

## تحلیل شکست پلاگینگ صفحات فلزی تحت اثر ضربه عمودی پرتابه‌های تغییر شکل پذیر

سعید فعلی<sup>i\*</sup>؛ اسد نوری تبار<sup>ii</sup>

### چکیده

در این مقاله شکست پلاگینگ صفحات فلزی در برخورد و نفوذ عمودی پرتابه‌های تغییر شکل پذیر به روش انتشار امواج تنش پلاستیک مدلسازی و تحلیل گردیده است. مدل رفتار ماده پرتابه و هدف بصورت صلب - پلاستیک با کار سختی خطی در نظر گرفته شده است. در این مدل تحلیلی بر اساس سرعت انتشار موج تنش پلاستیک در پرتابه، پلاگ و ناحیه خارج از پلاگ، فرایند نفوذ به شش مرحله تقسیم بندی شده و معادلات حاکم در هر مرحله استخراج شده‌اند. نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج شبیه سازی عددی انجام شده به کمک نرم افزار LS-Dyna، نتایج تجربی و تحلیلی موجود مقایسه گردیده است. مقادیر سرعت باقیمانده پرتابه بعد از برخورد به هدف، قطر ناحیه تخت شده پرتابه، زمان نفوذ و سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارند.

کلمات کلیدی: پرتابه، هدف، موج تنش پلاستیک، پلاگینگ، دیشینگ

### *Plugging of Metallic Plates under Normal Impact of Deformable Projectiles*

S. Feli , A. Noritabar

#### ABSTRACT

In this paper, the plugging failure of metallic plates under normal penetration of deformable projectiles has been analyzed by considering plastic stress wave theory. The material behaviors of plate material and projectile are considered rigid-plastic linear work hardening. In this model based on propagation of plastic stress waves in projectile, plug and outer region of plug, the penetration process is divided in six steps and governing equations at each step are derived. The results of analytical model are compared with experimental results and modeling by LS-Dyna software. The residual velocity, flattening area of projectile, penetration time and ballistic limit velocity predicted by new analytical model are good agreement with experimental results.

**KEYWORDS :** Projectile, Target, Plastic Stress wave, Plugging, Dishing

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۶/۳۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۵/۶

<sup>i\*</sup> نویسنده مسئول و استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه،

Felisaeid@gmail.com

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، Noritabar\_asad@yahoo.com

## ۱- مقدمه

سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه استخراج نمودند. لیاقت و همکاران در مراجع [۷] تا [۹]، نفوذ پرتابه های لبه تخت استوانه‌ای در اهداف فلزی و بکمک انتشار امواج تنش پلاستیک در ماده پرتابه و هدف را مدلسازی و تحلیل نموده‌اند. در این مقاله شکست پلاگینگ همراه با تغییر شکل دیشینگ هدف در نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر، به کمک انتشار امواج تنش پلاستیک، مدلسازی و تحلیل گردیده است. این روش تحلیلی بر اساس اصلاح مدل تحلیلی ونکسیو و همکاران [۴] و لیاقت و همکاران [۷] ارائه شده و تغییر شکل ناحیه خارج از پلاگ هدف (دیشینگ) را که در روش ونکسیو و همکاران [۴] چشم پوشی شده، در نظر می‌گیرد و این تغییر شکل را بر اساس انتشار موج تنش عرضی در صفحه هدف مدلسازی می‌نماید. در این روش، مدل رفتار ماده پرتابه و هدف بصورت صلب پلاستیک با کار سختی خطی در نظر گرفته شده است و معادلات ارائه شده قبلی اصلاح گردیده‌اند. نتایج مدل تحلیلی با نتایج شبیه سازی انجام شده با نرم افزار LS-Dyna، نتایج تجربی موجود و نتایج مدل تحلیلی ونکسیو و همکاران [۴] مقایسه گردیده است.

## ۲- مدل تحلیلی

### ۲-۱- فرضیات

فرضیات مدل تحلیلی عبارتند از:

- مدل رفتار ماده پرتابه و هدف بصورت صلب با کارسختی خطی در نظر گرفته شده است.
- واماندگی حاصل در هدف در برخورد عمودی پرتابه استوانه‌ای پلاگینگ همراه با ای‌جاد برآمدگی می‌باشد.
- پلاگ حاصل در صفحه هدف در شرایط کرنش محوری است.
- تنش حاصل در پرتابه بصورت محوری است.
- روابط مدل رفتار ماده پرتابه و هدف و سرعت انتشار امواج تنش پلاستیک در شرایط تنش محوری و کرنش محوری در پرتابه و هدف در قسمت ضمایم آورده شده است.

### ۲-۲- تحلیل و بررسی فرایند

در برخورد پرتابه تخت تغییر شکل پذیر به هدف با ضخامت متوسط یا نیمه ضخیم، مطابق شکل (۱) لبه پرتابه تخت شده و یک ناحیه استوانه‌ای به نام پلاگ در محل تماس و در صفحه هدف ایجاد می‌گردد و از هدف جدا می‌شود. مطابق شکل (۱) دو موج تنش در هدف (موج تنش پلاستیک محوری در پلاگ و موج تنش برشی در صفحه خارج از پلاگ) و یک موج

برخورد و نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی از جمله موضوعات علمی جدیدی است که پژوهشگران با دیدگاههای مختلف در حال بررسی این موضوع می‌باشند. مدلسازی تحلیلی فرایند به کمک معادلات اساسی، شبیه سازی عددی به کمک نرم افزارهای المان محدود و انجام آزمایشهای تجربی از جمله روشهایی بررسی این موضوع می‌باشد. بکمن و گلداسمیت [۱] و کوربت و همکاران [۲] بررسی کاملی از مکانیک نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی ارائه نموده و اکثر تحقیقات تجربی و تحلیلی انجام شده در گذشته را در این خصوص را جمع آوری و مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند.

