

تحلیل تنش وارده بر لوله توپ ناشی از پوک‌های سوزشی و برنجی

مرتضی قدم‌خیر^{1*}، محمد جواد غلامی²

سازمان صنایع دفاع

(تاریخ وصول: 90/8/7، تاریخ پذیرش: 90/12/13)

چکیده

به دلیل کارایی بالستیکی مناسب و حداقل تنش و کرنش وارده بر لوله توپ و تفنگ و نیز قیمت پایین و سبکی وزن، پوک‌های سوزشی کاربرد گسترده‌ای را در مهمات تانک و خمپاره پیدا کرده‌اند. در این مقاله، تنش‌های وارده بر لوله توپ در دو حالت مهمات با پوک برنجی و سوزشی، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در مهمات با پوک برنجی به دلیل تماس پوک برنجی با لوله توپ نوسانات تنش در لوله توپ بیشتر می‌باشد. همچنین مقدار کرنش پلاستیک در لوله با پوک سوزشی تقریباً یک سوم کرنش پلاستیک لوله با پوک برنجی می‌باشد. به این ترتیب، استفاده از پوک سوزشی، باعث وارد شدن تنش و کرنش کمتری به لوله توپ می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش، کرنش پلاستیک، لوله توپ، لوله تفنگ.

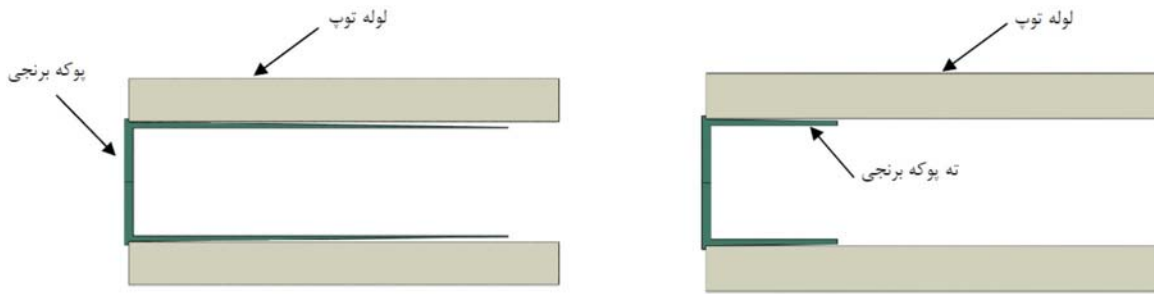
1- مقدمه

پوک‌های سوزشی را نشان می‌دهد. نحوه ایجاد تنش در لوله توپ، هنگام شلیک گلوله به این صورت می‌باشد که در اثر شلیک و احتراق مواد منفجره، فشار بالایی در پشت گلوله ایجاد می‌شود، این فشار موجب می‌گردد گلوله در داخل لوله شتاب گیرد و به حرکت درآید.

در گستره وسیعی از مهمات (شامل مهمات شرقی و غربی) از پوک سوزشی استفاده می‌شود. این پوک‌ها بر اساس استاندارد به کار گرفته شده، هر کدام دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشد. پوک سوزشی بیشتر در مهمات ضد تانک استفاده شده است، یکی از دلایل کاربرد این مهمات در زره پوش‌ها، کم حجم بودن و سوزشی بودن پوک سوزشی نسبت به پوک‌های برنجی می‌باشد که این موضوع با فضای کم اتاقک زره پوش‌ها هم‌خوانی دارد [1]. در سال‌های اخیر به دلیل مزایای این پوک‌ها، کاربرد آن‌ها در مهمات توپخانه صحرایی، انواع خمپاره‌ها و حتی توپ‌های کالیبر کوچک در حال گسترش است [2]. شکل 1 انواع



شکل 1 - انواع پوک‌های سوزشی.



شکل 2 - هندسه پوکه و لوله توپ.

با توجه به اینکه فشار ایجاد شده ناشی از سوزش باروت است و باروت نیز با گذشت زمان می‌سوزد، باید بارگذاری وابسته به زمان و در نتیجه تحلیل دینامیکی صورت گیرد. بنابراین برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی آباکوس¹ استفاده شده است.

