نشریه بین المللی علوم مهندسی، شماره ۱، جلد۱۷، بهار ۱۳۸۵، صفحه ۲۳ – ۱۵ دانشگاه علم و صنعت ایران

شبیه سازی عددی نفوذ بالستیکی پرتابههای میلههای بلند در اهداف سرامیک/ فلزی

خداداد واحدی و نجمه خضرائیان

چکیده: در این مقاله، نفوذ در اهداف سرامیکی با پشتیبان نیمه بینهایت آلومینیمی در برخورد با پرتابههای بلند از جنس تانتالیوم بررسی میشود. برای حل معادلات نفوذ، از نرم افزار المان محدود LS-DYNA استفاده شدهاست. در این شبیه سازی سرامیک و ورق پشتیبان, با استفاده از معادله مشخصه الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک با در نظر گرفتن تنش شکست کششی و کرنش شکست فرسایشی و پرتابه با معادله مشخصه جانسون-کوک مدل شده-اند. معادله حالت به کار رفته در پرتابه و سرامیک گرونایزن و در پشتیبان چندجمله ای خطی میباشد. سرعتهای برخورد از ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ سرای پرتابه در نظر گرفته شده است. عمق نفوذ بدست آمده در دو حالت مختلف هدف، یکی با لایه رویی سرامیکی و دیگری بدون آن، در مقایسه با دادههای آزمایشی از دقت خوبی برخوردار است.

واژههای کلیدی: برخورد بالستیک، زره سرامیکی، شبیه سازی عددی، نفوذ، LS-DYNA

۱. مقدمه

سرامیکها به علت داشتن خواصی مانند دانسیته پایین، مقاومت فشاری بالا و مدول بالک و برشی بالا مدتهاست به عنوان یک زره حفاظتی در سیستم های بالستیکی به کار میروند. در کاربردها، معمولاً زرههای سرامیکی با پشتیبان تقویت میشوند. پشتیبان انرژی جنبشی باقی مانده پرتابه را بعد از شکست سرامیک جذب میکند و باعث پایداری سرامیک در طی فرآیند نفوذ میگردد. هرچه ضخامت ورق پشتیبان بیشتر باشد شکست سرامیک در اثر تغییر شکل ورق پشتیبان کمتر خواهد بود. بعد از برخورد پرتابه به یک هدف سرامیکی با لایه پشتیبان فلزی، شکست مخروطی در اثر یک هدف سرامیکی با لایه پشتیبان فلزی، شکست مخروطی در اثر برگشت امواج کششی اتفاق میافتد، این مخروط سرامیکی، بار ناشی از برخورد پرتابه را به سطح وسیعتر پایه مخروط روی لایه پشتیبان منتقل میکند.

تحقیق و بررسی پدیده نفوذ در سرامیکها معمولاً به سه روش انجام می پذیرد: ۱) روشهای تجربی و نیمه تجربی, ۲) روشهای عددی، ۳) روشهای تحلیلی یا مهندسی. تاکنون مدلهای مختلفی اعم از

مدلهای عددی, تجربی و تحلیلی در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی ارائه گردیده است.

در روش عددی به حل کامل تمام معادلات حاکم بر نفوذ با استفاده از روشهای مختلف مانند تفاضل محدود, SPH¹ و اجزاء محدود در محیطهای پیوسته پرداخته میشود. روشهای عددی برای تحلیل مسائل مرکب و پیچیده مناسب است. اولین تحلیل عددی قابل ملاحظه بر اهداف سرامیکی توسط ویلکینز (Wilkins) و همکارانش[1] انجام گردیدهاست. این تحلیل عددی با کد تفاضل محدود (HEMP) برای شبیه سازی برخورد در ضربات قائم انجام شده است. مطالعات انجام شده توسط ویلکینز نشان داده است که برای بهینه ساختن یک سیستم دو جزیی سرامیک لازم است که اثر متقابل پرتابه و هدف به درستی بررسی شود. مدل عددی کرتز (Cortes) و همکارانش، به تحلیل برخورد عددی یک پرتابه استوانه ای به یک زره سرامیک - فلزی به صورت دو بعدی پرداخته است. رفتار ماکروسکوپیک مواد در این مدل عددی، در منطقه ای که سرامیک در حال فرسایش است به وسیله یک مدل ترکیبی با احتساب اصطكاك داخلي و انبساط حجمي ارائه گرديده است [2]. لی (Lee) و همکارانش با استفاده از روش های عددی، برخورد یک پرتابه فولادی را در یک زره سرامیکی سبک وزن بررسی کرده اند و همچنین به مطالعه پدیده هایی مانند فرسایش پرتابه، انتشار ترک، ساختار مخروطی سرامیک و شکست ورق پشت پرداختـهاند [3]. سیمها (Simha) و همکارانش نیز با استفاده از یک مدل محاسباتی

