

# بررسی تاثیر مدل ماده آستر (*Liner*) در شبیه‌سازی پرتابه های شکل‌یافته انفجاری (*EFP*)

پژمان کاظم پور<sup>۱</sup>؛ کیومرث مظاهری<sup>۲</sup>

## چکیده

هدف این مقاله بررسی تاثیر مدل ماده فلزی آستر بر شکل نهایی و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی پرتابه شکل‌یافته انفجاری یا EFP می‌باشد. مدل‌های ماده در نظر گرفته شده شامل سه مدل جانسون - کوک، اشتنبرگ و زیریلی - آرمسترونک است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که هر سه مدل یادشده دارای دقت بسیار خوبی در شبیه‌سازی EFP می‌باشند. از میان این مدل‌ها، نتایج مدل زیریلی - آرمسترونک دارای دقت بیشتری در تعیین شکل پرتابه و مدل‌های اشتنبرگ و جانسون - کوک نیز طول پرتابه را با دقت بیشتری نشان می‌دهند. سرعت بدست آمده از هر سه مدل اختلاف اندکی با مقادیر تجربی دارد.

## کلمات کلیدی

پرتابه شکل‌یافته انفجاری EFP، مدل ماده، Ls Dyna

## *Effect of Liner Material Model on Explosively Formed Projectiles (EFP) Simulation*

P.Kazempoor<sup>1</sup>; K.Mazaheri<sup>2</sup>

### ABSTRACT

In this paper, the effect of the liner material model on the result of numerical simulation of Explosively Formed Projectile (EFP) is examined. Johnson-Cook, Steinberg, and Zerilli – Armstrong models are used for the simulation. All models are shown that have a good agreement with the experimental results. Zerilli – Armstrong model predicts final EFP shape with more accuracy in comparison with the other models. The results of simulations indicate that Johnson-Cook and Steinberg models predict the projectile length better than Zerilli – Armstrong model. The velocity of projectile predicted by all models agrees well with the experimental measurement.

### KEYWORDS

Explosively formed projectile (EFP), material model, Ls-Dyna

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، Email: P\_kazempoor@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار مهندسی مکانیک، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، Email: Kiumars@modares.ac.ir (نویسنده مخاطب)

از مهمترین فرایندهای مرتبط با رفتار مواد، بارگذاری دینامیکی تحت نیروهای فوق‌العاده زیاد است که از آنجمله می‌توان به برخورد یک پرتابه با سرعت بالا به هدف اشاره کرد. در این بارگذاری‌ها تنش‌های فوق‌العاده زیادی در ماده ایجاد می‌شود که این تنش‌ها باعث ایجاد تغییر شکل زیاد یا شکست در ماده می‌گردد. این فرایند در بسیاری از پدیده‌های صنعتی به فراوانی مشاهده می‌گردد که از آنجمله می‌توان به فرایند جوشکاری و شکل‌دهی انفجاری و مکانیزم شکل‌گیری پرتابه‌هایی مانند EFP<sup>۱</sup> و جت حاصل از خرج‌گود اشاره نمود.

تحقیقات مربوط به فشرده شدن فلزات توسط امواج ضربه‌ای دارای سابقه طولانی می‌باشد، به طوری که می‌توان اولین تحقیقات را به جنگ جهانی دوم ارجاع داد. از اولین مطالعات انجام شده در این زمینه، می‌توان به کارهای رایس، مک کوئین و والش اشاره نمود [۱]. بررسی کامل‌تری هم توسط جونز انجام شده است که در این تحقیق با استفاده از معادلات اساسی (معادلات بقاء)، حرکت موج ضربه‌ای در فلزات تشریح شده است [۲]. داویسون و گراهام نیز برای بسیاری از مواد پارامترها و روابط ارائه شده بویژه در مورد معادله حالت فلزات را بیان کرده‌اند [۳].

علاوه بر کارهای یادشده که بیشتر به بررسی حرکت موج شاک و رفتار فلز در مقابل آن پرداخته‌اند، افراد دیگری نیز پدیده کارسختی<sup>۲</sup> را بررسی کرده‌اند. روابط مختلفی توسط محققین برای در نظر گرفتن اثرات کارسختی ارائه شده است. از مهمترین بررسی‌ها در مورد اثر کار سختی روی مواد می‌توان به کارهای ویلکینز در مرجع [۴] اشاره نمود که برای مس و آلومینیوم مدل‌های کارسختی را مورد بررسی قرار دادند. گریدی و همکاران نیز به بررسی خواص ریز ساختارها و خواص مکانیکی آلومینیوم که تحت یک نرخ بالای تغییرشکل قرار می‌گیرد، پرداختند و کار سختی ایجاد شده را دیدند [۱]. بوچر و کنون با چند سختی اولیه فولاد ۴۳۴۰ و بارگذاری شبه استاتیکی، منحنی‌های تنش- کرنش را بدست آوردند و سپس با آزمایش برخورد صفحات فولادی گفته شده در سرعت بالا، تاثیر کارسختی را روی منحنی دینامیکی تنش-کرنش بدست آوردند [۱]. در تحقیقاتی که توسط لاجت و همکاران صورت گرفته است، اثر کارسختی روی آلیاژ آهن با نیتروژن که در پرتابه‌های بالستیک کاربرد دارد، بررسی شد [۱].

