

ارائه یک مدل ریاضی جدید برای نفوذ پرتابه تکه‌ای در هدف سرامیکی نیمه بی‌نهایت

مجتبی ذوالفقاری^{۱*}، سید وحید میرآقایی^۲

۱- استادیار ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک
(تاریخ وصول: ۹۵/۵/۱۱، تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱۵)

چکیده

در این مقاله با بررسی مکانیک نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف سرامیکی مدل ریاضی جدیدی جهت پیش‌بینی 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 مهم‌ترین 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 بی‌نهایت سرامیکی وجود نداشته و روند افزایش عمق نفوذ با افزایش سرعت از سرعت ۲۵۰۰ متر بر ثانیه به بعد به صورت متناظر است. علاوه بر این کاهش طول تکه‌ها موجب افزایش عمق نفوذ نهایی می‌گردد، به گونه‌ای که شکل ایده‌آل برای تکه‌ها همان شکل دیسکی تکه‌ها است که نشان‌گر نقش فاز پس جریان در مکانیک نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای است. پس از اعتبارسنجی شبیه‌سازی و با تکیه بر زیر برنامه مدل بهبودیافته مدل هلم کوئیست در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی‌های متعدد بر اساس نتایج 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 تحلیل نفوذ در اهداف سرامیکی توصیه می‌گردد. این مقاله می‌تواند به عنوان مبنایی جدید در مطالعه نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف با ساختار پیچیده قرار گیرد.

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

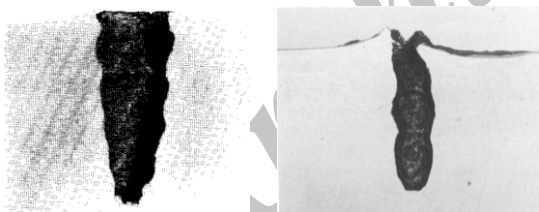
"Journal of Energetic Materials" Volume 12, No.1, Serial No.33, Spring 2017

۱- مقدمه

قطر ۳۰ حاصل شده است. در شکل عمق نفوذ پرتابه یکپارچه 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 حفره ایجاد شده توسط پرتابه حالت مخروط با دیواره موج‌دار است. شکل (۲) گویای این واقعیت است که نشان از عدم شرایط برخورد ایده‌آل دارد. این مشکلات متأثر از دو عامل ۱- سیستم پرتاب (حوزه بالستیک داخلی مانند کمناش 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 می‌گیرد. در منابع معتبر به صورت کامل و یک جا و مقایسه‌ای، مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی مواد سرامیکی مورد بحث و جمع‌بندی قرار نگرفته است. شاخص‌ترین مدل-های مادی مورد استفاده در شبیه‌سازی رفتار مادی سرامیک‌ها در شرایط برخورد و نفوذ، خانواده مدل‌های جانسون هلم-کوئیست (JH-1, JH-2, JH-3 & JHB) هستند.

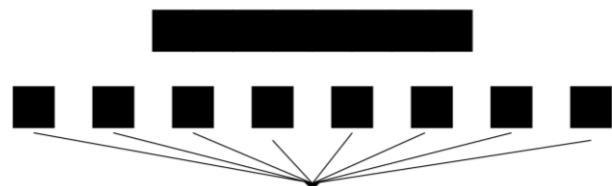


شکل ۲- حفره‌های به وجود آمده در اثر نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای.

اثبات کارایی مدل‌های مذکور منجر به پایه قرار گرفتن آن‌ها در مطالعات مربوط به نفوذ در اهداف سرامیکی گردیده است. این اثبات با استفاده از متنوعی که در جدیدترین تحقیقات صورت گرفته از خانواده‌های 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 ماده‌های پیر الاستیک که نشان‌دهنده بافت بدن است [۱۱]، شبیه‌سازی خردشدگی شیشه‌های ساختمانی و محاسبه ضرایب مدل ماده JH-1 با تاکید بر اینکه شکل مشتق‌ناپذیر سطوح استحکام در JH-1 با واقعیت

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- پایدار یا اولیه، ۳- پس جریان و ۴- بازبایی تقسیم می‌نماید [۲]. منظور از پرتابه‌های میله بلند یکپارچه، همان پرتابه‌های میله بلند معمول مانند گلوله‌های APFSDS^۱ در کاربردهای نظامی است که غالباً نسبت طول به قطر میله پرتابه بزرگ‌تر از ۱۰ ($L/D > 10$) است [۳]. پرتابه‌های تکه‌ای میله‌ای نوعی پرتابه‌های میله بلند هستند که میله یکپارچه با تکه‌های مجزای میله‌ای جایگزین شده است. از دیدگاه مکانیک نفوذ پرتابه‌های میله بلند، پرتابه‌های یکپارچه از فاز پایدار نفوذ بهره می‌برند [۴]. در حالی که پرتابه‌های تکه‌ای از فاز پس جریان نفوذ بهره می‌برند [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 قطر هر تکه برابر ۱/۸ حداکثر نفوذ در سرعت ۲۰۰۰ m/s و برای نسبت طول به قطر هر تکه ۱/۱۶، عمق نفوذ حداکثر در سرعت ۳۰۰۰ m/s ایجاد خواهد شد [۶].

