

مدل جدید نفوذ پرتابه‌های تخت در اهداف فلزی و مقایسه با نتایج تحلیل بکمک نرم افزار LS-Dyna

حسن مسلمی نائینی
استادیار

غلامحسین لیاقت
استاد

سعید فعلی

دانشجوی دکتری

بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در این مقاله مدلسازی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی صورت گرفته است. مدل تحلیلی این مقاله بر اساس انتشار امواج تنش پلاستیک محوری در پرتابه و پلاگ حاصل در هدف و امواج تنش برشی در ناحیه خارج از پلاگ هدف ارائه شده است. رفتار ماده پرتابه و هدف از معادلات جانسون کوک بدون در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش و دما تبعیت می‌کند. نتایج حاصل از این مدل تحلیلی با نتایج آزمایشهای تجربی و نیز با نتایج مدلسازی المان محدود بکمک نرم افزار LS-Dyna مقایسه گردیده است. مقادیر سرعت حد بالستیک حاصل از مدل تحلیلی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی و عددی موجود دارد. از ویژگی این مدل سادگی حل معادلات حاکم و دقت بسیار مناسب نتایج آن می‌باشد و بعنوان روش جدید در مدلسازی نفوذ با دیدگاه انتشار امواج تنش می‌باشد.

کلمات کلیدی

پرتابه، هدف، نفوذ، امواج تنش پلاستیک، پلاگ، سرعت حد بالستیک

A New Penetration Model of Blunt Projectiles into Metallic Targets and a Comparison to the Results of LS-Dyna Modeling

G.H. Liaghat
Professor

H. Moslemi Naeini
Assistant Professor

S. Felli

Ph.D. Student

Tarbiat Modarres University,
Mechanical Engineering Department

Abstract

In this paper, theoretical and numerical model for penetration of deformable projectiles into metallic targets is presented. The analytical model is based on the propagation of longitudinal plastic stress wave in projectile and plug also shear stress wave in outer region of plug. The projectile and target materials are adapted to Johnson- Cook equations without considering the strain rate and temperature effects. The results of this paper are compared with experimental results and finite element modelling with LS-DYNA software. The theoretical ballistic limit velocities

are in a good agreement with experimental and numerical results. In this model the solution of governing equations is easy and it will be a new method in modelling the penetration process by using stress wave propagation.

Keywords

Projectile, Target, Penetration, Plastic Stress Waves, Plug, Ballistic Limit Velocity

مقدمه

بررسی و تحلیل برخورد و نفوذ^۱ پرتابه‌ها^۲ در اهداف^۳ از جمله موضوعاتی است که محققین در حال انجام فعالیتهای تحقیقاتی در این خصوص و در صنایع نظامی و غیر نظامی می‌باشند. طراحی و ساخت زره‌های مقاوم به برخورد و نفوذ، طراحی و ساخت پرتابه‌های با قدرت تخریب بالا، بررسی اثرات انتشار امواج تنش ناشی از برخورد در سازه‌ها و طراحی سازه‌های مقاوم به برخورد و نفوذ از جمله کاربردهای این مسئله می‌باشد. تحقیقات انجام شده در مورد این موضوع معمولاً به سه صورت تحلیلی، عددی و تجربی می‌باشد. بررسی کاملی از مکانیک نفوذ پرتابه‌ها در اهداف توسط گلداسمیت [۱] در سال ۱۹۹۹ و زوکاس [۲] در سال ۱۹۹۰ انجام شده است. مدلسازی فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر^۴ در اهداف فلزی نازک تا نیمه ضخیم از جمله موضوعات کاربردی در این مورد است. در سال ۱۹۸۳ ونکسیو و دیگران [۳] مدلی ارائه نمودند که بکمک انتشار امواج تنش پلاستیک^۵ یک بعدی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف فلزی را مدل می‌کرد در این روش رفتار ماده پرتابه بصورت صلب با کار سختی خطی و هدف بصورت صلب کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شده بود و تغییر شکل دیشینگ^۶ یا تغییر مکان ناحیه خارج از پلاگ هدف طی نفوذ در نظر گرفته نشده و واماندگی^۷ حاصل در هدف فقط بصورت پلاگینگ^۸ (جدا شدن قسمت استوانه‌ای از هدف در جلو پرتابه) فرض شده بود. تشریح کامل این روش و انجام بهینه‌سازی در این مدل در مرجع [۴] ارائه شده است. در روش ونکسیو [۳] سرعت انتشار امواج تنش ثابت فرض شده است. نتایج حاصل از این مدل در محدوده سرعت حد بالستیک (حداقل سرعت لازم برای نفوذ کامل پرتابه در هدف) و نیز در هنگام عدم نفوذ کامل (یا ایجاد حفره در هدف^۹) همخوانی با نتایج تستهای تجربی ندارد. روش دیگری از تحلیل فرایند نفوذ پرتابه‌های تخت در اهداف فلزی با واماندگی پلاگینگ توسط لیس و دیگران [۵] در سال ۱۹۸۳ انجام گرفته است. در این روش پرتابه بصورت صلب و هدف از مدل رفتار ماده ریچت [۶] تبعیت می‌کند و مدلسازی نفوذ با انتشار امواج تنش پلاستیک محوری در پلاگ صورت گرفته است. با توجه به مدل رفتار ماده انتخاب شده برای هدف این روش تحلیلی فقط برای سه فلز خاص آلومینیم، فولاد و تیتانیم قابل استفاده بوده و در محدوده سرعت حد بالستیک نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهد. مراجع [۳] و [۵] تنها مراجعی هستند که فرایند نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر را در برخورد به اهداف فلزی و با روش تئوری امواج تنش مدل نموده‌اند که هر یک از آنها دارای محدودیتهای خاص می‌باشند. علاوه بر بررسی تحلیلی، کارهای تجربی زیادی در این خصوص صورت گرفته است. بورویک و دیگران [۷] در سال ۱۹۹۹ با انجام یک سری تستهای تجربی نفوذ پرتابه‌های تخت را در اهداف نازک بررسی نموده و نتایج حاصل از تستهای تجربی را ارائه نموده‌اند. لیو [۸] در سال ۲۰۰۰ با انجام یک سری تستهای تجربی مقادیر سرعت حد بالستیک را برای پرتابه‌های صلب و نیز پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در برخورد به اهداف با ضخامتهای مختلف اندازه‌گیری نموده است.

در این مقاله مدل تحلیلی جدیدی ارائه گردیده که نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر استوانه‌ای تخت را در اهداف فلزی و با استفاده از انتشار امواج تنش مدل می‌کند. در این روش تحلیلی از مدل رفتار ماده جانسون کوک (بدون در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش و دما در این معادله) در ماده پرتابه و هدف استفاده شده است. با توجه به این مدل رفتار ماده، تغییر شکل پرتابه و شکست پلاگینگ همراه تغییر شکل دیشینگ هدف با در نظر گرفتن انتشار امواج تنش پلاستیک محوری در پرتابه و هدف و امواج تنش برشی در ناحیه خارج از پلاگ مدل گردیده و فرایند نفوذ در شش مرحله تقسیم‌بندی شده است. در هر مرحله معادلات حرکت پرتابه و هدف استخراج گردیده و به روش عددی حل شده است. علاوه بر آن با استفاده از نرم افزار المان محدود LS-Dyna مدلسازی و تحلیل دو بعدی تقارن محوری پرتابه و هدف صورت گرفته و نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تستهای تجربی موجود و نیز نتایج مدلسازی با نرم افزار LS-Dyna مقایسه گردیده است.

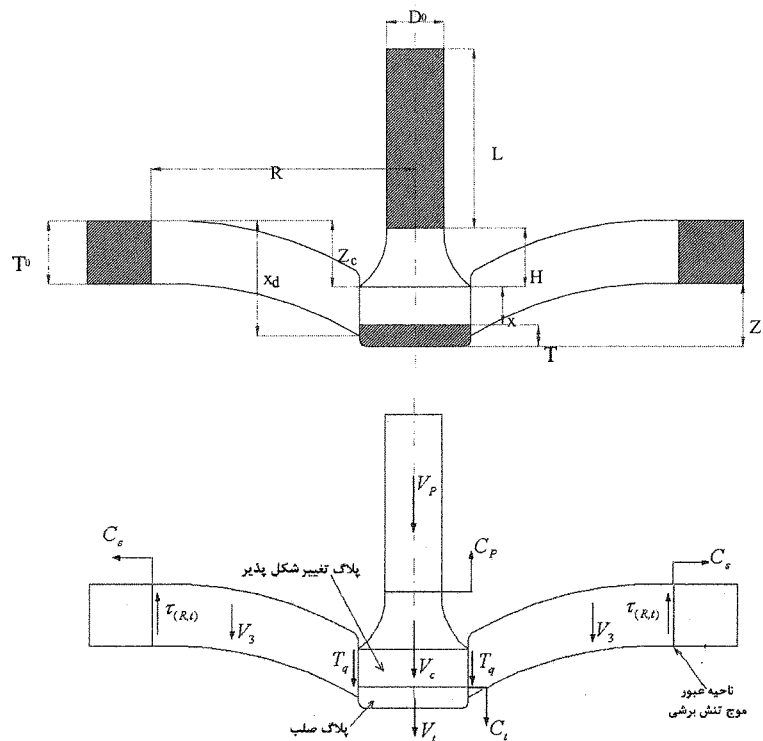
۱- تشریح مدل تحلیلی

۱-۱- معادلات و روابط حاکم بر مدل تحلیلی

فرضیات مدل تحلیلی به شرح زیر می باشد:

