

بررسی تحلیلی تاثیر ابعاد خان بر بالستیک داخلی سلاح ها

هاشم بابایی*

مجید علی طاوولی

میلاذ منصوری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

در این تحقیق به صورت تحلیلی و بر مبنای معادلات موازنه انرژی، به بررسی اثرات ابعاد خان بر سرعت‌های خطی و زاویه‌ای گلوله پرداخته شده است. در این روش، لوله سلاح به‌عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده است و بیشینه فشار ناشی از انفجار ماده منفجره، انرژی ورودی سیستم را تأمین می‌کند. برای محاسبه سرعت گلوله، همچنین سرعت گلوله با استفاده از محاسبه انرژی‌های ورودی به سیستم همچون انرژی ناشی از اصطکاک بین خان و گلوله و همچنین در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بالستیک داخلی قابل محاسبه است. نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده نشان داد که نرخ چرخش خان و طول لوله دو پارامتر بسیار مهم هستند که سرعت گلوله را در سلاح تحت تأثیر قرار می‌دهند. افزایش مقدار این دو پارامتر در هر سلاحی، منجر به افزایش سرعت گلوله تا محدوده معینی از مقادیر گردید و بعد رسیدن به این محدوده تأثیر چندانی بر سرعت گلوله مشاهده نشد. همچنین مقایسه بین نتایج تحلیلی به‌دست‌آمده با نتایج تجربی و عددی موجود در منابع، انطباق بسیار مطلوبی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: توازن انرژی، ابعاد خان، فشار ماکزیمم انفجار، بالستیک داخلی.

Analytical investigation of the rifling dimension effect on the inner ballistic of weapons

H. Babaei

M. Alitavoli

M. Mansouri

Depatmen of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran

Depatmen of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran

Depatmen of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

In this study, an analytical method based on energy balance equations has been presented to investigate the effects of rifling dimensions on the axial and angular velocities of the bullet. In this method, gun barrel has been considered as a control volume system that maximum pressure due to the detonation of explosive provides its input energy. Also, bullet velocity can be obtained using the calculation of absorbed energy terms by the system like energy due to friction between rifling and bullet along with taking into account the inner ballistic effective parameters. The obtained results of the presented model revealed that rifling twist-rate and barrel length are two important parameters which influence bullet velocity. Increasing these two effective parameters resulted in increasing bullet velocity over a particular range of values and after that has no important effect on bullet velocity. Comparison of the obtained theoretical results with previous experimental and numerical results in the literature showed a surprising agreement.

Keywords: energy balance, rifling dimensions, maximum pressure due to detonation, Inner ballistic.

چون قطر گلوله دقیقه با جداره داخلی لوله در قسمت فرورفتگی برابر است، بنابراین گاز باروت نمی‌تواند از کنار گلوله عبور کرده و قبل از گلوله از دهانه لوله خارج می‌شود و در نتیجه همه فشار حاصله صرف راندن گلوله به جلو می‌شود. محققین علم بالستیک داخلی تلاش می‌کنند پارامترهای طراحی سلاح و مهمات را به گونه‌ای بیابند که سرعت دهانه مورد نیاز تأمین شود. مدل سازی تحلیلی فرآیند بالستیک داخلی که تمامی پارامترهای تأثیرگذار را در خود جای داده باشد، می‌تواند تصویر روشنی از پاسخ نهایی فرآیند را پیش‌بینی کند.

کامیل لودک فرانسوی در سال ۱۸۹۵ با استخراج معادلاتی، رابطه سرعت گلوله را توسط یک منحنی هذلولی شکل توصیف کرده است. در این معادلات افزایش طول لوله، افزایش سرعت گلوله را سبب می‌شود [۱]. ریزال بر پایه محاسبات بالستیک داخلی روی موازنه انرژی در زمان شلیک و با در نظر گرفتن درصدی از خرج مواد محترقه که در زمان شلیک می‌سوزد، رابطه‌ای را بین انرژی شیمیایی آزاد شده با انرژی داخلی گازهای منفجره ارائه کرده است [۲].

