ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(09):579-590

Experimental Study of the Effect of Different Factors on the Performance of the Gas Gun Device and Numerical Study of the Rupture Pressure Estimate in the Rupture Disk

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Jafari S.[1]
Alavi Nia A.[1*]

How to cite this article
Jafari S., Alavi Nia A., Experimental Study of the Effect of Different Factors on the Performance of the Gas Gun Device and Numerical Study of the Rupture Pressure Estimate in the Rupture Disk Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(09):579-590.

[1] Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

*Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Phone: -
Fax: -
alavi495@basu.ac.ir

Article History
Received: 2022 March, 19
Accepted: 2022 May, 14
ePublished: August 21, 2022

ABSTRACT

In this study, the purpose is to evaluate the effective factors in the increase of projectile velocity in the gas-gun device. At first, the effect of various factors such as the shape and dimensions of the sabot, groove depth and the shape of the Rupture Disk holder, the path of the projectile from the moment of movement to the exit from the tube, and the type of gas used for launching are investigated. In each step of the experiments, a factor is evaluated and its effect on improving the performance of the gas-gun device is investigated. Based on the results of the study of effective factors the velocity of the projectile the shape of the sabot, and the projectile movement path with a 24.12 and 20.81% increase in projectile velocity respectively, the maximum and the type of gas used with 2.99% increase in projectile velocity had the minimum effect on the performance of the gas-gun device. In the second part of the present study, using the finite element method by LS-Dyna, the required pressure and rupture shape of the Rupture Disk in different grooves were investigated and compared with the experimental results. The shape of the rupture and the pressure required to rupture the Rupture Disk from the numerical method are in good agreement with the experimental results.

Keywords Finite Element Method, Gas Gun, Rupture Disk, Sabot, Rupture Pressure.

CITATION LINKS

[1] The mathematical theory of plasticity [2] An Analytical Method for the Design of Scored Rupture Diaphragms for Use in Shock and Gun Tunnels [3] On the plastic bulging of a circular diaphragm by hydrostatic pressure [4] Maximum bursting pressure of rupture disks [5] Chemical and Petroleum Engineering [6] Hydrostatic bulging of a circular aluminium diaphragm [7] Hydrostatic bulging of a circular soft brass diaphragm [8] Finite Element Analysis of Rupture Disc [9] FE simulation of rupture of diaphragm with initiated defect. Mechanics [10] Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air [11] Experimental and finite element modelling of thin sheet hydroforming processes [12] Experimental And Numerical Analysis Of Groove Depth Effect … [13] An integrated re-engineering plan for the manufacturing of aerospace components. Materials & Design [14] Getting the most out of your rupture disc [15] Limit pressure of rupture discs found on tensile instability condition [16] A study on the grooving process of a cross-scored rupture disc [17] Structural analysis on the superficial grooving stainless-steel thin-plate rupture discs [18] Numerical study on explosion performance and influential factors of the metallic rupture discs [19] Experimental study on spontaneous ignition and flame propagation of … [20] Propagation behavior of a self-ignited flame in high-pressure hydrogen flow in a tube [21] Experimental and finite element optimization analysis on hydroforming process of rupture disc [22] Self-ignited flame behavior of high-pressure hydrogen release by rupture disk through a long tube [23] Finite element analysis on the temperature-dependent burst behavior of domed 316L austenitic stainless steel rupture disc [24] Investigating the effect of nonlinear strain path on the mechanical properties of sheet metal to predict burst pressure of composite Rupture disc [25] Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry [26] keyword User's LL. manual.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی آزمایشگاهی اثر عوامل مختلف بر عملکرد دستگاه تفنگ‌گازی و بررسی عددی تخمین فشار پارگی در دیسک فداشونده

سامان جعفری
گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران
علی علوی‌نیا*
گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران

چکیده
هدف این پژوهش، بررسی عوامل موثر بر افزایش سرعت خروجی پرتابه در دستگاه تفنگ گازی می‌باشد. در بخش اول، اثر عوامل مختلف مانند شکل سابوت، ابعاد سابوت، عمق شیار دیسک و هندسه قطعه نگهدارنده دیسک فداشونده، مسیر حرکت پرتابه از لحظه شروع حرکت تا خروج از دهانه لوله و نوع گاز مورد استفاده برای شلیک، بر سرعت خروجی پرتابه مورد بررسی قرار گرفته‌است. در هر مرحله از آزمایش‌ها یک عامل مورد توجه بوده و تاثیر آن در بهبود عملکرد دستگاه تفنگ گازی بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از بررسی عوامل موثر بر سرعت خروجی پرتابه، هندسه جدید سابوت و صاف و بدون انحنا بودن لوله دستگاه (مسیر حرکت پرتابه) به ترتیب، با ۲۴/۱۲ و ۲۰/۸۱ درصد افزایش در سرعت پرتابه بیشترین و نوع گاز مورد استفاده برای شلیک با ۲/۹۹ درصد افزایش در سرعت پرتابه کمترین اثر را در عملکرد دستگاه تفنگ گازی داشتند. در بخش دوم پژوهش حاضر با استفاده از نرم افزار LS-Dyna فشار مورد نیاز و نحوه پارگی دیسک فداشونده در عمق شیارهای مختلف بررسی و با نتایج تجربی مقایسه شدند. شکل پارگی و فشار لازم برای پارگی دیسک فداشونده حاصل از روش عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، تفنگ گازی، دیسک فداشونده، سابوت، فشار پارگی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴
*نویسنده مسئول: alavi495@basu.ac.ir