- ۱- واماندگی حاصل در هدف در نفوذ پرتابه استوانه‌ای تخت پلاگینگ همراه تغییر شکل دیشینگ می باشد. واماندگی پلاگینگ هنگامی بوجود می آید که پرتابه تخت بوده، هدف از جنس نرم و ضخامت هدف کمتر از قطر پرتابه باشد [۳] و [۶].
 - ۲- در برخورد عمودی، پرتابه در شرایط تنش محوری و پلاگ حاصل در هدف در شرایط کرنش محوری قرار می گیرد.
 - ۳- منحنی تنش کرنش پرتابه و هدف از معادلات جانسون کوک (بدون در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در این معادله) تبعیت می کند و برای پرتابه بصورت $\sigma_p = A_p + B_p \epsilon^{n_p}$ و برای ماده هدف بصورت $\sigma_{st} = A_t + B_t \epsilon^{n_t}$ می باشد.
 - ۴- قطر پلاگ برابر قطر قسمتی از پرتابه است که تغییر شکل داده و تخت شده است.
- بر اساس مدل تحلیلی ارائه شده فرض می گردد در طی پروسه نفوذ پرتابه در هدف، لبه پرتابه تخت شده و مطابق شکل (۱) یک استوانه محصور در ماده هدف و در جلوی پرتابه شروع به شکل گیری می کند (پلاگ)، امواج تنش پلاستیک بصورت محوری در پلاگ منتشر شده و با عبور موج تنش پلاستیک پلاگ تغییر شکل داده و فشرده می شود. مطابق شکل (۱) با عبور موج تنش پلاستیک در پلاگ دو مقطع ایجاد خواهد شد یکی مقطعی است که موج تنش پلاستیک از آن عبور نموده و پلاگ تغییر شکل پذیر را تشکیل می دهد و دیگری مقطع بدون تغییر شکل یا پلاگ صلب می باشد که موج تنش پلاستیک هنوز به آن نرسیده است. براساس نتایج ونکسیو [۳] تنش حاصل در قسمت بدون تغییر شکل پلاگ برابر تنش تسلیم فشاری در شرایط کرنش محوری می باشد یعنی:

$$\sigma_t = \left(\frac{K}{2G} + \frac{2}{3} \right) Y \quad (1)$$



شکل (۱) مراحل نفوذ پرتابه در هدف، تغییر شکل حاصل در پرتابه و واماندگی پلاگینگ همراه دیشینگ در هدف.

در حین برخورد پرتابه استوانه‌ای به هدف و در نقطه برخورد دو موج تنش پلاستیک بصورت محوری و عرضی در هدف و یک موج تنش پلاستیک محوری در پرتابه منتشر می گردد. موج تنش محوری مطابق شکل (۱) با سرعت C_p در پلاگ منتشر می گردد و موج تنش عرضی یا برشی^{۱۱} با سرعت C_s در صفحه خارج از پلاگ هدف منتشر خواهد شد. رابطه تنش کرنش

افزایشی محوری پلاگ با توجه به اینکه پلاگ در شرایط کرنش محوری واقع شده، بصورت زیر می‌باشد:

$$d\sigma_x = Kd\varepsilon_x + \frac{2}{3}d\sigma_{s(\varepsilon_x)} \quad (2)$$

معادله (۲) با توجه به معیار تسلیم ترسکا در ناحیه پلاستیک و روابط تنش هیدروستاتیکی، تراکم ناپذیری و روابط تنش کرنش استخراج گردیده است. مطابق شکل (۱) ناحیه خارج از پلاگ هدف بطور پیوسته تغییر شکل داده و با جابجایی حلقه پلاستیک با سرعتی برابر سرعت موج تنش برشی (C_s) افزایش شعاع می‌دهد. سرعت این ناحیه هدف V_3 فرض می‌گردد. در قسمتی از پلاگ که موج پلاستیک محوری عبور نموده، تغییر شکل پلاستیک بوجود آمده و این ناحیه با سرعت V_c که برابر سرعت سطح مشترک پرتابه، هدف می‌باشد، حرکت می‌کند. ضخامت این ناحیه مطابق شکل (۱)، $x(r)$ می‌باشد. در این مقطع نیروی بازدارنده اعمالی بر پرتابه، نیروی حاصل از تنش برشی شکست یعنی τ_r می‌باشد. در جلوی موج پلاستیک، پلاگ صلب و با ضخامت T واقع است که با سرعت V_f حرکت می‌کند. تنش برشی در این قسمت پلاگ و نیز نیروی مقاوم به حرکت در این ناحیه صفر در نظر گرفته می‌شود.

پرتابه نیز طی فرایند نفوذ تغییر شکل داده و کاهش جرم ناشی از برش یا فرسایش^{۱۱} ممکن است در آن بوجود آید. با توجه به سرعت نسبی اولیه لبه پرتابه نسبت به انتهای آن، تغییر شکل پرتابه طی سه مرحله زیر ممکن است صورت گیرد:

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

- تخت شدن لبه پرتابه، اگر $V_s < C_p$ ، در حین تخت شدن لبه پرتابه، ممکن است کاهش جرم ناشی از برش نیز در آن صورت گیرد.

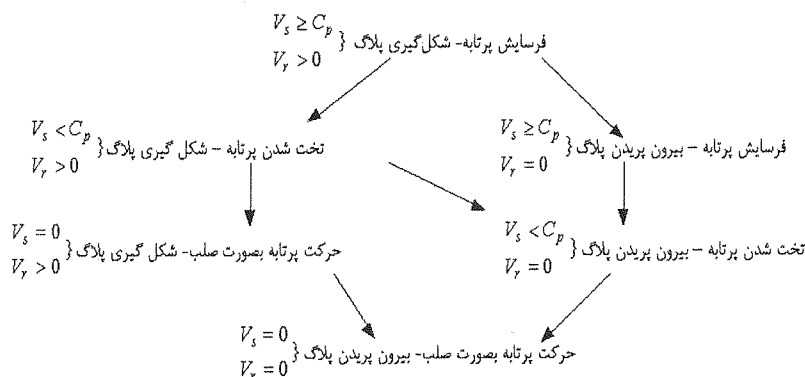
- حرکت پرتابه بصورت صلب یعنی $V_s = 0$

که $V_s = V_c - V_p$. فرسایش نوعی کاهش جرم در پرتابه است که در سرعت برخورد بالاتر از سرعت موج تنش پلاستیک بوجود می‌آید. جهت تعیین قطر پلاگ یا سطح تخت شده پرتابه حین نفوذ، از معادلات بقاء اندازه حرکت در سطح مشترک پرتابه و هدف استفاده شده و معادلات حاکم توسط ونکسیو [۳] آورده شده است. سطح تخت شده پرتابه با توجه به جنس آن دارای یک مقدار حداکثر بوده و اگر از این حد بیشتر شود، شکست ناشی از برش در آن بوجود خواهد آمد. این مقدار حداکثر برای جنسهای مختلف مشخص شده و حاصل تستهای تجربی انجام شده است. [۳]

جهت مدلسازی تغییر شکل پرتابه و هدف از اصل بقاء اندازه حرکت برای حجم کنترلی شامل پرتابه تغییر شکل یافته و پلاگ استفاده شده است. اصل بقاء اندازه حرکت با صرفنظر نمودن از اثرات نیروی اصطکاک طی فرایند نفوذ [۳] بصورت زیر می‌باشد:

$$F = \frac{\partial M}{\partial t} + \phi \quad (3)$$

در این مقاله مراحل نفوذ با توجه به سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف، سرعت موج پلاستیک در پرتابه و هدف و در نواحی پلاگ صلب و تغییر شکل یافته طی نفوذ، در شش مرحله بشرح الگوریتم شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲) مراحل تغییر شکل و نفوذ پرتابه در هدف.

در هر مرحله از فرایند نفوذ معادلات حرکت سیستم پرتابه و هدف استخراج شده و به روش عددی حل می‌گردد. قبل از استخراج معادلات حرکت سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و هدف و نیز سرعت سطح مشترک در لحظه اولیه برخورد در این مدل تحلیلی محاسبه می‌گردد.