اشتینبرگ و همکاران با مدل کردن رفتار مواد و بررسی اثرات دما و فشار روی تنش تسلیم ماده و مدول برشی آن، اثرات کار

سختی و همچنین اثر باوشینگر<sup>۳</sup> را بررسی کرده و مدل‌هایی را برای آنها ارائه نموده‌اند [۵]. جانسون و کوک نیز با تهیه یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی‌های کامپیوتری به بیان اثرات کارسختی، فشار و دما بر روی تنش تسلیم پرداختند [۶]. مدل دیگری نیز توسط زریلی-آرمسترونگ برای استفاده در کدهای کامپیوتری ارائه گردیده که امروزه از معتبرترین مدل‌های توسعه یافته برای شبیه‌سازی مسائل با نرخ کرنش بالا است [۷].

مدل‌های ارائه شده برای مواد در نرخ کرنش‌های بالا باید دارای چند خاصیت ویژه باشند که این خاصیت‌ها عبارتند از [۸]:

- مدل ارائه شده باید در دامنه وسیعی از کرنش، نرخ کرنش، دما و تنش قابل استفاده باشد.
- مدل باید بتواند تنش را برحسب توابعی از کرنش، نرخ کرنش، دما، فشار و سایر کمیت‌های میکروسکوپی مورد نیاز بیان کند.
- مدل باید ساده بوده و بتوان آن را به راحتی در کدهای کامپیوتری مورد استفاده قرار داد.
- مدل نباید باعث افزایش زمان حل و حافظه مورد نیاز کامپیوتر گردد.
- مدل باید برای مواد مختلف قابل استفاده باشد.
- ضرایب مدل باید به راحتی با استفاده از تعدادی آزمایش بدست آید.

در میان مدل‌هایی که تاکنون ارائه گردیده، مدل‌های ارائه شده توسط اشتینبرگ، جانسون-کوک و زریلی-آرمسترونگ دارای خواص گفته شده می‌باشند. بنابراین، این مدل‌ها به صورت گسترده در کدهای کامپیوتری مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به این موضوع در این مقاله این سه مدل برای بررسی دقت جواب‌های بدست آمده در شبیه‌سازی عددی EFP مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مهمترین مسائل در شبیه‌سازی عددی EFP انتخاب مدل ماده بکار رفته برای آستر می‌باشد، انتخاب صحیح مدل ماده می‌تواند سهم عمده‌ای در بهبود نتایج داشته باشد.

## ۲- کارسختی و نرم شدن حرارتی

فرایندهای دینامیکی با تغییر شکل زیاد، در فشارهای بسیار بالاتر از تنش تسلیم مواد، انجام می‌پذیرند. در شبیه‌سازی‌های اولیه برای فلزات رفتاری سیال‌گونه در نظر گرفته می‌شد و از مولفه‌های تنش‌برشی چشم‌پوشی می‌گردید. کارهای تجربی

تنش تسلیم و مدول برشی پرداخته شده است. از این مدلها می‌توان به مدلی که توسط اشتینبرگ و همکاران، مدل جانسون و کوک و پس از آن زریلی - آرمسترونگ اشاره کرد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

## ۲-۱- مدل اشتینبرگ

اشتینبرگ، کوچران و گیرن در سال ۱۹۸۰ رابطه ۱ را برای اصلاح مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک ارائه نمودند که در آن مدول برشی  $G$  و تنش تسلیم  $Y$  برحسب کرنش پلاستیک، فشار  $P$  و انرژی (دما  $T$ ) بصورت ۱ و ۲ تعریف شده بود [۵]:

$$G = G_0 [1 + \left(\frac{G'_P}{G_0}\right) \frac{P}{\eta^{1/3}} - \left(\frac{G'_T}{G_0}\right) (T-300)] \quad (1)$$

$$Y = Y_0 [1 + \beta(\varepsilon + \varepsilon_i)]^n [1 + \left(\frac{Y'_P}{Y_0}\right) \frac{P}{\eta^{1/3}} - \left(\frac{Y'_T}{Y_0}\right) (T-300)] \quad (2)$$

در این روابط،  $\eta$  بیانگر فشردگی فلز بوده و به صورت مقدار حجم مخصوص اولیه به حجم مخصوص فعلی تعریف می‌شود.

$n$  و  $\beta$  پارامترهای بیانگر کارسختی و  $\left(\frac{G'_P}{G_0}\right)$ ,  $\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)$ ,  $\left(\frac{Y'_P}{Y_0}\right)$  و  $\left(\frac{Y'_T}{Y_0}\right)$  ثابتهای مربوط به فلز و  $\varepsilon_i$  کرنش پلاستیک معادل اولیه می‌باشد که در حالت عادی برابر صفر است. بنابراین در صورتی که روی فلز عملیات کار سختی انجام شده باشد و مقداری کرنش پسماند در فلز باقی مانده باشد، ترم  $\varepsilon_i$  اثر آن را در کارسختی جدید وارد می‌کند. اندیس صفر بیانگر شرایط مرجع  $P=0$ ,  $\varepsilon=0$  است. اندیس های  $P$  و  $T$  نیز نشان دهنده ارتباط پارامتر با فشار و دما است [۵].