رچت [۳] روش تحلیلی ساده‌ای برای شبیه سازی تغییر شکل لبه یک میله در برخورد به سطح صلب و به کمک انتشار امواج تنش پلاستیک ارائه نمود. در این روش با توجه به سرعت برخورد اولیه، کاهش جرم ناشی از فرسایش و برش در میله به روش تحلیلی ساده‌ای محاسبه شده است.

ونکسیو و همکاران [۴] مدل تحلیلی برای شبیه سازی نفوذ پرتابه‌ها در اهداف به کمک انتشار امواج تنش پلاستیک ارائه نمودند. در این روش، برخورد پرتابه‌های لبه تخت تغییر شکل پذیر در اهداف نازک و ضخیم فلزی با در نظر گرفتن شکست پلاگینگ در هدف بررسی شده است. پرتابه و هدف بصورت صلب- کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده است. در این روش فرایند نفوذ پرتابه در هدف به شش مرحله تقسیم شده و معادلات حاکم بر هر مرحله استخراج شده اند. این روش قادر به محاسبه سرعت خروجی پرتابه بعد از برخورد بوده و در محدوده سرعت حد بالستیک نتایج حاصل از آن همخوانی مناسبی با نتایج آزمونهای تجربی ندارد.

مدل دیگری در خصوص نفوذ پرتابه‌های تخت در اهداف فلزی توسط لیس و گلداسمیت [۵] با در نظر گرفتن انتشار امواج تنش پلاستیک در پلاگ حاصل در هدف ارائه شده است. در این روش، پرتابه بصورت صلب و بدون تغییر شکل و ماده هدف بصورت صلب- کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج این روش دیده شده که در محدوده خاصی از سرعت برخورد این روش نتایج مناسبی ارائه می‌دهد.

مادولین و همکاران [۶] مدل تحلیلی برای شبیه سازی تغییر شکل در پرتابه استوانه‌ای که به سطح صلب برخورد می‌کند، بر اساس انتشار موج تنش پلاستیک و معادلات بقاء انرژی، اندازه حرکت و جرم در پیشانی موج تنش، ارائه کرده و روابطی را برای محاسبه تنش محوری، کرنش سطحی و

پرتابه، ممکن است ایجاد گردد. با توجه به سرعت لبه نسبت به انتهای پرتابه  $V_s = V_7 - V_1$  تغییر شکل در حین نفوذ طی سه مرحله صورت می‌گیرد که عبارتند از:

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

- تخت شدن لبه پرتابه اگر  $V_s < C_p$

- حرکت پرتابه بصورت صلب اگر  $V_s = 0$

تغییر شکل پلاگ طی فرایند نفوذ نیز در دو مرحله شامل شکل گیری پلاگ  $V_r > 0$  و بیرون زدن پلاگ  $V_r = 0$  صورت خواهد گرفت که  $V_r = V_1 - V_4$ . در مرحله شکل گیری پلاگ، موج تنش پلاستیک با سرعت  $C_T$  در آن منتشر می‌شود و در مرحله بیرون زدن، موج تنش پلاستیک به انتهای پلاگ رسیده است [۷].

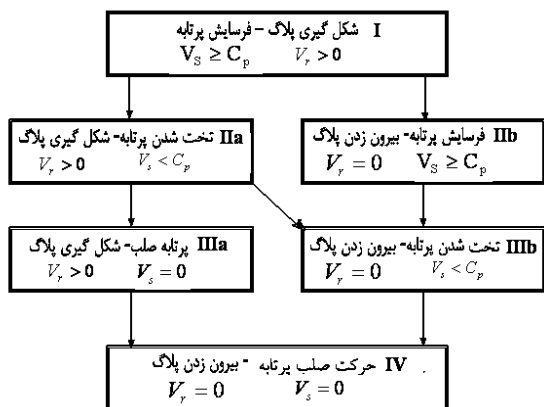
### ۲-۳- استخراج معادلات حاکم

برای مدلسازی فرایند از اصل بقا اندازه حرکت برای حجم کنترلی شامل پرتابه تغییر شکل یافته، پلاگ و ناحیه خارج از پلاگ استفاده می‌شود. اصل یاد شده عبارت است از:

کل نیروهای اعمال شده سطحی و حجمی روی یک بخش ثابت از ماده در داخل حجم کنترل  $(F) =$  نرخ زمانی تغییر اندازه حرکت خطی داخل حجم کنترل  $(\partial M / \partial t) +$  شار خالص اندازه حرکت از طریق سطوح کنترل  $(\phi)$   
بنابراین:

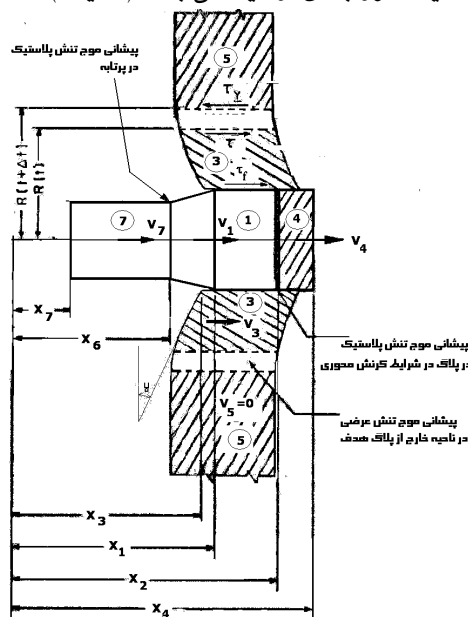
$$F = \frac{\partial M}{\partial t} + \phi \quad (1)$$

در استفاده از این قانون نیروی اصطکاک چشم پوشی شده است. در روش ونکسیو و همکاران [۴] با توجه به سرعت اولیه برخورد، سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و هدف و در نواحی پلاگ صلب و تغییر شکل یافته، فرایند نفوذ در شش مرحله به شرح الگوریتم شکل (۲) صورت می‌گیرد.