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۳/۱۳ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۳ به تصویب نهایی رسیده است.

سرپرستی داوریها توسط دبیر تخصصی، دکتر شجاعیفرد صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است.

دکتر خداداد واحدی، استادیار گروه مکانیک-دانشگاه امام حسین (ع). Vahedi1710@yahoo.com

نجمه خضرائیان، کارشناس ارشد گروه مکانیک- دانشگاه امام حسین (ع). n_khazra@dr.com

¹ Smoothed Particle Hydrodynamic

و نیز مدل المان محدود به بررسی پاسخ سرامیک های نیمه بی-نهایت با درصد خلوص بالا مانند آلومینا ۹۹/۵٪ در برخورد با یک پرتابه میله ای بلند پرداخته اند و نتایج خوبی در مقایسه با دادههای تجربی بدست آورده اند [4].

مدلهای تحلیلی بر پایه قوانین فیزیکی نسبتاً ساده بنا شدهاند و یکی از روش های شبیه سازی پدیده نفوذ میباشند. از جمله مدلهای تحلیلی ارائه شده در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی می توان از مدل تحلیلی فلورنس (Florence) نام برد. در مدل فلورنس از موازنه انرژی جنبشی پرتابهٔ برخورد کننده به هدف با انرژی جذب شده در ورق پشتیبان، مقدار سرعت حد بالستیک بدست می آید [5]، بعد از آن وودوارد (Woodward) یک مدل تحلیلی یک بعدی برای نفوذ کامل در یک زره سرامیکی با استفاده از روش جرم فشرده ارائه داده است. وودوارد با در نظر گرفتن فرسایش سرامیک و پرتابه و با بکاربردن ورق های پشتیبان نازک و ضخیم، میزان سرعت حد بالستیک و عمق نفوذ را بدست آورده است [6]. در مدل تحلیلی دن ریج_ر (Den Reijer) به بررسی فاز فرسایش و قارچی شدن پرتابه و نیز مدهای مختلف تغییر شکل ورق پشتیبان پرداخته شده است. همچنین معادلاتی برای رفتار سرامیک خرد شده ارائه گردیده است[7]. زائرا (Zaera) یک مدل یک بعدی برای شبیه سازی برخورد بالستیک بر اهداف سرامیک/ فلز محدود ارائه نموده است. در این مدل، نفوذ پرتابه در سرامیک بر پایه معادلات تیت وآلكسيوسكي (Tate & Alekseevskii) و پاسخ ورق پشتيبان بر اساس مدلهای وودوارد و ریجر پایه گذاری گردیده است [8]. در مدل فلوز (Fellows) و همكارانش با استفاده از روش جرم فشرده و در نظر گرفتن سه فاز فرسایشی، قارچی و صلب بودن، برای پرتابه، سرامیک و صفحه پشتیبان به پیش بینی عمق نفوذ در زرههای سرامیکی با ورق های پشتیبان نیمه بینهایت پرداخته شدهاست [9]. در مدلهای تجربی با استفاده از داده های آزمایشی معادلات جبری حاکم بر آنها استخراج و سپس پارامترهای مد نظر پیش بینی می-شوند. مدل های تجربی متعددی ارائه شده است که از آن میان می-توان به آزمایشات بلس (Bless) و همکارانش [10]، میسلز (Mayseless) و همکارانش [11] در زمینه نفوذ در اهداف سرامیکی اشاره کرد.