از آنجا که بسیاری از کدهای هیدروپلاستیک از قبیل HEMP [۴] از ترم انرژی  $E$  به جای دما استفاده می‌کنند، بنابراین  $T$  به صورت اختلاف بین انرژی کل و انرژی در صفر کلین  $E_c(\eta)$  تقسیم بر حرارت مخصوص جامد  $C$  به صورت  $T=(E-E_c)/C$  بیان می‌گردد. کمیت  $E_c(\eta)$  به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۵]:

$$E_c(\eta) = \int_0^\eta P \frac{d\eta}{\eta^2} - 300C \exp\left[a\left(1 - \frac{1}{\eta}\right)\right] \eta^{\gamma_0 - a} \quad (3)$$

و برابر است با انرژی در راستای خط آدیباتیک در  $300K$  و منهای انرژی مربوط به هر دما بر روی خط آدیباتیک. در رابطه (۳)،  $P(\eta)$ ، فشار در راستای آدیباتیک بوده و از معادله حالت تعیین می‌شود. پارامتر  $\gamma$  نیز گامای گرونایزن است که در راستای آدیباتیک به صورت  $\gamma = -\partial \ln T / \partial \ln v$  تعریف

سالیان بعد نشان داد که وجود یک مولفه تنش برشی هرچند کوچک اثر زیادی در میرا شدن یک موج فشاری دارد و دیگر اینکه مقاومت برشی و تنش تسلیم مواد با افزایش فشار افزایش می‌یابد. این حقایق باعث شد به جای استفاده از مدل‌های هیدروپلاستیک از مدل‌های الاستیک-کاملاً پلاستیک [۴] در بررسی رفتار مواد استفاده شود. در اینگونه مدل‌ها ضرایب مکانیکی مواد نظیر تنش تسلیم و مدول برشی ثابت در نظر گرفته می‌شد و از تغییرات آنها بر اثر عوامل مختلف چشم پوشی می‌شد. کارهای انجام گرفته توسط ویلکینز، اشتینبرگ، جانسون و کوک همگی در جهت بدست آوردن معادلاتی برای بیان تغییرات ضرایب مکانیکی بر اثر پارامترهای موثر در آن بود. اضافه کردن این تاثیرات به مدل‌های الاستیک-کاملاً پلاستیک توسط معادلات که به معادلات متشکله معروف می‌باشند، نقش بسزایی در یکسان سازی نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه سازی‌های کامپیوتری دارند [۵].

یکی از پدیده هائی که در نتایج تجربی دیده شده است، تغییر تنش تسلیم در اثر کرنش پلاستیک است. بنابراین یکی از روشهای اصلاح نتایج، افزایش مقدار تنش تسلیم بر اثر افزایش تغییر شکل پلاستیک است. این پدیده کار سختی و یا کرنش سختی<sup>۵</sup> نامیده شده است. همچنین دیده شده است که اگر دمای ماده نیز بالا باشد، تنش تسلیم کاهش می‌یابد که به این اثر، نرم شدن حرارتی می‌گویند. علت بوجود آمدن کارسختی را می‌توان تغییر در آرایش کریستالی ملکولهای ماده دانست. این مطلب بطور خلاصه توسط جونز [۲] شرح داده شده است. بنابراین خواص ساختمان کریستالی (ریز ساختارها) روی خواص مکانیکی مواد تاثیر می‌گذارد و لزوم مطالعه روی ریزساختارهای مواد آشکار می‌گردد. از مشاهدات تجربی دریافت شده است که تنش تسلیم و مدول برشی فلزات با افزایش فشار ماکزیمم در پالس شاک، افزایش و با کاهش آن کاهش می‌یابند. مدل‌هایی که برای این کار استفاده می‌شوند مدل‌های کارسختی نامیده می‌شوند.

در عمل مقادیر تنش تسلیم و مدول برشی علاوه بر اثر کرنش پلاستیک بر اثر عوامل دیگری نیز تغییر می‌کنند. یکی از مهمترین این عوامل تغییرات درجه حرارت می‌باشد. بطور کلی استحکام تسلیم با افزایش نرخ کرنش، افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج و اثرات فیزیکی، مدل‌های کارسختی و نیز نرم شدن گرمائی مختلفی ارائه شده است. در این مدلها به اثرات کرنش پلاستیک و نرخ آن، تغییرات فشار و دما بر روی

می‌شود. مقدار  $C$  نیز حرارت مخصوص فلز بوده و به صورت رابطه ۴ بیان می‌شود [۵]:

$$C = \frac{3R\rho_0}{A} \quad (۴)$$

که در این رابطه  $R$ ، ثابت جهانی گازها،  $A$  وزن اتمی و  $\rho_0$  چگالی اولیه فلز است.

با توجه به رابطه (۳) در  $300\text{K}$  انرژی برابر صفر و  $\eta=1$  می‌گردد. بنابراین در  $\eta=1$  می‌توان رابطه  $E_c = -300 C$  را نوشت.

در فشارهای پایین  $P \leq 2 \text{ GPa}$ ، نتایج تجربی نشان می‌دهد که  $G$  به صورت خطی با  $P$  تغییر می‌کند. اما در فشارهای بسیار بالا تئوری توماس-فرمی بیان می‌کند که  $P$  متناسب با  $\eta^{2/3}$  و  $G$  متناسب با  $\eta^{4/3}$  است. بنابراین در معادله (۱) دیده می‌شود که هنگامی که  $\eta \rightarrow 1$  و  $P \rightarrow 1$  آنگاه  $G$  به صورت  $G = G_0 + G_p P$  بیان می‌شود و در  $\eta \rightarrow \infty$ ،  $G$  با  $\eta^{4/3}$  تغییر می‌کند [۵].

