بررسي تاثير مدل ماده آستر (*Liner*) در شبيه‌سازي پرتابه‌هاي شكل‌يافته انفجاري (*EFP*)

پژمان کاظم پور[i]; کیومرث مظاهری[ii]

چكيده

هدف اين مقاله بررسي تاثير مدل ماده فلزي آستر بر شكل نهايي و نتايج بدست آمده از شبيه‌سازي پرتابه شكل‌يافته انفجاري يا EFP مي باشد. مدل‌هاي ماده در نظر گرفته شده شامل سه مدل جانسون – كوك ، اشتنبرگ و زريلي- آرمسترونگ است. نتايج حاصل نشان مي‌دهد كه هر سه مدل يادشده داراي دقت بسيار خوبي در شبيه سازي EFP مي‌باشند. از ميان اين مدل‌ها، نتايج مدل زريلي- آرمسترونگ داراي دقت بيشتري در تعيين شكل پرتابه و مدل هاي اشتنبرگ و جانسون- كوك نيز طول پرتابه را با دقت بيشتري نشان مي‌دهند. سرعت بدست آمده از هر سه مدل اختلاف اندكي با مقادير تجربي دارد.

كلمات كليدي

پرتابه شكل يافته انفجاري EFP، مدل ماده، Ls Dyna

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

P.Kazempoor[1]; K.Mazaheri[2]

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

[i] دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، Email: P_kazempoor@modares.ac.ir
[ii] دانشیارمهندسی مکانیک، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، Email: Kiumars@modares.ac.ir، (نویسنده مخاطب)

۱- مقدمه

از مهمترين فرايندهاي مرتبط با رفتار مواد, بارگذاري ديناميكي تحت نيروهاي فوق‌العاده زياد است كه از آن‌جمله مي‌توان به برخورد يک پرتابه با سرعت بالا به هدف اشاره كرد. در اين بارگذاري‌ها تنش‌هاي فوق العاده زيادي در ماده ايجاد مي‌شود كه اين تنش‌ها باعث ايجاد تغيير شكل زياد يا شكست در ماده مي‌گردد. اين فرايند در بسياري از پديده‌هاي صنعتي به فراواني مشاهده مي‌گردد كه از آن‌جمله مي‌توان به فرايند جوشكاري و شكل‌دهي انفجاري و مكانيزم شكل گيري پرتابه‌هايي مانند EFP[1] و جت حاصل از خرج‌گود اشاره نمود.

تحقيقات مربوط به فشرده شدن فلزات توسط امواج ضربه‌اي داراي سابقه طولاني مي‌باشد، به طوري كه مي‌توان اولين تحقيقات را به جنگ جهاني دوم ارجاع داد. از اولين مطالعات انجام شده در اين زمينه، مي‌توان به كارهاي رايس، مك كوئين و والش اشاره نمود[۱]. بررسي كامل‌تري هم توسط جونز انجام شده است كه در اين تحقيق با استفاده از معادلات اساسي (معادلات بقاء), حركت موج ضربه اي در فلزات تشريح شده است[۲].داويسون وگراهام نيز براي بسياري از مواد پارامترها و روابط ارائه شده بويژه در مورد معادله حالت فلزات را بيان كرده‌اند[۳].

علاوه بر كارهاي يادشده كه بيشتر به بررسي حركت موج شاک و رفتار فلز در مقابل‌آن پرداخته‌اند, افراد ديگري نيز پديده كارسختي[2] را بررسي كرده‌اند. روابط مختلفي توسط محققين براي در نظرگرفتن اثرات كارسختي ارائه شده است. از مهمترين بررسي‌ها در مورد اثر كار سختي روي مواد مي‌توان به كارهاي ويلكينز در مرجع [۴] اشاره نمود كه براي مس و آلومينيوم مدلهاي كارسختي را مورد بررسي قرار دادند. گريدي و همكاران نيز به بررسي خواص ريز ساختارها و خواص مكانيكي آلومينيوم كه تحت يک نرخ بالاي تغييرشكل قرار مي‌گيرد، پرداختند و كار سختي ايجاد شده را ديدند[۱]. بوچر و كنون با چند سختي اوليه فولاد ۴۳۴۰ و بارگذاري شبه استاتيكي، منحني‌هاي تنش-كرنش را بدست آوردند و سپس با آزمايش برخورد صفحات فولادي گفته شده در سرعت بالا، تاثير كارسختي را روي منحني ديناميكي تنش-كرنش بدست آوردند [۱]. در تحقيقاتي كه توسط لاچت و همكاران صورت گرفته است، اثر كارسختي روي آلياژ آهن با نيتروژن كه در پرتابه هاي بالستيک كاربرد دارد, بررسي شد [۱].

