

تحلیل نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در اهداف فلزی بکمک تئوری امواج تنش پلاستیک

حسن مسلمی نائینی
استادیار

غلامحسین لیاقت
استاد

سعید فعلی

دانشجوی دکتری

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله به کمک تئوری امواج تنش پلاستیک محوری و برشی در هدف و پرتابه، فرایند نفوذ عمودی پرتابه‌های تخت در اهداف فلزی مدل گردیده است. طی نفوذ پرتابه تغییر شکل داده و واماندگی حاصل در صفحه هدف پلاستیک همراه تغییر شکل دیشینگ می‌باشد. در این مدل فرایند نفوذ طی شش مرحله تقسیم شده و در هر مرحله معادلات حرکت پرتابه و هدف استخراج گردیده است. جهت مدل‌سازی تغییر شکل دینامیکی ناحیه خارج از پلاگ هدف، روش تحلیلی با فرض رفتار صلب با کار سختی ارائه گردیده است. همخوانی مناسبی بین نتایج مدل تحلیلی و نتایج تجربی وجود دارد.

کلمات کلیدی

پرتابه تغییر شکل‌پذیر، هدف فلزی، امواج تنش پلاستیک، پلاستیک، دیشینگ

Penetration Analysis of Deformable Projectiles Into Metallic Targets By Considering Plastic Stress Waves Theory

G. Liaghat
Professor

H. Moslemi Naeini
Assistant Professor

S. Felli

Ph.D. Student

Tarbiat Modarres University
Mechanical Engineering Department

Abstract

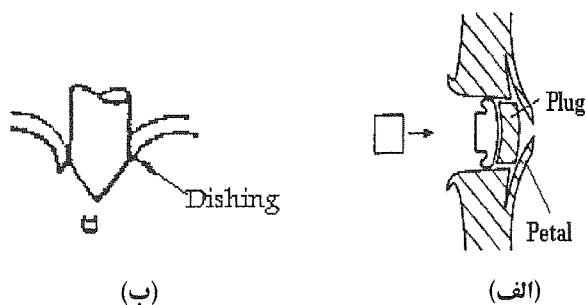
In this paper, an analysis for penetration of cylindrical projectiles into metallic targets at normal obliquity is developed by using propagation of longitudinal and shear plastic stress waves theory. During penetration, projectile deforms failure of target plate is assumed to be in plugging with dishing mode. In this model, projectile penetration into target is classified in six stages and for each and failure stage, the governing equations of motion of projectile and target are derived. We have presented a model for dynamic deformation of outer region of plug, Also, a dynamic behaviour of target is assumed to be like rigid - work hardening. The analytical results of this paper are in good agreement with experimental results.

Keywords

Deformable Projectile, Metallic Target, Plastic Stress Waves, Plugging, Dishing

مدلسازی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی از جمله موضوعاتی است که پژوهشگران در حال بررسی و تحلیل آن با دیدگاهها و روشهای متفاوتی می‌باشند. بررسی کاملی از مکانیک نفوذ پرتابه‌ها در اهداف عمدتاً فلزی توسط بکمن و گلداسمیت [۱]، در سال ۱۹۷۸ و کوربت و دیگران [۲] در سال ۱۹۹۶ انجام شده است. این مقالات شامل کلیه کارهای تجربی و تحلیلی انجام گرفته در مسایل برخورد پرتابه‌ها به اهداف فلزی می‌باشند. در مراجع [۳] تا [۵] نیز دیدگاههای جدید در مدلسازی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی توسط محققین این مقاله ارائه شده است. در روشهای تحلیلی موجود با استفاده از بقاء انرژی یا اندازه حرکت طی پروسه نفوذ و با توجه به نوع واماندگی^۱ هدف و شکل هندسی پرتابه معادلات تحلیلی یا تجربی - تحلیلی ارائه شده که در محدوده خاصی از سرعت و شرایط برخورد قابل استفاده می‌باشند.

در برخورد پرتابه‌ها به اهداف نوع واماندگی ایجاد شده در صفحه هدف با توجه به مشخصات پرتابه و هدف متفاوت می‌باشد. پتالینگ^۲، پلاگینگ^۳ و توسعه سوراخ نرم^۴ سه نوع واماندگی حاصل در هدف می‌باشند که در سرعت برخورد بالاتر از سرعت حد بالستیک (حداقل سرعت مورد نیاز پرتابه جهت نفوذ کامل در هدف) بوجود می‌آیند. بطور معمول در برخورد پرتابه‌های تخت به اهداف فلزی نرم واماندگی حاصل در هدف بصورت پلاگینگ می‌باشد. یعنی مطابق شکل (۱-الف) در هدف یک پلاگ محصور ایجاد می‌گردد که تغییر شکل داده و طی نفوذ از هدف جدا می‌گردد. پاسخ دینامیکی هدف یا ایجاد تغییر کشیدگی در صفحه آن مطابق شکل (۱-ب) تغییر شکل دیشینگ^۵ نامیده می‌شود. در خرابی پتالینگ لایه‌های هدف روی سطح پرتابه حرکت نموده و مطابق شکل (۱-الف) حالت غنچه‌ای روی هدف ایجاد می‌گردد.



شکل (۱) انواع واماندگی حاصل در صفحه هدف.

مدلسازی فرایند نفوذ بکمک انتشار امواج تنش پلاستیک^۶ در پرتابه و هدف یک روش جدیدی می‌باشد که کارهای علمی اندکی در این خصوص گزارش شده است. در این مقاله فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی به کمک انتشار امواج تنش پلاستیک، مدل می‌گردد. استفاده از تئوری امواج تنش پلاستیک بعنوان روش جدیدی در شبیه سازی فرایند نفوذ می‌باشد که محققین اندکی در این خصوص فعالیت نموده‌اند. ونکسیو و دیگران [۶] به کمک انتشار امواج تنش پلاستیک فرایند نفوذ را مدل نموده‌اند. در این روش منحنی تنش کرنش پرتابه بصورت صلب با کار سختی خطی و هدف بصورت صلب کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده و پاسخ دینامیکی هدف یا تغییر شکل دیشینگ طی نفوذ در نظر گرفته نشده است. در مدل ارائه شده در این مقاله ضمن بهینه سازی و تصحیح روش ونکسیو، رفتار ماده هدف بصورت صلب با کار سختی در نظر گرفته شده و علاوه بر آن پاسخ دینامیکی هدف طی نفوذ مدل گردیده و به معادلات حاکم بر تغییر شکل پرتابه و هدف اضافه شده است. در ادامه روش تحلیلی ارائه شده و بحث و بررسی می‌گردد.

۱- مدل تحلیلی نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی

۱-۱- فرضیات و رابطه تنش کرنش هدف

فرضیات مدل تحلیلی به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- منحنی تنش کرنش پرتابه و هدف بصورت صلب با کار سختی خطی در نظر گرفته شده است.
- ۲- واماندگی حاصل در هدف در برخورد عمودی پرتابه تخت پلاگینگ همراه با تغییر شکل دیشینگ می‌باشد.

۳- پلاگ حاصل در صفحه هدف در شرایط کرنش محوری می‌باشد.

۴- تنش حاصل در پرتابه بصورت محوری است.