آزمایشها نشان می‌دهند که مدول برشی تقریباً بطور خطی با دما تغییر می‌کند و این روند تا نزدیکی نقطه ذوب ادامه دارد. اشتینبرگ بیان داشت که با توجه به این موضوع که تاثیرات ترم دما در رابطه (۱)، ۱۰ درصد ترم فشاری است، فرض وابستگی خطی مدول برشی به دما برای تمام فلزات خطای چندانی ایجاد نمی‌کند و در نتیجه رابطه (۵) برای بیان وابستگی تغییرات مدول برشی و تنش تسلیم بر اثر تغییرات فشار درست است. لذا چگونگی تغییرات تنش تسلیم بر اثر تغییرات فشار همانند این تغییرات در مدول برشی در نظر گرفته می‌شود [۵]:

$$\left. \frac{1}{Y_0} \frac{dY}{dP} \right)_0 \approx \left. \frac{1}{G_0} \frac{dG}{dP} \right)_0 \quad (۵)$$

بعضی از مواد نظیر مس به عملیات‌های مکانیکی که در مراحل تولید بر روی آنها صورت می‌گیرد حساس می‌باشند. بعنوان مثال با عملیات حرارتی روی بعضی فلزات می‌توان تنش تسلیم آن‌ها را به صفر رساند، [۵]، [۸]. در این مدل فرض می‌شود که یک ماده (با هر سابقه تولید) از یک رفتار برای کارسختی تبعیت می‌کند و اثر عملیات قبلی روی آن تنها باعث ایجاد یک تنش محبوس در آن یا یک تغییر شکل پلاستیک اولیه معادل در آن می‌گردد.

در مدل اشتنبرگ نیاز به وجود سازوکاری است تا در هنگام ذوب شدن ماده از مقاومت مکانیکی مواد چشم پوشی شود. برای این منظور از معادله حالت گری<sup>۱</sup> استفاده شده که اصلاح شده قانون لیندرمن است. در این مدل در صورتی که انرژی داخلی ماده به یک مقدار حدی از انرژی (انرژی ذوب) برسد، ماده ذوب می‌گردد. مقدار انرژی ذوب طبق این مدل از

رابطه (۴) محاسبه می‌گردد [۵].

$$E_m(\eta) = E_c(\eta) + CT_{m0} \exp \left[ 2a \left( 1 - \frac{1}{\eta} \right) \right] \eta^{2(\gamma_0 - a - \frac{1}{3})} \quad (۶)$$

در رابطه ۶،  $T_{m0}$  دمای ذوب در  $\eta=1$  است.

## ۲-۲- مدل جانسون - کوک [۶]

رابطه ارائه شده توسط جانسون و کوک برای بیان اثرات کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما بر روی تنش تسلیم به صورت رابطه ۷ است، [۶]، [۸]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (۷)$$

که در آن  $A, B, C, n, m$  ثابتهای ماده و  $\varepsilon$  کرنش پلاستیک معادل،  $\dot{\varepsilon}^*$  پارامتر بی بعد شده نرخ کرنش پلاستیک است که بصورت  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / 1.0s^{-1}$  تعریف می‌شود.  $T^{*m}$  پارامتر بی بعد شده دما است که از رابطه ۸ محاسبه می‌گردد [۶] و [۸].

$$T^{*m} = \frac{T - T_{Room}}{T_{Melt} - T_{Room}} \quad (۸)$$

در این مدل اثرات نرخ کرنش پلاستیک نسبت به زمان بر روی تنش تسلیم در نظر گرفته شده است ولی در مدل اشتینبرگ از آن چشم پوشی شده است. دلیل این امر در تفاوت محدوده استفاده از این مدل‌ها است. در آزمایش‌های صورت گرفته توسط جانسون و کوک برای محاسبه ضرایب مورد استفاده در این مدل بیشترین نرخ کرنش پلاستیک برابر  $400s^{-1}$  بوده است ولی در آزمایشات اشتینبرگ به دلیل توجه آنها به بارگذاری‌های انفجاری و برخورد با سرعت‌های بسیار بالا نرخ کرنش پلاستیک بیشتر از  $10^6 s^{-1}$  بوده است. کرنش پلاستیک معادل از رابطه ۹ بدست می‌آید [۶]:

$$\varepsilon = \sum \dot{\varepsilon} \Delta t \quad (۹)$$

در رابطه ۹  $\dot{\varepsilon}$  به صورت ۱۰ بیان می‌شود [۶] و [۸]:

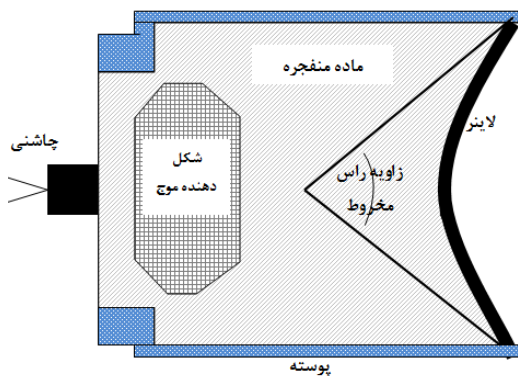
$$\dot{\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{9} \left[ (\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\theta)^2 + (\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_r)^2 \right] \frac{1}{2} \\ + \frac{1}{3} \dot{\gamma}_{rz} \end{array} \right\} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)،  $\dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\varepsilon}_z$  نرخ‌های کرنش پلاستیک انحرافی و  $\dot{\gamma}_{rz}$  نرخ کرنش برش پلاستیک است.