الف - محاسبه سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه

رابطه تنش کرنش جریان در پرتابه بصورت $\sigma_p = A_p + B_p \varepsilon^{n_p}$ در نظر گرفته شده است و پرتابه در شرایط تنش محوری قرار دارد. یعنی تمام مولفه‌های تنش بجز مولفه محوری آن (در جهت x) صفر می‌باشد. بنابراین تنش جریان (معادل) در پرتابه برابر تنش محوری، است. یعنی:

$$\sigma_p = \sigma_x \quad (4)$$

همچنین کرنشهای جانبی در پرتابه با هم مساوی‌اند، بنابراین اگر محورهای y, z در جهات جانبی در نظر گرفته شوند و با توجه به قانون حجم ثابت در ناحیه پلاستیک داریم:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_y, \quad \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \Rightarrow \varepsilon_x = -2\varepsilon_y = -2\varepsilon_z \quad (5)$$

بنابراین مقدار کرنش موثر (معادل) برابر کرنش محوری می‌باشد ($\varepsilon = \varepsilon_x$). با توجه به اینکه سرعت موج تنش پلاستیک از معادله زیر استخراج می‌گردد [۲]:

$$C_x = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_x}{\partial \varepsilon_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

با جایگذاری معادله رفتار ماده پرتابه در معادله (۶) سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه برابرست با:

$$C_p = \left(\frac{1}{\rho_p} B_p n_p \varepsilon_x^{n_p-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که کرنش محوری پرتابه در هر لحظه زمانی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\varepsilon_x = \frac{L_{(t)} + H_{(t)} - L_0}{L_0} \quad (8)$$

ب - محاسبه سرعت موج تنش پلاستیک در پلاگ

رابطه تنش کرنش جریان ماده هدف بصورت $\sigma_{st} = A_t + B_t \varepsilon^{n_t}$ در نظر گرفته شده و پلاگ در شرایط کرنش محوری قرار دارد، بنابراین رابطه تنش کرنش افزایشی محوری در پلاگ بصورت معادله (۲) بوده و سرعت موج تنش پلاستیک با توجه به معادلات (۲) و (۶) بصورت زیر می‌گردد:

$$C_t = \left(\frac{K}{\rho_t} + \frac{2}{3\rho_t} \frac{\partial \sigma_{st}}{\partial \varepsilon_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

بنابراین سرعت موج تنش پلاستیک در پلاگ برابرست با:

$$C_t = \left(\frac{K}{\rho_t} + \frac{2}{3\rho_t} B_t n_t \varepsilon_x^{n_t-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

در رابطه فوق مقدار کرنش پلاستیک محوری (ϵ_x) در پلاگ تغییر شکل پذیر و قبل از رسیدن موج تنش پلاستیک به انتهای پلاگ با توجه به شکل (۱) بصورت زیر می‌گردد:

$$\epsilon_x = \frac{T_0 - (T+x)}{T_0} \quad (11)$$

ج - محاسبه سرعت سطح مشترک پرتابه - هدف در لحظه برخورد

جهت محاسبه سرعت سطح مشترک پرتابه - هدف در لحظه اولیه برخورد (V_{c0})، معادله بقاء اندازه حرکت در سطح مشترک پرتابه و هدف بصورت زیر ارائه شده است:

$$V_0 \rho_p A C_{p(0)} \Delta t = V_{c0} (\rho_p A C_{p(0)} \Delta t + \rho_t A C_{t(0)} \Delta t) \quad (12)$$

که $C_{p(0)}$ و $C_{t(0)}$ مقادیر سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه و پلاگ می‌باشد. بنابراین سرعت سطح مشترک در لحظه اولیه برخورد با ساده سازی معادله (۱۲) بصورت زیر خواهد بود:

$$V_{c0} = \frac{V_0}{1 + \frac{\rho_t}{\rho_p} \frac{C_{t(0)}}{C_{p(0)}}} \quad (13)$$

مقدار $C_{t(0)}$ سرعت موج تنش پلاستیک در پلاگ در لحظه اولیه برخورد بوده و از معادله (۱۰) بدست می‌آید. در این معادله نیاز به $\epsilon_{x(0)}$ کرنش تسلیم محوری در شرایط کرنش محوری می‌باشیم که با توجه به روش زوکاس [۲] مقدار آن برابرست با:

$$\epsilon_{x(0)} = \frac{A_t}{2G} \quad (14)$$

و $C_{p(0)}$ از معادله (۷) بدست می‌آید که در این معادله $\epsilon_{x(0)} = \frac{A_p}{E_p}$ است.

در ادامه با توجه به مراحل تغییر شکل پلاگ و پرتابه مطابق شکل (۲) معادلات حاکم در هر مرحله از نفوذ استخراج می‌گردد.

مرحله I: فرسایش پرتابه، شکل گیری پلاگ ($V_s \geq C_p, V_r > 0$)

این مرحله هنگامی آغاز می‌گردد که سرعت اولیه برخورد از سرعت موج پلاستیک بیشتر گردد، بنابراین فرسایش در پرتابه صورت گرفته و پلاگ شروع به شکل گیری کرده و فشرده سازی پلاگ تغییر شکل پذیر صورت می‌گیرد. با استفاده از اصل بقاء اندازه حرکت برای مجموعه پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر، در این مرحله اندازه حرکت در داخل حجم کنترل، شامل اندازه حرکت سه عضو سیستم می‌باشد:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad M_1 = \rho_p A_0 L V_p, \quad M_2 = \rho_t A x V_c, \quad M_3 = \rho_t A T V_t$$

همچنین:

$$F = -\pi D x \tau_f, \quad \phi = (V_p - V_c) \rho_p A_0 V_c \quad (15)$$

با جایگذاری مقادیر F, ϕ, M در معادله (۳) و ساده سازی معادله بقاء اندازه حرکت بصورت زیر استخراج شده است:

$$-4D_0^{-1} \mu_t \frac{1}{2} x \tau_f + (\sigma_p + \rho_p V_s^2) - \mu_t [\sigma_t + \rho_t C_t V_c + \rho_t V_t (V_r + C_t)] = \rho_t \mu_t x \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (16)$$

معادلات حاکم بر حرکت پرتابه و پلاگ در این مرحله از فرایند بصورت زیر استخراج شده‌اند:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -V_s = -(V_p - V_c), H_{(t)} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = C_t \quad (18)$$

$$\frac{\partial Z_t}{\partial t} = V_t \quad \frac{\partial Z_c}{\partial t} = V_c \quad (19)$$

$$T = T_0 + Z_t - Z_c - x \quad (20)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial t} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L_{(t)}} \quad \frac{\partial V_t}{\partial t} = \frac{\sigma_t}{\rho_t T} \quad (21)$$

در روابط فوق σ_p تنش دینامیکی جریان در هر لحظه زمانی است که با توجه به معادله تنش کرنش، تابعی از کرنش محوری حاصل در پرتابه می‌باشد. همچنین σ_t تنش محوری حاصل در پلاگ صلب است که با توجه به روش زوکاس [۲] مقدار آن برابر تنش تسلیم در شرایط کرنش محوری فرض شده و از معادله (۱) استخراج می‌گردد. معادلات (۱۶) تا (۲۱) همراه معادلات (۷) و (۱۰) معادلات حاکم بر تغییر شکل پرتابه و هدف می‌باشند. مجهولات مسئله شامل $V_p, V_t, V_c, C_t, C_p, x, V_p, V_t, V_c, C_t, C_p, L, Z_c, Z_t, T, H$ می‌باشند که همگی تابعی از زمان بوده و با حل این معادلات محاسبه می‌گردند. شرایط اولیه حاکم در این مرحله بشرح زیر می‌باشد:

$$V_{c(0)} = V_{c0}, \quad T_{(0)} = T_0, \quad x_{(0)} = 0, \quad V_{t(0)} = 0, \quad V_{p(0)} = V_0, \quad L_{(0)} = L_0, \quad Z_{c(0)} = Z_{t(0)} = 0 \quad (22)$$

مرحله IIa: تخت شدن پرتابه، شکل گیری پلاگ ($V_s < C_p, V_r > 0$)

این مرحله از فرایند نفوذ هنگامی صورت می‌گیرد که سرعت پرتابه از سرعت موج پلاستیک کمتر باشد، در این حالت تغییر شکل پلاستیک یا تخت شدن لبه پرتابه آغاز شده و لبه آن حالت قارچی شکل پیدا می‌کند. علاوه بر آن پلاگ نیز تغییر شکل پلاستیک می‌دهد. با استفاده از اصل بقاء اندازه حرکت برای مجموعه پرتابه، پلاگ صلب و پلاگ تغییر شکل پذیر، در این مرحله اندازه حرکت در داخل حجم کنترل برابرست با:

$$M = \rho_p A_0 L V_p + [\rho_p A_0 (L_1 - L) + \mu_t \rho_t A_0 x] + \mu_t \rho_t A_0 T V_t \quad (23)$$

و نیز:

$$\phi = 0, \quad F = -\pi D_0 \tau_f \mu_t^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

با توجه به تخت شدن پرتابه، معادله کاهش طول پرتابه بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -C_{p(t)} \quad (25)$$

با ساده‌سازی معادله (۲۳) و (۲۴) و با توجه به معادله (۳)، معادله بقاء اندازه حرکت بصورت زیر می‌گردد:

$$-4D_0^{-1} \mu_t^{\frac{1}{2}} x \tau_f + \sigma_p + \rho_p V_s C_p - \mu_t (\sigma_t + \rho_t V_t V_r + \rho_t V_r C_t) = [\rho_t \mu_t x + \rho_p (L_1 - L)] \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (26)$$

و نیز معادله حاکم بر قسمت تخت شده پرتابه بصورت زیر است:

$$\frac{dH}{dt} = C_p - V_p + V_r \quad (27)$$

و سایر معادلات در این مرحله مانند معادلات (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) می‌باشند.

