

تعیین تنش فشاری مواد فلزی بر اساس تحلیل آزمایش ضربه تیلور

سعید فعلی^۱ و مهدی بختیار^۲

گروه مهندسی مکانیک

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه رازی کرمانشاه

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۸/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱/۱۶)

چکیده

در این مقاله با استفاده از تئوری انتشار امواج تنش پلاستیک، برخورد پرتابه استوانه‌ای به سطح صلب در آزمایش ضربه تیلور تحلیل شده است. در این روش تحلیلی از طرح رفتار ماده جانسون کوک، معادله حالت می‌گرونایزن، رابطه کرنش دینامیکی شکست جانسون کوک و معادلات سینماتیکی حرکت استفاده شده است. هم‌چنین، معادلات بقاء جرم، انرژی و اندازه حرکت در پیشانی موج تنش پلاستیک استخراج شده است. با استفاده از برنامه رایانه‌ای تهیه شده، معادلات استخراج شده حل و تنش، کرنش، نرخ کرنش، سرعت، طول و شعاع نواحی صلب و تغییرشکل یافته پرتابه محاسبه شده است. نتایج طرح تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی المان محدود انجام شده با نرم‌افزار آباکوس و نتایج تجربی موجود مقایسه شده و ملاحظه شد که طول و شعاع قسمت تغییرشکل یافته پرتابه و سرعت قسمت صلب پرتابه، هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس دارد. در پایان، تنش محوری حاصل در پرتابه به صورت تابعی از ابعاد هندسی و ضرایب خواص ماده پرتابه استخراج شده است. با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مقاله، تنش فشاری پرتابه در کرنش‌های پلاستیک مختلف و به‌صورت تابعی از نرخ کرنش محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: تنش دینامیکی فشاری، آزمایش تیلور، برخورد، پرتابه

Determination of Compressive Stress of Metallic Materials, Based on Taylor Impact Test

S. Feli and M. Bakhtiar

Mech. Eng. Dep't

Kermanshah Razi Univ.

(Received: 1 Nov., 2010; Accepted: 5 Apr., 2011)

ABSTRACT

In this paper based on the plastic stress wave propagation theory, a new analytical model is presented for impact of the cylindrical projectiles on the rigid surface. In this analytical model, Johnson-Cook material behavior equation, Mie-Grueneisen equation of state, Johnson-Cook strain at fracture equation and kinematics equations of motion, are used. Also, the conservation equations of mass, momentum and energy in front of plastic stress wave are determined. For solving the governing equations, a computer program is developed. The values of stress, strain, strain rate, velocity and length and radius of rigid and deformed region of projectile were determined. Using new model proposed in this paper, the compressive stress at different plastic strain and strain rates were determined. The results of the new model have been compared with ABAQUS finite element simulations and available experimental results. It shows that the length and radius of deformed region of projectile predicted by the new model have good agreements with experimental results and ABAQUS FE simulations. Furthermore, the compressive dynamic stress is determined as a function of the final projectile dimensions and material behavior coefficients.

Keywords: Compressive Dynamic Stress, Taylor Test, Impact, Projectile

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): felisaeid@gmail.com

۲- کارشناس ارشد: bakhtiar mahdi@gmail.com

۱- مقدمه

در سال ۱۹۴۸ تیلور^۱ [۱] برخورد عمودی پرتابه استوانه‌ای به سطح صلب و فرآیند قارچی شکل شدن لبه پرتابه را مورد مطالعه قرار داد تا به وسیله آن بتواند اثر نرخ کرنش‌های بالا را روی تنش تسلیم دینامیکی مواد بررسی نماید. در این تحلیل فرض شد که ماده تراکم‌ناپذیر و تنش‌ها یک‌بعدی باشند، همچنین رفتار ماده به صورت صلب کاملاً پلاستیک در نظر گرفته شد. تحلیل یک‌بعدی که توسط تیلور ارائه شد به عنوان یک روش استاندارد برای تعیین تنش تسلیم دینامیکی مواد با استفاده از ابعاد نهایی پرتابه، در نرخ کرنش‌های بین 10^3 تا 10^5 بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال ۱۹۶۸ هاکیارد^۲ [۲-۳] با استفاده از بقاء انرژی، طرح تیلور را مورد بازبینی قرار داد. در این روش با استفاده از تقریب مخروطی، دابل تنش، کرنش و نرخ کرنش میانگین برآورد شده است. تنش تسلیم دینامیکی محاسبه شده با این روش از تنش تسلیم دینامیکی محاسبه شده توسط تیلور بیش‌تر است، به طوری که این مقدار برای فولاد نرم ۱۵ درصد و برای سرب ۲۰ درصد و برای مس ۵۰ درصد افزایش نشان داده است.

بارنبلت و ایشلینسکی^۳ [۴] و تینگ^۴ [۵] آزمایش ضربه تیلور را برای مواد ویسکوپلاستیک مورد ارزیابی قرار دادند. هاتچینگ^۵ [۶] از آزمایش تیلور برای به دست آوردن تنش تسلیم دینامیکی مواد پلیمری استفاده نمود.

جونز^۶ و همکاران [۷] با در نظر گرفتن تحلیل یک‌بعدی از آزمایش تیلور، تغییر شکل پلاستیک پرتابه را به سه فاز تقسیم‌بندی نمودند. آنها فرض نمودند که تغییر شکل پلاستیک غیرخطی که در فاز اول تغییر شکل رخ می‌دهد، گذرا بوده و بر سرعت انتشار موج تنش پلاستیک مؤثر است. در فاز دوم تغییر شکل، حرکت موج تنش به صورت پایا بوده و در انتهای تغییر شکل پلاستیک یعنی

در فاز سوم تغییر شکل به صورت غیرخطی به صفر خواهد رسید.

مادلین^۷ و همکاران [۸] طرحی ارائه نمودند که انتشار امواج تنش پلاستیک را در برخورد پرتابه به سطح صلب بررسی می‌نمود. در این روش از معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی در پیشانی موج تنش پلاستیک برای طراحی انتشار امواج پلاستیک در مسائل تنش محوری استفاده شده است.

گوایکسینگ و وانگ^۸ [۹] طرح تیلور را برای به دست آوردن تنش تسلیم دینامیکی مواد نرم متخلخل، توسعه و گسترش دادند. چگالی مواد نرم متخلخل تحت کرنش‌های فشاری ثابت نبوده و تغییر می‌نماید. بنابراین در روابط مربوط به آزمایش ضربه تیلور چگالی به صورت تابع خطی از کرنش مهندسی در جلوی پیشانی موج تنش در نظر گرفته شده است.