هم اکنون روش های عددی به دلیل کاهش هزینه و زمان و نیز کاربرد آنها در مسائل پیچیده یکی از روش های مناسب برای تحلیل مسائل نفوذ خصوصاً در اهداف سرامیکی می باشند. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود LS-DYNA عمق نفوذ در هدف سرامیکی با پشتیبان فلزی نیمه بی نهایت و همچنین عمق نفوذ در پشتیبان فلزی بدون در نظر گرفتن لایه رویی سرامیک در اثر برخورد عمودی یک پرتابه میله ای بلند شبیه سازی شده است.

² Lumped Mass

۲. معادلات مشخصه ً

معادلات مشخصه بیانگر طرز رفتار مواد در اثر تغییرات محیط می-باشند. رفتار مواد در تحلیل عددی ارائه شده بر اساس معادله مشخصه جانسون-کوک¹ و الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک مدل می شوند. معادله مشخصه جانسون- کوک، رفتار مواد را تحت کرنش های بزرگ، نرخ کرنش و دمای بالا بیان می کند، بنابراین برای محاسبات عددی و مسائلی که در آنها تغییر شکلهای بزرگ رخ می دهد، مانند برخورد، نفوذ و شکل دهی انفجاری فلزات بسیار مناسب است. اکثر متغیرهای این معادله مشخصه برای برخی مواد فولاد، مس، آلومینیم و تنگستن بدست آورده شده است [12]. داده های ثابت مواد از آزمایشهای پیچش در نرخ کرنش بالا و نیز آزمایش کشش استاتیکی و کشش دینامیکی بدست می آیند. جانسون و کوک عبارت زیر را برای تنش جریان ارائه نموده اند: $\sigma = \left\lceil A + B\varepsilon^n \right\rceil \cdot \left\lceil 1 + c \ln \dot{\varepsilon}^* \right\rceil \cdot \left\lceil 1 - T^{*m} \right\rceil$ (1)که در آن σ تنش جریان مؤثر فون مایزز، arepsilon کرنش پلاستیک $\dot{\epsilon}_0 = 1s^{-1}$ موثر، $\dot{\epsilon}^* = \frac{\varepsilon}{\dot{c}}$ نرخ کرنش پلاستیک بی بعد برای $\dot{\epsilon}^* = \frac{\varepsilon}{\dot{c}}$, A,B,n,c,m دمای متشابه و پنج پارامتر $T^{*} = rac{T - T_{Room}}{T_{melt} - T_{Room}}$ ضرائب ثابت تجربی می باشند [12]. اولین عبارت معادله (۱) از سمت چپ تنش را برحسب تابعی از کرنش می دهد، دومین و سومین عبارت تاثیر نرخ کرنش و دما را بر تنش نشان می دهند. ضرائب ثابت B,n نشان دهنده تأثيرات سختی کرنش، A تنش تسليم و c ثابت نرخ كرنش مي باشند. مدل شکست در مدل جانسون-کوک برپایه کرنش شکست بنا نهاده شده است. پارامتر خرابی کر این مدل برای یک المان به صورت زیر تعريف مي شود: $D = \sum \frac{\Delta \mathcal{E}}{c^f}$ (٢) که $\Delta \varepsilon$ نمو کرنش پلاستیک موثر در طی یک سیکل و ε^f کرنش $\Delta \varepsilon$ شکست می باشد. شکست زمانی اتفاق می افتد که پارامتر خرابی به مقدار یک برسد. عبارت کلی برای کرنش شکست به وسیله عبارت زیر $\varepsilon^{f} = [D_{1} + D_{2} \exp D_{3} \sigma^{*}] [1 + D_{4} \ln \dot{\varepsilon}^{*}] [1 + D_{5} T^{*}]$ (٣) برای مقادیر ثابت ($\sigma^*, \dot{\varepsilon}^*, \sigma^*$) بیان می شود. نسبت $\sigma^* \leq 1.5$ σ_m فشار به تنش موثر بصورت $\sigma^* = rac{\sigma_m}{ar{\sigma}}$ تعریف می شود، که میانگین سه تنش عمودی (تنش هیدرواستاتیک) و $ar{\sigma}$ تنش موثر فون مايزز مي باشد. پارامترهای ثابت شکست $D_5,...,D_1$ از داده های تجربی [12] بدست می آیند. اولین عبارت در رابطه (۳) از سمت چپ نشان دهنده

