مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۶، جلد ۴۹، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۴۱-۴۵

# بررسی تحلیلی تاثیر ابعاد خان بر بالستیک داخلی سلاح ها

**هاشم بابایی*** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
**مجید علی‌طاولی** دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
**میلاد منصوری** 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 قابل‌محاسبه است. نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه‌شده 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** Depatmen of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
**M. Alitavoli** Depatmen of Mechanical Engineering , University of Guilan, Rasht, Iran
**M. Mansouri** 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.

## ۱- مقدمه

بالستیک داخلی هنگامی‌که یک سلاح مسلح شده است هنگامی‌که 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 به‌سرعت آتش می‌گیرد و یا درواقع به‌سرعت می‌سوزد و درنتیجه فشار گاز زیادی ایجاد می‌کند. هنگامی‌که 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 موثر بر آن، از گذشته دارای اهمیتی ویژه بوده است. هنگامی‌که گلوله ، در اثر فشار حاصله از گاز باروت ، در درون لوله به حرکت درمی‌آید ، با برجستگی‌های مارپیچی درون لوله درگیر می‌شود و درعین‌حال با قسمت‌های دیگر جدار داخلی لوله که با آن‌هم قطر است مماس است. 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 درنتیجه همه فشار حاصله صرف راندن گلوله به جلو می‌شود. محققین علم بالستیک داخلی تلاش می‌کنند پارامترهای طراحی سلاح و مهمات را به‌گونه‌ای 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 می شود[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 آزادشده با انرژی داخلی گازهای منفجره ارائه کرده است [۲].

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ghbabaei@guilan.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۷
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۹

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

مدل‌سازی‌های انجام‌شده بر روی جریان مواد پیشرانه در لوله تفنگ، به صورت تک فازی گاز و دو فازی گاز و جامد است. تحلیل‌های صفر بعدی، توزیع چگالی مواد پیشرانه و گازها را در پشت گلوله کاملا یکنواخت در نظر گرفته می شود. 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 گاگ در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است [۴].

موبیدیک در سال ۱۹۸۱ علاوه بر در نظر گرفتن مدل یک‌بعدی گاگ، 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 به‌جای فرمول تراکم ناپذیر گاگ از فرمول تراکم پذیر چند فازی بایر-نانزیاتو استفاده‌شده است.

درگذشته به دلیل فقدان وجود توضیحات ریاضی از روند طراحی‌ها، بسیاری از لوله‌های اسلحه به‌صورت آزمون‌وخطا ساخته می‌شدند. ازاین‌رو اغلب مهندسین و طراحانی که در این زمینه فعالیت می‌کنند با یک ساده‌سازی معقول لوله‌ی سلاح را به‌عنوان یک مخزن جدار ضخیم انتها باز در نظر می‌گیرند که در آن‌یک ماده‌ی منفجره با ایجاد فشار آنی بر دیواره باعث به وجود آمدن تنش و تغییر شکل می‌شود که نهایتاً به‌وسیله‌ی تحلیل استاتیکی یا دینامیکی موردبررسی قرار می‌گیرد.

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

تاکنون چند حل نظری رضایت‌بخش برای سیلندر جدار ضخیم انتها باز، بر اساس معیارهای ترسکا و فون‌میسز، به‌دست‌آمده که برای کاربردهای مهندسی قابل‌اطمینان و مناسب است. یک حل بسته برای مؤلفه‌های تنش توسط نادای با استفاده از یک روش متغیر تقریبی و نظری تغییر شکل هِنکی 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].

پی‌سی‌تی چن با استفاده از روش بهبودیافته‌ی متغیر تقریبی نادای و مطابق با تئوری تغییر شکل هنکی 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 به‌صورت معادله‌ی JWL در نظر گرفته‌شده بود. درنتیجه روابط مربوط 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. ازآنجاکه 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 تاثیرات پارامترهی 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 می دهد 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- مدل‌سازی تحلیلی

به‌منظور حل تحلیلی سیستم، فرضیاتی بر مدل اعمال‌شده 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 می گیرد و با توجه به اینکه در هنگامی که فشار بیشینه شده،دما نیز در بالاترین سطح خود قرار دارد، از تغییرات دما طی فرآیند، صرف‌نظر شده است.