2-1- مدل ماده

لوله‌های توپ، مسلسل و دیگر لوله‌های خاندان به طور معمول از فولادهای کم آلیاژ مانند 5CrMoV% با میکروساختار مارتنزیت تمپر شده ساخته می‌شوند. برای شبیه‌سازی از فولاد 4340 - که خواص آن شبیه 5CrMoV% است استفاده شده است [3]. پوکه‌های مربوط به مهمات کالیبر بالا از جنس برنج 70/30 (70 درصد مس و 30 درصد روی) ساخته می‌شود. در شبیه‌سازی پوکه از برنج استفاده شده است [3]. از آنجائیکه فرآیند سوزش باروت و شلیک گلوله از ماهیت انفجاری و دینامیک برخوردار است، بارگذاری و نتایج این بارگذاری همراه با تغییرات شدید دما، نرخ کرنش و فشار می‌باشد [4]. در اینجا از مدل مادی - جانسون- کوک² استفاده شده است. این مدل مادی تنش تسلیم را به صورت تابعی از کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و دما بصورت زیر بیان می‌کند [5].

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\epsilon}^P)^N][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)][1 - (T^*)^M] \quad (1)$$

که در آن A، B، C، M، N ثابت‌هایی هستند که با استفاده از نتایج تجربی بدست می‌آیند و $\bar{\epsilon}^P$ کرنش پلاستیک موثر، $\dot{\epsilon}^*$ نرخ کرنش بدون بعد و T^* دمای بدون بعد بوده و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$T^* = (T - T_{ref}) / (T_{melt} - T_{ref}) \quad (2)$$

که در آن T_{ref} دمای محیط و T_{melt} دمای ذوب ماده مورد نظر می‌باشد.

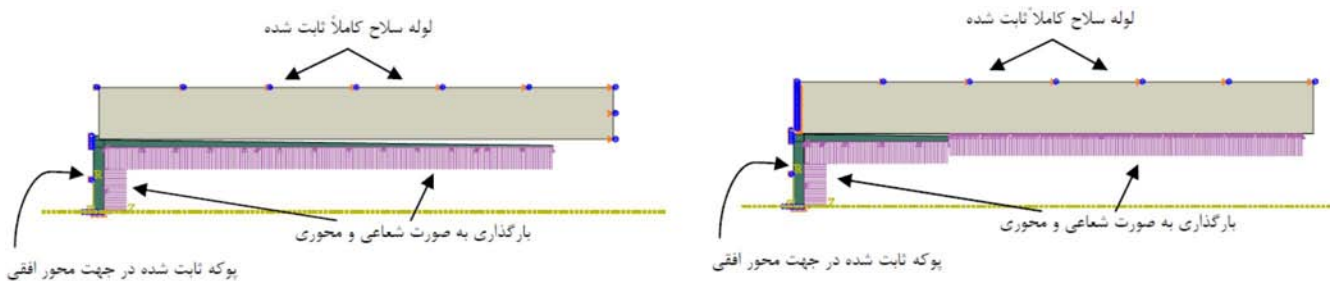
این فشار در زمان حرکت گلوله، تغییر می‌کند و سرعت گلوله همچنان رو به افزایش است تا لوله را ترک کند. هر چند بیشتر انرژی تولید شده در اثر سوخت مواد منفجره، صرف رانش گلوله به جلو می‌شود اما مقدار دیگری از آن به چرخش گلوله، مقابله با اصطکاک بین کمر بند محرکه گلوله و جداره داخلی لوله، انتقال گاز حاصل از احتراق و گرما، می‌شود. با شروع احتراق و رسیدن فشار به حدی که موجب رانش گلوله شود، گلوله به جلو حرکت می‌کند. در اثر این حرکت حجم محفظه در پشت گلوله افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار با کاهش مواجه می‌شود. از طرف دیگر، سوخت همچنان در حال احتراق است و موجب افزایش فشار می‌شود. این دو عامل باعث ایجاد نقطه حداکثر فشار می‌شود و این افزایش فشار باعث ایجاد تنش در پوکه و در نتیجه روی لوله توپ می‌شود [3].

دلیل جایگزین کردن پوکه سوزشی بجای پوکه برنجی در گلوله‌ها مزایایی از قبیل ارزانی، سبکی، افزایش کارایی بالستیکی و... می‌باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر پوکه سوزشی (از لحاظ مکانیکی - شکست - دمایی) روی لوله توپ و مقایسه اثرات آن با اثر پوکه برنجی می‌باشد. با توجه به تغییر پوکه برنجی به پوکه سوزشی تغییراتی در تنش‌ها و کرنش‌های لوله توپ به وجود خواهد آمد به منظور بررسی این تغییرات از نرم افزار تحلیلی آباکوس استفاده شده است.

