

ارائه یک مدل ریاضی جدید برای نفوذ پرتابه تکهای

در هدف سرامیکی نیمه بینهایت

مجتبی ذوالفقاری^{(*»}، سید وحید میر آقایی^۲ ۱ – استادیار ۲ – دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک (تاریخ وصول: ۹۵/۹/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱۹)

چکیدہ

در این مقاله با بررسی مکانیک نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف سرامیکی مدل ریاضی جدیدی جهت پیش بینی نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف نیمه بینهایت سرامیکی ارائه شده است. در بررسیها عوامل سرعت برخورد، طول تکهها، فاصله بین تکهها و تعداد تکهها به جهت اهمیت آنها در عمق نهایی نفوذ مورد توجه قرار گرفته است. نتیجه بررسیها نشان داد سرعت برخورد مهم ترین عامل در افزایش عمق نفوذ بوده و بر خلاف مکانیک نفوذ در پرتابههای میله بلند یکپارچه سرعت حدی هیدرودینامیکی برای نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف نیمه بی نهایت سرامیکی وجود نداشته و روند افزایش عمق نفوذ با افزایش سرعت از سرعت حدی هیدرودینامیکی برای نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف نیمه بی نهایت سرامیکی وجود نداشته و روند افزایش می نفوذ با افزایش سرعت از سرعت حدی هیدرودینامیکی برای نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف نیمه بی نهایت سرامیکی وجود نداشته و روند افزایش می گردد، به گونهای که شکل ایدهآل برای تکهها همان شکل دیسکی تکهها است که نشان گر نقش فاز پس جریان در مکانیک نفوذ نهایی است. پس از اعتبارسنجی شبیه سازی و با تکیه بر زیر برنامه مدل بهبودیافته مدل هلم کوئیست در نرمافزار SAD شبیه سازی اساس تایج طراحی آزمایش جهت ارائه مدل، صورت گرفته است. پس از اطمینان از نتایج به دست آمده، مدلی ریاضی بر اساس روش سطح پاسخ ارائه گردید. با توجه به اینکه نتایج به دست آمده بر اساس تحقیقات صورت گرفته روی اهداف سرامیکی است استفاده از نتایج این تحقیق نیز برای تعلیم متی رفوذ برای گرفته است. با توجه به اینکه نتایج به دست آمده بر اساس تحقیقات صورت گرفته روی اهداف سرامیکی است استفاده از نتایج این تحقیق نیز برای تحلیل نفوذ در اهداف سرامیکی توصیه می گردد. این مقاله می تواند به عنوان مبنایی جدید در مطالعه نفوذ پرتابههای در اهداف با ساس روش سطح پاسخ ارائه گردید.

واژههای کلیدی: پرتابه تکهای، هدف سرامیکی، نفوذ، روش سطح پاسخ.

A New Mathematical Model for the Penetration of Segmented Rod into Ceramic Semi-Infinite Target M. Zolfaghari^{*}, V. Miraghaie

Arak University, Arak, Iran (Received: 8/1/2016, Accepted: 12/5/2016)

Abstract

In this paper by analyzing the penetration mechanics of the segmented rods into semi-infinite ceramic targets, a mathematical model is proposed to predict segmented rod projectiles penetration into semi-infinite ceramic targets. The factors of impact velocity, segments length, segments distance and number of segments are considered, because of their importance in final penetration depth. Results show that the most important factor in penetration depth is impact velocity. Against the penetration mechanics of long rods projectiles, for segmented rod penetrating semi-infinite ceramic targets, there is no hydrodynamic speed limit and the increase rate of penetration depth is corresponding to speed increase for speeds greater than 2500 m/s. In addition, reduction in segments length causes deeper final penetration depth, so that the ideal shape for segments is a disk-like shape. Disk-like shape as ideal shape for segments shows the important role of "after flow phase" in segmented rod penetration mechanics. After validating the simulations and by the use of modified Holm-Quist model subroutine in ABAQUS software, numerous simulations were conducted which were based on design of experiment (DOE) in order to propose a model. After making sure of the results, a mathematical model based on Response Surface method (RSM) is proposed. It is recommended that the results of this study can also be employed in analysis of penetration for ceramic targets. This paper can generate a suite base to study penetration of segmented rod into targets with complex structures.

Keywords: Segmented Rod, Ceramic Target, Penetration, Response Surface Methodology.

* Corresponding Author E-mail: m-zolfaghari@araku.ac.ir

۱– مقدمه

امروزه با ورود سیستمهای پرتاب سرعت بالا مانند توپهای گاز سبک و توپهای انفجاری مخلوط گازی در عرصه نظامی، پرتابههای تکهای میله بلند مورد توجه قرار گرفته است[۱]. مکانیک نفوذ پرتابههای میله بلند، نفوذ یک پرتابه میله بلند یکپارچه را به چهار فاز ۱- گذرا، ۲-پايدار يا اوليه، ٣- پس جريان و ۴- بازيابي تقسيم مي نمايد [٢]. منظور از پرتابههای میله بلند یکپارچه، همان پرتابههای میله بلند معمول مانند گلولههای APFSDS^۲ در کاربردهای نظامی است که غالباً نسبت طول به قطر میله پرتابه بزرگتر از ۱۰ (L/D) است[۳]. پرتابههای تکهای میلهای نوعی پرتابههای میله بلند هستند که میله پکیارچه با تکههای مجزای میلهای جایگزین شده است. از دیـدگاه مکانیـک نفـوذ پرتابههای میله بلند، پرتابههای یکپارچه از فاز پایدار نفوذ بهره می-برند[۴]، درحالی که پرتابههای تکهای از فاز پس جریان نفوذ بهره می-برند[۵]. فاز پس جریان در نفوذ یک پرتابه از زمان تمام شدن کامل طول پرتابه شروع شده و به واسطهی سرعت قسمت انتهایی پرتابه در هدف نفوذ مینماید. فاز پس جریان زمانی که سرعت برخورد به حد کافی بالا باشد، مشروط بر این که فاصله بین تکهها در زمان برخورد و نیز نسبت طول به قطر هر تکه بهینه باشد، اهمیت پیدا میکند. برای نمونه برای نسبت طول به قطـر هـر تکـه برابـر ۱/۸ حـداکثر نفـوذ در سرعتm/s و برای نسبت طول به قطر هر تکه ۱/۱۶ ،عمق نفوذ حداکثر در سرعتm/s ۳۰۰۰ ایجاد خواهد شد[۶].

پرتابه معادل پرتابه تکه ای



۲ تکه-های پرتابه- نسبت طول تکه به فاصله برابر شکل ۱- یک پرتابه تکهای به همراه سابوت و لوله حامل تکهها.

برتری کارایی نفوذ پرتابههای تکهای در صورت ایدهآل بودن شرایط پرتاب و برخورد از ۴۰ تا ۳۰۰ درصد گزارش شده است. منظور از کارایی نفوذ، نسبت عمق نفوذ بر طول اولیه پرتابه (P/L) است. *L* برای پرتابه تکهای مجموع طول تکهها است [۷]. پرتابههای تکهای فلزی بر خلاف پرتابههای یکپارچه در اثر افزایش سرعت، سرعت حد نفوذ ندارند و همواره به ازای افزایش سرعت برخورد عمق نفوذ آنها نیز افزایش مییابد. شاید بتوان برتری ۳۰۰ درصدی به دست آمده در محاسبات نظری را به عدم وجود سرعت حدی نسبت داد[۸]. کارایی نفوذ یک پرتابه تکه ای معادل نسبت به یک پرتابه یکپارچه با نسبت طول به

قطر ۳۰ حاصل شده است. در شکل عمق نفوذ پرتابه یکپارچـه آورده نشده است.