۱- مقدمه
تفنگ‌های گازی معمولاً نوعی پرتاب‌گر هستند که برای پرتاب گلوله‌هایی با سرعت مشخص مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نوعی از این تفنگ‌ها، گاز پشت یک صفحه فلزی (دیسک فداشونده) متراکم می‌شود و در فشار معینی دیسک دچار پارگی شده و جریان گاز، باعث شلیک پرتابه می‌شود. دیسک فداشونده به عنوان یک شیر با عملکرد سریع، جهت هدایت گاز استفاده می‌شود. در تفنگ‌های گازی از مخزنی که با گازهای مختلف پر می‌شود، استفاده می‌کنند تا به فشارهای نسبتاً بالایی برای ایجاد انرژی برای شلیک پرتابه برسند. در بعضی از تفنگ‌های گازی، در زمان شلیک از دیسک فداشونده (Rupture Disk) استفاده می‌شود تا گاز را از مخزن آزاد کند. فشار گاز در پشت پرتابه باعث شتاب پرتابه و افزایش سرعت آن می‌شود. دیسک فداشونده در صنایع مختلف از جمله صنایع شیمیایي، پتروشیمي، نفت و گاز کاربرد دارد. بسیاری از محققین به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی نحوه پارگی و مقدار فشار لازم جهت پارگی دیسک فداشونده پرداخته‌اند. هیل [1] در تئوری پلاستیسیته، به روش تحلیلی به‌بررسی شرایط ناپایداری در دیسک فداشونده پرداخت. هندرسون [2] نیز به بررسی تجربی و تحلیلی ناپایداری در دیسک‌های فداشونده فولادی پرداخت و بر اساس مشاهدات تجربی، رابطه‌ای تحلیلی جهت پیش‌بینی پارگی در دیسک فداشونده ارائه کرد. وانگ و شماماي [3] به بررسي ناپايداري در ديسک فداشونده فلزي بر اساس دو تئوري مختلف پرداختند. طبق تئوري نمو، کرنش در مرکز ديسک افزايش مي‌يابد تا زماني‌که فشار به مقدار بيشينه خود يعني فشار ناپايداري برسد و سپس کاهش مي‌يابد، در حالي‌که تئوري کرنش کل، نتايج کاملي را در اين راستا ارائه نمي‌دهد. مالاخوف و همکارانش [4] با آزمایش‌های تجربی زیادی، ضرایبی را ارائه دادند که فشار لازم برای پارگی دیسک را پیش‌بینی می‌کند. استپانوف [5] به بررسی اثر ضخامت دیسک بر تکرارپذیری فشار پارگی پرداخت. ایلاهي و همکاران [6-7] به بررسي برآمدگي ديسک فداشونده آلومينيومي و برنجي پرداختند که در آن از روابط موجود در تئوري ناپايداري براي ديسک فداشونده بدون شيار استفاده شده است. آن‌ها همچنين يك روش عددي براي حل روابط حاکم بر تغيير شکل پلاستيك ديسک فداشونده فلزي مدور ارائه دادند. مورتي [8] رفتار ديسک فداشونده را فقط تا حد مقاومت کشش نهايي با روش عددي بررسي کرد اما به شکست آن نپرداخت. ايشان ارتباط بين فشار و تغييرشکل ديسک فداشونده بدون شيار را بررسي کرد. ترتجاکواس و همکارانش [9] به بررسي رفتار قبل و بعد از پارگي ديسک فداشونده مسي مورد استفاده در تونل شاک پرداختند. درايز و همکارانش [10] علت خوداشتعالی هیدروژن پر فشار در یک لوله را بررسی و پیش‌بینی کردند که امواج عرضی هنگام پارگی دیسک فداشونده محدب ایجاد می‌شوند. همچنین، خود اشتعالی توسط یک منطقه با دمای بالا توسط تعامل بین بازتاب امواج عرضی با دیواره جانبی ایجاد خواهد شد. چروات و همکارانش [11] به بررسی اثر فرآیند هیدروفرمینگ در عواملی مانند ضریب اصطکاک و مقدار فشار پارگی دیسک فداشونده پرداختند. خدارحمی و همکارانش [12] به بررسی تجربی فشار مورد نیاز برای پارگی دیسک فداشونده در عمق شیارهای مختلف پرداختند. آن‌ها در این پژوهش رابطه‌ای تحلیلی نیز بر اساس داده‌های تجربی برای محدوده مشخصی از عمق شیار ارائه دادند. جاویدراد و رحمتي [13] پارگي ديافراگم بدون شيار مورد استفاده در کپسول اطفاء حريق موتور جت را به روش تجربي و عددي بررسي کردند. میلر[14] به بررسی راه‌حل‌های واقعی و پیشگیرانه که می‌تواند عملکرد پارگی دیسک فداشونده را بهبود بخشد و فشار پارگی را تثبیت کند، پرداخت. گائو و همکارانش [15] با در نظر گرفتن عواملی چون برآمدگی و ناپایداری، فرمولی برای پیش‌بینی مقدار فشار پارگی دیسک فداشونده ارائه دادند. جیونگ و همکارانش[16-17] به کمک روش عددی به طراحی دیسک‌های فداشونده بر اساس نتایج گسیختگی آن‌ها پرداختند.

یان [18] به ارزیابی عددی تأثیر شکل و طول گسیختگی بر روی مقدار فشار پارگی دیسک فداشونده پرداخت. داون و همکارانش [19] به پیش‌بینی رفتار جریان گاز داخل لوله با استفاده از سنسور فشار یا سنسور لومینسانس نصب شده در لوله پرداختند. آندو و همکارانش [20] به بررسی رابطه بین جریان در لوله که توسط سنسورهای فشار و لومینسانس نصب شده در لوله پیش‌بینی خواهد شد و رفتار شوک در خارج از لوله پرداختند. شیان وی کانگ [21] به بررسی تجربی و عددی فرآیند هیدروفرمینگ در ساخت دیسک فداشونده پرداخت. در دیسک‌های فداشونده مقدار جابجایی مرکز دیسک با افزایش فشار، افزایش می‌یابد. این اثر می‌تواند منجر به کاهش ضخامت ورق و پارگی دیسک قبل از رسیدن به فشار از پیش تعیین شده گردد. با تغییر وضعیت روانکاری سطح تماس و کاهش اصطکاک، نسبت نازک شدن دیسک کاهش یافته و جابجایی مرکز دیسک نیز افزایش پیدا می‌کند. ماکوتو و همکارانش [22] به بررسی کنترل خود اشتعالی هیدروژن توسط دیسک‌های فداشونده پرداختند. همچنین، فرایند خوداشتعالی در حین تخلیه هیدروژن با فشارهای بالا در لوله با طول‌های مختلف بررسی شد. ژو و همکارانش [23] تأثیر دما بر فشار پارگی راپچر دیسک‌های ساخته شده از فولاد ۳۱٦L را بررسی کردند.

آن‌ها نشان دادند که با افزایش دما از ۳۰۰ کلوین به ۵۷۳ کلوین، فشار پارگی از ٦/۸۸ مگاپاسکال به ۵/۲٤ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. محبی و همکارانش [24] به بررسی اثر مسیر کرنش غیرخطی بر روي خواص مکانیکی ورق فلزي به منظور پیش بینی فشار پارگی دیسک فداشونده کامپوزیتی پرداختند. در پژوهش آنها مشاهده شد که هرچه کرنش ناشی از تنش دو محوري در ورق بیشتر می‌شود، فشار بیشتري در زمان پارگی تحت کشش تک محوري تحمل می‌کند (به مقدار ٦٤ درصد). همچنین با استفاده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازي، برابري میزان کرنش ناشی از تنش دو محوره در نسبت ارتفاع به قطر شکل دهی ($\frac{h}{d}$) یکسان، اثبات شد.