شکل ۲- تقسیم بندی مراحل شش گانه نفوذ

تنش پلاستیک در پرتابه (موج محوری) منتشر می‌شود. موج تنش پلاستیک محوری در پلاگ که در شرایط کرنش محوری قرار دارد با سرعت  $C_T$  منتشر می‌گردد. علاوه بر آن ناحیه خارج از پلاگ مطابق شکل ۱ تحت اثر تنش برشی ساده  $\tau$  قرار دارد و موج تنش برشی در صفحه خارج از پلاگ هدف با سرعت  $C_s$  منتشر می‌شود. موج تنش پلاستیک محوری در پرتابه نیز با سرعت  $C_p$  منتشر می‌گردد. ضمن عبور موج تنش پلاستیک در پلاگ دو مقطع ایجاد خواهد شد. یکی تغییر شکل یافته که موج تنش پلاستیک از آن عبور نموده (ناحیه ۱) و دیگری مقطع صلب و بدون تغییر شکل که موج تنش پلاستیک هنوز به آن نرسیده می‌باشد (ناحیه ۴).



شکل ۱- تغییر شکل پرتابه و هدف در حین نفوذ

در قسمتی از پلاگ که موج پلاستیک عبور نموده مطابق شکل (۱) پلاگ تغییر شکل می‌دهد و با سرعت  $V_1$  حرکت می‌کند. در این مقطع تنها نیروی بازدارنده اعمالی بر پرتابه، نیروی حاصل از تنش برشی شکست  $(\tau_f)$  در پلاگ تغییر شکل یافته است. در جلوی موج پلاستیک، پلاگ صلب با ضخامت  $T$  واقع است و با سرعت  $V_4$  حرکت می‌کند. تنش برشی در این قسمت پلاگ صفر می‌باشد. قطر پلاگ با قطر قسمتی از پرتابه که تغییر شکل داده برابر است. علاوه بر پلاگ، پرتابه نیز طی نفوذ تغییر شکل داده و کاهش جرم ناشی از برش و فرسایش در آن ممکن است بوجود آید. فرسایش در پرتابه نوعی کاهش جرم در آن است که در سرعت برخورد بالاتر از سرعت موج تنش پلاستیک ایجاد می‌گردد [۶]. علاوه بر فرسایش کاهش جرم ناشی از برش نیز در پرتابه بعثت تخت و نازک شدن زیاد از حد لبه آن و جدا شدن دیسک حلقه‌ای از لبه

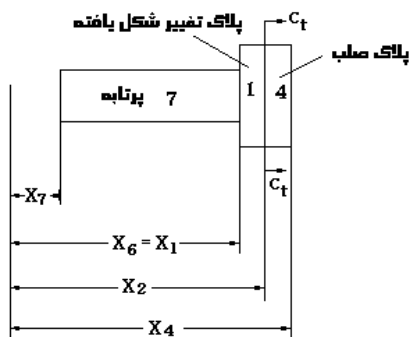
در هر یک از شش مرحله یاد شده، معادلات حرکت سیستم بصورت تابعی از زمان استخراج شده و حل می‌گردد. انتقال از هر مرحله به مرحله بعد بستگی به سرعت پرتابه، سرعت سطح مشترک پرتابه - پلاگ و سرعت پلاگ صلب دارد. در ادامه معادلات حاکم بر مرحله I و II ارائه شده است.

### مرحله I: فرسایش پرتابه، شکل گیری پلاگ

این مرحله زمانی شروع می‌شود که سرعت انتشار موج تنش پلاستیک در پرتابه کمتر از سرعت نسبی لبه نسبت به انتهای پرتابه باشد یعنی  $V_s \geq C_p$  و پلاگ در هدف شکل گرفته و موج تنش پلاستیک در آن با سرعت  $C_t$  منتشر شود یعنی  $V_r > 0$  [۴]. پارامترهای هندسی و چگونگی انتشار موج تنش در پلاگ در این مرحله مانند شکل (۳) می‌باشد. سرعت سطح مشترک پرتابه هدف ( $V_{c0}$ ) بر اساس اصل بقاء اندازه حرکت در سطح مشترک پرتابه- پلاگ و با ساده سازی از معادله ۲ محاسبه می‌گردد [۱۱].

$$V_{c0} = \frac{\beta(V_0 + u_p) - \mu_t u_t}{\beta + \mu_t} \quad (2)$$

که در آن  $\mu_t = \frac{A}{A_0}$  و  $\beta = \frac{\rho_p C_p}{\rho_t C_t}$ ،  $u_t = \frac{\sigma_t}{\rho_t C_t}$  می‌باشد که  $A_0$  سطح اولیه،  $A$  سطح تغییر شکل یافته و  $V_0$  سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف می‌باشند.