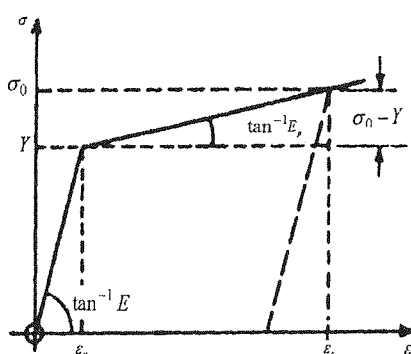
با توجه به روش زوکاس [۸] سرعت انتشار موج محوری در یک میله از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_x = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \varepsilon_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

بنابراین مطابق شکل (۲) در ناحیه الاستیک سرعت انتشار موج الاستیک برابر $C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ می‌باشد. تنش محوری در میله

ناشی از انتشار موج برابریست با [۸]:

$$\sigma_x = \rho C_e v \quad (2)$$



شکل (۲) نمونه‌ای از منحنی تنش کرنش با کار سختی خطی [۸].

رابطه فوق هنگامی که تنش حاصل در میله در حین برخورد کمتر از تنش تسلیم باشد، صادق است. اگر تنش حاصل از تنش تسلیم بیشتر گردد، موجهای تنش الاستو پلاستیک بوجود می‌آید. یعنی علاوه بر موج تنش الاستیک یک موج تنش پلاستیک با سرعت خیلی کمتر از موج الاستیک بوجود می‌آید. اولین بررسی از تئوری امواج تنش پلاستیک توسط دونل [۸] در سال ۱۹۳۰ صورت گرفته است. منحنی تنش کرنش در ناحیه الاستیک و پلاستیک مطابق شکل (۲) بصورت خطی فرض شده و سرعت موج تنش پلاستیک محوری مطابق معادله (۱) برابر با $C_p = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}}$ در نظر گرفته شده است.

علاوه بر امواج تنش محوری، موج تنش برشی^۷ بعلت تنش برشی بوجود می‌آید و سرعت آن برابریست با [۷]:

$$C_s = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

در این مقاله رابطه تنش کرنش حقیقی هدف در بارگذاری دینامیکی فشاری بر اساس نتایج تجربی ارائه شده توسط ریچت

[۷] در نرخ کرنشهای بالاتر از $\frac{1}{3} \times 10^4$ بصورت زیر می‌باشد:

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y - B \bar{\varepsilon} \quad (4)$$

با توجه به روابط تنش کرنش حقیقی و مهندسی در بارگذاری فشاری، معادله فوق برای تنش و کرنش مهندسی بصورت

زیر می‌گردد:

$$\tau = -\tau_y + \frac{1}{3}B\gamma \quad (8)$$

با توجه به رابطه (۸) و استفاده از معادله (۳) سرعت موج تنش برشی در صفحه خارج از پلاگ هدف برابرست با:

$$C_s = \sqrt{\frac{B}{3\rho_t}} \quad (9)$$

در قسمتی از پلاگ که موج پلاستیک عبور نموده مطابق شکل (۳-الف) پلاگ تغییر شکل می‌دهد و با سرعت V_c حرکت می‌کند. در این مقطع تنها نیروی بازدارنده اعمالی بر پرتابه، نیروی حاصل از تنش برشی شکست (τ_f) در پلاگ تغییر شکل یافته می‌باشد. در جلوی موج پلاستیک، پلاگ صلب و با ضخامت T واقع است و با سرعت V_f حرکت می‌کند. تنش برشی در این قسمت پلاگ صفر می‌باشد. علاوه بر پلاگ، پرتابه نیز طی نفوذ تغییر شکل داده و ممکن است کاهش جرم ناشی از برش و فرسایش^۸ در آن بوجود آید. فرسایش در پرتابه نوعی کاهش جرم در آن است که در سرعت برخورد بالاتر از سرعت موج تنش پلاستیک ایجاد می‌گردد [۷]. در این حالت امواج تنش پلاستیک نمی‌توانند ایجاد شوند و بجای آن امواج شاک در سطح مشترک برخورد ایجاد شده و متوقف می‌گردند. فشار حاصل در محل موج بسیار بالا بوده و باعث جت شدن مواد می‌شود تغییر شکل ماده زیاد و مواد موجود در سطح مشترک پرتابه و هدف گرم و ذوب شده و جدا می‌شوند. علاوه بر فرسایش کاهش جرم ناشی از برش نیز در پرتابه بعلت تخت و نازک شدن زیاد از حد لبه آن و جدا شدن دیسک حلقه‌ای از لبه پرتابه، ممکن است ایجاد گردد.

با توجه به سرعت نسبی اولیه لبه پرتابه نسبت به انتهای آن، تغییر شکل پرتابه در حین نفوذ طی سه مرحله بشرح زیر صورت می‌گیرد:

- ایجاد فرسایش در پرتابه اگر $V_s \geq C_p$

- تخت شدن لبه پرتابه اگر $V_s < C_p$

- حرکت پرتابه بصورت صلب اگر $V_s = 0$ که $V_s = V_p - V_c$

در حین برخورد پرتابه به هدف فرض می‌گردد که، قطر پلاگ برابر قطر قسمتی از پرتابه می‌باشد که حداکثر تغییر شکل را داده است و حداکثر سطح مقطع در لحظه اولیه برخورد ایجاد می‌شود [۶] و [۸]. افزایش سطح مقطع پرتابه بعد از برخورد با توجه به بقاء اندازه حرکت در سطح مشترک پرتابه هدف از رابطه زیر استخراج می‌گردد [۶]:

$$\mu_t = \frac{1}{2\phi} \left[\phi \pm (\phi^2 - 4\beta\phi C_p)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

که در آن $\phi = \beta(u_p + C_p) - C_p$ ، $u_i = \frac{\sigma_i}{\rho_i C_i}$ ، $\phi = V_0 + u_t - C_p$ ، $\beta = \frac{\rho_p C_p}{\rho_t C_t}$ و $\mu_t = \frac{A}{A_0}$ می‌باشد. در لحظه اولیه

برخورد پرتابه به هدف، سطح مشترک پرتابه و هدف دارای یک سرعت اولیه می‌باشد که این سرعت اولیه با تساوی نیروهای اعمالی بر پرتابه و پلاگ محاسبه می‌گردد، بنابراین می‌توان نوشت:

$$A_0(\rho_p C_p V_{s0} + \sigma_p) = A(\sigma_t + \rho_t C_t V_{c0}) \quad (11)$$

نیروی حاصل در پلاگ = نیروی حاصل در پرتابه

V_{c0} سرعت سطح مشترک در لحظه برخورد و V_{s0} سرعت نسبی قسمت تغییر شکل یافته نسبت به قسمت بدون تغییر شکل پرتابه می‌باشد و مقدار آن برابر با $V_{s0} = V_0 - V_{c0}$ است. بنابراین با ساده‌سازی معادله (۱۱) داریم:

$$V_{c0} = \frac{\beta(V_0 + u_p) - \mu_t u_t}{\beta + \mu_t} \quad (12)$$

تغییر شکل پلاگ طی فرایند نفوذ نیز در دو مرحله شامل شکل گیری پلاگ $V_r > 0$ و حرکت پلاگ بصورت صلب $V_r = 0$ صورت خواهد گرفت که $V_r = V_c - V_t$.