در عمل ایجاد شرایطی که پرتابه بتواند به صورت ایده آل برخورد و نفوذ نماید با مشکلاتی مواجه است. به عنوان یک واقعیت خارجی، شکل حفرہ ایجاد شدہ توسط پرتابہ حالت مخروط با دیوارہ موجدار است. شکل (۲) گویای این واقعیت است که نشان از عدم شرایط برخورد ایده آل دارد. این مشکلات متأثر از دو عامل ۱- سیستم پرتاب (حوزه بالستیک داخلی مانند کمانش پرتابه) و ۲- ساختار پرتابه حاوی تکههاست (برخی مشکلات ساختار پرتابه حاوی تکهها: عدم هم محوری تکهها قبل و حین نفوذ در هدف، چسبیدگی تکهها در حین پرتاب و باز شدن آنها در سیکل پرواز)[۹]. به طور کلی ملاحظات عملی مهم که لحاظ نمودن آنها در جلوگیری از کاهش کارایی پرتابه-های تکهای مهم است عبارت است از: هم محوری تکهها[۱۰] قبل و حین اصابت، رعایت نسبت "فاصله به قطر تکهها" (S/D)، جلوگیری از بالا بودن جرم حامل، اثرات نامطلوب تکههای قبلی و نیز باقیمانده آنها، عدم مسطح بودن و صاف بودن سطح برخورد در هدف. با توجه به اینکه در این مقاله، نفوذ در اهداف سرامیکی مورد توجه است، در ادامه مدلهای مورد استفاده در شبیهسازی نفوذ در اهداف سرامیکی مورد بحث قرار می گیرد. در منابع معتبر به صورت کامل و یک جا و مقایسهای، مدل های مورد استفاده در شبیه سازی مواد

سرامیکی مورد بحث و جمعبندی قرار نگرفته است. شاخص ترین مدل-های مادی مورد استفاده در شبیهسازی رفتار مادی سرامیکها در شرایط برخورد و نفوذ، خانواده مدلهای جانسون هلم- کوئیست (-JH JHB-2, JH-3&JHB) هستند.



شکل ۲ – حفرههای به وجود آمده در اثر نفوذ پرتابههای تکهای.

اثبات کارایی مدلهای مذکور منجر به پایه قرار گرفتن آنها در مطالعات مربوط به نفوذ در اهداف سرامیکی گردیده است. این اثبات با استفاده های متنوعی که در جدیدترین تحقیقات صورت گرفته از خانواده های این مدل شده قابل احراز است. صدمات به وجود آمده روی بدن در اثر اصابت گلوله به جلیقه ضد گلوله سرامیکی با لحاظ نمودن تعامل سه ماده سرامیک (JH-2)، کامپوزیت و ماده هایپر الاستیک که نشاندهنده بافت بدن است[۱۱]، شبیه سازی خردشدگی شیشه های ساختمانی و محاسبه ضرایب مدل ماده I-HI با تاکید بر اینکه شکل مشتق ناپذیر سطوح استحکام در IH-1 با واقعیت

¹⁻ Long Rod

²⁻ Amour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot

شکست ترد شیشه در اثر امواج انفجار تطابق بیشتری دارد، اصلاح مدل در حساسیت به نرخ کرنش کششی و در نتیجه حصول تطابق بیشتر با واقعیت[۱۲] از جمله برخی کاربردهای اخیر مدلهای IH-2 ،JH-1 و JH-3 است.

مدل HBB تعمیمی از مدل I-HJ است که تغییر فاز در اثر فشار را در معادله حالت لحاظ نموده [۱۳] و مبتنی بر نامتغیر دوم تانسور تنش است. با توجه به اعتبار این مدل نیز تحقیقات صورت گرفته بر روی آن قابل توجه است. اضافه نمودن جملهای به مدل استحکام HBB به منظور تأثیر دادن نامتغیر سوم تانسور تنش در این مدل استحکام که موجب گردید واقعیتهای نفوذهای سرعت بالا در مواد سرامیکی و مواد تردی همچون بتن دقیق تر منعکس شود [۱۴]. منظور از این واقعیتها قیود جانبی نقطه تحت بارگذاری حین تغییر شکل در نفوذ است که از طریق معرفی نسبت بارگذاری سه محوره در مدل لحاظ می گردد. علاوه بر این اثر کرنش حجمی در پدیده آسیب لحاظ گردیده است که این مسئله موجب گردیده در زمان بارگذارهای دینامیکی شدید، فرآیند آسیب دقیق تر پیشبینی گردد. استفاده از مدل HBB در شبیه سازی نفوذ در هدف FGM نیز گویای موفقیت مدل HBB در انعکاس رفتار FGM

۱–۱– مکانیک نفوذ پر تابههای تکهای

مطالعه رفتار نفوذ پرتابههای تکهای ^۱ در زیرمجموعه مطالعات مربوط به پرتابههای میله بلند قرار می گیرد. صحت مدل ارائه شده در زیر از طریق آزمایش های صورت گرفته تأیید شده است [۵]. اصول این مدل شبیه اصول مدل نفوذ تیت در مورد پرتابههای میله بلند یکپارچه است. اساساً رفتار نفوذ هر تکه در غالب نفوذ یک میله جداگانه در هدف در نظر گرفته می شود. بر این اساس برای تکه در حال نفوذ سه معادله اساسی نفوذ عبارت است از [7]:

$$\frac{1}{2}\rho_p(\nu-u)^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_t u^2 + R_t \tag{1}$$

$$\frac{dl}{dt} = -(\nu - u) \tag{(Y)}$$

$$\rho_p l \frac{dv}{dt} = -\sigma_{yp} \tag{(7)}$$

ا طول لحظهای پرتابه و Y_p و R_t استحکامهای هیدرودینامیکی پرتابه و هدف بوده و مقادیر آنها با رابطه ارائهشده توسط تیت- برای مواد فلزی- به صورت زیر تقریب زده شده است:

$$Y_{\rm p} = 1.7\sigma_{yp} \ , R_t = \sigma_{yt} [(2/3) + ln(0.5E_t/\sigma_{yt})]$$
(f)

 $u_c = \left[2(R_T - Y_P)/\rho_P\right]^{1/2}$ و $\mu = \left(\rho_t/\rho_p\right)^{1/2}$ معادله (۱) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\bar{l}(d\bar{v}/d\bar{t}) = -1, \qquad d\bar{l}/d\bar{t} = -(\bar{v} - \bar{u}) \tag{9}$$

$$\bar{v}$$

$$= \left\{ \bar{\nu} - [\mu^2 \bar{\nu}^2 + (1 - \mu^2) \bar{\nu}_c^2]^{1/2} \right\} / (1 - \mu^2)$$

= $f(\bar{\nu}) \ \bar{\nu} > \bar{\nu}_c$
 $\bar{u} = 0$
 $\bar{\nu} < \bar{\nu}_c$ (V)

می توان اثبات نمود در صورتی که به ترتیب \overline{U} و \overline{V} مقادیر اولیـه بـرای سرعتهای نفوذ و برخورد تکه در حـال نفـوذ باشـند، آنگـاه مـی تـوان نوشت:

$$\bar{l}_f = \{ \nu_c [\bar{V} - (1 - \mu)\bar{U}] \}^b exp\left[\frac{1}{2} \bar{V} (\bar{V} - \bar{U}) \right] \tag{A}$$

*I*_f طول باقیمانده تکه پس از کاهش سرعت قسمت صلب تکه به پایین از سرعت بحرانی نفوذ است. از آنجایی که در نفوذ پرتابههای تکهای توالی صحیح پرتابه به این صورت است که پس از مصرف شدن تکه در حال نفوذ، تکه بعدی به انتهای حفره ایجاد شده توسط تکه قبلی برخورد کرده و نفوذ کرده و عمق نفوذ را افزایش میدهد، تعیین پارامتر مهم "حداقل فاصله بین تکهها" با ترکیب معادلات حرکت ابتدا و انتهای تکه در حال نفوذ" از یک سو و با معادلات نفوذ از سوی دیگر محاسبه می گردد.