2- شبیه‌سازی مدل

تحلیلی که در اینجا صورت می‌گیرد مربوط به تنش وارده بر لوله توپ در هنگام شلیک می‌باشد. هدف از این شبیه‌سازی مقایسه تنش‌های وارد بر لوله توپ ناشی از سوزش باروت در دو حالت پوکه سوزشی و پوکه برنجی است.

1- Abaqus6.8-Explicit
2- Jahnson- Cook Plasticity model



شکل 3 - بارگذاری و شرایط مرزی.

2-2- تشریح مدل شبیه‌سازی شده

در شکل 2 هندسه پوک و لوله توپ در دو حالت، پوک برنجی بصورت کامل و پوک سوزشی بصورت ته پوک نشان داده شده است. برای مدل کردن لوله و پوک در نرم‌افزار با توجه به دوار و متقارن بودن آنها از حالت تقارن محور¹ استفاده شده است.

شعاع داخلی پوک 62/5 میلی‌متر و شعاع خارجی آن 69/5 میلی‌متر است. همچنین شعاع داخلی لوله 70/5 میلی‌متر و شعاع خارجی لوله 120 میلی‌متر است. طول پوک برنجی 500 میلی‌متر و طول ته پوک سوزشی 150 میلی‌متر می‌باشد. طول پوک به طور خواسته از شیب ملایمی برخوردار است. بدین ترتیب که دهانه آن برای اتصال به مرمی و همچنین انبساط در اثر شلیک برای کاهش برگشت گاز، نرم‌ترین قسمت آن است. در طول پوک به طرف انتها، ضخامت و سختی بیشتر می‌شود تا بتواند فشار ناشی از انفجار را تحمل کند (شکل 2) [3]. جنس پوک و ته پوک، برنجی و جنس لوله فولاد 4340 انتخاب شده است. دلیل استفاده از آلیاژ برنج برای پوک، مقاومت به خوردگی این آلیاژ و عدم نیاز آن به رنگ می‌باشد.

مدل‌های مادی در نرم‌افزار Abaqus در حقیقت معادلات مشخصه‌ای هستند که بیانگر رفتار تنش- کرنش مواد می‌باشد [6]. در تحلیل عددی حاضر، از مدل مادی جانسون-کوک برای پوک و لوله استفاده شده است که به صورت تجربی حاصل می‌شوند. ثابت‌های مورد استفاده در تحلیل در جدول 1 برای مدل جانسون کوک ارائه شده است [7].

3-2- شرایط مرزی و اولیه

با توجه به ماهیت مسئله و تقارن موجود برای مدل، از شرایط تقارن محوری برای لوله و پوک استفاده شده است. شکل 3 بارگذاری فشاری

ناشی از سوزش باروت را در درون پوک نشان می‌دهد به طوری که فشار متقارن و از درون پوک به سمت خارج و به صورت شعاعی-محوری به مجموعه پوک و لوله وارد می‌شود.

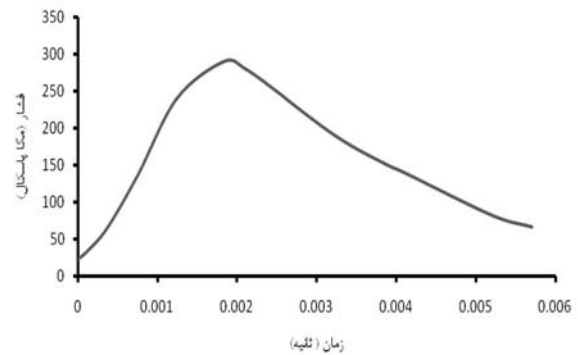
جدول 1- مشخصات و ویژگی‌های مواد مورد استفاده در تحقیق.

خواص ماده	علامت ویژه	واحد (یکا)	فولاد	برنج
جرم	ρ	kg/m^3	7800	8940
مدول الاستیسیته	E	GPa	210	79
ضریب پواسون	ν	-	0/3	0/31
ثابت جانسون - کوک	A	MPa	792	112
ثابت جانسون - کوک	B	MPa	510	505
ثابت جانسون - کوک	C	-	0/014	0/009
ثابت جانسون - کوک	M	-	1/03	1/68
ثابت جانسون - کوک	N	-	0/26	0/42
دمای ذوب	T_m	K	1793	1189
دمای اتاق	T_r	K	298	298

در شکل 3 بارگذاری ناشی از فشار با رنگ صورتی نشان داده شده است. ماکزیمم فشار ناشی از سوزش باروت در حدود 2900 bar، در زمان 2 میلی‌ثانیه بعد از شلیک گلوله می‌باشد. شکل 4 نمودار تغییرات فشار را بر حسب زمان در درون پوک نشان می‌دهد.