## ۲-۳- مدل زیرلی-آرمسترونگ [۷]

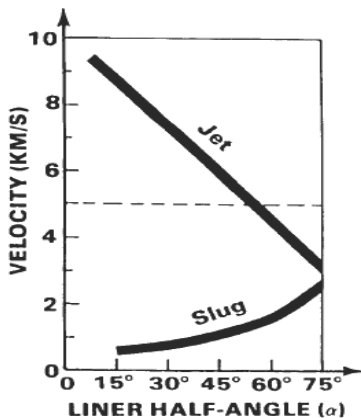
در مدل ارائه شده توسط زیرلی-آرمسترونگ، تاثیر کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما بر روی تنش تسلیم به صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود [۷]:

۱- برای فلزات FCC<sup>v</sup>:



شکل (۱) - نمونه ای از سرچنگی EFP

برای بررسی عملکرد و شکل گیری EFP می توان سازوکار تشکیل جت در خرج گود را مورد بررسی قرار داد. خرج گود، یک استوانه از ماده منفجره است که در داخل آن حفره ای مخروطی شکل فلزی قرار داده شده است. بعد از انفجار آستر به جت تبدیل گردیده که نوک این جت دارای سرعتی نزدیک به ۸ الی ۱۰ کیلومتر بر ثانیه است. دنباله نیز دارای سرعتی نزدیک به یک کیلومتر بر ثانیه است. جت و دنباله در طول فرایند از یکدیگر جدا می گردند. در حالت کلی ۱۵٪ از جرم آستر به جت و باقیمانده دنباله را تشکیل می دهد. با افزایش زاویه راس مخروط در خرج گود، فروپاشی داخلی به شدت کاهش یافته و اختلاف سرعت بین جت و دنباله کمتر می گردد. در حقیقت برای زاویه راس نزدیک به ۱۵۰ درجه، آستر و جت دارای سرعت یکسانی گردیده و در این زاویه EFP تشکیل می گردد (شکل ۳).



شکل (۲) - سرعت جت و دنباله بر حسب تابعی از زاویه راس [۸]

مزایای پرتابه EFP در مقایسه با خرج گود عبارتند از:

- ۱- در فاصله زیاد، حتی تا هزار برابر کالیبر گسیخته نمی شود.
- ۲- دارای وزن و فشردگی کافی برای روبرو شدن با اهداف مستحکم می باشند.

برای طراحی EFP روابط تحلیلی خاصی وجود ندارد.

$$\sigma = C_1 + \left\{ C_2 (\varepsilon^P)^{\frac{1}{2}} \left[ e^{(-C_3 T + C_4 T \cdot \ln(\varepsilon^*)) T} \right] + C_5 \right\} \left( \frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right) \quad (11)$$

۲- برای فلزات BCC<sup>A</sup>:

$$\sigma = C_1 + C_2 e^{(-C_3 T + C_4 T \cdot \ln(\varepsilon^*)) T} + \left[ C_5 (\varepsilon^P)^n + C_6 \left( \frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right) \right] \quad (12)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲،  $C_1$  تا  $C_6$  ثابت مربوط به هر ماده،  $\varepsilon^P$  کرنش پلاستیک موثر و  $\varepsilon^*$  نیز نرخ کرنش پلاستیک موثر است که به صورت  $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$  تعریف می گردد. در این رابطه برابر  $10^{-6}$  و  $10^{-7}$  برای واحد زمانی ثانیه، میلی ثانیه و میکروثانیه است. کمیت  $\left( \frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right)$  در روابط قبل به صورت رابطه ۱۳ تعریف می شود:

$$\frac{\mu(T)}{\mu(293)} = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 \quad (13)$$

که ضرایب  $B_1$  تا  $B_3$  ثابت مربوط به هر ماده است.

### ۳- پرتابه شکل یافته انفجاری (EFP)

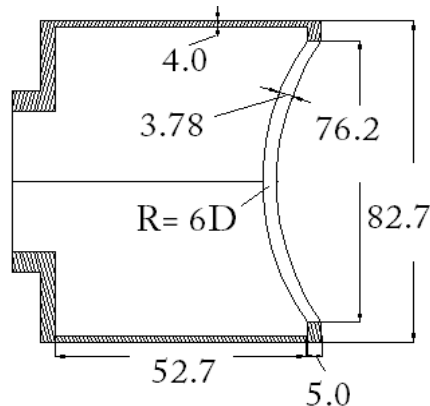
استفاده از انرژی مواد منفجره برای تغییر شکل صفحات فلزی به پرتابه هایی با سرعت بالا، یکی از مهم ترین راههای استفاده از انرژی مواد منفجره است. جت حاصل از خرج گود و EFP دو نمونه از این پرتابه ها می باشند. در EFP هدف طراحی ایجاد یک گلوله فشرده و دارای سرعت بالا است. به عبارت دیگر بر خلاف جت حاصل از خرج گود که قسمت بسیار کمی از آستر فلزی به جت تبدیل می شود. در EFP جت و دنباله<sup>۹</sup> به همراه یکدیگر حرکت می کنند [۸]. نمونه ای از یک سرچنگی EFP در شکل (۱) نشان داده شده است، همانطور که دیده می شود هر EFP متشکل از پوسته، آستر، شکل دهنده موج، ماده منفجره و تجهیزات مربوط به آغاز انفجار است. البته شکل دهنده موج در تمامی نمونه ها لازم نمی باشد، اما می تواند کیفیت پرتابه خروجی را افزایش دهد.

