

## شبیه سازی عددی نفوذ بالستیکی پرتابه های میله های بلند در اهداف سرامیک / فلزی

### خداداد واحدی و نجمه خضرائیان

**چکیده:** در این مقاله، نفوذ در اهداف سرامیکی با پشتیبان نیمه بی نهایت آلومینیومی در برخورد با پرتابه های بلند از جنس تانتالیوم بررسی می شود. برای حل معادلات نفوذ، از نرم افزار المان محدود LS-DYNA استفاده شده است. 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 چند جمله ای خطی می باشد. سرعت های برخورد از ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ m/s برای 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 داده های آزمایشی از دقت خوبی برخوردار است.

**واژه های کلیدی:** برخورد بالستیک، زره سرامیکی، شبیه سازی عددی، نفوذ، LS-DYNA

#### ۱. مقدمه

سرامیک ها به علت داشتن خواصی مانند دانسیته پایین، مقاومت فشاری بالا و مدول بالک و برشی بالا مدت ها است به عنوان یک زره حفاظتی در سیستم های بالستیکی به کار می روند. در کاربردها، معمولاً زره های سرامیکی با پشتیبان تقویت می شوند. پشتیبان انرژی جنبشی باقی مانده پرتابه را بعد از شکست سرامیک جذب می کند و باعث پایداری سرامیک در طی فرآیند نفوذ می گردد. 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 برگشت امواج کششی اتفاق می افتد، این مخروط سرامیکی، بار ناشی از برخورد پرتابه را به سطح وسیع تر پایه مخروط روی لایه پشتیبان منتقل می کند.

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

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 داوری ها توسط دبیر تخصصی، دکتر شجاعی فرد 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

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 روش های مختلف مانند تفاضل محدود،<sup>1</sup> SPH و اجزاء محدود در محیط های پیوسته پرداخته می شود. روش های عددی برای تحلیل مسائل مرکب و پیچیده مناسب است. اولین تحلیل عددی قابل ملاحظه بر اهداف سرامیکی توسط ویلکینز (Wilkins) و همکارانش [1] انجام گردیده است. 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 (Cortez) و همکارانش، به تحلیل برخورد عددی یک پرتابه استوانه ای به یک زره سرامیک - فلزی به صورت دو بعدی پرداخته است. رفتار ماکروسکوپی مواد در این مدل عددی، در منطقه ای که سرامیک در حال فرسایش است به وسیله یک مدل ترکیبی با احتساب اصطکاک داخلی و انبساط حجمی ارائه گردیده 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 پرداخته اند [3]. سیمها (Simha) و همکارانش نیز با استفاده از یک مدل محاسباتی

<sup>1</sup> Smoothed Particle Hydrodynamic

## ۲. معادلات مشخصه<sup>۳</sup>

معادلات مشخصه بیانگر طرز رفتار مواد در اثر تغییرات محیط می-باشند. رفتار مواد در تحلیل عددی ارائه شده بر اساس معادله مشخصه جانسون-کوک<sup>۴</sup> و الاستیک-پلاستیک هیدروپلاستیک 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:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] \cdot [1 + c \ln \dot{\epsilon}^*] \cdot [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  تنش جریان مؤثر فون مایز،  $\epsilon$  کرنش پلاستیک مؤثر،  $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} = 1s^{-1}$  برای بعد بعد برای  $\dot{\epsilon}_0 = 1s^{-1}$

$$T^* = \frac{T - T_{Room}}{T_{melt} - T_{Room}}$$

دمای متشابه<sup>۵</sup> و پنج پارامتر  $A, B, n, c, m$

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 تأثیرات سختی کرنش،  $A$  تنش تسلیم و  $c$  ثابت نرخ کرنش می باشند.

مدل شکست در مدل جانسون-کوک برپایه کرنش شکست بنا نهاده شده است. پارامتر خرابی<sup>۶</sup> در این مدل برای یک المان به صورت زیر تعریف می شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^f} \quad (2)$$

که  $\Delta \epsilon$  نمو کرنش پلاستیک مؤثر در طی یک سیکل و  $\epsilon^f$  کرنش شکست می باشد. شکست زمانی اتفاق می افتد که پارامتر خرابی به مقدار یک برسد.