۱- مقدمه

بالستیک داخلی هنگامی که یک سلاح مسلح شده است هنگامی که ماشه را می‌کشیم یا می‌چکانیم و نوک سوزن به چاشنی ضربه زده و آن را که روی سندان ته فشنگ جا گرفته است، محترق می‌سازد. این نکته شایان توجه است که بدانیم باروت برخلاف آنچه اغلب تصور می‌شود، منفجر نمی‌شود، بلکه به سرعت آتش می‌گیرد و یا در واقع به سرعت می‌سوزد و در نتیجه فشار گاز زیادی ایجاد می‌کند. هنگامی که این فشار گاز بسته به نوع فشنگ به تراکم معینی رسید، گلوله را از جایش می‌کند و آن را به درون لوله می‌راند و سپس به بیرون پرتاب می‌کند. تحلیل بالستیک داخلی سلاح و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن، از گذشته دارای اهمیتی ویژه بوده است. هنگامی که گلوله، در اثر فشار حاصله از گاز باروت، در درون لوله به حرکت درمی‌آید، با برجستگی‌های مارپیچی درون لوله درگیر می‌شود و در عین حال با قسمت‌های دیگر جدار داخلی لوله که با آن هم قطر است تماس است.

به تنش‌های شعاعی و محیطی و سرعت شعاعی استوانه با در نظر گرفتن نرخ کرنش محاسبه گردید [۹].

طالعی در سال ۲۰۰۳ منحنی‌های عملکردی را از روش حجم محدود و با حل معادلات حاکم بر بالستیک داخلی، استخراج کرده است که نتایج آن‌ها به نتایج تجربی حاصل از آزمایش مطابقت قابل قبولی دارد [۱۰].

معینی در سال ۲۰۰۴ با روش الگوریتم ضمنی مک کورمک به تحلیل جریان دوفازی محترق در تفنگ پرداخته است [۱۱].

سوختن در سطح پیشرانه جامد و الزاماً عمود بر سطح آن روی می‌دهد. میزان پس‌روی نسبت به زمان را نرخ سوزش می‌نامند. از آنجاکه روش‌های تحلیلی مانند روش کرنر، تنها قادر به تحلیل پیشرانه‌ای هستند که رابطه فشار گاز و نرخ سوزش آن خطی است، بنابراین روشی که توانایی تحلیل پیشرانه‌ای با نرخ سوزش غیرخطی را دارا باشد، بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

در سال ۱۹۶۲ بایر، برای تحلیل پیشرانه‌های استوانه‌ای از معادله انرژی با در نظر گرفتن اتلاف‌ها استفاده کرده است و با ارائه الگوریتم صریحی که در آن دیگر نیاز به حل همزمان معادلات دیفرانسیل غیرخطی نیست، متغیرهای بالستیکی را در هر مرحله محاسبه نموده است [۱۲].

ویل کرسن تأثیرات پارامتری اولیه پرتاب بر انرژی جنبشی و عملکرد شلیک را به وسیله یک مدل عددی که فعل و انفعال بین گلوله و لوله تفنگ را توضیح می‌دهد بررسی کرده است [۱۳].

در اکثر تحقیقات گذشته، محوریت بر احتراق و نحوه ی پروفیل فشار قرار گرفته است. در مدل ارائه شده، شبیه سازی بالستیک داخلی سلاح با در نظر گرفتن معادله ای ساده برای تغییرات فشار انجام شده و تمرکز روی اثر خان بر سیستم در اولویت قرار گرفته و با استفاده از معادلات توازن نیرو، ممنتوم و انرژی به مدل سازی سیستم پرداخته شده است.