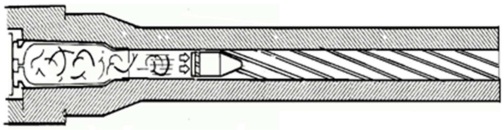
$$\frac{P_o V_o}{T_o} = \frac{P(x)V(x)}{T(x)} \qquad (۱)$$

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

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

$$P_o V_o = P(x)V(x) \qquad (۲)$$

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



**شکل ۱- شماتیک لوله سلاح**

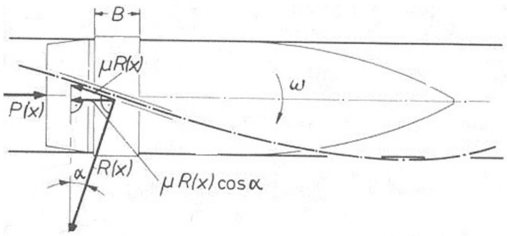
$$V(x) = V_0 + \frac{\pi}{4} c^2 x \qquad (۳)$$

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

$$P(x) = \frac{P_o V_o}{v_0 + \frac{\pi}{4} c^2 x_p} \qquad (۴)$$

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

$$w_{CG} = \int_{V_o}^{V_x} P dv = nRT ln \frac{V_x}{V_o} = P_o V_o ln \frac{V_x}{V_o} \qquad (۵)$$




**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]

$$\sum f_x = 0 \rightarrow F(x) - R(x)[sin\alpha + \mu cos\alpha]\frac{c}{2} m_p \frac{dV}{dt} = 0 \qquad (۶)$$

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.

$$\sum M_x = 0 \rightarrow R(x)[cos\alpha - \mu \sin\alpha]\frac{c}{2} - J_p d\omega = 0 \qquad (۷)$$

$J_p$ ممان اینرسی حول محور طولی و $\omega$ سرعت زاویه‌ای گلوله است.که ممان اینرسی حول محور طولی برای گلوله های معمولی برابر $J_p = \left(\frac{0.73d}{2}\right)^2 m_p$ است [۱۶]

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:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_p}\left[F(x) - R(x) z\right] \qquad (۸)$$

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.

$$\omega = \frac{2\pi V}{Rc} \qquad (۹)$$

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

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m_p}\left[F(x) - R(x) z\right] \qquad (۱۰)$$

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

$$F(x) = P(x)\left[\frac{\pi}{4} c^2 + nhb\right] \qquad (۱۱)$$

انرژی تلف‌شده ناشی از اصطکاک $W_F$ به دو بخش انرژی تلف‌شده توسط اصطکاک بین گلوله و لوله اصطکاک گلوله و خان تقسیم‌بندی می شود.

$$W_F = \mu_0 \int_0^x R(x) dx \qquad (۱۲)$$

$$W_F = W_f + W_R \qquad (۱۳)$$

$$W_f = \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p\left(Rc^2 + 4 j_p \pi z\right)} \int_0^x P(x) \frac{\pi}{4} c^2 dx \qquad (۱۴)$$

$$W_R = \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p\left(Rc^2 + 4 j_p \pi z\right)} \int_{x_{sr}}^x P(x) nbhdx \qquad (۱۵)$$

انرژی ذخیره‌شده در گلوله به دو بخش تقسیم می شود.

$$E = E_k + E_t \qquad (۱۶)$$

$E_k$ انرژی ذخیره‌شده جنبشی گلوله و $E_t$ انرژی جنبشی دورانی گلوله است.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (۱۷)$$

$$E_t = \frac{1}{2} J_p \omega^2 \qquad (۱۸)$$

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

$$W_{CG} - E_k - E_t - W_f - W_R = 0 \qquad (۱۹)$$

$$P_o V_o ln \frac{V_x}{V_o} - \frac{1}{2}\left(m + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{2\pi}{rc}\right)^2\right) v^2 - \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p\left(Rc^2 + 4 j_p \pi z\right)} \int_0^x P(x) \frac{\pi}{4} c^2 dx - \frac{4\mu_0 J_p \pi}{m_p\left(Rc^2 + 4 j_p \pi z\right)} \int_{x_{sr}}^x P(x) nbhdx = 0 \qquad (۲۰)$$

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 زاویه‌ای 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 می‌شود. 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

خروجی گلوله برای سه سلاح با هم مقایسه شده است.

**جدول ۱- مشخصات سلاح ها**

| | ژ ۳ | کلت | رماک ۳ |
|---|---|---|---|
| C(mm) | ۷/۶۳ | ۹ | ۷/۶۳ |
| L(mm) | ۴۵۰ | ۹۸ | ۶۳۰ |
| $L_{sr}(mm)$ | ۳۰۵ | ۹۰ | ۵۷۰ |
| m(gr) | ۹/۴۵ | ۹/۴۵ | ۹/۴۵ |
| n | ۴ | ۶ | ۴ |
| R(cal) | ۴۰ | ۲۸ | ۱۸ |
| $V(\frac{m}{s})$ | ۸۳۰ | ۳۵۰ | ۸۳۰ |
| $b_g(\mathrm{mm})$ | ۴/۲ | ۲/۵۰۴ | ۳/۸ |
| h(mm) | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۱۷ | ۰/۱۱۲ |
| $\mu$ | 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**

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

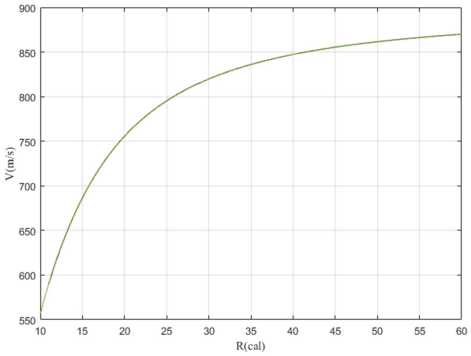
با توجه به نمودار شکل ۳ با افزایش مقدار گام، سرعت نهایی گلوله افزایش یافته است ولی بیشترین تغییرات سرعت مربوط به گام ۸ تا ۴۰ کالیبر است و پس از این محدوده، نرخ تغییرات کاهش یافته و تأثیر چندانی بر سرعت پایانی گلوله ندارد.