۱-۲- حداقل فاصله بین تکهها به منظور جلـوگیری از برخـورد تکهها با یکدیگر

در عمل مطلوب است زمانی تکه پرتابه به انتهای حفره نفوذ برسد که تکه قبلی تا حد نهایی مصرف شده باشد. مختصه نوک تکه با x و مختصه قسمت انتهایی تکه با y نشان داده می شود. مشتق زمانی x سرعت نوک تکه یا همان سرعت نفوذ و مشتق زمانی y سرعت انتهای تکه یا همان سرعت قسمت انتهای صلب تکه پرتابه را نشان می دهد. شکل بی بعد سرعت نفوذ و سرعت انتهای صلب پرتابه عبارت است از [۵]:

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{u}, \qquad \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} = \bar{v} \tag{9}$$

در لحظه t=0 برای تکه در حال نفوذ میتوان نوشت:

$$\bar{x} = 1, \quad \bar{y} = 0 \qquad at \quad \bar{t} = 0$$
 (1.)

¹⁻ Segmented Rod

با توجه به وابستگی دو پارامتر x و y به مکانیک نفوذ، در حالت کلی حل مسئله حداقل فاصله بین تکهها با استفاده شبیهسازی عددی محاسبه می گردد. نمودار شکل (۳) تغییرات دو پارامتر x و y را به صورت نوعی بر اساس شبیهسازیهای صورت گرفته ارائه داده است. برای سرعتهایی که به حد کافی بزرگتر از سرعت حدی v باشند، سرعت نفوذ تقریباً برابر سرعت حدی جت سیال $\left(\frac{\overline{w}}{1+\mu}\right)$ می گردد. با تقریب این سرعت حدی برای طول میتوان نوشت:





$$\bar{l} = \exp\{[\mu/2(1+\mu)(\bar{\nu}^2 + \bar{V}^2)]\}$$
(1)

با استفاده از معادله (۹) می توان نوشت:

$$\bar{v} = \int \bar{v} d\bar{t} = -\int \bar{v} \bar{l} d\bar{v} \tag{11}$$

رابطهی بین فاصله تکه نفوذکننده با تکهای که هنوز شروع به نفوذ ننموده از طریق در نظر گرفتن مختصهای بنام z روی تکهای که هنوز شروع به نفوذ ننموده با مختصات انتهای تکهی در حال نفوذ بیان می-شود:

$$\bar{z} - \bar{y} = -\int (\bar{V} - \bar{v})\bar{l}d\bar{v} \tag{17}$$

با توجه به بالا بودن سرعت برخورد در نفوذ پرتابههای تکهای، کهش سرعت تکه در حال نفوذ ناچیز بوده و رابطهی (۸) به صورت رابطهی (۱۴) تقریب زده میشود:

$$\bar{l} = exp[-\mu\bar{U}(\bar{V} - \bar{\nu})] \tag{14}$$

با انجام عمل انتگرالگیری از معادله (۱۳) میتوان نوشت:

$$=\frac{\{1-exp[-\mu\overline{U}(\overline{V}-\overline{v})][1+\mu\overline{U}(\overline{V}-\overline{v})]\}}{\mu^{2}\overline{U}^{2}}$$
(1 Δ)

با توجه به ناچیز بودن کاهش سرعت در حین نفوذ ($\overline{V} = \overline{V}$) و به عبارتی مساوی صفر قرار گرفتن معادله (۱۳) پس از انتگرالگیری میتوان نوشت:

$$\bar{z} - \bar{y} = \frac{1}{2} (\bar{V} - \bar{v})^2 \tag{19}$$

با استفاده از معادله (۱۴) می توان حداقل فاصله مورد نیاز جهـت عـدم برخورد دو تکه متوالی را بر اساس سرعت برخورد اولیه به صورت زیر به دست آورد:

$$\bar{s} = \frac{[ln(1/l)]^2}{2\mu^2 \bar{\Pi}^2}$$
(1Y)

برای نفوذ پرتابه تکهای آلیاژ تنگستنی در هدف فولادی با سـرعتی کـه تکهها به طور کامل در حین نفوذ مصرف شوند، فاصله لازم جهت عـدم برخورد عبارت است از:

$$\overline{s} = \frac{10}{\overline{12}} \tag{1}$$

بر اساس معادلـه (۱۷) بـرای سـرعت برخـورد m/s ۱۷۰۰ بـه منظـور جلوگیری از برخورد تکهها لازم است حداقل فاصله بین تکههـا معـادل ۱/۱۸ طول تکهها باشد.

۲- روش تحقیق ۲-۱- شبیهسازی نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف سرامیکی

در شبیه سازی های صورت گرفته جنس پرتابه از طلا و جنس هدف، سرامیکی و از نوع سیلیکن کارباید^۱ است. مدل ماده مورد استفاده برای پرتابه جانسون کوک و مدل ماده مورد استفاده برای هدف سرامیکی "مدل اصلاح شده جانسون هلم - کوئیست" یعنی ^۲ HB از طریق نوشتن و اجرای یک سابروتین در نرمافزار ABAQUS است. با توجه به این که مدل ماده جانسون کوک به کرات در مراجع معتبر مورد استفاده قرار گرفته و شناخته شده برای مطالعه میتوان به مراجع [۱۶] و [۱۷] مراجعه نمود. در مقابل تا جایی که نویسندگان اطلاع دارند در خصوص مدل HBI تشریح و توضیح جامع و کاملی در مراجع وجود نداشته و لازم است به صورت موجز توضیحاتی در ایـن خصوص ارائه گردد.

در سال ۱۹۹۲ جانسون و هلم کوینست (JH-۱) مدلی را به منظور بیان رفتار مواد ترد تحت فشار و نرخ کرنشهای بالا با در نظر گرفتن آسیب ارائه دادند. این مدل شامل سه نمودار استحکام، آسیب و تراکم است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

ویژگی بارز IH-1 نسبت به JH-2 انتقال از حالت بدون آسیب به حالت آسیب کامل به صورت ناگهانی است. مدل JH-2 در سال ۱۹۹۳ با هدف بهبود در مدل IH-1 ارائه گردید. به لحاظ ساختار و ملاحظات همانند مدل JH-1 است، با دو تفاوت عمده ۱- نمودار تغییرات به صورت یک انحنای anglره درآمده (سخت شوندگی کاملاً پیوسته و نمودار مشتق پذیر) ۲-انتقال از حالت بدون آسیب به آسیب کامل نیز تدریجی و هموار انجام می-

1- Silicon Carbide

²⁻ Hohnson, Holmquist, Beissel

شود. در شکل (۵) متناظر نمودارهای مربوط به I-HI آمده است. مدل IHB که مدل مورد استفاده در این مقالـه در شبیهسازی نفـوذ پرتابه تکهای است در سال ۲۰۰۳ و بـه واسـطه بیـان رفتـار نیتریـد آلومینیوم در شرایطی که سه پارامتر کرنش، نرخ کرنش و فشار بالاست ارائه گردید. این مدل قادر است بر خلاف مدلهای I-HI و I-H2 تغییر فاز در اثر افزایش فشار را نیز لحاظ نماید. در صورت عـدم اسـتفاده از قابلیت تغییر فاز به لحاظ ساختار و مبنا مدل IHB شبیه I-HI است، با این تفاوت که مولفـههـای اسـتحکام و کـرنش شکست دارای عبارات تحلیلی مبتنی بر پدیدهشناسی است. شکل (۶) توصیفی موجز از مـدل را ارائه می دهد.