تاکنون تاثیر عوامل مختلف بر مقدار سرعت خروجی پرتابه در دستگاه تفنگ گازی بررسی نشده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی عواملی از جمله هندسه و ابعاد سابوت، عمق شیار دیسک فداشونده، مسیر حرکت پرتابه از لحظه شروع حرکت تا خروج از دهانه لوله، نوع گاز مورد استفاده برای شلیک و شکل نگهدارنده دیسک فداشونده (مسیر تخلیه‌ی فشار گاز به پشت پرتابه) بر سرعت خروجی پرتابه در دستگاه تفنگ گازی می‌باشد. این عوامل به صورت تجربی توسط دستگاه تفنگ گازی موجود در آزمایشگاه رفتار مکانیکی مواد دانشگاه بوعلی‌سینا ارزیابی و با استفاده از روش عددی نیز، فشار لازم برای پارگی دیسک فداشونده آلومینیومی با عمق شیارهای مختلف، بررسی شده است.

۲- آزمایش‌ها

۲-۱- دستگاه آزمایش

در تفنگ‌های گازی از مخزنی که با گازهای مختلف تا فشارهای نسبتاً بالایی پر می‌شود، برای ایجاد انرژی جهت حرکت پرتابه استفاده می‌شود. در برخی تفنگ‌های گازی از یک دیسک فداشونده استفاده می‌شود تادر زمان بسیار کوتاهی گاز را از مخزن به پشت پرتابه آزاد کند. بعد از باز کردن شیر کپسول، گاز کم کم پشت دیسک فداشونده نگهداری و متراکم خواهد شد تا در فشار خاصی دیسک فداشونده پاره شده و گاز به پشت پرتابه هدایت شود و پس از خروج پرتابه از دهانه لوله سرعت‌سنج‌ها سرعت پرتابه را ثبت می‌کنند. طول لوله پرتاب‌گر دستگاه مورد استفاده در این پژوهش ۵ متر و قطر داخلی آن ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۱ دستگاه تفنگ گازی مورد بررسی نشان داده شده است.

۲-۱-۱-بررسی عملکرد سرعت‌سنج‌ها

برای افزایش دقت در اندازه‌گیری سرعت خروجی پرتابه، از دو سرعت‌سنج از نوع کرونی استفاده می‌شود. جهت افزایش دقت در ثبت سرعت، از دو سرعت‌سنج که یکی از آن‌ها سرعت را بر حسب متر بر ثانیه و دیگری بر حسب فوت بر ثانیه اندازه می‌گیرد، استفاده شده است.

لازم است صحت عملکرد هر دو سرعت‌سنج ارزیابی گردد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، با آزمایش و بررسی سرعت‌سنج‌ها در شرایط یکسان، مشخص شد سرعت ثبت شده در سرعت‌سنج فوت بر ثانیه در مقایسه با متر بر ثانیه به طور میانگین ۵/۵ متر بر ثانیه اختلاف دارد. برای کاهش اختلاف، میانگین سرعت‌های اندازه‌گیری شده، ثبت شده است.

۲-۲- آزمون کوانتومتری و آزمایش کشش

برای تعیین ترکیب شیمیایی ورق آلومینیومی مورد استفاده برای دیسک فداشونده، آزمون کوانتومتری بر اساس استاندارد ASTM E۱۲۵۱ [25] انجام شد. با توجه به ترکیب شیمیایی به‌دست آمده، آلیاژ مورد استفاده در دیسک فداشونده با استاندارد آمریکایی AA۱۰۵۰ مطابقت دارد. این آزمایش توسط مرکز پژوهش متالورژی رازی انجام شده است. جهت استخراج خصوصیات

شکل ۱) دستگاه تفنگ‌گازی با کالیبر ۲۵ میلی‌متر

جدول ۱) بررسی عملکرد سرعت سنج‌های اینجی و متریک

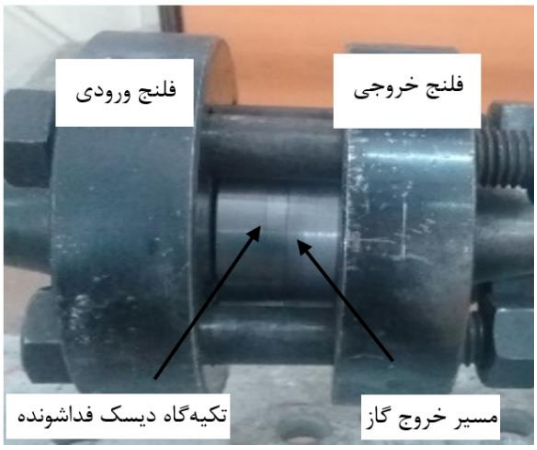
	فوت بر ثانیه	متر بر ثانیه
سرعت ثبت شده	معادل ۴۲۷/۳۲ متر بر ثانیه	
سرعت ثبت شده	معادل ۲۵۷/۳۷ متر بر ثانیه	
نحوه قرارگیری سرعت سنج‌ها		

مکانیکی دیسک فداشونده آزمایش کشش شبه-استاتیکی بر اساس استاندارد ASTM E8M و به وسیله دستگاه سنتام واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشگاه بوعلی‌سینا با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. داده‌های خروجی از دستگاه سنتام به صورت نیرو-جابجایی می‌باشد، لذا داده‌های استخراج شده وارد نرم افزار اکسل شده و به تنش-کرنش حقیقی تبدیل شدند. تنش تسلیم و تنش نهایی دیسک فداشونده به ترتیب، ۱۰۹/۶۵ و ۱۸۱/۶۵ مگاپاسکال، مدول یانگ ۶۹/۳۹ گیگاپاسکال، کرنش شکست ۰/۱۱۵۷ و چگالی آن ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

۲-۳- بررسی تاثیر عوامل مختلف بر سرعت پرتابه

در این بخش به بررسی اثر عوامل مختلف از جمله شکل سابوت، ابعاد سابوت، عمق شیار دیسک فداشونده، مسیر حرکت پرتابه از لحظه شروع حرکت تا خروج از دهانه لوله، نوع گاز مورد استفاده برای شلیک و شکل نگهدارنده دیسک فداشونده بر سرعت پرتابه پرداخته شده است. فشاری که باعث پارگی دیسک فداشونده و تخلیه گاز می‌شود به ضخامت ورق، جنس ورق و عمق شیار بستگی دارد. شیار ایجاد شده موجب تمرکز تنش، پارگی دیسک و هدایت گاز به پشت پرتابه می‌شود. مطابق شکل ۲ گاز از مخزن وارد فلنج ورودی می‌شود و پشت دیسک فداشونده نگهداری می‌شود. سپس، در فشار معینی دیسک فداشونده پاره شده وگاز وارد فلنج خروجی می‌شود. بعد از فلنج خروجی، پرتابه که داخل لوله پرتاب‌گر قرار گرفته توسط گاز تخلیه شده شلیک خواهد شد. قطر داخلی فلنج‌های ورودی و خروجی ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. برای نگهداری دیسک فداشونده از دو قطعه فولادی استفاده شده است. قطعه اولیه تکیه‌گاه دیسک فداشونده است که دیسک فداشونده داخل آن قرار می‌گیرد و گاز پشت آن متراکم می‌شود و قطعه‌ی دیگر مسیر خروج گاز به پشت پرتابه را تامین می‌کند. دیسک فداشونده بین این دو قطعه قرار می‌گیرد.