منحنی فشار- زمان از تحلیل بالستیک داخلی و معادلات نیمه تجربی سوزش باروت بدست آمده است. در این بارگذاری لوله توپ کاملاً ثابت شده و دارای هیچگونه درجه آزادی نمی‌باشد. همچنین پوک به علت وجود پوک‌گیر در سلاح شلیک کننده نمی‌تواند حرکت کند که در شرایط مرزی این پدیده در نظر گرفته شده است و پوک در جهت محور افقی دارای درجه آزادی نیست و مقید شده است.

المان‌ها برای لوله توپ و پوک‌ها از نوع 4 گره‌ای و متقارن محوری³ هستند. در حالت پوک‌ها برنجی تعداد المان‌ها برابر 10339 المان و تعداد گره برابر 10985 گره و در حالت پوک‌ها سوزشی تعداد المان‌ها برابر 9627 و تعداد گره برابر 10095 است. این تعداد المان و گره، بهینه‌ترین حالت تعداد المان و گره می‌باشد که پس از چند بار حل کردن⁴ مسئله بدست آمد. مدت زمان حل مسئله در دو حالت تقریباً یکسان و برابر 2 ساعت می‌باشد.



شکل 4 - نمودار فشار وارد بر پوک‌ها بر حسب زمان.

3- نتایج و بحث

در این قسمت ضمن ارائه نتایج، مقایسه‌ای بین این دو حالت از لحاظ تنش و کرنش وارده بر لوله انجام می‌گیرد شکل 6 و 7 حالت پوک‌ها برنجی و لوله را قبل و بعد از اعمال فشار نشان می‌دهد. شکل‌های 6 و 7 نشان می‌دهد بعد از اعمال فشار پوک‌ها به لوله توپ چسبیده و به آن تنش وارد می‌کند رنگ قرمز نشان دهنده بحرانی‌ترین نقطه است، در این نقطه ماکزیمم تنش فون-مایز (750 مگا پاسکال) اتفاق می‌افتد. برای اینکه بتوان تنش و کرنش اعمال شده بر سطح لوله سلاح را در این دو حالت (پوک‌ها کامل برنجی و ته پوک‌ها برنجی - پوک‌ها سوزشی) مقایسه کرد، می‌بایست در یک نقطه با فاصله مشخص از ابتدای لوله این مقایسه انجام شود. این نقطه در حالت اول با پوک‌ها برنجی تماس پیدا می‌کند و در حالت دوم با پوک‌ها سوزشی. شکل‌های 8 تا 11 مقدار تنش فون مایز و کرنش را بر روی سطح داخلی لوله توپ و به فاصله 280/7 میلی‌متر از ابتدای آن نشان می‌دهند.

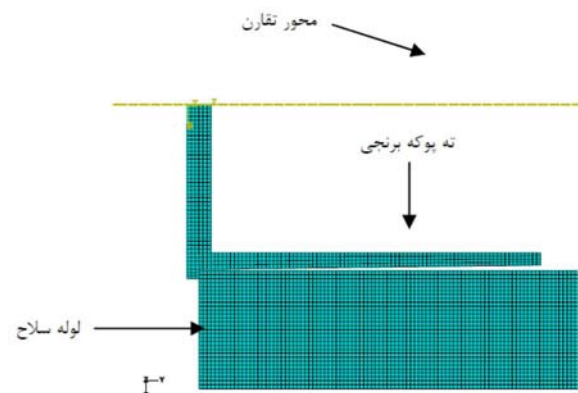
از نمودارهای تنش فون مایز - شکل 8 و 9 - معلوم است که تغییرات آن مانند تغییرات نمودار تغییرات فشار ناشی از سوزش باروت است و اندازه ماکزیمم تنش در هر دو حالت در حدود 750 مگا پاسکال می‌باشد و در زمان 2 میلی ثانیه که ماکزیمم فشار ناشی از سوزش باروت است، اتفاق می‌افتد. این مقدار تنش نزدیک استحکام تسلیم فولاد 4340- است (790 مگا پاسکال) و باعث می‌شود در برخی از نواحی کرنش پلاستیک بوجود آید.