مرحله IIb: فرسایش پرتابه، بیرون پریدن پلاگ^{۱۳} ($V_s \geq C_p, V_r = 0$)

این مرحله از فرایند هنگامی آغاز می‌گردد که سرعت لبه نسبت به انتهای پرتابه بیشتر از سرعت موج تنش پلاستیک باشد موج تنش پلاستیک در پلاگ به انتهای پلاگ رسیده و طول پلاگ صفر شود. در این مرحله $T = 0$ و طول پلاگ برابرست با:

$$x = T_0 + Z_t - Z_c \quad (28)$$

معادلات حاکم در این مرحله با ساده سازی معادلات حرکت بصورت زیر می‌باشد:

$$\mu_t \rho_t (T_0 + Z_t - Z_c) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -4D_0^{-1} \mu_t^{\frac{1}{2}} \tau_f (x - Z_c) + \sigma_p + \rho_p V_s^2 \quad (29)$$

و با توجه به مرحله بیرون پریدن پلاگ:

$$V_t = V_c \quad (30)$$

و سایر معادلات حاکم مانند معادلات (۱۷)، (۱۹) و (۲۱) می‌باشند.

مرحله IIIa: حرکت پرتابه بصورت صلب، شکل‌گیری پلاگ $V_s = 0, V_r > 0$

در این مرحله از فرایند نفوذ، سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه به صفر رسیده و پرتابه بصورت جسم صلب حرکت می‌کند، در حالی که مرحله شکل‌گیری پلاگ ادامه دارد و موج تنش پلاستیک هنوز به انتهای پلاگ نرسیده است. در این مرحله داریم:

$$M = (\rho_p A_0 L_1 + \mu_t \rho_t A_0 x) V_c + \mu_t \rho_t A_0 T V_t, \quad \phi = 0, \quad F = -\pi D \tau_f x \quad (31)$$

با توجه به اینکه پلاگ در حال شکل‌گیری است و پرتابه بصورت جسم صلب حرکت می‌کند، داریم:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = C_t, \quad V_p = V_c \quad (32)$$

بنابراین معادله بقاء اندازه حرکت در این مرحله بصورت زیر می‌گردد:

$$(\rho_p L_1 + \mu_t \rho_t x) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -4D_0^{-1} \mu_t^{\frac{1}{2}} \tau_f x - \mu_t (\sigma_t + \rho_t C_t V_r - \rho_t V_t V_r) \quad (33)$$

و نیز:

$$\frac{\partial V_t}{\partial t} = \frac{\sigma_t}{\rho_p T}, \quad L = L_{IIIa}, \quad H_{(t)} = H_{IIIa} \quad (34)$$

و سایر معادلات حاکم مانند معادله (۱۹) و (۲۰) می‌باشد.

مرحله IIIb: تخت شدن پرتابه، بیرون پریدن پلاگ ($V_s < C_p, V_r = 0$)

در این مرحله موج تنش پلاستیک به انتهای پلاگ رسیده، در حالی که پرتابه در حال تغییر شکل پلاستیک است. معادلات حاکم در این مرحله به صورت زیر خلاصه می‌گردند:

$$[\rho_p(L_1 - L) + \mu_t \rho_t x] \frac{\partial V_c}{\partial t} = -4D_0^{-1} \mu_t^{\frac{1}{2}} \tau_f (xd - Z_c) + \sigma_p + \rho_p C_p V_s \quad (35)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = -C_p, \quad \frac{\partial V_p}{\partial t} = -\frac{\sigma_p}{\rho_p L}, \quad \frac{\partial H}{\partial t} = C_p - V_s \quad (36)$$

$$\frac{\partial Z_t}{\partial t} = V_t, \quad \frac{\partial Z_c}{\partial t} = V_c, \quad V_c = V_t, \quad T = 0, \quad x = T_0 + Z_t - Z_c \quad (37)$$

مرحله IV: حرکت پرتابه بصورت صلب، بیرون پریدن پلاگ ($V_s = 0, V_r = 0$)

در این مرحله پرتابه و پلاگ مانند یک جسم صلب به حرکت ادامه می‌دهند و نیروی مقاوم به حرکت نیروی حاصل از تنش برشی شکست می‌باشد. معادلات حاکم در این مرحله بصورت زیر می‌باشد:

$$(\rho_p L + \mu_t \rho_t x) \frac{\partial V_c}{\partial t} = -4D_0^{-1} \mu_t^{\frac{1}{2}} \tau_f (xd - Z_c) \quad (38)$$

$$\frac{\partial Z_t}{\partial t} = V_t, \quad \frac{\partial Z_c}{\partial t} = V_c, \quad V_c = V_t = V_p, \quad T = 0, \quad x = T_0 + Z_t - Z_c, \quad L = L_{pIII} \quad (39)$$

۲-۲- مدلسازی تغییر شکل دیشینگ صفحه خارج از پلاگ هدف

با توجه به اینکه در طی پروسه نفوذ، صفحه خارج از پلاگ هدف تغییر شکل پلاستیک می‌دهد، نیاز به مدلسازی این ناحیه و اثر آن در طی پروسه نفوذ هستیم. جهت مدلسازی تغییر شکل دیشینگ هدف فرض می‌گردد که ناحیه خارج از پلاگ تحت اثر فقط تنش برشی ساده τ مطابق شکل (۱) واقع شده است. بنابراین مقدار تنش و کرنش معادل با استفاده از معیار فن مایز برابرند با:

$$\sigma = \sqrt{3}\tau, \quad \gamma = \sqrt{3}\varepsilon \quad (40)$$

حال با توجه به رابطه تنش کرنش جریان هدف $\sigma_{st} = A_t + B_t \varepsilon^{n_t}$ ، رابطه تنش-کرنش برشی آن بصورت زیر می‌گردد:

$$\tau = \frac{A_t}{\sqrt{3}} + \frac{B_t}{(\sqrt{3})^{n_t+1}} \gamma^{n_t} \quad (41)$$

و با توجه به اینکه سرعت موج تنش برشی از معادله $C_s = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial \gamma}\right)^{\frac{1}{2}}$ محاسبه می‌گردد [۲]، با جایگذاری مقادیر در این معادله داریم:

$$C_s = \left(\frac{1}{\rho_t} \frac{B_t n_t}{(\sqrt{3})^{n_t+1}} \gamma^{n_t-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

از طرفی با توجه به شکل (۱) مشخص است که

$$\frac{dx_d}{dt} = V_3, \quad \frac{dR}{dt} = C_s \quad (43)$$

بنابراین:

$$\gamma \Big|_R = \frac{dx_d}{dR} \Big|_R = \frac{V_{3(R,t)}}{C_s} \quad (44)$$

معادله تعادل برای ناحیه خارج از پلاگ هدف بصورت زیر استخراج می‌گردد:

$$T_q - 2\pi R T_0 \tau_{(R,t)} = \pi \rho_t T_0 (R^2 - a_d^2) \frac{dV_3}{dt} \quad (45)$$

که در این معادله $\tau_{(R,t)}$ تنش برشی حاصل در ناحیه پیشروی حلقه پلاستیک یا ناحیه عبور موج تنش برشی می‌باشد و با توجه به معادلات (۴۱) و (۴۴) مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tau_{(R,t)} = \frac{A_t}{\sqrt{3}} + \frac{B_t}{(\sqrt{3})^{n_t+1}} \left(\frac{V_3}{C_s} \right)^{n_t} \quad (46)$$

یعنی تابعی از سرعت موج تنش برشی و سرعت حرکت ماده هدف خارج از پلاگ هدف می‌باشد و مقدار T_q در معادله (۴۵) که نیروی مقاوم به حرکت در ناحیه خارج از پلاگ است برابر $T_q = 2\pi a_d x_{(t)} \tau_f$ می‌باشد. بنابراین سرعت حرکت ماده خارج از هدف پلاگ بصورت زیر می‌گردد:

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{2a_d x_{(t)} \tau_f - 2R_{(t)} T_0 \tau_{(R,t)}}{\rho_t T_0 (R_{(t)}^2 - a_d^2)} \quad (47)$$

دو معادله (۴۳) همراه معادله (۴۷) سه معادله دیفرانسیل مرتبه اول می‌باشند که به معادلات حرکت قبلی در هر مرحله از فرایند نفوذ اضافه شده و با حل این سه معادله می‌توان موقعیت حلقه پلاستیک (R)، سرعت حرکت ناحیه خارج از پلاگ هدف (V_3) و پارامتر x_d را در هر لحظه زمانی محاسبه و تعیین نمود.

این معادلات همراه با معادلات قبلی در هر مرحله نفوذ، استخراج گردیده و بروش عددی رانگ گوتا مرتبه چهار حل شده است. برای این منظور برنامه کامپیوتری تهیه گردیده که نتایج تحلیل را بصورت مناسب استخراج می‌کند. در این برنامه فرایند نفوذ در یکی از مراحل زیر متوقف خواهد شد:

- سرعت پرتابه در یکی از شش مرحله فوق به صفر برسد یعنی $V_{p(t)} = 0$. در این حالت نفوذ ناقص صورت گرفته و پرتابه در هدف متوقف خواهد شد.