علاوه بر طرح‌های تحلیلی، آزمایش ضربه تیلور با دیدگاه عددی و به کمک نرم‌افزارهای المان محدود نیز بررسی شده است. مایکل برونینگ^۹ [۱۰] در مورد جنبه‌های شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های ضربه تیلور بحث نموده و توابع ترموپلاستیک ویژه‌ای پیشنهاد نموده است. آزمایش‌های ضربه‌ای تیلور با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA و با استفاده از تعریف طرح رفتار ماده جدید شبیه‌سازی شده و اثر تغییرات عوامل مربوط به طرح انتخاب شده بررسی شده است.

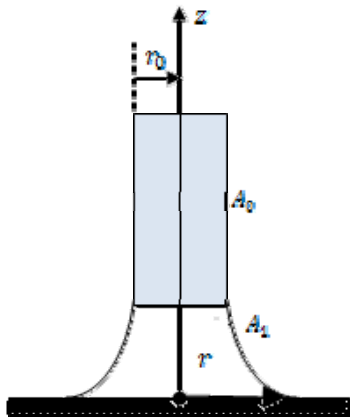
به کاربرد طرح تیلور در شبیه‌سازی و تحلیل فرآیند تغییر شکل و قارچی شدن لبه پرتابه حین نفوذ از جمله موارد کاربردی دیگری از موضوع مورد بررسی در این مقاله است. رادمهر و همکاران [۱۱] و قاسمی‌نیا و واحدی [۱۲] از این روش برای شبیه‌سازی تغییر شکل پرتابه حین نفوذ در اهداف فلزی نازک و نیمه بی‌نهایت استفاده نموده‌اند.

در اکثر طرح‌های تحلیلی ارائه شده توسط محققین از فرضیات ساده‌کننده و طرح رفتار ماده ساده استفاده شده و اثر شکست دینامیکی و فرسایش پرتابه در حین تغییر

- 1- Taylor
- 2- Hawkyard
- 3- Barenblatt and Ishlinskii
- 4- Ting
- 5- Hutching
- 6- Jones

- 7- Madulin
- 8- Guoxing & Wang
- 9-Michael Brunig

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پرتابه استوانه‌ای با سرعت اولیه U_0 به سطح صلب، برخورد نموده و لبه آن تغییر شکل می‌دهد و موج تنش پلاستیک به صورت محوری و با سرعت مطلق C_p در آن منتشر می‌شود.



شکل (۱): برخورد پرتابه استوانه‌ای به سطح صلب و تغییر شکل حاصل در آن.

کرنش مساحتی حاصل در پیشانی موج پلاستیک، با توجه به اینکه مقدار آن در بارگذاری فشاری منفی است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_A = \frac{A_0}{A_1} - 1, \quad (1)$$

که در آن، A_0 سطح مقطع اولیه و A_1 سطح مقطع قسمت تغییر شکل یافته پرتابه است. با مشتق‌گیری از معادله فوق نسبت به کرنش مساحتی و سطح تغییر شکل یافته و استفاده از المان حلقه‌ای به مساحت $dA_1 = 2\pi r dr$ کرنش مساحتی بر حسب کرنش شعاعی به صورت زیر محاسبه شده است:

$$de_A = -2 \frac{A_0}{A_1} \frac{dr}{r} = -2 \frac{A_0}{A_1} d\varepsilon_{rr}. \quad (2)$$

با تجزیه کرنش شعاعی به دو قسمت الاستیک و پلاستیک، داریم:

$$de_A = -2 \frac{A_0}{A_1} (d\varepsilon_{rr}^e + d\varepsilon_{rr}^p). \quad (3)$$

با استفاده از تراکم‌ناپذیری پلاستیک برای فلزات $d\varepsilon_{rr}^p + d\varepsilon_{\theta\theta}^p + d\varepsilon_{zz}^p = 0$ هم‌چنین استفاده از تقارن

شکل و تخت شدن در نظر گرفته نشده است. هم‌چنین هیچ یک از محققین فرآیند تغییر شکل پلاستودینامیک پرتابه را به کمک معادلات حاکمه و روش به کار رفته در این مقاله بررسی ننموده‌اند.

هدف این مقاله، فرمول‌بندی و تحلیل تغییر شکل پلاستودینامیک آزمایش ضربه تیلور است. در این مقاله با بهینه‌سازی روش مادلین [۸] معادلات بقاء جرم، انرژی و اندازه حرکت در پیشانی موج تنش پلاستیک استخراج شده‌اند. با ترکیب این معادلات با معادله حالت می‌گرونایزن، معادله معیار تسلیم ون مایرز و استفاده از طرح رفتار ماده جانسون-کوک و معیار شکست مناسب و معادلات حرکت سینماتیکی، معادلات حاکم استخراج شده هستند. هم‌چنین تنش محوری حاصل در پرتابه به صورت تابعی از ابعاد هندسی و ضرایب مربوط به خواص ماده پرتابه استخراج شده است. معادلات حاکم توسط برنامه رایانه‌ای تهیه شده حل شده و نتایج حاصل از تحلیل، استخراج شده است. هم‌چنین به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس فرآیند تغییر شکل پرتابه در برخورد به سطح صلب شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از طرح تحلیلی با نتایج تجربی موجود در سایر مراجع و نتایج شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس مقایسه شده و مشاهده شده که عوامل خروجی طرح تحلیلی، هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام شده دارد. نهایتاً منحنی تنش فشاری بر حسب کرنش پلاستیک و در نرخ کرنش مختلف رسم شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است.

۲- طرح تحلیلی

فرضیات طرح تحلیلی به شرح زیر است:

- جنس ماده پرتابه ایزوتروپیک است،
- پرتابه در شرایط تنش محوری بوده و انتشار موج پلاستیک در آن یک‌بعدی است،
- اثر دما حاصل از کار پلاستیک، در معادله رفتار ماده در نظر گرفته نشده است و
- تماس بین پرتابه و سطح صلب بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است.

با توجه به تراکم‌ناپذیری پلاستیک و استفاده از ضریب پواسون رابطه بالا به صورت زیر ساده می‌شود:

$$d\varepsilon_v = \frac{V_1}{V_0}(1-2\nu)d\varepsilon_{zz}^e. \quad (12)$$

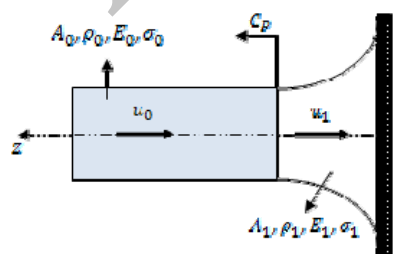
با انتگرال‌گیری از رابطه بالا، کرنش حجمی از رابطه (۱۳) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_v = e^{(1-2\nu)\varepsilon_{zz}^e} - 1, \quad (13)$$

که در آن، $\varepsilon_{zz}^e = \frac{\sigma_0}{E}$ است که σ_0 تنش تسلیم استاتیکی و E مدول یانگ پرتابه است.