2-4- تعریف نوع و مناطق مشترک تماس

برای تعامل بین پوک‌ها و لوله سلاح باید سطوح تماس بین آن دو تعریف شود. در این تحلیل تماس بین پوک‌ها و لوله از نوع سطح به سطح¹ انتخاب شده است. دلیل این انتخاب، تقارن محوری بودن مدل می‌باشد. در این تعامل سطح پشتی پوک‌ها با سطح درونی لوله توپ تماس دارد.

2-5- مش‌بندی مدل

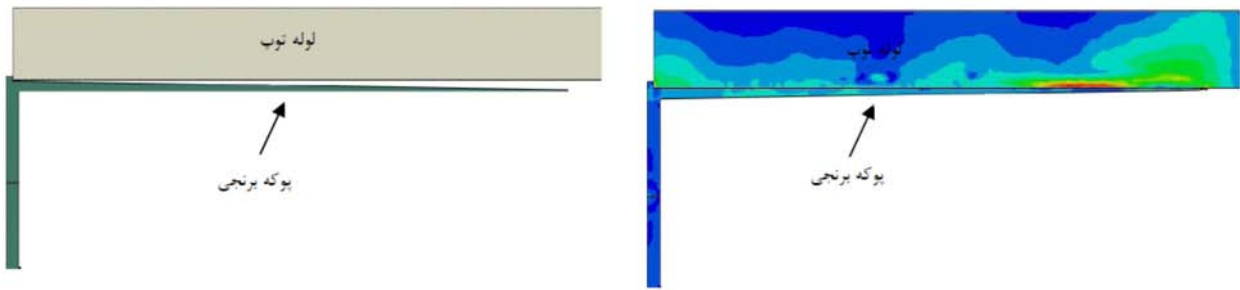
شکل 5 مش‌بندی قسمتی از لوله توپ و پوک‌ها را نشان می‌دهد. برای تحلیل بارگذاری دینامیکی و نرخ کرنش بالا در حالت تقارن محوری بهتر است از المان‌های 4 گره‌ای متقارن محوری و از نوع ساختاری² استفاده شود [6].



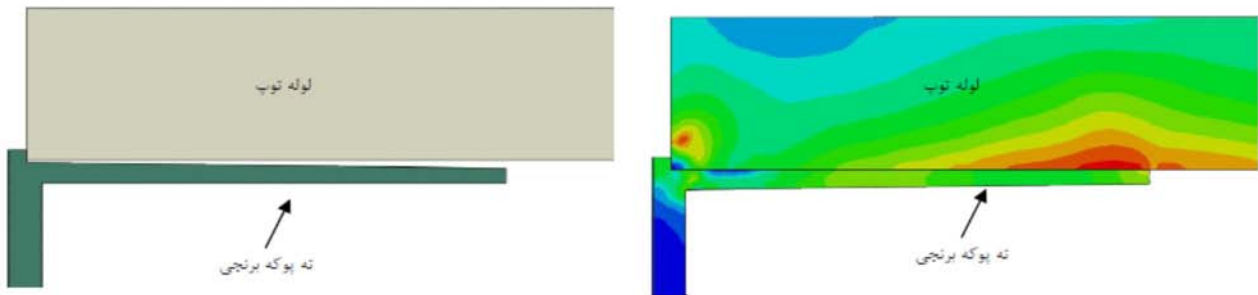
شکل 5- مش بندی مدل.