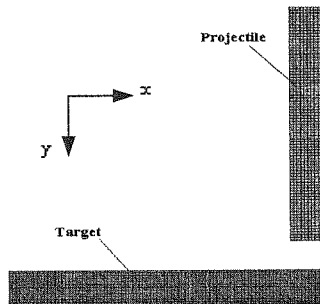
- پلاگ از هدف بیرون آید یعنی $Z_{c(t)} > x_{d(t)}$. در این حالت نفوذ کامل صورت گرفته و سرعت خروج پرتابه V_p می‌باشد.

- در تمام جرم پرتابه فرسایش یا برش بوجود آید.

جهت محاسبه سرعت حد بالستیک، سرعت اولیه برخورد به اندازه‌ای در نظر گرفته می‌شود که هنگامی که $Z_{c(t)} = x_{d(t)}$ گردد، سرعت خروج پرتابه یعنی $V_{p(t)}$ صفر شود. در این حالت سرعت اولیه برخورد پرتابه برابر سرعت حد بالستیک یا حداقل سرعت لازم برای نفوذ کامل خواهد بود.

۳ - مدل‌سازی فرایند بکمک نرم افزار LS-Dyna

نرم افزار LS-Dyna یک کد کامپیوتری مناسب در تحلیل بارگذاری ضربه‌ای و مدل‌سازی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف می‌باشد که معادلات حاکم را با روش صریح^{۱۳} حل می‌کند. در این مقاله مدل‌سازی دو بعدی تقارن محوری از پرتابه و هدف مطابق شکل (۳) صورت گرفته است. المانها بصورت مربعی کوادراتیک^{۱۴} و از نوع المان دو بعدی پوسته با ضخامت صفر انتخاب می‌شوند. محور z در جهت محور تقارن و پرتابه و هدف در صفحه xy المان بندی می‌گردند.



شکل (۳) مدل المان محدود مسئله نفوذ.

تکیه گاه هدف بصورت مقید شده در هر شش درجه آزادی در انتها انتخاب می‌گردد. جهت مدل‌سازی تقارن محوری، درجه آزادی تمام المانهای هدف و پرتابه در جهت محور z صفر (یعنی $u_z = 0$) و چرخشها نیز در جهت x و y صفر می‌باشند (یعنی $\theta_x = \theta_y = 0$). تماس^{۱۵} بین پرتابه و هدف بصورت دو بعدی بدون اصطکاک و تماس سطح به سطح انتخاب می‌گردد. در تعریف تماس تمام المانهای پرتابه از نوع *Master* و المانهای از هدف که در تماس یا برخورد با پرتابه قرار دارند از نوع *Slave* انتخاب می‌گردند. سرعت اولیه پرتابه بصورت شرط اولیه و روی تمام المانهای پرتابه در جهت y تعریف می‌گردد. مدل رفتار ماده مورد استفاده در نرم افزار مدل جانسون کوک می‌باشد که در تحلیل مسائل ضربه‌ای و موج تنش مدل مناسب بوده و محققین معمولاً از آن استفاده می‌کنند [۶]. معادله تنش جریان جانسون کوک بصورت زیر می‌باشد:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \varepsilon^*][1 - T^{*m}] \quad (48)$$

که A, B, C, n, m ثوابت ماده و $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ علاوه بر معادله فوق معادله دیگری برای تعیین کرنش شکست ماده توسط جانسون و کوک بصورت زیر ارائه شده است:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (49)$$

که σ^* نسبت تنش هیدروستاتیکی (متوسط) به تنش جریان موثر می‌باشد. یعنی:

$$\sigma_s = \sqrt{3J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad \sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_s} \quad (50)$$

که s_{ij} تانسور تنش انحرافی^{۱۶} و J_2 دومین نامتغیر تنش انحرافی نامیده می‌شود. ضرایب D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 در معادله (۴۹) برای یک سری مواد در جداول مرجع [۲] آورده شده است. این مدل رفتار ماده بعلت فشار بالای حاصل از ضربه نیاز به تعریف معادله حالت^{۱۷} دارد. در این مقاله از معادله حالت می‌گرونایزن^{۱۸} که برای فلزات ارائه شده است و در نرم افزار نیز این معادله حالت وجود دارد استفاده می‌گردد. این معادله برای مواد در بارگذاری فشاری در نرم افزار بصورت معادله زیر تعریف شده است:

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2]}{[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(1 + \mu)^2}]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (51)$$

که μ بر حسب حجم V برابرست با:

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (52)$$

ثوابت معادله حالت برای مواد مختلف برای نرم افزار باید مشخص گردد. این ثوابت برای فلزات مختلف توسط کارلون در جداول مرجع [۹] آورده شده است.

۴ - نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی و مدل‌های تحلیلی سایر محققین مقایسه می‌گردد. برای این منظور نخست نتایج مدل تحلیلی با نتایج تست‌های انجام شده توسط بوریک [۷] مقایسه می‌گردد. در این مرجع هدف از جنس فولاد Weldox 460E و پرتابه از جنس فولاد ابزار^{۱۹} در نظر گرفته شده است. ثوابت جانسون کوک این دو ماده در مقاله بوریک [۷] داده شده و بشرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱) ضرایب جانسون کوک پرتابه و هدف [۷].

ماده پرتابه و هدف	ρ Kg/m ³	A Mpa	B Mpa	C Mpa	n	m	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Weldox 460E St. (Target)	۷۸۵۰	۴۹۰	۸۰۷	۰/۰۱۲	۰/۷۳	۰/۹۴	۰/۰۷	۱/۷۳	-۰/۵۴	-۰/۰۱۲	۰
Arne Tool Steel (Projectile)	۷۷۵۰	۱۵۴۰	۴۷۷	۰/۰۱۲	۰/۱۸	۱	۰	۰/۵۶	-۱/۵	۰	۰

در این مرجع پرتابه استوانه‌ای تخت با قطر ۲۰ mm، طول ۸۰ mm و جرم ۱۹۷ gr و با سختی RC ۵۳ انتخاب شده است. هدف نیز دارای ضخامت ۱۲ mm و بصورت دیسک مدور با قطر ۱۰۰ mm می‌باشد. ضرایب معادله حالت می‌گرونایزن برای فولاد انتخابی بر اساس نتایج کارلون [۹] برای تحلیل بکمک نرم افزار LS-Dyna (تحلیل عددی) بشرح زیر در نظر گرفته شده است:

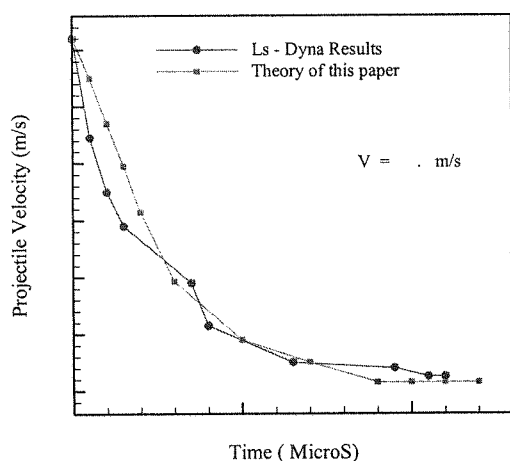
$$S_1 = 1.9, \quad S_2 = S_3 = 0, \quad C = 3600 m/s, \quad \gamma_0 = 1.7$$

در جدول (۲) مقادیر سرعت باقیمانده پرتابه بعد برخورد و نیز مدت زمان نفوذ در سرعت‌های برخورد مختلف حاصل از تست‌های تجربی بوریک [۷] با نتایج مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله و نیز مقادیر حاصل از تحلیل عددی مقایسه گردیده است.

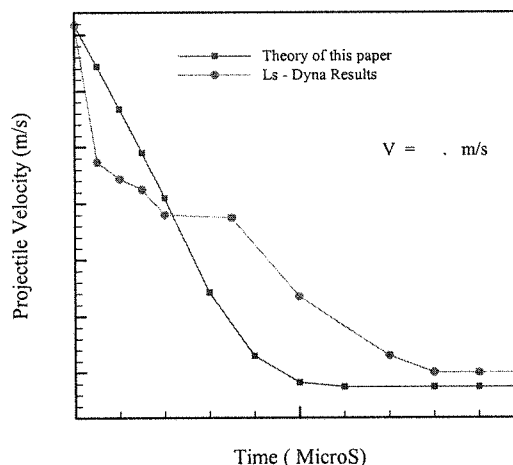
جدول (۲) مقایسه نتایج مدل تحلیلی با نتایج تست‌های تجربی بوریک [۷] و نتایج تحلیل عددی با نرم افزار LS-Dyna.