۱-۳- استخراج معادلات حرکت پرتابه و هدف

برای مدلسازی فرایند از اصل بقا اندازه حرکت برای حجم کنترلی شامل پرتابه تغییر شکل یافته و پلاگ استفاده می‌شود. این اصل به شرح زیر است:

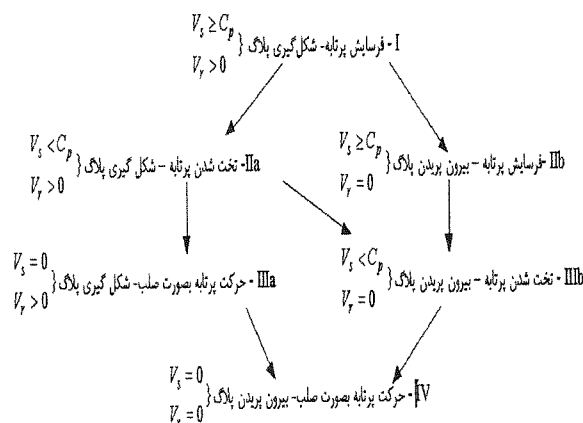
کل نیروهای اعمال شده سطحی و حجمی روی یک بخش ثابت از ماده در داخل حجم کنترل = نرخ زمانی تغییر اندازه حرکت خطی داخل حجم کنترل + شار خالص اندازه حرکت از طریق سطوح کنترل
بنابراین، داریم:

$$F = \frac{\partial M}{\partial t} + \phi \quad (13)$$

در استفاده از این قانون نیروی اصطکاک که معمولاً در فرایند نفوذ از آن صرف نظر می‌گردد، اثری ندارد [۹]. فرایند نفوذ با توجه به سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف، سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و هدف و در نواحی پلاگ صلب و تغییر شکل یافته طی نفوذ، در شش مرحله بشرح فلوجارت شکل (۴) صورت می‌گیرد. در هر یک از شش مرحله فوق، معادلات حرکت سیستم بصورت تابعی از زمان استخراج شده و حل می‌گردد. انتقال از هر مرحله به مرحله بعد بستگی به سرعت پرتابه V_p ، سرعت سطح مشترک V_c و سرعت پلاگ صلب V_t دارد. شرایط اولیه و مرزی هر مرحله بستگی به شرایط نهایی مرحله قبل دارد. در هر مرحله مجهولات مسئله پارامترهای زیر می‌باشند:

$$L(t), T(t), Z_c(t), Z_t(t), H(t), V_t(t), V_c(t), V_p(t)$$

پارامترها در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. در ادامه چند مرحله از معادلات حرکت استخراج شده و توضیحات لازم آورده می‌شود.



شکل (۴) تقسیم بندی مراحل نفوذ با توجه به سرعت پرتابه و پلاگ.

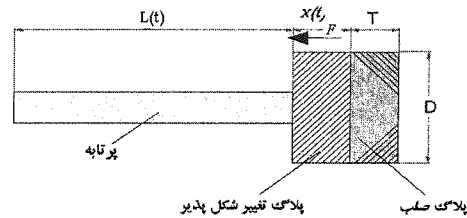
مرحله I: فرسایش پرتابه، شکل گیری پلاگ^۹

این مرحله هنگامی آغاز می‌گردد که سرعت اولیه برخورد از سرعت موج پلاستیک بیشتر گردد و فرسایش در پرتابه صورت گیرد (یعنی $V_s \geq C_p$) و فشرده سازی پلاگ تغییر شکل پذیر انجام پذیرد (یعنی $V_r = V_c - V_t > 0$). در شکل (۵) حجم

کنترل شامل پرتابه، پلاگ تغییر شکل پذیر و پلاگ صلب، نشان داده شده است. اندازه حرکت داخل حجم کنترل شامل اندازه حرکت پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر بشرح زیر می باشد:

$$M = \rho_p A_0 L V_p + \rho_i A x V_c + \rho_i A T V_i$$

که x فاصله از لبه پلاگ است که موج پلاستیک عبور نموده می باشد، یعنی $x = \int C_i dt$ مطابق شکل (۳):



شکل (۵) حجم کنترل شامل پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر مرحله I

$$T = T_0 + Z_t - Z_c - x \quad (14)$$

کل نیروهای خارجی اعمالی بر سطح کنترل با توجه به شکل (۵) و اینکه تنها نیروی خارجی، نیروی برشی حاصل در پلاگ تغییر شکل یافته می باشد، برابرست با:

$$F = \pi D x \tau_f \quad (15)$$

با جایگذاری معادله (۱۴) در (۱۵) داریم:

$$F = -\pi \mu_i \frac{1}{2} D_0 \tau_f (T_0 - T + Z_t - Z_c) \quad (16)$$

شار خالص اندازه حرکت از طریق سطح کنترل یا عبارت دیگر نرخ فرسایش برابرست با:

$$\phi = (V_p - V_c) V_c \rho_p A_0 \quad (17)$$

با جایگذاری مقادیر در معادله (۱۳) و ساده سازی اولین معادله مرحله I بصورت زیر استخراج می گردد:

$$\mu_i \rho_i x \frac{dV_c}{dt} = (\sigma_p + \rho_p V_s^2) - \mu_i (\sigma_i + \rho_i C_i V_i) - 4 \mu_i \frac{1}{2} D_0^{-1} \tau_f (T_0 - T + Z_t - Z_c) \quad (1-I)$$

با توجه به قانون دوم نیوتن داریم:

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L} \quad (2-I)$$

نرخ کاهش طول پرتابه برابرست با:

$$\frac{dL}{dt} = (V_c - V_p) = -V_s \quad (3-I)$$

با توجه به شکل (۳):

$$\frac{dZ_c}{dt} = V_c \quad (۴-۱)$$

$$\frac{dZ_t}{dt} = V_t \quad (۵-۱)$$

همچنین قانون دوم نیوتن برای پلاگ صلب به صورت زیر می‌گردد:

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{\sigma_t}{\rho_t T} \quad (۶-۱)$$

در این مرحله از نفوذ با توجه به اینکه فرسایش در پرتابه صورت می‌گیرد، داریم:

$$H_{(t)} = 0 \quad (۷-۱)$$

با توجه به روابط هندسی موجود:

$$T_{(t)} = T_0 - x + Z_t - Z_c \quad (۸-۱)$$

معادلات (۱-۱) تا (۸-۱) معادلات حاکم بر مرحله I می‌باشند. شرایط اولیه و مرزی حاکم در این مرحله به شرح زیر است:

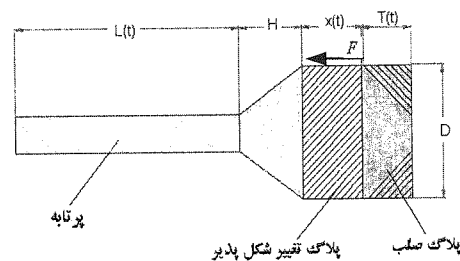
$$\begin{aligned} V_{c(0)} &= V_{c0}, \quad L_{(0)} = L_0, \quad V_{p(v)} = V_0, \quad Z_{c(0)} = 0, \\ Z_{t(0)} &= 0, \quad T_{(0)} = T_0, \quad V_{t(0)} = 0, \quad H_{(0)} = 0 \end{aligned} \quad (۱۸)$$

مرحله IIa: تخت شدن پرتابه، شکل گیری پلاگ

این مرحله از فرایند نفوذ هنگامی صورت می‌گیرد که سرعت پرتابه از سرعت موج پلاستیک کمتر باشد، در این حالت تغییر شکل پلاستیک در پرتابه آغاز می‌گردد. همچنین $V_r > 0$ ، یعنی پلاگ تغییر شکل پذیر فشرده می‌گردد و موج تنش پلاستیک از آن عبور می‌کند. در این مرحله مجموعه پرتابه، پلاگ تغییر شکل پذیر و پلاگ صلب مطابق شکل (۶) حجم کنترل را تشکیل می‌دهند.