۲-۱- معادلات بقاء در پیشانی موج تنش پلاستیک منتشر شده در پرتابه

پرتابه استوانه‌ای مطابق شکل ۲ بعد از برخورد، تغییرشکل داده و موج تنش پلاستیک با سرعت C_p در آن منتشر خواهد شد. فرض می‌شود که مقادیر تنش، انرژی داخلی، دانسیته و سطح مقطع در ناحیه صلب پرتابه که موج پلاستیک به آن نرسیده دارای مقادیر $A_0, \rho_0, E_0, \sigma_0$ و در ناحیه عبور موج تنش پلاستیک دارای مقادیر $A_1, \rho_1, E_1, \sigma_1$ باشد. با توجه به شکل ۲ پیشانی موج پلاستیک با سرعت مطلق C_p نسبت به سطح صلب حرکت نموده، در نتیجه سرعت نسبی قسمت بدون تغییر شکل (صلب) نسبت به پیشانی موج برابر با $u_0 + C_p$ خواهد بود که در آن u_0 سرعت لحظه‌ای مطلق انتهای سمت چپ میله است. همچنین سرعت نسبی قسمت تغییر شکل یافته نسبت به پیشانی موج برابر با $u_1 + C_p$ است.



شکل (۲): عبور موج تنش پلاستیک در پرتابه.

در استوانه، افزایش کرنش پلاستیک شعاعی بر حسب افزایش کرنش پلاستیک محوری به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$d\varepsilon_{rr}^p = d\varepsilon_{\theta\theta}^p = -\frac{d\varepsilon_{zz}^p}{2}. \quad (4)$$

با جایگزینی معادله (۴) در معادله (۳) داریم:

$$de_A = \frac{A_0}{A_1}(-2d\varepsilon_{rr}^e + d\varepsilon_{zz}^p). \quad (5)$$

با صرف نظر از مقادیر الاستیک کرنش شعاعی به علت کوچک بودن مقدار آن، معادله (۵) به صورت زیر خواهد شد:

$$de_A = \frac{A_0}{A} d\varepsilon_{zz}^p. \quad (6)$$

چون پرتابه در حالت تنش تک محوری قرار دارد، بنابراین:

$$\varepsilon_{zz}^p = -\varepsilon^p, \quad (7)$$

که در آن، ε^p کرنش معادل پلاستیک پرتابه است. با انتگرال‌گیری از رابطه (۶) کرنش پلاستیک محوری پرتابه برابر خواهد بود با:

$$\varepsilon^p = -\varepsilon_{zz}^p = -\int_0^{e_A} \frac{A_1}{A_0} de_A = -Ln(1+e_A). \quad (8)$$

افزایش کرنش حجمی نسبت به حالت اولیه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d\varepsilon_v = \frac{dV_1}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} \frac{dV_1}{V_1} = \frac{V_1}{V_0} d\varepsilon_{kk}, \quad (9)$$

که در آن، V_0 حجم مخصوص اولیه و V_1 حجم مخصوص قسمت تغییرشکل یافته پرتابه پس از عبور موج پلاستیک است. علامت این کرنش نیز بر حسب قرارداد در کشش مثبت در نظر گرفته می‌شود. با انتگرال‌گیری از جمله اول رابطه بالا داریم:

$$\varepsilon_v = \frac{V_1}{V_0} - 1 = \frac{\rho_0}{\rho_1} - 1, \quad (10)$$

که در آن، ρ_0 چگالی اولیه و ρ_1 چگالی قسمت تغییر شکل یافته پرتابه، پس از عبور از موج پلاستیک است. اگر افزایش کرنش به مؤلفه‌های پلاستیک و الاستیک آن تجزیه شده و در رابطه (۹) قرار گیرد، داریم:

$$d\varepsilon_v = \frac{V_1}{V_0}(d\varepsilon_{kk}^e + d\varepsilon_{kk}^p). \quad (11)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_1 = S_{zz} + P, \quad \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = 0, \quad (21)$$

$$\Rightarrow S_{rr} = S_{\theta\theta}, \quad P = \frac{\sigma_1}{3},$$

بنابراین، مؤلفه‌های انحرافی تنش برابرند با:

$$S_{rr} = -P, \quad S_{\theta\theta} = -P, \quad S_{zz} = 2P. \quad (22)$$

۲-۳- معیار تسلیم ون مایرز

معیار تسلیم ون مایرز برای ناحیه پلاستیک به صورت زیر است [۱۳]:

$$\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} = \sigma^2. \quad (23)$$

در معادله بالا، σ تنش معادل جریان است که از رابطه جانسون-کوک به دست می‌آید [۸]:

$$\sigma(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = (A + B \varepsilon_p^n) \quad (24)$$

$$(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}),$$

که در آن، ε_p کرنش معادل پلاستیک، $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک و A, B, C, n, m ثوابت مربوط به ماده هستند و هم‌چنین:

$$\dot{\varepsilon}_p^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (25)$$

که در آن، $\dot{\varepsilon}_{p0}$ نرخ کرنش تعریف شده مرجع، T_0 دمای مرجع و T_m دمای ذوب ماده پرتابه است. با صرف نظر از تنش‌های برشی و بسط رابطه (۲۳) مؤلفه انحرافی محوری تنش به صورت زیر است:

$$S_{zz} = \frac{2}{3} \sigma. \quad (26)$$

بنابراین، مقدار تنش محوری در ناحیه پلاستیک پرتابه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_1 = \frac{2}{3} \sigma + P. \quad (27)$$

۲-۴- معادله حالت می گرونایزن

در برخورد پرتابه به سطح صلب به علت سرعت بالای برخورد، معادله حالت برای ارتباط بین فشار و حجم ماده تعریف شده است. در این مقاله از معادله حالت می گرونایزن برای فلزات استفاده شده است [۸]:

$$P = P_H \left(1 - \frac{\Gamma}{2} \mu\right) + \Gamma \rho_0 (1 + \mu) (E_1 - E_0), \quad (28)$$

با نوشتن معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی در پیشانی موج تنش پلاستیک، نهایتاً روابط زیر استخراج خواهند شد:

$$C_p + u_0 = \frac{u_1 - u_0}{(1 + e_A)(1 + \varepsilon_v) - 1}, \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_1}{1 + e_A} - \sigma_0 = \rho_0 (c_p + u_0)(u_0 - u_1), \quad (15)$$

$$(1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)(u_{01})E_0 +$$

$$\frac{1}{2}(1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)(u_{01})(c_p + u_0)^2 +$$

$$\frac{\sigma_0}{\rho_0}(1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)(u_{01}) = \quad (16)$$

$$E_1 + \frac{1}{2}(c_p + u_1)^2 + \frac{\sigma_1}{\rho_0}(1 + \varepsilon_v),$$

که در این معادلات، $u_{01} = (C_p + u_0)/(C_p + u_1)$ است. از طرف دیگر با توجه به قانون دوم نیوتن برای قسمت صلب پرتابه، نرخ کاهش سرعت انتهای آن برابر است با:

$$\frac{du_0}{dt} = -\frac{\sigma_1}{\rho_0 l}, \quad (17)$$

که در آن، l طول قسمت تغییرشکل یافته پرتابه است.

