



مدل‌های تحلیلی ارائه‌شده در زمینه نفوذ در اهداف فلزی

محمد فرحمند^۱، خداداد واحدی^{۲*}، علیرضا نداد اسکویی^۳ و روح‌ا... حسینی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران،

۲- استاد، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۴- استادیار، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

m.farahmand.iust@gmail.com*

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله به بررسی مدل‌های تحلیلی ارائه شده در زمینه نفوذ پرتابه در صفحات فلزی (نازک، ضخیم و نیمه بی‌نهایت) پرداخته شده است، تلاش بر این بوده‌است که مدل‌های مرجع در این زمینه ارائه گردد و در ادامه به کارهای تحلیلی ارائه شده توسط محققین داخلی و خارجی پرداخته شود. این مقاله می‌تواند مرجعی جهت خوانندگان علاقه‌مند به بررسی تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف فلزی باشد. و با تئوری‌های مختلف ارائه شده توسط محققین آشنا گردند.

مقاله مروری
دریافت: ۱۸ تیر ۱۳۹۸
پذیرش: ۲۵ آبان ۱۳۹۸
ارائه در سایت: ۲۵ آذر ۱۳۹۸

کلیدواژگان

مدل تحلیلی

پرتاب

هدف

عمق نفوذ

سرعت حد بالستیک

سرعت خروجی.

Analytical models presented for the Penetration of metallic targets

Mohammad Farahmand¹، Khodadad Vahedi^{2*}، Alireza Naddaf Oskouei³، Roholah Hoseini⁴

1- Ph.D. Candidate, Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

2- Prof., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

3- Associate Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

4- Assistant Professor., Dep. of Mech. Eng., Imam Hossein Comprehensive University.

* m.farahmand.iust@gmail.com

Article Information

Review Paper

Received 9 July 2019

Accepted 16 November 2019

Available Online 16 December 2019

Keywords

Analytical mode

Projectile, target

Penetration depth of, ballistic

Limit speed

Output speed.

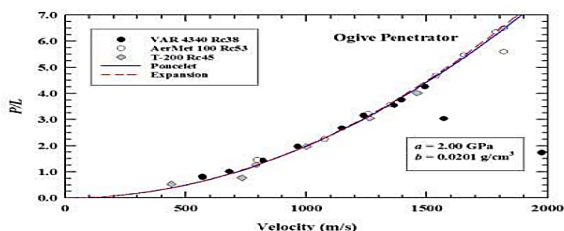
ABSTRACT

This paper investigates the analytical models presented for projectile penetration in metallic sheets (thin, thick and semi-infinite). It has been attempted to present reference models in this field and after that the analytical works by domestic and foreign researchers presented. This article can use as a reference for readers interested in analytical studies on the penetration of metal targets. And become familiar with various theories presented by researchers.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohammad Farahmand, Khodadad Vahedi, Alireza Naddaf Oskouei, Roholah Hoseini, Analytical models presented for the Penetration of metallic targets, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 3, pp. 22-31, 2019 (In Persian)



شکل ۱: عمق نفوذ بی‌بعد شده برای نفوذ پرتابه‌های فولادی سخت در آلومینیوم T6-۶۰۶۱ [۱]

۲- تئوری هیدرودینامیک

معادله اصلی از بقای مومنتوم با این فرض که مقاومت و ویسکوزیته مواد تشکیل‌دهنده هدف و نفوذکننده نادیده گرفته شوند، به دست آمده می‌آید. با این فرضیات معادله به وسیله علم هیدرودینامیک قابل حل است. بنابراین معادله مومنتوم این گونه است:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(v^2) - v \times (\nabla \times v) = -\frac{1}{\rho} \nabla P_r \quad (4)$$

∇ بردار گرادیان است. ترم سمت راست با فرض غیرقابل تراکم بودن مواد تشکیل‌دهنده هدف و جریان سریع از (P_r/ρ) به دست آمده است. فرض می‌شود که جریان با سرعت ثابت، v حرکت می‌کند و سرعت نفوذ، u نیز ثابت است، بنابراین نقطه تقابل پرتابه-هدف حرکت نمی‌کند. معادله مومنتوم، با فرض هیدرودینامیک و غیرقابل تراکم بودن مواد تحت شرایط پایدار به شکل زیر می‌شود:

$$[v \times (\nabla \times v)] = \nabla \left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{P_r}{\rho} \right) \quad (5)$$

در طول خط مرکزی پرتابه-هدف می‌شود:

$$\left(\frac{1}{2} v^2 + \frac{P_r}{\rho} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + P_r \right) = 0 \quad (6)$$

از معادله از پشت پرتابه تا نقطه تقابل پرتابه-هدف و از نقطه تقابل پرتابه-هدف تا هدف انتگرال‌گیری می‌شود. فشار در پشت پرتابه صفر است و هدف به صورت نیمه بی‌نهایت فرض شده است. انتگرال معادله به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_T u^2 \quad (7)$$

۱- مقدمه

جین-ویکتور پانسل^۱ یک معادله دیفرانسیل معمولی را برای توصیف نفوذ پرتابه‌های صلب ایجاد کرد. طبق قانون دوم نیوتن، کاهش شتاب پرتابه، ناشی از نیروی مقاوم می‌باشد:

$$M \frac{dv}{dt} = -F = -(A + Bv^2) \quad (1)$$

مقدار A برابر مقاومت استاتیکی هدف است و Bv^2 نشان می‌دهد که نیروی مقاوم با توان دوم سرعت رابطه دارد. در مکانیک سیالات معمولاً یک ترم پَسار^۲ است. وقتی پرتابه تغییر شکل نمی‌دهد، سطح مقطع ثابت باقی می‌ماند و معادله (۱) می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$\rho_P L \frac{dv}{dt} = -(a + bv^2) \quad (2)$$

