید و موجب تخریب و شکست صفحه پایه گردیده و نوک پرتابه از پشت صفحه پایه خارج می‌گردد.

در مقابل در چیدمانی دیگر از دو صفحه سوراخ‌دار مشابه با قسمت ۴-۱ در جلوی صفحه پایه استفاده شده و سرعت اولیه برخورد پرتابه با صفحات نیز همان ۲۰۳ متربرثانیه در نظر گرفته شد. فقط تمهیداتی مدنظر قرار گرفت تا پرتابه به وسط دو سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلویی برخورد نماید. با مشاهده نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مربوطه مشخص گردید، پرتابه در برخورد با صفحه سوراخ‌دار جلویی و با توجه به اینکه به وسط دو سوراخ در این صفحه برخورد می‌نماید؛ به دلیل عدم وجود نیروی خمشی نامتقارن، اثرپذیری بسیار اندکی از این صفحه داشته و تنها به دلیل تخریب لبه بین دو سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلویی، دچار کاهش انرژی جنبشی (سرعت) گردیده است. در ادامه فرآیند نفوذ با توجه به نحوه چیدمان سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی نسبت به یکدیگر، پرتابه در برخورد با صفحه سوراخ‌دار پشتی، در اثر اعمال نیروی نامتقارن از سوی این صفحه دچار انحراف از مسیر مستقیم خود می‌گردد؛ بنابراین پرتابه به طور مایل به صفحه پایه برخورد می‌نماید. درکل در این نوع چیدمان مشاهده گردید که صفحه‌های هدف قادر به ایجاد حفاظت بالستیک مناسب‌تری در مقایسه با وضعیت استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه در این حالت می‌گردند. در شکل ۱۱ نحوه تغییر شکل صفحه‌های هدف در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفته و همان طور که مشخص است می‌توان مشاهده نمود که تغییر شکل‌های حاصل به طور کامل با یکدیگر همخوانی دارد که این موضوع نشان‌دهنده مدل‌سازی و تعریف درست مسئله در شبیه‌سازی عددی است. در شکل ۱۲ قسمت الف، محل برخورد پرتابه با هریک از دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی و در قسمت ب، محل برخورد پرتابه با دو صفحه سوراخ‌دار پشتی و صفحه پایه نمایش داده شده است. با مشاهده و بررسی دو تصویر شکل ۱۲ به وضوح مشخص است که صفحه

به عبور از صفحه پایه نشده است. در کل مشاهده گردید، مجموعه صفحه‌های هدف در چیدمانی شامل دو صفحه سوراخ‌دار، قادر به ایجاد حفاظت بالستیک مناسب‌تری در مقایسه با وضعیت استفاده از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه در این حالت گردیده است

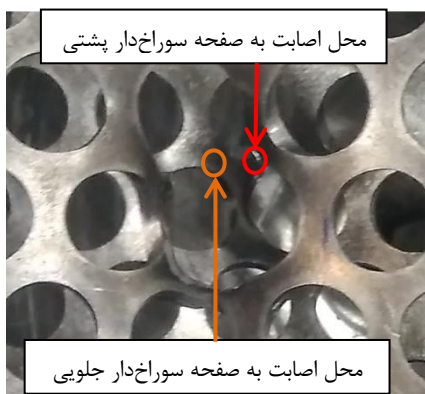


شکل ۱۰ - نتایج آزمایش تجربی (تصاویر سمت راست) و شبیه‌سازی عددی (تصاویر سمت چپ) - برخورد پرتابه با مرکز سوراخ صفحه سوراخ‌دار جلویی - {الف - صفحه سوراخ‌دار جلویی، ب - صفحه سوراخ‌دار پشتی، پ - صفحه پایه}

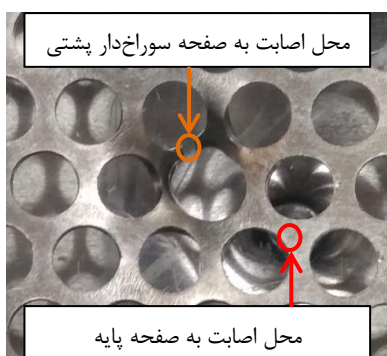
۴-۲- برخورد پرتابه با وسط دو سوراخ

در این آزمایش در وضعیتی که از یک صفحه سوراخ‌دار استفاده شده است، نوع چیدمان، فاصله صفحه سوراخ‌دار و پایه و همچنین سرعت پرتابه مشابه با آزمایش بخش ۴-۱ بوده و فقط تمهیداتی در نظر گرفته شده تا پرتابه به وسط دو سوراخ در صفحه سوراخ‌دار برخورد نماید. مجدد مشاهده گردید که پرتابه با توجه به اینکه در برخورد با صفحه سوراخ‌دار تحت تاثیر

به عدم اعمال نیروی نامتقارن به پرتابه از سوی صفحه سوراخ‌دار، پرتابه به طور مستقیم به صفحه پایه برخورد نموده است.