مسیر خروج گاز بعد از پاره شدن دیسک فداشونده، می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد. در مسیر منحنی، مستقیم و پله‌ای زمانی که گاز بعد از پاره شدن دیسک فداشونده خالی می‌شود ممکن است مقداری از انرژی آن با برخورد به دیواره مسیر خروج



شکل ۲) فلنج‌های ورودی، خروجی و مجموعه نگهدارنده دیسک فداشونده

گاز، تلف شود. با توجه به اینکه در مسیر شیب‌دار، مانعی در امتداد عمود بر مسیر خروج گاز وجود ندارد که باعث برخورد و اتلاف انرژی گاز تخلیه شده شود، لذا مسیر شیب‌دار جهت خروج گاز از مخزن به پشت پرتابه انتخاب شده است. در بررسی اولیه مسیر خروج گاز دارای شیب ۳۰ درجه و طول ۱۱/٦٥ میلی‌متر بوده است. پرتابه در فاصله حدودا ۱۵۰ میلی‌متری از دیسک قرار دارد. بعد از پارگی دیسک، گاز فشرده وارد مسیر خروج گاز خواهد شد و بعد از آن بلافاصله به پشت گلوله هدایت می‌شود. پرتابه‌های فولادی سرتخت مورد استفاده در تمام این آزمایش‌ها از گروه آلیاژی ٤٣٤٠ بوده که دارای قطر ۷/٦۲، طول ۲۵/٤ میلی‌متر و جرم ۸/٦ گرم می‌باشد.

۲-۳-۱- اثر مسیر حرکت پرتابه

اولین آزمایش با دیسک فداشونده از جنس آلومینیوم آلیاژی ۱۰۵۰ با عمق شیار ۰/٦ میلی‌متری انجام شد. قطر همه دیسک‌های فداشونده ۷۰ و ضخامت آن‌ها ۲ میلی‌متر است. این دیسک فداشونده در فشار ۵۰ بار دچار پارگی شده و گاز تخلیه شده در این فشار باعث می‌شود سرعت پرتابه به۲٤۰ متر بر ثانیه برسد. جهت اطمینان از سرعت ثبت شده در این حالت، عمق شیارهای دیگری نیز بررسی شد و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که کاهش عمق شیار، موجب افزایش فشار لازم برای پارگی دیسک فداشونده شده و با افزایش فشار، سرعت پرتابه بیشتر می‌شود. با افزایش فشار به مقدار ۲۰ بار، سرعت پرتابه به طور میانگین ۸/۷۵ درصد افزایش پیدا کرد. از عوامل موثر دیگر در سرعت پرتابه، مسیر حرکت پرتابه است. با مرور زمان و یا بعد از شلیک‌های متوالی، لوله پرتاب‌گر ممکن است دچار زنگ‌زدگی، جمع شدن گرد و غبار و پلیسه‌های سابوت شود. لذا این موارد می‌تواند باعث کاهش سرعت پرتابه گردد و باید داخل لوله پاکسازی شود. جهت اطمینان از یکنواخت بودن قطر داخل لوله در کل مسیر، از میله‌ای فولادی و سخت به قطر ۲٤/۹۲ میلی‌متر و طول ٤۰۰ میلی‌متر استفاده شده است.

عامل بعدی که می‌تواند در مقدار سرعت خروجی موثر باشد یکسان بودن ارتفاع لوله (کاملا افقی بودن) در طول مسیر می‌باشد. ارتفاع مرکز لوله فلنج خروجی به عنوان نقطه مبنا در نظر گرفته شده و ادامه‌ی طول لوله به نسبت این نقطه تراز شد. بعد از این تغییرات، شلیک‌های دیگری با فشارهای مختلف انجام شده و نتایج در جدول ۲ گزارش شده است.

۲-۳-۲-اثر افزایش شیب مسیر خروج گاز

با توجه به شکل پارگی دیسک فداشونده در جدول ۲ مشاهده شد با افزایش فشار، دیسک فداشونده به دیواره شیب‌دار مسیر خروج

جدول ۲) سرعت خروجی پرتابه قبل و بعد از اصلاح مسیر حرکت (فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

قبل از اصلاح مسیر حرکت پرتابه		۷۰ فشار ۰/۴ عمق شیار دیسک فداشونده ۲۵۴ سرعت خروجی		۵۰ فشار ۰/۶ عمق شیار دیسک فداشونده ۲۴۰ سرعت خروجی
		۷۵ فشار ۰/۴ عمق شیار دیسک فداشونده ۲۷۹ سرعت خروجی		۷۰ فشار ۰/۴ عمق شیار دیسک فداشونده ۲۶۵ سرعت خروجی
بعد از اصلاح مسیر حرکت پرتابه		۷۰ فشار ۰/۵ عمق شیار دیسک فداشونده ۳۲۲ سرعت خروجی		۵۰ فشار ۰/۶ عمق شیار دیسک فداشونده ۲۸۹ سرعت خروجی
		۷۵ فشار ۰/۴ عمق شیار دیسک فداشونده ۳۳۱ سرعت خروجی		۵۵ فشار ۰/۶ عمق شیار دیسک فداشونده ۳۰۳ سرعت خروجی

گاز برخورد کرده و این دیواره مانع بازشدن بیشتر دهانه دیسک فداشونده می‌گردد. این پدیده باعث می‌شود که زمان تخلیه گاز به پشت پرتابه طولانی تر شود. تا این مرحله از بررسی‌ها مقدار شیب مسیر تخلیه گاز ۳۰ درجه بوده است. در این بخش، مقدار این زاویه ۱۵درجه افزایش یافته تا تاثیر باز شدگی بیشتر در دیسک فداشونده مشخص شود. طول مخروط ناقص همان ۱۱/٦٥ میلی‌متر می‌باشد. در جدول ۳ اثر این تغییرات بر سرعت پرتابه ارائه شده است.