۲-۲- محاسبه مؤلفه‌های تنش

رابطه بین مؤلفه‌های انحرافی و واقعی تنش به صورت زیر تعریف شده است:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij}, \quad (18)$$

که مؤلفه هیدرواستاتیکی تنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \frac{\sigma_{kk}}{3} = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}}{3}. \quad (19)$$

بنابراین، رابطه بین تنش‌های نرمال انحرافی و واقعی، به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_{zz} = S_{zz} + P, \quad \sigma_{rr} = S_{rr} + P, \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} + P.$$

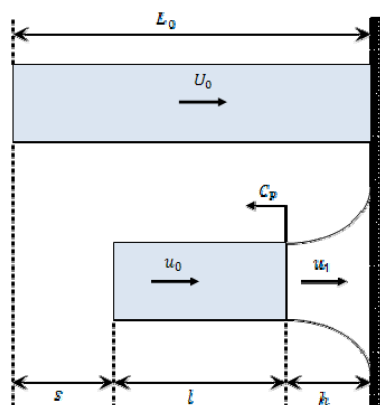
پرتابه بعد از برخورد به هدف در شرایط تنش محوری واقع بوده و محور z در جهت محور پرتابه است، بنابراین:

با مشتق‌گیری از رابطه فوق نسبت به زمان رابطه نرخ کرنش به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d\varepsilon^p}{dt} = \frac{1}{L_0} \left(\frac{dl}{dt} + \frac{dh}{dt} \right). \quad (38)$$

با جای‌گذاری روابط (۳۴-۳۵) در رابطه بالا نرخ کرنش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\varepsilon^p}{dt} = -\frac{u_0}{L_0}. \quad (39)$$



شکل (۳): نرخ افزایش طول ناحیه تغییر شکل داده و کاهش طول ناحیه صلب پرتابه.

۲-۷- معیار شکست دینامیکی پرتابه

برای کنترل فرسایش یا شکست پرتابه در حین تغییر شکل، از معیار شکست لحظه‌ای جانسون-کوک استفاده شده است. جانسون و کوک [۱۴] در سال ۱۹۸۵ رابطه‌ای برای شکست دینامیکی مواد ارائه نمودند که در کدهای رایانه‌ای استفاده شده است. بر اساس این طرح، شکست هنگامی که کرنش پلاستیک در ماده به مقدار ε^f برسد رخ خواهد داد که مقدار این کرنش از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*), \quad (40)$$

که در آن، σ^* ضریب بی‌بعد تنش-فشار بوده که از رابطه (۴۱) به دست می‌آید:

$$\sigma^* = \frac{P}{\sigma}, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{3J_2}, \quad (41)$$

که در آن، E_1 و E_0 انرژی داخلی در دو سمت موج، Γ گامای می‌گرونایزن بوده و μ به صورت زیر با کرنش حجمی ارتباط دارد:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v}. \quad (29)$$

هم‌چنین، P_H از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_H = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3. \quad (30)$$

ضرایب $K_2 \mu^2, K_3 \mu^3$ در مقایسه با $K_1 \mu$ کوچک بوده و از آن صرف‌نظر می‌شود. بنابراین داریم:

$$P_H = K_1 \mu. \quad (31)$$

با جای‌گذاری رابطه (۳۰) در روابط (۲۷-۲۸) مقدار تنش محوری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_1 = \frac{2}{3} \sigma + P_H \left(1 - \frac{\Gamma}{2} \mu \right) + \Gamma \rho_0 (1 + \mu) (E_1 - E_0). \quad (32)$$

۲-۵- سرعت موج تنش پلاستیک

سرعت موج تنش پلاستیک در پرتابه از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon^p}}. \quad (33)$$

۲-۶- روابط سینماتیکی

با توجه به شکل ۳ سرعت نسبی ناحیه، بدون تغییر شکل نسبت به پیشانی موج برابر با $u_0 + C_p$ خواهد بود که در آن u_0 سرعت لحظه‌ای مطلق انتهای سمت چپ میله است. بنابراین، روابط سینماتیکی به صورت زیر است:

$$\frac{dh}{dt} = C_p, \quad (34)$$

$$\frac{dl}{dt} = -(C_p + u_0), \quad (35)$$

$$\frac{ds}{dt} = u_0, \quad (36)$$

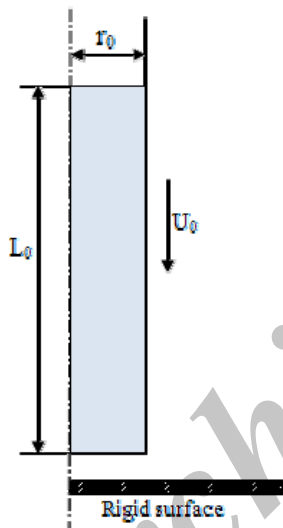
که در آنها، h طول لحظه‌ای ناحیه پلاستیک، l طول لحظه‌ای ناحیه است. کرنش مهندسی در پرتابه از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$\varepsilon^p = \frac{(l + h) - L_0}{L_0}. \quad (37)$$

سرعت، طول و قطر اولیه پرتابه، ضرایب مربوط به معادله رفتار ماده جانسون-کوک، ضرایب مربوط به معادله حالت، عوامل مکانیکی پرتابه از جمله چگالی، مدول یانگ، ضریب پواسون و تنش تسلیم استاتیکی پرتابه و همچنین ضرایب مربوط به معادله شکست جانسون-کوک.

۳- شبیه‌سازی فرآیند با نرم افزار آباکوس

طبق شکل ۴ سطح صلب و پرتابه استوانه‌ای (به شعاع r_0 و طول اولیه L_0) به صورت دو بعدی متقارن محوری در محیط آباکوس مدل‌سازی می‌شود. لبه‌های سطح صلب با شرط مرزی گیردار مقید شده و پرتابه با سرعت اولیه U_0 به سطح صلب برخورد می‌نماید.



شکل (۴): طرح تقارن محوری برخورد پرتابه به سطح صلب در آباکوس.

به علت فشار بالای حاصل در منطقه برخورد و تغییر چگالی ماده پرتابه، برای تعیین فشار هیدرواستاتیکی و تعریف خواص الاستیسیته ماده پرتابه، از معادله حالت می‌گرونایزن استفاده شده است. طرح رفتار ماده پرتابه با استفاده از طرح جانسون-کوک تعریف شده و برای پیش‌بینی شکست دینامیکی در آن از معیار شکست دینامیکی جانسون-کوک استفاده شده و ضرایب این معادلات به نرم‌افزار اعمال شده است.

که در این رابطه، J_2 پایای دوم تانسور تنش انحرافی است. ضرایب D_1 تا D_5 ضرایب معادله کرنش شکست جانسون-کوک است که برای مواد با جنس‌های مختلف متفاوت بوده و برای برخی از مواد موجود است.