۲- مدل سازی تحلیلی

به منظور حل تحلیلی سیستم، فرضیاتی بر مدل اعمال شده است. در معادلات ارائه شده، بر خلاف مدل های قبلی از فشار بیشینه در لحظه انفجار به جای انرژی تولیدشده از انفجار مواد محترقه استفاده شده است. گازهای ناشی از انفجار، ایده آل و لوله سلاح، حجم کنترل در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه فرآیند در مدت زمان بسیار کمی انجام می‌گیرد و با توجه به اینکه در هنگامی که فشار بیشینه شده، دما نیز در بالاترین سطح خود قرار دارد، از تغییرات دما طی فرآیند، صرف نظر شده است.

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P(x)V(x)}{T(x)} \quad (1)$$

در معادله (۱) که برای گازهای ایده‌آل به کار می‌رود، $P(x)$ فشار گلوله در هر نقطه از لوله، $V(x)$ حجم پشت گلوله در هر نقطه از لوله، V_0 حجم اولیه محفظه گلوله و P_0 فشار ناشی از انفجار است.

با فرض در نظر گرفتن دما T در مدت زمان فرآیند معادله (۱) بصورت زیر ساده سازی می‌شود

$$P_0 V_0 = P(x)V(x) \quad (2)$$

کرنر در سال ۱۹۵۰ برای نخستین بار با استفاده از فرضیاتی ساده، مدل‌های بالستیکی را ارائه کرده است. در روابط تحلیلی ارائه شده توسط کرنر، فرآیند بالستیکی قبل از سوختن کامل پیشرانه، به صورت هم‌دما فرض شده و بعد از اتمام سوخت، به صورت آدیاباتیک برگشت‌پذیر در نظر گرفته شده است [۳].

مدل‌سازی‌های انجام شده بر روی جریان مواد پیشرانه در لوله تفنگ، به صورت تک‌فازی گاز و دو فازی گاز و جامد است. تحلیل‌های صفر بعدی، توزیع چگالی مواد پیشرانه و گازها را در پشت گلوله کاملاً یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که تحلیل‌های یک‌بعدی توزیع چگالی را در طول لوله، متغیر و تحلیل‌های دوبعدی توزیع آن را در هر دو راستای شعاعی و طولی، غیریکنواخت در نظر می‌گیرند. مدل‌سازی دوفازی یک‌بعدی، اولین بار توسط گگ در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است [۴].

مویبیک در سال ۱۹۸۱ علاوه بر در نظر گرفتن مدل یک‌بعدی گگ، شکل‌گیری امواج فشاری و پخش شعله را شبیه‌سازی نموده است که بعدها در سال ۱۹۹۸ نسخه ارتقاء یافته آن در صنایع تسلیحاتی مورد استفاده قرار گرفت [۴]. در این مدل ارتقاء یافته به جای فرمول تراکم ناپذیر گگ از فرمول تراکم پذیر چند فازی بایر-نازیانو استفاده شده است.

در گذشته به دلیل فقدان وجود توضیحات ریاضی از روند طراحی‌ها، بسیاری از لوله‌های اسلحه به صورت آزمون و خطا ساخته می‌شدند. از این رو اغلب مهندسين و طراحانی که در این زمینه فعالیت می‌کنند با یک ساده‌سازی معقول لوله‌ی سلاح را به عنوان یک مخزن جدار ضخیم انتها باز در نظر می‌گیرند که در آن یک ماده‌ی منفجره با ایجاد فشار آبی بر دیواره باعث به وجود آمدن تنش و تغییر شکل می‌شود که نهایتاً به وسیله‌ی تحلیل استاتیکی یا دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این زمینه مقالاتی منتشر شده است. از جمله سیلندرهای جدار ضخیم انتها باز ($\sigma_z = 0$) می‌توان به لوله‌ی سلاح، پوسته‌ی راکت، لوله‌کشی‌ها تحت فشار بالا، سیلندر پیستون تحت فشار بالا و بدنه‌ی پمپ‌های تحت فشار بسیار بالا اشاره کرد [۵].