عبارت کلی برای کرنش شکست به وسیله عبارت زیر

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (3)$$

برای مقادیر ثابت  $(T^*, \dot{\epsilon}^*, \sigma^*)$  و نیز  $\sigma^* \leq 1.5$  بیان می شود. نسبت فشار به تنش مؤثر بصورت  $\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma}$  تعریف می شود، که  $\sigma_m$  میانگین سه تنش عمودی (تنش هیدرواستاتیک) و  $\sigma$  تنش مؤثر فون مایز می باشد.

پارامترهای ثابت شکست  $D_1, \dots, D_5$  از داده های تجربی [12] بدست می آیند. اولین عبارت در رابطه (۳) از سمت چپ نشان دهنده

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 داده های تجربی بدست آورده اند [4].

مدلهای تحلیلی بر پایه قوانین فیزیکی نسبتاً ساده بنا شده اند و یکی از روش های شبیه سازی پدیده نفوذ می باشند. از جمله مدل های 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 پرتابه 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<sup>۲</sup> 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 ریجر (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 و آلکسیوسکی (Tate & Alekseevskii) و پاسخ ورق پشتیبان بر اساس مدل های وودوارد و ریجر پایه گذاری گردیده است [8]. در مدل فلوز (Fellows) و همکارانش 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 زره های سرامیکی با ورق های پشتیبان نیمه بی نهایت پرداخته شده است [9]. در مدل های 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.

<sup>3</sup> Constitutive Equations

<sup>4</sup> Johnson-Cook

<sup>5</sup> Homologous Temperature

<sup>6</sup> Damage Parameter

<sup>2</sup> Lumped Mass

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 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:

$$\sigma_y = \sigma_0 + E_h \varepsilon \quad (4)$$

که در آن  $\sigma_0$  تنش تسلیم،  $\varepsilon$  کرنش پلاستیک موثر،  $E_H$  مدول سختی پلاستیک می باشد و بر حسب  $E$  مدول یانگ و  $E_t$  مدول مماسی به صورت زیر بیان می شود:

$$E_h = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (5)$$

### ۳. معادلات حالت

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

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

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma + \alpha \mu) E_0 \quad (6)$$

که در رابطه (۶)،  $P$  فشار،  $S_1, S_2, S_3$  ضرائب شیب منحنی  $U_s - U_p$ ،  $U_s$  سرعت موج شاک و  $U_p$  سرعت ذره،  $\gamma$  ضریب گرونایزن،  $C$  سرعت صوت حجمی ( $m/s$ ) یا مقدار عرض از مبدا منحنی  $U_s - U_p$ ،  $\alpha$  فاکتور تصحیح حجمی<sup>۸</sup> و  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  تراکم، که 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:

$$p = c_0 + c_1 \mu + c_2 \mu^2 + c_3 \mu^3 + (c_4 + c_5 \mu + c_6 \mu^2) E_0 \quad (7)$$

که  $C_0, \dots, C_6$  ضرائب ثابت معادله حالت چند جمله ای خطی و پارامترهای  $\mu, E_0$  به ترتیب انرژی داخلی و تراکم می باشند. مقادیر این ضرائب برای آلومینیم (۶۰۶۱-T۶) که به عنوان ماده پشتیبان در این تحلیل عددی مورد استفاده قرار می گیرد، در جدول ۲ نشان داده شده است [13].