پرتابه معادل پرتابه تکه ای



تکه‌های پرتابه- نسبت طول تکه به فاصله برابر ۱

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

1- Long Rod

2- Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot

$$\begin{cases} (v-u)^2 = \mu^2 u^2 + v_c^2 & v > v_c \\ u = 0 & v < v_c \end{cases} \quad (۵)$$

با استفاده از سه پارامتر L ، $(\sigma_{yp}/\rho_p)^{1/2}$ و $(\rho_p/\sigma_{yp})^{1/2}$ - سه پارامتر طول، سرعت و زمان - امکان بی بعد شدن پیدا کرده و معادلات (۱) تا (۳) و (۵) بازنویسی می‌گردد. L طول، ρ_p چگالی و σ_{yp} استحکام دینامیکی فشاری پرتابه و ρ_t و σ_{yt} به ترتیب چگالی و استحکام دینامیکی فشاری هدف هستند. از این رو برای فرسایش تکه پرتابه در حال نفوذ و نیز کاهش سرعت آن به ترتیب می‌توان نوشت [۵]:

$$\bar{l}(d\bar{v}/d\bar{t}) = -1, \quad d\bar{l}/d\bar{t} = -(\bar{v} - \bar{u}) \quad (۶)$$

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \left\{ \bar{v} - [\mu^2 \bar{v}^2 + (1 - \mu^2) \bar{v}_c^2]^{1/2} \right\} / (1 - \mu^2) \\ &= f(\bar{v}) \quad \bar{v} > \bar{v}_c \\ \bar{u} &= 0 \\ \bar{v} &\leq \bar{v}_c \end{aligned} \quad (۷)$$

می‌توان اثبات نمود در صورتی که به ترتیب \bar{V} و \bar{U} مقادیر اولیه برای سرعت‌های نفوذ و برخورد تکه در حال نفوذ باشند، آنگاه می‌توان نوشت:

$$\bar{l}_f = \{v_c[\bar{V} - (1 - \mu)\bar{U}]\}^b \exp\left[\frac{1}{2}\bar{V}(\bar{V} - \bar{U})\right] \quad (۸)$$

\bar{l}_f طول باقی‌مانده تکه پس از کاهش سرعت قسمت صلب تکه به پایین‌تر 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 می‌گردد.

۱-۲- حد اقل فاصله بین تکه‌ها به منظور جلوگیری از برخورد 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 می‌شود. مشتق زمانی x سرعت نوک تکه یا همان سرعت نفوذ و مشتق زمانی y سرعت انتهای تکه یا همان سرعت قسمت انتهایی صلب تکه پرتابه را نشان می‌دهد. شکل بی بعد سرعت نفوذ و سرعت انتهای صلب پرتابه عبارت است از [۵]:

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{u}, \quad \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} = \bar{v} \quad (۹)$$

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

$$\bar{x} = 1, \quad \bar{y} = 0 \quad \text{at} \quad \bar{t} = 0 \quad (۱۰)$$

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 JH-1، JH-2 و JH-3 است.

مدل JHB تعمیمی از مدل JH-1 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 JHB 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 دقیق‌تر 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 می‌گردد. علاوه بر این اثر کرنش حجمی در پدیده آسیب لحاظ گردیده است که این مسئله موجب گردیده در زمان بارگذارهای دینامیکی شدید، فرآیند آسیب دقیق‌تر پیش‌بینی گردد. استفاده از مدل JHB در شبیه‌سازی نفوذ در هدف FGM نیز گویای موفقیت مدل JHB در انعکاس رفتار FGM تحت بارگذاری‌های شدید ضربه‌ای دارد [۱۵].

۱-۱- مکانیک نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای

مطالعه رفتار نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای^۱ در زیرمجموعه مطالعات مربوط به پرتابه‌های میله بلند قرار می‌گیرد. صحت مدل ارائه‌شده در زیر از طریق آزمایش‌های 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 می‌شود. بر این اساس برای تکه در حال نفوذ سه معادله اساسی نفوذ عبارت است از [۲]:

$$\frac{1}{2}\rho_p(v-u)^2 + Y_p = \frac{1}{2}\rho_t u^2 + R_t \quad (۱)$$

$$\frac{dl}{dt} = -(v-u) \quad (۲)$$

$$\rho_p l \frac{dv}{dt} = -\sigma_{yp} \quad (۳)$$

l 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:

$$Y_p = 1.7\sigma_{yp}, \quad R_t = \sigma_{yt}[(2/3) + \ln(0.5E_t/\sigma_{yt})] \quad (۴)$$

با معرفی دو پارامتر $\mu = (\rho_t/\rho_p)^{1/2}$ و $v_c = [2(R_t - Y_p)/\rho_p]^{1/2}$ معادله (۱) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\bar{z} - \bar{y} = \frac{1}{2}(\bar{V} - \bar{v})^2 \quad (16)$$

با استفاده از معادله (۱۴) می‌توان حداقل فاصله مورد نیاز جهت عدم برخورد دو تکه متوالی را بر اساس سرعت برخورد اولیه به صورت زیر به دست آورد:

$$\bar{s} = \frac{[\ln(1/l)]^2}{2\mu^2\bar{U}^2} \quad (17)$$

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

$$\bar{s} = \frac{10}{\bar{U}^2} \quad (18)$$

بر اساس معادله (۱۷) برای سرعت برخورد 1700 m/s به منظور جلوگیری از برخورد تکه‌ها لازم است حداقل فاصله بین تکه‌ها معادل $1/18$ طول تکه‌ها باشد.

۲- روش تحقیق

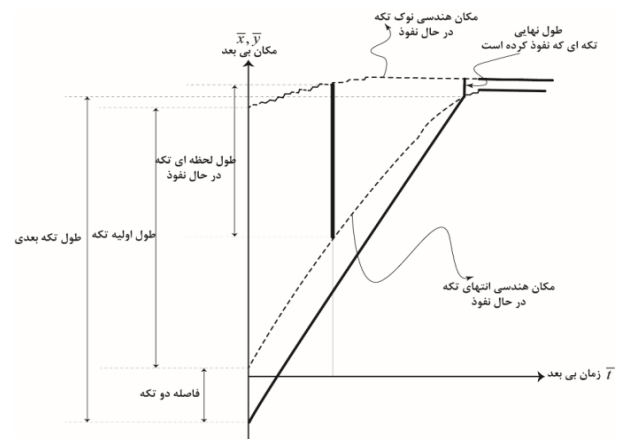
۲-۱- شبیه‌سازی نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف سرامیکی

در شبیه‌سازی‌های 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 JHB^۲ 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 JHB تشریح و توضیح جامع و کاملی در مراجع وجود نداشته و لازم است به صورت موجز توضیحاتی در این خصوص ارائه گردد.