با آغاز انفجار و رسیدن موج ضربه ای به آستر، آستر در اثر فشار بالا شتاب گرفته و تغییر شکل می دهد. شکل پرتابه خروجی و سرعت آن وابسته به طراحی بکار رفته است. بطوری که می توان پرتابه ای به صورت گوی فشرده، میله ای بلند و میله ای با دنباله قیفی شکل بدست آورد. سرعت این پرتابه ها نزدیک به ۲۰۰۰ m/s است [۸].

برابر ۵۲/۷ mm است.

به منظور شبیه سازی نمونه یادشده، از یک مدل دوبعدی با تقارن محوری ALE استفاده گردید. استفاده از گزینه ALE باعث جلوگیری از بهم ریختن المانها در نرخ کرنش های بالا می گردد. مدل سوزش ماده منفجره، CJ BURN و از معادله حالت JWL [۱۴] استفاده شده است. ضرایب مربوط به پارامترهای CJ و معادله حالت ماده منفجره CompB در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

در جدول های (۳) تا (۵) نیز پارامترهای بکار رفته در سه مدل ماده مورد بررسی نشان داده شده است.



(الف)

VELOCITY 1902 M/S



(ب)

شکل (۳) الف- نمونه استاندارد EFP ب- شکل پرتابه خروجی با استفاده از اشعه x

جدول ۱- مشخصات ماده منفجره Comp B [۱۴]

نوع ماده	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	سرعت انفجار (m/s)	انرژی اولیه (GPa)	فشار CJ (GPa)
TNT	۱۷۱۷	۷۹۸۰	۸/۵	۲۹/۵

جدول ۲- ضرایب معادله حالت JWL برای ماده منفجره CompB

[۱۴]

ماده منفجره	A (GPa)	B (GPa)	R1	R2	ω
TNT	۵۲۴/۲	۷/۱۷۸	۴/۲	۱/۱	۰/۳۴

بنابراین در بررسی این نوع پرتابه ها استفاده از روش عددی در کنار کارهای تجربی ضروری است [۸]. با توجه به گستردگی پارامترها در طراحی یک EFP که می تواند شامل جنس آستر، شکل آستر، ضخامت پوسته، نوع ماده منفجره باشد، استفاده از روش تجربی بسیار وقت گیر و نیازمند انجام آزمایش های فراوان و پرهزینه می باشد. استفاده از روشهای عددی نیز نیازمند بکارگیری کدهای عددی خاص است. از آنجا که فرایند تشکیل جت باعث انبساط و کشیدگی المانها تا چندین برابر مقدار اولیه می گردد، لذا کدهای لاگرانژی نمی توانند فرآیند شکل گیری و نفوذ EFP و خرج گود را بدرستی مدل سازی کنند و استفاده از روش ALE ضروری می باشد. از دیگر موارد مهم در شبیه سازی عددی انتخاب مدل ماده مناسب برای فلز آستر است. انتخاب مدل های بدون در نظر گرفتن کارسختی، [۵]، [۶] و [۷]، نرخ کرنش بالا، نمی تواند رفتار و شکل گیری لاینر را به درستی مدل کند. امروزه مدل های مختلفی برای مدل سازی ماده آستر پیشنهاد گردیده که در قسمت های قبل توضیح داده شد. با توجه به این موضوع در ادامه با استفاده از این مدل ها نمونه ای از یک EFP شبیه سازی گردیده و نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه می گردد تا بتوان مدل ماده مناسب را برای این نوع شبیه سازی ها معرفی نمود.

## ع- روش المان محدود

همانطور که اشاره گردید، در این مقاله سه مدل ماده ارائه شده توسط اشتنبرگ، جانسون- کوک و زریلی- آرمسترونگ در شبیه سازی EFP بررسی می گردند. از آنجا که این مدل ها در نرم افزار LS-DYNA [۹] موجود می باشند، لذا از این نرم افزار برای شبیه سازی استفاده گردیده است. از طرف دیگر، امکان استفاده از گزینه های ALE نیز در این نرم افزار امکان پذیر است.

به منظور مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی، با نتایج تجربی، نمونه استاندارد که توسط کدهای مختلفی شبیه سازی گردیده، انتخاب گردید: [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. این مدل اولین بار در آزمایشگاه ملی LLNL<sup>۱۱</sup> توسط مرفی و وینمن برای ارزیابی کدهای مختلف از جمله DYNA2D و DYNA3D مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲]. در شکل (۳- الف)، نمونه مورد بررسی نشان داده شده است. جنس ماده منفجره از CompB و جنس لاینر از آهن خالص است. پوسته نیز از فولاد است. در شکل (۳- ب) تصویر پرتابه خروجی که با استفاده از اشعه x بدست آمده را می توان دید. نتایج تجربی نشان می دهد که سرعت نهایی پرتابه برای این EFP برابر ۱۹۰۲m/s و طول آن