۲-۳-۳-تاثیر افزایش شیب و طول مسیر خروج گاز

با توجه به اینکه در بررسی قبلی با اندکی تغییر در زاویه به طور میانگین سرعت ۱۹/۱٦ متربرثانیه افزایش داشت، در مرحله بعد مسیر جدیدی برای خروج گاز طراحی و اثرات آن بر سرعت بررسی شد. این نگهدارنده به گونه‌ای طراحی شده است که اجازه بدهد بدون هیچ مانعی دیسک دچار کشیدگی شود و مقدار بازشدگی نیز به حداکثر مقدار خود برسد. مقدار شیب جدید ۷۰/٤۸ درجه و طول مخروط ناقص نیز ٤٤/۸۳ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که باید حتما از نظر عدم نشتی فشار گاز در مجموعه نگهدارنده دیسک فداشونده اطمینان حاصل کرد. با توجه به اینکه تغییرات مرحله‌ای اعمال شده، جهت مشاهده دقیق نتیجه تغییرات لازم است در هر آزمون، نشتی بررسی و از عدم نشتی اطمینان حاصل گردد. در جدول ٤ تاثیر این تغییرات بر سرعت ارائه شده است.

۲-۳-۴- تاثیر هندسه سابوت

تا اینجا موثرترین عامل بر افزایش سرعت پرتابه، مسیر حرکت پرتابه بود که موجب افزایش ۲۰/۸ درصدی سرعت پرتابه شد. از سابوت که از جنس تفلون می‌باشد به عنوان رابط بین پرتابه و لوله پرتاب‌گر استفاده می‌شود. سابوت‌ها تا این بخش از آزمایش‌ها،

جدول ۳) سرعت خروجی پرتابه برای مسیرخروج گاز با شیب ٤٥ درجه و طول ۱۱/٦٥ میلی‌متر(فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

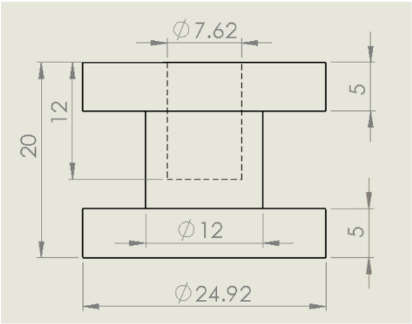
	۷۵	فشار		۵۰	فشار
	۰/۴	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۶	عمق شیار دیسک فداشونده
	۳۴۹	سرعت خروجی		۳۰۱	سرعت خروجی
	۷۵	فشار		۷۰	فشار
	۰/۴	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۵	عمق شیار دیسک فداشونده
	۳۶۶	سرعت خروجی		۳۴۱	سرعت خروجی

جدول ۴) تاثیر افزایش شیب و طول مسیر خروج گاز (فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

	۷۵	فشار		۵۵	فشار
	۰/۴	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۶	عمق شیار دیسک فداشونده
	۳۹۹	سرعت خروجی		۳۴۴	سرعت خروجی
	۷۵	فشار		۷۰	فشار
	۰/۴	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۵	عمق شیار دیسک فداشونده
	۴۰۳	سرعت خروجی		۳۸۶	سرعت خروجی

دارای شکل استوانه‌ای با قطر خارجی ۲۴/۹۲ و طول ۲۰ میلی‌متر بودند. با توجه به این‌که سطح استوانه‌ای بیشترین اصطکاک را با مسیر حرکت پرتابه دارد لذا طرح جدیدی برای سابوت در نظر گرفته شد که مقدار اصطکاک را کاهش دهد. هندسه و ابعاد سابوت در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل پارگی در برخی از دیسک‌های فداشونده نشان داده شده در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در بعضی از دیسک‌های فداشونده پارگی به صورت متقارن اتفاق نمی‌افتد.

با توجه به اینکه دیسک فداشونده بین دو نگهدارنده تحت نیروی زیادی قرار گرفته و فشرده می‌شود، در جاهایی که فشار بیشتر شده و عمق شیار نیز کم است دیسک فداشونده به طور همزمان همراه با پارگی در شیار، در محیط تماسش با نگهدارنده نیز دچار پارگی خواهد شد. همچنین، دلیل دیگر این پدیده یکسان بودن عمق شیار در تمام نقاط می‌باشد، اگر در جایی از شیار مقدار ضخامت به مقدار بسیار کمی، بیشتر از دیگر نقاط باشد، ممکن است پارگی متقارن اتفاق نیافتد. تا مرحله قبل شکل سابوت استوانه‌ای و جرم آن ۵/۶ گرم بوده است که در این بخش با توجه به تغییر شکل سابوت جرم آن به ۴/۵۲ گرم رسیده است.



شکل ۳) هندسه و ابعاد سابوت (به میلی‌متر)

جدول ۵) اثر شکل سابوت بر سرعت پرتابه (فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

	۸۵	فشار		۵۵	فشار
	۰/۳	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۶	عمق شیار دیسک فداشونده
	۴۵۲	سرعت خروجی		۴۲۵	سرعت خروجی
	۱۰۵	فشار		۹۰	فشار
	۰/۱	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۲	عمق شیار دیسک فداشونده
	۴۹۸	سرعت خروجی		۴۶۸	سرعت خروجی

جدول ۶) بررسی تاثیر ابعاد شکل سابوت بر سرعت خروجی (فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

	۸۰	فشار		۵۰	فشار
	۰/۳	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۶	عمق شیار دیسک فداشونده
	۴۸۵	سرعت خروجی		۳۹۵	سرعت خروجی
	۱۰۰	فشار		۹۰	فشار
	۰/۱	عمق شیار دیسک فداشونده		۰/۲	عمق شیار دیسک فداشونده
	۵۱۷	سرعت خروجی		۵۰۱	سرعت خروجی

۲-۳-۵-تاثیر ابعاد سابوت

در مرحله قبل مشاهده شد که با تغییر هندسه سابوت و کاهش اصطکاک سرعت به مقدار زیادی افزایش داشته است. لذا ضخامت بال آن از ۵ به ۳ میلی‌متر کاهش داده شده و مجددا نتایج بررسی می‌گردد. جهت کاهش اصطکاک، بال سابوتی که در معرض ضربه اولیه می‌باشد ۳ و بال بعدی ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در جدول ٦ اثر این تغییرات نشان داده شده است. در مرحله قبل جرم سابوت ٤/٥٢ گرم بوده است که در این بخش با توجه به کاهش ابعاد بال آن جرم به ٤/٢١ گرم رسیده است.

۲-۳-۶- بررسی نوع گاز مورد استفاده

در این بخش اثر نوع گاز بر سرعت پرتابه بررسی شده اســـت. در آزمون‌های قبلی از هوا استفاده شد. در این بخش از نیتروژن به دلیل جرم کمتر نسبت به هوا و ارزان بودن آن نسبت به گازهای دیگری مانند هلیوم، استفاده شده و نتایج در جدول ۷ گزارش شده است.