شکل ۳- پارامترهای هندسی پلاگ و پرتابه در مرحله I

نسبت سطح مقطع پلاگ به پرتابه بر اساس بقاء جرم برابرست با [۱۱]:

$$\mu = \left(1 - \frac{V_7}{C_p}\right)^{-1} \quad (3)$$

اندازه حرکت حجم کنترل شامل اندازه حرکت پرتابه ( $M_7$ )، پلاگ صلب ( $M_4$ ) و تغییر شکل یافته ( $M_1$ ) از معادلات شماره ۴ تا ۶ محاسبه می‌شوند.

$$M_7 = \rho_p \cdot A_0 \cdot (X_1 - X_7) \cdot V_7 \quad (4)$$

$$M_4 = \rho_t \cdot \mu \cdot A_0 \cdot (X_4 - X_2) \cdot V_4 \quad (5)$$

$$M_1 = \rho_t \cdot \mu \cdot A_0 \cdot (X_2 - X_1) \cdot V_1 \quad (6)$$

نیروی خارجی اعمالی بر سطح کنترل در ناحیه پلاگ تغییر شکل یافته اعمال شده و برابر است با:

$$F = -\pi \cdot \mu^{\frac{1}{2}} \cdot D_0 \cdot (C_t \cdot t) \cdot \tau_f \quad (7)$$

که  $\tau_f$  تنش برشی شکست ماده هدف،  $D_0$  قطر اولیه پرتابه و  $t$  زمان است. شار خالص اندازه حرکت از طریق سطح کنترل و یا نرخ فرسایش پرتابه نیز برابر است با:

$$\phi = (V_7 - V_1) \cdot V_1 \cdot \rho_p \cdot A_0 \quad (8)$$

معادلات اندازه حرکت بصورت رابطه ۹ است.

$$\frac{\partial M_t}{\partial t} + \phi = F$$

$$M_t = M_1 + M_4 + M_7$$

$$\frac{\partial M_7}{\partial t} = -\sigma_p \cdot A_0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M_4}{\partial t} = \sigma_t \cdot \mu \cdot A_0$$

با توجه به معادلات یاد شده و جایگذاری مقادیر، معادلات حاکم برای محاسبه  $\dot{V}_7$ ،  $\dot{V}_4$ ،  $\dot{V}_1$  بصورت رابطه ۱۰ است.

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} = & (-\pi \cdot (\mu^{\frac{1}{2}} \cdot D_0) \cdot (C_t \cdot t) \cdot \tau_f + \\ & \rho_p \cdot A_0 \cdot (V_7 - V_1)^2 \\ & - \rho_t \cdot \mu \cdot A_0 \cdot C_t \cdot (V_1 - V_4) + (A_p + B_p) \cdot A_0 \\ & - \left(\frac{2}{3} \cdot A_t - (K_t + B_t)\right) \\ & \cdot \ln((X_4 - T_0 + C_t \cdot t - X_1) / C_t \cdot t) \cdot A_0 \cdot \mu) \\ & / \rho_t \cdot \mu \cdot A_0 \cdot C_t \cdot t \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_4}{dt} = & \left(\frac{2}{3} \cdot A_t - (K_t + B_t)\right) \\ & \cdot \ln((X_4 - T_0 + C_t \cdot t - X_1) / C_t \cdot t) \cdot A_0 \cdot \mu / \\ & (\rho_t \cdot (T_0 - C_t \cdot t) \cdot \mu \cdot A_0) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{dV_7}{dt} = -(A_p + B_p) / (\rho_p \cdot L) \quad (12)$$

که  $T_0$  ضخامت اولیه هدف فلزی است. همچنین نرخ تغییر طول پرتابه برابر است با:

$$H_p = X_1 - X_6 \quad (17)$$

از طرفی:

$$\frac{dL}{dt} = -C_p \cdot t \quad (18)$$

این مرحله تا زمانی که  $V_s \leq 0$  یا  $V_r = 0$  گردد، ادامه می‌یابد و یکی از مراحل IIIa یا IIIb آغاز می‌گردد.

معادلات حاکم بر سایر مراحل فرایند نیز با روشی مشابه استخراج می‌گردد. در مرحله‌ای از نفوذ که مرحله بیرون پریدن پلاگ است یعنی  $V_r = 0$  سرعت نواحی ۳ و ۴ با هم مساوی بوده و در این مراحل ناحیه خارج از پلاگ هدف به حجم کنترل اضافه می‌گردد. جزئیات دقیق و معادلات حاکم در هر مرحله بطور مفصل در مرجع [۱۱] آورده شده است.

فرایند نفوذ پرتابه در هدف در یکی از مراحل متوقف می‌گردد که عبارتند از:

- سرعت پرتابه در یکی از شش مرحله از فرایند به صفر برسد، یعنی  $V_7 = 0$  (نفوذ جزئی).

- پلاگ از صفحه هدف بیرون آید یعنی مطابق شکل (۱)  $X_2 \geq X_3 + T_0$  گردد. در این صورت نفوذ کامل صورت می‌گیرد و پلاگ از ماده هدف خارج می‌شود.

