

شبیه‌سازی بالستیک داخلی نارنجک‌های تفنگی، با محفظه‌های پرفشار - کم‌فشار

عباس سیفی‌پور^۱

۱- کارشناس ارشد سازمان صنایع دفاع
(تاریخ وصول: ۹۲/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۲۰)

چکیده

در این مقاله بالستیک داخلی سلاح‌های نارنجک دو محفظه‌ای با هدف امکان بهینه‌سازی آن، شبیه‌سازی شده است. در مدل‌سازی فرآیند، جریان گازهای حاصل از احتراق باروت و ذرات باروت نسوخته از محفظه پرفشار به محفظه کم‌فشار و ادامه سوزش در امتداد لوله سلاح، مورد تحلیل قرار گرفته است. معادلات مورد استفاده در این مدل، با لحاظ نمودن تأثیر تغییرات دمای گاز پشت نارنجک بر معادلات ارائه شده توسط سایر محققین، توسعه یافته است و به این ترتیب مدل کامل‌تری ارائه گردیده است. جهت اعتبارسنجی مدل، نتایج تئوری با داده‌های تجربی یکی از مراجع مقایسه شده‌اند. از آنجا که جهت هرگونه بهینه‌سازی شلیک نیاز به شناخت پارامترهای موثر است، میزان تأثیر این پارامترها به صورت تئوری بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: بالستیک داخلی، محفظه‌های پرفشار - کم‌فشار، تحلیل دوفازی

Interior Ballistic Simulation of Grenade Launchers with High/Low Pressure Chambers

A. Seifipoor

Defense Industry

(Received: 11/30/2013, Accepted: 05/10/2014)

Abstract

In this article, the interior ballistic of grenade launchers with high/low pressure chambers is simulated for the sake of optimization of it. In theoretical modeling special attention is paid to flow of two-phase mixture of propellant gases and unburned propellant from the high-pressure chamber and to continuation of propellant combustion in the low-pressure chamber and the launcher barrel. The system of equations used in this model is improved by considering the combustion gases thermal variation effects in low pressure chamber. The theoretical and experimental data that were obtained from a reference are used to verify the model. Through theoretical investigations the influence of propellant weight, dimensions of holes in wall separating chambers, grenade weight and type of liner across the holes are studied.

Keywords: Interior Ballistic, Two-Phase Analysis, High/Low Pressure Chambers.

* Corresponding Author E-mail: seifipoor@yahoo.com

"Journal of Energetic Materials" Volume 9, No.1, Serial No.22, Spring and Summer 2014

۱- مقدمه

فرض ثابت بودن دمای گازهای حاصل از احتراق، نتایج تئوری را دارای تقریب می‌سازد. نتایج ارائه شده در مراجع پس از کالیبراسیون برنامه ارائه شده است و تفاوت چندانی بین نتایج تئوری و آزمایشگاهی دیده نمی‌شود، ولی باید توجه داشت که در این مراجع با تغییر وزن باروت و عدم تغییر ضریب کالیبراسیون نتایج تئوری تقریب‌های بیشتری داشته‌اند. گذشته از دقت پیش‌بینی نتایج، مسئله دیگری که اهمیت پیش‌بینی دمای گازهای حاصل از احتراق را دوچندان می‌کند ارتباط ترکیب گازهای حاصل از احتراق با دمای آن‌ها می‌باشد. بررسی این مسئله در مطالعه خوردگی لوله سلاح و کاهش شعله دهانه مورد نیاز است. لذا یکی از خواسته‌های شبیه‌سازی پیش‌بینی دمای گازهای حاصل از احتراق در طول لوله است. کومر [۵] که جزء اولین افراد ارائه دهنده بالستیک داخلی سلاح‌های دو محفظه‌ای می‌باشد، اثر تغییر دمای گازهای پشت نارنجک را در مدل بالستیک داخلی لحاظ نموده است ولی در ارائه معادلات از ذرات جامد موجود در سیال گذرنده از سوراخ‌های بین دو محفظه چشم‌پوشی کرده و با فرض جریان تک فازی به ارائه معادلات حاکم پرداخته است. در این مرجع تنها به ارائه معادلات بسنده شده و به حل این معادلات پرداخته نشده است. این مدل برای زمان خودش که هنوز امکان استفاده از کامپیوترهای پرسرعت جهت حل عددی دستگاه معادلات دیفرانسیل مهیا نبوده است، می‌توانست حل قابل قبولی از مسئله را ارائه نماید. البته باید خاطر نشان نمود که فرض تک فازی بودن جریان، سبب تقریب زیادی در نتایج می‌گردد که در حال حاضر قابل قبول نمی‌باشد. در تحقیق حاضر با اصلاح معادلات ارائه شده توسط جارامیز و میکوویچ [۱] به ارائه مدلی پرداخته شده است که در آن دمای لحظه‌ای گازهای پشت نارنجک در محفظه کم‌فشار محاسبه و لحاظ گردیده‌اند و معادلات بر اساس دمای لحظه‌ای محاسبه شده، حل گردیده‌اند نه با فرض ثابت بودن دمای گازهای پشت نارنجک، و به این ترتیب مدل کامل‌تری ارائه گردیده است. به عبارت دیگر در مدل ارائه شده، هم فرض دو فازی بودن جریان لحاظ گردیده است که از این لحاظ از مدل ارائه شده توسط کومر [۵] کامل‌تر است و هم در آن دمای لحظه‌ای گازهای پشت نارنجک لحاظ شده است که در مراجع [۱ و ۴] لحاظ نشده است. نتایج حاصل از برنامه شبیه‌ساز برای یک سلاح ۳۰ میلی‌متری استخراج گردیده و با نتایج تجربی ارائه شده توسط جارامیز و میکوویچ [۱] مقایسه شده است. سپس با استفاده از نتایج برنامه، تأثیر پارامترهای موثر بر بالستیک داخلی سلاح نارنجک دو محفظه‌ای بررسی گردیده است.

۲- سیکل بالستیک داخلی

در شکل (۱) شماتیکی از عملکرد سیکل بالستیک داخلی یک سلاح دو محفظه‌ای که با اصول حاکم بر محفظه‌های پرفشار-کم‌فشار کار می‌کند، نشان داده شده است.