3- CAX4R
4- Run

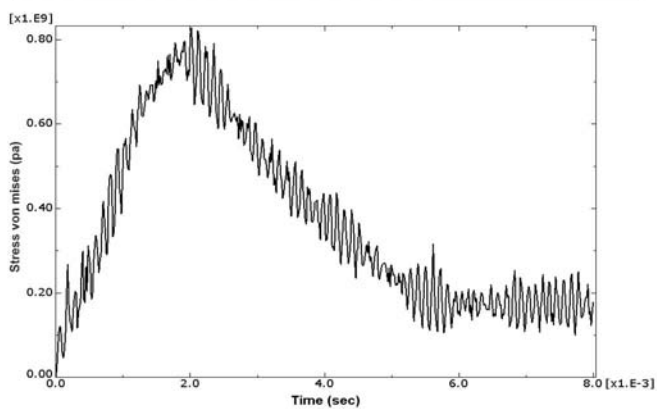
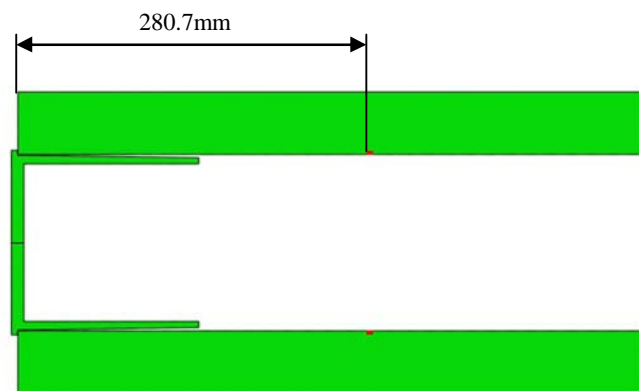
1- Surface-to- surface
2- Structured



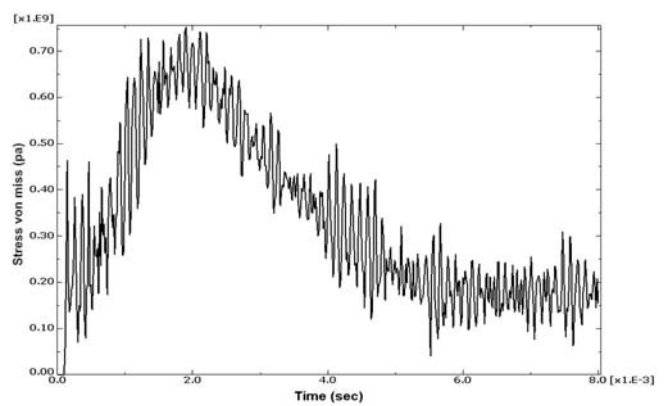
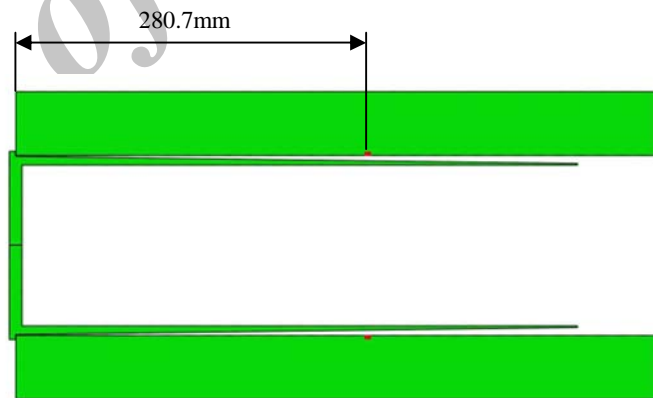
شکل 6- پوکه برنجی قبل از اعمال فشار (سمت چپ) و بعد از اعمال فشار (سمت راست).



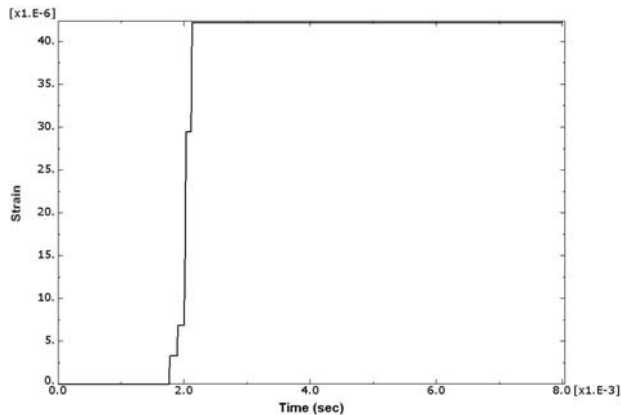
شکل 7- ته پوکه سوزشی قبل از اعمال فشار (سمت چپ) و بعد از اعمال فشار (سمت راست).



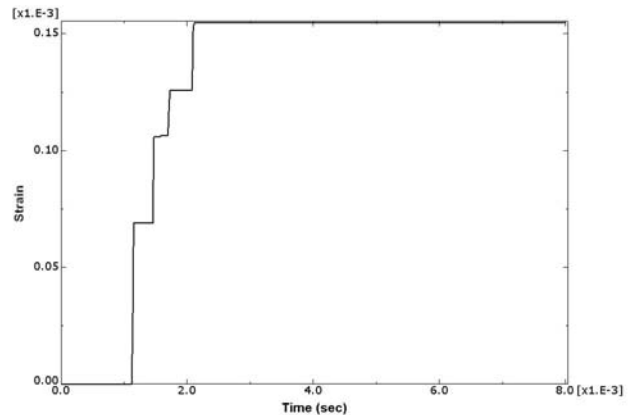
شکل 9- نمودار تنش فون مایز المان مشخص شده روی لوله توپ، پوکه سوزشی.