جدول ۳- ضرایب مدل ماده اشتنبرگ [۵]

نام ماده	$G_0$ (GPa)	$Y_0$ (GPa)	$Y_{max}$ (GPa)	$T_{m0}$ (K)
آهن خالص	۷۷/۰	۰/۳۴	۲/۵	۱۸۱۱
	n	$\left(\frac{G'_P}{G_0}\right)$	$\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)$	$\beta$
	۰/۳۵	۲۶/۰	۰/۴۵	۴۲

جدول ۴- ضرایب مدل ماده جانسون-کوک [۶]

نام ماده	$\rho$ (kg/m3)	$T_{m0}$ (K)	A (Mpa)	B (Mpa)
آهن خالص	۷۸۹۰	۱۸۱۱	۱۷۵	۲۸۰
	C	n	m	
	۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۵۵	

جدول ۵- ضرایب مدل ماده زیرلی-آرمسترونک [۷]

نام ماده	$\rho$ (kg/m3)	$C_1$ (MPa)	$C_2$ (MPa)	$C_3$ ( $K^{-1}$ )
آهن خالص	۷۸۹۰	۰/۰	۱۰۳۳	۰/۰۰۶۹۸
	$C_4$ ( $K^{-1}$ )	$C_5$ (MPa)	n	K (MPamm <sup>0.5</sup> )
	۰/۰۰۰۴۱۵	۲۶۶/۰	۰/۲۸۹	۰/۲۲

از آنجا که هر سه مدل ماده بکار رفته برای لاینر، نیاز به معادله حالت دارند. لذا برای هر سه مدل از معادله حالت مای-گرونایزن استفاده شده است که ضرایب آن در جدول (۶) قابل مشاهده است. [۲].

جدول ۶- ضرایب معادله حالت مای-گونایزن [۸]

نام ماده	$C_0$ m/s	S	$\gamma_0$
Armco Iron	۳۵۷۰	۱/۹۲	۱/۸

برای پوسته فولادی نیز از مدل ماده Plastic-Kinematic استفاده گردید که در آن با استفاده از پارامتر کرنش شکست، پارگی پوسته و حذف المانها کنترل می‌گردد.

## ۵- نتایج

با توجه به توضیحات قسمت قبل، پرتابه با استفاده از مدل‌های توضیح داده شده شبیه سازی گردید. البته گفتنی است که قبل از شبیه‌سازی مسئله وابستگی جوابها به شبکه محاسباتی بررسی گردیده و شبکه مناسب بدست آمد. در شکل (۴) و (۵) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با استفاده از

مدل ماده جانسون- کوک و زیرلی- آرمسترونک نشان داده شده است. شایان گفتن است که شکل پرتابه خروجی از روش اشتنبرگ تفاوت ویژه‌ای با نتیجه بدست آمده از مدل جانسون- کوک ندارد و فقط اختلاف جزئی در طول پرتابه و سرعت پایانی آن وجود دارد. همانطور که دیده می‌شود در مقایسه با نتایج تجربی، پروفیل بدست آمده از روش زیرلی- آرمسترونک برابری بهتری نسبت به نتایج تجربی دارد. از طرف دیگر همانطور که در شکل (۴- ب) دیده می‌شود، مقداری از جرم پرتابه در طول فرایند از آن جدا می‌گردد که این مقدار در روش زیرلی- آرمسترونک قابل تشخیص است.

نتایج بدست آمده برای طول پرتابه نشان می‌دهد که طول بدست آمده از روش جانسون- کوک و اشتنبرگ برابر ۵۲ میلیمتر است که برابری بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. طول بدست آمده از روش زیرلی- آرمسترونک برابر ۶۶ میلیمتر است که اختلاف قابل توجهی با نتایج تجربی دارد.

سرعت بدست آمده از روش زیرلی- آرمسترونک در مقایسه با نتایج دو مدل دیگر در طول فرایند شکل گیری پرتابه بیشتر است. به طوری که سرعت نهایی پرتابه از این مدل برابر ۱۹۷۰ متر بر ثانیه است که در مقایسه با نتایج تجربی اندکی بیشتر است. سرعت بدست آمده از روش اشتنبرگ و جانسون- کوک نزدیک به ۱۸۶۰ متر بر ثانیه است که در مقایسه با نتایج تجربی کمتر است. گفتنی است که سرعت بدست آمده از کد DYNA2D برابر ۱۹۴۶ متر بر ثانیه است که به نتیجه مدل زیرلی- آرمسترونک نزدیک‌تر است [۱۲].

در مورد ضخامت قسمت ابتدایی و انتهایی پرتابه، نتیجه مشخصی در مراجع موجود بدست نیامد، لذا امکان مقایسه این پارمتر با نتایج تجربی وجود ندارد.

## ۶- نتیجه گیری

با توجه به گستردگی پارامترها در طراحی EFP، استفاده از روش عددی بسیار سودمند است. در روش عددی یکی از پارامترهای مهم که نقش مهمی بر نتایج بدست آمده دارد، مدل ماده است. مدل ماده تاثیر بسزایی بر شکل نهایی و پارامترهای خروجی پرتابه دارد. با توجه به این موضوع در این مقاله سه نمونه از مدل‌های مهم مواد برای نرخ کرنش‌های زیاد در شبیه سازی EFP استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که هر سه روش دارای دقت بسیار خوبی بوده و می‌توانند در نرخ کرنش‌های بالا و تشکیل پرتابه‌های انفجاری مورد استفاده قرار گیرند. خلاصه ای از نتایج بدست

Jones O.E., "Metal Response under Explosive Loading", Behavior and Utilization of Explosive in Engineering Design, 12th Annual Symposium, New Mexico, 1993.