۲-۸- رابطه تنش-کرنش دینامیکی پرتابه

با استفاده از معادلات (۱۶-۱۴)، متغیرهای سرعت موج تنش پلاستیک (C_p)، سرعت ذرات در ناحیه تغییر شکل یافته و تغییر شکل نیافته پرتابه (u_0 و u_1) حذف شده و رابطه زیر نتیجه خواهد شد:

$$\rho_0(E_1 - E_0) = [1 - (1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)] \left[\frac{\sigma_0}{2} + \frac{\sigma_1}{2(1 + e_A)} \right] \quad (42)$$

به کمک معادله‌های (۴۲) و (۳۲) و حذف عبارت $E_1 - E_0$ معادله زیر نتیجه خواهد شد:

$$\sigma_1 = \frac{\frac{\sigma_0}{2} [1 - (1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)] + \frac{1}{\Gamma(1 + \mu)} \left[\frac{2}{3} \sigma + P_H (1 - \frac{\Gamma}{2} \mu) \right]}{\frac{1}{\Gamma(1 + \mu)} - \frac{1 - (1 + e_A)(1 + \varepsilon_v)}{2(1 + e_A)}} \quad (43)$$

در رابطه فوق، σ_1 تنش فشاری ماده پرتابه است که تابعی از کرنش حجمی و سطحی، نرخ کرنش و کرنش پلاستیک است.

۲-۹- حل معادلات حاکم

هفت معادله جبری (۸، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۲۴، ۳۷ و ۴۳) و چهار معادله دیفرانسیل (۳۵-۳۹) به دست آمده که دارای مجهولات کرنش مساحتی در پیشانی موج (e_A)، تنش در ناحیه پلاستیک (σ_1)، سرعت ذرات در ناحیه پلاستیک (u_1)، سرعت موج پلاستیک (C_p)، تنش معادل (σ)، طول ناحیه تغییر شکل داده (h)، طول ناحیه صلب (l)، سرعت ذرات در قسمت صلب (u_0)، کرنش پلاستیک (ε_p)، نرخ کرنش پلاستیک ($\dot{\varepsilon}_p$) و کرنش حجمی (ε_v) هستند. معادلات فوق توسط کد رایانه‌ای نوشته شده به زبان برنامه‌نویسی مطلب و به روش رانج کوتای مرتبه چهار حل شده است. با توجه به شرایط اولیه مسئله، مجهولات در هر لحظه زمانی محاسبه می‌شوند. ورودی‌های مسئله عبارتند از:

جدول (۱): مشخصات مکانیکی نمونه‌های

مورد آزمایش [۱۶].

مدول یانگ (E) (Gpa)	تنش تسلیم استاتیکی (σ_0) (MPa)	چگالی ρ (kg/m ³)	ضریب پواسون (ν)
۱۲۴	۸۶	۸۹۵۰	۰/۳۴

جدول (۲): ضرایب معادله رفتار ماده جانسون-

کوک برای مس OFHC [۱۴].

A (Mpa)	B (Mpa)	n	m
۸۹/۶	۲۹۲	۰/۳۱	۱/۰۹
C	$\dot{\epsilon}_0$	T_m (°C)	T_0 (°C)
۰/۰۲۵	۱	۱۰۸۲	۲۵

جدول (۳): ضرایب معادله حالت می گرونایزن

برای مس OFHC [۸].

C_0	S	Γ
۳,۹۴۰	۱/۴۸۹	۱/۹۶

جدول (۴): ضرایب معادله شکست جانسون-کوک

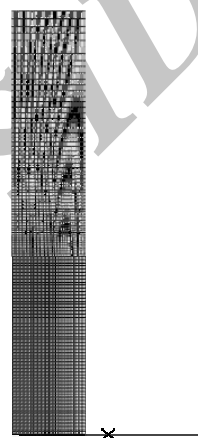
برای مس OFHC [۱۲].

D_1	D_2	D_3	L_f	D_5
۰/۵۴	۴/۸۹	-۳/۰۳	۰/۰۱۴	۱/۱۲

جدول (۵): مشخصات نمونه‌های مورد بررسی [۱۶].

شماره نمونه	طول اولیه نمونه (L_0) (mm)	شعاع اولیه نمونه (r_0) (mm)	سرعت برخورد (U_0) (m/s)
نمونه ۱	۳۱/۴	۲/۰۸	۱۷۱
نمونه ۲	۳۱/۳	۲/۰۸	۲۰۰
نمونه ۳	۳۱/۴	۲/۰۸	۲۱۲
نمونه ۴	۳۱/۴	۲/۰۸	۱۴۵
نمونه ۵	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۴۴
نمونه ۶	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۷۳
نمونه ۷	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۷۰
نمونه ۸	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۶۷
نمونه ۹	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۵۲
نمونه ۱۰	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۷۴
نمونه ۱۱	۳۱/۲	۲/۰۷	۱۶۰

طبق شکل ۵، المان‌بندی پرتابه با استفاده از المان‌های چهارگره‌ای متقارن محوری دوبعدی (CAX4R) انجام شده است. برای افزایش دقت جواب‌ها و جلوگیری از اعوجاج بیش از اندازه المان‌ها در نزدیکی سطح برخورد، المان‌بندی پرتابه در نزدیکی سطح برخورد کوچک‌تر است. تماس بین المان‌های پرتابه و سطح صلب از نوع تماس سطح به سطح و اصطکاک بین دو سطح صفر در نظر گرفته می‌شود. حل مسئله به روش Dynamic/Explicit و همه مراحل طراحی و تحلیل در ABAQUS/CAE انجام شده است.



شکل (۵): طرح تقارن محوری المان‌بندی

شده در آباکوس.

۴- نتایج و بحث

برای تأیید درستی طرح تحلیلی، نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و نتایج تجربی موجود در مقالات مقایسه شده است. عوامل طول نهایی پرتابه، شعاع قسمت تغییر شکل داده شده و نرخ کاهش سرعت قسمت تغییر شکل نیافته پرتابه در این قسمت مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- مشخصات هندسی و مکانیکی پرتابه

ماده مورد بررسی از جنس مس آنیل شده OFHC است. مشخصات مکانیکی، ضرایب طرح رفتار ماده جانسون کوک، ضرایب معادله حالت می گرونایزن و ضرایب معادله کرنش شکست در جدول‌های ۴-۱ و مشخصات هندسی برای یازده نمونه مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شده است.

سازی عددی شباهت زیاد دیدگاه تحلیل مدل جدید و معادلات حاکم بر هر دو روش حل است. در شبیه‌سازی عددی و همچنین در مدل تحلیلی، از مدل رفتار ماده جانسون کوک و معادله حالت مای‌گرونایزن استفاده شده است و برای کنترل شکست، معیار خرابی و شکست جانسون کوک به کار برده شده است. همچنین معادلات حاکم بر مدل تحلیلی با روش عددی رانج-کوتا مرتبه چهار حل و طراحی مسئله به صورت یک‌بعدی انجام شده است.