تاکنون چند حل نظری رضایت‌بخش برای سیلندر جدار ضخیم انتها باز، بر اساس معیارهای ترسکا و فون میسر، به دست آمده که برای کاربردهای مهندسی قابل اطمینان و مناسب است. یک حل بسته برای مؤلفه‌های تنش توسط نادای با استفاده از یک روش متغیر تقریبی و نظری تغییر شکل هینکی ارائه شد [۶].

مجموعه‌ای از عبارات تحلیلی بر پایه‌ی روابط تجربی حاصل از انجام آزمایش‌ها برای مؤلفه‌های تنش و جابجایی الاستوپلاستیک توسط دیوید سون به دست آمد [۷].

پی‌سی‌تی‌چن با استفاده از روش بهبودیافته‌ی متغیر تقریبی نادای و مطابق با تئوری تغییر شکل هتکی و تئوری سیلان پرانتل رویس، به دو راه‌حل تحلیلی ریاضی قوی برای کرنش‌ها و جابجایی‌ها دست‌یافت [۸].

باقری و همکارش در سال ۱۳۹۳ مقاله‌ای باهدف استخراج مدل ریاضی انبساط استوانه‌ی جدار ضخیم ایزوتروپیک آلومینیومی حاوی ماده‌ی منفجره‌ی تی‌ان‌تی ارائه کردند که در آن رفتار ماده‌ی منفجره به صورت معادله‌ی JWL در نظر گرفته شده بود. در نتیجه روابط مربوط

$$\omega = \frac{2\pi V}{Rc} \quad (9)$$

با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۷) رابطه زیر استخراج می شود

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_p} [F(x) - R(x)z] \quad (10)$$

$F(x)$ بعنوان نیروی گاز روی پایه گلوله تعریف شده است [۹].

$$F(x) = P(x) \left[\frac{\pi}{4} c^2 + nhb \right] \quad (11)$$

انرژی تلف شده ناشی از اصطکاک W_F به دو بخش انرژی تلف شده توسط اصطکاک بین گلوله و لوله اصطکاک گلوله و خان تقسیم بندی می شود.

$$W_F = \mu_0 \int_0^x R(x) dx \quad (12)$$

$$W_F = W_f + W_R \quad (13)$$

$$W_f = \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p (Rc^2 + 4j_p \pi z)} \int_0^x P(x) \frac{\pi}{4} c^2 dx \quad (14)$$

$$W_R = \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p (Rc^2 + 4j_p \pi z)} \int_{x_{sr}}^x P(x) nbh dx \quad (15)$$

انرژی ذخیره شده در گلوله به دو بخش تقسیم می شود.

$$E = E_k + E_t \quad (16)$$

E_k انرژی ذخیره شده جنبشی گلوله و E_t انرژی جنبشی دورانی گلوله است.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (17)$$

$$E_t = \frac{1}{2} J_p \omega^2 \quad (18)$$

حال با استفاده از توازن انرژی رابطه (۱۹) نوشته می شود.

$$W_{CG} - E_k - E_t - W_f - W_R = 0 \quad (19)$$

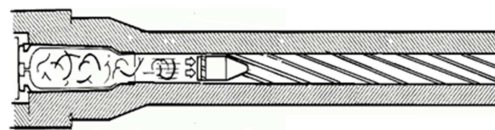
$$P_0 V_0 \ln \frac{V_x}{V_0} - \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{2\pi}{rc} \right)^2 \right) v^2 - \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p (Rc^2 + 4j_p \pi z)} \int_0^x P(x) \frac{\pi}{4} c^2 dx - \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p (Rc^2 + 4j_p \pi z)} \int_{x_{sr}}^x P(x) nbh dx = 0 \quad (20)$$

در نهایت با حل معادله فوق مقدار سرعت گلوله در هر نقطه از طول لوله به دست آمده و با جایگذاری این سرعت در رابطه (۹) مقدار سرعت زاویه ای مشخص می شود.