شماره تست	سرعت اولیه برخورد $V_0 (m/s)$	سرعت باقیمانده پرتابه بعد از برخورد (m/s)			زمان نفوذ پرتابه در هدف (μs)		
		نتایج تست‌های تجربی مرجع [۷]	نتایج مدل تحلیلی	نتایج تحلیل عددی	نتایج تست‌های تجربی مرجع [۷]	نتایج مدل تحلیلی	نتایج تحلیل عددی
۱	۳۰۳/۵	۱۹۹/۷	۱۷۳	۱۸۴	-	۸۱/۳	۹۵
۲	۲۸۵	۱۸۱/۱	۱۵۰	۱۷۰	-	۸۴/۶	۱۰۰
۳	۲۴۴/۲	۱۳۲/۴	۱۲۳	۱۲۷	-	۹۷	۱۱۰
۴	۲۰۰/۴	۷۱/۴	۷۴/۲	۸۰	-	۱۳۰	۱۳۹
۵	۱۹۹	۶۷/۳	۷۳/۷	۷۶	-	۱۳۲	۱۴۱
۶	۱۷۳/۷	۰	۱۳	۰	-	۲۴۰	۲۳۳
۷	۱۷۰	۰	۰	۰	-	۲۶۰	۲۵۸

مشاهده می‌گردد که نتایج همخوانی مناسبی با نتایج تستهای تجربی سایر محققین بخصوص در تستهای شماره ۳ به بعد دارد. در برخورد با سرعتهای بالا اختلاف نتایج مدل تحلیلی با نتایج تجربی بیشتر شده است. علت این موضوع افزایش فشار در ناحیه برخورد می‌باشد عبارت دیگر هنگامی که سرعت اولیه برخورد پرتابه افزایش می‌یابد، فشار حاصل در سطح مشترک پرتابه - هدف افزایش یافته، بنابراین مقادیر تنشهای حاصل در پرتابه و هدف به شدت زیاد می‌گردند. در این حالت رفتار ماده عوض شده و باید از معادلات حالت با فشار بالا برای فلزات استفاده نمود تا مقادیر فشار حاصل از معادله حالت جایگزین مقادیر تنشهای هیدرواستاتیکی گردد. قابل ذکر است در این مدل تحلیلی از معادله حالت استفاده نشده است. بنابراین در سرعت برخورد بالاتر از محدوده حد بالستیک نتایج مدل تحلیلی با نتایج تستهای تجربی فاصله می‌گیرد. نتایج پیش‌بینی شده بکمک نرم افزار LS-Dyna در برخورد با سرعت بالا نیز انطباق خوبی با نتایج تستهای تجربی در محاسبه سرعت باقیمانده پرتابه دارد. در شکل‌های (۴) و (۵) منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در برخورد با سرعتهای $303/5 \text{ m/s}$ و $244/2 \text{ m/s}$ (تست شماره ۱ و ۳) نشان داده شده است. در این دو منحنی نتایج مدل تحلیلی با نتایج مدلسازی عددی مقایسه شده است. با توجه به این شکلها مشاهده می‌گردد که در برخورد با $244/2 \text{ m/s}$ نتایج مدل تحلیلی از انطباق بهتری با نتایج تحلیل عددی نسبت به برخورد با سرعت $303/5 \text{ m/s}$ برخوردار می‌باشد. این موضوع در برخورد با سرعتهای زیر $244/2 \text{ m/s}$ نیز در جدول (۲) نیز مشاهده شده است و تأیید کننده اختلاف نتایج تحلیلی و عددی در برخورد با سرعت بالاست. در تحلیل با نرم‌افزار LS-Dyna از معادله حالت استفاده شده در حالی که در مدل تحلیلی از معادلات حالت در فرمولبندی معادلات استفاده نشده است.



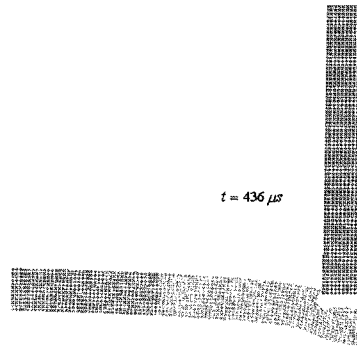
شکل (۵) منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در طی نفوذ و با برخورد با سرعت $303/5 \text{ m/s}$.



شکل (۴) منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در طی نفوذ و در برخورد با سرعت $244/5 \text{ m/s}$.

مشاهدات حاصل از تحلیل بکمک نرم افزار عددی در تحلیل مسئله فوق بشرح زیر می‌باشد:

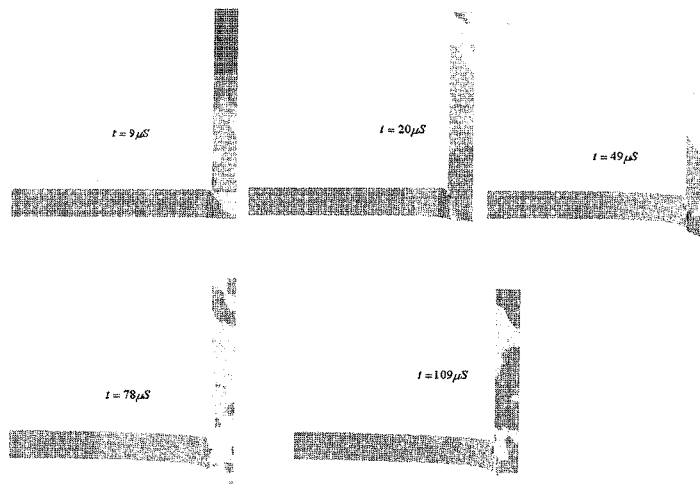
- در برخورد با سرعت بالا (یعنی تست شماره یک در جدول فوق)، سطح مشترک پرتابه و هدف بر خلاف مدل تحلیلی که صاف در نظر گرفته شده است، بصورت سطح انحناء دار بوده پلاگ حاصل نیز بجای مقطع صاف، بصورت انحناء دار می‌باشد و ذراتی از پلاگ طی نفوذ جدا می‌گردند. یعنی در سطح مشترک پرتابه و هدف ذرات پلاگ فرسایش می‌یابند. در مدل تحلیلی کاهش جرم پلاگ طی نفوذ که در سرعت برخورد بالا بوجود می‌آید در نظر گرفته نشده است.
- در برخورد با سرعت $244/2 \text{ m/s}$ به پائین، سطح تماس پرتابه و هدف و نیز پلاگ حاصل مشابه پیش‌بینی مدل تحلیلی می‌باشد. یعنی پلاگ بصورت مقطع استوانه‌ای صاف تشکیل خواهد شد.
- در سرعت برخورد $173/2 \text{ m/s}$ به پائین نیز پرتابه در هدف فقط حفره ایجاد نموده و مطابق شکل (۶) به عقب باز می‌گردد و تغییر شکل دیشینگ نسبتاً بالاتر از سایر سرعتهای برخورد است. در این حالت مدت زمان تماس پرتابه و هدف به شدت افزایش می‌یابد که هم در مدل تحلیلی و هم در تحلیل عددی یکسان است.



شکل (۶) برخورد و بازگشت پرتابه در برخورد به هدف و ایجاد برآمدگی دیشینگ در آن.

مراحل تغییر شکل پرتابه و هدف و شکل‌گیری پلاگ در چند مرحله زمانی در برخورد با سرعت $244/2 \text{ m/s}$ در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در زمان بسیار کوتاه از برخورد ماده هدف در جلوی پرتابه شتاب گرفته و در ماده هدف در تماس با پرتابه برش صورت می‌گیرد و این برش به جلو حرکت می‌کند و پلاگ را تشکیل می‌دهد. همزمان با آن المانهای سطح مشترک فرسایش یافته و ذره ذره می‌گردند. همچنین صفحه خارج از پلاگ هدف تغییر شکل دیشینگ داده و به جلو حرکت می‌کند. توسط این مدل رفتار ماده تعریف شده در نرم افزار می‌توان به پیش بینی مناسبی از نتایج رسید، شکست پلاگینگ در برخورد پرتابه تخت و تغییر شکل دیشینگ در صفحه خارج از پلاگ قابل مشاهده و پیش‌بینی است.

در قسمت بعد نتایج مدل تحلیلی با نتایج لیو [۸] مقایسه می‌گردد در این مرجع پرتابه‌ها از جنسهای مختلف و تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده‌اند. هدف از جنس آلومینیم 1200 با ضخامت $3/03 \text{ mm}$ دانسیته 2700 Kg/m^3 و ضرایب معادله رفتار ماده آن بصورت $A_f = 115 \text{ Mpa}$, $B_f = 80 \text{ Mpa}$, $n_f = 0.67$ انتخاب شده است. پرتابه نیز از سه جنس مختلف آلومینیم 1200، آلومینیم 6063 TF و آلومینیم T6 6061 با جرم $3/8 \text{ gr}$ ، قطر $12/5 \text{ mm}$ و طول $11/46 \text{ mm}$ انتخاب می‌گردد. ثوابت مدل رفتار ماده پرتابه بشرح جدول (۳) می‌باشد.



شکل (۷) مراحل شکل‌گیری پلاگ و نفوذ در زمانهای متفاوت برخورد.

علاوه بر آن ضرایب معادله حالت می‌گرونایزن برای آلومینیم بر اساس نتایج کارلون [۹] بشرح زیر انتخاب شده است:

$$S_1 = 1.34, \quad S_2 = S_3 = 0, \quad C = 5380 \text{ m/s}, \quad \gamma_0 = 1.97$$

در جدول (۴) نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تستهای تجربی لیو [۸] مقایسه شده است. در این جدول مقادیر طول باقیمانده پرتابه X در برخورد با سرعت حد بالستیک به هدف و نیز سرعت حد بالستیک V_b با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌گردد که مقادیر سرعت حد بالستیک و نیز طول نهایی پرتابه، همخوانی مناسبی با نتایج تستهای تجربی دارد و مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از این مقادیر بنماید.