جدول (۶): مقایسه طول نهایی و شعاع نهایی ناحیه تغییر شکل داده شده پرتابه.

نمونه	طول نهایی شعاع	نتایج تجربی	آباکوس (mm)	مدل جدید (mm)	مدل تیلور (mm)	مدل هاکیارد (mm)
		[۱۴] (mm)				
نمونه ۱	L_f	۲۴/۲۳	۲۲/۳۲	۲۱/۱	۱۳/۱۳	۹/۲۲
	r_1	۳/۵۶	۳/۶	۳/۴۸	۴/۵۵	۷/۰۲
نمونه ۲	L_f	۲۲/۴	۲۰/۱۴	۱۹/۱۶	۱۰/۶۶	۵/۸
	r_1	۴/۰۴	۴/۰۸	۴	۵/۰۹	۹/۶
نمونه ۳	L_f	۲۱/۵	۱۹/۳۲	۱۸/۵	۹/۸۶	۴/۷۹
	r_1	۴/۲۳	۴/۲۹	۴/۲۳	۵/۳۲	۱۱/۱۵
نمونه ۴	L_f	۲۵/۸	۲۴/۱۸	۲۲/۹۶	۱۵/۸۵	۱۳/۰۳
	r_1	۳/۱۸	۳/۲۴	۳/۱۱	۴/۱	۵/۵
نمونه ۵	L_f	۲۵/۸	۲۴/۱	۳۲/۸۹	۱۵/۸۶	۱۳/۱۱
	r_1	۳/۱۵	۳/۲	۳/۰۸	۴/۰۶	۵/۴۸
نمونه ۶	L_f	۲۳/۹۸	۲۲/۰۲	۲۰/۸۴	۱۲/۵۳	۸/۹۶
	r_1	۳/۵۲	۳/۵۸	۳/۴۹	۴/۶۴	۷/۲۲
نمونه ۷	L_f	۲۴/۲۸	۲۲/۲۴	۲۱/۰۴	۱۳/۱۴	۹/۳۶
	r_1	۳/۴۸	۳/۵۵	۳/۴۵	۴/۵۱	۷
نمونه ۸	L_f	۲۴/۵۱	۲۲/۴۶	۲۱/۲۵	۱۳/۱	۹/۷۶
	r_1	۳/۴۷	۳/۵۲	۳/۴	۴/۵۲	۶/۸
نمونه ۹	L_f	۲۵/۲۷	۲۳/۵۳	۲۲/۳۱	۱۴/۹۷	۱۱/۹
	r_1	۳/۲۴	۳/۳۲	۳/۱۹	۴/۲	۵/۹
نمونه ۱۰	L_f	۲۴	۲۱/۹۶	۲۰/۷۷	۱۲/۴۴	۸/۸۴
	r_1	۳/۵۳	۳/۶۴	۳/۵۱	۴/۶۵	۷/۳
نمونه ۱۱	L_f	۲۴/۷۷	۲۲/۹۶	۲۱/۷۴	۱۴/۱۲	۱۰/۷۴
	r_1	۳/۳۵	۳/۴۱	۳/۳	۴/۳۳	۶/۳

۴-۲- مقایسه طول و شعاع ناحیه تغییر شکل یافته

پیش‌بینی ابعاد نهایی پرتابه در آزمایش ضربه تیلور اهمیت زیادی دارد، به طوری که در همه تحلیل‌هایی که ارائه شده سعی بر بالا بردن دقت پیش‌بینی این ابعاد است. در جدول ۶ مقادیر طول نهایی پرتابه (L_f) و شعاع نهایی ناحیه تغییر شکل داده شده (r_f) حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی مرجع [۱۶]، مدل تحلیلی تیلور [۱] و هاکیارد [۳] و شبیه‌سازی عددی به‌وسیله نرم‌افزار آباکوس برای یازده نمونه ارائه شده در جدول ۵ با هم مقایسه شده است.

با توجه به نتایج ملاحظه شد که دقت مدل تحلیلی در محاسبه طول نهایی پرتابه و شعاع ناحیه تخت شده آن بیش‌تر از مدل تحلیلی تیلور و هاکیارد بوده و نتایج ارائه شده هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار آباکوس دارد. بر اساس بررسی انجام شده حداکثر خطای مدل تحلیلی جدید در محاسبه طول نهایی و شعاع ناحیه تغییر شکل داده شده پرتابه در مقایسه با نتایج تجربی زیر ۱۲ درصد است در حالی که خطای روش تیلور و هاکیارد قابل توجه است. علت این موضوع بهینه‌سازی انجام شده در مدل تحلیلی و استفاده از معادلات اساسی بقاء و طرح رفتار ماده جدید تعریف شده است، به طوری که بر خلاف اکثر طرح‌های تحلیلی موجود، اثرات اکثر عوامل مؤثر در تغییر شکل پلاستیک و دینامیکی ماده پرتابه در مدل تحلیلی جدید در نظر گرفته شده است.

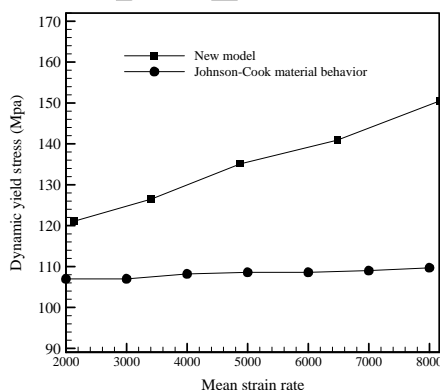
۴-۳- نرخ کاهش سرعت پرتابه

در مدل‌های تحلیلی قبلی رابطه‌ای برای پیش‌بینی نرخ کاهش سرعت پرتابه ارائه نشده است. بنابراین در این قسمت، تاریخچه تغییرات سرعت پرتابه پیش‌بینی شده توسط مدل تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی عددی با آباکوس مقایسه شده است. در شکل‌های ۶-۷ تغییرات سرعت انتهای صلب پرتابه نسبت به زمان برای دو نمونه از نمونه‌های ارائه شده در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج طرح تحلیلی و شبیه‌سازی عددی هم‌خوانی مناسبی با هم داشته و سرعت پرتابه با گذشت زمان تغییر شکل، کاهش و در پایان به صفر خواهد رسید. علت دقت نتایج مدل تحلیلی و شبیه-

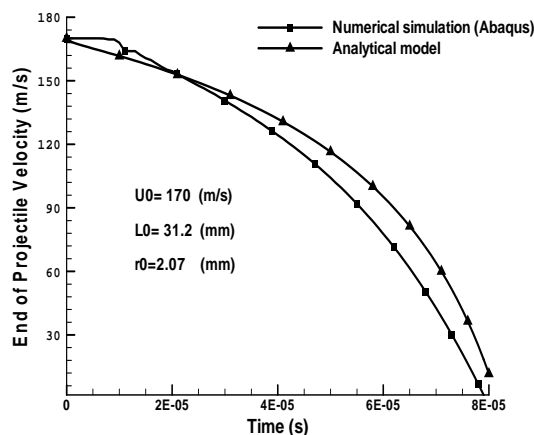
$$\sigma_{YD} = \rho_0 U_0^2 \frac{L_0 - l_f}{2(L_0 - L_f)} \frac{1}{\ln(L_0/l_f)} \quad (44)$$

که در آن، L_f طول نهایی پرتابه بعد از تغییر شکل، l_f طول قسمت تغییرشکل یافته پرتابه و σ_{YD} تنش تسلیم دینامیکی ماده پرتابه است. در این مقاله، بر اساس سرعت اولیه برخورد، عوامل L_f ، l_f و نرخ کرنش متوسط محاسبه شده‌اند. تنش تسلیم دینامیکی نیز از معادله (۴۴) استخراج شده است.