الف

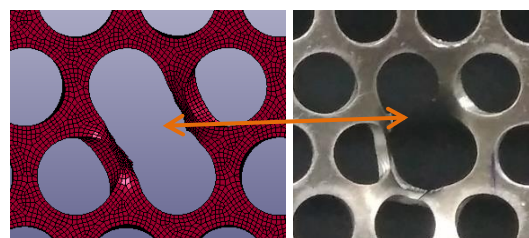


ب

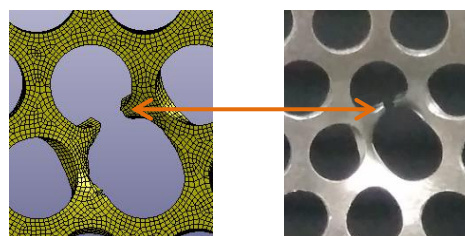
شکل ۱۲ - مقایسه محل برخورد پرتابه به صفحه‌های هدف - آزمایش تجربی برخورد پرتابه با وسط دو سوراخ صفحه سوراخ‌دار جلویی (الف) - مقایسه صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی، ب - مقایسه صفحه سوراخ‌دار پشتی و صفحه پایه

در واقع پرتابه در تقابل با صفحه سوراخ‌دار (در محل مرکز هندسی سه سوراخ) فقط کمی دچار کاهش انرژی جنبشی (سرعت) گردیده است؛ بنابراین پرتابه پس از عبور از صفحه سوراخ‌دار به صفحه پایه رسیده و با تخریب و ایجاد شکست در آن نوک پرتابه از پشت صفحه پایه خارج شده است. در آزمایشی دیگر برخورد پرتابه به مرکز هندسی سه سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلویی در وضعیتی که از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه (مشابه با قسمت ۴-۱) استفاده شده است، مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش مشاهده

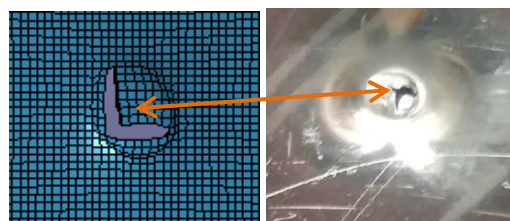
سوراخ‌دار جلویی با توجه به محل تقابل پرتابه با این صفحه (که در وسط دو سوراخ بوده)، موجب ایجاد انحراف چندانی در مسیر پرتابه نگردیده، ولی در مقابل صفحه سوراخ‌دار پشتی با توجه به برخورد پرتابه به نزدیکی یکی از سوراخ‌ها در این صفحه، موجب ایجاد انحراف چشمگیر در مسیر پرتابه شده است.



الف



ب

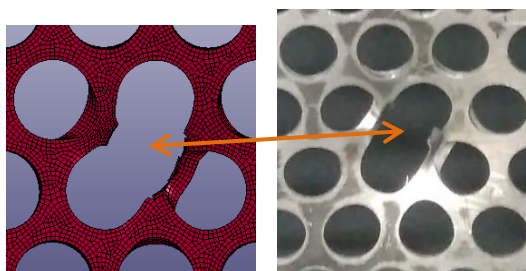


پ

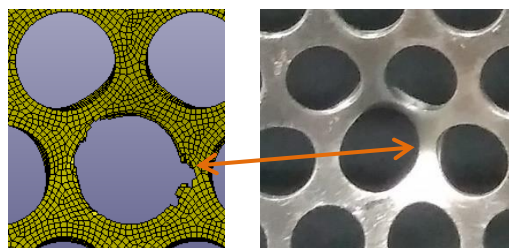
شکل ۱۱ - نتایج آزمایش تجربی (تصاویر سمت راست) و شبیه‌سازی عددی (تصاویر سمت چپ) - برخورد پرتابه با وسط دو سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلویی (الف) - صفحه سوراخ‌دار جلویی، ب - صفحه سوراخ‌دار پشتی، پ - صفحه پایه