۳- صحت سنجی مدل تحلیلی و ارائه نتایج

به منظور صحت سنجی نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در بخش قبلی، از نتایج تجربی موجود در مراجع [۹ و ۱۸] استفاده می شود. لازم به ذکر است که اطلاعات کامل و دقیق برای پارامترهای اولیه طراحی سلاح های متفاوت و تست های جامع تجربی به دلیل مسائل نظامی و امنیتی در اختیار قرار ندارد، با توجه به توضیحات مذکور، مقدار پارامترهای بالستیکی سه سلاح در جدول (۱) جمع آوری شده است. در جدول شماره (۲) مقادیر تجربی و تحلیلی مربوط به سرعت

حال با توجه به شکل ۱ و در نظر گرفتن حرکت گلوله در مسیر، رابطه حجم به صورت رابطه (۳) تغییر خواهد کرد:



شکل ۱- شماتیک لوله سلاح

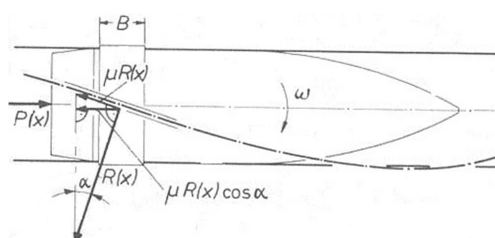
$$V(x) = V_0 + \frac{\pi}{4} c^2 x \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۲) برای رابطه تغییرات فشار در طول لوله رابطه زیر بدست می آید.

$$P(x) = \frac{P_0 V_0}{v_0 + \frac{\pi}{4} c^2 x p} \quad (4)$$

کار انجام شده توسط گاز بر روی گلوله تفنگ از انتگرال زیر قابل محاسبه است.

$$w_{CG} = \int_{V_0}^{V_x} P dv = nRT \ln \frac{V_x}{V_0} = P_0 V_0 \ln \frac{V_x}{V_0} \quad (5)$$



شکل ۲- نیروهای وارد بر گلوله [۱۴]

با توجه به شکل ۲ برای تعادل نیروها در راستای محور x و تعادل دورانی حول این محور معادلات (۶) و (۷) بیان می شود [۱۵]

$$\sum f_x = 0 \rightarrow F(x) - R(x) [\sin \alpha + \mu \cos \alpha] \frac{c}{2} m_p \frac{dV}{dt} = 0 \quad (6)$$

که در این معادله c قطر گلوله، μ ضریب اصطکاک، m_p جرم پرتابه، V سرعت خطی گلوله، $R(x)$ نیروی اصطکاک خان، α زاویه خان و $F(x)$ نیروی گاز روی پایه گلوله است.

$$\sum M_x = 0 \rightarrow R(x) [\cos \alpha - \mu \sin \alpha] \frac{c}{2} - J_p d\omega = 0 \quad (7)$$

J_p ممان اینرسی حول محور طولی و ω سرعت زاویه ای گلوله است. که ممان اینرسی حول محور طولی برای گلوله های معمولی برابر

$$J_p = \left(\frac{0.73d}{2} \right)^2 m_p \quad (16)$$

به دلیل کوچک بودن زاویه خان از تقریب های $\cos \alpha \cong 1$ و $\mu \sin \alpha \cong 0$ استفاده می شود

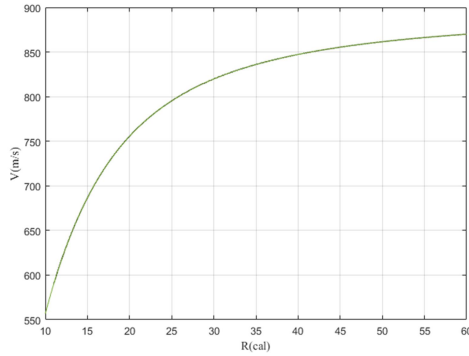
پس از ساده سازی معادله زیر استخراج می شود:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_p} [F(x) - R(x)z] \quad (8)$$