در سال ۱۹۹۲ جانسون و هلم کوئیست (JH-1) 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 JH-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 JH-1 ارائه گردید. به لحاظ ساختار و ملاحظات همانند مدل JH-1 است، با دو تفاوت عمده ۱- نمودار تغییرات به صورت یک انحنای همواره درآمده (سخت شوندگی کاملاً پیوسته و نمودار مشتق پذیر) ۲- انتقال از حالت بدون آسیب به آسیب کامل نیز تدریجی و هموار انجام می-

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 می‌گردد. 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_c باشند، سرعت نفوذ تقریباً برابر سرعت حدی جت سیال $(\frac{\bar{v}}{1+\mu})$ می‌گردد. با تقریب این سرعت حدی برای طول می‌توان نوشت:



شکل ۳- میزان فرسایش و طول باقی مانده تکه در حال نفوذ زمانی تکه بعدی به انتهای این پرتابه می‌رسد.

$$\bar{l} = \exp\{[\mu/2(1+\mu)(\bar{v}^2 + \bar{V}^2)]\} \quad (11)$$

با استفاده از معادله (۹) می‌توان نوشت:

$$\bar{y} = \int \bar{v} d\bar{t} = - \int \bar{v} \bar{l} d\bar{v} \quad (12)$$

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

$$\bar{z} - \bar{y} = - \int (\bar{V} - \bar{v}) \bar{l} d\bar{v} \quad (13)$$

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

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

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

$$\bar{z} - \bar{y} = \frac{\{1 - \exp[-\mu\bar{U}(\bar{V} - \bar{v})][1 + \mu\bar{U}(\bar{V} - \bar{v})]\}}{\mu^2\bar{U}^2} \quad (15)$$

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

1- Silicon Carbide
2- Hohnson, Holmquist, Beissel

یعنی نقطه $P=-T$ 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 می‌گردد:

$$\sigma = \sigma_i + (\sigma_{max} - \sigma_i)\{1 - \exp[-\alpha_i(P - P_i)]\} \quad (19)$$

که

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i}{[(\sigma_{max} - \sigma_i)(P_i + T)]} \quad (20)$$

معادلات (۱۹) و (۲۰) برای زمانی است که استحکام ماده در اثر افزایش بار افزوده می‌شود. حال پس از آن که ماده به حداکثر استحکام رسید و آسیب شروع شد و تا آسیب کامل ($D=1$) پیش رفت، بر اساس مدل - که با واقعیت مطابقت دارد- باز هم ماده توانایی تحمل بار را دارد که البته این توانایی به مراتب کمتر از حالت قبل از شروع آسیب است. خط زیرین توپر در نمودار شکل (۶) تغییرات استحکام ماده کاملاً آسیب دیده در اثر افزایش فشار را نشان می‌دهد. واضح است که ماده کاملاً آسیب دیده به هیچ عنوان توانایی تحمل کشش را ندارد و بنابراین نمودار از نقطه $(0,0)$ شروع شده و به صورت خطی تا (σ_f, P_f) پیش می‌رود. برای فشارهای بالاتر از P_f تغییرات استحکام برای ماده کاملاً آسیب دیده عبارت است از:

$$\sigma = \sigma_f + (\sigma_{max}^f - \sigma_f)\{1 - \exp[-\alpha_f(P - P_f)]\} \quad (21)$$

که

$$\alpha_f = \frac{\sigma_f}{P_f(\sigma_{max}^f - \sigma_f)} \quad (22)$$

معادلات (۱۹) تا (۲۲) برای زمانی است که نرخ کرنش $\dot{\epsilon}^* = 1$. اگر استحکام در این حالت برابر σ_0 در نظر گرفته شود برای نرخ کرنش‌های دیگر می‌توان نوشت:

$$\sigma = \sigma_0(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (23)$$

C ثابت نرخ کرنش بی بعد است.

۳-۲- آسیب در مدل JHB

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

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \right) \quad (24)$$

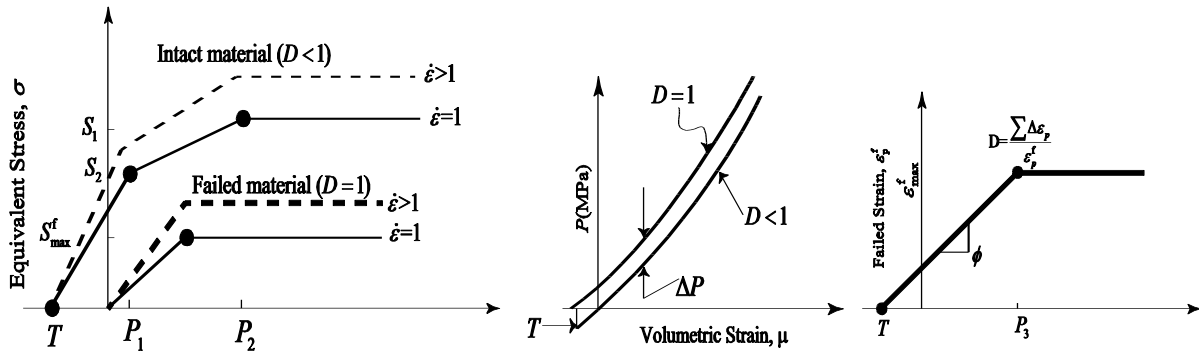
شود. در شکل (۵) متناظر نمودارهای مربوط به JH-1 آمده است. مدل JHB که مدل مورد استفاده در این مقاله در شبیه‌سازی نفوذ پرتابه تکه‌ای است در سال ۲۰۰۳ و به واسطه بیان رفتار نیتريد آلومینیوم در شرایطی که سه پارامتر کرنش، نرخ کرنش و فشار بالاست ارائه گردید. این مدل قادر است بر خلاف مدل‌های JH-1 و JH-2 تغییر فاز در اثر افزایش فشار را نیز لحاظ نماید. در صورت عدم استفاده از قابلیت تغییر فاز به لحاظ ساختار و مبنا مدل JHB شبیه JH-1 است، با این تفاوت که مولفه‌های استحکام و کرنش شکست دارای عبارات تحلیلی مبتنی بر پدیده‌شناسی است. شکل (۶) توصیفی موجز از مدل را ارائه می‌دهد.