۳- شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ال‌اس‌داینا (LS-Dyna) [26] فشار مورد نیاز جهت پارگی دیسک فداشونده در عمق شیارهای مختلف بررسی شده است.

۳-۱- بررسی عددی فشار پارگی در دیسک فداشونده با عمق شیارهای مختلف

قطر و ضخامت همه دیسک‌ها به ترتیب، ۷۰ و ۲ میلی‌متر می‌باشد و دو شیار عمود بر هم با عمق‌های مختلف ۰/۱ تا ۰/٦ میلي‌متر در يك سمت آن ایجاد شده است. براي مدل‌سازي دیسک فداشونده، از اجزای سه‌بعدی (Solid) استفاده شده است. با شبیه‌سازی و بررسی تاثیر اندازه اجزا بر فشار پارگی دیسک فداشونده، اندازه اجزا در مرکز دیسک فداشونده ۰/۵×۰/۵ و در راستای ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که در مدل واقعی ۷/۵ میلی‌متر از قطر ورق کاملا گیردار می‌باشد در شبیه‌سازی نیز، این مقدار کاملا مقید شده و جابجایی و دوران آن در راستاهای مختلف صفر در نظر گرفته شده است. براي اعمال فشار بر روي دیسک فداشونده در نرم افزار از بخش Define-Curve مشابه آزمایش‌هاي تجربي، فشار به صورت خطي از مقدار صفر تا مقدار ۱۲۰ بار به تدریج اعمال شد. برای اعمال فشار از مسیر Load-Segment-Set در نرم افزار استفاده شده است. برای تعریف خواص مکانیکی دیسک فداشونده، از مدل مادي شماره ۲٤ (MAT_Piecewise_Linear_Plasticity) استفاده شده است. این مدل معرف يك رفتار الاستيك- پلاستيك تكه‌اي خطي با قابليت اعمال منحني تنش-كرنش دلخواه است. بر اساس نتایج آزمایش کشش ورق مورد استفاده برای دیسک فداشونده (بخش ۲-۲)، تنش تسلیم و تنش نهایی دیسک فداشونده به ترتیب، ۱۰۹/٦٥ و ۱۸۱/٦٥ مگاپاسکال، مدول یانگ ٦٩/٣٩ گیگاپاسکال، کرنش شکست ۰/۱۱۵۷ و چگالی آن ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج روش عددی

در این بخش تاثیر عمق شیار دیسک فداشونده بر فشارپارگی به صورت عددی بررسی شده است. در آزمایش‌هاي تجربي مشاهده شد، گاز از کپسول به تدریج وارد مخزن شده (پشت دیسک فداشونده متراکم خواهد شد) و افزایش فشار تا لحظه پارگي دیسک فداشونده ادامه دارد و در لحظه‌ی پارگی، گاز تخلیه شده و در زمان بسیار کوتاهی فشار به مقدار بسیار زیادی افت خواهد کرد. جهت پیدا کردن فشار پارگی دیسک فداشونده، اجزایی که پارگی دیسک فداشونده از آنجا شروع خواهد شد مشخص کرده و نمودار فشار برای آن اجزا استخراج خواهد شد. در شکل‌های ٤ و ٥ به

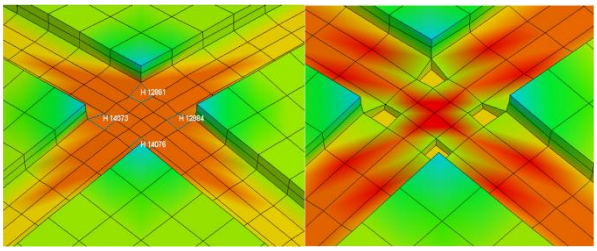
جدول ۷) اثر نوع گاز در سرعت خروجی (فشار، سرعت و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار، متربرثانیه و میلی‌متر)

	فشار ۷۰ عمق شیار دیسک فداشونده ۰/۴ سرعت خروجی ۴۵۶		فشار ۷۰ عمق شیار دیسک فداشونده ۰/۴ سرعت خروجی ۴۶۵
	فشار ۱۱۰ عمق شیار دیسک فداشونده ۰/۱ سرعت خروجی ۵۳۱		فشار ۹۰ عمق شیار دیسک فداشونده ۰/۲ سرعت خروجی ۵۱۶

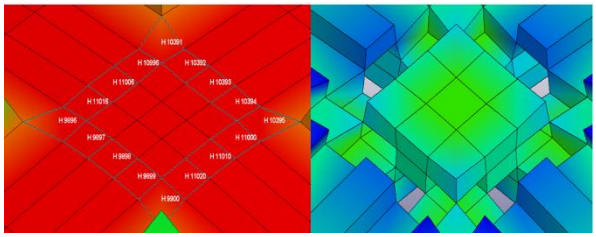
ترتیب، محدوده‌ی شروع پارگی و نمودار فشار اولین اجزای حذف شده برای دیسک فداشونده با عمق شیار ۰/۵ میلی‌متر نشان داده شده است. از این نمودارها هر کدام که در زمان کمتری فشار آن به صفر رسیده است را به عنوان نمودار فشار اولین اجزا حذف شده در نظر گرفته و سپس حداکثر فشار آن نمودار به عنوان فشار پارگی لحاظ می‌گردد. همان‌طور که در شکل ٦ دیده می‌شود چهار جزء به طور همزمان تخریب شده‌اند. نمودار هر چهار جزء کاملا روی همدیگر منطبق بوده و مشخص است که در زمان کمتری نسبت به دیگر اجزا تخریب شده‌اند. لذا این نمودار به عنوان نمودار فشار پارگی برای شیار با عمق ۰/۵ میلیمتر و فشار حداکثر که ٦٤/٦٩٤ بار است به عنوان فشار پارگی در نظر گرفته شد.

در شکل های ٦ و ۷ به ترتیب، محدوده شروع پارگی و نمودار فشار اولین اجزای حذف شده برای دیسک فداشونده با عمق شیار ۰/٤ میلی‌متر نشان داده شده است. نمودار اجزایی که در زمان کمتری به فشار صفر رسیده‌اند به عنوان نمودار فشار پارگی و فشار حداکثر که ٧٦/٣٥١ بار است به عنوان فشار پارگی در نظر گرفته شد.