اندازه حرکت در داخل حجم کنترل که شامل پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر است، برابرست با:

$$M = \rho_t V V_t A_0 + \mu_t A_0 \rho_t C_t t V_c + \rho_p A_0 L + \rho_p A_0 (L_1 - L) V_c \quad (۱۹)$$



شکل (۶) حجم کنترل شامل پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر مرحله IIa.

که L_1 طول پرتابه در انتهای مرحله فرسایش می‌باشد. همچنین به دلیل اینکه هیچ جرمی از طریق سطوح کنترل منتقل نمی‌گردد، $\phi = 0$ است.

تنها نیروی سطحی، ناشی از تنش برشی روی پلاگ تغییر شکل یافته می‌باشد و مقدار آن برابرست با:

$$F = -\pi D \tau_f \mu_t \frac{1}{2} x \quad (20)$$

با جایگذاری مقادیر در معادله (۱۳) اولین معادله مرحله IIa بصورت زیر می‌گردد:

$$[\rho_p(L_1 - L) + \mu_t \rho_t x] \frac{dV_c}{dt} = \sigma_p + \rho_p C_p V_s - \mu_t (\sigma_t + \rho_t C_t V_r) - 4\tau_f \mu_t^{\frac{1}{2}} D_0^{-1} x \quad (1-IIa)$$

با توجه به قانون دوم نیوتن داریم:

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L} \Rightarrow \int_{V_{p1}}^{V_p} dV_p = \frac{\sigma_p}{\rho_p C_p L_1} \int_{L_1}^L dL$$

$$V_p = V_{p1} + \frac{\sigma_p}{C_p \rho_p} \ln \frac{L}{L_1} \quad (2-IIa)$$

که $-\frac{dL}{dt} = C_p$ نرخ کاهش طول پرتابه طی فرایند نفوذ است و V_{p1} سرعت پرتابه در انتهای مرحله I می‌باشد. همچنین:

$$\frac{dZ_c}{dt} = V_c \quad (3-IIa)$$

$$\frac{dL}{dt} = -C_p \Rightarrow \int_{L_1}^L dL = -\int_{t_1}^t C_p dt \Rightarrow L = L_1 - C_p(t - t_1) \quad (4-IIa)$$

که L_1 و t_1 طول پرتابه و زمان نفوذ در اتمام مرحله فرسایش (مرحله I) می‌باشد. همچنین داریم:

$$\frac{dH}{dt} = V_r - V_p + C_p \quad (5-IIa)$$

از مرحله قبل داریم:

$$\frac{dZ_t}{dt} = V_t \quad (6-IIa)$$

همچنین قانون دوم نیوتن برای پلاگ صلب به صورت زیر می‌گردد:

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{\sigma_t}{\rho_t T} \quad (7-IIa)$$

مانند قبل:

$$T_{(t)} = T_0 - x + Z_t - Z_c \quad (8-IIa)$$

شرایط اولیه و مرزی در این مرحله با توجه به مرحله قبل تعیین می‌گردد. این مرحله فرایند نفوذ تا زمانی ادامه می‌یابد که $V_s = 0$ یا $V_r = 0$ گردد.

اگر $V_r = 0$ در حالی که $V_s \leq C_p$ مطابق شکل (۴) مرحله IIIb و اگر $V_s = 0$ در حالی که $V_r > 0$ مرحله IIIa آغاز می‌گردد.

مرحله IIIb: فرسایش پرتابه، بیرون پریدن پلاگ^{۱۰}

این مرحله از فرایند نفوذ هنگامی آغاز می‌گردد که سرعت پرتابه از سرعت موج پلاستیک بیشتر باشد، بنحوی که فرسایش در آن صورت گیرد در حالی که فرایند شکل‌گیری پلاگ متوقف گردیده و سرعت موج پلاستیک در آن به صفر رسیده است، حجم کنترل شامل پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل یافته است و $V_c = V_r$ می‌باشد. معادلات حاکم در این مرحله به شرح زیر خلاصه شده‌اند:

$$\mu_i \rho_i x \frac{dV_c}{dt} = \sigma_p + \rho_p (V_p - V_c)^2 - 4\mu_i^{\frac{1}{2}} \tau_f D_0^{-1} T \quad (1-IIb)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L} \quad (2-IIb)$$

$$\frac{dL}{dt} = -V_s \quad (3-IIb)$$

$$V_t = V_c \quad (4-IIb)$$

$$\frac{dZ_t}{dt} = V_c \quad (5-IIb)$$

$$T_{(t)} = T_{(t_1)} \quad (6-IIb)$$

که $T_{(t_1)}$ مقدار T در اتمام مرحله I در زمان t_1 است با توجه به شکل (۳-ب) و حرکت پلاگ بصورت صلب داریم:

$$Z_{c(t)} = Z_{t(t_1)I} + \Delta Z_{t(t)} \quad (7-IIb)$$

و نیز با توجه به اینکه فرسایش پرتابه صورت می‌گیرد:

$$H_{(t)} = 0 \quad (8-IIb)$$

این مرحله از فرایند نفوذ تا هنگامی ادامه می‌یابد که $V_s < C_p$ گردد. شرایط اولیه و مرزی در این حالت با توجه به شرایط نهایی مرحله I تعیین می‌گردد.

سایر معادلات حاکم بر فرایند نیز به روش فوق محاسبه می‌گردد و به علت محدودیت جا به آن اشاره نمی‌گردد. انتقال از هر مرحله به مرحله بعد بستگی به سرعت پرتابه، سرعت پلاگ و سرعت انتشار موج پلاستیک در پرتابه و هدف دارد.