با توجه به این که VUmat ماده به کاررفته در شبیه سازی ها، مربوط به مدل ماده JHB است، در خصوص پارامترهای استحکام، معادله حالت و آسیب این مدل به طور مبسوط توضیحاتی ارائه می گردد. لازم به ذکر است توضیحات ارائه شده روند و ملزومات نوشتن یک VUmat را برای مدل های رفتاری دینامیکی ارائه می دهد.

JHB استحکام در مدل ماده JHB

در شکل (۶) نمودار اول بیان گر تغییرات استحکام ماده تحت فشار است. فرآیند به کارگیری مدل در شبیهسازی از این قرار است که بارگذاری اصلی (برخورد و در نتیجه اعمال فشار) فشاری (با ماهیت ضربهای) است و مولفههای تانسور تنش بر اساس معیار میزز به صورت تنش معادل درمی آیند. مولفه های تانسور نرخ کرنش بر اساس قاعده میزز به صورت نرخ کرنش معادل درآمده و با استفاده از کرنش مبنای بی بعد گردیدہ و به صورت $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ نوشته میشود. کرنش $\dot{\varepsilon} = 1$ مبنا برابر عدد یک بدین معنی است که معیار دینامیکی شدن در این مدل کرنش ¹⁻1S است. به عبارتی در این مدل زمانی که نـرخ کـرنش بیشتر از ^۱-ا3 گردید مـدل، بارگـذاری را دینـامیکی تلقـی مـینمایـد. 0 < D < 1 اسیب با D نشان داده می شود. D = 0 ماده بدون آسیب، D < D < 0ماده به صورت موضعی و تا حدودی دچار آسیب شده (قسمتهایی کاملاً خرد و گسسته شده و قسمتهایی هنوز قابلیت سخت شوندگی در اثر فشار را دارند) و D=1 ماده کاملاً آسیب دیده و ضمن کاهش شدید استحکام و از بین سخت شوندگی، هنوز قابلیت تحمل بار وجود دارد. قابلیت تحمل بار فشاری پس از آسیب کامل وجه تمایز مواد ترد با مواد دیگر است که این وجه تمایز بین مدل های مادی خانواده JH و JC^۲ نیز قابل مشاهده است. مطابق اولین نمودار شکل (۶)، با افزایش نرخ کرنش از ¹⁻1S به بالا، نمودار استحکامی به سمت بالا جابجا می-شود (خط چین بالایی). برای ٤ = ٤ نم ودار برای بارگذاری کششی

- 1- Work Hardening
- 2- Johnson Cook

یعنی نقطه T-=P روی محوری افقی ($\sigma = 0$) شروع شده و تا نقطه (P_i, σ_i) به صورت خطی پیش میرود. T عبارت است از حداکثر استحکام کششی هیدروستاتیک. برای فشارهای بالاتر از P_i استحکام با معادله تحلیلی زیر بیان می گردد:

$$\sigma = \sigma_i + (\sigma_{max} - \sigma_i)\{1 - exp[-\alpha_i(P - P_i)]\}$$
(14)

که

 $\begin{aligned} &\alpha_i \\ &= \frac{\sigma_i}{\left[\left(\sigma_{max} - \sigma_i \right) \left(P_i + T \right) \right]} \end{aligned} \tag{(Y \cdot)}$

معادلات (۱۹) و (۲۰) برای زمانی است که استحکام ماده در اثر افزایش بار افزوده می شود. حال پس از آن که ماده به حداکثر استحکام رسید و آسیب شروع شد و تا آسیب کامل (D=1) پیش رفت، بر اساس مـدل – که با واقعیت مطابقت دارد– باز هم ماده توانایی تحمـل بـار را دارد کـه البته این توانایی به مراتب کمتر از حالت قبـل از شـروع آسـیب است. خط زیرین توپر در نمـودار شـکل (۶) تغییـرات اسـتحکام مـاده کـاملاً آسیب دیده در اثر افزایش فشار را نشان می دهد. واضح است کـه ماده و کاملاً آسیب دیده بـه هـیچ عنـوان توانـایی تحمـل کشـش را نـدارد و بنابراین نمودار از نقطه (0,0) شروع شده و به صورت خطی تا (σ_r, P_f) پیش می رود. برای فشارهای بالاتر از Pr تغییرات استحکام بـرای ماده کاملاً آسیب دیده عبارت است از:

$$\sigma = \sigma_f + (\sigma_{max}^f - \sigma_f) \{1 - exp[-\alpha_f(P - P_f)]\}$$
(1)

 $\alpha_{f} = \frac{\sigma_{f}}{P_{f}(\sigma_{max}^{f} - \sigma_{f})}$ (۲۲) معادلات (۱۹) تا (۲۲) برای زمانی است که نرخ کرنش 1 = \dot{s} . اگر استحکام در این حالت برابر σ_{0} در نظر گرفته شود برای نرخ کرنشهای دیگر می توان نوشت:

 $\sigma = \sigma_0 (1 + C ln \dot{\varepsilon}^*)$

ثابت نرخ کرنش بی بعد است C

(۲۳)

JHB –۳−۲ آسیب در مدل

در این مدل، آسیب تجمعی (تجمعی از کرنشهای پلاستیک) است. در نمودار دوم از شکل (۶) تغییرات حـد کـرنش آسیب نهایی مشخصهای حسب فشار نشان داده شده است. حد کرنش آسیب نهایی مشخصهای از ماده است که اگر مجموع کرنشهای پلاستیک در اثر بار ضربهای بـه آن برسد آسیب کامل رخ میدهد. تغییر آسیب بر اساس فشار ماهیت دینامیکی بودن پارامتر آسیب را نشان میدهد. پارامتر آسیب عبارت است از:

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}\right) \tag{11}$$





(79)

شکل ۶- نمودارهای مدل JH-B از چپ به راست به ترتیب استحکام، معادله حالت (فشار چگالی) و آسیب[۱۸].

$$\begin{aligned} \varepsilon_p^f \\ &= D_1 (P^* \\ &+ T^*)^n \quad Where \quad P^* \\ &= \frac{P}{\sigma_{max}} \& T^* = \frac{T}{\sigma_{max}} \end{aligned} \tag{7}$$

و n ثابتهای بی بعد هستند.
$$D_1$$

سومین نمودار متعلق است به رفتار تراکمی ماده یا همان معادله حالت. با توجه به شدید بودن فشار، باید تراکم ماده نیز در نظر گرفتـه شـود. گاهی اوقات به واسطه بالا بودن فشار، تغییر فاز نیـز در مـاده مشـاهده میگردد.

$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3$

 P_{i}

K₁، K₁ و K3 ثابتهای مادی هستند که البته K₁ همان مدول بالک ماده است. این ثابتها از آزمون برخورد صفحه و یا فشردن سمبه الماس محاسبه می گردند.