اشتينبرگ و همكاران با مدل كردن رفتار مواد و بررسي اثرات دما وفشار روي تنش تسليم ماده و مدول برشي آن، اثرات كار سختي و همچنين اثر باوشينگر[3] را بررسي كرده و مدل‌هايي را براي آنها ارائه نموده‌اند[۵]. جانسون و كوک نيز با تهيه يک مدل مناسب براي شبيه‌سازي‌هاي كامپيوتري به بيان اثرات كارسختي، فشار و دما برروي تنش تسليم پرداختند[۶]. مدل ديگري نيز توسط زريلي- آرمسترونگ براي استفاده در كدهاي كامپيوتري ارائه گرديده كه امروزه از معتبرترين مدلهاي توسعه يافته براي شبيه سازي مسائل با نرخ كرنش بالا است[۷].

مدل‌هاي ارائه شده براي مواد در نرخ كرنش‌هاي بالا بايد داراي چند خاصيت ويژه باشند كه اين خاصيت ها عبارتند از[۸]:

- مدل ارائه شده بايد در دامنه وسيعي از كرنش, نرخ كرنش, دما و تنش قابل استفاده باشد.
- مدل بايد بتواند تنش را برحسب توابعي از كرنش, نرخ كرنش، دما، فشار و ساير كميت‌هاي ميكروسكوپي مورد نياز بيان كند.
- مدل بايد ساده بوده و بتوان آن را به راحتي دركدهاي كامپيوتري مورد استفاده قرار داد.
- مدل نبايد باعث افزايش زمان حل و حافظه مورد نياز كامپيوتر گردد.
- مدل بايد براي مواد مختلف قابل استفاده باشد.
- ضرايب مدل بايد به راحتي با استفاده از تعدادي آزمايش بدست آيد.

در ميان مدلهايي كه تاكنون ارائه گرديده، مدلهاي ارائه شده توسط اشتنبرگ, جانسون -كوک و زريلي- آرمسترونگ داراي خواص گفته شده مي باشند. بنابراين، اين مدل‌ها به صورت گسترده در كدهاي كامپيوتري مورد استفاده قرار مي‌گيرند. با توجه به اين موضوع در اين مقاله اين سه مدل براي بررسي دقت جواب‌هاي بدست آمده در شبيه سازي عددي EFP مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از مهمترين مسائل در شبيه‌سازي عددي EFP انتخاب مدل ماده بكار رفته براي آستر مي باشد، انتخاب صحيح مدل ماده مي‌تواند سهم عمده‌اي در بهبود نتايج داشته باشد.

۲- كارسختي و نرم شدن حرارتي

فرايندهاي ديناميكي با تغيير شكل زياد، در فشارهاي بسيار بالاتر از تنش تسليم مواد، انجام مي‌پذيرند. در شبيه‌سازي‌هاي اوليه براي فلزات رفتاري سيال‌گونه در نظرگرفته مي‌شد و از مولفه هاي تنش‌برشي چشم پوشی مي‌گرديد. كارهاي تجربي

ساليان بعد نشان داد که وجود يک مولفه تنش برشي هرچندکوچک اثر زيادي در ميرا شدن يک موج فشاري دارد و ديگر اينکه مقاومت برشي و تنش تسليم مواد با افزايش فشار افزايش مي‌يابد. اين حقايق باعث شد به‌جاي استفاده از مدل‌هاي هيدروديناميکي از مدل‌هاي الاستيک-کاملاً پلاستيک [٤] در بررسي رفتار مواد استفاده شود. در اينگونه مدل‌ها ضرايب مکانيکي مواد نظير تنش تسليم و مدول برشي ثابت درنظرگرفته مي‌شد و از تغييرات آنها بر اثر عوامل مختلف چشم پوشی مي‌شد. کارهاي انجام گرفته توسط ويلکينز، اشتينبرگ، جانسون و کوک همگي درجهت بدست آوردن معادلاتي براي بيان تغييرات ضرايب مکانيکي بر اثر پارامترهاي موثر در آن بود. اضافه کردن اين تاثيرات به مدل‌هاي الاستيک- کاملاً پلاستيک توسط معادلات که به معادلات متشکله معروف مي‌باشند، نقش بسزايي در يکسان سازی نتايج تجربي و نتايج حاصل از شبيه سازي‌هاي کامپيوتري دارند[۵].

يکي از پديده هائي که در نتايج تجربي ديده شده است، تغيير تنش تسليم در اثر کرنش پلاستيک است. بنابراين يکي از روشهاي اصلاح نتايج، افزايش مقدار تنش تسليم بر اثر افزايش تغيير شکل پلاستيک است. اين پديده کار سختي و يا کرنش سختي[5] ناميده شده است. همچنين دیده شده است که اگر دماي ماده نيز بالا باشد، تنش تسليم کاهش مي‌يابد که به اين اثر، نرم شدن حرارتي مي‌گويند. علت بوجود آمدن کارسختي را مي‌توان تغيير در آرايش کريستالي ملکولهاي ماده دانست. اين مطلب بطور خلاصه توسط جونز[۲] شرح داده شده است. بنابراين خواص ساختمان کريستالي (ريز ساختارها) روي خواص مکانيکي مواد تاثير مي‌گذارد و لزوم مطالعه روي ريزساختارهاي مواد آشکار مي‌گردد. از مشاهدات تجربي دريافت شده است که تنش تسليم و مدول برشي فلزات با افزايش فشار ماکزيمم در پالس شاک، افزايش و با کاهش آن کاهش مي‌يابند. مدل‌هايي که براي اين کار استفاده مي‌شوند مدلهاي کارسختي ناميده مي‌شوند.