بالستیک داخلی به عنوان یک دانش تخصصی به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است به گونه‌ای که تا کنون مسائل متنوعی با استفاده از الگوریتم‌های متفاوت در این زمینه حل شده است و تحقیق در این زمینه همچنان ادامه دارد [۱ و ۲]. با توجه به جزئیات در نظر گرفته شده و به همین میزان پیچیده‌تر بودن روابط حاکم بر این فرآیند، مدل‌سازی فرآیند سیکل بالستیک داخلی گستره وسیعی را شامل می‌شود. ساده‌ترین مدل در این گستره، مدل ترمودینامیکی یا صفر بعدی است که از طریق دیدگاه لاگرانژین و با استفاده از روش پارامترهای مجتمع^۱ و بر اساس روابط ترمودینامیکی بسط داده می‌شود. این مدل به طور گسترده‌ای در تعیین پارامترهای کلی از قبیل فشار ماکزیمم و سرعت دهانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سطح بعدی مدل یک بعدی قرار دارد که تغییرات پارامترها را در راستای محور لوله سلاح بررسی می‌کند و در سطوح بعدی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی قرار دارند [۳]. به سلاح‌های نارنجک با محفظه‌های پرفشار-کم‌فشار، سلاح‌های دو محفظه‌ای نیز گفته می‌شود. گاز ناشی از احتراق باروت در محفظه پرفشار به همراه ذرات در حال سوزش باروت، از طریق یک یا چند سوراخ به محفظه کم-فشار وارد می‌شود. ادامه سوزش این ذرات در محفظه کم‌فشار تا اتمام آن‌ها ادامه می‌یابد. فشار ناشی از گاز منتقل شده به محفظه کم‌فشار و گازهای حاصل از ادامه سوزش ذرات عبوری باروت در این محفظه، سبب پیشرانش گلوله می‌گردد. دبی جرمی عبوری مخلوط گاز و ذرات نسوخته تابع قوانین دینامیک گازها است که این مسئله در سلاح‌های تک محفظه‌ای وجود ندارد. دلایل دو محفظه‌ای بودن سلاح‌های نارنجک را می‌توان بهبود آغازگری باروت و یکنواختی سرعت دهانه دانست [۱]. واسیل و مورسو [۴] بالستیک داخلی نوعی نارنجک سرعت پایین با تلفیقی از قوانین حاکم بر مدل‌های ترمودینامیکی و قوانین دینامیک گاز شبیه‌سازی شده و پس از اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی، اثر تغییر سطح سوراخ‌های بین دو محفظه و حجم محفظه کم‌فشار بر بالستیک داخلی سلاح مورد بررسی قرار گرفته است. جارامیز و میکوویچ [۱] کار مشابهی برای یک نارنجک سرعت بالا انجام گرفته و سپس جهت بهبود بالستیک داخلی سلاح نارنجک، سطح سوراخ‌ها، وزن و جنس باروت و استحکام صفحه مسی حائل بین دو محفظه مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌های ارائه شده توسط جارامیز و واسیل [۱ و ۴] از اثر تغییر دمای گازهای پشت محفظه چشم‌پوشی شده و مدل بر این اساس ارائه گردیده است که دمای گازهای حاصل از احتراق همواره ثابت و برابر دمای شعله آدیباتیک آن باشد. در سلاح‌هایی که در آن‌ها نسبت وزن باروت به وزن گلوله بالا است مانند توپخانه‌ها و تانک‌ها (که دارای نسبت وزنی ۰/۵ تا ۱/۲ هستند)، چنین فرضی معقول به نظر می‌رسد. ولی در سلاح‌های نارنجک که این نسبت از ۰/۰۴ تا ۰/۰۵ است،

- جریان سیال، مخلوط یک بعدی و پایا است.
- سرعت ذرات نسوخته باروت و گازها در هر مقطع ثابت است و از منتهی الیه محفظه کم فشار تا پشت نارنجک به طور خطی تغییر می کند.
- از اصطکاک مخلوط گاز و ذرات سوخت با دیواره لوله سلاح چشم پوشی گردیده است.
- تمامی ذرات باروت در محفظه پر فشار، با هم شروع به سوزش می کنند.

۳-۱- معادلات سوزش باروت

معادلات سوزش برای هر دو محفظه پر فشار و کم فشار یکسان هستند و به صورت زیر ارائه می شوند. آهنگ سوزش باروت به صورت رابطه زیر است [۶]:

$$\dot{Z}_i = Sr \rho_s / C \quad (1)$$

این مقدار آهنگ سوزش است که باعث تولید گاز، ایجاد فشار و حرکت گلوله می گردد. در معادله فوق Z_i کسر سوخته شده باروت در هر لحظه، S سطح سوزش باروت در هر لحظه، r نرخ سوزش باروت، ρ_s چگالی باروت و C جرم کل باروت مورد استفاده در نارنجک هستند. اندیس i می تواند n باشد که بیانگر شرایط محفظه پر فشار است و می تواند L باشد که بیانگر شرایط محفظه کم فشار می باشد. نرخ سوزش باروت وابسته به فشار محفظه است و به شکل زیر مدل می شود [۶].

$$r = B P_i^n \quad (2)$$

در این معادله، B ضریب خطی سوزش و n ضریب نمائی سوزش و P فشار محفظه هستند. قابل ذکر است که در محفظه پر فشار تنها یک فشار متوسط محاسبه می شود، ولی در محفظه کم فشار، تابعی از فاصله تا انتهای محفظه بوده و در انتهای محفظه، بیشترین مقدار را دارد. در این تحقیق فرض شده است که تغییرات فشار از انتهای محفظه تا پشت نارنجک به طور خطی افزایش یابد.

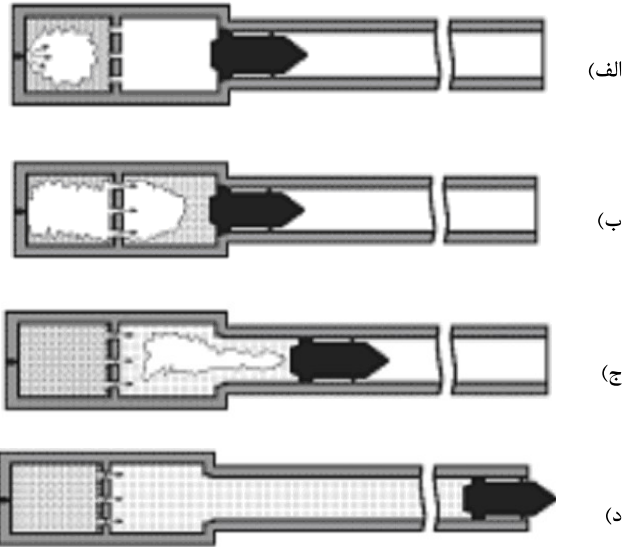
۳-۲- معادلات محفظه پر فشار

در این مدل، از معادله حالت نوبل-آبل به صورت معادله (۳) استفاده شده است. این معادله حالت، فرم اصلاح شده معادله حالت گاز ایده آل با استفاده از پارامتر کووالیوم است که به طور گسترده ای در محاسبات بالستیک داخلی که فشار می تواند به مقادیر بیش از ۵۰۰۰ بار برسد، مورد استفاده قرار می گیرد [۹].

$$\frac{P_h}{C} (V - C\delta) = f \quad (3)$$

در رابطه فوق V حجم خالص محفظه، δ کووالیوم گاز، C جرم باروت و f نیروی ویژه باروت هستند. بر اساس رابطه فوق و با در نظر گرفتن انرژی آغازگر می توان فشار محفظه اول را محاسبه کرد [۱]:

$$P_h = \frac{fC(Z-\eta) + f_{ig}m_{ig}}{V_h - C \left[\left(\frac{1-Z-\xi}{\rho_s} \right) + (Z-\eta)\delta \right]} \quad (4)$$



شکل ۱- شیوه عملکرد سیکل بالستیک داخلی سلاح های دو محفظه ای.