با توجه به این که VUmat ماده به‌کاررفته در شبیه‌سازی‌ها، مربوط به مدل ماده JHB است، در خصوص پارامترهای استحکام، معادله حالت و آسیب این مدل به طور مبسوط توضیحاتی ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است توضیحات ارائه‌شده روند و ملزومات نوشتن یک VUmat را برای مدل‌های رفتاری دینامیکی ارائه می‌دهد.

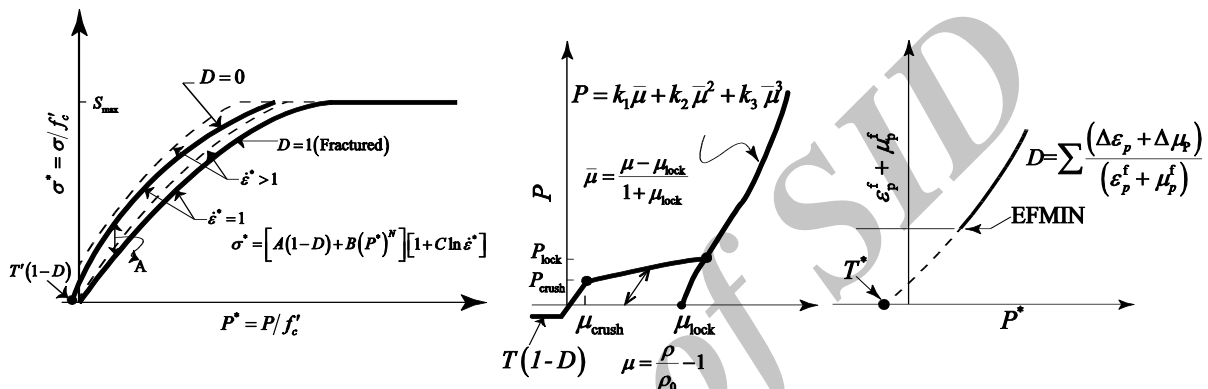
۲-۲- استحکام در مدل ماده JHB

در شکل (۶) نمودار اول بیان‌گر تغییرات استحکام ماده تحت فشار است. فرآیند به‌کارگیری 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 میز به صورت تنش معادل درمی‌آیند. مولفه‌های تانسور نرخ کرنش بر اساس قاعده میز به صورت نرخ کرنش معادل درآمده و با استفاده از کرنش مبنای $\dot{\epsilon} = 1$ بی بعد گردیده و به صورت $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ نوشته می‌شود. کرنش مبنای برابر عدد یک بدین معنی است که معیار دینامیکی شدن در این مدل کرنش $1S^{-1}$ است. به عبارتی در این مدل زمانی که نرخ کرنش بیشتر از $1S^{-1}$ گردید مدل، بارگذاری را دینامیکی تلقی می‌نماید. پارامتر آسیب با D نشان داده می‌شود. $D=0$ ماده بدون آسیب، $0 < D < 1$ ماده به صورت موضعی و تا حدودی دچار آسیب شده (قسمت‌هایی کاملاً خرد و گسسته شده و قسمت‌هایی هنوز قابلیت سخت شوندگی^۱ 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 مدل‌های مادی خانواده JH و JC^2 نیز قابل مشاهده است. مطابق اولین نمودار شکل (۶)، با افزایش نرخ کرنش از $1S^{-1}$ به بالا، نمودار استحکامی به سمت بالا جابجا می‌شود (خط چین بالایی). برای $\dot{\epsilon} = 1$ نمودار برای بارگذاری کششی

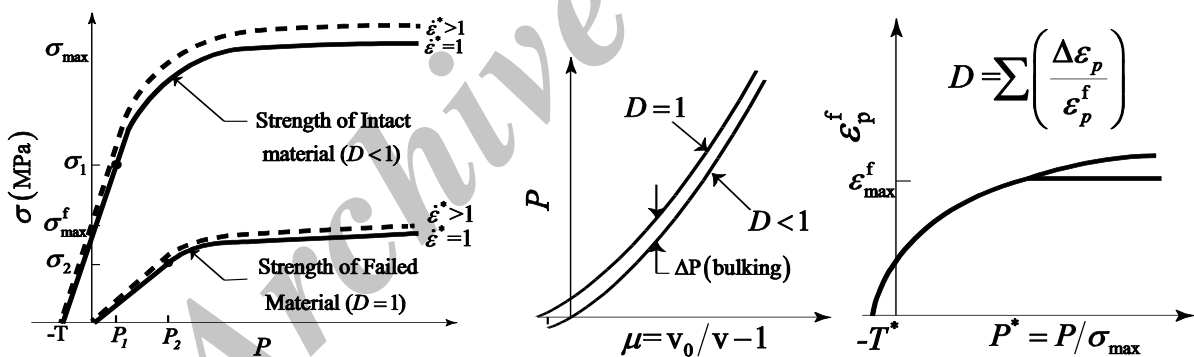
1- Work Hardening
2- Johnson Cook



شکل ۴- نمودارهای مدل JH-1 از چپ به راست به ترتیب استحکام، معادله حالت و آسیب.