۱-۴- مدلسازی تغییر شکل دیشینگ هدف

مدلسازی تغییر شکل ناحیه خارج از پلاگ هدف طی پروسه نفوذ (دیشینگ) کار جدیدی است که به معادلات حرکت اضافه گردیده است. جهت مدلسازی این ناحیه مطابق شکل (۳-ب) هدف به دو ناحیه تقسیم شده است، یکی ناحیه‌ای از هدف که پلاگ را تشکیل می‌دهد و ناحیه دوم ناحیه خارج از پلاگ هدف است که بطور پیوسته تغییر شکل داده و با حرکت حلقه پلاستیک با سرعتی برابر سرعت موج تنش برشی افزایش قطر می‌دهد و سرعت این قسمت از هدف V_3 فرض می‌گردد. سرعت

حرکت حلقه پلاستیک یا $\frac{dR}{dt}$ با توجه به شکل (۳) برابرست با:

$$\frac{dR}{dt} = C_s \quad (21)$$

با توجه به اینکه C_s ثابت است بنابراین:

$$R_{(t)} = C_s t + a_d \quad (22)$$

معادله تعادل در ناحیه خارج از پلاگ هدف، با در نظر گرفتن المانی از آن که تحت تنش برشی ساده قرار دارد، بصورت زیر استخراج می‌گردد:

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\tau}{r} = \rho \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad a \leq r \leq R \quad (23)$$

که $\gamma = \frac{\partial x}{\partial r}$ با توجه به معادله (۸) و (۹) و جایگذاری مقادیر در معادله (۲۳) داریم:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial r^2} + \frac{\partial x}{r \partial r} - \frac{3\tau_Y}{Br} = \frac{1}{C_s^2} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (24)$$

با توجه به روابط هندسی و مرجع [۷] و [۱۲] داریم:

$$\gamma|_R = \frac{\partial x}{\partial r} \Big|_R = -\frac{V_{3(R,t)}}{C_s} \quad (25)$$

با استفاده از رابطه تنش کرنش برشی (معادله (۸)) و معادله (۲۵) توزیع تنش برشی بصورت تابعی از زمان و موقعیت بصورت زیر استخراج خواهد شد:

$$\tau_{(R,t)} = -\tau_Y - \rho_t C_s V_{3(R,t)} \quad (26)$$

با نوشتن معادله تعادل برای صفحه خارج از پلاگ هدف که در حال تغییر شکل است داریم:

$$T_q + 2\pi R T_0 \tau_{(R,t)} = \pi \rho_t T_0 (R^2 - a_d^2) \frac{dV_3}{dt} \quad (27)$$

که $T_q = 2\pi a_d x_{(t)} \tau_f$ نیروی بازدارنده برشی است. با جایگذاری در معادله (۲۷) و ساده سازی، معادله حاکم بر ناحیه خارج از پلاگ بصورت زیر می‌گردد:

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{2a_d x_{(t)} \tau_f - 2R_{(t)} T_0 (\tau_Y + \rho_t C_s V_3)}{\rho_t T_0 (R_{(t)}^2 - a_d^2)} \quad (28)$$

از رابطه (۲۸) V_3 سرعت حرکت قسمتی از هدف که موج تنش برشی از آن عبور نموده است، در هر لحظه زمانی و در هر موقعیت حلقه پلاستیک R با تقریب مناسب محاسبه می‌گردد. معادله (۲۸) به معادلات حرکت در هر مرحله از فرایند نفوذ (مطابق نمودار شکل (۴)) اضافه می‌گردد. هنگامی که $V_3 = 0$ گردد، حرکت صفحه خارج از پلاگ هدف متوقف و اثر پاسخ

دینامیکی در معادلات حذف می‌گردد. از طرفی x_d مطابق شکل (۳-ب) از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dx_d}{dt} = V_3 \quad (26)$$

$$x_d(0) = T_0 \text{ که}$$

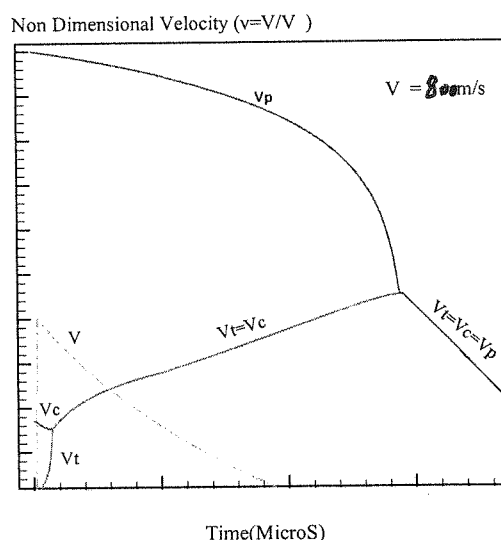
با توجه به توضیحات فوق و استخراج معادلات در هر یک از مراحل فرایند نفوذ، در هر مرحله با توجه به شرایط مرزی و اولیه در شروع برخورد یا مرحله قبل، معادلات حرکت سیستم با روش عددی رانگ کوتا مرتبه چهار حل شده است. برنامه کامپیوتری آماده گردیده که معادلات دیفرانسیل حاصل را حل کرده و نتایج را بصورت مناسب ارائه می‌دهد. ورودیها و اطلاعات مورد نیاز در این برنامه شامل، طول اولیه پرتابه، قطر پرتابه، دانسیته پرتابه، تنش دینامیکی فشاری در پرتابه، ضخامت صفحه هدف، دانسیته هدف، تنش تسلیم دینامیکی هدف، تنش برشی شکست و تنش برشی تسلیم هدف می‌باشد. با حل این معادلات در هر لحظه زمانی، سرعت پرتابه، سرعت سطح مشترک، سرعت پلاگ صلب، عمق نفوذ، طول و ابعاد پرتابه محاسبه می‌گردد.

فرایند نفوذ در یکی از مراحل زیر متوقف می‌گردد:

- سرعت پرتابه در یکی از شش مرحله از فرایند به صفر برسد، یعنی $V_p(t) = 0$. در این حالت نفوذ کامل صورت نمی‌گیرد.
- پلاگ از داخل صفحه هدف بیرون آید یعنی $Z_c(t) > x_d(t)$ گردد. در این صورت نفوذ کامل صورت می‌گیرد.
- تمام جرم پرتابه فرسایش یابد یعنی طول پرتابه بصفر برسد.

۲- نتایج و بحث

در شکل (۷) منحنی تغییرات سرعت پرتابه، سرعت پلاگ پذیر، سرعت پلاگ صلب و نیز سرعت حرکت هدف بر حسب زمان که توسط مدل ارائه شده در این مقاله محاسبه گردیده، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در $5\mu S$ اول برخورد سرعت پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر با هم مساوی شده و مرحله شکل گیری پلاگ متوقف می‌گردد. در $70\mu S$ بعد از برخورد نیز سرعت پرتابه با سرعت پلاگ مساوی خواهد شد و هر سه مانند یک جسم صلب به حرکت ادامه خواهند داد. همچنین تغییر شکل ناحیه خارج از پلاگ در $45\mu S$ بعد از برخورد متوقف می‌گردد یعنی $V_3 = 0$ می‌گردد. همچنین در زمان $95\mu S$ بعد از برخورد پلاگ از صفحه هدف بیرون می‌آید و فرایند نفوذ کامل صورت می‌گیرد. (این منحنی جهت نمایش مراحل تغییر شکل پرتابه و صفحه هدف ارائه گردیده است.)



شکل (۷) منحنی تغییرات سرعت پرتابه، سرعت پلاگ صلب و سرعت پلاگ تغییر شکل پذیر در حین نفوذ.

جهت مقایسه نتایج مدل تحلیلی با نتایج تحلیلی دیگر محققین و نتایج تجربی از نتایج مدل تحلیلی ونکسیو [۶] و نتایج تجربی آوریوخ و بودنر [۱۰] استفاده می‌گردد. مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه و هدف مورد استفاده بشرح جداول (۱) و (۲) می‌باشد. در جدول (۳) مقایسه سرعت باقیمانده پرتابه بعد از برخورد به هدف و زمان نفوذ، بین نتایج تجربی آوریوخ و بودنر [۱۰]، مدل ونکسیو [۶] و نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این مقاله صورت گرفته است. مشاهده می‌گردد که مدل جدید باعث بهبود نتایج مدل ونکسیو [۶] و همگرا شدن نتایج به سمت نتایج تجربی شده است. در اصل اضافه نمودن اثر دیشینگ در ناحیه خارج از پلاگ هدف و تغییر مدل رفتار ماده هدف در مدل جدید، باعث بهبود نتایج گردیده است.