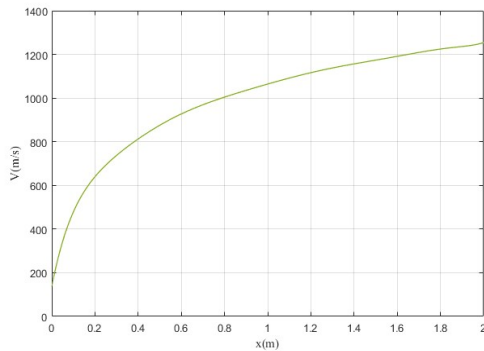
که در آن $z = \sin \alpha + \mu \cos \alpha$ است.

رابطه ای که برای سرعت دورانی توسط مک کوی [۱۷] ارائه شده است بصورت معادله (۹) بیان می شود که در آن R نرخ چرخش است.

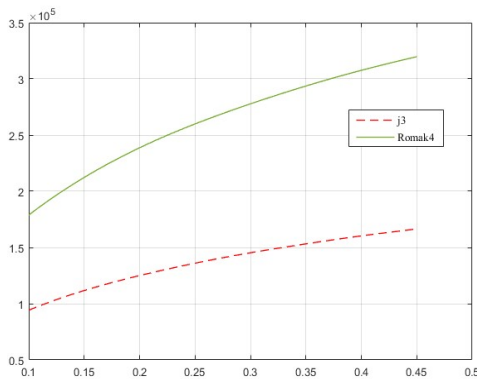
خروجی گلوله برای سه سلاح با هم مقایسه شده است.



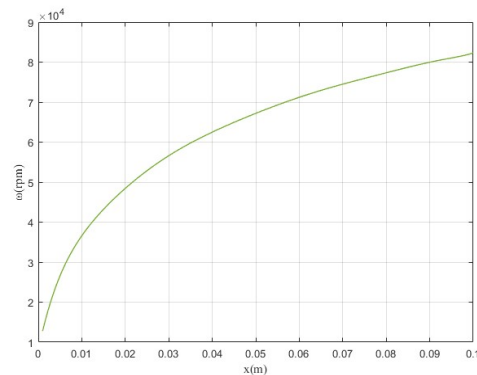
شکل ۳- تغییرات سرعت نسبت به گام خان



شکل ۴- تغییرات سرعت نسبت به طول لوله



شکل ۵- تغییرات سرعت زاویه ای نسبت به طول لوله اسلحه کلت



شکل ۶- تغییرات سرعت زاویه ای نسبت به طول لوله در دو سلاح j3 و romak3

جدول ۱- مشخصات سلاح ها

	رماک ۳	کلت	ژ ۳
C(mm)	۷/۶۳	۹	۷/۶۳
L(mm)	۶۳۰	۹۸	۴۵۰
$L_{sr}(mm)$	۵۷۰	۹۰	۳۰۵
m(gr)	۹/۴۵	۹/۴۵	۹/۴۵
n	۴	۶	۴
R(cal)	۱۸	۲۸	۴۰
$V(\frac{m}{s})$	۸۳۰	۳۵۰	۸۳۰
$b_g(mm)$	۳/۸	۲/۵۰۴	۴/۲
h(mm)	۰/۱۱۲	۰/۱۱۷	۰/۱۰۵
μ	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۵
$p_0(Mpa)$	۳۲۰	۲۴۰	۳۲۰
$V_0(cm^3)$	۱۱/۷۲۲۸	۲/۴۶۱۸	۱۱/۷۲۲۸

جدول ۲- مقایسه سرعت خروجی سلاح بین مدل و منابع تجربی

خطا	تحلیلی	تجربی	سرعت خطی
٪+۰/۳۹	۸۳۶/۷۳	۸۳۰	ژ ۳
٪-۱/۲۴	۳۴۵/۶۵	۳۵۰	کلت
٪-۰/۵۶	۸۲۳/۶۴	۸۳۰	رماک ۳

با توجه به نمودار شکل ۳ با افزایش مقدار گام، سرعت نهایی گلوله افزایش یافته است ولی بیشترین تغییرات سرعت مربوط به گام ۸ تا ۴۰ کالیبر است و پس از این محدوده، نرخ تغییرات کاهش یافته و تأثیر چندانی بر سرعت پایانی گلوله ندارد.