- کل پرتابه فرسایش یابد یعنی طول پرتابه به صفر برسد. معادلات حاکم بر مدل تحلیلی در هر یک از ۶ مرحله نفوذ شامل معادلات دیفرانسیل محاسبه سرعت نواحی مختلف ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ) و معادلات پارامترهای موقعیتی  $x_1$  تا  $x_7$  در هر لحظه زمانی  $t$  می‌باشد. برای حل این معادلات برنامه کامپیوتری با زبان ++C تهیه گردیده که معادلات دیفرانسیل حاکم را به روش عددی رانچ گاتا مرتبه چهار حل نموده و با گرفتن پارامترهای ورودی، شامل ابعاد و جرم پرتابه، سرعت اولیه پرتابه، ضخامت هدف و ضرایب مدل رفتار ماده پرتابه و هدف، پارامترهای مجهول را در هر لحظه زمانی محاسبه می‌نماید. شرایط اولیه به شرح روابط شماره ۱۹ است:

$$V_{3(0)} = V_{4(0)} = 0, \quad V_{7(0)} = V_0, \quad V_{1(0)} = V_{c0} \\ x_{1(0)} - x_{7(0)} = L_0, \quad x_{4(0)} - x_{3(0)} = T_0 \quad (19)$$

که  $V_0$  سرعت اولیه پرتابه در لحظه برخورد،  $L_0$  طول اولیه پرتابه،  $T_0$  ضخامت اولیه هدف،  $V_{c0}$  سرعت سطح مشترک پرتابه هدف مطابق معادله (۲) می‌باشد و سایر پارامترها در شکل (۱) نشان داده شده است.

### ۳- تحلیل فرایند به کمک نرم افزار LS-Dyna

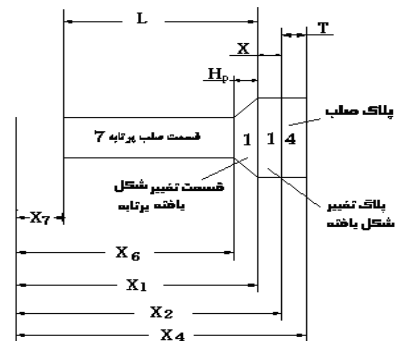
برای مقایسه نتایج مدل تحلیلی، شبیه سازی شکست

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt}(X_1 - X_7) = V_1 - V_7 \quad (13)$$

این مرحله تا زمانی که  $V_s < C_p$  یا  $V_r = 0$  ادامه می‌یابد و یکی از مراحل IIa یا IIb آغاز می‌گردد. در این مرحله سرعت نواحی ۳ و ۴ با هم مساوی است.

### مرحله IIa: تخت شدن پرتابه، شکل گیری پلاگ

این مرحله هنگامی آغاز می‌شود که لبه پرتابه تخت شود یعنی  $V_r = V_1 - V_4 > 0$  و  $V_s < C_p$  یعنی موج تنش پلاستیک در پلاگ حاصل در هدف انتشار یابد [۴]. در این مرحله مجموعه پرتابه، پلاگ تغییر شکل یافته و پلاگ صلب با توجه به وجود یا نبودن برش در ناحیه تخت شده پرتابه اجزاء حجم کنترل را تشکیل می‌دهند. پارامترهای هندسی و چگونگی تغییر شکل پرتابه و پلاگ مطابق شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴- پارامترهای هندسی پرتابه و پلاگ در مرحله IIa

اندازه حرکت حجم کنترل شامل اندازه حرکت ناحیه صلب و تغییر شکل یافته پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل یافته است، علاوه بر آن:

$$\begin{cases} F = -\pi \cdot D \cdot (C_t \cdot t) \cdot \tau_f \\ \phi = 0 \end{cases} \quad (14)$$

که  $D$  قطر ناحیه تخت شده پرتابه است. با توجه به معادله (۱) و ساده سازی در پای‌ان بدست می‌آید:

$$\frac{dV_4}{dt} = \left( \frac{2}{3} \cdot A_t - (K_t + B_t) \cdot \ln(X_4 - T_0 + C_t \cdot t - X_1) \right) / (C_t \cdot t) A_0 \cdot \mu / (\rho_t \cdot (T_0 - C_t \cdot t) \cdot \mu \cdot A_0) \quad (15)$$

که  $t_1$  زمان پایان فاز اول می‌باشد. از طرفی با توجه به قانون دوم نیوتن:

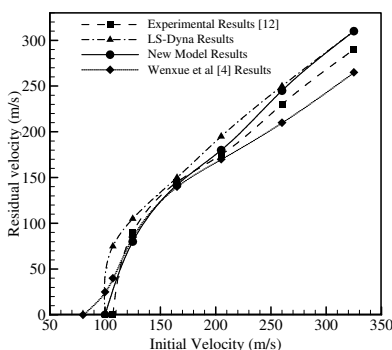
$$\frac{dV_7}{dt} = -(A_p - B_p \cdot \ln(\frac{H_p}{L_c})) / (\rho_p \cdot L) \quad (16)$$

که  $H_p$  ضخامت ناحیه تخت شدگی پرتابه بوده و برابرست با:

جدول ۱- مشخصات ماده پرتابه و هدف [۱۲]

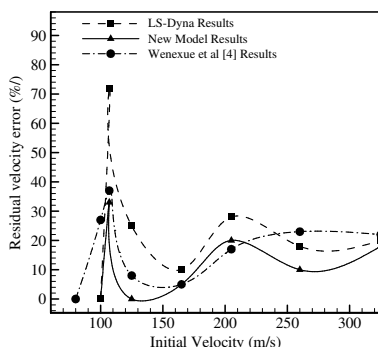
Material	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	A Mpa	B Mpa	C Mpa	n	m
4340 ST. (Projectile)	۷۸۲۰	۷۹۲	۵۱۰	۰.۱۴	۰.۲۶	۱.۳
HY-100 (Target)	۷۸۰۰	۸۰۳	۴۹۷	۰.۱۵	۰.۱۶	۱

که  $A, B, C, n, m$  ضرایب مدل رفتار ماده جانسون کوک است. شکل ۶ سرعت خروجی پرتابه از هدف (سرعت باقیمانده) را بر حسب سرعت اولیه برخورد نشان می‌دهد و نتایج مدل جدید را با نتایج مدل تحلیلی ونکسیو و همکاران [۴]، شبیه سازی با نرم افزار LS-Dyna و نتایج تجربی مرجع [۱۲] مقایسه می‌نماید.