در عمل مقادير تنش تسليم و مدول برشي علاوه بر اثر کرنش پلاستيک بر اثر عوامل ديگري نيز تغيير مي‌کنند. يکي از مهمترين اين عوامل تغييرات درجه حرارت مي‌باشد. بطور کلي استحکام تسليم با افزايش نرخ کرنش، افزايش و با افزايش دما کاهش مي‌يابد.

با توجه به نتايج و اثرات فيزيکي، مدلهاي کارسختي و نيز نرم شدن گرمائي مختلفي ارائه شده است. در اين مدلها به اثرات کرنش پلاستيک و نرخ آن، تغييرات فشار و دما برروي تنش تسليم و مدول برشي پرداخته شده است. از اين مدلها مي‌توان به مدلي که توسط اشتينبرگ و همکاران، مدل جانسون و کوک و پس از آن زريلي- آرمسترونگ اشاره کرد که در ادامه توضيح داده مي‌شود.

۲-۱- مدل اشتنبرگ

اشتنبرگ، کوچران و گيرن در سال ۱۹۸۰ رابطه ۱ را براي اصلاح مدل الاستيک- کاملا پلاستيک ارائه نمودند که در آن مدول برشي G و تنش تسليم Y برحسب کرنش پلاستيک، فشار P و انرژي (دما T) بصورت ۱ و ۲ تعريف شده بود[۵]:

$$G = G_0 [1+\left(\frac{G'_P}{G_0}\right)\frac{P}{\eta^{1/3}}-\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)(T-300)] \quad (۱)$$

$$Y = Y_0 [1+\beta(\varepsilon+\varepsilon_i)]^n [1+\left(\frac{Y'_P}{Y_0}\right)\frac{P}{\eta^{1/3}} -\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)(T-300)] \quad (۲)$$

در اين روابط، η بيانگر فشردگي فلز بوده و به صورت مقدار حجم مخصوص اوليه به حجم مخصوص فعلي تعريف مي‌شود. n و β پارامترهاي بيانگر کارسختي و $\left(\frac{G'_P}{G_0}\right), \left(\frac{G'_Y}{G_0}\right), \left(\frac{Y'_P}{Y_0}\right)$ ثابتهاي مربوط به فلز و ε_i کرنش پلاستيک معادل اوليه مي‌باشد که در حالت عادي برابر صفر است. بنابراين در صورتي که روي فلز عمليات کار سختي انجام شده باشد و مقداري کرنش پسماند در فلز باقي مانده باشد، ترم ε_i اثر آن را در کارسختي جديد وارد مي‌کند. انديس صفر بيانگر شرايط مرجع P=0, ε =0) و T=۳۰۰K) است. انديس هاي P و T نيز نشان دهنده ارتباط پارامتر با فشار و دما است[۵].

از آنجا که بسياري از کدهاي هيدروديناميکي از قبيل HEMP [۴] از ترم انرژي E به جاي دما استفاده مي‌کنند، بنابراين T به صورت اختلاف بين انرژي کل و انرژي در صفر کلوين $E_c(\eta)$ تقسيم بر حرارت مخصوص جامدC به صورت $T=(E-E_C)/C$ بيان مي‌گردد. کميت $E_c(\eta)$ به صورت رابطه ۳ تعريف مي‌شود[۵]:

$$E_c(\eta) = \int_0^{\eta} P\frac{d\eta}{\eta^2} - 300C\, exp\left[a\left(1-\frac{1}{\eta}\right)\right]\eta^{\gamma_0 - a} \quad (۳)$$

و برابر است با انرژي در راستاي خط آدياباتيک در ۳۰۰K منهاي انرژي مربوط به هر دما بر روي خط آدياباتيک. در رابطه (۳)، $P(\eta)$, فشار در راستاي آدياباتيک بوده و از معادله حالت تعيين مي‌شود. پارامتر γ نيز گاماي گرونايزن است که در راستاي آدياباتيک به صورت $\gamma = -\partial ln T / \partial ln v$ تعريف

مي‌شود. مقدار C نيز حرارت مخصوص فلز بوده و به صـورت رابطه ۴ بيان مي‌شود[۵]:

$$C = \frac{3R\rho_0}{A} \qquad (۴)$$

که در ايـن رابطـه R، ثابـت جهـاني گازهـا، A وزن اتمـي و ρ_0 چگالي اوليه فلز است.

با توجه به رابطه (۳) در ۳۰۰K انرژي برابر صفر و η=۱ مي‌گردد. بنابراين در η=۱ مي‌توان رابطه Ec = -۳۰۰ C را نوشت.