³ Constitutive Equations

⁴ Johnson-Cook

⁵ Homologous Temperature

⁶ Damage Parameter

وابستگی کرنش شکست به تنش هیدرواستاتیک می باشد. دومین عبارت تاثیر نرخ کرنش و سومین عبارت تاثیر دما را بر کرنش شکست بیان می کند. معادله مشخصه الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک برای موادی که معادله مشخصه الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک برای موادی که تحت کرنش های بالا قرار می گیرند و جایی که رفتار پلاستیک بوسیله تنش تسلیم و مدول سختی تعریف می شود، استفاده می-شود. معادله مقاومت تسلیم با عبارت زیر بیان می شود، استفاده می-شود. معادله مقاومت تسلیم با عبارت زیر بیان می شود، استفاده می که در آن σ_0 تنش تسلیم، \mathcal{F} کرنش پلاستیک موثر، \mathcal{F}_H مدول سختی پلاستیک می باشد و بر حسب \mathcal{F} مدول یانگ و \mathcal{F}_A مدول

$$E_h = \frac{E_t E}{E - E_t}$$

(۵)

مماسی به صورت زیر بیان می شود:

رابطه فشار، حجم و انرژی داخلی توسط معادلات حالت^۷ بیان می-شود. معادلات حالت مای – گرونایزن (Mie-Gruneisen) و چند جمله ایی خطی (Linear polynomial) در این تحلیل عددی مورد استفاده قرار می گیرند.

معادله حالت مای-گرونایزن به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$= \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma + \alpha \mu) E_0 \qquad (\pounds)$$

که در رابطه (۶)، P فشار، S_3, S_2, S_1 ضرائب شیب منحنی U_s که در رابطه (۶)، γ فشار، $U_s - U_p$ شرعت ذره)، γ ضریب $\mathcal{I}_s - U_p$ از مبدا \mathcal{I}_s مرونایزن، C سرعت صوت حجمی (m/s) یا مقدار عرض از مبدا محنی منحنی $U_s - U_p = \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ یا مقدار عرض از مرد α ، $U_s - U_p = \mu$ تراکم، که $\frac{\rho}{\rho_0}$ نسبت چگالی جاری به چگالی اولیه است و E_0 انرژی داخلی می باشد.

جدول ۱. نشان دهنده ضرائب معادله حالت گرونایزن برای تانتالیوم و آلومینا ۸۵٪ می باشند [13].

معادله حالت چند جمله ای خطی بصورت زیر بیان می شود: $p = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E_0$ (۷) که C_6, \dots, C_0 ضرائب ثابت معادله حالت چند جمله ای خطی و پارامتر های μ, E_0 به ترتیب انرژی داخلی و تراکم می باشند.

مقادیر این ضرائب برای آلومینیم (۲۶–۶۰۶۱) که به عنوان ماده پشتیبان در این تحلیل عددی مورد استفاده قرار می گیرد، در جدول ۲ نشان داده شده است [13].

مواد	تانتاليوم	آلومينا٨٥٪
C (m/s)	86	٩٠٠٣
S_1	1/14	-٣/•٢۶
S_2	٠/٠٧۴	۲/۳۵۰
S ₃	-٠/٠٣٨	-•/٣٨٣
γ	۱/۶	١

ضرائب	آلومينيم(T۶-۶۰۶۱)
$C_0(Mbar)$	*
$C_1(Mbar)$	•/٧۴٢
$C_2(Mbar)$	۰ /۶ • ۵
$C_3(Mbar)$	۰/۳۶۵
C_4	١/٩٧
<i>C</i> ₅	•
C_6	*

۴. شبیه سازی عددی

مدل عددی مورد نظر بوسیله شرایط تقارن محوری و با استفاده از LS-DYNA انجام می گیرد. این نرم افزار کد محاسباتی (دو بعدی و سه بعدی) اجزاء محدود است که برای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم های سازهای، جامداتی و سیالاتی در مقابل بارهای ضربه ای و تغییر شکلهای بزرگ به کار برده می شود. روش حل مسائل در این نرم افزار بر پایه انتگرال زمانی صریح صورت می گیرد.