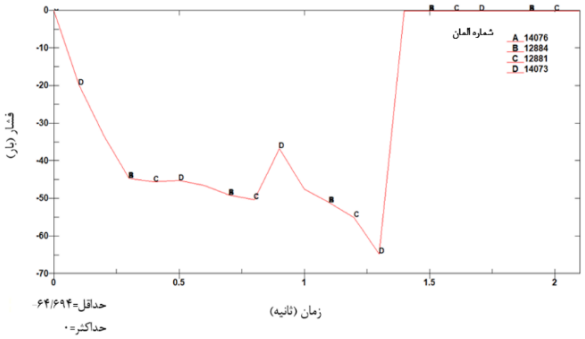
در شکل ۸ نمودار پارگی دیسک فداشونده با عمق شیارهای مختلف نشان داده شده است. در جدول ۸ نیز مقدار فشار مورد نیاز جهت پارگی دیسک فداشونده با ضخامت‌های مختلف در روش عددی و آزمایشگاهی نشان ارائه شده است. همان‌طور که در شکل تخریب دیسک فداشونده در روش آزمایشگاهی مشاهده شد، در عمق شیارهای کم (فشارهای بالا)، ممکن است تخریب تنها در مرکز اتفاق نیافتد و در جایی که دیسک فداشونده مقید شده است نیز نمونه دچار تخریب شود. در عمق شیارهای بیشتر از ۰/۳ در روش



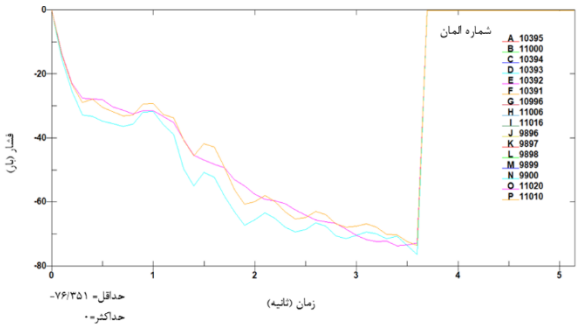
شکل ۴) محدوده شروع پارگی دیسک فداشونده با عمق شیار ۰/۵ میلی‌متر



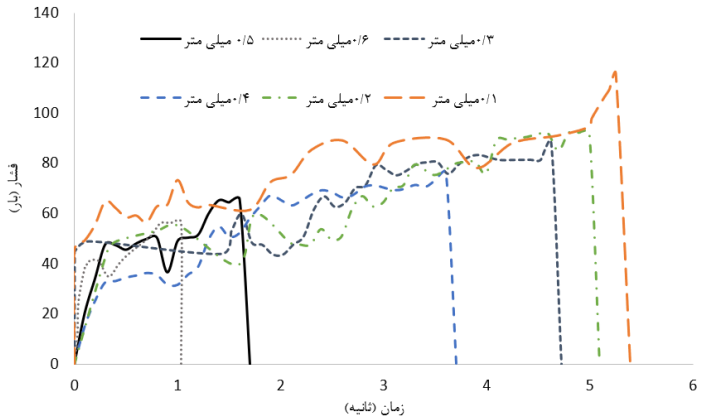
شکل ۶) محدوده شروع پارگی دیسک فداشونده با عمق شیار ۰/٤ میلی‌متر



شکل ۵) نمودار فشار-زمان برای شروع پارگی دیسک فداشونده در عمق شیار ۰/۵میلی‌متر



شکل ۷) نمودار فشار-زمان برای شروع پارگی دیسک فداشونده در عمق شیار ۰/٤ میلی‌متر



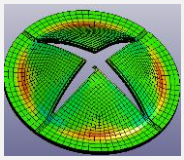
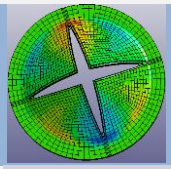
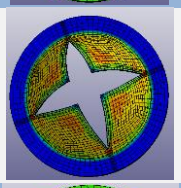
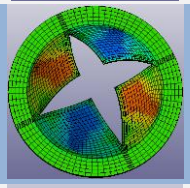
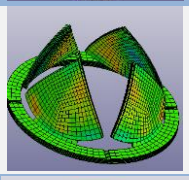
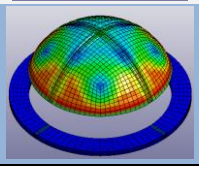
شکل ۸) نمودار فشار-زمان برای دیسک فداشونده با عمق شیارهای مختلف.

تجربی و عددی مشاهده می‌شود که تخریب در مرکز نمونه‌ها اتفاق خواهد افتاد. این پدیده در روش عددی نیز مطابق جدول ۸ قابل مشاهده است. با کاهش عمق شیار به مقدار ۰/۱ میلی‌متر در روش عددی، تخریب در مرکز اتفاق نمی‌افتد و اولین اجزا در مکان مقید شده دچار تخریب می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر عوامل مختلف از جمله شکل سابوت، ابعاد سابوت، عمق شیار دیسک فداشونده، مسیر حرکت پرتابه از لحظه شروع حرکت تا خروج از دهانه لوله، نوع گاز مورد استفاده برای شلیک و شکل نگهدارنده دیسک فداشونده مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله سرعت پرتابه نسبت به سرعت مرحله قبل از آن مقایسه شد. همچنین، در هر مرحله تاثیر افزایش فشار به مقدار ۲۰ بار (به طور مثال، مقایسه سرعت خروجی در ۵۰ و ۷۰ بار) در سرعت خروجی پرتابه ارزیابی شد. مشاهده شد بعد از اصلاح مسیر حرکت پرتابه، سرعت پرتابه نسبت به قبل از اصلاح مسیر حرکت پرتابه، به طور میانگین ۲۰/۸ درصد افزایش پیدا کرد و همچنین با افزایش فشار به مقدار ۲۰ بار، سرعت خروجی پرتابه ۱۰/۳ درصد افزایش داشت. تغییر زاویه شیب مسیر خروج گاز (از ۳۰ به ٤٥ درجه) موجب شد سرعت پرتابه ٦/٠٤ درصد افزایش پیدا کند. همچنین، با افزایش فشار ۲۰ بار، سرعت ۱۳/۲۸درصد افزایش پیدا کرد. تغییر طراحی (طول و زاویه مخروط ناقص) مسیر خروج گاز پس از پارگی دیسک موجب افزایش ۱۲/۱٦ درصدی سرعت گردید. در این حالت، با افزایش فشار ۲۰ بار، سرعت ١٦/٥٦ درصد افزایش داشت. در مرحله بعد با اصلاح شکل سابوت، سرعت ٢٤/١٢ درصد افزایش پیدا کرد. با افزایش فشار ۲۰ بار در این بررسی، سرعت ۱۰/۱۷ درصد بیشتر شد. با تغییر در ابعاد سابوت، سرعت ۷/۰۵ درصد بهبود یافت. با افزایش فشار ۲۰ بار نیز، سرعت ٦/٥٩ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین با تغییر نوع گاز از هوا به نیتروژن سرعت ۲/۹۹

جدول ۸) مقایسه فشار و شکل تخریب برای دیسک‌های فداشونده مختلف در روش عددی و تجربی (فشار و عمق شیار به ترتیب، بر حسب بار و میلی‌متر)