جدول (۳) ضرایب معادله رفتار ماده پرتابه لیو [۸].

نوع ماده	$A(Mpa)$	$B(Mpa)$	n
1200Al	۵۰	۳۷۶	۰/۸۷
6063 TF	۱۴۰	۴۶۵	۰/۸۹
6061 T6	۲۰۰	۹۵۶	۰/۵۳

جدول (۴) مقایسه سرعت حد بالستیک و طول باقیمانده پرتابه مدل تحلیلی با نتایج تجربی لیو [۸] و نتایج تحلیل با نرم افزار.

جنس ماده پرتابه	نتایج تستهای تجربی مرجع [۸]		نتایج مدل تحلیلی این مقاله		نتایج تحلیل با نرم افزار Ls-Dyna	
	$X(mm)$	$V_b(m/s)$	$X(mm)$	$V_b(m/s)$	$X(mm)$	$V_b(m/s)$
1200 AL	۵/۸	۳۵۴	۵/۲	۳۶۵	۴/۷	۳۵۳
6063 TF	۵/۵	۳۱۹	۶/۳۳	۳۲۵	۶/۹	۳۲۲
6061 T6	۷/۷	۲۴۷	۸/۶	۲۵۶	۹/۳	۲۵۲

در قسمت بعد، نتایج حاصل از مدل تحلیلی با سایر نتایج تستهای تجربی لیو [۸] مقایسه می‌گردد. در این حالت پرتابه از جنس فولاد ابزار انتخاب گردیده که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است و هدف نیز از جنسهای مختلف (با مشخصات داده شده در جدول (۵)) انتخاب گردیده است. مقادیر سرعت حد بالستیک حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تستهای تجربی در ضخامتها و جنسهای مختلف هدف و نیز در طولهای مختلف پرتابه در جدول (۵) مقایسه گردیده‌اند. مشاهده می‌گردد مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله در جنسها و ابعاد مختلف پرتابه و هدف می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از مقادیر سرعت حد بالستیک بنماید و مقادیر پیش‌بینی شده سرعت حد بالستیک در مدل تحلیلی این مقاله بسیار دقیق‌تر از سایر مدل‌های تحلیلی موجود می‌باشد [۳]. مدل تحلیلی ونکسیو [۳] نمی‌تواند نتایج مناسبی در محدوده سرعت حد بالستیک ارائه دهد و نتایج ارائه شده در این مرجع در محدوده سرعت حد بالستیک اختلاف زیادی با نتایج تستهای تجربی دارد.

در این قسمت نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تستهای تجربی وودوارد [۱۰] مقایسه می‌گردد. در این مرجع پرتابه از جنس فولاد ابزار با مشخصات مکانیکی جدول (۱) با طول $25/4\text{ mm}$ و قطر $6/23\text{ mm}$ و هدف از جنس فولاد و آلومینیم با مشخصات داده شده در جدول (۶) انتخاب گردیده است. مقادیر ثوابت مدل رفتار ماده هدف (A_i, B_i, n_i) از روی منحنی تنش کرنش این مواد محاسبه شده‌اند. سرعت حد بالستیک و طول پلاگ حاصل از تستهای تجربی وودوارد [۱۰] با مقادیر حاصل از مدل تحلیلی در جدول (۶) مقایسه گردیده‌اند. مشاهده می‌گردد مقادیر سرعت حد بالستیک حاصل از مدل تحلیلی همخوانی بسیار مناسبی با نتایج تستهای تجربی دارد. طول پلاگ حاصل از مدل تحلیلی در تمام این تستها بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط تستهای تجربی می‌باشد. علت این موضوع در نظر نگرفتن فرسایش یا کاهش جرم در پلاگ در برخورد و نفوذ پرتابه است. بعبارت دیگر در برخورد پرتابه به هدف و نیز در طی پروسه نفوذ مقداری از جرم پلاگ بعلت فرسایش یا ذره شدن ذرات آن جدا می‌گردد [۵] و در مدل تحلیلی این مقاله از این اثر صرف‌نظر گردیده است.

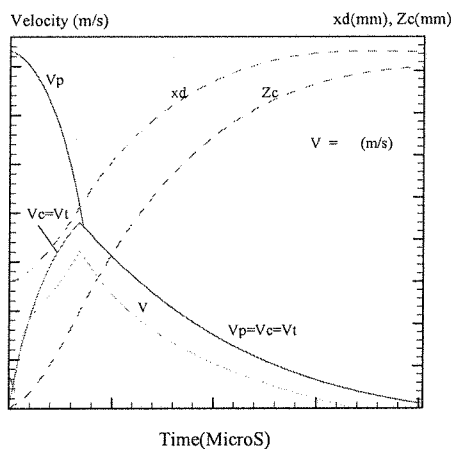
جدول (۵) مقایسه سرعت حد بالستیک در مدل تحلیلی با نتایج تجربی لیو [۸].

ابعاد پرتابه	مشخصات و جنس هدف	سرعت حد بالستیک	
		تجربی [۸]	تحلیلی
$m_p (gr)$	جنس ماده	$V_b(m/s)$	$V_b(m/s)$
۲۳/۶	2014Al	۱۴۷	۱۳۳
۲۳/۶	2014Al	۱۲۲	۱۱۰
۹/۷	1200Al	۵۶	۶۰
۹/۷	1200Al	۱۴۵	۱۳۸
۹/۷	1200Al	۲۱۸	۲۰۸
۳/۸	1200Al	۹۷	۹۰
۳/۸	1200Al	۲۳۰	۲۲۳
۳/۸	1200Al	۳۵۶	۳۴۸

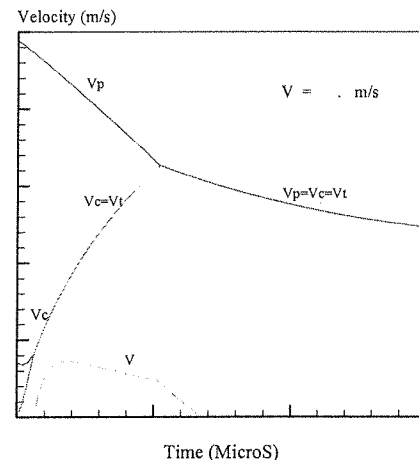
جدول (۶) مقایسه سرعت حد بالستیک و طول پلاگ در مدل تحلیلی با نتایج تجربی مرجع [10].

$T_0(mm)$	جنس ماده	مشخصات و جنس هدف			سرعت حد بالستیک تجربی $V_b(m/s)$	سرعت حد بالستیک تحلیلی $V_b(m/s)$	طول پلاگ تجربی $[10]$ mm	طول پلاگ تحلیلی mm
		$A_f(Mpa)$	$B_f(Mpa)$	n_f				
۱/۶	SAE 4130	۱۰۲۰	۳۴۶	۰/۹	۱۱۴	۱۰۷	۱/۳۷	۱/۴۸
۳/۲	SAE 4130	۱۰۲۰	۳۴۶	۰/۹	۲۵۷	۲۶۵	۳	۳/۱۲
۴/۷۸	Mild Steel	۴۰۰	۴۲۶	۰/۶	۲۹۸	۳۰۴	۴/۳۷	۴/۶۳
۱/۶	Mild Steel	۳۰۰	۵۰۰	۱	۹۵	۸۵	۱/۳	۱/۴۳
۶/۳۵	7039Al	۱۲۰	۱۳۵	۰/۴۳	۱۵۲	۱۵۰	۵/۵۱	۶/۱
۶/۳۵	7039Al	۱۲۰	۱۳۵	۰/۴۳	۱۴۶	۱۴۸	۴/۹۵	۵/۹۳

در ادامه بررسی از مقادیر پارامترهای پیش‌بینی شده در مدل تحلیلی می‌پردازیم. در شکل (۸) منحنی تغییرات سرعت پرتابه (V_p)، سرعت پلاگ صلب (V_c) و پلاگ تغییر شکل‌پذیر (V_t) و نیز سرعت حرکت ماده خارج از پلاگ هدف (V_3) برای پرتابه و هدف با جنس داده شده در جدول (۱) و در برخورد با سرعت $242/2 m/s$ (در جدول (۲)) حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که سرعت پرتابه با گذشت زمان کاهش یافته و برابر سرعت پلاگ می‌گردد و سرعت هر دو عضو سیستم با گذشت زمان کاهش خواهد یافت.



شکل (۹) منحنی تغییرات سرعت بر حسب زمان در طی نفوذ و با برخورد با سرعت $244/2 m/s$.



شکل (۸) منحنی تغییرات سرعت پرتابه بر حسب زمان در طی نفوذ و با برخورد با سرعت $368 m/s$.