جدول ۱. ضرائب معادله حالت گرونایزن

مواد	تانتالیوم	آلومینا ۸۵٪
C (m/s)	۳۴۰۰	۹۰۰۳
S <sub>1</sub>	۱/۱۷	-۳/۰۲۶
S <sub>2</sub>	۰/۰۷۴	۲/۳۵۰
S <sub>3</sub>	-۰/۰۳۸	-۰/۳۸۳
$\gamma$	۱/۶	۱

جدول ۲. ضرائب معادله حالت چند جمله ای خطی

ضرائب	آلومینیم (۶۰۶۱-T۶)
C <sub>0</sub> (Mbar)	۰
C <sub>1</sub> (Mbar)	۰/۷۴۲
C <sub>2</sub> (Mbar)	۰/۶۰۵
C <sub>3</sub> (Mbar)	۰/۳۶۵
C <sub>4</sub>	۱/۹۷
C <sub>5</sub>	۰
C <sub>6</sub>	۰

### 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.

#### ۴-۱. 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 می شود. به علت تشابه دو مدل ارائه شده در بیشتر موارد، بررسی مدل قسمت (ب) ترجیح داده می شود.

سه بخش پرتابه (تانتالیوم)، سرامیک (آلومینا ۸۵٪) و پشتیبان (آلومینیم (۶۰۶۱-T۶)) برای ترسیم و مدل بندی قسمت (ب) انتخاب می شود. در این بررسی قطر پرتابه ۴/۹ میلی متر با نسبت منظری  $L/D=5$  در نظر گرفته می شود. سرامیک با ضخامت ۹/۳ و شعاع ۵۰ میلی متر و ابعاد پشتیبان  $50 \times 100$  میلی متر در نظر گرفته می شود. با توجه به ابعاد پشتیبان می توان آنرا یک هدف نیمه بی نهایت در نظر گرفت.

<sup>7</sup> Equations of State (EOS)

<sup>8</sup> Volume Correction Factor

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.

### ۴-۳. 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 گرہ های پرتابه اعمال می شود. در این شبیه سازی سرعت برخورد در محدوده 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، اندازه گام زمانی  $\Delta t$  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  $\Delta t$  در طول شبیه سازی تغییر می کند. در دو بعد رابطه زیر برقرار است:

$$d = \frac{1}{SCFT} C_w \Delta t \quad (8)$$

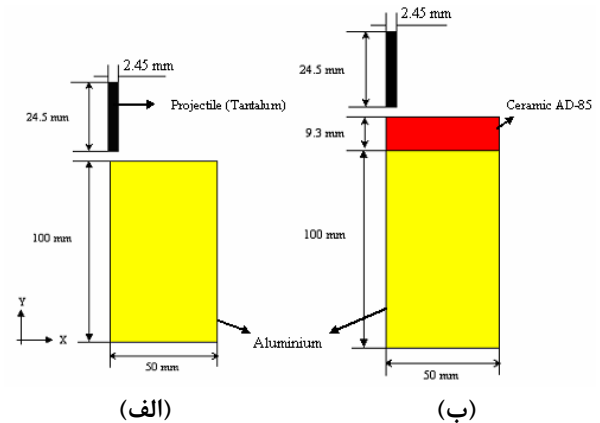
که برای تعیین مقدار (SCFT) (ضریب مقیاس قدم زمانی یا TSSF) به کار برده می شود.  $d$  طول کوچکترین جزء،  $C_w$  سرعت موج کششی در ماده که برابر است با  $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ،  $E$  مدول یانگ و  $\rho$  دانسیته مواد می باشد [15].

پارامتر کنترلی آور گلاس<sup>۱۰</sup> به منظور جلوگیری از ایجاد مدهای تغییر شکل انرژی صفر در کل تحلیل انتخاب می شود. بنابراین ضریب ویسکوزیته آورگلاس برابر ۰/۱، نوع ویسکوزیته بالک (bulk) برابر یک و  $quadratic\ bulk\ viscosity = 1.5$  در نظر گرفته می شود. کل بازه زمانی ۸۵  $\mu s$  و گام زمانی برای رسم  $d3plot$  (فایلهای گرافیک) نیز ۱  $\mu s$  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 بازه سرعت های برخورد از ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ m/s می -

برای مش بندی مدل از حالت اتوماتیک و از نوع شبکه بندی ورق (Plate) استفاده می شود. بدین منظور با انتخاب 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 (۱۰\*۵۰) ۵۰۰۰ شبکه، سرامیک به (۱۰\*۵۰) ۵۰۰ قسمت و پرتابه به (۳۰\*۳۰) ۹۰ شبکه تقسیم می شوند.