شکل ۶- سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه پرتابه

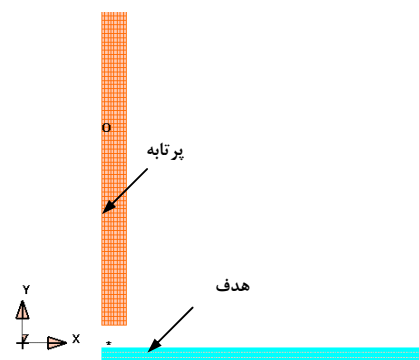
در شکل ۷ درصد خطا در محاسبه سرعت باقیمانده مدل تحلیلی، شبیه سازی با نرم افزار LS-Dyna، نتایج مدل ونکسیو و همکاران [۴] در مقیاس با نتایج تجربی آورده شده است.



شکل ۷- در صد خطای حاصل از سه روش ارائه شده

بر اساس منحنی موجود در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود که سرعت باقیمانده پرتابه پیش بینی شده توسط مدل تحلیلی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی، مدل ونکسیو و همکاران [۴] و شبیه سازی عددی دارد و میزان خطای مدل تحلیلی در محاسبه سرعت باقیمانده کمتر از مدل تحلیلی قبلی بوده و میانگین درصد خطای مدل تحلیلی زیر ۲۰ درصد

پلاگینگ هدف در برخورد پرتابه بکمک نرم افزار المان محدود LS-Dyna صورت گرفته است. در شکل ۵ مدل تقارن محوری پرتابه و هدف نشان داده شده است. مدلسازی بصورت دو بعدی تقارن محوری و المانها از نوع پوسته تقارن محوری کوادراتیک انتخاب شده اند. پرتابه با سرعت اولیه  $V_0$  به هدف برخورد می‌کند، تماس بین المانهای پرتابه و هدف از نوع تماس سطح به سطح خودکار و المانهای پرتابه بصورت Master و هدف از نوع Slave انتخاب شده است. مدل رفتار ماده پرتابه و هدف جانسون کوک می‌باشد که اثرات نرخ کرنش و دما را در نظر می‌گیرد [۱۰].

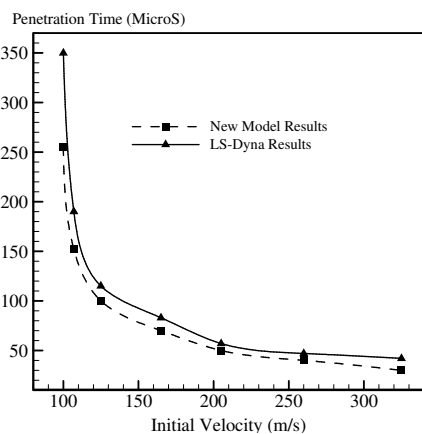


شکل ۵- مدل تقارن محوری پرتابه و هدف

برای مشخص شدن جدایی پلاگ و ایجاد فرسایش در پرتابه از مدل کرنش شکست جانسون کوک استفاده شده و ضرایب مدل رفتار ماده پرتابه و هدف به نرم افزار داده شده است. این مدل رفتار ماده به دلیل فشار بالای حاصل در منطقه برخورد نیاز به تعریف معادله حالت (Equation of state) دارد. معادله حالت بکار رفته در این شبیه سازی معادله حالت می گرونایزن (Mie-Gruniesen) می‌باشد که برای فلزات بکار می‌رود، جزئیات مدلسازی بکمک نرم افزار در مرجع [۱۱] آورده شده است.

## ۶- نتایج و بحث

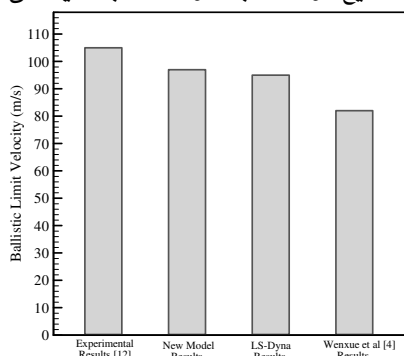
در این قسمت نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج آزمونهای تجربی موجود در مرجع [۱۲]، نتایج تحلیلی عددی با نرم افزار LS-Dyna مقایسه می‌گردد. پرتابه مورد استفاده در مدل‌های تحلیلی و نرم افزار LS-Dyna از جنس فولاد ۴۳۴۰ با قطر ۳۰ و طول ۲۸۲ میلیمتر و هدف نیز از جنس HY-100 با ضخامت ۱۰/۵ میلیمتر انتخاب شده است. مشخصات ماده پرتابه و هدف به شرح جدول ۱ می‌باشد.



شکل ۹- زمان نفوذ پرتابه بر حسب سرعت اولیه برخورد

علت این موضوع آن است که این محدوده سرعت در نزدیکی سرعت حد بالستیک می‌باشد. در محدوده سرعت حد بالستیک تغییر شکلهای شدیدی در ناحیه خارج از پلاگ هدف بوجود آمده و زمان خاتمه نفوذ بعلت تغییر شکلهای زیاد در محل تماس طولانی‌تر می‌شود.