در فشارهاي پايين P ≤ ۲ GPa، نتايج تجربي نشان مي‌دهد که G به صورت خطي با P تغيير مي‌کند. اما در فشارهاي بسيار بالا تئوري توماس- فرمي بيان مي‌کند که P متناسب با $\eta^{۵/۳}$ و G متناسب با $\eta^{۴/۳}$ است. بنابراين در معادله (۱) دیده می‌شود که هنگامي که P → ۱ و η → ۱ آنگاه G به صورت $G = G_0 + G'_p P$ بيان مي‌شود و در $\eta \to \infty$، G با $\eta^{۴/۳}$ تغيير مي‌کند[۵].

آزمايشها نشان مي‌دهند که مدول برشي تقريباً بطور خطي با دما تغيير مي‌کند و اين روند تا نزديکي نقطه ذوب ادامه دارد. اشتينبرگ بيان داشت که باتوجه به اين موضوع که تاثيرات ترم دما در رابطه (۱)، ۱۰ درصد ترم فشاري است، فرض وابستگي خطي مدول برشي به دما براي تمام فلزات خطاي چنداني ايجاد نمي‌کند و در نتيجه رابطه(۵) براي بيان وابستگي تغييرات مدول برشي و تنش تسليم براثر تغييرات فشار درست است. لذا چگونگي تغييرات تنش تسليم بر اثر تغييرات فشار همانند اين تغييرات در مدول برشي در نظر گرفته مي‌شود[۵]:

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

بعضي از مواد نظير مس به عمليات‌هاي مکانيکي که در مراحل توليد برروي آنها صورت مي‌گيرد حساس مي‌باشند. بعنوان مثال با عمليات حرارتي روي بعضي فلزات مي‌توان تنش تسليم آن ها را به صفر رساند، [۵]، [۸]. در اين مدل فرض مي‌شود که يک ماده (با هر سابقه توليد) از يک رفتار براي کارسختي تبعيت مي‌کند و اثر عمليات قبلي روي آن تنها باعث ايجاد يک تنش محبوس در آن يا يک تغيير شکل پلاستيک اوليه معادل در آن مي‌گردد.

در مدل اشتنبرگ نياز به وجود سازوکاري است تا در هنگام ذوب شدن ماده از مقاومت مکانيکي مواد چشم پوشي شود. براي اين منظور از معادله حالت گري[۶] استفاده شده که اصلاح شده قانون ليندرمن است. در اين مدل در صورتي‌که انرژي داخلي ماده به يک مقدار حدي از انرژي (انرژي ذوب) برسد، ماده ذوب مي‌گردد. مقدار انرژي ذوب طبق اين مدل از رابطه (۴) محاسبه مي‌گردد[۵].

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

در رابطه ۶، Tm0 دماي ذوب در η=۱ است.

۲-۲- مدل جانسون – کوك [۶]

رابطه ارائه شده توسط جانسون و کوک براي بيان اثرات کار پلاستيک، نرخ کرنش پلاستيک و دما برروي تنش تسليم به صورت رابطه ۷ است، [۶]، [۸] :

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

که در آن A,B,C,n,m ثابتهاي ماده و ε کرنش پلاستيک معادل، $\dot{\varepsilon}^*$ پارامتر بي‌بعد شده نرخ کرنش پلاستيک است کـه بـصورت $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/1.0s^{-1}$ تعريف مي شود. T^{*m} پارامتر بي بعد شده دمـا است که از رابطه ۸ محاسبه مي‌گردد[۶ و ۸].

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

در اين مدل اثرات نرخ کرنش پلاستيک نسبت به زمـان بـرروي تنش تسليم در نظر گرفته شده است ولي در مـدل اشـتينبرگ از آن چشم پوشی شده است. دليـل ايـن امـر در تفـاوت محـدوده استفاده از اين مدل‌هـا اسـت. در آزمـايش‌هـاي صـورت گرفتـه توسط جانسون و کوک براي محاسبه ضـرايب مـورد اسـتفاده در اين مدل بيشترين نرخ کـرنش پلاسـتيک برابـر $۴۰۰s^{-1}$ بـوده اسـت ولـي در آزمايـشات اشـتينبرگ بـه دليـل توجـه آنهـا بـه بارگذاري‌هاي انفجاري و برخورد با سرعتهاي بسيار بـالا نـرخ کرنش پلاستيک بيشتر از $۱۰^۵\ s^{-1}$ بـوده اسـت. کـرنش پلاسـتيک معادل از رابطه ۹ بدست مي‌آيد[۶]:

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

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

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

در رابطه (۱۰)، $\dot{e}_r, \dot{e}_\theta, \dot{e}_z$ نرخ هاي کـرنش پلاسـتيک انحرافـي و $\dot{\gamma}_{rz}$ نرخ کرنش برش پلاستيک است.