(اگر سطح مقطع ثابت نباشد، L طول مؤثر پرتابه است.) با انتگرال گرفتن از معادله (۲) می‌توان عمق کلی نفوذ (P) را با استفاده از تعریف مشتق‌گیری زنجیره‌ای به دست آورد:

$$\frac{P}{L} = \frac{\rho_P}{2b} \ln \left(1 + \frac{bv^2}{a} \right) \quad (3)$$

فورااستال^۳ و پیکوتوسکی^۴ [۱] عمق نفوذ را برای پرتابه‌ای از جنس فولاد مارتنزیتی^۵ با دماغه اجابو^۶ که به آلومینیوم 6061-T6 نفوذ می‌کند را به عنوان تابعی از سرعت ضربه اندازه‌گیری کردند. عمق‌های نفوذ که با طول پرتابه بی‌بعد شده‌اند در شکل ۱ رسم شده است. سختی راکول^۷ نوع C پرتابه‌ها بین Rc38 تا Rc53 بسته به آلیاژ مخصوص و عملیات حرارتی متفاوت است.

¹Jean-VictorPoncelet

²Drag

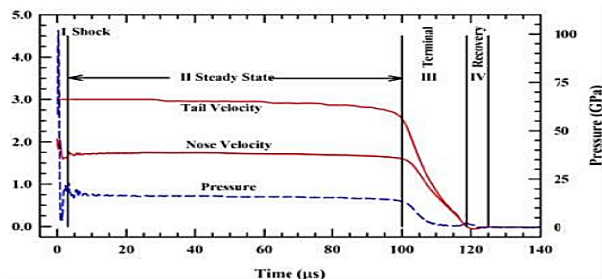
³Forrestal

⁴Piekutowski

⁵maragingsteel

⁶ogival

⁷Rockwell



شکل ۲: مراحل نفوذ برای یک پرتابه با $L/D = 20$ در سرعت ضربه 3 Km/s [۲]

تا اینجا، در مدل‌های ارائه‌شده اهداف را به صورت نیمه بی‌نهایت در نظر می‌گرفتند، هرچند که فرضیاتی توسط محققین زیادی برای استفاده از این مدل‌ها برای محاسبه اهداف ضخیم بی‌نهایت به کار گرفته می‌شد. رچت-ایپسون مدلی را ایجاد کردند که سرعت باقی‌مانده‌ی پرتابه‌های کوتاه‌ی ۶ ($L/D \sim 1$) را که به صفحات نسبتاً نازک ضربه می‌زند با استفاده از بقای انرژی و مومنوم تخمین بزنند.

نویسندگان ضربه را در سرعت‌هایی که پرتابه سالم باقی‌مانده، بررسی کردند. اگرچه، که پرتابه می‌تواند کمی تغییر شکل دهد (قارچی شکل). در مشاهدات تجربی برای ضربات به صفحات نازک، یک‌تکه‌ی ۷ از هدف جدا شده و به پرتابه متصل می‌شود. با به‌کارگیری بقای مومنوم داریم:

$$M_P V = (M_P + m_P) V_f \quad (9)$$

که M و m به ترتیب جرم‌های پرتابه و تکه‌ی جدا شده از هدف است. بدین ترتیب، استفاده از بقای انرژی می‌دهد:

$$M_P V^2 = \frac{1}{2} (M_P + m_P) V_f^2 + W_s + E_d \quad (10)$$

W_s ، انرژی است که استفاده می‌شود تا تکه‌ای از هدف جدا شود و E_d ، انرژی مرتبط با تغییر شکل و گرم شدن (کار پلاستیک) است. E_d به‌طور ساده اختلاف بین انرژی‌های جنبشی اولیه و نهایی است، که با استفاده از معادله‌ی (۱۲) داریم:

این یک مدل هیدرودینامیک، غیرقابل تراکم در شرایط پایدار برای نفوذ است.

خرج گود جریان‌های سریع دارای گرادیان سرعت است. تئوری هیدرودینامیک برای هرکدام از این بخش‌های جریان اعمال می‌شود. این فرآیند عمق نهایی نفوذ را پیش‌بینی می‌کند. ایچلبرگر^۱ [۲] ثابت کرد که در سرعت‌های کم، به‌خصوص در مورد اهداف محکم (فولاد)، اثرات مقاومت هدف نمی‌تواند نادیده گرفته شود. او معادله را اصلاح کرد:

$$\frac{1}{2} \rho_P (v - u)^2 = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + \Sigma \quad (8)$$

که $\Sigma = \sigma_{Yt} - \sigma_{Yp}$ مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد. ایچلبرگر برآورد کرد که مقدار Σ ، ۱ تا ۳ برابر مقاومت تسلیم تک‌محوری ماده تشکیل‌دهنده هدف است (از آنجایی که جریان معمولاً از مس ۲ است، σ_{Yp} بسیار کوچک‌تر از σ_{Yt} است).

کریستن^۲ و گهرینگ^۳ [45] برای نفوذ با سرعت بالا، ۴ مرحله در نظر گرفتند: (۱) مرحله انتقالی، (۲) مرحله اولیه، (۳) مرحله ثانویه، (۴) مرحله استرداد. هرچند که این تفکر درست بود، اما شکل اصلی آن‌ها خیلی تحریف شده بود. این مراحل نفوذ برای پرتابه‌ای از جنس آلایژ تنگستن با $L/D = 20$ به داخل هدفی فولادی در سرعت ۳ کیلومتر بر ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است.