در شکل ۱۰ سرعت حد بالستیک محاسبه شده توسط مدل تحلیلی با نتایج تجربی، مدل ونکسیو و همکاران [۴] و شبیه سازی بکمک نرم افزار LS-Dyna مقایسه شده است. دقت محاسبه سرعت حد بالستیک توسط مدل تحلیل بهتر از روش ونکسیو و همکاران [۴] بوده و درصد خطا در مدل جدید کمتر یک درصد است. علت این موضوع در نظر گرفتن ایجاد برآمدگی در ناحیه خارج از پلاگ هدف می‌باشد. با توجه به تغییر شکل زیادی که در محدوده سرعت حد بالستیک در ناحیه خارج از پلاگ بوجود می‌آید، درصدی از انرژی جنبشی اولیه صرف این تغییر شکل می‌شود و در نظر نگرفتن آن باعث نداشتن دقت نتایج در محاسبه سرعت حد بالستیک می‌گردد.

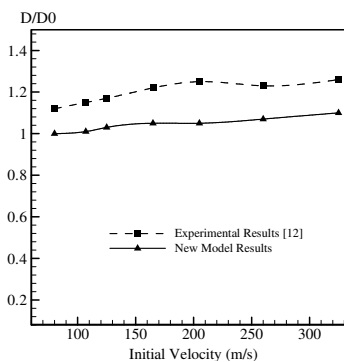


شکل ۱۰- مقایسه سرعت حد بالستیک

در این مدل تحلیلی شکست پلاگینگ در ماده هدف در نظر گرفته شده است. این نوع شکست در برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای لبه تخت در اهداف فلزی ضخیم و متوسط فلزی با

می‌باشد. علت کاهش میزان خطا اصلاح معادلات تحلیلی ونکسیو [۴] بر اساس تغییر در مدل رفتار ماده پرتابه و هدف، استفاده از معادلات بقاء اندازه حرکت جدید و بکاربری معادلات جدید برای محاسبه سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و پلاگ می‌باشد.

در شکل ۸ نسبت قطر ناحیه تخت شده پرتابه به قطر اولیه آن محاسبه شده توسط مدل تحلیلی با نتایج تجربی مقایسه شده است. قطر ناحیه تخت شده پرتابه که توسط مدل تحلیلی پیش بینی شده اندکی بیشتر از نتایج تجربی بوده و خطا حداکثر ۱۶/۸ درصد می‌باشد. علت این موضوع می‌تواند نوع مدل رفتار ماده بکار برده شده برای مدلسازی ناحیه پلاستیک پرتابه باشد که برای سادگی محاسبات و استخراج معادلات بصورت صلب با کار سختی خطی در نظر گرفته شده است. همچنین مشخص است که با افزایش سرعت اولیه برخورد قطر ناحیه تخت شده پرتابه اندکی افزایش یافته و پس از آن ثابت مانده است. علت این موضوع ایجاد برش در لبه پرتابه و در قسمت تخت شده آن است به گونه‌ای که با افزایش سرعت اولیه پرتابه قطر ناحیه تخت شده تا حد خاصی بیشتر شده و بعد از آن قسمت حلقه‌ای شکل از لبه پرتابه به علت تخت شدگی زیاد جدا می‌گردد. کاهش جرم ناشی از برش لبه پرتابه در مدل ارائه شده در این مقاله بصورت تحلیلی محاسبه می‌شود [۱۱] و در روش ونکسیو و همکاران [۴] افزایش قطر پرتابه بر اساس معیار تجربی کنترل می‌گردد.



شکل ۸- تغییرات افزایش قطر بر حسب سرعت اولیه پرتابه

در شکل ۹ زمان نفوذ محاسبه شده توسط مدل تحلیلی در سرعت اولیه برخورد مختلف با نتایج مدلسازی با نرم افزار LS-Dyna مقایسه شده است، دیده می‌شود که برابری خوبی در پیش بینی زمان نفوذ وجود دارد. علاوه بر آن مشخص است که با افزایش سرعت اولیه برخورد، زمان نفوذ کاهش می‌یابد. در محدوده سرعت ۹۵ تا ۱۲۰ متر بر ثانیه زمان نفوذ به شدت و با شیب بیشتری افت می‌نماید.

$$C_s = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

رابطه تنش ( $\sigma_p$ ) کرنش ( $\epsilon_p$ ) پلاستیک پرتابه بصورت رابطه ۲۲ می‌باشد:

$$\sigma_p = A_p + B_p \cdot \epsilon_p \quad (22)$$

که  $A_p$  و  $B_p$  ضرایب مدل رفتار ماده پرتابه است. لذا سرعت انتشار موج تنش پلاستیک در پرتابه با توجه به روابط (۲۰) و (۲۲) برابر است با:

$$C_p = \left( \frac{B_p}{\rho_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

که  $\rho_p$  جرم حجمی پرتابه است. همچنین رابطه تنش کرنش هدف بصورت رابطه ۲۴ می‌باشد:

$$\sigma = A_t + B_t \cdot \epsilon_p \quad (24)$$

که  $A_t$  و  $B_t$  ضرایب مدل رفتار ماده هدف هستند. با استفاده از معیار تسلیم ترسکا و اینکه تغییر شکل پلاستیک در حجم ثابت صورت می‌گیرد، رابطه تنش و کرنش محوری در شرایط کرنش محوری بصورت رابطه ۲۶ می‌باشد [۱۱]:

$$d\sigma_x = K_t d\epsilon_x + \frac{2}{3} d\sigma \quad (25)$$

که  $K_t$  مدول حجمی هدف،  $\sigma$  تنش معادل و  $\sigma_x$  تنش محوری در پلاگ است. لذا سرعت موج تنش پلاستیک در شرایط کرنش محوری بصورت رابطه ۲۶ محاسبه می‌گردد:

$$C_t = \left( \frac{1}{\rho_t} \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial \epsilon_x} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{K_t}{\rho_t} + \frac{2}{3\rho_t} B_t \right)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