شکل ۱. مدل اجزاء محدود. الف: هدف بدون لایه سرامیکی

ب: هدف با لایه سرامیکی

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 پوسته ای دو بعدی به کار برده می شوند [14].

لایه رویی زره، سرامیک نازک از جنس آلومینا AD-85 با دانسیته  $3420\ kg/m^3$ ، تنش تسلیم کششی  $0.185\ GPa$  مدول برشی  $108\ GPa$  می باشد. این ماده به علت دارا بودن عملکرد بالستیکی مناسب، قیمت کم و دسترسی فراوان بطور گسترده در تحقیقات دانشمندان مورد توجه قرار گرفته است. صفحه پشتیبان از آلومینیم (T6-6061) با دانسیته  $2750\ kg/m^3$  و مدول برشی  $26\ GPa$  و پرتابه از جنس تانتالیوم، با دانسیته  $16650\ kg/m^3$  و مدول برشی  $69\ GPa$  انتخاب گردیده است. ضرائب شکست تانتالیوم برطبق معادله جانسون - کوک برابر با مقادیر زیر می باشند:

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

### ۴-۲. سطوح تماس

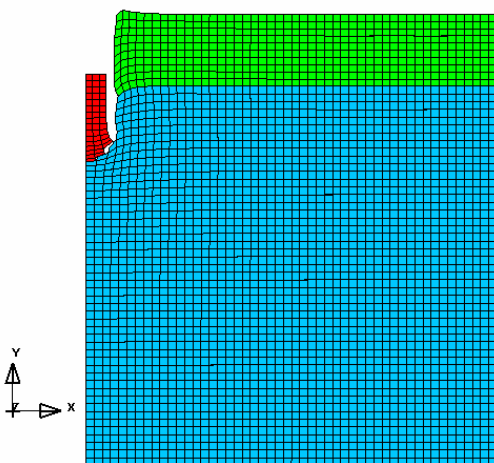
الگوریتم تماس، شرایط نفوذپذیری را اعمال می کند. در این مدل از دو سطح تماس استفاده می شود. سطوح تماس به واسطه انتخاب شرایط تقارن محوری از نوع اتوماتیک بوده و هر بخش به عنوان یک سطح اثر برگزیده می شود. سطح اثر اول بین پرتابه و سرامیک می - باشد که گرہ های پرتابه به عنوان slave و گرہ های سرامیک به

<sup>9</sup> Time Step Scale Factor

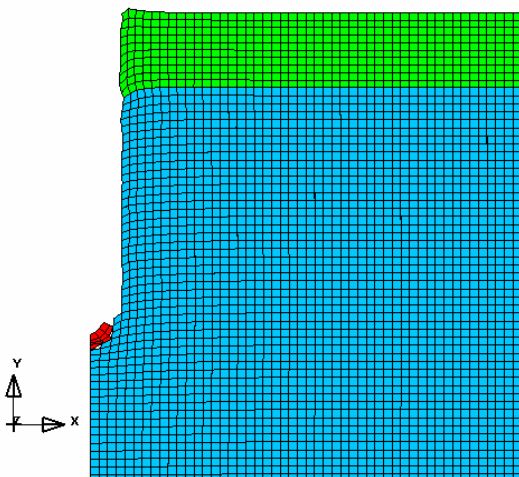
<sup>10</sup> Hourglass

نشان داده شده است. سرعت های برخورد بین ۶۱۰ تا  $1350 \text{ m/s}$  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 لایه 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.