¹ Eichelberger

² copper

³ Christman

⁴ Gehring

⁵ recovery

⁶ chunky
⁷ plug

بنابراین با حل هم‌زمان می‌توان مقادیر v ، u و l را تخمین زد. با مرتب‌سازی برای به‌دست‌آمده آوردن سرعت نفوذ لحظه‌ای در ترم‌های سرعت پرتابه (که بازمان تغییر می‌کند) و تعیین خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده هدف و پرتابه داریم:

در حالت a خواهیم داشت

$$u = \frac{v - \mu(v^2 + A)^{1/2}}{1 - \mu^2} \quad (18)$$

که در این فرمول موارد زیر مدنظر است:

و در حالت b خواهیم داشت

$$u = \frac{v}{2} - \frac{(R_t - Y_p)}{\rho v} \quad \rho_p = \rho_t = \rho \quad (19)$$

به‌دست‌آمده آوردن u در معادله (۱۱) توسط معادله (۲۱) با قرار دادن $Y_p = 0$ و جایگزین کردن \sum به‌جای R_t داده‌شده است.

از معادله مشخص می‌شود که سرعت بحرانی، v_c ، با قرار دادن $u = 0$ به‌دست‌آمده می‌آید:

$$v_c = \left[\frac{2(R_t - Y_p)}{\rho_p} \right]^{1/2} \quad (20)$$

وقتی سرعت میله تا حد سرعت بحرانی افت می‌کند، نفوذ بیش‌تری اتفاق نمی‌افتد. روش‌هایی برای تخمین Y_p و R_t بعد از دو بخش زیر بیان می‌شوند.

نفوذ جسم صلب و انتقال از جسم صلب به نفوذ سایشی

در قسمت قبلی، $R_t > Y_p$ و سایش میله را داریم. تیت حالتی را آزمایش و بررسی کرد که $Y_p > R_t$ باشد [۵]. در این حالت یک سرعت انتقالی، v_{tr} ، وجود دارد. میله سایش زیادی نداشته یا به‌عبارت‌دیگر نفوذ در حالت جسم صلب اتفاق می‌افتد. برای نفوذ جسم صلب، $u = v$ است. سرعت انتقالی از معادله (۲۱a) با جایگزین کردن $u = v = v_{tr}$ به‌دست‌آمده می‌آید:

$$v_{tr} = \left[\frac{2(Y_p - R_t)}{\rho_t} \right]^{1/2} \quad (21)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \left(\frac{m_p}{M_p + m_p} \right) M_p V^2 \quad (11)$$

انرژی از دست‌رفته ناشی از جدا شدن تکه‌ای از هدف، با یافتن سرعت حداقل که یک سرعت باقی‌مانده‌ی صفر را می‌دهد، تخمین زده می‌شود. این سرعت حداقل V_{50} است. با $V_r = 0$ و جایگذاری کردن معادله‌ی انرژی جدا شدن تکه‌ای از هدف به روش زیر محاسبه می‌شود:

$$W_s = \frac{1}{2} \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) M_p V_{50}^2 \quad (12)$$

جایگذاری کردن و حل کردن آن، مقدار سرعت باقی‌مانده به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_r = \left(\frac{M_p}{M_p + m_p} \right) (V^2 - V_{50}^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$\rho_p \neq \rho_t \quad \mu = \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^{1/2} \quad A = \frac{2(R_t - Y_p)(1 - \mu^2)}{\rho_t}$$

در مقابل جریان‌های خرج گود، پرتابه‌ها (میله‌ها) حین نفوذ به هدف از سرعتشان کاسته می‌شود. تیت [۳] و الکسویسکی [۴] به‌طور مستقل و جداگانه معادله برنولی اصلاح‌شده را پیشنهاد دادند:

$$\frac{1}{2} \rho_p (v - u)^2 + Y_p = \frac{1}{2} \rho_t u^2 + R_t \quad (14)$$

مقدار Y_p برابر تنش تسلیم دینامیکی پرتابه و R_t مقدار مقاومت هدف در مقابل نفوذ است. با جدا کردن قسمت صلب میله از قسمتی که تحت تغییر شکل پلاستیک (قارچی شکل شدن) قرار می‌گیرد، نیرویی که سبب کاهش سرعت قسمت صلب میله به طول l می‌شود برابر است با:

$$\rho_p l \pi R_p^2 \frac{dv}{dt} = -\pi R_p^2 Y_p \quad (15)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{Y_p}{\rho_p l} \quad (16)$$

طول اولیه میله L است، اما از آنجایی که قسمت صلب میله سریع‌تر از سرعت نفوذ حرکت می‌کند، میله طی زمان کوتاه‌تر می‌شود:

$$\frac{dl}{dt} = -(v - u) \quad (17)$$

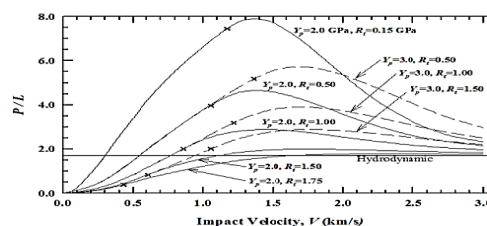
بنابراین کاهش سرعت به صورت زیر است:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho_p L} \left(\frac{1}{2} \rho_t v^2 + R_t \right) \quad (22)$$

معادله ۲۲ یک فرم مشابه معادله (۲)، معادله پانسلت، است که معادله $a = R_t$ و $b = \rho_t/2$. بنابراین معادله (۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{P}{L} = \frac{\rho_p}{\rho_t} \ln \left(1 + \frac{\rho_t V^2}{2R_t} \right) \quad (23)$$