با توجه به شکل ۴ افزایش طول لوله، افزایش سرعت نهایی گلوله را در پی دارد، ولی با توجه به اینکه افزایش سرعت گلوله در ۳۰ سانتی متر دوم لوله، در مقایسه با ۳۰ سانتی متر اول آن در حدود ۰/۲ است، افزایش طول آن به هر مقداری توجیه ناپذیر است.

در شکل ۵ سرعت زاویه ای در لحظه خروج و در تمامی طول لوله با مرجع [۱۳] که با مدل سازی با نرم افزار LS-DAYNA انجام شده مطابقت داده شده است.

در شکل ۶ سرعت زاویه ای در لحظه خروج گلوله برای دو سلاح رسم شده است. با مقایسه این دو نمودار مشخص می شود، با وجود سرعت خطی یکسان برای هر دو سلاح، سرعت زاویه ای آنها متفاوت است. با توجه به این موضوع که مقدار گام سلاح j3 بیشتر از سلاح romak3 است، افزایش نرخ چرخش خان باعث کاهش سرعت زاویه ای شده است.

با توجه به شکل ۷ می توان نتیجه گرفت که افزایش گام سبب افزایش اصطکاک بین گلوله و لوله سلاح خواهد شد اما این افزایش اصطکاک باعث کاهش عمر لوله سلاح نخواهد شد چون فقط سطح بیشتری در طول لوله با گلوله درگیر خواهد شد.

مکان نقطه شروع خان کشی در لوله (mm) x_{sr}

۶- مراجع

[1] Melchior E., *Hand book on weaponry*. Dusseldorf Rheinmetall GMBH FEB, 1982.

[2] Resal H., *Investigation of the movement of project in firearms*. Rheinmetall GMBH, 1964.

[3] Corner Y., *Theory of interior ballistics of gun*, Franklin INST. New York, 1950.

[4] Longuet B., Mobidic N.G., a 1D/2D Code Suitable for Interior Ballistics and Vulnerability Modeling. *22nd International Symposium on Ballistics*, Vancouver, Canada, 2005.

[5] Gao X.L., An exact elasto-plastic solution for an open-ended thick-walled cylinder of a strain-hardening material. *International journal of pressure vessels and piping*, Vol. 52, No.1, pp.129-144, 1992.

[6] Nadai, A., *Theory of Flow and Fracture of Solid*, Vol. 1, Mc Graw-Hill, New York, 1950, pp. 472-81.

[7] Davidson, T. E., et al., Overstrain of high-strength open-ended cylinders of intermediate diameter ratio, In *Proceedings of the 1st International Congress on Experimental Mechanics*, Pergamon Press, New York, 1963.

[8] Chen, P. C. T., A comparison of flow and deformation theories in a radially stressed annular plate. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 40, pp. 283-287, 1973.

[9] باقری، سیدمسعود، ارزیابی رفتار انبساط شعاعی استوانه جدار ضخیم تحت بارگذاری انفجاری داخلی به همراه تحلیل عددی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۵، ش. ۳، ص ۲۵۱-۲۵۹، ۲۰۰۵.

[10] Talei, M., Rahimian, M. H., Experimental and Numerical Study of Combusting Solid Propellant and Axisymmetric Flow Field with Moving Boundary. In *11th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Vancouver, Canada, 2003.

[11] معینی، س.، مدل سازی یک بعدی جریان دو فازی محترق در سیستم های توپ، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۳.