۱-۴. مدل اجزاء محدود

در شکل ۱ مدل اجزاء محدود ارائه شده است. در قسمت (الف) هدف بدون لایه رویی سرامیکی فرض می شود و در قسمت (ب) ورق پشتیبان با لایه سرامیکی پوشانده میشود. به علت تشابه دو مدل ارائه شده در بیشتر موارد، بررسی مدل قسمت (ب) ترجیح داده میشود.

سه بخش پرتابه (تانتالیوم)، سرامیک (آلومینا ۸۵٪) و پشتیبان(آلومینیم(۲۶–۶۰۶)) برای ترسیم و مدل بندی قسمت (ب) انتخاب می شود. در این بررسی قطر پرتابه ۴/۹ میلی متر با نسبت منظری 5=*L/D* در نظر گرفته می شود. سرامیک با ضخامت ۹/۳ و شعاع ۵۰ میلی متر و ابعاد پشتیبان ۵۰*۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته می شود. با توجه به ابعاد پشتیبان می توان آنرا یک هدف نیمه بی نهایت در نظر گرفت.

⁷ Equations of State (EOS)

⁸ Volume Correction Factor

برای مش بندی مدل از حالت اتوماتیک و از نوع شبکه بندی ورق (Plate) استفاده می شود. بدین منظور با اتنخاب خطوط مورد نظر و تعداد مش ها برای هر سطح به شبکه بندی مدل پرداخته می شود. برای مش بندی مدل مورد نظر، ورق پشتیبان به (۲۰۰ «۵۰) ۹۰۰ شبکه، سرامیک به (۱۰ «۵۰ ۵۰۰ قسمت و پرتابه به (۳۰ «۳۰)



در این تحلیل به علت استفاده از شرایط تقارن محوری برای کلیه بخش ها از فرمول المان شماره ۱۴ استفاده می شود این نوع المانها به صورت تقارن محوری و برای المانهای پوستهای دو بعدی به کاربرده می شوند [14].

لايه رويی زره، سراميک نازک از جنس آلومينا 85– AD با دانسيته 767، kg/m^3 تنش تسليم کششی GPa ۵۵۵، مدول برشی ۲۰۸۵ می باشد. اين ماده به علت دارا بودن عملکرد برشی مناسب، قيمت کم و دسترسی فراوان بطور گسترده در تحقيقات دانشمندان مورد توجه قرار گرفته است. صفحه پشتيبان از آلومينيم (۶۰۶–۶۰۱) با دانسيته 7۷۵۰ kg/m^3 و مدول برشی R/m^3 و پرتابه از جنس تانتاليوم، با دانسيته kg/m^3 مدانب مانبا 19۶۵ و مدول برشی ۲۶۹ مانتخاب گرديده است. ضرائب شکست تانتاليوم برطبق معادله جانسون – کوک برابر با مقادير زير می باشند:

 $D_1 = 0.7, D_2 = 0.32, D_3 = -1.5, D_4 = D_5 = 0$

۲-۲. سطوح تماس

الگوریتم تماس، شرایط نفوذپذیری را اعمال می کند. در این مدل از دو سطح تماس استفاده می شود. سطوح تماس به واسطه انتخاب شرایط تقارن محوری از نوع اتوماتیک بوده و هر بخش به عنوان یک سطح اثر برگزیده می شود. سطح اثر اول بین پرتابه و سرامیک می-باشد که گره های پرتابه به عنوان slave و گره های سرامیک به

عنوان Master و در سطح اثر دوم پرتابه slave و ورق پشتیبان Master می باشد. به علت اینکه شکست خیلی سریع اتفاق می افتد و سرعت برخورد بالا است، ضرایب دینامیکی و استاتیکی اصطکاک تاثیر مهمی بر روند شبیه سازی مسأله ندارند.