جدول (۱) مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه [۶].

علامت	ماده پرتابه	ρ Kg/m ³	E Gpa	σ_p Mpa	C_p m/s	D_0 mm	L_0 mm	جرم پرتابه gr
TT-R	Lead	۱۱۳۴۰	۱۵	۲۰	۱۱۹	۵/۶	۹/۴۱	۲/۶۳
S-R	Lead	۱۱۳۴۰	۱۵	۲۰	۱۱۹	۷/۶۲	۱۸	۹/۳
A-R	Lead	۱۱۳۴۰	۱۵	۲۰	۱۱۹	۹	۱۰/۲۵	۷/۴

جدول (۲) مشخصات مکانیکی هدف [۶].

علامت	ماده هدف	σ_y Mpa	ρ Kg/m ³	K Gpa	G Gpa	B Mpa	τ_y Mpa	τ_f Mpa
SA-A	St Alloy A	۹۸۰	۷۸۹۰	۱۶۴	۸۰	۱۱۳۷	۴۹۰	۶۵۰
SA-B	St Alloy B	۱۲۰۰	۷۸۹۰	۱۶۴	۸۰	۱۳۹۲	۶۰۰	۸۰۰
Al-1	Al 1100-H14	۱۲۰	۲۷۲۰	۷۵	۳۰	۱۳۹/۳	۶۰	۷۰
Al-6	Al6061-T6	۱۶۰	۲۷۸۰	۷۸	۳۰	۱۸۵/۷	۱۳۰	۱۹۰

جدول (۳) مقایسه نتایج مدل تحلیلی و تجربی.

پرتابه	هدف	ضخامت mm	$V_0(m/s)$	سرعت باقیمانده پرتابه (m/s) V_{rp}			زمان نفوذ (μs)		
				نتایج تجربی [۱۰]	مدل تحلیلی Wenxue [۶]	نتایج مدل جدید (این مقاله)	نتایج تجربی [۱۰]	مدل تحلیلی Wenxue [۶]	نتایج مدل جدید (این مقاله)
S-R	SA-B	۶/۳۵	۸۵۴	۳۵۰-۵۵۰	۴۴۹	۴۶۲	-	۲۲/۹	۲۲/۱
TT-R	Al-1	۱	۳۸۷	۳۶۹	۲۹۷	۳۲۲	-	۴	۳/۹
TT-R	Al-1	۲	۳۸۵	۳۴۶	۲۹۰	۳۲۱	-	۸/۱	۸
TT-R	Al-1	۳	۳۹۷	۳۳۲	۲۹۶	۳۲۳	-	۱۲/۶	۱۲
TT-R	Al-6	۱	۳۷۹	۳۵۷	۲۸۱	۳۱۰	-	۴/۲	۴/۷
TT-R	Al-6	۳	۳۹۷	۳۰۹	۲۶۸	۲۸۸	-	۱۴/۱	۱۸
A-R	Al-6	۳	۴۲۲	۳۴۹	۳۰۰	۳۲۳	۱۲	۱۲	۱۵/۳
A-R	Al-6	۵	۴۱۶	۲۹۱	۲۸۳	۲۹۸	۲۳/۸	۲۲/۵	۲۷
A-R	Al-1	۴	۴۱۶	۳۵۵	۳۱۲	۳۱۶	۱۵	۱۶/۲	۱۷
A-R	Al-1	۶	۴۲۸	۳۳۰	۳۱۲	۳۱۳	۱۹	۲۸/۶	۲۵/۶

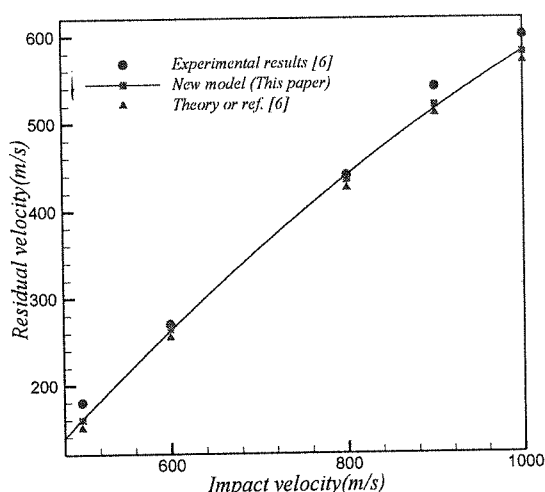
در این قسمت مقایسه‌ای از نتایج حاصل از مدل ارائه شده در این مقاله با نتایج تجربی ونکسیو [۶] و نیز نتایج مدل تحلیلی این مرجع (مدل ونکسیو) صورت می‌گیرد. مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه و هدف مورد استفاده بشرح جدول (۴) می‌باشد. سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه فولادی طبق مرجع [۶] $538m/s$ در نظر گرفته می‌شود. سرعت موج تنش پلاستیک در هدف آلومینیومی با توجه به کرنش پلاستیک حاصل در پلاگ که تابعی از زمان می‌باشد در هر لحظه زمانی از

معادله (۶) بدست می‌آید و سرعت موج تنش برشی نیز از معادله (۳) تعیین می‌گردد. در شکل‌های (۸) و (۹) منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بعد از برخورد بر حسب سرعت اولیه پرتابه برای دو جنس مختلف (جدول (۴)) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله همخوانی بیشتری با نتایج تجربی نسبت به مدل تحلیلی مرجع [۶] دارد و مدل تحلیلی جدید باعث بهبود نتایج گردیده است. در سرعت‌های برخورد بالاتر از سرعت حد بالستیک با توجه به کوتاه بودن زمان نفوذ تغییر شکل خارج از پلاگ هدف چندان زیاد نبوده و برآمدگی چندان در هدف ایجاد نخواهد شد. بنابراین با افزایش سرعت برخورد پرتابه تغییر شکل صفحه خارج از پلاگ هدف تاثیر چندان در نتایج نخواهد داشت.

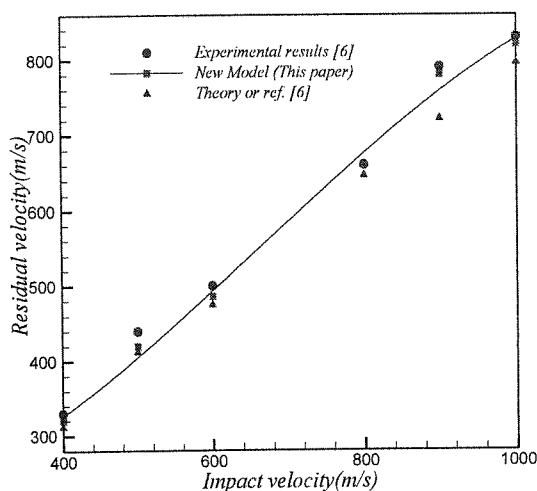
جدول (۴) مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه و هدف.