سیکل بالستیک داخلی با عمل نمودن چاشنی و آغازگری باروت در محفظه اول شروع می شود (شکل ۱- الف). در ابتدا یک صفحه مسی از داخل محفظه پر فشار روی سوراخ های بین دو محفظه را پوشانده است. با ادامه سوزش باروت در محفظه اول، فشار آنقدر بالا می رود که این صفحه را از محل سوراخ ها برش می دهد. پس از آن مخلوطی از گاز و ذرات در حال سوزش باروت از محفظه اول به محفظه دوم وارد می شوند (شکل ۱- ب). ورود این مخلوط به محفظه دوم و ادامه سوزش ذرات در این محفظه، سبب افزایش هر چه بیشتر فشار می گردد. هنگامی که فشار به میزان خاصی رسید، نارنجک شروع به حرکت داخل لوله می نماید. تا زمانی که حجم فضای آزاد شده در اثر حرکت نارنجک کمتر از مجموع حجم گاز آزاد شده در اثر سوزش باروت در محفظه دوم و حجم گاز عبوری از محفظه اول باشد، فشار بالا خواهد رفت (شکل ۱- ج). با ادامه سوزش، به دلیل اینکه متوسط فشار در محفظه اول بیشتر است، باروت موجود در این محفظه زودتر از باروت منتقل شده به محفظه دوم به اتمام می رسد. پس از اتمام سوزش باروت ها، شتاب گیری نارنجک در اثر انبساط گازهای پشت آن ادامه می یابد (شکل ۱- د).

۳- دستگاه معادلات حاکم

معادلات باید بر اساس سیکل بالستیک داخلی گفته شده ارائه شوند. فرضیاتی که در ارائه معادلات در نظر گرفته شده است عبارتند از:

- سوزش باروت بر اساس شکل ایده آل باروت صورت می پذیرد. به عنوان مثال باروتی که به شکل استوانه ای یک سوراخه فرض می شود ممکن است عملاً دارای مقطع بیضی باشد و یا طول دانه های باروت دقیقاً برابر هم نیستند.

- مخلوط گاز و ذرات باروت همگن هستند.

و فرض ثابت ماندن دما دچار تقریب خواهد بود. لذا در معادله حالت مورد استفاده در محفظه دوم، از ترم $\frac{T}{T_0}$ چشم‌پوشی نشده است [۵].

$$\frac{P_{LA}}{C}(V - C\delta) = \frac{fT}{T_0} \quad (۱۲)$$

با جایگذاری از معادله (۱۲) در معادله (۷) و ساده‌سازی آن، معادله‌ای جهت محاسبه فشار بدست می‌آید.

$$P_{LA} = \frac{fC(Z_L + \eta)\frac{T}{T_0} - 0.5M_e V_p^2 (\gamma_1 - 1)}{V_L + AX - C \left[\frac{(\xi - Z_L)}{\rho_s} + (Z_L + \eta)\delta \right]} \quad (۱۳)$$

در این معادله P_{LA} فشار متوسط محفظه کم‌فشار، γ_1 نسبت ظرفیت گرمائی گازهای حاصل از احتراق، Z_L کسر باروت سوخته شده در محفظه کم‌فشار، A سطح مقطع لوله سلاح، X مسافت طی شده نارنجک در هر لحظه و M_e جرم موثر هستند. تعریف جرم موثر به شکل زیر می‌باشد [۱۱].

$$M_e = \frac{CZ}{3} + W_s \quad (۱۴)$$

با استفاده از معادلات حرکت، روابط سرعت و شتاب نارنجک به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) نوشته می‌شوند.

$$\dot{X} = V_p \quad (۱۵)$$

$$\dot{V}_p = AP_{LB} / W_s \quad (۱۶)$$

به طوری که V_p سرعت لحظه‌ای نارنجک و P_{LB} فشار پشت نارنجک در محفظه کم‌فشار می‌باشد. جهت محاسبه این فشار از فرض خطی بودن پروفیل سرعت گازهای پشت نارنجک استفاده گردید که از فرضیه لاگرانژ به صورتی که در شکل (۲) نشان داده شده است حاصل می‌شود [۱]. اساس این فرضیه تغییر خطی سرعت گازهای حاصل از احتراق در طول لوله سلاح می‌باشد. همان‌گونه که در شکل هم پیداست، حداکثر سرعت گازها در کنار صفحه حائل به وجود می‌آید که برابر سرعت صوت می‌باشد. سرعت گازها با دورتر شدن از این محل و نزدیکتر شدن به پشت نارنجک کاهش می‌یابد تا اینکه در پشت نارنجک برابر سرعت نارنجک می‌شود. از آنجا که سرعت در ابتدا و انتهای مسیر مشخص است، می‌توان با یک تناسب خطی سرعت را در هر نقطه از طول لوله بدست آورد. در این صورت رابطه فشار پشت گلوله برابر است با [۱]:

$$P_{LB} = P_{LA} + \frac{C(\xi + \eta)V_f^2}{6(V_L + AX)(1 + \frac{C(\xi + \eta)}{3W_s})} \left(\frac{V_p}{V_f} - 1 \right) \quad (۱۷)$$

فشار انتهای محفظه کم‌فشار نیز طبق فرضیه لاگرانژ [۱۱] با فشار پشت گلوله رابطه زیر را دارد [۱].

$$P_{LBR} = P_{LB} \left(1 + \frac{C(\xi + \eta)}{2W_s} \right) - \frac{C(\xi + \eta)V_f^2}{2(V_L + AX)} \left(\frac{V_p}{V_f} - 1 \right) \quad (۱۸)$$

در روابط فوق V_f سرعت گازهای خروجی از سوراخ‌های بین دو محفظه است و از روابط (۲۷) و (۲۹) حاصل می‌شود.