۳-۲- مدل زريلي- آرمسترونگ [۷]

در مدل ارائه شده توسط زريلي- آمسترونگ، تاثير کار پلاستيک، نرخ کرنش پلاستيک و دما برروي تنش تسليم به صورت رابطه ۱۱ بيان مي‌شود[۷]:

۱- براي فلزات FCC[۷] :

$$\sigma = C_1 + \left\{ C_2 (\varepsilon^p)^{\frac{1}{2}} \left[e^{(-C_3 T + C_4 T . Ln(\dot{\varepsilon}^*)) T} \right] + C_5 \right\} \left(\frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right) \qquad (۱۱)$$

۲- براي فلزات BCC[۸] :

$$\sigma = C_1 + C_2 e^{(-C_3 T + C_4 T . Ln(\dot{\varepsilon}^*)) T} + \left[C_5 (\varepsilon^p)^n + C_6 \right] \left(\frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right) \qquad (۱۲)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲، C_1 تـا C_6 ثابـت مربـوط بـه هـر مـاده، ε^p کرنش پلاستيک موثر و $\dot{\varepsilon}^*$ نيز نرخ کرنش پلاستيک موثر اسـت که به صورت $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ تعريـف مـي‌گـردد. $\dot{\varepsilon}_0$ در ايـن رابطـه برابـر ۱، $1e^{-3}$ و $1e^{-6}$ بـراي واحـد زمـاني ثانيـه،ميلـي ثانيـه و ميکروثانيه است. کميت $\left(\frac{\mu(T)}{\mu(293)} \right)$ در روابـط قبـل بـه صـورت رابطه ۱۳ تعريف مي‌شود:

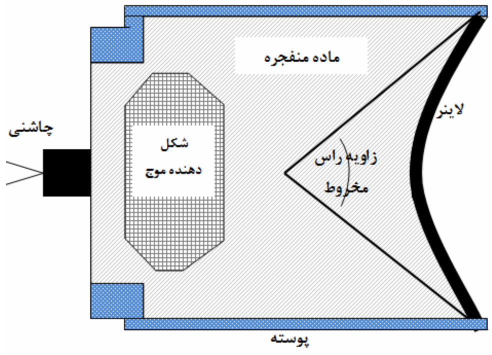
$$\frac{\mu(T)}{\mu(293)} = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 \qquad (۱۳)$$

که ضرايب B_1 تا B_3 ثابت مربوط به هر ماده است.

۳- پرتابه شکل يافته انفجاري (EFP)

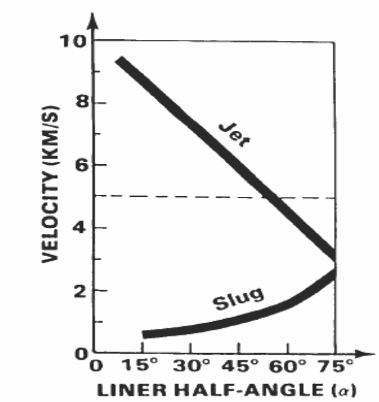
استفاده از انرژي مواد منفجره براي تغيير شکل صفحات فلزي به پرتابه‌هايي با سرعت بالا، يکي از مهم‌ترين راههاي استفاده از انرژي مواد منفجره است. جت حاصل از خرج گود و EFP دو نمونه از اين پرتابه ها مي‌باشند. در EFP هدف طراح ايجاد يك گلوله فشرده و داراي سرعت بالا است. به عبارت ديگر بر خلاف جت حاصل از خرج‌گود که قسمت بسيار کمي از آستر فلزي به جت تبديل مي‌شود. در EFP جت و دنباله[۹] به همراه يکديگر حرکت مي‌کنند[۸]. نمونه اي از يك سرجنگي EFP در شکل (۱) نشان داده شده است, همانطور که ديده مي شود هر EFP متشکل از پوسته، آستر[۱۰]، شکل دهنده موج، ماده منفجره و تجهيزات مربوط به آغازش انفجار است. البته شکل دهنده موج در تمامي نمونه ها لازم نمي‌باشد، اما مي‌تواند کيفيت پرتابه خروجي را افزايش دهد.

با آغاز انفجار و رسيدن موج ضربه‌اي به آستر، آستر در اثر فشار بالا شتاب گرفته و تغيير شکل مي‌دهد. شکل پرتابه خروجي و سرعت آن وابسته به طراحي بکار رفته است. بطوري که مي‌توان پرتابه‌اي به صورت گوي فشرده, ميله‌اي بلند و ميله‌اي با دنباله قيفي شکل بدست آورد. سرعت اين پرتابه‌ها نزديک به ۲۰۰۰ m/s است [۸].



شکل (۱)- نمونه اي از سرجنگي EFP

براي بررسي عملکرد و شکل گيري EFP مي‌توان سازوکار تشکيل جت در خرج گود را مورد بررسي قرار داد. خرج گود، يک استوانه از ماده منفجره است که در داخل آن حفره اي مخروطي شکل فلزي قرار داده شده است. بعد از انفجار آستر به جت تبديل گرديده که نوک اين جت داراي سرعتي نزديک به ۸ الي ۱۰ کيلومتر بر ثانيه است. دنباله نيز داراي سرعتي نزديک به يک کيلومتر بر ثانيه است. جت و دنباله در طول فرايند از يکديگر جدا مي‌گردند. در حالت کلي ۱۵% از جرم آستر به جت و باقيمانده دنباله را تشکيل مي‌دهد. با افزايش زاويه راس مخروط در خرج گود، فروپاشي داخلي به شدت کاهش يافته و اختلاف سرعت بين جت و دنباله کمتر مي‌گردد. در حقيقت براي زاويه راس نزديک به ۱۵۰ درجه، آستر و جت داراي سرعت يکساني گرديده و در اين زاويه EFP تشکيل مي‌گردد(شکل ۳).