۳-۴. شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرایط مرزی این مسئله با انتخاب محور y به عنوان محور تقارن محوری ایجاد می شوند. لبه های خارجی هدف در فاصله ۵۰ میلیمتر از محور تقارن مدل ثابت می باشند. تنها شرط اولیه مسأله سرعت برخورد یا سرعت اولیه پرتابه می باشد که بر کل گره های پرتابه اعمال می شود. در این شبیه سازی سرعت برخورد در محدودهٔ ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ m/s مورد نظر می باشد

۴-۴. پارامترهای کنترلی

برای کنترل خروجی ها، زمان توقف حل، بهبود دقت محاسبات، کنترل سطوح تماس، محاسبه پله های زمانی، از پارامترهای کنترلی استفاده می شود.

از مهمترین پارامترهای کنترلی ضریب مقیاس قدم زمانی می باشد. برای پایداری عددی، انداره گام زمانی Δ برای هر نمو زمانی باید کوچکتر از زمان گذر موج تنش از کوچکترین اجزاء شبکه بندی شده باشد. در مسائل برخورد که تغییر شکلهای بزرگ رخ می دهد مقدار گام زمانی Δ در طول شبیه سازی تغییر می کند. در دو بعد رابطه زیر برقرار است:

 $d = \frac{1}{SCFT} C_w \Delta t$

که برای تعیین مقدار (SCFT) (ضریب مقیاس قدم زمانی C_w یا TSSF) به کار برده می شود. b طول کوچکترین جزء، C_w یا TSSF) به کار برده می شود. d مول کوچکترین جزء، سرعت موج کششی در ماده که برابر است با $\frac{\overline{E}}{\rho}$ ، T مدول یانگ

و ho دانسیته مواد می باشد [15].

(λ)

پارامتر کنترلی آور گلاس^{۱۰} به منظور جلوگیری از ایجاد مدهای تغییر شکل انرژی صفر در کل تحلیل انتخاب می شود. بنابراین ضریب ویسکوزیته آورگلاس برابر ۰/۰، نوع ویسکوزیته بالک (bulk) برابر یک و 1.5= quadratic bulk viscosity در نظر گرفته می شود. کل بازه زمانی ۸۵ μ ۵ و گام زمانی برای رسم d3plot (فایلهای گرافیک) نیز μ ۶ فرض می شود. بقیه پارامترهای کنترلی به صورت پیش فرض انتخاب می شوند.

۵. نتایج و بحث

تحلیل عددی ارائه شده در این مقاله مقادیر عمق نفوذ و سرعت پرتابه را در بازهٔ سرعت های برخورد از ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ m/s می-

⁹ Time Step Scale Factor

¹⁰ Hourglass

دهد. در شبیه سازی انجام شده ساختار پشتیبان نیمه بی نهایت مورد نظر بوده است و بنابراین عمدهترین پارامتر مد نظر عمق نفوذ در پشتیبان می باشد. نتایج شتاب، انرژی جنبشی، انرژی داخلی را نیز می توان به صورت نمودارهایی ارائه نمود. در این شبیه سازی از معادلات مشخصه مختلف مانند جانسون-کوک و الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک استفاده شد. در بیان رفتار سرامیک در این تحلیل از معادله الاستیک پلاستیک با تنش کششی شکست سرامیک^{۱۱} استفاده شده است. استفاده از معادله مشخصه مواد شکننده در صورتی که دادههای آزمایشی آن فراهم باشد، نتایج واقعیتری میدهد. بدست آوردن ضرائب معادلات حالت مانند تجربی[13]، این ضرائب استخراج گردیده اند.