در رابطه فوق V_h حجم محفظه پرفشار و f_{ig} و m_{ig} نیز به ترتیب نیروی ویژه و جرم آغازگر هستند. نیروی ویژه به طور عملی از آزمایشات بمب بالستیک و به صورت تئوری از محاسبات ترموشیمی قابل حصول است. برای بسیاری از آغازگرهای مورد استفاده می‌توان این عدد را از جداول موجود در کتب بالستیک داخلی استخراج نمود. Z نسبت وزن باروت سوخته شده به وزن اولیه باروت است و با داشتن نرخ سوزش باروت و شکل هندسی آن بر اساس تابعی از زمان بدست می‌آید. این ارتباط به شکل زیر بیان می‌شود [۱]:

$$C \frac{dZ}{dt} = \rho_s S \frac{dx}{dt} \quad (۵)$$

در این رابطه S سطح سوزش و X میزان پیشروی سوزش از سطح باروت می‌باشد. جهت محاسبه X باید ضرایب سوزش مشخص باشند. نحوه تعیین ضرایب سوزش در بخش ۴ این مقاله توضیح داده شده است. η جرم نسبی گاز جریان یافته از سوراخ‌ها به سمت محفظه کم‌فشار و ξ جرم نسبی دانه‌های باروت است که از سوراخ‌ها عبور کرده است. به این ترتیب برای η و ξ می‌توان گفت:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\dot{m}_s}{C} \quad \text{و} \quad \frac{d\eta}{dt} = \frac{\dot{m}}{C} \quad (۶)$$

به طوری که \dot{m} نرخ جرمی جریان گاز عبوری از سوراخ‌ها و \dot{m}_s نرخ جرمی دانه‌های عبوری از سوراخ‌ها است.

۳-۳- معادلات محفظه کم‌فشار

جهت محاسبه فشار در محفظه دوم موازنه انرژی حول لوله و نارنجک به شکل زیر نوشته می‌شود [۶].

$$E_1 = E_2 + E_3 + E_4 \quad (۷)$$

$$E_1 = C(Z_L + \eta)C_v T_0 \quad (۸)$$

$$E_2 = \frac{W_s V_p^2}{2} \quad (۹)$$

$$E_3 = C(Z_L + \eta) \frac{V_p^2}{6} \quad (۱۰)$$

$$E_4 = C(Z_L + \eta)C_v T \quad (۱۱)$$

به طوری که E_1 انرژی شیمیایی و حرارتی تولید شده، E_2 انرژی انتقالی به نارنجک، E_3 انرژی جنبشی گازهای حاصل از احتراق، E_4 انرژی داخلی گازهای حاصل از احتراق، C_v ظرفیت حرارتی در حجم ثابت، T_0 دمای آدیاباتیک شعله، T دمای لحظه‌ای باروت، W_s وزن گلوله و V_p سرعت لحظه‌ای گلوله هستند. معادله حالت نوبل-آبل در این بخش به شکل معادله (۱۲) خواهد بود. در محفظه پرفشار به دلیل حجم ثابت محفظه و فشار بالای آن می‌توان دمای لحظه‌ای را برابر دمای شعله باروت در نظر گرفته و عبارت $\frac{T}{T_0}$ را برابر یک فرض کرد.

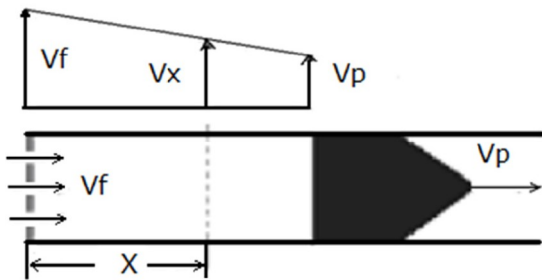
به دلیل حرکت نارنجک، حجم محفظه کم‌فشار نسبت به محفظه پرفشار خیلی بیشتر است. با افزوده شدن حجم، کاهش دما بیشتر شده

ج- افزایش فشار محفظه دوم در اثر عبور سیال از سوراخ‌های حائل بین دو محفظه سبب افزایش دما می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۵].

$$\dot{T}_3 = \frac{\gamma-1}{(1-\delta\rho)(\eta+Z_L)} \frac{d(\eta+Z_L)}{dt} \quad (23)$$

تغییر دمای نهایی، حاصل از جمع عوامل فوق خواهد بود.

$$\dot{T} = \dot{T}_1 + \dot{T}_2 + \dot{T}_3 \quad (24)$$



شکل ۲- فرضیه لاگرانژ جهت محاسبه سرعت گازهای پشت نارنجک در حال حرکت.

۳-۴- معادلات جریان گذرنده از سوراخ‌ها

جریان مخلوط همگن گذرنده از سوراخ‌های دیواره حائل دو محفظه به فشار محفظه اول و فشار منتهی‌الیه محفظه دوم بستگی دارد. فشار بحرانی انتهای محفظه دوم از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۲].

$$P_{crit} = P_h \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (25)$$

برای محاسبه دبی جریان عبوری از سوراخ‌ها، ۲ حالت را بررسی می‌کنیم:

۱- حالتی که $P_{crit} > P_{LBR}$ باشد (فشار ورودی به محفظه دوم است). در این حالت دبی جریان عبوری ثابت و بدون ارتباط با فشار محفظه دوم می‌باشد و از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱]:

$$\dot{m}_m = \mu p_h S_h \sqrt{\frac{\gamma}{f(1-\varepsilon)} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (26)$$

به طوری که S_h مجموع سطوح مقطع سوراخ‌ها و μ ضریب خروج جریان از سوراخ‌ها است. این ضریب مطابق اطلاعات حاصل از مرجع [۱] برابر ۰/۵۳ فرض شده است. در این صورت سرعت خروج سیال از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$V_f = \sqrt{\frac{2\gamma f(1-\varepsilon)}{\gamma+1}} \quad (27)$$

۲- حالتی که $P_{crit} \leq P_{LBR}$ باشد [۱].

در شرایط خاصی که فرآیند به انتهای سوزش باروت در محفظه پر فشار نزدیک می‌شود، فشار این محفظه افت کرده و سبب می‌شود که فشار انتهای محفظه کم‌فشار بیشتر از فشار بحرانی شود. در این صورت سرعت و دبی جریان افت کرده و مرتبط با نسبت فشار محفظه‌ها تغییر می‌کند.