[12] Baer P. G., Frankle J. M., *The Simulation of Interior Ballistic Performance of Guns by Digital Computer Program*. BRL-TR-1183, US Army Ballistic Research Laboratory, 1962.

[13] Wilkerson S.A., The effect of initial and gun mount conditions on the accuracy of kinetic energy (KE) projectiles. *Technical Report No. ARL-TR-895*, US Army Research Laboratory, 1995.

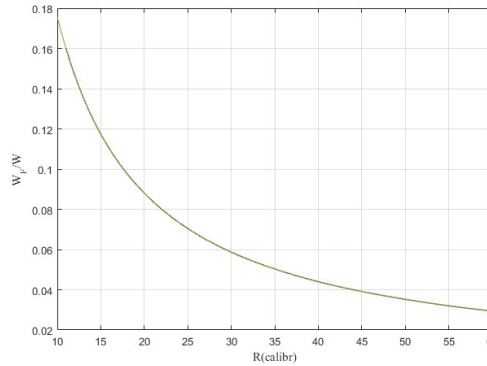
[14] حیدری، ف.، تحلیل دینامیکی سلاح های کوچک خان دار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۶.

[15] Meriam J., *Engineering Mechanics dynamincs*. John Wiley and Sons INC, Vol 2, 1987.

[16] Germershaven R., Melchior E., Thermodynamic model of internal ballistics. *Wehrtechnik*, pp 281-288, 1971.

[17] McCoy R. L., Modern exterior ballistics The launch and flight dynamics of symmetric projectiles. *Schiffer military history at glen pa*, 1998.

[18] Deng S., Sun H. K., Chung-Jung Chiu., Kuei-Chi Chen., Transient finite element for in-bore analysis of 9 mm pistols. *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, pp. 2673-2688, 2014.



شکل ۷- تغییرات نسبت اصطکاک تلف شده به کل انرژی مفید سیستم

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق بر خلاف مدل های قبل که از انرژی ناشی از احتراق خرج انفجاری استفاده شده از ماکزیمم فشار ناشی از انفجار خرج انفجاری به عنوان پارامتر ورودی استفاده شده است که دارای پاسخ نهایی قابل قبول با درصد خطای بسیار کم می باشد، با تحلیل سلاح های ذکر شده در مراحل قبل به وسیله ی معادلات ارائه شده مشخص می شود که، گام خان و طول لوله دو عامل تاثیر گذار در بالستیک داخلی لوله هستند. افزایش طول باعث افزایش سرعت گلوله در لوله سلاح می شود. همینطور تغییر در گام خان منجر به تغییر در سرعت و سرعت زاویه ای گلوله می شود به طوری که سرعت با گام خان رابطه ی مستقیم اما سرعت زاویه ای با آن رابطه ی معکوس دارد. بنابر این با افزایش گام خان سرعت زاویه ای گلوله کاهش می یابد این کاهش، پایداری ژيروسکوپی گلوله را در لحظه خروج از سلاح کم می کند. بنابر این برای دستیابی به بهترین پایداری و بالاترین سرعت نیاز است که هنگام طراحی لوله سلاح، گام خان حالت بهینه خود را داشته باشد.

۵- نمادها

$P(x)$	فشار گلوله در هر نقطه از لوله (Mpa)
$V(x)$	حجم پشت گلوله در هر نقطه از لوله (cm^3)
V_0	حجم محفظه احتراق (cm^3)
C	قطر گلوله (mm)
x	مکان گلوله در لوله (mm)
P_0	فشار ناشی از انفجار (Mpa)
ω	سرعت زاویه ای گلوله ($\frac{rad}{s}$)
V	سرعت خطی گلوله $\frac{m}{s}$
R	نرخ چرخش (cal)
μ	ضریب اصطکاک
m_p	جرم پرتابه (gr)
N	تعداد خان
H	عمق شیار (mm)
b_g	پهنای شیار (mm)