۲-۴- صحه گذاری شبیه سازی های عددی

قبل از انجام و استناد به شبیه سازی عددی مسئله مورد نظر، می بایست اعتبار روش و نیز صحت شبیه سازی مورد تأیید قرار گیرد. روش اجزای

www.SID.ir

محدود به خودی خود قادر به صحه گذاری نتایج خود نیست. زمانی که تحلیل توسط یک کد تجاری مانند آباکوس صورت مے یذیرد، موضوع صحه گذاری نتایج پیچیده تر خواهد گردید. از این رو لازم است قبل از استناد به نتایج حاصل از نرمافزار ابتدا صحیح بودن حل مسئله توسط نرمافزار در شرایط مورد نظر در مسئله (در این جا شکست دینامیکی همراه با تغییر شکلها و نرخ کرنشهای شدید در سازه سرامیکی) را بررسی و تثبیت نمود و آنگاه در صورت اثبات صحیح بودن حل و تطابق با واقعیت ، به تحلیلهای مورد نظر پرداخت. زمانی که نرمافزار قفل شکسته باشد این موضوع اهمیت بیشتری پیدا می کند. بر این اساس یک مسئله نمونه که ضرایب آن در منابع معتبر موجود و علاوه بر این از طريق آزمايش، مورد صحه گذاري قرار گرفته است حل شده و نتايج آن بررسی می شود و پس از اطمینان از عملکرد نرمافزار در شرایط مورد نظر مسئله نفوذ پرتابهی تکهای در هدف سرامیکی تحلیل و مطالعه می گردد. مسئله نمونه، شبیهسازی نفوذ یک پرتابه میله بلند یکپارچه در هدف سرامیکی بر اساس دادهها و نتایج آقایان جانسون و هلم کوئیست[۲۰] است که نتایج به دست آمده و خصوصاً طبیعت تحلیل و نتایج مطابق نمونه معتبر آن گزارش است. علاوه بر این نتایج شبیهسازی صورت گرفته با مسئله حل شدهی اعتبارسنجی شده در مراجع نرمافزار آباکوس انطباق کامل دارد. روند شبیهسازی و صحتسنجی به صورت خلاصه در ذیل ارائه می گردد. در شکل (۷) نمونه ای از مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه سازی های صورت گرفته و نتایج به دست آمده از آزمایشها و شبیهسازیهای صورت گرفته توسط جانسون و هلم کوئیست ارائه گردیده است.

۲-۵- شبیهسازی نفوذ پرتابه تکهای در هدف سرامیکی

مدل تحلیلی ارائهشده در ابتدای مقاله صرفاً به جهت فهم رفتار نفوذ پرتابه تکهای در هدف سرامیکی مفید است. از این رو برای ارائه یک فرمول جدید برای نفوذ در اهداف سرامیکی از شبیهسازی عددی استفاده میشود (استفاده از شبیهسازی عددی در ارائه مدل اجتنابناپذیر است).

هندسه شبیهسازی: شکل (۸) ساختار شبکهبندی پرتابه و هدف را قبل از برخورد نشان میدهد. ابعاد هدف و پرتابه (طول×قطر) به ترتیب ۲۵۰×۳۱ و ۶۴×۱/۵ میلیمتر هستند. با توجه به الگوریتم فرسایش، (راهکاری برای جلوگیری از توقف فرآیند حل در مدلهای لاگرانژی در مسائل نفوذ) در نرمافزار ۱۱/۵ درجه از مدل به صورت سه بعدی مدل-سازی شده است. مطالعه هم گرایی مش صورت پذیرفته و آرایش و تعداد نهایی مش بر پایه این مطالعه احراز گردیده است. در احراز

همگرایی چند نکته لحاظ شده است؛ اول اینکه همگرایی روی پارامتر جابجایی صورت پذیرفته است تا اینکه روی تنش، دوم اینکه مطالعه همگرایی روی المانهای مجاور محور تقارن صورت نپذیرفته است. بر این اساس پرتابه از ۲۲۴۰ و هدف از ۲۵۹۹۹۲ المان سهبعدی، مرتبهی موارت محور پرتابه و هدف از نوع گوهای (۲۵۵۲) و مابقی المانها در شش وجهی (C3D81) هستند. مرتبه اول بودن المانها با طبیعت فشاری - کششی بودن بارگذاری و کاهش یافتگی انتگرال گیری با تغییر شکل شدید المان قبل از فرسایش سازگار است. الگوی تماس بین سطوح المانهای هدف با تمامی سطوح المانهای پرتابه تعریف شده است. علاوه بر این به واسطه لاگرانژی بودن مدل، پارامتر فرسایش⁷ با توجه به بیشترین تغییر شکل ممکن قبل از بروز خطا در مدل و نیز واقعیات نفوذ تعیین شده است.



جنس مواد پر تابه و هدف: جنس هدف سیلیکن کارباید و جنس پرتابه طلا است. سیلیکن کارباید مادهای است بسیار سخت که تحمل بارگذاریهای فشاری بسیار بالا را دارد. این در حالی است که این ماده در مقابل بارگذاری کششی مقاومت کوچکی دارد. از کاربردهای مهم این ماده در ساخت جلیقههای ضد گلوله و ترمز ماشین است. مطابق رفتار دینامیکی بسیاری از مواد ترد، در سیلیکن کارباید، استحکام

۶١

¹⁻ Abaqus

²⁻ Wedge Reduced Integration

³⁻ Erosion

وابسته به فشار است. مدل ماده بکار رفته در شبیهسازی هـدف JHB و در شبیهسازی پرتابه الاستیک- پلاستیک با آسیب فلزات نرم به همـراه معادله حالت U_s-U_p است. ضرایب مدل ماده برای مواد پرتابـه و هـدف قبلاً گزارش شده است[۲۰].

شرایط مرزی، شرایط اولیه و خروجی های مورد نظر: سرعت برخورد اولیه با توجه به طراحی آزمایش از ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰۰متر بر ثانیه متغیر است. با توجه به نوع تحلیل که دینامیکی صریح است شرایط مرزی در قالب سرعت صفر بجای جابجایی صفر تعریف می-گردد. از اینرو در تمامی شبیه سازی سرعت تمامی گرهها در امتداد محورهای y و z صفر است. بجز گرههای واقع بر محور تقارن سرعت تمامی گرههای واقع بر سطوح پرتابه و هدف در راستای محیطی صفر است. علاوه بر این سرعت گرههای سطح انتهایی هدف نیز صفر است. نمونهای از نتایج ۱۵ شبیه سازی صورت گرفته در شکل (۹) آمده است. ۲-۶- استفاده از روش سطح پاسخ جهت ارائه مدلی ریاضی بر حسب پارامتر های سرعت بخورد، تعداد تکه و طول تکه

حسب پراست کی سرعت بر حوری مندان که و طول کتا روش سطح پاسخ از جمله روشهای ریاضی و آماری است که برای میگیرد، استفاده میگردد و هدف آن مدلسازی آماری و بهینهسازی پاسخ مورد نظر است[۲1]. اساس روش سطح پاسخ بر طراحی آزمایش-ها و بهینهسازی آماری استوار است. طرح آزمایش به عنوان ابزاری مناسب برای مهندسین در توسعه و اصلاح و صرفهجویی در وقت و هزینههای آزمایشها و رفع عیوب آنها به کار گرفته میشود و استفاده به موقع از آن سبب کاهش زمان و هزینهها میگردد[۲۲]. تبیین دقت آزمایش، مدل ریاضی حاکم بر آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منغیرهای ورودی، بهینهسازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایشها از مزایای مهم روش سطح پاسخ است[۳7]. موجنین ایت روش ایت قابلیت را دارد که رابطه بین ورودیها و خروجیهای یک آزمایش را مدلسازی نموده و به صورت یک معادله ریاضی رگرسیون ^۱ خطی مرتبه دوم ارائه نماید[۲۴]. فرم کلی معادله با توجه متغیرها و برهم کنش های مؤثر به صورت معاد ۲ است[۳7].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (YY)$$