شکل ۵- نمودارهای مدل JH-2 از چپ به راست به ترتیب استحکام، معادله حالت و آسیب.



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

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (26)$$

K_1, K_2 و K_3 ثابت‌های مادی هستند که البته K_1 همان مدول بالک ماده است. این ثابت‌ها از آزمون برخورد صفحه و یا فشردن سمبه الماس محاسبه می‌گردند.

۴-۲- صحت‌گذاری شبیه‌سازی‌های عددی

قبل از انجام و استناد به شبیه‌سازی عددی مسئله مورد نظر، می‌بایست اعتبار روش و نیز صحت شبیه‌سازی مورد تأیید قرار گیرد. روش اجزای

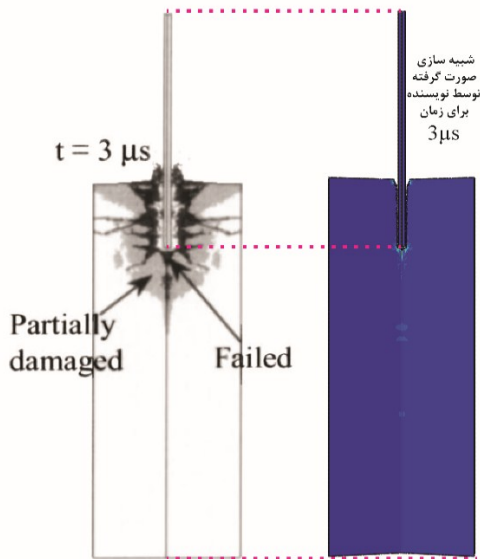
حد کرنش آسیب نهایی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p^f &= D_1(P^* + T^*)^n \quad \text{Where } P^* \\ &= \frac{P}{\sigma_{max}} \quad \& T^* = \frac{T}{\sigma_{max}} \end{aligned} \quad (25)$$

D_1 و n ثابت‌های بی بعد هستند.

سومین نمودار متعلق است به رفتار تراکمی ماده یا همان معادله حالت. با توجه به شدید بودن فشار، باید تراکم ماده نیز در نظر گرفته شود. گاهی اوقات به واسطه بالا بودن فشار، تغییر فاز نیز در ماده مشاهده می‌گردد.

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 پذیرفته است. بر این اساس پرتابه از ۲۲۴۰ و هدف از ۲۵۰۹۹۲ المان سه‌بعدی، مرتبه‌ی اول با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته تشکیل شده است. المان‌های در مجاورت محور پرتابه و هدف از نوع گوه‌ای ($C3D6$) و مابقی المان‌ها شش وجهی ($C3D8R$) هستند. مرتبه اول بودن المان‌ها با طبیعت فشاری-کششی بودن بارگذاری و کاهش‌یافتگی انتگرال‌گیری با تغییر شکل شدید المان قبل از فرسایش سازگار است. الگوی تماس بین پرتابه و هدف سطح به سطح است، به طوری که تماس بین تمامی سطوح المان‌های هدف با تمامی سطوح المان‌های پرتابه تعریف شده است. علاوه بر این به واسطه لاگرانژی بودن مدل، پارامتر فرسایش^۳ با توجه به بیش‌ترین تغییر شکل ممکن قبل از بروز خطا در مدل و نیز واقعیات نفوذ تعیین شده است.



شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در این مقاله (سمت راست) و نتایج آزمایش و شبیه‌سازی صورت گرفته برای لحظه $3\mu s$ در [۲۰].

جنس مواد پرتابه 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

محدود به خودی خود قادر به صحنه‌گذاری نتایج خود نیست. زمانی که تحلیل توسط یک کد تجاری مانند آباکوس^۱ صورت می‌پذیرد، موضوع صحنه‌گذاری نتایج پیچیده‌تر 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 سازه‌های 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 می‌کند. بر این اساس یک مسئله نمونه که ضرایب آن در منابع معتبر موجود و علاوه بر این از طریق آزمایش، مورد صحنه‌گذاری قرار گرفته است حل شده و نتایج آن بررسی می‌شود و پس از اطمینان از عملکرد نرم‌افزار در شرایط مورد نظر مسئله نفوذ پرتابه‌ی تکه‌ای در هدف سرامیکی تحلیل و مطالعه می‌گردد. مسئله نمونه، شبیه‌سازی نفوذ یک پرتابه میله بلند پکپارچه 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 می‌گردد. در شکل (۷) نمونه‌ای از مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های 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

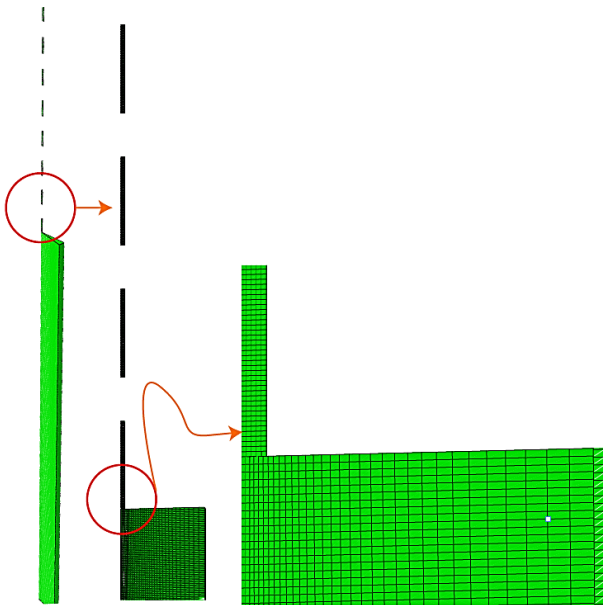
مدل تحلیلی ارائه‌شده در ابتدای مقاله صرفاً به جهت فهم رفتار نفوذ پرتابه تکه‌ای در هدف سرامیکی مفید است. از این رو برای ارائه یک فرمول جدید برای نفوذ در اهداف سرامیکی از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود (استفاده از شبیه‌سازی عددی در ارائه مدل اجتناب‌ناپذیر است).