به طوری که γ نسبت ظرفیت گرمائی مخلوط است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\gamma = \frac{(1-\varepsilon)c_p + \varepsilon c_{pr}}{(1-\varepsilon)c_v + \varepsilon c_{pr}} \quad (19)$$

در رابطه فوق ε نسبت جرم باروت نسوخته موجود در سیال جریان یافته از سوراخ‌ها به کل جرم عبوری است که از معادله (۲۰) بدست می‌آید. در معادله (۲۰) برای محاسبه ε ، کسر جرمی گاز آزاد شده در محفظه پر فشار و کسر جرمی باروت گذرنده از سوراخ‌ها از کسر جرمی کل باروت (عدد یک) کم گردیده تا کسر جرمی باروت نسوخته موجود در محفظه پر فشار حاصل شود. با تقسیم این عدد به کسر جرمی گاز باروت موجود در محفظه، ε حاصل شده است. برای محاسبه کسر جرمی گاز موجود در محفظه نیز کافی است که کسر جرمی باروت گذرنده از سوراخ‌ها و کسر جرمی گاز عبوری از سوراخ‌ها از کسر جرمی کل باروت (عدد یک) کم گردد. یعنی ε برابر نسبت جرم باروت نسوخته به کل جرم موجود در محفظه اول محاسبه شده است. از آنجا که ε نسبت جرم باروت نسوخته موجود در سیال جریان یافته از سوراخ‌ها به کل جرم عبوری است، باید گفت: چنین فرض شده است که در هر لحظه نسبت جرم باروت گذرنده از سوراخ‌ها به کل جرم در حال عبور، با نسبت جرم باروت به کل جرم موجود در محفظه اول، یکسان است [۱].

$$\varepsilon = \frac{1-\xi - Z_h}{1-\xi - \eta} \quad (20)$$

در معادله فوق c_{pr} ظرفیت گرمائی ویژه باروت می‌باشد. در معادله (۱۳) نیاز به محاسبه دمای لحظه‌ای T می‌باشد تا امکان محاسبه P_{LA} در هر لحظه میسر گردد. جهت تعیین تغییرات دما ابتدا باید عوامل تغییر دهنده دما مشخص شده و سپس روابط حاکم ارائه گردند. ۳ عامل سبب تغییر دما در محفظه کم‌فشار می‌گردد [۵]:

الف- کار انجام شده بر روی گلوله سبب کاهش انرژی جنبشی گاز پشت گلوله و نهایتاً کاهش دمای آن می‌گردد. تغییرات دمای حاصله به صورت زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$\dot{T}_1 = \frac{-V_p A P_{LA} (\gamma_1 - 1)}{RC(Z_L + \eta)} \quad (21)$$

در رابطه فوق R ثابت مخصوص گازهای حاصل از احتراق باروت می‌باشد. ب- انرژی آزاد شده در اثر سوزش، در هر لحظه سبب افزایش دمای محفظه می‌گردد. در اثر سوزش CdZ_L گرم از باروت و ورود $C\eta$ گرم گاز از محفظه پر فشار، دمای $C(\eta + \xi + Z_L)$ گرم باروت موجود در محفظه کم‌فشار به T می‌رسد و معادله نهایی حاصل از این موازنه انرژی عبارتست از [۵]:

$$\dot{T}_2 = \frac{d(Z_L + \eta)}{dt} \frac{T_0 - T}{Z_L + \eta} \quad (22)$$

دوم است. در ابتدای ورود گازهای خروجی از محفظه اول، دمای محفظه دوم برابر دمای گازهای ورودی که همان دمای شعله است، می‌شود و طبق معادله (۲۳) در اثر افزایش فشار حاصله دما باز هم بالاتر می‌رود. تا زمانی که نارنجک کم کم حرکت کرده و فضای محفظه دوم را افزایش می‌دهد. در جدول (۲) نتایج حاصل از برنامه با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱] و نتایج حاصل از مدل ارائه شده در همان مرجع مقایسه گردیده است. مقایسه نتایج نشان دهنده انطباق خوب نتایج سرعت و فشار تنوری با نتایج تجربی و نتایج آن مرجع است. در محاسبه دمای گازهای خروجی به دلیل فرض ثابت بودن دمای گازهای پشت نارنجک دمای محاسبه شده در مرجع [۱] صحیح نمی‌باشد. همان گونه که گفته شد، در مدل حاضر، محاسبه دمای گازهای پشت نارنجک با افزودن معادله (۲۴) و اصلاح سایر معادلات ارائه شده امکان‌پذیر گردیده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۲) و شکل (۳) تغییرات ۳۰ درصدی دمای گازهای پشت نارنجک را در طول لوله، می‌توان دید. این تغییرات نشان می‌دهد که فرض ثابت بودن دمای گازهای پشت نارنجک نمی‌تواند فرض صحیحی باشد و اگر امکان پیش‌بینی دمای گازهای پشت نارنجک وجود نداشته باشد، می‌تواند به عنوان یک نقص در شبیه‌سازی مطرح گردد.

جدول ۲- نتایج فشار و سرعت تنوری و تجربی [۱].

دمای گازهای خروجی (درجه سانتی‌گراد)	سرعت دهانه (متر بر ثانیه)	PLB (بار)	Ph (بار)	پارامترهای اندازه‌گیری شده
-----	۱۸۴/۳	۱۸۷۵	۲۹۸۲	داده‌های تجربی [۱]
۲۹۰۰	۱۸۴/۲	۱۸۹۳	۳۰۳۴	نتایج حاصل از مرجع [۱]
۱۹۷۸	۱۸۴/۵	۱۸۶۰	۲۹۲۹	نتایج برنامه پس از کالیبراسیون
۱۸۸۸	۱۸۰/۳	۱۳۶۹	۲۲۵۹	نتایج برنامه بدون کالیبراسیون

در جدول (۲) مقایسه نتایج برنامه بدون کالیبراسیون با نتایج میدان نیز آمده است. کالیبراسیون برنامه با تغییر ضریب سوزش باروت انجام می‌پذیرد. ضریب سوزش برای تعیین نرخ سوزش باروت در فشارهای مختلف استفاده می‌شود. این کار جهت حذف خطاهای ناشی از تست‌های آزمایشگاهی انجام شده جهت تعیین خواص شیمیایی باروت صورت می‌پذیرد. کووالیوم، نیروی ویژه و ضرایب سوزش باروت، باید با استفاده از داده‌های بمب بالستیک تعیین شوند. فرضیاتی که در تعیین این پارامترها دخیل هستند، ایده‌آل بوده و سبب ایجاد تقریب می‌گردند. به عنوان مثال جهت تعیین ضرایب سوزش از داده‌های بمب بالستیک استفاده می‌شود. روش تعیین ضرایب به این صورت است که ابتدا با استفاده از داده‌های بمب بالستیک و انجام محاسبات ریاضی و مدل‌سازی احتراق در یک

$$\dot{m}_m = \mu p S_h \sqrt{\frac{2\gamma}{f(1-\varepsilon)(\gamma-1)}} \left[\left(\frac{P_{LBR}}{P_h} \right)^\gamma - \left(\frac{P_{LBR}}{P_h} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right] \quad (28)$$

در این حالت سرعت خروج سیال از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$V_f = \sqrt{\frac{2\gamma f(1-\varepsilon)}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{P_{LBR}}{P_h} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right] \quad (29)$$