نفوذ بی‌بعد شده در مقایسه با سرعت ضربه در شکل ۵ برای پرتابه‌ای از جنس فولاد (7.9 g/cm) و یک هدف آلومینیومی (2.7 g/cm) نشان داده شده است. فرض‌های مختلفی برای ترکیبات $Y_p - R_t$ در این شکل نشان داده شده است. از آنجایی که در تمام مثال‌های نشان داده شده $Y_p > R_t$ است، نفوذ در سرعت‌های پایین ضربه، در حالت جسم صلب است. علامت X در شکل ۵، سرعت انتقالی از نفوذ جسم صلب به نفوذ سایشی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نفوذ بی‌بعد در مقابل سرعت ضربه برای ترکیب‌های مختلف $Y_p - R_t$ برای یک پرتابه فولادی در هدف آلومینیومی [۵]

۳- تخمین مقادیر Y_p و R_t :

تیت دریافت که برای مفید بودن مدل هیدرودینامیک اصلاح‌شده، نیازمند یک روش جهت تعیین مقادیر Y_p و R_t می‌باشد. دو مقاله تلاش‌های او را خلاصه کردند [50-51]. Y_p با کاهش سرعت مرتبط است و از تنش تسلیم، σ_{Yp} به دست آمده می‌آید:

$$Y_p = (1 + \lambda) \sigma_{Yp} \quad (24)$$

که λ یک مقدار ثابت و مستقل از سرعت است و به عنوان اثرات دینامیکی ماده در نظر گرفته می‌شود.

R_t مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک جریان هدف می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین مقدار R_t پیشنهاد شده است. به طور مخصوص، تئوری انبساط حفره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دیدگاه یک منطقه متراکم و غیرقابل تراکم پلاستیک و یک منطقه الاستیک را برای مواد فرض می‌کند. یک حفره از قطر صفر تا R ، به صورت شبه‌استاتیکی باز می‌شود. یک راه‌حل مشابه نیز به دست آمده آمد؛ راه‌حل به سمت مناطق پلاستیک و الاستیک می‌رود و اجازه می‌دهد تا محاسبه تنش در نقطه تقابل آن‌ها انجام شود. انبساط حفره کروی و یا استوانه‌ای فرض می‌شود.

تیت انبساط حفره را بر روی منطقه تسلیم که الهام گرفته از خطوط جریان مغناطیسی در سولنوئید^۱ است، انجام داد. تأکید می‌شود که این راه‌حل وابسته به مقدار λ در معادله است. بعد از تحلیل داده‌های تجربی، تیت تخمین زد که $\lambda = 0.7$ یک مقدار مناسب برای در نظر گرفتن تأثیرات دینامیکی است [۷].

زید و پل در سال‌های ۱۹۵۸ و ۱۹۵۹ تئوری‌هایی برای نفوذ پرتابه‌های مخروطی و اجایو با صفحات نازک فلزی در حالت عمودی و مایل را ارائه کردند و نتایج را با مقادیر تجربی مقایسه نمودند [۸ و ۹].

در سال ۱۹۷۰ مدلی توسط بودنر^۲ ارائه شد که فرآیند نفوذ در اهداف فلزی را به دو مرحله تقسیم می‌کند، مرحله اول فرآیند نفوذ شروع شده و انرژی جنبشی به نیروی اینرسی و فشاری تبدیل می‌گردد و در مرحله بعدی انرژی جنبشی باقیمانده صرف برش هدف می‌شود. این مدل برای پرتابه با دماغه‌های تخت، اجایو و کروی و برخوردی قائم و مایل قابل به کارگیری می‌باشد [۱۰].

¹ solenoid
² Bodner

پرتابه‌اند و نحوه محاسبه آن‌ها در مقاله چن ۲۰۰۲ به صورت کامل توضیح داده شده است [۱۵].

ρ و σ_y به ترتیب تنش تسلیم دینامیکی و چگالی ماده هدف می‌باشند.

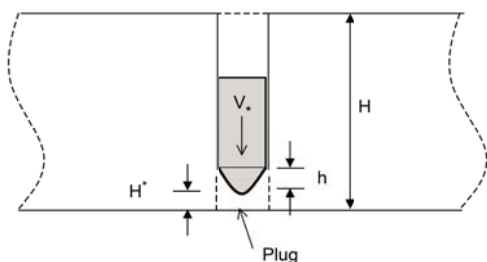
برای ماده تراکم‌ناپذیر الاستیک-پلاستیک کامل خواهیم داشت (ضرایب A, B):

$$A = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \left[\frac{E}{3(1-\nu)\sigma_y} \right] \right\} \quad B = \frac{3}{2} \quad (26)$$

$$\frac{x}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left(1 + \frac{1}{N} \right) \quad (27)$$

$$x = \frac{H}{d} \quad \text{و} \quad \eta_* = \frac{\pi d^2 H^*}{4M}$$

$$I = \frac{\lambda \Phi_I}{AN_1} \quad N = \frac{\lambda}{BN_2} \quad (28)$$



شکل ۴: نفوذ پرتابه در هدف ضخیم و تشکیل پلاگ [۱۳].