از آنجا که اعمال شرایط مرزی در روش لاگرانژی بسیار ساده تر از روش اویلری است و همچنین سرعت و دقت حل مسائل نفوذ در این روش نسبت به روش اویلری برتری دارد در این تحلیل از روش لاگرانژی استفاده شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل شامل تغییر شکل, کانتور تغییر شکل و کانتور سرعت، با سرعت برخورد m/s ۱۳۵۰ در شکلهای ۲ و ۳ مشاهده می شود. با توجه به شکل ۲ موقعیت پرتابه در طی فرآیند در زمانهای مختلف مشاهده می گردد. به عبارتی میزان عمق نفوذ در زمانهای مختلف را می توان ملاحظه کرد. موقعیت پرتابه، زمانی که سرعت پرتابه صفر گردد، مهم است و می توان عمق نفوذ را از آن بدست آورد. در شکل ۳ کانتور سرعت و موقعیت نشان داده شده است. با توجه به کانتور سرعت، زمان لازم برای توقف پرتابه بدست می آید و سپس با استفاده از کانتور تغییر مکان و همچنین زمان توقف پرتابه (زمانی که سرعت پرتابه صفر می شود) می توان موقعیت پرتابه را در انتهای فرآیند که برابر توقف کامل پرتابه است، بدست آورد و سپس عمق نفوذ پرتابه تعیین می شود. به عنوان مثال می توان عمق نفوذ دو گره از پرتابه، یکی در سر بالای پرتابه و دیگری در قسمتی از پرتابه که هنگام توقف پرتابه در سر پایینی آن قرار می گیرد، را با مشاهده نمودار سرعت برحسب زمان شکل ۴ و نمودار موقعیت بر حسب زمان شکل ۵ بدست آورد. همانطور که در شکل ۴ دیده می شود، سرعت اولیه پرتابه m/s ۱۳۵۰ می باشد و با افزایش زمان به مقدار صفر کاهش می یابد با در نظر گرفتن زمان و نمودار موقعیت (شکل ۵) می توان عمق نفوذ را برای دو گره ذکر شده بدست آورد. محورهای مختصات در قسمت پایین مدل، (شکل ۱) قرار گرفته اند، بنابراین بــا توجه به اندازه سرامیک و پرتابه می توان عمق نفوذ را محاسبه میزان عمق نفوذ بر حسب سرعت برخورد در شکل ۶ برای دو حالت مختلف هدف شامل الف) هدف بدون لایه سرامیکی و ب) هدف با لایه سرامیکی

¹¹ Pressure Cut-off

نشان داده شده است. سرعت های برخورد بین ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ *m/s* در نظر گرفته شده است. به طور کلی ملاحظه می شود که با افزایش سرعت برخورد میزان عمق نفوذ افزایش می یابد. همچنین با مقایسه دو نمودار (الف) و (ب) مشاهده می شود که با افزودن لایــه سرامیکی کاهش قابل ملاحظه ایی در مقدار عمق نفوذ بوجود می آید که خود نشان دهنده مفید بودن لایه سرامیکی به عنوان لایه حفاظتی بر روی اهداف فلزی می باشد. همچنین نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشی [10] توافق خوبی را نشان می-دهند.







www.SID.ir



شکل ۶. مقایسه نتایج عددی عمق نفوذ بر حسب سرعت برخورد با داده های آزمایشی[10]. الف) برای هدف بدون لایه سرامیکی. ب) برای هدف با در نظر گرفتن لایه سرامیکی

www.SID.ir

[9] Fellows N. A., Barton P. C., *Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armor*, Int. J. Impact Eng, Vol. 22, 1999, pp.793-811.

[10] Bless S. J., Rozenberg Z., Yoon B., "*Hypervelocity penetration of ceramics*", Int. J. Impact Eng, Vol. 5, 1987, pp.165-171.

[11] Mayseless M., Goldsmith W., Virosterk S. P., Finnegan S.A., "*Impact on ceramic targets*", J. Appl. Mech., Vol. 54, 1987, pp. 373-378.

[12] Johnson G. R., Cook W. H., "Fracture characteristics of three metal subjected to various strain, strain rates, temperature and pressure", Eng Fracture Mech., Vol. 21, No. 1, 1985, pp. 31-48.

[13] Marsh P. S., "LASL shock hugoniot data", University Of California Press, Berkeley, 1980, pp.136, 181, 373.

[14] "LS-DYNA Manual Reference", Livermore Software Technology Corporation, 2001.

[15] Lim C. T., Shim V. P. W., Ng Y. H., "Finite-element modeling of the ballistic impact on fabric", Int. J. Impact Eng, Vol. 28, 2003, pp. 13-31.