هندسه شبیه‌سازی: شکل (۸) ساختار شبکه‌بندی پرتابه و هدف را قبل از برخورد نشان می‌دهد. ابعاد هدف و پرتابه (طول×قطر) به ترتیب 31×250 و $1/5 \times 64$ میلی‌متر هستند. با توجه به الگوریتم فرسایش، (راه‌کاری برای جلوگیری از توقف فرآیند حل در مدل‌های لاگرانژی در مسائل نفوذ) در نرم‌افزار $11/5$ درجه از مدل به صورت سه بعدی مدل-سازی شده است. مطالعه هم‌گرایی مش صورت پذیرفته و آرایش و تعداد نهایی مش بر پایه این مطالعه احراز گردیده است. در احراز

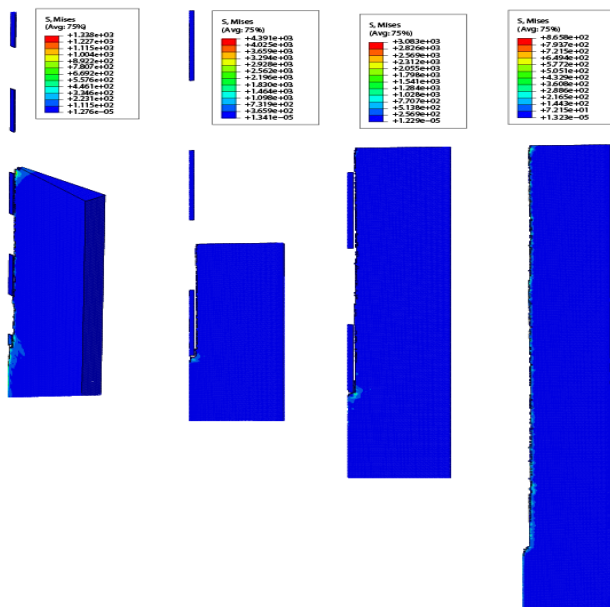
2- Wedge Reduced Integration
3- Erosion

1- Abaqus

است رفتار خروجی را بر حسب پارامترهای ورودی در تمام بازه آزمایش‌ها پیش‌بینی نموده و نقاط بهینه را ارائه نماید. [۲۴].



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



شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی نفوذ پرتابه تکه‌ای در هدف سرامیکی: از چپ به راست: الف) برای لحظه ۸ μs طول تکه‌ها ۸ mm، فاصله تکه‌ها ۸ mm، سرعت برخورد ۱۵۰۰ m/s، ب) برای لحظه ۱۳ μs طول تکه‌ها ۱۶ mm، فاصله تکه‌ها ۱۶ mm، سرعت برخورد ۴۵۰۰ m/s، ج) برای لحظه ۲۶ μs طول تکه‌ها ۱۶ mm، فاصله تکه‌ها ۱۶ mm، سرعت برخورد ۴۵۰۰ m/s، د) برای لحظه ۵۲ μs طول تکه‌ها ۱۶ mm، فاصله تکه‌ها ۱۶ mm، سرعت برخورد ۴۵۰۰ m/s است.

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

شرایط مرزی، شرایط اولیه و خروجی‌های مورد نظر: سرعت برخورد اولیه با توجه به طراحی آزمایش از ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه متغیر است. با توجه به نوع تحلیل که دینامیکی صریح است شرایط مرزی در قالب سرعت صفر بجای جابجایی صفر تعریف می‌گردد. از این‌رو در تمامی شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی صورت گرفته در شکل (۹) آمده است.

۲-۶- استفاده از روش سطح پاسخ جهت ارائه مدلی ریاضی بر حسب پارامترهای سرعت برخورد، تعداد تکه و طول تکه

روش سطح پاسخ از جمله روش‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار می‌گیرد، استفاده می‌گردد و هدف آن مدل‌سازی آماری و بهینه‌سازی پاسخ مورد نظر است [۲۱]. اساس روش سطح پاسخ بر طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی آماری استوار است. طرح آزمایش به عنوان ابزاری مناسب برای مهندسی 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، ارائه نمودارهای برهم‌کنش متغیرهای ورودی، بهینه‌سازی آزمایش و کسب اطمینان از دقت مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها از مزایای مهم روش سطح پاسخ است [۲۳]. همچنین این روش این 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 برهم‌کنش‌های مؤثر به صورت معادله ۲۷ است [۲۳].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (27)$$

در این معادله ضرایب β ثوابت معادله رگرسیون خطی و x_i فاکتورهای ورودی ترم اصلی و x_i^2 حالت توان مرتبه دوم فاکتورهای ورودی و $x_i x_j$ برهم‌کنش مرتبه دوم فاکتورهای ورودی هستند. در روش سطح پاسخ یک معادله رگرسیون مرتبه دوم خطی به داده‌ها منطبق می‌شود. این معادله پاسخ خروجی را بر اساس تابعی از فاکتورهای اصلی و مرتبه دوم این فاکتورها و همچنین برهم‌کنش مرتبه دوم فاکتورهای اصلی با یکدیگر توصیف می‌نماید. مدل ارائه شده در صورت دقیق بودن قادر

۳- نتایج و بحث

۱-۳- مدل سازی ریاضی، بررسی و بهینه سازی پارامترهای موثر در نفوذ پرتابه های تکه ای در اهداف سرامیکی

به منظور ارائه مدل ریاضی؛ پارامترهای سرعت برخورد، طول تکه ها و فاصله بین تکه ها 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.