به این ترتیب می‌توان نرخ جریان گاز باروت \dot{m} و نرخ جریان دانه‌های باروت \dot{m}_s را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\dot{m} = (1-\varepsilon)\dot{m}_m \quad (30)$$

$$\dot{m}_s = \varepsilon\dot{m}_m \quad (31)$$

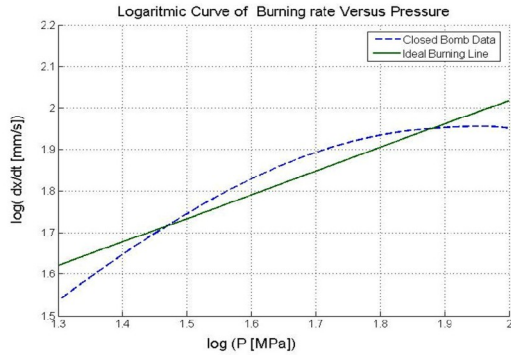
۴- برنامه کامپیوتری و اعتبارسنجی مدل

دستگاه معادلات ارائه شده جهت مدل‌سازی بالستیک داخلی محفظه‌های پرفشار-کم‌فشار شامل معادلات دیفرانسیل معمولی و معادلات جبری است. حل دستگاه معادلات دیفرانسیل با استفاده از روش رانگ کوتا مرتبه چهارم انجام شد. برنامه شبیه‌ساز حاصل با نام GIBSC قادر به پیش‌بینی منحنی دما، فشار، سرعت و سطح سوزش باروت بر اساس زمان و یا محل حرکت نارنجک در کالیبرهای مختلف می‌باشد. جهت اعتبارسنجی نتایج، خروجی برنامه برای یک نوع نارنجک ۳۰ میلی‌متری سرعت بالا با شرایط ارائه شده در جدول (۱) مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱- شرایط شلیک نارنجک ۳۰ میلی‌متری.

پارامتر ورودی برنامه	مقدار
وزن نارنجک (گرم)	۲۸۰
وزن باروت (گرم)	۲/۳
قطر سوراخ‌های دیواره حائل (میلی‌متر)	۳
تعداد سوراخ‌های دیواره حائل	۶
قطر لوله (میلی‌متر)	۳۰/۰۹
نوع باروت	M2

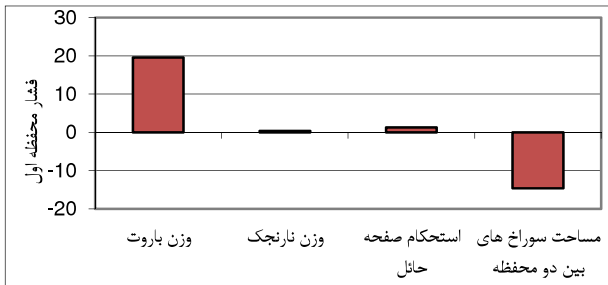
در شکل (۳) نتایج حاصل از برنامه به صورت منحنی‌های بدون بعد، ارائه شده است. مقادیر منحنی‌ها در نمودارهای فشار نسبت به حداکثر فشار محفظه اول و در نمودار سرعت نسبت به سرعت دهانه نارنجک (جدول ۲)، بدون بعد شده‌اند. دمای متوسط گازهای پشت گلوله نیز با دمای شعله باروت که در اینجا ۲۹۰۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است، بدون بعد گردیده است. در این منحنی‌ها شروع محاسبات از زمانی است که صفحه مسی داخل محفظه پرفشار سوراخ شده و مخلوط همگنی از گاز و دانه‌های باروت می‌خواهند از سوراخ‌ها جریان پیدا کنند. در منحنی دما دیده می‌شود که در لحظات اولیه خروج گازها، دمای محفظه دوم از دمای شعله باروت فراتر رفته است. این مسئله به دلیل حجم کم محفظه



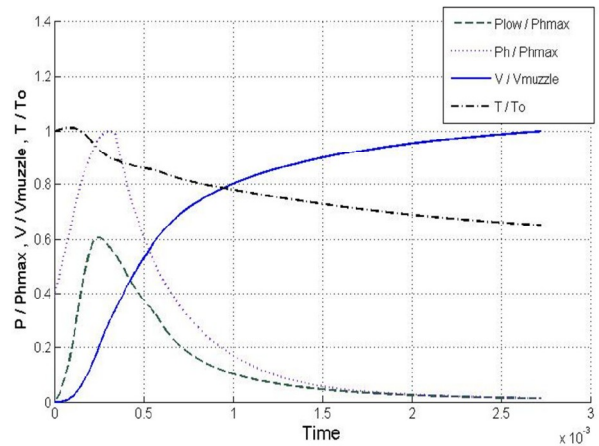
شکل ۴- مقایسه منحنی لگاریتمی سرعت سوزش بر حسب فشار منتج از داده‌های بمب بالستیک با معادله مورد استفاده در مدل بالستیک داخلی.

محفظه بسته، منحنی فشار- زمان خروجی دستگاه به منحنی لگاریتمی نرخ سوزش- فشار تبدیل می‌شود. این منحنی لگاریتمی چنانچه با لگاریتم معادله (۲) که معادله یک خط است و در رابطه (۳۲) آمده است مقایسه شود، ضرایب سوزش n و B حاصل می‌شوند. شکل (۴) نتایج نهایی تحلیل داده‌های بمب بالستیک، برای باروت مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این نتایج از برنامه CBDA که در مرجع [۱۰] ارائه شده، استخراج گردیده است. همان‌گونه که از شکل (۴) پیداست رفتار احتراقی باروت دقیقاً با معادله سوزش مورد استفاده در مدل ارائه شده یکسان نیست و این مسئله سبب تقریب نتایج می‌گردد و لزوم کالیبراسیون نتایج را جهت تطبیق با داده‌های تجربی اثبات می‌نماید.

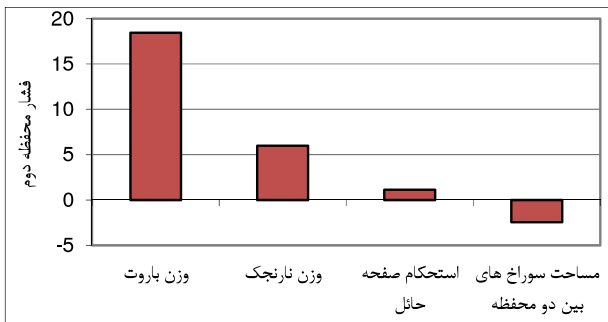
$$\text{Log} \frac{dx}{dt} = \text{Log} B + n \text{Log} P \quad (32)$$



(الف)



شکل ۳- نتایج حاصل از برنامه برای ورودی‌های جدول (۱).