حال با بهره‌گیری از معادلات حرکت میتوان عمق نفوذ پرتابه در هدف را محاسبه نمود:

که در آن I, N کمیت‌های بدون بعد به‌عنوان تابع برخورد و تابع هندسی به‌صورت زیر تعریف میشوند:

Φ_I عدد تخریب جانسون و λ جرم بی‌بعد شده پرتابه به‌شکل زیر تعریف میشوند:

$$\Phi_I = \frac{\rho V_0^2}{\sigma_y} \quad \lambda = \frac{M}{\rho d^3} \quad (29)$$

در ادامه چن سرعت حد بالستیک و سرعت خروجی پرتابه از هدف را به صورت زیر ارائه نمود:

سال ۱۹۷۴ بودن در اصلاح تئوری قبلی خود نیروهای در برابر حرکت را در ۳ مرحله مدل نمود که عبارت‌اند از:

در مرحله‌ی اول این مدل فرض شده که نیروهای فشاری و اینرسی باعث کند شدن پرتابه می‌شود و درروی سطح لهیدگی ایجاد می‌گردد. در مرحله‌ی دوم، علاوه بر نیروهای فشاری و اینرسی، نیروی برشی نیز اضافه‌شده و باعث تشکیل پلاگ می‌گردد. و در مرحله‌ی سوم نیروی برشی به پلاگ به وجود آمده شتاب می‌دهد و آن را از هدف خارج می‌کند. در این مدل سرعت حد بالستیک، سرعت خروجی پلاگ و سرعت باقیمانده‌ی گلوله محاسبه می‌شود [۱۱].

سیدنی چاکرون^۱ در سال ۲۰۰۱ مطالعه تجربی، عددی و تحلیلی برای شکست هسته گلوله APM2، 7.62 میلی‌متر انجام داده است، آنالیز تحلیلی در این مقاله بر مبنای تیر تیموشینکو می‌باشد [۱۲].

چن در سال ۲۰۰۳ به تحلیل نفوذ پرتابه صلب در هدف فلزی ضخیم پرداخت [۱۳]، در این مقاله چن از تئوری دینامیکی انبساط حفره استفاده کرده است. و رابطه تحلیلی جهت بدست آوردن عمق نفوذ پرتابه، سرعت حد بالستیک و سرعت خروجی پرتابه از هدف ارائه کرده است، در ادامه با مقادیر تجربی مقایسه نموده و دقت مدل به اثبات رسیده است.

تحلیل نفوذ پرتابه با شکل دماغه‌های مختلف، از مزایای این روش نسبت به مدل‌های موجود است.

معادلات حرکت در برخورد به‌صورت زیر تعریف میشوند:

$$(25)$$

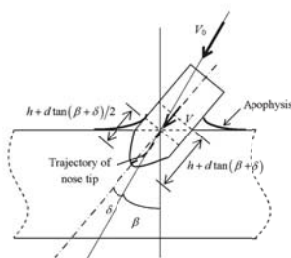
$$\frac{dV}{dt} = -F_x \quad V = \frac{dx}{dt} \quad F_x = \frac{\pi d^2}{4} (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho V^2)$$

که در آن F_x نیروی اولیه وارد بر پرتابه است که با استفاده از مدل فورستال [۱۴] محاسبه میشود A, B ثابت‌های تجربی هستند که به جنس ماده هدف بستگی دارند و N_1, N_2 ضرایب شکل دماغه

^۱Sidney Chocron

در راستای جدید، به صورت یک حرکت صلب با سرعت V ادامه دهد.

برای اندازه‌گیری این کمیت باید دانست که چه عاملی باعث چرخش پرتابه و چه عاملی باعث حرکت رو به جلوی پرتابه در هدف می‌شود. همان‌طور که در شکل زیر مشخص است، پس از آنکه دماغه پرتابه به‌طور کامل وارد هدف شد، راستای نفوذ پرتابه نسبت به راستای سرعت اولیه آن تغییر کرده است.



شکل ۵: تغییر راستای نفوذ پرتابه نسبت به راستای سرعت اولیه [۱۶].

می‌توان سرعت اولیه پرتابه را به دو راستای عمود بر مسیر نفوذ و موازی مسیر نفوذ تجزیه کرد:

$$V_{\perp} = V_0 \sin \delta \quad (۳۳)$$

$$V_x = V_0 \sin \delta \quad (۳۴)$$

که در آن V_x مؤلفه سرعت در راستای مسیر نفوذ و V_{\perp} مؤلفه سرعت عمود بر مسیر نفوذ می‌باشد.

از تجزیه سرعت مشخص می‌شود که مؤلفه سرعت عمود بر مسیر نفوذ باعث چرخش پرتابه و مؤلفه دیگر سرعت باعث حرکت پرتابه رو به جلو و نفوذ آن در هدف می‌گردد. پس از نفوذ کامل دماغه پرتابه در هدف، دیگر پرتابه تغییر جهت نمی‌دهد، یعنی میزان V_{\perp} صفر می‌شود و یا به عبارت دیگر، انرژی جنبشی پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ به صفر می‌شود و پرتابه چرخشی به اندازه δ دارد.

انرژی جنبشی عمود بر مسیر نفوذ، در مسیر چرخش پرتابه مصرف می‌شود. حال از برابر قرار دادن میزان این انرژی جنبشی با مقدار

$$V_{BL}^2 = \frac{AN_1\sigma_y}{BN_2\rho} \left\{ \left[1 + \frac{8BN_2\pi\eta(1+\eta_*)}{\sqrt{3}AN_1} \left(\frac{H^*}{H} + \frac{h}{H} \right) \frac{H^*}{H} \right] \exp \left[\frac{\pi x}{2N} \left(1 - \frac{H^*}{H} \right) \right] - 1 \right\} \quad (۳۰)$$

$$V_r = \frac{1}{1+\eta_*} \sqrt{\frac{(V_1^2 - V_{BL}^2)}{\exp \left[\frac{\pi x}{2N} \left(1 - \frac{H^*}{H} \right) \right]}} \quad (۳۱)$$

که در این روابط داریم:

حالت خاص:

برخورد پرتابه نوک تیز به هدف

اگر پرتابه نوک تیز و باریک باشد و با سرعت زیاد به هدف برخورد کند، احتمال تشکیل پلاگ بسیار کم می‌شود و پرتابه با سوراخ کردن هدف، از آن خارج می‌گردد. به عبارت دیگر، در این حالت نیروی وارده از طرف پرتابه، از نیروی لازم برای برش پلاگ کوچکتر است [۱۳].