که  $\rho_t$  جرم حجمی هدف است. همچنین سرعت موج تنش برشی عرضی با توجه به معیار ترسکا برابرست با [۱۱]:

$$C_s = \left( \frac{B_t}{3\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

ضخامت هدف اندکی بزرگتر یا مساوی قطر پرتابه، بوجود می‌آید. علاوه بر آن سرعت برخورد پرتابه به هدف در محدوده سرعت حد بالستیک تا چند برابر آن بوده و در برخوردهای با سرعت خیلی بالا روش مدلسازی فرایند متفاوت می‌باشد و این مدل تحلیلی نمی‌تواند نتایج مناسبی ارائه دهد.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله نتیجه‌گیری‌های حاصل گردید که عبارتند از:

- مقادیر سرعت باقیمانده پرتابه بعد از برخورد به هدف، قطر ناحیه تخت شده پرتابه یا قطر پلاگ، زمان نفوذ و سرعت حد بالستیک پیش بینی شده توسط مدل تحلیلی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد و مدل تحلیلی جدید، پیش بینی مناسب‌تری از نتایج نسبت به مدل‌های قبلی می‌نماید.

- استفاده از مدل رفتار ماده صلب- پلاستیک با کار سختی خطی در مدل تحلیلی جدید برای پرتابه و هدف، تغییر شکل پذیر در نظر گرفتن پرتابه (که در مدل‌های قبلی بصورت صلب در نظر گرفته شده است) و در نظر گرفتن تغییر شکل ناحیه خارج از پلاگ باعث افزایش دقت نتایج شده است.

- به کمک نرم افزار کامپیوتری تهیه شده برای حل معادلات حاکم بر مدل تحلیلی می‌توان براحتی اثرات پارامترهای هندسی و مکانیکی مختلف را در فرایند نفوذ بررسی نمود.

- نتایج مدل تحلیلی جدید همخوانی مناسبی با نتایج شبیه سازی به کمک نرم افزار LS-Dyna در پیش‌بینی زمان نفوذ، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه داشته است.

## ۶- ضمایم

محاسبه سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و هدف: سرعت انتشار موج تنش محوری در یک میله در شرایط تنش محوری برابرست با [۱۰]:

$$C_x = \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \epsilon_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

همچنین سرعت موج تنش برشی برابرست با:

## ۷- مراجع

- [۱] Backman M.E. , Goldsmith W., "The Mechanics of Penetration of Projectiles Into Targets", Int. J. Eng. Sci., Vol. 16, p.p.1-99,1978.
- [۲] Corbett G.G. , Reid S.R. , Johanson W., "Impact Loading of Plates and Shells By Free- Flying Projectiles, A review", Int. J. Impact Eng., Vol. 18, N. 2, p.p. 141-230, 1996
- [۳] Recht R.F., " Taylor Ballistic Impact Modeling Applied to Deformation and Mass Loss Determinations", Int. J. Eng. Sci., Vol. 16, p.p. 809-827, 1978.
- [۴] Wenxue Y. , Lanting Z., "Plate Perforation By Deformable Projectiles- A Plastic Wave Theory," Int. J. Impact Eng., Vol. 1,N. 4,p.p. 393-412, 1983.



- Liaghat G. H., Moslemi Naeini H. , Felli S. [۹]  
 "The mechanics of normal and oblique penetration of conical projectiles into multi layer metallic targets", Iranian J. of Sci. & Tech., Trans. B, Eng., Vol. 29, N. B2, 2005.
- Zukas J.A., "High Velocity Impact Dynamic", [۱۰]  
 John Wily and Sons, 1990.
- نوری تبار، اسد، "بکارگیری امواج تنش پلاستیک در [۱۱]  
 تحلیل فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف  
 فلزی"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه رازی،  
 ۱۳۸۷.
- M. J. Forrestal and S. Hanchak, "Penetration [۱۲]  
 experiments on HY-100 steel plates with 4340 Rc  
 38 and maraging T-250 steel rod projectiles", Int.  
 J. Impact Eng., Vol. 22, p.p. 923-933, 1999.
- Liss J. and W. Goldsmith, Plate Perforation Due to [۵]  
 Impact By Blunt Cylinders, Int. J. Impact Eng., 2,  
 1, 37-64, 1984
- Maudlin P.J., Foster J. C., Jones S.E., " A [۶]  
 continuum mechanics code analysis of steady  
 plastic wave propagation in the Taylor test", Int. J.  
 Impact Eng. . Vol. 19,N. 3, p.p. 231-256, 1997.
- لیاقت، غلامحسین، نائینی، حسن مسلمی و فعلی، سعید، [۷]  
 "تحلیل نفوذ عمودی پرتابه‌های تخت تغییر شکل‌پذیر در  
 اهداف فلزی نازک تا نیمه ضخیم"، نشریه پژوهشی  
 مهندسی مکانیک ایران، سال پنجم، شماره اول، صفحه  
 ۳۵-۵۳، ۱۳۸۲.
- لیاقت، غلامحسین، نائینی، حسن مسلمی و فعلی، سعید، [۸]  
 تحلیل نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در اهداف فلزی  
 بکمک تئوری امواج تنش پلاستیک، نشریه امیرکبیر،  
 سال پانزدهم، شماره ب-۵۷، صفحه ۸۴-۱۰۰، ۱۳۸۲.