PENETRATION  
STEP 26 TIME = 2.499375E-05



PENETRATION  
STEP 69 TIME = 6.7990484E-05



شکل ۲. تغییر شکل سیستم در برخورد پرتابه تانتالیومی با

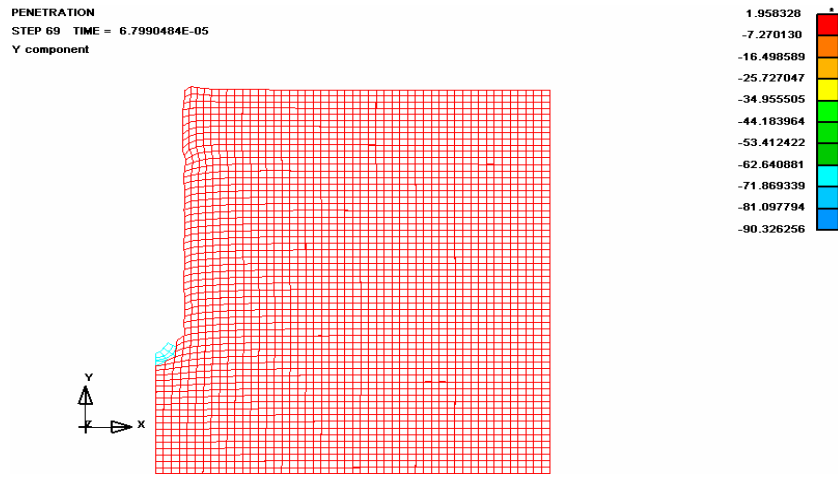
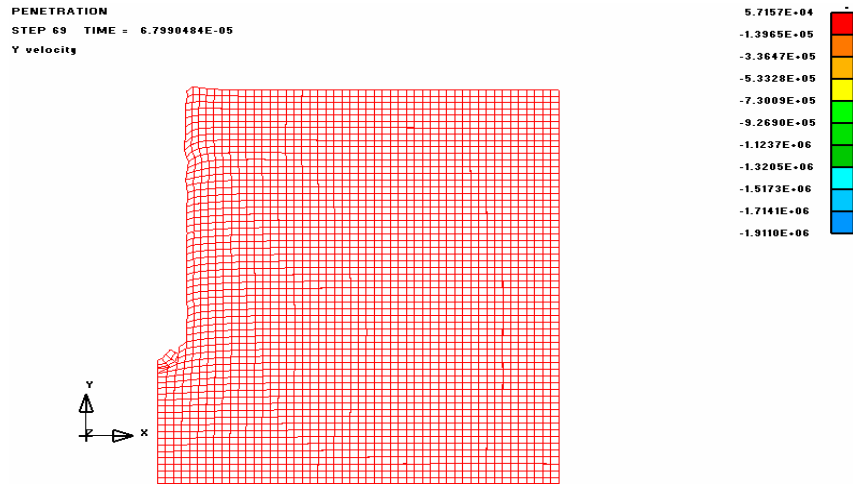
سرعت  $1350 \text{ m/s}$

دهد. در شبیه سازی انجام شده ساختار پشتیبان نیمه بی نهایت مورد نظر بوده است و بنابراین عمده ترین 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<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. استفاده از معادله مشخصه مواد شکننده در صورتی که داده های آزمایشی آن فراهم باشد، نتایج واقعی تری می دهد. بدست آوردن ضرائب معادلات حالت مانند گرونایزن برای سرامیکها از آنجا که به پارامترهای مختلف تجربی نیاز دارد، مشکل می باشد. بنابراین با استناد به پارامترهای تجربی [13]، این ضرائب استخراج گردیده اند.