(۳۲)

$$H^* \rightarrow 0 \quad V_{BL}^2 = \frac{AN_1\sigma_y}{BN_2\rho} \left\{ \exp \left(\frac{\pi x}{2N} \right) - 1 \right\} \quad V_r = \sqrt{\frac{(V_1^2 - V_{BL}^2)}{\exp \left(\frac{\pi x}{2N} \right)}}$$

در ادامه چن در سال ۲۰۰۶ به تحلیل نفوذ مایل پرتابه صلب در هدف فلزی ضخیم پرداخت [۱۶].

پرتابه با سرعت اولیه V_0 و تحت زاویه کجی اولیه β به یک هدف فلزی ضخیم با ضخامت H برخورد می‌کند و به دلیل غیر متقارن بودن نیروهای وارد به پرتابه، خروج آن از هدف با تغییر راستایی به اندازه δ همراه می‌باشد.

۴- محاسبه زاویه تغییر راستا

فرض می‌شود که تغییر راستای پرتابه تا زمانی ادامه دارد که دماغه پرتابه به‌طور کامل وارد هدف شود

در این حالت، نیروی مقاوم وارد بر پرتابه در راستای محور آن قرار می‌گیرد و باعث به وجود آمدن تقارن می‌شود. این مسئله باعث می‌گردد که گشتاور وارده به پرتابه صفر شود و پرتابه نفوذ خود را

$$\frac{x}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left(1 + \frac{\cos^2 \bar{\delta}}{N} \right) \quad (41)$$

در ادامه چن سرعت حد بالستیک و سرعت خروجی پرتابه از هدف را به صورت زیر ارائه نمود:

$$(42)$$

$$V_{BL}^2 = \frac{AN_1 \sigma_y \sec^2 \bar{\delta}}{BN_2 \rho} \left\{ \left[1 + \frac{8BN_2 x \eta \sec^2(\beta + \delta)(1 + \eta_*)}{\sqrt{3} AN_1} \left(\frac{H^*}{H} + \frac{h}{H \sec(\beta + \delta)} \right) \frac{H^*}{H} \right] \exp \left[\frac{\pi x \sec(\beta + \delta)}{2N} \left(1 - \frac{H^*}{H} \right) \right] - 1 \right\}$$

$$V_r = \frac{1}{1 + \eta_*} \sqrt{\frac{(V_0^2 - V_{BL}^2) \cos^2 \bar{\delta}}{\exp \left[\frac{\pi x \sec(\beta + \delta)}{2N} \left(1 - \frac{H^*}{H} \right) \right]}} \quad (43)$$

حالت خاص:

برخورد مایل پرتابه نوک تیز به هدف

اگر پرتابه نوک تیز و باریک باشد و با سرعت زیاد به هدف برخورد کند، احتمال تشکیل پلاگ بسیار کم میشود و پرتابه با سوراخ کردن هدف، از آن خارج میگردد. به عبارت دیگر، در این حالت نیروی وارده از طرف پرتابه، از نیروی لازم برای برش پلاگ کوچکتر است [۱۶].

$$(44)$$

$$\begin{aligned} H^* \rightarrow 0 \quad V_{BL}^2 \\ = \frac{AN_1 \sigma_y \sec^2 \bar{\delta}}{BN_2 \rho} \left\{ \exp \left[\frac{\pi x \sec(\beta + \delta)}{2N} \right] - 1 \right\} \quad V_r \\ = \sqrt{\frac{(V_0^2 - V_{BL}^2) \cos^2 \bar{\delta}}{\exp \left[\frac{\pi x \sec(\beta + \delta)}{2N} \right]}} \end{aligned}$$

لیاقت و فعلی به مدل‌سازی پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در سال ۲۰۱۰ به تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر تخت در اهداف فلزی چندگانه پرداختند، در این مقاله با فرض حفره‌ای شدن هدف فرآیند آغاز و پس از تماس کامل دماغه پرتابه با هدف مرحله شکل‌گیری پلاگ شروع می‌شود، معادلات حاکم در این مدل تحلیلی بر اساس روش بقا اندازه حرکت خطی و با استفاده از انتشار امواج پلاستیک در پرتابه و پلاگ استخراج شده است.

کار مصرفی در این مسیر، میتوان میزان چرخش را محاسبه کرد. برای این کار، مسیر چرخش پرتابه در هدف به صورت یک کمان و به شکل زیر تخمین زده میشود:

$$S_{\perp} = [h + d \tan(\beta + \delta)] \delta \quad (35)$$

در این مرحله، تغییرات نیروی مقاوم جانبی نسبت به زمان به صورت خطی فرض میشود. به این ترتیب می‌توان نیروی جانبی متوسط وارده به پرتابه در راستای عمود بر مسیر نفوذ را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$F_{\perp \text{avg}} = \frac{1}{2} F_0 \sin \beta \quad (36)$$

$$F_0 = \frac{\pi d^2}{4} (AN_1 \sigma_y + BN_2 \rho V^2) \quad (37)$$

حال میتوان مقدار کار انجام شده در کمان S_{\perp} را به صورت حاصلضرب نیروی متوسط در کمان در نظر گرفت و با برابر قرار دادن میزان انرژی جنبشی مصرف شده در این و همچنین حل این معادله، میتوان میزان انحراف را از رابطه غیرخطی زیر به دست آورد:

$$\frac{1}{2} M V_{\perp}^2 = F_{\perp \text{avg}} \times S_{\perp} \quad (38)$$

$$\sin^2 \bar{\delta} = \delta \sin \beta \times \frac{\pi}{4} \left[\frac{h}{d} + \tan(\beta + \delta) \right] \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{N} \right) \quad (98)$$