در این معادله ضرایب β ثوابت معادله رگرسیون خطی و x_i فاکتور های ورودی ترم اصلی و x_i^2 حالت توان مرتبه دوم فاکتورهای ورودی و x_ix , برهم کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی هستند. در روش سطح پاسخ یک معادله رگرسیون مرتبه دوم خطی به دادهها منطبق می شود. این معادله پاسخ خروجی را بر اساس تابعی از فاکتورهای اصلی و مرتبه دوم این فاکتورها و همچنین برهم کنش مرتبه دوم فاکتورهای اصلی با یکدیگر توصیف می نماید. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن قادر





شکل ۸- شبکهبندی در شبیهسازی نفوذ پرتابه تکهای در هدف سرامیکی.



شکل ۹- نتایج شبیه سازی نفوذ پر تابه تکه ای در هدف سرامیکی: از چـپ بـه راست: الف) برای لحظه μs ۸ طـول تکـهها ۸ mm ، فاصـله تکـهها ۸ mm ۸ سرعت برخورد ۱۶ mm ۲۰ ، فاصله سرعت برخورد ۱۶ mm ۲۶، ب) برای لحظه ۳۵ طول تکهها ۲۶ طول تکهها تکهها ۱۶ mm ۱۶، سرعت برخورد ۱۶ mm ۴۵۰۰ مج) برای لحظه ۵۲ مول تکهها ۱۶ mm ۴۵۰۰ شاصله تکهها ۱۶ سرعت برخورد ۱۶ mm ۴۵۰۰ ما د) برای لحظه ۴۵۰ است.

¹⁻ Regression

۳-نتايج و بحث

۳-۱- مدلسازی ریاضی، بررسی و بهینهسازی پارامترهای موثر در نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف سرامیکی

به منظور ارائه مدل ریاضی؛ پارامترهای سرعت برخورد، طول تکهها و فاصله بین تکهها به عنوان پارامترهای ورودی و عمق نفوذ پرتابه به عنوان پاسخ خروجی مدل در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) حدود پارامترها در حالت کد شده و واقعی ارائه شده است.

جدول۱- مقادیر کد شده و واقعی متغیرهای ورودی.

١	•	- 1	فاكتورهاي ورودي
٣٢	18	٨	طول تکهها(mm)
74	18	٨	فاصله بین تکهها(mm)
40	۳۰۰۰	10	سرعت(m/s)

بدین منظور تعداد ۱۵ شبیه سازی به روش کامپوزیت مرکب مرکزی سطح پاسخ در نظر گرفته شده است. مقادیر عمق نفوذ به دست آمده بر حسب پارامترهای ورودی برای این شبیه سازی ها در جدول (۲) ارائه شده است. مدل سازی با استفاده از نرمافزار مینیتب ٔ صورت پذیرفته است.

جدول ۲ – شبیهسازی و مفادیر به دست آمده برای عمق نفود.						
عمق نفوذ	طول تکه	فاصله تكه	سرعت	رديف		
Υ۵/Υ۵	۳۲	٨	۱۵۰۰	١		
٩٨/١٧	٣٢	٨	40	٢		
٧۶/۲۵	٨	٨	10	٣		
۱۰۴/۰۰	٨	٨	40	۴		
۷۳/۴۰	٣٢	74	10	۵		
۹۸/۴۱	٣٢	74	40	۶		
۷۲/۸۰	٨	74	10	٧		
۱۰۱/۲۰	٨	74	40	٨		
Υ۵/٨٠	18	18	10	٩		
۹۸/۸۰	18	18	40	١٠		
۹۷/۲۲	۳۲	18	۳۰۰۰	11		
۹۸/۱۸	٨	18	۳۰۰۰	١٢		
۹۸/۶۵	18	٨	۳۰۰۰	١٣		
۹۶/۰۲	18	74	۳۰۰۰	14		
<i>१۶/۹۹</i>	18	18	۳۰۰۰	۱۵		

با استفاده از روش سطح پاسخ و تحلیل دادهها یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم برای هر متغیر خروجی بر حسب متغیرهای ورودی ترسیم شده است. پس از انجام اصلاح روی مدل اولیه و معنیدار بودن روند نمودارها به سمت نتایجی کلی، مدل نهایی به دست آمده و تفسیر نتایج و ارائه نتیجهگیریهای جامع ارائه میگردد.

۲-۳- بررسی نتایج به دست آمده از مدلسازی

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل داده ها، نتایج حاصل از آنالیز واریانس^۲ در جدول (۳) آمده است. با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصدی در آزمایش های مهندسی، مقدار *P* کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر ترمهای مدل در نظر گرفته می شود [۲۲]. در این صورت جدول آنالیز واریانس برای مدل اصلاح شده فوق پس از حذف ترمهای غیر مؤثر با رعایت نسبت ترمها به صورت جدول (۴) است.

مايشها.	سازی از	ه از مدر	دست امد	واريانس به	، اناليز	۳- جدول	جدول

مقدار <i>P</i>	مقدار <i>F</i>	میانگین مربعات <i>MS</i>	جمع مربعات SS	درجه آزادی DF	ترم ها
•/•••	142/114	۲۱۸/۳۳	1980/••	٩	مدل
•/•••	1801/08	1044/22	1807/18	١	V
•/•٣•	٨/٩٣	11/78	۱۲/۰۸	١	S
•/•۴۵	٧/١١	٨/٩٧	۱۷/۸۳	١	l
•/•••	۲ • ۶/۷۷	۲۶۰/۷۰	۳۲۰/۴۷	١	V^2
•/998	•/••	• / • •	•/•۶	١	S^2
•/4•1	•/\7	۳ ۱/۰	۳/۱	١	l^2
۰/۱۳۵	1/•۴	۱۳۱	۱/۳۱	١	$V \cdot S$
•/۳۵۴	۶/۱۳	۷/۷۲	۷/۷۲	١	V·l
•/•۵۶	١/٧٨	747	۲/۲۴	١	S·l

جدول ۴- جدول أناليز واريانس مدل اصلاح شد

مقدار <i>P</i>	مقدار F	میانگین مربعات <i>MS</i>	جمع مربعات SS	درجه آزادی DF	ترمها
•/•••	۳۲۲/۳۰	392/08	1980/88	۵	مدل
•/•••	1898/88	1011/22	1807/20	١	V
•/•1٢	९/९٣	۱۲/۰۸	۱۲/۰۸	١	S
•/•۲٩	۶/۷۱	٨/١۶	۱۷/۸۳	١	I
•/•••	783/44	۳۲۰/۴۷	۳۲۰/۴۷	١	V ²
•/•٣٣	۶/۳۵	۷/۷۲	٧/٧٢	١	V·I