Davison L. and Graham R.A.; "Shock Compression of Solids," PHYSICS REPORTS. Vol. 55, No.4, 1979.

Wilkins, M.L.; "Numerical Simulation of Dynamic Phenomena", Springer, New York, 1998.

Steinberg D.J. and Al.; "A Constitutive Model For Metals Applicable At High Strain Rate"; J. Appl. Phys.; Vol.51;No.3; Pp. 1498-1504; 1981.

Johnson, G. And Cook, W. H., "Constitutive Model And Data For Metals Subjected To Large Strains", High Strain Rates And High Temperatures; Proceedings Of The Seventh International Symposium On Ballistics; Pp. 541-P547; 1983.

Zerilli, F.J and Armstrong, R.W; "Dislocation-Mechanics-Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations", J.Appl.Phys, Vol.61; No.5; 1987.

Carleone, J., "Tactical Missile Warheads", Volume 155, American Institute of Aeronautics and Astronautics;1993.

Hallquist, J. O.; "Ls- Dyna 960 Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation.

Hydrosoft web page; <http://www.hydrosoft.com>

Murphy, M.J.; Weimann, K.; Doeringsfeld, K.; "The Effect of Explosive Detonation Wave Shaping on EFP Shape and Performance", 13th International Symposium on Ballistics; Stockholm; 1992.

Murphy, M.J and Lassila, D.H; "Modeling and Evaluation of HE Driven Shock Effects In Copper With The MTS Model", Lawrence Livermore Laboratory Repor; UCRL-JC-125679; 1997.

Murph, M.J ; Weinmann, K; Doeringsfeld, K; and Speck, J; "The Effect Of Explosive Detonation Wave Shaping On EFP Shape And Performance", Lawrence Livermore Laboratory Report; UCRL-JC-107088; 1997.

## ۸- زیر نویس ها

<sup>۱</sup>Explosively Formed Projectile

<sup>۲</sup> Work Hardening

<sup>۳</sup> Bauschinger Effect

<sup>۴</sup> Elastic-Perfectly Plastic

<sup>۵</sup> Strain Hardening

<sup>۶</sup> Gary

<sup>۷</sup> Face-Centered-Cubic

<sup>۸</sup> Body-Centered-Cubic

<sup>۹</sup> Slug

<sup>۱۰</sup> Liner

<sup>۱۱</sup> Lawrence Livermore National Laboratory

آمده در این مقاله عبارتند از:

- [۲] ۱- مدل زیریلی - آرمسترنگ در مقایسه با دو مدل دیگر شکل دقیق‌تری را برای پرتابه نشان می‌دهد.
- [۳] ۲- سرعت و طول پرتابه بدست آمده از مدل زیریلی - آرمسترنگ بیشتر از مقدار تجربی است.
- [۴] ۳- مدل‌های اشتنبرگ و جانسون - کوک نتایج مشابهی دارند.
- [۵] ۴- سرعت بدست آمده از مدل‌های اشتنبرگ و جانسون - کوک، کمتر از مقدار تجربی است.
- [۶] ۵- طول بدست آمده از مدل‌های اشتنبرگ و جانسون - کوک دارای دقت بسیار خوبی در مقایسه با نتایج تجربی است.
- [۷] ۶- با توجه به نتایج مرجع [۷] می‌توان با تغییر پارامترهای مدل زیریلی - آرمسترنگ، نتایج بسیار دقیقی را در مقایسه با نتایج تجربی بدست آورد.

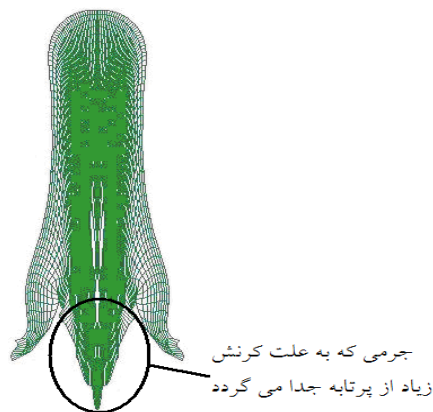
[۷]

[۸]

[۹]

[۱۰]

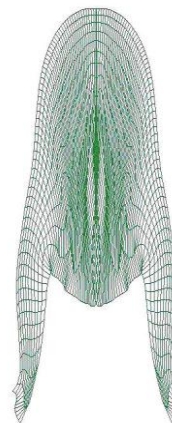
[۱۱]



شکل (۴) - شکل بدست آمده از مدل زیریلی - آرمسترنگ

[۱۲]

[۱۳]



شکل (۵) - شکل بدست آمده از مدل‌های جانسون - کوک و اشتنبرگ

## ۷- مراجع

- [۱] انبارلویی، حمیدرضا؛ مظاهری، کیومرث؛ "مقایسه مدل‌های اشتنبرگ و جانسون - کوک در بررسی رفتار فلزات تحت تاثیر امواج ضربه ای"، فنی و مهندسی مدرس، ویژه نامه مهندسی مکانیک، شماره ۱۷، ص ۱۱-۱۱