۴-۳- برخورد پرتابه با مرکز هندسی سه سوراخ

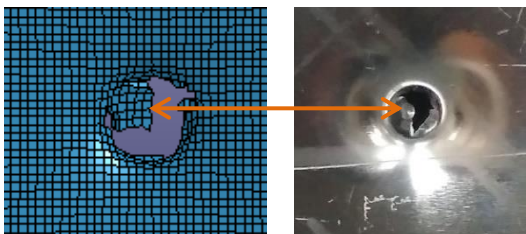
در این آزمایش نیز ابتدا در وضعیتی که از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه استفاده شده است و با حفظ شرایط قبلی (نوع چیدمان، فاصله صفحه سوراخ‌دار و پایه و همچنین سرعت پرتابه مشابه با آزمایش بخش ۴-۱) فقط تمهیداتی در نظر گرفته شد تا پرتابه به مرکز هندسی سه سوراخ در صفحه سوراخ‌دار برخورد نماید. با بررسی نتایج مشاهده شد که با توجه



الف



ب



پ

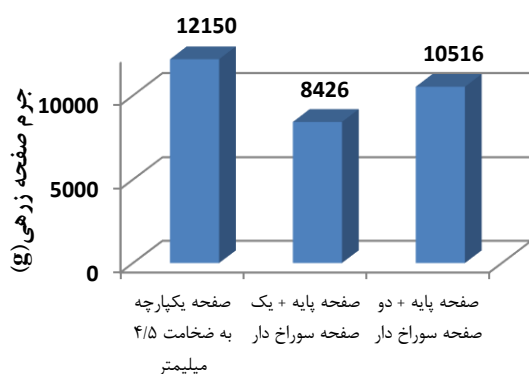
شکل ۱۳ - نتایج آزمایش تجربی (تصاویر سمت راست) و شبیه‌سازی عددی (تصاویر سمت چپ) - آزمایش برخورد پرتابه با مرکز هندسی سه سوراخ (الف) - صفحه سوراخ‌دار جلویی، ب - صفحه سوراخ‌دار پشتی، پ - صفحه پایه

۴-۴- بررسی جرمی صفحه هدف

در شکل ۱۵ نمودار مربوط به مقایسه وزنی صفحه‌های هدف در سه وضعیت صفحه پایه با ضخامت ۴/۵ میلیمتر به تنهایی، یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه و دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه نمایش داده شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، میزان کاهش وزن مجموعه صفحه پایه به همراه یک صفحه سوراخ‌دار در مقایسه با صفحه یکپارچه‌ای به ضخامت ۴/۵ میلیمتر (دارای حفاظت بالستیک یکسان در مقابل پرتابه ورودی) ۳۱٪ بوده و این میزان کاهش وزن برای صفحه پایه به همراه دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی آن در مقایسه با صفحه یکپارچه‌ای به ضخامت ۴/۵ میلیمتر برابر ۱۳/۵٪ است.

گردید که پرتابه ابتدا با برخورد به مرکز هندسی سه سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلویی و با توجه به این نکته که در این نقطه نیروی وارده از سوی صفحه سوراخ‌دار جلویی به پرتابه متقارن است، دچار انحراف نگردیده است و فقط کمی از انرژی جنبشی ابتدایی آن کاسته شده است. در ادامه فرآیند نفوذ، با توجه به نحوه چیدمان سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی نسبت به یکدیگر، پرتابه در برخورد با صفحه سوراخ‌دار پشتی به لبه یکی از سوراخ‌ها در این صفحه برخورد نموده که این موضوع باعث ایجاد سایش در نوک تیز پرتابه و همچنین ایجاد اثر خمشی بر روی پرتابه گردیده و به تبع آن نیروی نامتقارن وارده از صفحه سوراخ‌دار پشتی به پرتابه، منجر به ایجاد انحراف در مسیر مستقیم پرتابه می‌گردد. سرانجام پرتابه با برخورد مایل به صفحه پایه ضمن ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بر روی صفحه پایه، متوقف شده و قادر به نفوذ در صفحه پایه نبوده است. در شکل ۱۳ نحوه تغییر شکل صفحه‌های هدف در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است که مشاهده می‌شود که تا حدود بسیار زیادی به یکدیگر مشابهت دارند که این موضع حاکی از تعریف درست پارامترهای مختلف در شبیه‌سازی عددی است.