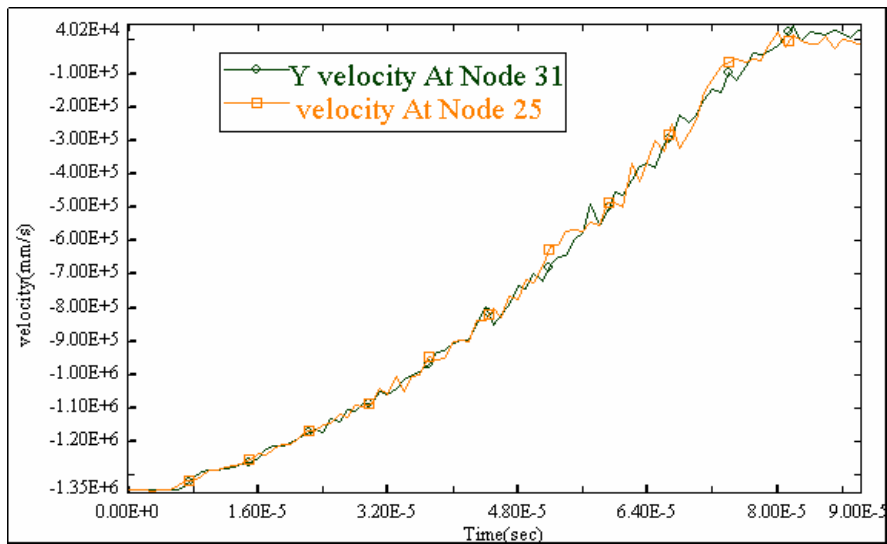
از آنجا که اعمال شرایط مرزی در روش لاگرانژی بسیار ساده تر از روش اولبری است و همچنین سرعت و دقت حل مسائل نفوذ در این روش نسبت به روش اولبری برتری دارد در این تحلیل از روش لاگرانژی استفاده شده است.

نتایج حاصل از شبیه سازی مدل شامل تغییر شکل، کانتور تغییر شکل و کانتور سرعت، با سرعت برخورد  $1350 \text{ m/s}$  در شکل های 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 بر حسب زمان شکل ۴ و نمودار موقعیت بر حسب زمان شکل ۵ بدست آورد. همانطور که در شکل ۴ دیده می شود، سرعت اولیه پرتابه  $1350 \text{ m/s}$  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 با 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

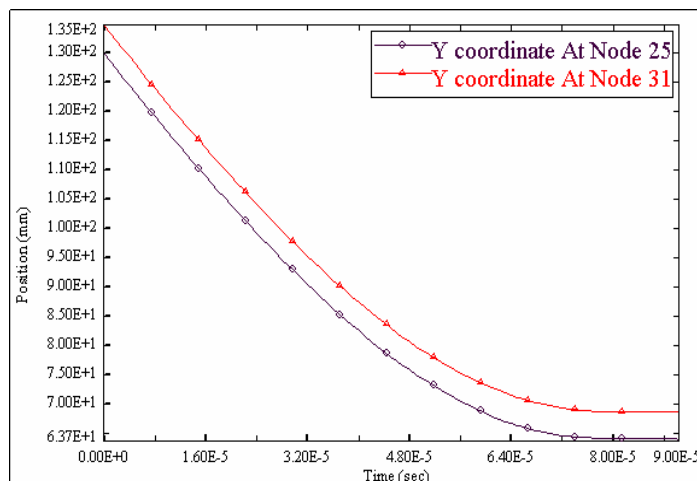
<sup>11</sup> Pressure Cut-off



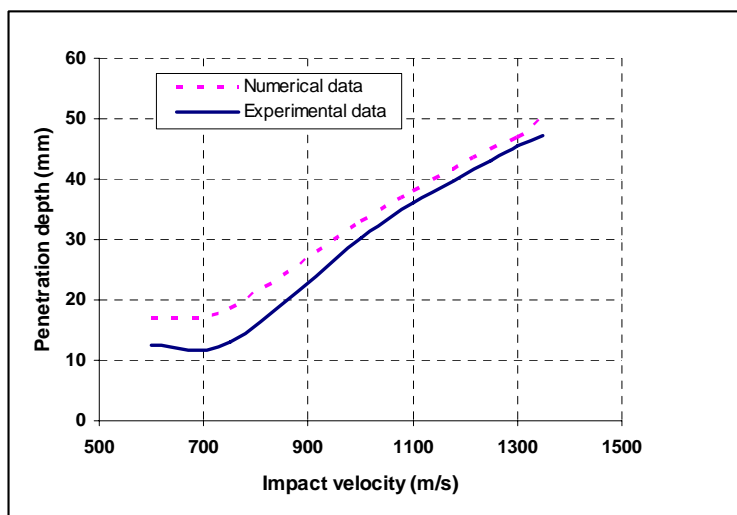
شکل ۳. کانتور تغییر مکان و سرعت پرتابه در سرعت برخورد  $1350 \text{ m/s}$