(ب)



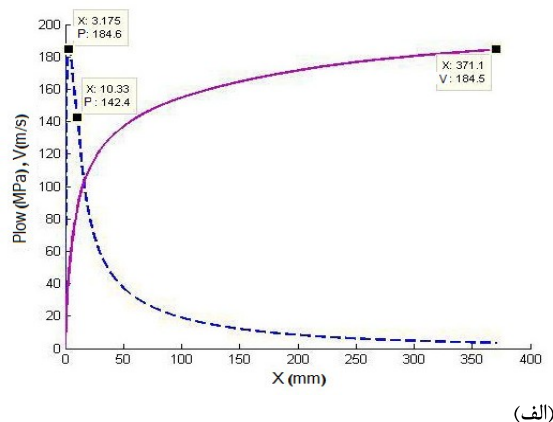
(ج)

شکل ۵- الف- درصد تغییر فشار محفظه اول با افزایش ۱۰ درصدی پارامترها
ب- درصد تغییر فشار محفظه دوم با افزایش ۱۰ درصدی پارامترها ج- درصد تغییر سرعت دهانه با افزایش ۱۰ درصدی پارامترها.

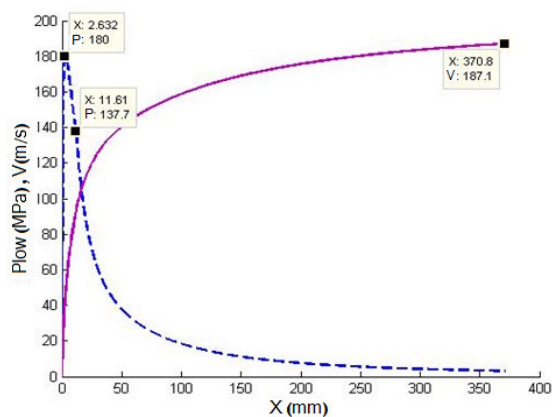
به طور کلی باید گفت چنانچه مدل‌سازی به صورتی انجام پذیرفته باشد که بتوان با یک ضریب کالیبراسیون با دقت مناسبی به مقادیر فشار ماکزیمم محفظه‌ها و سرعت دهانه تجربی رسید و این ضریب با تغییر پارامترهای ورودی برای باروت خاص و سیستم سلاح تغییر نکند، می‌توان گفت که رفتار بالستیکی به درستی شبیه‌سازی شده است. چون مدل توانسته است ارتباط بین فشار محفظه‌ها و سرعت دهانه را به درستی برقرار نماید به طوری که با اعمال یک فاکتور اصلاحی برای ضریب سوزش باروت، ماکزیمم هر سه منحنی، بر داده‌های تجربی منطبق می‌شود. در تحقیق حاضر جهت کالیبراسیون نرخ سوزش از ضریب $1/0.6$ استفاده شده است. به طوری که ضریب نمائی سوزش از 0.1865 به 0.1917 تغییر یافته است.

جهت بررسی تأثیر پارامترهایی نظیر استحکام صفحه حائل، وزن گلوله، سطح سوراخ‌های صفحه حائل و وزن باروت بر بالستیک داخلی سلاح‌های دو محفظه‌ای از نتایج برنامه برای افزایش ۱۰ درصدی هر یک از این پارامترها استفاده شده است. این نتایج در نمودارهای شکل (۵) آورده شده‌اند.

دهانه نارنجک گردیده است. نتیجه‌ای که از این بحث می‌توان گرفت این است که هر چه مساحت سطح سوراخ‌ها بیشتر باشد، بهتر است. زیرا حداکثر فشار محفظه‌ها کاهش یافته و سرعت دهانه افزایش می‌یابد. حال این سوال پیش می‌آید که چرا طراحان گلوله حداکثر سطح ممکن برای سوراخ‌ها که به تک محفظه‌ای شدن نارنجک می‌انجامد را در نظر نمی‌گیرند. در جواب این مسئله باید گفت که یک سطح فشار حداقلی برای محفظه اول لازم است تا آغازگری باروت به طور کامل انجام پذیرد. آغازگری ناقص سبب کاهش سرعت دهانه و ایجاد باروت نسوخته داخل سلاح می‌شود. همچنین نیروی لازم جهت خروج پوک نارنجک شلیک شده و مسلح شدن سلاح، متناسب با فشار محفظه اول می‌باشد و چنانچه در اثر افزایش سطح سوراخ‌ها فشار محفظه اول از یک حدی کمتر شود، بارگذاری نارنجک و مسلح شدن اتوماتیک سلاح دچار مشکل می‌شود. به همین دلیل نمی‌توان فشار محفظه اول را از حد مجاز کاهش داد. حال اگر کسی بخواهد با افزایش باروت این کاهش فشار را جبران کند و افزایش سرعت هم داشته باشد، سبب افزایش لگد سلاح می‌شود که این مسئله کاربرد سلاح را با استفاده از پایه‌های تعبیه شده بر روی خودروهای سبک ناممکن می‌سازد. در مجموع می‌توان گفت که با در نظر گرفتن محدودیت‌های طراحی می‌توان با تغییر این پارامترها به اهداف مورد نظر رسید.



(الف)



(ب)

شکل ۶- الف - تغییرات فشار محفظه دوم و سرعت نارنجک بر حسب مکان بدون تغییر مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه ب- تغییرات فشار محفظه دوم و سرعت نارنجک بر حسب مکان با افزایش ۱۰ درصدی مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه.

نتایج نشان می‌دهند که بیشترین تأثیر در فشار محفظه‌ها و سرعت دهانه مربوط به تغییر وزن باروت و کم‌ترین تأثیر مربوط به تغییر استحکام صفحه حائل است. افزایش مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه بر فشار محفظه اول تأثیر زیادی دارد به طوری که با تغییر (۱۰) درصدی مساحت، ۷/۵ درصد کاهش فشار اتفاق افتاده است. از آنجا که طبق معادله (۲۴) در بیشتر زمان شلیک، دبی خروجی از محفظه اول تنها به فشار محفظه اول وابسته است و بقیه پارامترهای تعیین کننده دبی جریان اعداد ثابتی هستند، با افزایش سطح سوراخ‌ها، به همان نسبت دبی خروجی افزایش یافته و این مسئله سبب کاهش فشار می‌گردد. این مسئله همچنین سبب گردیده است که افزایش وزن نارنجک تأثیر چندانی بر فشار محفظه اول نداشته باشد. این در حالی است که در محفظه دوم به دلیل کاهش شتاب نارنجک در اثر افزایش وزن آن، نرخ افزایش حجم در پشت نارنجک کاهش یافته و در نتیجه فشار محفظه دوم افزایش ۵/۹ درصدی دارد. در مجموع می‌توان گفت: با افزایش هم‌زمان وزن باروت و مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه، می‌توان بدون افزایش فشار محفظه اول، فشار محفظه دوم و سرعت دهانه را افزایش داد.