علامت	مشخصات پرتابه فولادی					مشخصات هدف آلومینیومی		
	ماده پرتابه	σ_p Mpa	ρ Kg/m ³	L_0 mm	D_0 mm	σ_Y Mpa	T_0 mm	B Mpa
BL-3	St 1045	۶۱۰	۷۸۰۰	۱۲/۲	۴/۶۹	۳۴۰	۳	۳۹۴
C-5	4140 Cr	۱۰۵۰	۷۸۰۰	۵/۲۱	۴/۹۹	۴۳۰	۵	۴۹۹

در قسمت بعدی، جهت مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی این مقاله با نتایج تجربی دیگر محققین از نتایج تجربی لیس [۱۱] استفاده شده است. در این مرجع هدف آلومینیومی با مشخصات جدول (۵) و پرتابه فولادی با مشخصات جدول (۶) می‌باشد. در جدول (۷) مقایسه‌ای از مقادیر سرعت حد بالستیک (حداقل سرعت مورد نیاز پرتابه برای نفوذ کامل در هدف) که توسط مدل ارائه شده در این مقاله محاسبه می‌گردد با نتایج حاصل از تست‌های انجام شده توسط لیس [۱۱] و نیز نتایج مدل تحلیلی مرجع [۹] صورت گرفته است. مشاهده می‌گردد که مقادیر سرعت حد بالستیک که توسط مدل ارائه شده در این مقاله محاسبه می‌گردد، همخوانی مناسبی با نتایج تست‌های تجربی انجام شده دارد. در مدل تحلیلی که در مرجع [۹] ارائه گردیده، پرتابه بصورت صلب فرض شده است و اثر دیشینگ هدف در نظر گرفته نشده است.



شکل (۹) منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بعد از برخورد پرتابه بر حسب سرعت اولیه آن برای ماده C-5



شکل (۸) منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بعد از برخورد پرتابه بر حسب سرعت اولیه آن برای BL-3

جدول (۵) مشخصات هدف آلومینیومی [۱۱].

علامت	ضخامت هدف mm	σ_Y Mpa	ρ Kg/m ³	K Gpa	G Gpa	B Mpa
AL1	۲/۲	۱۹۹/۳	۲۷۰۰	۷۵	۳۰	۳۸۱
AL2	۶/۴	۱۹۹/۳	۲۷۰۰	۷۵	۳۰	۳۸۱

جدول (۶) مشخصات پرتابه فولادی [۱۱].

علامت	جرم پرتابه <i>gr</i>	σ_p <i>Mpa</i>	ρ <i>Kg/m³</i>	L_0 <i>mm</i>	D_0 <i>mm</i>
P1	۳۹/۷	۴۵۰	۷۸۰۰	۴۰/۱۷	۱۲/۷

جدول (۷) مقایسه سرعت حد بالستیک مدل جدید با نتایج تجربی مرجع [۱۱] و مدل تحلیلی مرجع [۹].

هدف	پرتابه	سرعت حد بالستیک (m/s)		
		نتایج تجربی مرجع [۱۱]	نتایج مدل تحلیلی مرجع [۹]	نتایج مدل جدید این مقاله
A11	P1	۱۰۰	۶۰/۴۳	۱۰۵
A12	P1	۱۴۵	۱۰۴	۱۶۰

در جدول (۸) مقایسه‌ای از سرعت باقیمانده بعد از برخورد و طول پلاگ که توسط مدل جدید ارائه شده در این مقاله محاسبه می‌گردد، با نتایج تجربی لیس [۱۱] صورت گرفته است. مشخصات پرتابه و هدف مطابق جدول (۵) و (۶) می‌باشد. مشاهده می‌گردد که مدل تحلیلی این مقاله همخوانی مناسبی با نتایج تستهای تجربی دارد.

مدل تحلیل ارائه شده در این مقاله جهت برخورد عمودی پرتابه‌های تخت و با فرض رفتار صلب با کار سختی خطی برای پرتابه و رفتار صلب با کار سختی برای هدف (مطابق معادله (۵)) ارائه شده که اثر نرخ کرنش را در پرتابه و هدف را در نظر نمی‌گیرد. این رفتار از ماده هدف که بر اساس آزمایشات تجربی ارائه شده در مرجع [۷] می‌باشد، برای سه ماده فولاد، آلومینیوم و تیتانیوم که تحت اثر بارگذاری دینامیکی واقع شده‌اند، ارائه شده است با فرض این رفتار از ماده هدف سرعت موج تنش پلاستیک در پلاگ حاصل در هدف تابعی از کرنش پلاستیک محوری خواهد بود و با توجه به معادله (۶) با افزایش کرنش محوری در پلاگ سرعت موج پلاستیک افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به مدل رفتار پرتابه و هدف سرعت موج تنش الاستیک هم در پرتابه و هم در هدف صفر بوده و اثری بر انتشار امواج تنش پلاستیک نخواهد داشت.

جدول (۸) مقایسه نتایج مدل تحلیلی و تجربی لیس [۱۱].

پرتابه	هدف	ضخامت هدف <i>mm</i>	$V_0(m/s)$	سرعت باقیمانده پرتابه (<i>m/s</i>) V_{rp}		طول پلاگ (<i>mm</i>)	
				نتایج تجربی [۱۱]	نتایج مدل جدید این مقاله	نتایج تجربی [۱۱]	نتایج مدل جدید این مقاله
P1	A11	۳/۲	۱۱۰/۴	۶۸/۱	۵۷	۲/۹	۳/۱۰۸
P1	A11	۳/۲	۱۳۲/۲	۱۰۲/۸	۹۱	۲/۸	۳/۰۸
P1	A11	۳/۲	۱۷۲/۵	۱۵۹/۹	۱۴۱	۳	۳/۰۵
P1	A11	۳/۲	۱۸۷/۲	۱۷۵/۶	۱۶۰	۳/۱	۳/۰۳۸
P1	A11	۳/۲	۲۸۴	۲۶۲	۲۶۳	۲/۷	۲/۵۹
P1	A12	۶/۴	۳۴۲/۹	۳۰۰	۲۸۳	۵/۱	۲/۰۶
P1	A12	۶/۴	۳۵۶/۶	۳۰۴/۸	۳۰۰	۴/۹	۵/۷
P1	A12	۶/۴	۵۸۲/۱	۵۳۲	۴۸۰	-	۵/۶۱
P1	A12	۶/۴	۵۹۴/۳	۴۹۰/۷	۴۸۶	۴/۱	۵/۸

دیشینگ هدف در برخورد با سرعت پائین که نفوذ کامل صورت نمی‌گیرد و در محدوده سرعت حد بالستیک و نیز در ضخامت کمتر هدف تاثیر زیادی در نتایج دارد. در سرعت برخورد بالا که نفوذ کامل پرتابه در هدف صورت می‌گیرد، فرایند نفوذ در زمان کوتاهی صورت گرفته و حلقه پلاستیک حاصل در هدف ناحیه کمتری از صفحه خارج از پلاگ را طی می‌کند. روشی که جهت تحلیل و مدلسازی دیشینگ هدف ارائه گردیده با این فرض است که سرعت حلقه پلاستیک در هدف برابر سرعت انتشار امواج تنش برشی می‌باشد و ناحیه‌ای از هدف که موج تنش برشی از آن عبور نموده است تحت اثر برش ساده

قرار دارد و از اثرات نیروی ناشی از خمش صفحه هدف و انتشار امواج تنش خمشی صرفنظر گردیده است در اصل تغییر شکل ناشی از خمش صفحه هدف نیز باید به معادلات حرکت ناحیه خارج از پلاگ اضافه گردد که در آینده انجام خواهد شد [۱۲].