مقایسه میزان انحراف ایجاد شده در مسیر پرتابه توسط هر یک از دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی در این آزمایش به کمک تصاویر شکل ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۴ قسمت الف محل برخورد پرتابه با هر یک از دو صفحه سوراخ‌دار جلویی و پشتی را نشان می‌دهد و شکل ۱۴ قسمت ب محل برخورد پرتابه با هر یک از دو صفحه سوراخ‌دار پشتی و صفحه پایه را نمایش داده است. به وضوح از مقایسه دو شکل مذکور مشخص است که صفحه سوراخ‌دار جلویی با توجه به محل تقابل پرتابه و این صفحه (که در مرکز هندسی سه سوراخ بوده)، موجب ایجاد انحراف چندانی در مسیر پرتابه نگردیده، ولی در مقابل صفحه سوراخ‌دار پشتی با توجه به برخورد پرتابه به لبه یکی از سوراخ‌ها در این صفحه، موجب ایجاد انحراف در مسیر پرتابه شده است.



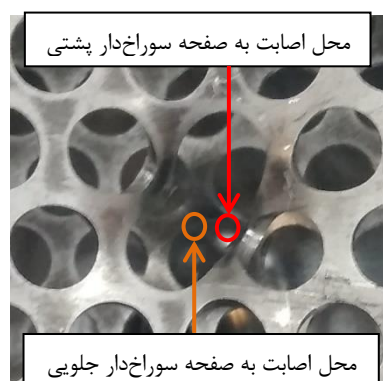
نوع چیدمان صفحه زرهی

شکل ۱۵- نمودار مقایسه جرم صفحه‌ها بر حسب نوع چیدمان صفحه هدف

➤ ایجاد حفاظت بالستیک مناسب با بهره‌گیری از یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه در برخی حالت‌های برخورد پرتابه با صفحه سوراخ‌دار (اعم از الف- مرکز سوراخ، ب- وسط دو سوراخ و پ- مرکز هندسی سه سوراخ) ایجاد نمی‌گردد، هرچند که احتمال پیش آمدن این حالت‌ها بسیار اندک است.

➤ استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه در عین حال که حفاظت بالستیک در مقابل پرتابه ورودی را بهبود می‌بخشد ولی موجب افزایش وزن مجموعه صفحه زرهی و همچنین افزایش ضخامت مجموعه صفحه زرهی می‌گردد که این موضوع برای سازه‌هایی که قرار است از آنها در مقابل پرتابه ورودی محافظت گردد، به خصوص سازه‌های متحرک، نامطلوب بوده و محدودیت‌های مختلفی را ایجاد می‌نماید.

➤ از آنجاییکه قرارگیری سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلوئی و پشتی نسبت به یکدیگر می‌بایست به گونه‌ای باشد که اثر لبه بر روی پرتابه توسط حداقل یکی از این دو صفحه اعمال گردد؛ بنابراین مونتاژ این دو صفحه نسبت به یکدیگر بسیار اهمیت دارد و این موضوع ساخت و مونتاژ یک مجموعه صفحه زرهی مشتمل بر دو صفحه سوراخ‌دار را نسبت به مجموعه صفحه زرهی دارای یک صفحه سوراخ‌دار بسیار پیچیده‌تر می‌نماید.



الف



ب

شکل ۱۴- محل برخورد پرتابه به صفحه‌های هدف- آزمایش تجربی برخورد پرتابه با مرکز هندسی سه سوراخ در صفحه سوراخ‌دار جلوئی (الف-مقایسه صفحه سوراخ‌دار جلوئی و پشتی، ب-مقایسه صفحه سوراخ‌دار پشتی و صفحه پایه)

۵- نتیجه گیری

➤ به منظور رفع نقاط ضعف ایجاد حفاظت بالستیک توسط یک صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه، استفاده از دو صفحه سوراخ‌دار در جلوی صفحه پایه می‌بایست به نحوی صورت پذیرد که سوراخ‌ها در دو صفحه سوراخ‌دار جلوئی و پشتی با خروج از مرکزی نسبت به یکدیگر تعبیه گردند تا اثر لبه بر روی پرتابه توسط حداقل یکی از دو صفحه سوراخ‌دار جلوئی و یا پشتی ایجاد گردد.