شکل‌های (۵) نشان می‌دهند که وزن باروت بیشترین تأثیر بر سرعت و فشار را دارا می‌باشد. با افزایش ۱۰ درصدی باروت، سرعت دهانه ۵ درصد افزایش می‌یابد و فشار محفظه اول و دوم به ترتیب ۱۹ و ۱۸ درصد افزایش خواهند داشت. پارامتر موثر دوم وزن نارنجک می‌باشد که با افزایش ۱۰ درصدی آن کاهش ۴ درصدی سرعت و افزایش ۱ و ۶ درصدی فشار در محفظه‌های اول و دوم مشهود می‌باشد.

در نمودارهای فوق با افزایش مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه، کاهش فشارهای حداکثر در دو محفظه و افزایش سرعت دهانه اتفاق افتاده است. در نظر اول چنین مسئله‌ای نوعی تناقض در ذهن ایجاد می‌کند. برای توضیح این مسئله باید گفت: کار انجام شده روی گلوله به سبب فشار، سبب ایجاد انرژی جنبشی در گلوله می‌شود و می‌توان نوشت:

$$\int P dx = \int \frac{F dx}{A} = \frac{m}{2A} V^2 \quad (۳۳)$$

در رابطه فوق P فشار، X مسیر طی شده تحت این فشار، F نیروی ناشی از فشار وارد بر گلوله، A سطح مقطع داخلی لوله و V سرعت دهانه گلوله هستند. مطابق معادله (۳۳) سطح زیر نمودار فشار-مکان گلوله متناسب با مربع سرعت است. لذا چنانچه سطح زیر نمودار فشار-مکان طوری تغییر کند که با افزایش سطح و کاهش فشار حداکثر همراه باشد، افزایش سرعت دهانه با کاهش فشار حداکثر مشاهده می‌گردد. شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) این مسئله را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص شده است، محل اتمام سوزش باروت در این دو نمودار متفاوت است. با اتمام سوزش باروت، افت فشار با شیب بیشتری ادامه می‌یابد. لذا هر چه محل اتمام سوزش باروت جلوتر باشد گستردگی نمودار کمتر شده و سطح زیر نمودار کمتر می‌شود و در نتیجه سرعت دهانه کمتر خواهد بود. بر این اساس دلیل افزایش سرعت دهانه در نمودار ۶-ب بر خلاف کاهش نوک فشار این است که در نمودار ۶-ب محل اتمام سوزش باروت از ۱۰/۳۳ میلی‌متر به ۱۱/۶۱ میلی‌متر رسیده است و این مسئله سبب گسترده‌تر شدن نمودار فشار-مکان و در نتیجه افزایش سرعت

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اصول و معادلات حاکم بر محفظه‌های پرفشار-کم‌فشاری که در سلاح‌های نارنجک مورد استفاده قرار می‌گیرند، بیان گردید. نوآوری این تحقیق در افزودن قابلیت پیش‌بینی دمای لحظه‌ای گازهای پشت نارنجک در کنار فرض دوفازی بودن سیال عبوری از سوراخ‌های بین دو محفظه می‌باشد. سیستم معادلات دیفرانسیل حاصل در کنار سایر معادلات جبری به روش رانگ کوتاه حل و نتایج آن‌ها با حل مثال از یک نارنجک ۳۰ میلی متری مورد ارزیابی قرار گرفت. آن دسته از پارامترهای ورودی که سبب ایجاد تقریب در نتایج می‌شدند، شناسایی گردیده و نحوه حذف تقریب‌ها و انطباق نتایج برنامه با داده‌های تجربی بیان شد. اعتباردهی نتایج با استفاده از نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱] انجام پذیرفت. جهت بررسی تأثیر وزن نارنجک و باروت، استحکام صفحه حائل و مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه، از نتایج برنامه با افزایش ۱۰ درصدی هر یک از این پارامترها استفاده گردید. نتایج نشان دادند که افزایش وزن نارنجک تأثیر چندانی بر فشار محفظه اول ندارد و با افزایش مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه کاهش فشار و افزایش سرعت دهانه اتفاق می‌افتد. اگر فشار از میزان مشخصی کمتر شود عملیات بارگذاری خودکار گلوله در سلاح دچار اشکال می‌شود و به همین دلیل نمی‌توان مساحت سوراخ‌ها را از حد مشخصی بیشتر کرد. از آنجا که افزایش وزن باروت سبب افزایش فشار محفظه‌ها می‌شود، می‌توان گفت با افزایش هم‌زمان وزن باروت و مساحت سوراخ‌های بین دو محفظه، می‌توان بدون افزایش فشار محفظه اول، فشار محفظه دوم و سرعت دهانه را افزایش داد.

مراجع

- [3] Toit, P. A. "A Two Dimensional Interior Ballistics Model for Modular Solid Propellant Charge"; 19th Int. Symp. on Bal., Switzerland, 2001, pp. 105-112.
- [4] Vasil, T.; Mrussu, G. "Studies and Researches Concerning Interior Ballistics of Weapons with Double Chambers"; 4th Conference on Barrel Weapon Systems, Brno, 1999, pp. 143-150
- [5] Corner, J. "Theory of Interior Ballistics of Guns", Wiley, New York, 1950
- [6] Krier, H.; Michael, J. "An Introduction of Gun Interior Ballistics and a Simplified Ballistic Code"; Univ. of Illinois, 1978, pp. 89-102
- [7] Klaus A. H.; Steve T. "Computational Fluid Dynamics Volume 1"; Engineering Education System, Wichita Kansas 67208-1078 USA, 2000, pp. 113-118
- [8] Nusca, M. "High-Performance Computing and Simulation for Advanced Armament Propulsion"; US Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, Technical Report ARL-TR-3215, June 2004, pp. 14-22
- [9] Woody, J. "Engineering Design Handbook-Gun Series-Interior Ballistics of Guns"; Army Material Command, Pamphlet AMCP 706-150, Feb. 1964.
- [۱۰] سیفی‌پور، عباس، فاضلی، حمید "ارائه کد CBDA جهت تحلیل داده‌های بمب بالستیک" هشتمین کنفرانس بین‌المللی هوافضا، صفحه ۲۵-۳۲، ۱۳۸۷.
- [11] Carlucci, D.; Jacobson, S. "Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition"; Taylor and Francis Group, New York, 2008, pp. 318-329
- [12] Robert D.; Oscar, B. "Fundamentals of Gas Dynamics"; Department of Aeronautics Naval, Postgraduate School, Monterey California, 2002.

- [1] Jaramaz, S.; Mikovic, D. "Interior Ballistic Principle of High/Low Pressure Chamber in Automatic Grenade Launchers"; 19th Int. Symp. on Bal., Switzerland, 2001, pp. 203-215.
- [2] Struble, R. A. "A Study of the Interior Ballistic Equation"; Arch. Rational Mech. Anal. 1959, 3, 43-52.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.