جدول ۱- مقادیر کد شده و واقعی متغیرهای ورودی.

فاکتورهای ورودی	۰	-۱	۱
طول تکه ها (mm)	۱۶	۸	۳۲
فاصله بین تکه ها (mm)	۱۶	۸	۲۴
سرعت (m/s)	۳۰۰۰	۱۵۰۰	۴۵۰۰

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 نرم افزار مینیتب^۱ صورت پذیرفته است.

جدول ۲- شبیه سازی و مقادیر به دست آمده برای عمق نفوذ.

ردیف	سرعت	فاصله تکه	طول تکه	عمق نفوذ
۱	۱۵۰۰	۸	۳۲	۷۵/۷۵
۲	۴۵۰۰	۸	۳۲	۹۸/۱۷
۳	۱۵۰۰	۸	۸	۷۶/۲۵
۴	۴۵۰۰	۸	۸	۱۰۴/۰۰
۵	۱۵۰۰	۲۴	۳۲	۷۳/۴۰
۶	۴۵۰۰	۲۴	۳۲	۹۸/۴۱
۷	۱۵۰۰	۲۴	۸	۷۲/۸۰
۸	۴۵۰۰	۲۴	۸	۱۰۱/۲۰
۹	۱۵۰۰	۱۶	۱۶	۷۵/۸۰
۱۰	۴۵۰۰	۱۶	۱۶	۹۸/۸۰
۱۱	۳۰۰۰	۱۶	۳۲	۹۷/۲۲
۱۲	۳۰۰۰	۱۶	۸	۹۸/۱۸
۱۳	۳۰۰۰	۸	۱۶	۹۸/۶۵
۱۴	۳۰۰۰	۲۴	۱۶	۹۶/۰۲
۱۵	۳۰۰۰	۱۶	۱۶	۹۶/۹۹

۳-۲- بررسی نتایج به دست آمده از مدل سازی

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 ترم های مدل در نظر گرفته می شود [۲۲]. در این صورت جدول آنالیز واریانس برای مدل اصلاح شده فوق پس از حذف ترم های غیر مؤثر با رعایت نسبت ترم ها به صورت جدول (۴) است.

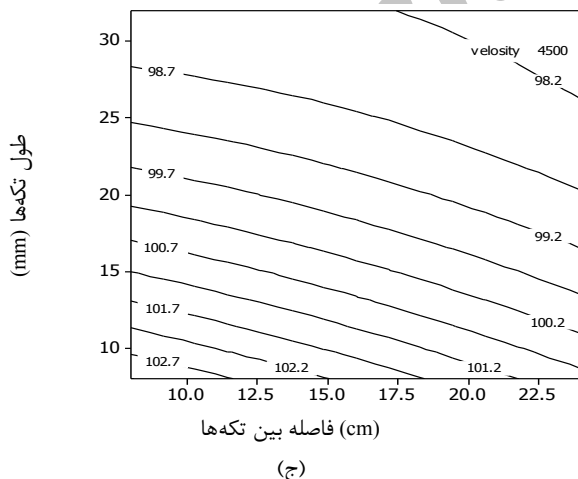
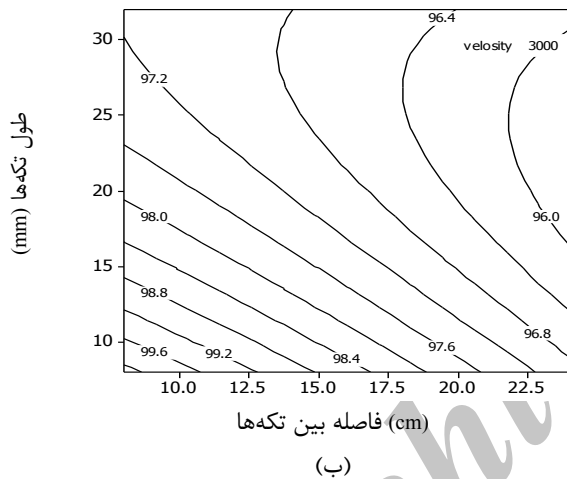
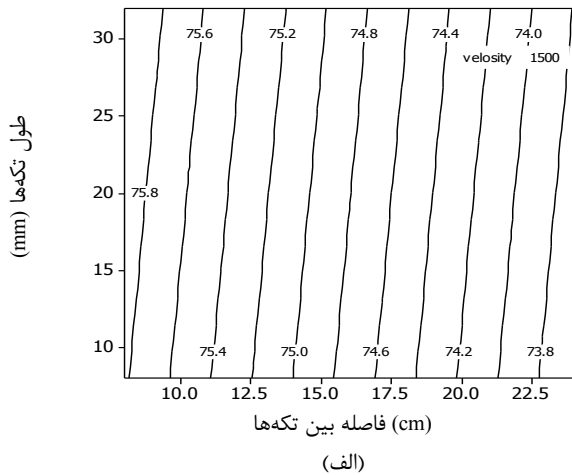
جدول ۳- جدول آنالیز واریانس به دست آمده از مدل سازی آزمایش ها.