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

مزاياي پرتابه EFP در مقايسه با خرج گود عبارتند از:

۱- در فاصله زياد، حتي تا هزار برابر کاليبر گسيخته نمي‌شود.

۲- داراي وزن و فشردگي کافي براي روبـرو شـدن بـا اهـداف مستحکم مي‌باشند.

براي طراحي EFP روابط تحليلي خاصي وجود ندارد.

بنابراين در بررسي اين نوع پرتابه ها استفاده از روش عددي در كنار كارهاي تجربي ضروري است[۸]. با توجه به گستردگي پارامترها در طراحي يك EFP كه مي‌تواند شامل جنس آستر، شكل آستر، ضخامت پوسته، نوع ماده منفجره باشد، استفاده از روش تجربي بسيار وقت‌گير و نيازمند انجام آزمايش هاي فراوان و پر هزينه مي‌باشد. استفاده از روشهاي عددي نيز نيازمند بكارگيري كدهاي عددي خاص است. از آنجا كه فرايند تشكيل جت باعث انبساط و كشيدگي المان‌ها تا چندين برابر مقدار اوليه مي‌گردد، لذا كدهاي لاگرانژي نمي‌توانند فرآيند شكل‌گيري و نفوذ EFP و خرج گود را بدرستي مدل‌سازي كنند و استفاده از روش ALE ضروري مي باشد. از ديگر موارد مهم در شبيه‌سازي عددي انتخاب مدل ماده مناسب براي فلز آستر است. انتخاب مدل‌هاي بدون در نظر گرفتن كارسختي، [۵]، [۶] و [۷]، و نرخ كرنش بالا، نمي‌تواند رفتار و شكل‌گيري لاينر را به درستي مدل كند. امروزه مدلهاي مختلفي براي مدل‌سازي ماده آستر پيشنهاد گرديده كه در قسمت‌هاي قبل توضيح داده شد. با توجه به اين موضوع در ادامه با استفاده از اين مدل‌ها نمونه‌اي از يک EFP شبيه سازي گرديده و نتايج حاصل با نتايج تجربي مقايسه مي گردد تا بتوان مدل ماده مناسب را براي اين نوع شبيه سازي‌ها معرفي نمود.

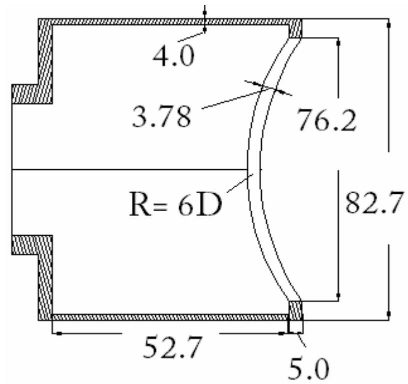
۴- روش المان محدود

همانطور كه اشاره گرديد, در اين مقاله سه مدل ماده ارائه شده توسط اشتنبرگ، جانسون- كوک و زريلي- آرمسترونگ در شبيه سازي EFP بررسي مي‌گردند. از آنجا كه اين مدل‌ها در نرم افزار LS-DYNA [۹]موجود مي‌باشند، لذا از اين نرم افزار براي شبيه‌سازي استفاده گرديده است. از طرف ديگر، امكان استفاده از گزينه هاي ALE نيز در اين نرم‌افزار امكان پذير است.

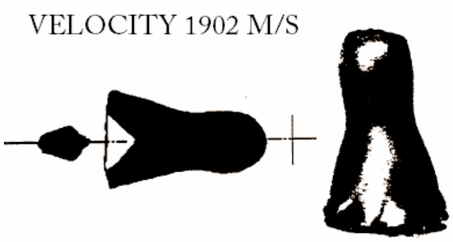
به منظور مقايسه نتايج بدست آمده از شبيه‌سازي، با نتايج تجربي، نمونه استانداردي كه توسط كدهاي مختلفي شبيه‌سازي گرديده، انتخاب گرديد: [۱۰] ، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. اين مدل اولين بار در آزمايشگاه ملي LLNL[11] توسط مرفي و وينمن براي ارزيابي كدهاي مختلف از جمله DYNA2D و DYNA3D مورد استفاده قرار گرفته است[۱۲]. در شكل (۳- الف)، نمونه مورد بررسي نشان داده شده است. جنس ماده منفجره از CompB و جنس لاينر از آهن خالص است. پوسته نيز از فولاد است. در شكل (۳- ب) تصوير پرتابه خروجي كه با استفاده از اشعه x بدست آمده را مي توان ديد. نتايج تجربي نشان مي‌دهد كه سرعت نهايي پرتابه براي اين EFP برابر ۱۹۰۲m/s و طول آن برابر ۵۲/۷ mm است.