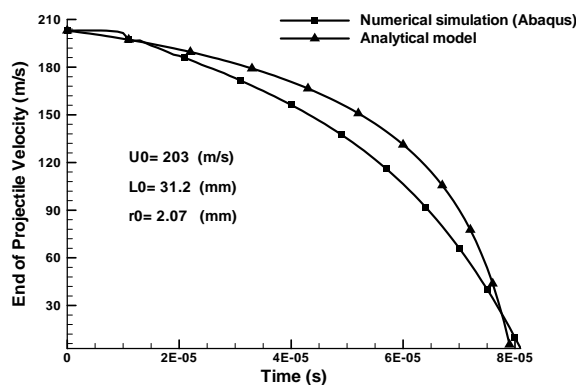
در شکل ۸ منحنی تغییرات تنش تسلیم دینامیکی محاسبه شده از معادله (۴۳) با تنش تسلیم دینامیکی محاسبه شده از مدل رفتار ماده جانسون کوک در نرخ کرنش‌های مختلف مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود که در نرخ کرنش ۲,۰۰۰ تا ۸,۰۰۰ بر ثانیه مدل جانسون کوک حساسیت چندانی به نرخ کرنش ندارد اما در مدل ارائه شده این مقاله، در نرخ کرنش ۲,۰۰۰ بر ثانیه، تنش تسلیم دینامیکی، $1/34$ برابر تنش تسلیم استاتیکی بوده و در نرخ کرنش ۸,۰۰۰ بر ثانیه، σ_{YD} ، $1/67$ برابر تنش تسلیم استاتیکی است. این نتیجه، منطبق بر نتایج تجربی ارائه شده توسط محققینی است که بیان نموده‌اند که تنش تسلیم دینامیکی مس در نرخ کرنش‌های بالا $1/5$ تا دو برابر تنش تسلیم در بارگذاری استاتیکی است [۱۵]. در حالی که مدل رفتار ماده جانسون کوک به‌خصوص در نرخ کرنش‌های پایین حساسیت زیادی به نرخ کرنش ندارد [۴].



شکل (۸): تغییرات تنش تسلیم دینامیکی بر حسب نرخ کرنش متوسط.



شکل (۶): نمودار تغییرات سرعت ناحیه صلب پرتابه بر حسب زمان برای نمونه ۷.



شکل (۷): نمودار تغییرات سرعت ناحیه صلب پرتابه بر حسب زمان برای نمونه ۲.

در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس معادلات دیفرانسیل حاکم به روش المان محدود حل شده و طراحی مسئله به صورت دوبعدی تقارن محوری است. لذا، با توجه به دقت نتایج مدل تحلیلی، این روش می‌تواند جایگزین شبیه‌سازی با آباکوس که هزینه و زمان زیادی نیاز دارد، شود.

۴-۴- محاسبه تنش تسلیم فشاری

بر اساس طول قسمت تغییر شکل یافته و طول نهایی، بعد از تغییرشکل پرتابه، تیلور [۱] معادله‌ای استخراج نموده است که به کمک آن می‌توان تنش تسلیم دینامیکی مواد فلزی را در نرخ کرنش‌های مختلف محاسبه نمود. این معادله به شرح زیر است:

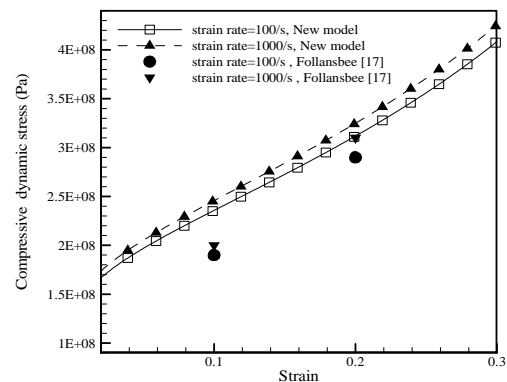
مدل تحلیلی بر حسب کرنش پلاستیک و در نرخ کرنش - های مختلف رسم شده و با نتایج فولانسبی [۱۷] مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۹ ملاحظه می شود دقت مدل تحلیلی در محاسبه تنش دینامیکی فشاری در نرخ کرنش های ۱۰۰ و ۱,۰۰۰ بر ثانیه، هم خوانی خوبی با نتایج فولانسبی [۱۷] ندارد و لیکن در نرخ کرنش $10^4/s$ با توجه به شکل ۱۰ دقت نتایج افزایش یافته است. بنابراین طرح تحلیلی جدید می تواند پیش بینی مناسبی از تنش دینامیکی فشاری در نرخ کرنش بالا و به صورت تابعی از کرنش پلاستیک داشته باشد.

محاسبه تنش دینامیکی فشاری حقیقی بر اساس روش ارائه شده در این مقاله، نیاز به تعیین ضرایب مدل رفتار ماده جانسون کوک و معادله حالت دارد. این ضرایب برای همه مواد مشخص نبوده و تعیین آن ها نیازمند انجام آزمایش های تجربی است. هم چنین در این مقاله، تنش فشاری به صورت تابعی از کرنش پلاستیک و در نرخ کرنش های مختلف برای فلز مس محاسبه شده است. برای بررسی درستی بیش تر مدل تحلیلی، نیاز به مقایسه های بیشتر نتایج مدل تحلیلی با نتایج تجربی برای سایر فلزات است.