شکل پارگی (عددی)	شکل پارگی (تجربی)	اختلاف (درصد)	فشار پارگی (شبیه‌سازی)	فشار پارگی (تجربی)	عمق شیار
		۸/۱۹	۵۶/۸	۵۰-۵۵	۰/۶
		۴/۱۴	۶۴/۷	۶۵-۷۰	۰/۵
		۵/۹۳	۷۶/۳	۷۵-۷۰	۰/۴
		۷/۱۵	۸۸/۴	۸۰-۸۵	۰/۳
		۰/۳۲	۹۲/۲	۹۰-۹۵	۰/۲
		۸/۲۸	۱۱۳/۷	۱۰۰-۱۱۰	۰/۱

درصد بیشتر شد. در این حالت نیز، با افزایش فشار ۲۰ بار، سرعت به طور میانگین ۱۲/۱۷ درصد افزایش داشت. در بخش دوم این پژوهش با استفاده از روش عددی مقدار فشار پارگی دیسک فداشونده در عمق شیارهای مختلف بررسی شد، نتایج شبیه‌سازی با تجربی مطابقت قابل قبولی داشت. بر این اساس می‌توان از این الگوی شبیه‌سازی برای ضخامت‌های دیگر، مواد دیگر و همچنین عمق شیارهای دیگر برای تخمین فشار پارگی استفاده کرد.

تشکروقدردانی: نویسندگان مقاله، از جناب آقای اشکان قربانی کارشناس آزمایشگاه رفتار مکانیکی مواد دانشگاه بوعلی‌سینا برای همکاری در انجام آزمون‌های بالستیک تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری چاپ نشده است. محتوای مقاله حاصل فعالیت‌های علمی خود نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها می‌باشد.

تعارض منافع: این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی وحقوقی ندارد.

منابع مالی: منابع مالی از پژوهانه دانشگاه تامین شده است.

منابع

1- Hill R. The mathematical theory of plasticity. Oxford university press; 1998.
2- Henderson RW. An Analytical Method for the Design of Scored Rupture Diaphragms for Use in Shock and Gun Tunnels. JOHNS HOPKINS UNIV LAUREL MD APPLIED PHYSICS LAB; 1967.
3- Wang NM, Shammamy MR. On the plastic bulging of a circular diaphragm by hydrostatic pressure. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1969 (1):43-61.
4- Malakhov NN, Kosolapov AI, Ol'khovskii NE, Zinin VY, Shelyuk IP. Maximum bursting pressure of rupture disks. Chemical and Petroleum Engineering. 1970 (12):1048-50.
5- Stepanov AP. Rupture disks. Chemical and Petroleum Engineering. 1976 (4):386-7.
6- Ilahi MF, Parmar A, Mellor PB. Hydrostatic bulging of a circular aluminium diaphragm. International Journal of Mechanical Sciences. 1981 Jan 1;23(4):221-7.
7- Ilahi MF, Paul TK. Hydrostatic bulging of a circular soft brass diaphragm. International journal of mechanical sciences. 1985 Jan 1;27(5):275-80.
8- Murty DV. Finite Element Analysis of Rupture Disc. Scientist EL, Design and Engineering Division Indian Institute of Chemical Technology, India, Tarnaka. 2006.
9- Tretjakovas J, Kačianauskas R, Šimkevičius Č. FE simulation of rupture of diaphragm with initiated defect. Mechanics. 2006;62(6):5-10.
10- Dryer FL, Chaos M, Zhao Z, Stein JN, Alpert JY, Homer CJ. Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air. Combustion science and technology. 2007;179(4):663-94.
11- Cherouat A, Ayadi M, Mezghani N, Slimani F. Experimental and finite element modelling of thin sheet hydroforming processes. International Journal of Material Forming. 2008;1(1):313-6.
12- خدارحمي حسين, واحدي خداداد, لطفي حسين. تحليل تجربي و عددي اثر عمق شيار و تخمين فشار پارگي در ديافراگم هاي صفحه ۸۵ تا دوره ۸، شماره ۱، مکانيك هوا فضا، ۱۳۹۱،پاره شونده. ۹۸.
13- Javidrad F, Rahmati R. An integrated re-engineering plan for the manufacturing of aerospace components. Materials & Design. 2009;30(5):1524-32.
14- Miller D. Getting the most out of your rupture disc. Chemical Engineering. 2009;116(3):45.
15- Gao GF, Wang GD, Ding XW, Chen JJ. Limit pressure of rupture discs found on tensile instability condition. InAdvanced Materials Research 2010 (Vol. 97, pp. 296-300). Trans Tech Publications Ltd.
16- Jeong JY, Lee J, Yeom S, Choi W, Kim TG, Hong SC, Ryu M, Kim H, Lee SB. A study on the grooving process of a cross-scored rupture disc. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012;13(2):219-27.
17- Jeong JY, Jo W, Kim H, Baek SH, Lee SB. Structural analysis on the superficial grooving stainless-steel thin-plate rupture discs. International journal of precision engineering and manufacturing. 2014;15(6):1035-40.
18- Z.F. Yan, Numerical study on explosion performance and influential factors of the metallic rupture discs, Dalian University of Technology (2012), pp. 45-51
19- Duan Q, Xiao H, Gao W, Gong L, Wang Q, Sun J. Experimental study on spontaneous ignition and flame propagation of high-pressure hydrogen release via a tube into air. Fuel. 2016 Oct 1;181:811-9.
20- Toshiki Ando, Makoto Asahara, Tei Saburi, Shiro Kubota, Takeshi Miyasaka, "Propagation behavior of a self-ignited flame in high-pressure hydrogen flow in a tube", Proceedings of the 12th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 2018/08/15, Kansas City, USA
21- Kong X, Zhang J, Li X, Jin Z, Zhong H, Zhan Y, Han F. Experimental and finite element optimization analysis on hydroforming process of rupture disc. Procedia Manufacturing. 2018;15:892-8.
22- Asahara M, Saburi T, Ando T, Takahashi Y, Miyasaka T, Kubota S. Self-ignited flame behavior of high-pressure hydrogen release by rupture disk through a long tube. International Journal of Hydrogen Energy. 2021;46(24):13484-500.
23- Zhu H, Xu W, Luo Z, Zheng H. Finite element analysis on the temperature-dependent burst behavior of domed 316L austenitic stainless steel rupture disc. Metals. 2020;10(2):232.
24- Mohebbi M, Hoseinpour M. Investigating the effect of nonlinear strain path on the mechanical properties of sheet metal to predict burst pressure of composite Rupture disc. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021;8(4):1-1.

25- ASTM-E1251. Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry. (2017).
26- keyword User's LL. manual (version 971). Livermore, California, USA: Livermore Software Technology Corporation (LSTC). 2007.