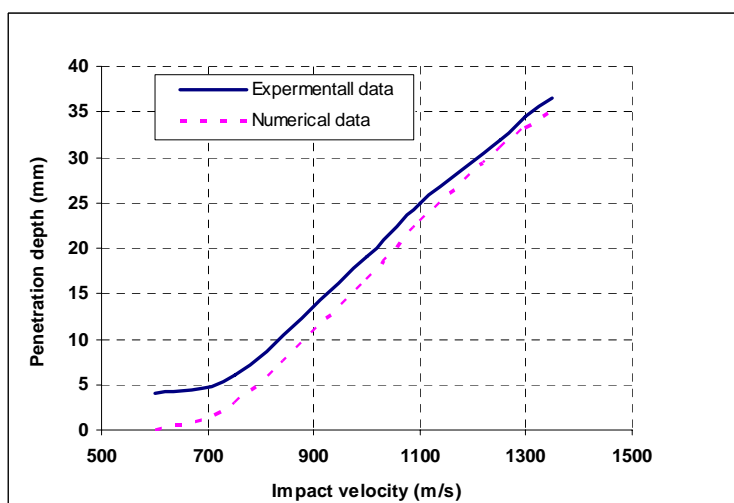
شکل ۴. نمودار سرعت بر حسب زمان برای دو گره از پرتابه با شماره های ۳۱ (سر بالایی پرتابه) و ۲۵ (سر پایینی پرتابه در زمان توقف)



شکل ۵. نمودار موقعیت بر حسب زمان برای دو گره از پرتابه با شماره های ۳۱ (سر بالایی پرتابه) و ۲۵ (سر پایینی پرتابه در زمان توقف)



الف



ب

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

- [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] Maysless 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 hgoniot 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

$\alpha$	فاکتور تصحیح حجمی
$A, B, n, c, m$	ضرائب ثابت تجربی مدل جانسون-کوک
$C_w$	سرعت موج کششی
$C$	سرعت صوت حجمی یا مقدار عرض از مبدا $U_s-U_p$
$c_0, \dots, c_6$	ضرائب ثابت معادله حالت چند جمله ای خطی
$d$	طول کوچکترین المان
$D_1, \dots, D_5$	ضرائب ثابت تجربی برای شکست
$D$	پارامتر خرابی
$E$	ضریب یانگ
$E_0$	انرژی داخلی
$E_t$	مدول مماسی
$E_H$	ضریب سختی پلاستیک
$P$	فشار
$S_1, S_2, S_3$	ضرائب شیب منحنی $U_s - U_p$
$SCFT$	ضریب مقیاس گام زمانی
$T_{ROOM}, T_{melt}$	دمای محیط و دمای ذوب
$T^*$	دمای یکنواخت
$U_s$	سرعت موج شاک
$U_p$	سرعت ذره
$\gamma$	ضریب گرונایزن
$\epsilon$	کرنش پلاستیک موثر

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. محدوده سرعت برخورد از ۶۱۰ تا ۱۳۵۰ m/s در نظر گرفته شد. معادله مشخصه جانسون-کوک و الاستیک پلاستیک هیدرودینامیک با معادلات حالات مای-گرونایزن و چند جمله ای 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 افزارهای عددی راه حل مناسبی برای تحلیل مسائل نفوذ می باشند.

### 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 high-purity ceramic", Int. J. Impact Eng., Vol.27, 2002, pp. 65-86.
- [5] Florence A. L., "Interaction of projectile and composite armour part II", 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 faced 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.



$\Delta E$  نمو کرنش پلاستیک موثر

$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش پلاستیک بی بعد

$\sigma$  تنش جریان موثر فون مایزر

$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  تراکم  $\mu$

$\rho / \rho_0$  نسبت چگالی جاری به چگالی اولیه