شکل 8- نمودار تنش فون مایز المان مشخص شده روی لوله توپ، پوکه برنجی.



شکل 11- نمودار کرنش پلاستیک المان مشخص شده روی لوله توپ، پوک‌های سوزشی.



شکل 10- نمودار کرنش پلاستیک المان مشخص شده روی لوله توپ، پوک‌های برنجی.

سوزشی کمتر از پوک‌های برنجی است که این مزایای مکانیکی علاوه بر ارزانی، سبکی و افزایش کارایی بالستیکی، باعث برتری پوک‌های سوزشی بر پوک‌های برنجی می‌باشد.

مراجع

- [1] Courtney-Green P. R. "Ammunition for the Land."; Brassay's Defence publishers Ltd. Inc, London (1991).
- [2] Sayal, R. K.; Narr, P. S. "Study of Brass Obturator Design for Combustible Cartridge Case for 105 mm Tank Gun Ammunition."; Def. Sci. J. 1997, 47, 373-81.
- [3] هادوی، سید محمد مهدی "متالورژی در تسلیحات"، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، چاپ اول، پاییز 1382.
- [4] اکبر دوست، جواد "بررسی عددی شکست استوانه شیاردار تحت اثر انفجار داخلی با استفاده از روش CLE"، نشریه مواد پرنرزی، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان 88، ص 57-70.
- [5] Payne, N.; Carlucci, P.; Mellini, M. "Modeling and Simulation of Engraving and Gun Launch of a 40-mm Sensor Grenade" Technical Report ARMET-TR-08022, U.S. Army Armament, Research Development and Engineering Center, Picatinny Arsenal, NJ, November 2008.
- [6] Abaqus Version 6.8 Documentation, Dassault Systems Simulia Corp., 2008.
- [7] Rohra, I.; Nahme, H. "Material Characterization and Constitutive Modeling of a Tungsten-Sintered Alloy for a Wide Range of Strain Rates."; Int. J. Impact Eng. 2008, 35, 811-819.

از نمودار کرنش پلاستیک برای دو حالت (شکل 10 و 11) مشخص می‌شود که کرنش پلاستیک برای لوله با پوک‌های برنجی 150×10^{-6} و برای لوله با پوک‌های سوزشی 45×10^{-6} می‌باشد. با اینکه مقدار کرنش پلاستیک در دو حالت ناچیز است اما کرنش در لوله با پوک‌های برنجی 3/3 برابر بیشتر نسبت به لوله با پوک‌های سوزشی می‌باشد. همچنین نوسانات تنش در لوله با پوک‌های برنجی بیشتر می‌باشد که دلیل آن چسبیدن پوک‌ها به لوله می‌باشد، وجود این نوسانات مضر بوده و باعث ایجاد کرنش بیشتری می‌شود.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق تنش و کرنش وارد بر لوله توپ، در هنگام شلیک با استفاده از پوک‌های برنجی و پوک‌های سوزشی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. نتایج نشان داد که اندازه ماکزیمم تنش روی لوله سلاح در هر دو حالت در حدود 750 مگاپاسکال می‌باشد و در زمان 2 میلی ثانیه که ماکزیمم فشار ناشی از سوزش باروت است، اتفاق می‌افتد. کرنش پلاستیک برای لوله با پوک‌های برنجی 150×10^{-6} و برای لوله با پوک‌های سوزشی 45×10^{-6} محاسبه شد. با اینکه مقدار کرنش پلاستیک در دو حالت ناچیز است اما کرنش در لوله با پوک‌های برنجی 3/3 برابر بیشتر نسبت به لوله با پوک‌های سوزشی می‌باشد. همچنین نوسانات تنش در لوله با پوک‌های برنجی بیشتر می‌باشد که دلیل آن چسبیدن پوک‌ها به لوله است، وجود این نوسانات مضر بوده و باعث ایجاد کرنش بیشتری می‌شود. بنابراین نوسانات تنش و کرنش در پوک‌ها