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 سانتی‌متر دوم لوله، در مقایسه با ۳۰ سانتی‌متر اول آن در حدود ۰/۲ است، افزایش طول آن به هر مقداری توجیه‌ناپذیر است.

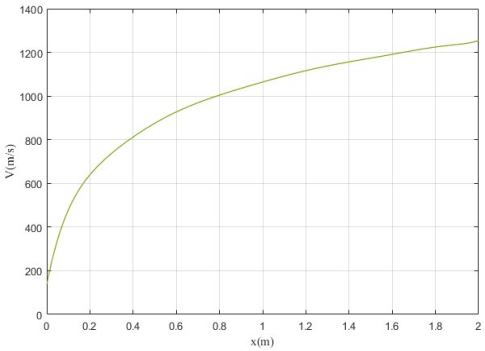
در شکل ۵ سرعت زاویه ای در لحظه خروج و در تمامی طول لوله با مرجع [۱۳] که با مدل سازی با نرم افزار LS-DAYNA انجام شده مطابقت داده شده است.

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.

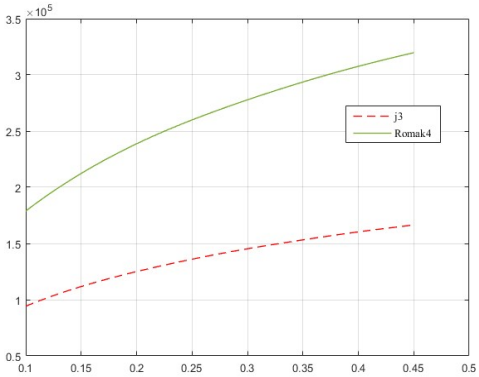
با توجه به شکل ۷ می توان نتیجه گرفت که افزایش گام سبب افزایش اصطکاک بین گلوله و لوله سلاح خواهد شد اما این افزایش اصطکاک باعث کاهش عمر لوله سلاح نخواهد شد چون فقط سطح بیشتری در طول لوله با گلوله در گیر خواهد شد.



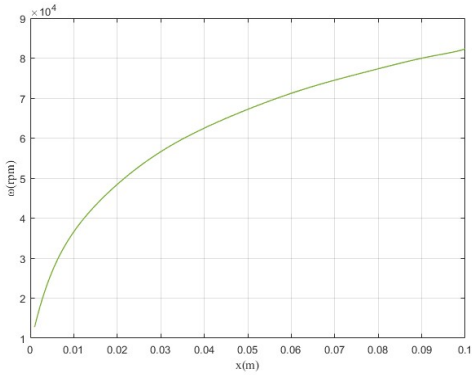

**شکل ۳- تغییرات سرعت نسبت به گام خان**



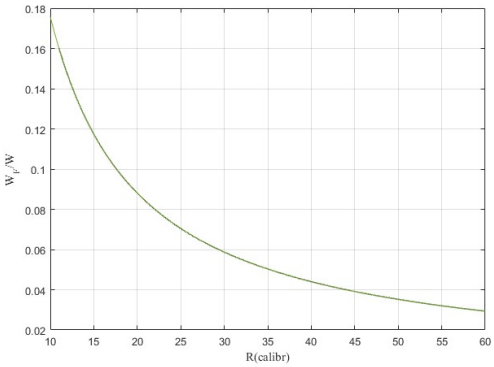

**شکل ۴- تغییرات سرعت نسبت به طول لوله**




**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**




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

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر خلاف مدل های قبل که ازانرژی 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 ژیروسکوپی گلوله را در لحظه خروج از سلاح کم می کند. بنابراین 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) |
| $\omega$ | سرعت زاویه‌ای گلوله $(\frac{rad}{s})$ |
| V | سرعت خطی گلوله$\frac{m}{s}$ |
| R | نرخ چرخش(cal) |
| $\mu$ | ضریب اصطکاک |
| $m_p$ | جرم پرتابه(gr) |
| N | تعداد خان |
| H | عمق شیار(mm) |
| $b_g$ | پهنای شیار(mm) |
| $x_{sr}$ | مکان نقطه شروع خان‌کشی در لوله(mm) |

## 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 Appleid Mechanics*, Vol. 40, pp. 283-287, 1973.

[۹] 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، ۴۵.

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

[۱۱] 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, USArmy Research Laboratory,* 1995.

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

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

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

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