همچنین از شکل (۸) مشخص است که سرعت ماده خارج از پلاگ (V_3) کم بوده و به عبارت دیگر تغییر مکان ناحیه خارج از پلاگ چندان زیاد نیست و دیشینگ اثر زیادی در این پروسه ندارد علت این موضوع بالا بودن ضخامت هدف نسبت به قطر پرتابه ($\frac{12}{20}$) و استحکام بالای هدف می‌باشد. همچنین در شکل (۹) علاوه بر سرعت‌های فوق مقادیر پارامترهای xd, Z_c بر حسب زمان نشان داده شده است. این شکل برای هدف از جنس آلومینیم 1200 با ضخامت $3/03 mm$ رسم شده است که مشخصات جنس آن قبلاً داده شده و پرتابه نیز از جنس آلومینیم 1200 با مشخصات جدول (۳) و قطر $12/5 mm$ و طول $11/46 mm$ می‌باشد سرعت برخورد نیز در حدود سرعت حد بالستیک (یعنی سرعت $368 m/s$ در جدول (۴)) می‌باشد. از این منحنی مشخص است که سرعت ناحیه خارج از پلاگ هدف (V_3) بالاست و بنابراین تغییر مکان خارجی هدف یا دیشینگ زیاد بوده و اثر زیادی در نتایج خواهد داشت زیرا در این حالت نسبت ضخامت هدف به قطر پرتابه ($\frac{3.03}{12.5}$) کم بوده و تغییر مکان زیادی در ناحیه خارج از پلاگ ایجاد می‌گردد. هنگامی که Z_c به xd برسد، فرایند نفوذ متوقف خواهد شد و سرعت پرتابه در این لحظه برابر سرعت باقیمانده است و هنگامی که این سرعت صفر باشد، سرعت برخورد همان سرعت حد بالستیک می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از این مقاله در محدوده سرعت حد بالستیک و نیز در ضخامت کم هدف (نسبت به قطر پرتابه) دیشینگ هدف بالاست و در نظر نگرفتن آن باعث عدم دقت نتایج خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل تحلیلی ارائه شده است که بکمک انتشار امواج تنش پلاستیک یک بعدی محوری در پرتابه و پلاگ، تغییر شکل پرتابه و هدف را و با استفاده از انتشار امواج تنش برشی تغییر شکل دیشینگ هدف را طی فرایند نفوذ مدل می‌کند. در این روش تحلیلی از مدل رفتار ماده جانسون کوک در پرتابه و هدف بدون در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش و دما استفاده شده است. نتایج حاصل از این مدل تحلیلی در محدوده سرعت حد بالستیک بسیار مناسب بوده و نتایج آن قابل اعتماد می‌باشد. در نظر گرفتن اثر دیشینگ هدف در مدل تحلیلی باعث بهبود نتایج بخصوص در محدوده سرعت حد بالستیک و نیز در ضخامتهای کم هدف شده است. این مدل تحلیلی به عنوان روشی مناسب و جدید در محاسبه سرعت حد بالستیک می‌باشد. علاوه بر سرعت حد بالستیک، زمان نفوذ، طول نهایی پرتابه، تغییر شکل حاصل در هدف (ابعاد پلاگ، ابعاد ناحیه تحت دیشینگ) و نیز سرعت باقیمانده بعد از برخورد در این مدل تحلیلی محاسبه و تعیین می‌گردد و مقادیر این پارامترها نیز همخوانی مناسبی با نتایج تستهای تجربی داشته است. از ویژگی مدل تحلیلی سادگی حل معادلات حاکم و دقت مناسب نتایج بخصوص محاسبه دقیق سرعت حد بالستیک و سایر پارامترهای نفوذ می‌باشد.

فهرست علائم

T_0 : ضخامت هدف	A : سطح مقطع مشترک پلاگ و پرتابه
V_0 : سرعت اولیه برخورد پرتابه به هدف	A_p : ضریب معادله رفتار ماده پرتابه
V_3 : سرعت حرکت ناحیه خارج از پلاگ هدف	A_f : ضریب معادله رفتار ماده هدف
V_c : سرعت سطح مشترک پرتابه، هدف	a_d : شعاع پلاگ
V_{c0} : سرعت سطح مشترک پرتابه، هدف در لحظه برخورد	B_p : ضریب معادله رفتار ماده پرتابه
V_p : سرعت قسمت بدون تغییر شکل پرتابه	B_f : ضریب معادله رفتار ماده هدف
V_r : سرعت پلاگ تغییر شکل پذیر نسبت به پلاگ صلب	C : ضریب نرخ کرنش معادله جانسون کوک
V_s : سرعت قسمت تغییر شکل یافته نسبت به قسمت صلب پرتابه	C_0 : سرعت صوت در ماده
x : ضخامت پلاگ تغییر شکل پذیر	C_p : سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پرتابه
X : طول باقیمانده پرتابه در انتهای نفوذ	C_f : سرعت موج تنش پلاستیک محوری در پلاگ
Y : تنش تسلیم هدف	C_s : سرعت موج تنش برشی در صفحه هدف
Z_f, Z_c : مقادیر جابجایی پلاگ مطابق شکل (۱)	C_x : سرعت موج تنش محوری
ε : کرنش مهندسی معادل	D_0 : قطر اولیه پرتابه
ε_x : کرنش پلاستیک محوری	D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 : ضرایب معادله کرنش شکست جانسون کوک
ε_y : کرنش پلاستیک در جهت جانبی y	E : انرژی بر واحد حجم در معادله حالت
ε_z : کرنش پلاستیک در جهت جانبی z	E_p : مدول الاستیک پرتابه
ϕ : شار خالص اندازه حرکت از طریق سطح کنترل	F : کل نیروهای سطحی و حجمی اعمالی بر حجم کنترل
γ : کرنش برشی	G : مدول برشی
γ_0 : ضریب معادله حالت- گامای می-گرونایزن	$H_{(f)}$: ضخامت ناحیه تغییر شکل یافته پرتابه مطابق شکل (۱-الف)
μ : ضریب معادله حالت	j_2 : دومین نامتغیر تنش انحرافی
μ_f : نسبت سطح مقطع اولیه به سطح مقطع تغییر شکل یافته پرتابه	K : مدول حجمی
ρ : دانسیته	$L_{(f)}$: طول قسمت بدون تغییر شکل پرتابه در هر لحظه زمانی
ρ_p : دانسیته پرتابه	L_0 : طول اولیه پرتابه
ρ_f : دانسیته هدف	M : اندازه حرکت خطی در داخل حجم کنترل
σ_m : تنش متوسط	n_p : ضریب کارسختی ماده پرتابه
σ_p : تنش جریان پرتابه	n_f : ضریب کار سختی ماده هدف
σ_f : تنش تسلیم هدف در شرایط کرنش محوری	R : شعاع حلقه پلاستیک هدف، شکل (۱-ب)
σ_{ff} : تنش جریان پلاگ پلاگ	S_{ij} : تانسور تنش انحرافی
σ_x : تنش محوری	S_1, S_2, S_3 : ضرایب معادله حالت
τ : تنش برشی	T : ضخامت پلاگ صلب، شکل (۱-الف)
τ_f : تنش برشی شکست	t : زمان نفوذ

- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1- penetration | 11- erosion |
| 2- projectile | 12- plug ejection |
| 3- target | 13- explicit |
| 4- deformable | 14- quadratic |
| 5- plastic stress wave | 15- contact |
| 6- dishing | 16- deviatiric |
| 7- failure | 17- equation of state |
| 8- plugging | 18- Mie- Gruneisen |
| 9- cratering | 19- Arne tool steel |
| 10- shear stress wave | |

مراجع

- [1] Goldsmith W., Non Ideal Projectile Impact on Targets (Review), *Int. J. Impact Engng*, 22, 95-395, 1999.
- [2] Zukas J.A., *High Velocity Impact Dynamic*, John Wily and Sons, 1990.
- [3] Wenxue Y. and Z. Lanting, Plate Perforation By Deformable Projectiles- A Plastic Wave Theory, *Int. J. Impact Eng.*, 1, 4, 393-412, 1983.
- [4] لیاقت غلامحسین، حسن مسلمی نائینی و سعید فعلی، مدلسازی نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی، چهارمین کنفرانس انجمن هوا فضای ایران، ۱۳۸۱
- [5] Liss J., W. Goldsmith and J.M. Kelly, A Phenomenological Penetration Model of Plates, *Int. J. Impact Eng.*, 1, 4, 321-341, 1983.
- [6] Recht R.F., Taylor Ballistic Impact Modelling Applied to Deformation and Mass Loss Determinations, *Int. J. Eng. Sci.*, 16, 809-827, 1978.
- [7] Borvik T., Langseth M., Hopperstad O.S., Ballistic Penetration of Steel Plates, *Int. J. Impact Eng.*, 22, 855-886, 1999.
- [8] Liu D., W.J. Stronge, Ballistic Limit of Metal Plates by Blunt Deformable Missiles: experimets, *Int. J. Solids and Structures*, 37, 1403-1423, 2000.
- [9] Carleone J., Tactical missile warhead, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA Tactical Missile Series V. 155, pp 246, 1993.
- [10] Woodward R.L., Morton M.E., Penetration of Targets by Flat-Ended Projectiles, *Int. J. Mech. Sci*, 18, 119-127, 1976.
- [11] سعید فعلی، تحلیل نفوذ پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی بکمک امواج تنش پلاستیک، رساله دکتری دانشگاه تربیت مدرس، (در حال انجام)
- [12] G. Liaghat, H. Moslemi Naeini, S. Felli, Normal Penetration Analysis of Deformable Projectiles Into Metallic Targets and Extending to Oblique Penetration, *Modarres Technical and Engineering Journal*, In press.