به منظور شبيه سازي نمونه يادشده، از يك مدل دوبعدي با تقارن محوري ALE استفاده گرديد. استفاده از گزينه ALE باعث جلوگيري از بهم ريختن المانها در نرخ كرنش‌هاي بالا مي‌گردد. مدل سوزش ماده منفجره، CJ BURN و از معادله حالت JWL [۱۴] استفاده شده است. ضرايب مربوط به پارامترهاي CJ و معادله حالت ماده منفجره CompB در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

در جدول‌هاي (۳) تا (۵) نيز پارامترهاي بكار رفته در سه مدل ماده مورد بررسي نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شكل (۳) الف- نمونه استاندارد EFP ب- شكل پرتابه خروجي با استفاده از اشعه x

جدول ۱- مشخصات ماده منفجره Comp B [۱۴]

نوع ماده	چگالي (Kg/m³)	سرعت انفجار (m/s)	انرژي اوليه(GPa)	فشار CJ (GPa)
TNT	۱۷۱۷	۷۹۸۰	۸/۵	۲۹/۵

جدول ۲- ضرايب معادله حالت JWL براي ماده منفجره CompB [۱۴]

ماده منفجره	A (GPa)	B (GPa)	R1	R2	ω
TNT	۵۲۴/۲	۷/۶۷۸	۴/۲	۱/۱	۰/۳۴

جدول۳- ضرايب 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	$\left(\frac{G'_P}{G_0}\right)$	$\left(\frac{G'_T}{G_0}\right)$	β
	۰/۳۵	۲۶/۰	۰/۴۵	۴۳

جدول ۴- ضرايب مدل ماده جانسون-کوک[۶]

نام ماده	ρ (kg/m3)	Tm0 (K)	A (Mpa)	B (Mpa)
آهن خالص	۷۸۹۰	۱۸۱۱	۱۷۵	۳۸۰
	C	n	m	
	۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۵۵	

جدول ۵- ضرايب مدل ماده زريلي-آرمسترونگ [۷]

نام ماده	ρ (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 $(MPa\ mm^{0.5})$
	۰/۰۰۰۴۱۵	۲۶۶/۰	۰/۲۸۹	۰/۲۲

از آنجا که هر سه مدل ماده بکار رفته براي لاينر، نياز به معادله حالت دارنـد. لـذا بـراي هـر سـه مـدل از معادلـه حالـت ماي- گرونايزن استفاده شده است که ضرايب آن در جدول (۶) قابل مشاهده است. [۲].

جدول۶- ضرايب معادله حالت ماي-گونايزن [۸]

نام ماده	C_0 m/s	S	γ_0
Armco Iron	۳۵۷۰	۱/۹۲	۱/۸

بـراي پوسـته فـولادي نيـز از مـدل مـاده Plastic-Kinematic استفاده گرديد که در آن با استفاده از پارامتر کـرنش شکـست، پارگي پوسته و حذف المانها کنترل مي‌گردد.

۵- نتايج

با توجه به توضيحات قسمت قبل، پرتابه با استفاده از مدلهاي توضيح داده شده شبيه سازي گرديد. البته گفتني است که قبل از شبيه‌سازي مسئله وابستگي جوابها به شبکه محاسباتي بررسي‌گرديده و شبکه مناسب بدست آمد. در شکل (۴) و (۵) نتايج بدست آمده از شبيه‌سازي عددي با استفاده از مدل ماده جانسون- کوك و زريلي- آرمسترونگ نشان داده شده است. شايان گفتن است که شکل پرتابه خروجي از روش اشتنبرگ تفاوت ويژه‌اي با نتيجه بدست آمده از مدل جانسون- کوك ندارد و فقط اختلاف جزيي در طول پرتابه و سرعت پاياني آن وجود دارد. همانطور که ديده مي شود در مقايسه با نتايج تجربي، پروفيل بدست آمده از روش زريلي- آرمسترنگ برابری بهتري نسبت به نتايج تجربي دارد. از طرف ديگر همانطور که در شکل (۴- ب) ديده مي شود، مقداري از جرم پرتابه در طول فرايند از آن جدا مي‌گردد که اين مقدار در روش زريلي- آرمسترنگ قابل تشخيص است.

نتايج بدست آمده براي طول پرتابه نشان مي‌دهد که طول بدست آمده از روش جانسون- کوك و اشتنبرگ برابر ۵۲ ميليمتر است که برابری بسيار خوبي با نتايج تجربي دارد. طول بدست آمده از روش زريلي- آرمسترنگ برابر ۶۶ ميليمتر است که اختلاف قابل توجهي با نتايج تجربي دارد.

سرعت بدست آمده از روش زريلي- آرمسترنگ در مقايسه با نتايج دو مدل ديگر در طول فرايند شکل گيري پرتابه بيشتر است. به طوري که سرعت نهايي پرتابه از اين مدل برابر۱۹۷۰ متر بر ثانيه است که در مقايسه با نتايج تجربي اندکي بيشتر است. سرعت بدست آمده از روش اشتنبرگ و جانسون- کوك نزديک به ۱۸۶۰ متر بر ثانيه است که در مقايسه با نتايج تجربي کمتر است. گفتنی است که سرعت بدست آمده از کد DYNA2D برابر ۱۹۴۶ متر بر ثانيه است که به نتيجه مدل زريلي- آرمسترنگ نزديك‌تر است [۱۲].