با حل رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\delta = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{N} \right) \left[\frac{h}{d} + \tan \beta \right] \sin \beta \quad (40)$$

میزان چرخش پرتابه در هدف تابعی از شکل پرتابه، سرعت برخورد پرتابه به هدف و همچنین زاویه اولیه برخورد میباشد. علاوه بر موارد گفته شده، جنس هدف و خصوصیات فیزیکی نیز در مقدار این زاویه مؤثر هستند.

برای بررسی حرکت پرتابه در هدف، فقط مؤلفه مماسی سرعت مدنظر قرار می‌گیرد.

با بهره‌گیری از معادلات حرکت میتوان عمق نفوذ پرتابه در هدف را محاسبه نمود:

چرخش غیر محوری، بین بردار سرعت و عمود بر هدف زاویه β و بین محور پرتابه و عمود بر هدف زاویه α تا که زاویه برخورد نامیده می‌شود به وجود می‌آید.

و قابل ذکر است که چرخش منجر به گشادشدن دهانه حفره ایجادشده در هدف و در نتیجه تخریب بیشتر می‌گردد.

در این مدل فرآیند نفوذ را به ۴ مرحله فرسایش، پلاگینگ، توسعه سوراخ و پتالینگ تقسیم کرده است. که مرحله پلاگینگ نیز به صورت حفره‌ای شدن، شکل‌گیری پلاگ، لغزش پلاگ و تغییر شکل پس از سوراخ‌کاری در نظر گرفته شده است.

اگر زاویه برخورد پرتابه به هدف صفر باشد فاز فرسایش هدف اتفاق نمی‌افتد و نفوذ مستقیماً از مرحله پلاگینگ اتفاق می‌افتد.

با افزایش زاویه برخورد میزان افت سرعت افزایش می‌یابد که علت آن افزایش طول پلاگ ایجادشده در جلوی پرتابه است که به انرژی بیشتر برای جدایش احتیاج دارد.

نکته جالب این است که تغییرات سرعت زاویه‌ای پرتابه حتی در محدوده بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ رادیان بر ثانیه تغییر قابل توجهی در سرعت نهایی آن ایجاد نمی‌کند و می‌توان گفت تنها تأثیر سرعت زاویه‌ای در تغییر زاویه برخورد در طی فرآیند نفوذ است

در مدل جدید با لحاظ نیروی اصطکاک و تغییر فرم پذیری پرتابه با استفاده از مدل ونکسیو پاره‌ای از فرضیات حاکم بر مدل لی اصلاح شده است و سپس با نتایج تجربی دیگران مقایسه شده است و پیش‌بینی قابل قبولی از سرعت پلاگ خروجی و سرعت نهایی پرتابه و نیز ارتباط میان میزان افت سرعت با زاویه برخورد و سرعت اولیه پرتابه به دست آمده است [۲۰].

واحدی و خدارحمی در سال ۲۰۱۲ به بررسی و تحلیل نفوذ مایل پرتابه صلب در هدف فلزی ضخیم پرداختند. در این مقاله، پس از بررسی تحلیلی پیش‌بینی سرعت باقیمانده و زاویه خروجی پرتابه صلب با شکل دماغه مختلف که به صورت مایل به یک هدف فلزی ضخیم برخورد میکند با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ال اس داینما فرآیند نفوذ مایل را به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کرده

در این مقاله با توجه به سرعت نسبی بین فاصله تغییر شکل یافته پرتابه و ناحیه صلب آن (V_s) ۳ حالت فرسایش ($V_s > C_p$)، تغییر شکل ($V_s < C_p$) و حرکت صلب ($V_s = 0$) می‌تواند وجود داشته باشد که به بررسی آن‌ها پرداخته‌اند [۱۷].

لیاقت و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک پرداختند و یک مدل تحلیلی برای آن پیشنهاد کردند، در این تحقیق شکست از نوع پتالینگ نامتقارن فرض شده و آنالیز با استفاده از موازنه انرژی بین انرژی اولیه و کار انجام‌شده صورت می‌پذیرد.

در این مقاله با تخمین انرژی جذب‌شده در طی فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی نازک، سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده محاسبه شده است و در سرعت‌های بالا همخوانی مشاهده گردید [۱۸].

در تحقیقی دیگر لیاقت به تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی شاخک‌دار اهداف فلزی نازک پرداخت و در مورد اثر شاخک‌ها در فرآیند نفوذ بحث کرده است، در این تحقیق شکست از نوع پتالینگ نامتقارن فرض شده است آنالیز با استفاده از موازنه انرژی بین انرژی اولیه و کار انجام‌شده صورت می‌گیرد، کل کار انجام‌شده شامل کار لازم جهت تغییر شکل پلاستیک (W_p)، کار لازم جهت انتقال ماده به موقعیت جدید (W_d)، کار لازم جهت خمش پتال‌ها (W_b) و کار انجام‌شده در اثر نفوذ شاخک‌ها (W_t) فرض شده است.