1- Mnitab

در مبحث طراحی و تحلیل آزمایشها یکی از تحلیلهای مهمی که بر روی دادہھا صورت می گیرد جدول آنالیز واریانس است. خروجے مھے این جدول در تحلیل آزمایشها مقدار Pvalue است. این فاکتور مقدار تأثير هر مؤلفه را در تغييرات پاسخ خروجی نشان میدهد. هرچـه ايـن مقدار به صفر نزدیک تر باشد. تأثیر ترم مورد نظر در رفتار یاسخ خروجی بالاتر است. در آزمایشهای مهندسی فاکتوری موثر در آزمایشها محسوب می شود که مقدار این فاکتور از ۰/۰۵ کوچک تر باشد این ترم موثر محسوب می شود [۲۲]. مقدار این فاکتور طبق جدول از روی مقدار F مشخص می شود. هرچه این مقدار بزرگتر باشد تـ أثیر فاکتور بیشتر است و مقدار P کوچکتر خواهد بود. مقدار F از روی مقادیر میانگین حداقل مربعات و درجات آزادی در جدول تحلیل واریانس تعیین می گردد. مقادیر خطای مجموع مربعات نیز پس از اصلاح مدل از ۶۱/۷۱۹۰ به ۳۳/۸۵۰۳ در این مدل کاهش پیدا کرده است که در مجموع نشان دهنده دقت بیشتر مدل پس از اصلاح است. معادله رگرسیون اصلاحشده کد نشده مدل به صورت معادله (۲۸) است:

P = 33.1535 + 0.0357V - 0.1374S + (۲۸) $0.08784l - 4.37 \times 10^{-6}V^2 - 5.4 \times 10^{-5}V \times l$ R - sq (adj)= 99.14 و % R-sq = 99.44 و % R-sq (adj) = 98.28% sq (pred)= 98.28% میتوان گفت که مـدلسـازی صـورت گرفتـه از دقت بسیار خوب و مناسبی برخوردار است.

۳-۳- تحلیل و بررسی مکانیک نفـوذ پرتابـههـای تکـهای در اهداف سرامیکی بر اساس مدل ارائهشده

اکنون با استفاده از نمودارهای به دست آمده از نتایج شبیه سازی های عددی نتایجی کلی مربوط به نفوذ پرتاب های تکهای در اهداف سرامیکی استنتاج می گردد. این نتایج به لحاظ کیفی با نتایجی که در خصوص نفوذ پرتابه های تکه ای در اهداف فلزی متداول به دست آمده تطابق مناسبی دارد. اساس تفسیر نمودارهای به دست آمده تحلیل برهم کنش سه فاکتور مهم سرعت برخورد، طول تکه و فاصله بین دو تکه متوالی است.

نمودار شکل (۱۲) روند کلی حاکم بر تأثیر سرعت برخورد بر عمق نفوذ را نشان می دهد. بر این اساس در بازه سرعتی ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰، افزایش سرعت عمق نفوذ را به شدت افزایش می دهد و پس از آن اثر افزایش سرعت کاسته می شود. علاوه بر این نمودارهای (الف،ب و ج) در شکل (۱۰) نیز اثر مثبت افزایش سرعت برخورد را نشان می دهند. به گونه ای که در نمودار اول که مربوط به سرعت برخورد در بازه کوچک ۸/۳۷ تا ۷۵/۸ تغییر نموده است. در نمودار دوم، که مربوط به سرعت برخورد ۳۰۰۰ متر

مجله علمی ــ پژوهشی «مواد پرانرژی»؛ سال دوازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

بر ثانیه است با افزایش فاصله تکهها عمق نفوذ در بازه کوچک ۹۶ تا ۹۹/۶ تغییر نموده است. و به همین ترتیب در نمودار سوم شکل (۱۰).



شکل ۱۰- نمودارهای برهم کنش موثر فاصله بین تکهها و طول تکهها (الف): سرعت ۱۵۰۰ m/s (ب): سرعت ۳/s (ج): سرعت ۳۰۰۰ .m/s

نمودار شکل (۱۱) نشان میدهد طول تکه در سرعت ۱۵۰۰ تأثیری بر کارایی عمق نفوذ ندارد. درحالی که افزایش کارایی نفوذ در اثر کاهش طول تکه از سرعت ۳۰۰۰ به بالا شروع شده و در سرعتهایی مانند ۴۵۰۰ کاملاً خود را نشان میدهد. بر این اساس، طول تکه نقش مهمی در افزایش کارایی عمق نفوذ دارد به طوری که هر قدر طول تکه کوچکتر، کارایی عمق نفوذ دارد به طوری که هر قدر طول تکه نظریه معروف در نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف معمولی است که شکل ایدهآل تکهها در پرتابههای تکهای دیسکی بودن آنها است. این موضوع را نمودارهای اول تا سوم شکل (۱۰) نیز نشان میدهند. ماهیت سوم انحنا داشته و نشان از موثر شدن شکل دارند. در هر سه نمودار سوم انحنا داشته و نشان از موثر شدن شکل دارند. در هر سه نمودار شکل (۱۰) با قرار گرفتن فاصله بین دو تکه متوالی به مقدار کمتر از شکل (۱۰) با قرار گرفتن فاصله بین دو تکه متوالی به مقدار کمتر از مودار است که فاصله ۱۰ میلیمتر حدود فاصله بهینه برای به دست آوردن



۴- نتیجهگیری

در این مقاله با دیدگاهی جدید و بر اساس توصیه منابع معتبر مبنی بر ارائه مدلهای نفوذ با تکیه بر شبیهسازیهای عددی معتبر، مدلی جدید جهت بررسی نفوذ پرتابههای تکهای در اهـداف سـرامیکی ارائـه گردید. بر این اساس با شناخت و فهم دقیق مدلهای عددی، شبیهسازی عددی جایگاه ویژهای در ارائهی مدل های نفوذ با پرتابهها و اهداف با ساختاری پیچیده پیدا میکند به طوری که شبیهسازی قادر است جایگزین مناسب برای آزمایش تجربی باشد. بررسی منابع معتبر نشان داد، مرجعی که بتواند هر سه مدل را به طور یکجا و در معیارهایی مشابه مورد بررسی و تشریح قرار دهد وجود ندارد و لزوم بررسی و جمعبندی باعث گردید در ابتدای مقاله سه مدل این خانواده یعنی JH-2 ،JH-1 و JHB مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند. با توجه به انتخاب مدل JHB در این مقاله برای شبیهسازیها این مدل به طور کامل تشریح گردید. در ادامه با تهیه و به کارگیری VUmat ماده سرامیکی ابتدا نفوذ یک پرتابه با سرعت بالا در یک هدف سرامیکی شبیهسازی و صحه گذاری گردید. یس از اطمینان از نتایج (صحت دادههای ورودی برای مدلهای مادی سرامیک و طلا، عملکرد صحیح کد شبیهساز) با پایه قرار دادن شبیهسازیها، طراحی آزمایش صورت گرفت. طراحی آزمایش با هدف ارائه مدلی ریاضی برای نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف سرامیکی نیمه بینهایت صورت پذیرفت. اولین نتیجه این طراحی آزمایش انتخاب ۱۵ شبیهسازی جهت ارائه مـدل ریاضی گردید. ۱۵ شبیهسازی با محور قرار دادن سه عامل سرعت برخورد، طول تکه و فاصله بین دو تکه متوالی انتخاب گردید. دومین نتیجه پس از انجام شبیه سازی ها به دست آمد و مشخص نمود سه عامل یادشده نقش کاملاً موثری در کارایی نفوذ پرتابههای تکهای داشته و با تغییر آنها میتوان عمق نفوذ در اهداف نیمه بی نهایت را بهینهسازی نمود. یکی از بهترین روشها، برای ارائه مدلهایی که بتوانند مکانیک نفوذ پرتابهها و اهداف با ساختار پیچیده همچون پرتابه های تکهای و اهداف سرامیکی توصیف کنند، استفاده از ترکیب شبیهسازیهای معتبر و طراحی آزمایش و تحلیل داده هاست. در نفوذ پرتابههای تکهای در اهداف سرامیکی، محدودیت رسیدن به حد هیدرودینامیکی وجود ندارد، بلکه بر عکس در صورت بهینه بودن فاصله و طول تکه افزایش عمق نفوذ با افزایش سرعت برخورد به صورت پیوسته ادامه دارد. برای بهرهمندی از اثر افزایش سرعت بهتر است این پرتابهها با سرعتهایی بالاتر از ۳۰۰۰ m/s به هدف برخورد نمایند. دستیابی به سرعتهای بالا در سالهای اخیر موجب توجه مجدد و ویژه به این پرتابهها شده است. بر اساس مکانیک نفوذ پرتابههای میله بلند افزایش کارایی نفوذ پس از سرعت m/s مربوط به بهره گیری از فاز پس جریان نفوذ است. به عبارتی رژیم سرعتی۳۰۰۰ m/s مرز اثر فازهای اولیه و پس