در مورد ضخامت قسمت ابتدايي و انتهايي پرتابه، نتيجه مشخصي در مراجع موجود بدست نيامد، لذا امکان مقايسه اين پارمتر با نتايج تجربي وجود ندارد.

۶- نتيجه گيري

با توجه به گستردگي پارامترها در طراحي EFP، استفاده از روش عددي بسيار سودمند است. در روش عددي يکي از پارامترهاي مهم که نقش مهمي بر نتايج بدست آمده دارد، مدل ماده است. مدل ماده تاثير بسزايي بر شکل نهايي و پارامترهاي خروجي پرتابه دارد. با توجه به اين موضوع در اين مقاله سه نمونه از مدل‌هاي مهم مواد براي نرخ کرنش‌هاي زياد در شبيه سازي EFP استاندارد مورد بررسي قرار گرفت. نتايج بدست آمده نشان داد که هر سه روش داراي دقت بسيار خوبي بوده و مي توانند در نرخ کرنش‌هاي بالا و تشکيل پرتابه‌هاي انفجاري مورد استفاده قرار گيرند. خلاصه اي از نتايج بدست

آمده در اين مقاله عبارتند از:

۱- مدل زريلي- آرمسترنگ در مقايسه با دو مدل ديگر شكل دقيق‌تري را براي پرتابه نشان مي‌دهد.

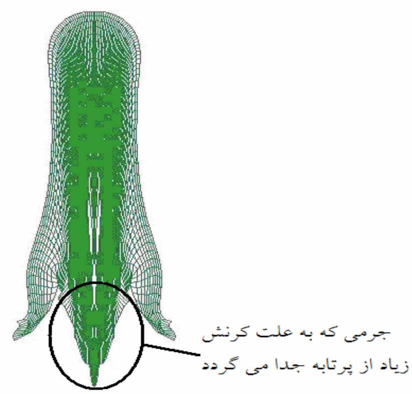
۲- سرعت و طول پرتابه بدست آمده از مدل زريلي- آرمسترنگ بيشتر از مقدار تجربي است.

۳- مدل‌هاي اشتنبرگ و جانسون- كوك نتايج مشابهي دارند.

۴- سرعت بدست آمده از مدل‌هاي اشتنبرگ و جانسون- كوك، كمتر از مقدار تجربي است.

۵- طول بدست آمده از مدل‌هاي اشتنبرگ و جانسون- كوك داراي دقت بسيار خوبي در مقايسه با نتايج تجربي است.

۶- با توجه به نتايج مرجع [۷] مي‌توان با تغيير پارامترهاي مدل زريلي- آرمسترنگ، نتايج بسيار دقيقي را در مقايسه با نتايج تجربي بدست آورد.



شكل (۴)- شكل بدست آمده از مدل زريلي- آرمسترنگ

شكل (۵)-شكل بدست آمده از مدل‌هاي جانسون- كوك و اشتنبرگ

۷- مراجع

[۱] انبارلویی،حمیدرضا؛ مظاهری، کیومرث؛ "مقايسه مدل هاي اشتنبرگ و جانسون- كوک در بررسي رفتار فلزات تحت تاثير امواج ضربه اي"، فني و مهندسي مدرس، ويژه نامه مهندسي مكانيك، شماره ۱۷، ص ۱۱- ۱۹، ۱۳۸۳.

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

[۳] Davison L. and Graham R.A.; “Shock Compression of Solids,” PHYSICS REPORTS. Vol. 55, No.4, 1979.

[٤] Wilkins, M.L.; “Numerical Simulation of Dynamic Phenomena”, Springer, New York, 1998.

[٥] 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.

[٦] 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.

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

[۸] Carleone, J., “Tactical Missile Warheads”, Volume 155, American Institute of Aeronautics and Astronautics;1993.

[۹] Hallquist, J. O.; “Ls- Dyna 960 Theoretical Manual”, Livermore Software Technology Corporation.

[۱۰] Hydrosoft web page; http://www.hydrosoft.com

[۱۱] 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.

[۱۲] 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.

[۱۳] Murph, M.J ; Weinmann, K; Doeringsfeld, K; and Speck, J; “The Effect Of Explosive Detonation Wave Shaping On EFP Shape And Performancel”,Lawrence Livermore Laboratory Report; UCRL-JC-107088; 1997.

۸- زيرنويس ها

---

[1] Explosively Formed Projectile
[2] Work Hardening
[3] Bauschinger Effect
[4] Elastic-Perfectly Plastic
[5] Strain Hardening
[6] Gary
[7] Face-Centered-Cubic
[8] Body-Centered-Cubic
[9] Slug
[10] Liner
[11] Lawrence Livermore National Laboratory