فهرست علائم

فاكتور تصحيح حجمى lphaضرائب ثابت تجربي مدل جانسون-كوك A, B, n, c, mسرعت موج کششی C_w سرعت صوت حجمی یا مقدار عرض از مبدا U_s-U_P ضرائب ثابت معادله حالت چند جمله ای خطی $c_0,...,c_6$ طول كوچكترين المان dشکست مرائب ثابت تجربی برای شکست $D_1,...,D_5$ D Ε انرژی داخلے E_0 مدول مماسى E_t E_H ضريب سختي پلاستيك فشار Р $\mathrm{U_s}$ - $\mathrm{U_P}$ منحنى منحنى S_1, S_2, S_3 SCFT ضریب مقیاس گام زمانی دمای محیط و دمای ذوب T_{ROOM}, T_{melt} دمای یکنواخت T^* سرعت موج شاک U_s سرعت ذره U_P γ ضريب گرونايزن کرنش پلاستیک موثر arepsilon

اختلاف داده های آزمایشی با نتایج حاصل از شبیه سازی در سرعتهای نسبتاً پایین تر می تواند به علت انتخاب معادلات مشخصه باشد. برخی از معادلات مشخصه مانند الاستیک-پلاستیک هیدرودینامیک در سرعتهای پایین از دقت خوبی برخوردار نیستند.

۶. نتیجه گیری

مدل عددی ارائه شده در این مطالعه با استفاده از نرم افزار -LS DYNA تحلیل شده است. عمق نفوذ در پشتیبان نیمه بی نهایت آلومینیمی با روکش سرامیک (آلومینا) و بدون در نظر گرفتن لایه سرامیکی در اثر برخورد یک پرتابه میله ای بلند با جنس تانتالیوم بدست می آید. محدودهٔ سرعت برخورد از ۶۱۰ تا ۲۵ سر ۱۳۵۰ در نظر گرفته شد. معادله مشخصه جانسون-کوک و الاستیک پلاستیک هیدرودینامیک با معادلات حالات مای-گرونایزن و چند جملهای خطی در این مدل عددی استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با در نظر گرفتن لایه سرامیکی بر روی ورق نیمه بی نهایت آلومینیمی عمق نفوذ کاهش قابل توجهی را نشان می دهد. همچنین نتایج حاصل از حل عددی و داده های تجربی تطابق خوبی را نشان می دهند. بنابراین استفاده از هیدروکدها و نرم

مراجع

[1] Wilkins M. L., "Mechanics of penetration and perforation", Int. J. Eng. Science, Vol.16, 1978, pp. 793-803.

[2] Cortes R., Navarro C., Martinez M. A., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V., "Numerical modeling of normal impact on ceramic composite armours", Int. J. Impact Eng., Vol. 9, 1992, pp. 639-651.

[3] Lee M., Yoo Y. H., "Analysis of ceramic/metal armour systems", Int. J. Impact Eng., Vol. 25, 2001, pp. 819-829.

[4] Hari Manoj Simha C., Bless S. J., Bedford A., "Computational modeling of penetration response of a highpurity ceramic", Int. J. Impact Eng., Vol.27, 2002, pp. 65-86.

[5] Florence A. L., "Interaction of projectile and composite armour part 11", Stanford Research Institute Menlo Park, California, USA., AMMRG-CR-69-15, 1969.

[6] Woodward R. L., "A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite defeat", Int. J. Impact Eng., Vol. 9, No. 4, 199, pp.455-747.

[7] Reijer P. C., "*Impact on ceramic faceed armours*", Ph.D Thesis, Delft University of Technology, 1991.

[8] Zaera R., Sanchez-Galvez V., "Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours", Int. J. Impact Eng., Vol. 21, No. 3, 1998, pp. 133-148.

که نمو کرنش پلاستیک موثر
$$\delta \varepsilon$$
 نرخ کرنش پلاستیک بی بعد
 $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ تنش جریان موثر فون مایزز
 σ تراکم 1 $-\frac{\rho}{\rho_0} - \mu$
پسراکم 1, جاری به چگالی اولیه