www.SID.ir

$$\begin{array}{cccc} b & & & & & & & & & \\ \hline b & & & & & & \\ \hline b & & & & & & \\ \hline b & & & & & & \\ \hline b & & & & & \\ \hline c & & & & & \\ \hline c & & & & & \\ \hline c & & & \\ \hline c & & & & \\ \hline c & & & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & & \\ \hline c & & \\ c & &$$

آن نفوذ رخ نمیدهد
$$\overline{v}_c = v_c \big/ \sqrt{\sigma_{_{V\!P}} /
ho_{_p}}$$

 \overline{v}_c

$$\overline{x} = x/L$$

$$y \qquad \overline{y} = y/I$$

 Y_p مقاومت هيدروديناميكي پرتابه

 \boldsymbol{Z} مختصهای که موقعیت انتهای تکه در حال نفوذ را

نسبت به تکهای که هنوز به شروع ننموده است

$$\mu$$
 نشان می دهد $\sqrt{
ho_p/
ho_t}$

$$ho_p$$
چگالی پرتابه

$$\sigma_{_{yp}}$$
مقاومت ديناميکی فشاری پرتابه

$$\sigma_{_{yt}}$$
مقاومت ديناميکي فشاري هدف

مراجع

1

1

Ì

S

t

I

I

٦

 V_c

- [1] Kruczynski, D.; Massey, D.; Milligan, R.; E. Vigil, Landers, B.; Meneguzzi, M. "Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration"; DTIC Document, 2007.
- Zukas, J. A. "High Velocity Impact Dynamics"; Wiley-[2] Interscience, 1990.
- Vahedi, K.; H. Zohoor, Nezamabadi, A.; Zolfaghari, M. [3] "Performance Optimization of Long Rod Penetrator Penetrating into a Semi-Infinite Target Considering Bendig Characteristics"; Turkish J. Eng. Env. Sci. 2009, 33, 9-20.
- Alavi Nia, A.; Zolfaghari, M.; Mahmoudi, A.; Nili, M.; [4] Khodarahmi, H. "Analysis of Resistance of Concrete Target Against Penetration of Eroding Long Rod Projectile Regarding Flow Field Around the Projectile Tip"; Int. J. Impact Eng. 2013, 57, 36-42.
- [5] Tate, A. "Engineering Modelling of Some Aspects of Segmented Rod Penetration"; Int. J. Impact Eng. 1990, 9, 327-341.
- Normandia, M. J.; Lee, M. "Penetration Performance of Multiple Segmented Rods at 2.6 km/s"; Int. J. Impact Eng. 1999, 23, 675-[6] 686.
- [7] Franzen, R.; Walker, J.; Orphal, D.; Anderson, C. "An Upper Limit for the Penetration Performance of Segmented Rods with Segment-L/D 1"; Int. J. Impact Eng. 1994, 15, 661-668.
- [8] Lee, M. "A Numerical Comparison of the Ballistic Performance of Unitary Rod and Segmented-rods Against Stationary and Moving Oblique Plates"; Int. J. Impact Eng. 2001, 26, 399-407.
- Wang, X.; Zhao, G.; Shen, P.; Zha, H. "High Velocity Impact of [9] Segmented Rods with an Aluminum Carrier Tube"; Int. J. Impact Eng. 1995, 17, 915-923.
- [10] Littlefield, D. L. "Effect of Alignment on the Penetration of Segmented Rods"; Int. J. Impact Eng. 2001, 26, 421-431.
- [11] Wen, Y.; Xu, C.; Wang, S.; Batra, R. "Analysis of Behind the Armor Ballistic Trauma"; J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2015, 45, 11-21.
- [12] Zhang, H.; Hao, X.; Ma, G. "Dynamic Material Model of Annealed Soda-Lime Glass"; Int. J. Impact Eng. 2015, 77, 1088-1119.

$$\overline{v} = v / \sqrt{\sigma_{yp} / \rho_p}$$

سرعت حدی نفوذ= سرعت برخوردی که کمتر از

- [19] Holqmuist, T. J.; Johnson, G. R. "A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rate, and High Pressures"; J. Appl. Mech. 2011, 78, 591-600.
- [20] Holmquist, T.; Johnson, G. "Characterization and Evaluation of Silicon Carbide for High-Velocity Impact"; J. Appl. Phys. 2005, 97, 697-706.
- [21] Ghoreishi, M.; Tahmasbi, V. "Optimization of Material Removal Rate in Dry Electro-Discharge Machining Process", Modares Mech. Eng. 2015,14, 9 (In Persian).
- [22] Montgomery, D. C. "Design and Analysis of Experiments"; John Wiley & Sons, 2008.
- [23] Hou, T. H.; Su, C. H.; Liu, W. L. "Parameters Optimization of a Nano-Particle Wet Milling Process using the Taguchi Method, Response Surface Method and Genetic Algorithm"; Powder Technology 2007, 173, 153-162.
- [24] Tahmasbi, V.; Ghoreishi, M.; Zolfaghari, M. "Modeling and Multi Objective Optimization of Effective Parameters in Drilling Cortical Bone"; Modares Mech. Eng. 2015, 15, 109-115.

- [13] Holmquist, T.; Johnson, G. "Response of Boron Carbide Subjected to High-Velocity Impact"; Int. J. Impact Eng. 2008, 35, 742-752.
- [14] Beissel, S. R.; Holmquist, T. J.; Johnson, G. R. "Influence of the Third Invariant in the Ballistic Impact of Silicon Carbide"; Int. J. Impact Eng. 2012, 45, 52-59.
- [15] Eghtesad, A.; Shafiei, A.; Mahzoon, M. "Study of Dynamic Behavior of Ceramic–Metal FGM Under High Velocity Impact Conditions Using CSPM Method, Applied Mathematical Modelling"; 2012, 36, 2724-2738.
- [16] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures"; Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, Netherlands, 1985, 541-547.
- [17] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "Fracture Characteristics of three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures"; Eng. Fracture Mech. 1985, 21, 31-48.
- [18] Quan, X.; Clegg, R.; Cowler, M.; Birnbaum, N.; Hayhurst, C. " Numerical Simulation of Long Rods Impacting Silicon Carbide Targets using JH-1 Model"; Int. J. Impact Eng. 2006, 33, 634-644.