- [12] W. Burian, J. Marcisz, L. Starczewski, M. Wnuk (2017) A probabilistic model of optimising perforated high-strength steel sheet assemblies for impact-resistant armour systems, *Problemy Mechatroniki: uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, 8.
- [13] W. Burian, P. Żochowski, M. Gmitrzuk, J. Marcisz, L. Starczewski, B. Juszczuk, M. Magier (2019) Protection effectiveness of perforated plates made of high strength steel, *Int. J. Impact Eng.*, 126: 27-39.
- [14] A. Mubashar, E. Uddin, S. Anwar, N. Arif, S. Waheed Ul Haq, M. Chowdhury (2019) Ballistic response of 12.7 mm armour piercing projectile against perforated armour developed from structural steel, *Proceedings of (IMEchE, Part L: Mater. Des., 233(10): 1993-2005.*
- [15] Y.Y. Émurlaeva, I.A. Bataev, Q. Zhou, D.V. Lazurenko, I.V. Ivanov, P.A. Riabinkina, S. Tanaka, P. Chen (2019) Welding window: comparison of deribas' and wittman's approaches and SPH simulation results, *metals*, 9(12): 1323.
- [16] E.A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards (2011) Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, *Int. J. Impact Eng.*, 38(12) 1022-1032.
- [17] M. Becker (2018) Numerical ricochet model of a 7.62 mm projectile penetrating an armor steel plate “, in: *proceedings 15th International LS-DYNA Conference.*
- [18] B. Gladman, L.-D.K.U.s. Manual, Version 971 (2007) Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, CA.
- [19] M. Buyuk, C.-D.S. Kan, N.E. Bedewi, A. Durmus, S. Ulku (2004) 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.*
- [20] J. Zukas (2004) *Introduction to hydrocodes*, Elsevier.
- [21] D.R. Lesuer, G. Kay, M. LeBlanc (2001) *Modeling large-strain, high-rate deformation in metals*, Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States).
- [22] J. Jung, Y.J. Cho, S.-H. Kim, Y.-S. Lee, H.-J. Kim, C.-Y. Lim, Y.H. Park (2020) Microstructural and mechanical responses of various aluminum alloys to ballistic impacts by armor piercing projectile, *Mater. Charact.*, 159:110033.
- [1] Z. Rosenberg, Y. Ashuach, Y. Yeshurun, E. Dekel (2009) On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets, *Int. J. Impact Eng.*, 36(4) 588-596.
- [2] M. Ravid, Y. Hirschberg (2006) Perforated armor plates, in, *Google Patents.*
- [3] S. Balos, V. Grabulov, L. Sidjanin, M. Pantic, I. Radisavljevic (2010) Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application, *Mater. Des.*, 31(6): 2916-2924.
- [4] S. Balos, I. Radisavljevic, D. Rajnovic, M. Dramicanin, S. Tabakovic, O. Eric-Cekic, L. Sidjanin (2015) Geometry, mechanical and ballistic properties of ADI material perforated plates, *Mater. Des.*, 83: 66-74.
- [5] N. Kilic, Y. Erbil, B. Ekici, A. Erdik, D. Bircan (2011) 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*, pp. 720-726.
- [6] N. Kılıç, S. Bedir, A. Erdik, B. Ekici, A. Taşdemirci, M. Güden (2014) Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62mm armor piercing projectile, *Mater. Des.*, 63: 427-438.
- [7] N. Kılıç, B. Ekici, S. Bedir (2017) Optimization of high hardness perforated steel armor plates using finite element and response surface methods, *Mech. Adv. Mater*, 24(7) 615-624.
- [8] B. Mishra, P.K. Jena, B. Ramakrishna, V. Madhu, T.B. Bhat, N.K. Gupta (2012) Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel, *Int. J. Impact Eng.*, 44 : 17-28.
- [9] B. Mishra, B. Ramakrishna, P.K. Jena, K. Siva Kumar, V. Madhu, N.K. Gupta (2012) Experimental studies on the effect of size and shape of holes on damage and microstructure of high hardness armour steel plates under ballistic impact, *Mater. Des.*, 43: 17-24.
- [10] I. Radisavljevic, S. Balos, M. Nikacevic, L. Sidjanin (2013) Optimization of geometrical characteristics of perforated plates, *Mater. Des.*, 49: 81-89.
- [11] P. Pawlowski, T. Fras (2017) Numerical and experimental investigation of asymmetrical contact between a steel plate and armour-piercing projectiles, in: *11th European Ls-Dyna Conference.*