۳- نتیجه گیری

با توجه به تحقیقات انجام شده و مقایسه نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله با نتایج تحلیلی و تجربی موجود، نتیجه گیریهای زیر حاصل می گردد:

- مدلسازی فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی بکمک انتشار امواج تنش پلاستیک در پرتابه و هدف یک روش جدید در مدلسازی فرایند نفوذ می باشد که با توجه به کارهای تحلیلی انجام شده در این مقاله، نتایج حاصل از آن همخوانی مناسبی با نتایج تجربی موجود دارد و باعث بهبود نتایج مدل تحلیلی دیگر محققین [۶] گردیده است.

- مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله مدلی مناسب جهت تحلیل نفوذ عمودی پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی می باشد و می تواند پیش بینی مناسبی از نفوذ یا عدم نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی نماید. نرم افزار حاصل از این مدل جهت طراحی زره‌ها و پرتابه‌ها مناسب می باشد و توسط آن می توان بررسی پارامتری در خصوص عوامل موثر در نفوذ نمود.

- پاسخ دینامیکی یا تغییر شکل دیشینگ صفحه خارج از پلاگ هدف هنگامی که سرعت برخورد پرتابه به هدف در نزدیکی سرعت حد بالستیک یا اندکی بالاتر از آن است و نیز هنگامی که نسبت ضخامت به قطر پرتابه کوچکتر از یک است (اهداف نازک) در فرایند نفوذ موثر بوده و در نتایج تاثیر به سزایی دارد.

فهرست نمادها

V_c : سرعت سطح مشترک پرتابه، هدف	A : سطح مقطع پلاگ
V_p : سرعت قسمت بدون تغییر شکل پرتابه	A_0 : سطح مقطع اولیه پرتابه
V_r : سرعت پلاگ تغییر شکل پذیر نسبت به پلاگ صلب	a_d : شعاع پلاگ
V_{rp} : سرعت باقیمانده پرتابه بعد از برخورد به هدف	B : ضریب کار سختی
V_s : سرعت قسمت تغییر شکل یافته نسبت به قسمت صلب پرتابه	C_e : سرعت موج تنش الاستیک محوری
x : ضخامت پلاگ تغییر شکل پذیر	C_f : سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پلاگ
ε : کرنش مهندسی معادل	C_p : سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پرتابه
$\bar{\varepsilon}$: کرنش پلاستیک حقیقی	C_x : سرعت موج تنش محوری
ε_x : کرنش پلاستیک محوری	D : قطر پلاگ
ϕ : شار خالص اندازه حرکت از طریق سطح کنترل	D_0 : قطر اولیه پرتابه
γ : کرنش برشی محوری	E : مدول الاستیک
μ_f : نسبت سطح مقطع اولیه به سطح مقطع تغییر شکل یافته پرتابه	E_p : مدول پلاستیک (شیب منحنی تنش کرنش پلاستیک)
ρ : دانسیته	F : کل نیروهای سطحی و حجمی اعمالی بر حجم کنترل
ρ_p : دانسیته پرتابه	$H(f)$: ضخامت ناحیه تغییر شکل یافته پرتابه (شکل (۳-ب))
ρ_f : دانسیته هدف	K : مدول حجمی
$\bar{\sigma}$: تنش پلاستیک حقیقی	$L(f)$: طول قسمت صاف پرتابه در هر لحظه زمانی
σ_x : تنش محوری	L_0 : طول اولیه پرتابه
σ_p : تنش دینامیکی فشاری پرتابه در شرایط تنش محوری	M : اندازه حرکت خطی در داخل حجم کنترل
σ_f : تنش تسلیم دینامیکی هدف در شرایط کرنش محوری	R : شعاع حلقه پلاستیک در هدف، شکل (۳-ب)
σ_s : تنش معادل مهندسی	T : ضخامت پلاگ صلب
σ_T : تنش تسلیم	t : زمان نفوذ
τ : تنش برشی	T_0 : ضخامت اولیه هدف
τ_f : تنش برشی شکست	v : سرعت ذرات میله که موج تنش از آن عبور نموده است.
τ_p : تنش برشی تسلیم	V_0 : سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف
	V_3 : سرعت حرکت ناحیه خارج از پلاگ هدف (شکل (۳))

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| 1-Failure | 6- Plastic Stress Wave |
| 2- Petalling | 7- Shear Stress Wave |
| 3- Plugging | 8- Erosion |
| 4- Ductile Hold Enlargement | 9- Plug Formation |
| 5- Dishing | 10- Plug Ejection |

مراجع

- [1] Backman M.E. and W. Goldsmith, The Mechanics of Penetration of Projectiles Into Targets, Int. J. Engng Sci., 16,1-99,1978.
- [2] Corbett G.G. and S.R.Reid and W. Johanson, Impact Loading of Plates and Shells By Free- Flying Projectiles, A review, Int. J. Impact Eng., 18, 2, 141-230, 1996.
- [3] Liaghat G.H. and A. Malekzadeh, A Modification to the Mathematical Model of Perforation by Dikshit and Sundararajan, Int. J. Impact Eng., 22, 543-550, 1999.
- [4] Liaghat G.H. and A. Malekzadeh, A Comment on the Penetration Theory by Dikshit and Sundararajan, Int. J. Impact Eng., 16(4), 691, 1995.
- [5] لیاقت غلامحسین، سعید فعلی، مدل جدید نفوذ مایل پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلزی چند لایه‌ای نازک در تماس و با فاصله، هشتمین کنفرانس مهندسی مکانیک، دانشگاه شریف، ۱۳۷۹.
- [6] Wenxue Y. and Z. Lanting , Plate Perforation By Deformable Projectiles- A Plastic Wave Theory, Int. J. Impact Eng., 1, 4, 393-412, 1983.
- [7] Recht R.F., Taylor Ballistic Impact Modelling Applied to Deformation and Mass Loss Determinations, Int. J. Eng. Sci., 16, 809-827, 1978.
- [8] Zukas J.A., High Velocity Impact Dynamic, John Wily and Sons, 1990.
- [9] Liss J., W. Goldsmith and J.M. Kelly, A Phenomenological Penetration Model of Plates, Int. J. Impact Eng., 1, 4, 321-341, 1983.
- [10] Awerbuch J. and S.R. Bodner, Analysis of the Mechanics of Normal Perforation of Projectiles into Metallic Plates, Int. J. Solid Struct., 10(1), 685-699, 1974.
- [11] Liss J. and W. Goldsmith, Plate Perforation Due to Impact By Blunt Cylinders, Int. J. Impact Eng., 2, 1, 37-64, 1984.
- [12] سعید فعلی، بکارگیری امواج تنش پلاستیک در تحلیل فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی، رساله دکتری دانشگاه تربیت مدرس (در حال انجام).
- [13] K. Li & W. Goldsmith, A Phenomenological Model for Penetration of Moderately Thick Plates by Projectiles, Int. J. Solids Struc., 33, 24, 3561-3575, 1996.