و به این نتیجه رسید که با وجود مزیت استفاده از شاخک جهت به تعویق انداختن کمانش، مقدار اتلاف انرژی در طی نفوذ آن بسیار ناچیز است [۱۹].

لیاقت در سال ۲۰۱۱ به بررسی اثر تغییر شکل‌پذیری پرتابه دارای چرخش غیرمحوری که در اهداف آلومینیومی انجام گرفته است با استفاده از مدل لی گلداسمیت مورد مطالعه پرداخت.

در برخورد عمودی بردار سرعت پرتابه به موازات محور تقارن آن و عمود بر صفحه هدف می‌باشد و در برخورد همگرا همراه با

normal perforation of projectiles in metallic plate, International Journal of solids and structures, Vol 10. No 6, pp 685-699, 1974.

- [12]. Sidney Chocron, Charles E. Anderson Jr., Donald J. Grosch, Carl H. Popelar, "Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target," International Journal of Impact Engineering 423-437, 25, 2001.
- [13]. Chen, X, Li, Q.: Perforation of a thick plate by rigid projectiles. Int. J. Impact Eng. 28(7), 743-759, 2003.
- [14]. Forrestal, M. J.; Okajima, K.; Luk, V. K. "Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets With Rigid Long Rods.," J. Appl. Mech., 755-760 1988.
- [15]. Chen, X.W., Li, Q.: Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics. Int. J. Impact Eng. 27(6), 619-637, 2002.
- [16]. Chen, X., Li, Q., Fan, S.: Oblique perforation of thick metallic plates by rigid projectiles. Acta Mechanica Sinica 22:367-376, 2006.

[۱۷]. غ ح لیاقت، س فعلی، د رادمهر، "تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر تخت در اهداف فلزی چندگانه"، شماره ۱، سال ششم مجله - پژوهشی علمی مواد پراثری، بهار و تابستان ۱۳۹۰.

[۱۸]. غ ح لیاقت، م ح پل، ع حسینی، "تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های

مخروطی در اهداف فلزی نازک"، صفحه ۱-۱۰، مکانیک و هوافضا جلد ۵ شماره ۲، اسفندماه ۱۳۸۴.

[۱۹]. غ ح لیاقت، م ح پل، ع حسینی، "تحلیل نفوذ مایل پرتابه‌های

مخروطی شاخک‌دار در اهداف فلزی نازک"، صفحه ۴۹-۵۶، مکانیک و هوافضا جلد ۳ شماره ۱، ۱۳۸۷.

[۲۰]. غ ح لیاقت، س فعلی، ط اکبری، "بررسی اثر تغییر شکل‌پذیری

پرتابه دارای چرخش غیرمحوری"، شماره ۴، سال هفتم مجله - پژوهشی علمی مواد پراثری، ۱۳۹۱.

[۲۱]. خ واحدی، ح خدارحمی، ع دهدشتی اخوان، "بررسی و تحلیل

نفوذ مایل پرتابه صلب در هدف فلزی ضخیم"، مجله علمی - پژوهشی مواد پراثری، سال هفتم - شماره ۳ - ۱۳۹۱

و نتایج به‌دست آمده از حل تحلیلی و عددی، با نتایج تجربی مقایسه گردیده است [۲۱].

۵- جمع بندی

- (۱) در این مقاله به مدل‌های تحلیلی مرجع ارائه شده در زمینه نفوذ پرتابه در صفحات فلزی پرداخته شده است.
- (۲) مدل‌های تحلیلی ارائه شده در زمینه نفوذ پرتابه در صفحات فلزی نازک، ضخیم و نیمه بی‌نهایت می‌باشند.
- (۳) در ادامه به کارهای تحلیلی ارائه شده توسط محققین داخلی و خارجی پرداخته شده است.
- (۴) این مقاله می‌تواند به عنوان مرجعی برای خوانندگان علاقه‌مند به بررسی تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف فلزی باشد.

۶- مراجع

- [1]. Forrestal MJ, Piekutowski AJ Penetration experiments with 6061-T6511 aluminum targets and spherical-nose steel projectiles at striking velocities between 0.5 and 3 km/s. Int J Impact Eng, 24: 57-67, 2000.
- [2]. Eichelberger RJ Experimental test of the theory of penetration by metallic jets. J Appl Phys 27(1): 63-68, 1956.
- [3]. Tate A A theory for the deceleration of long rods after impact. J Mech Phys Solids 15: 387-399, 1967.
- [4]. Alekseevskii VP Penetration of a rod into a target at high velocity. Fizika Goreniya I Vzryva, 2(2): 99-106, 1966.
- [5]. Tate A Further results in the theory of long rod penetration. J Mech Phys Solids 17: 141-150, 1969.
- [6]. Tate A Long rod penetration models-Part I. A flow field model for high speed long rod penetration. Int J Mech Sci 28(8): 535-548, 1986.
- [7]. Tate A Long rod penetration models-Part II. Extensions to the hydrodynamic theory of penetration. Int J Mech Sci 28(9): 599-612, 1986.
- [8]. B. PAUL, M. ZAID, "Normal Perforation of a Thin Plate by Truncated Projectiles," JOUR. FRANKLIN INST., Vol. 265, pp. 317-335 1958.
- [9]. M. ZAID, B. PAUL, "Oblique perforation of a thin plate by a truncated conical projectile," JOUR. FRANKLIN INST., Vol. 265, pp. 317-335 1959.
- [10]. J.Awerbuch and Bodner, Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates, International Journal of solids and structures, Vol 10. No 6, pp 671-684, 1974.
- [11]. J.Awerbuch and Bodner, Experimental investigation of