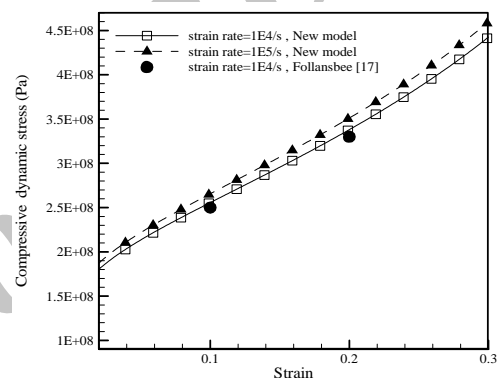
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل تحلیلی جدیدی جهت شبیه سازی برخورد پرتابه استوانه ای به سطح صلب در آزمایش ضربه تیلور ارائه شده و تنش فشاری دینامیکی پرتابه در نرخ کرنش های مختلف به صورت تابعی از ابعاد هندسی و ضرایب خواص ماده پرتابه استخراج و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- به کمک معادلات بقاء جرم، انرژی و اندازه حرکت در پیشانی موج تنش پلاستیک، استفاده از روابط سینماتیکی حرکت، کاربرد مدل رفتار ماده جانسون کوک و استفاده از مؤلفه های انحرافی و هیدروستاتیکی تنش، روش جدیدی برای محاسبه ابعاد تغییر شکل یافته پرتابه در آزمایش ضربه تیلور ارائه شده و تنش تسلیم دینامیکی با توجه به



شکل (۹): نمودار تغییرات تنش فشاری بر حسب کرنش پلاستیک در نرخ کرنش های $100/s$ و $1000/s$.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات تنش فشاری بر حسب کرنش پلاستیک در نرخ کرنش $10^4/s$ و $10^5/s$.

۴-۵- محاسبه تنش فشاری در ناحیه پلاستیک

یکی از کاربردهای جالب مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله، محاسبه تنش دینامیکی فشاری در نرخ کرنش ها و کرنش های پلاستیک مختلف بوده و می توان بر اساس ابعاد تغییر شکل داده شده و ورودی های برنامه رایانه ای تنش فشاری دینامیکی را محاسبه نمود. تنش فشاری دینامیکی حقیقی از معادله (۴۳) محاسبه شده است. در این معادله بر اساس سرعت اولیه برخورد، کرنش مساحتی و کرنش پلاستیک محاسبه شده و با در نظر گرفتن ضرایب مدل رفتار ماده جانسون کوک و معادله حالت، تنش حقیقی σ_1 تعیین خواهد شد. در شکل های ۹-۱۰ منحنی تغییرات تنش دینامیکی فشاری محاسبه شده به کمک

1- Follansbee

5. Ting, T.C.T. "Impact of Nonlinear Viscoplastic Rod on a Rigid Wall", J. Appl. Mech. Trans. ASME, Vol. 33, No. 1, pp. 505-512, 1966.
6. Hutching, I.M. "Estimation of Yield Stress in Polymers at High Strain Rate, Using G.I. Taylor Impact Technique", J. Mech. Phys. Solids., Vol. 26, No's. 5-6, pp. 289-297, 1979.
7. Jones, S.E., Paul, J.M., Joseph, C., and Foster, J.R. "An Engineering Analysis of Plastic Wave Propagation in the Taylor Test", Int. J. Impact Eng., Vol. 19, No. 2, pp. 95-106, 1997.
8. Maudlin, P.J., Foster, J.C., and Jones, S.E. "A Continuum Mechanics Code Analysis of Steady Plastic Wave Propagation in the Taylor Test", Int. J. Impact Eng., Vol. 19, No. 3, pp. 231-256, 1997.
9. Guoxing, Lu, Bin, W., and Tieguang, Z. "Taylor Impact Test for Ductile Porous Materials-Part I: Theory", Int. J. Impact Eng., Vol. 25, No. 10, pp. 981-991, 2001.
10. Brunig, M. and Driemeier, L. "Numerical Simulation of Taylor Impact Tests", Int. J. Plasticity, Vol. 23, No. 4, pp. 1979-2003, 2007.
11. Radmehr, D., Liaghat, G.H., Felli, S., and Zahir-Mirdamadi, M. "Analysis of Penetration Process of Plunt Deformable Projectiles into Metallic Targets", Mech. Aerospace J., Vol. 4, No. 4, pp. 41-54, 2004 (In Persian).
12. Ghasemi-Nia, A. and Vahedi, Kh. "Analysis and Comparison of Projectile Penetration Models into Semi-infinite Metal Targets", Mech. Aerospace J., Vol. 1, No. 3, pp. 83-96, 2001 (In Persian).
13. Chakrabarty, J. "Applied Plastics", Springer-Verlag, New York, 2000.
14. Zukas, J.A. "High Velocity Impact Dynamic", John Wiley and Sons, The Univ. of Michigan, USA, 1990.
15. Holmquist, T.J. and Johnson, G.R. "Determination of Constant and Comparison of Result for Various Constitutive Models", Alliant Techsystems Inc., USA, 1991.
16. William, K.R. and Jones, S.E. "A Revised form for the Johnson-Cook Strength Model", Int. J. Impact Eng., Vol. 21, No. 8, pp. 609-624, 1998.
17. Follansbee, P.S. "High Strain Rate Deformation of FCC Metals and Alloys", Metallurgical Appli. of Shock Wave and High Strain Rate, 1986.

ابعاد تغییر شکل یافته پرتابه و به کمک معادله تیلور محاسبه شده است. جایگزینی فشار حاصل از معادله حالت، به جای مؤلفه‌های هیدروستاتیکی تنش محوری در پرتابه از جمله نوآوری‌های ارائه شده در این مقاله است،

۲- طول و شعاع نهایی تغییر شکل یافته پرتابه بعد از برخورد به سطح صلب هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی موجود و نتایج شبیه‌سازی المان محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس دارد و دقت نتایج بیشتر از طرح‌های تحلیلی سایر محققین است،

۳- تنش فشاری محاسبه شده با روش ارائه شده در این مقاله برای فلز مس در کرنش‌های پلاستیک مختلف و نرخ کرنش $10^4/s$ هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی موجود داشته است و

۴- روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند شروع فعالیت‌های تحقیقاتی سایر محققین برای محاسبه تنش دینامیکی فشاری مواد فلزی در نرخ کرنش‌های بالا باشد.

مراجع

1. Taylor, G.I. "The Use of Flat-ended Projectiles for Determining Dynamic Yield Stress I: Theoretical Considerations", Proc. R. Soc. London A, Vol. 194, No. 1038, pp. 289-299, 1948.
2. Hawkyard, J.B. "A Theory for the Mushrooming of Flat-ended Projectiles Impinging on a Flat Rigid Anvil, Using Energy Consideration", Int. J. Mech. Sci., Vol. 11, No. 3, pp. 313-324, 1969.
3. Hawkyard, J.B., Eaton, D., and Johnson, W. "The Mean Dynamic Yield Strength of Copper and Low Carbon Steel at Elevated Temperatures from Measurements of the Mushrooming of Flat-Ended Projectiles", Int. J. Mech. Sci., Vol. 10, No. 12, pp. 929-930, 1968.
4. Barenblatt, G.I. and Ishlinskii, A.I. "On the Impact of a Viscoplastic Bar on a Rigid Wall", Prikl. Mech. Sci., Vol. 10, No. 3, pp. 929-935, 1968.