ترم ها	درجه آزادی DF	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F	مقدار P
مدل	۹	۱۹۶۵/۰۰	۲۱۸/۳۳	۱۷۳/۱۱۷	۰/۰۰۰
V	۱	۱۶۰۲/۱۶	۱۵۷۷/۳۲	۱۲۵۱/۰۴	۰/۰۰۰
S	۱	۱۲/۰۸	۱۱/۲۶	۸/۹۳	۰/۰۳۰
I	۱	۱۷/۸۳	۸/۹۷	۷/۱۱	۰/۰۴۵
V^2	۱	۳۲۰/۴۷	۲۶۰/۷۰	۲۰۶/۷۷	۰/۰۰۰
S^2	۱	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۶۳
I^2	۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۸۲	۰/۴۰۸
$V \cdot S$	۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۰۴	۰/۱۳۵
$V \cdot I$	۱	۷/۷۲	۷/۷۲	۶/۱۳	۰/۳۵۴
$S \cdot I$	۱	۲/۲۴	۲۴/۲	۱/۷۸	۰/۰۵۶

جدول ۴- جدول آنالیز واریانس مدل اصلاح شده.

ترم ها	درجه آزادی DF	جمع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F	مقدار P
مدل	۵	۱۹۶۰/۳۶	۳۹۲/۰۴	۳۲۲/۳۰	۰/۰۰۰
V	۱	۱۶۰۲/۲۵	۱۵۷۷/۳۲	۱۲۹۶/۶۲	۰/۰۰۰
S	۱	۱۲/۰۸	۱۲/۰۸	۹/۹۳	۰/۰۱۲
I	۱	۱۷/۸۳	۸/۱۶	۶/۷۱	۰/۰۲۹
V^2	۱	۳۲۰/۴۷	۳۲۰/۴۷	۲۶۳/۴۴	۰/۰۰۰
$V \cdot I$	۱	۷/۷۲	۷/۷۲	۶/۳۵	۰/۰۳۳

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 برهم‌کنش موثر فاصله بین تکه‌ها و طول تکه‌ها (الف): سرعت ۱۵۰۰ m/s (ب): سرعت ۳۰۰۰ m/s (ج): سرعت ۴۵۰۰ m/s

m/s

در مبحث طراحی و تحلیل آزمایش‌ها یکی از تحلیل‌های مهمی که بر روی داده‌ها صورت می‌گیرد جدول آنالیز واریانس است. خروجی مهم این جدول در تحلیل آزمایش‌ها مقدار Pvalue است. این فاکتور مقدار تأثیر هر مؤلفه را در تغییرات پاسخ خروجی نشان می‌دهد. هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد. تأثیر ترم مورد نظر در رفتار پاسخ خروجی بالاتر است. در آزمایش‌های مهندسی فاکتوری موثر در آزمایش‌ها محسوب می‌شود که مقدار این فاکتور از ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد این ترم موثر محسوب می‌شود [۲۲]. مقدار این فاکتور طبق جدول از روی مقدار F مشخص می‌شود. هرچه این مقدار بزرگ‌تر باشد تأثیر 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 می‌گردد. مقادیر خطای مجموع مربعات^۱ نیز پس از اصلاح مدل از ۶۱/۷۱۹۰ به ۳۳/۸۵۰۳ در این مدل کاهش پیدا کرده است که در مجموع نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل پس از اصلاح است. معادله رگرسیون اصلاح‌شده کد نشده مدل به صورت معادله (۲۸) است:

$$P = 33.1535 + 0.0357V - 0.1374S + 0.08784l - 4.37 \times 10^{-6}V^2 - 5.4 \times 10^{-5}V \times l \quad (28)$$

با در نظر داشتن مقادیر $R-sq = 99.44\%$ و $R-sq(adj) = 99.14\%$ و $sq(pred) = 98.28\%$ می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت گرفته از دقت بسیار خوب و مناسبی برخوردار است.

۳-۳- تحلیل و بررسی مکانیک نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف سرامیکی بر اساس مدل ارائه‌شده

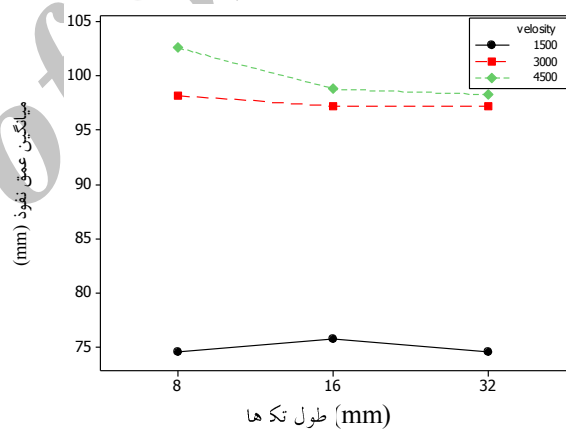
اکنون با استفاده از نمودارهای به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نتایج کلی مربوط به نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف سرامیکی استنتاج می‌گردد. این نتایج به لحاظ کیفی با نتایجی که در خصوص نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف فلزی متداول به دست آمده تطابق مناسبی دارد. اساس تفسیر نمودارهای به دست آمده تحلیل برهم‌کنش 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 می‌دهد. بر این اساس در بازه سرعتی ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰، افزایش سرعت عمق نفوذ را به شدت افزایش می‌دهد و پس از آن اثر افزایش سرعت کاسته می‌شود. علاوه بر این نمودارهای (الف، ب، و ج) در شکل (۱۰) نیز اثر مثبت افزایش سرعت برخورد را نشان می‌دهند. به گونه‌ای که در نمودار اول که مربوط به سرعت برخورد ۱۵۰۰ متر بر ثانیه است علی‌رغم افزایش فاصله تکه‌ها عمق نفوذ در بازه کوچک ۷۳/۸ تا ۷۵/۸ تغییر نموده است. در نمودار دوم، که مربوط به سرعت برخورد ۳۰۰۰ متر

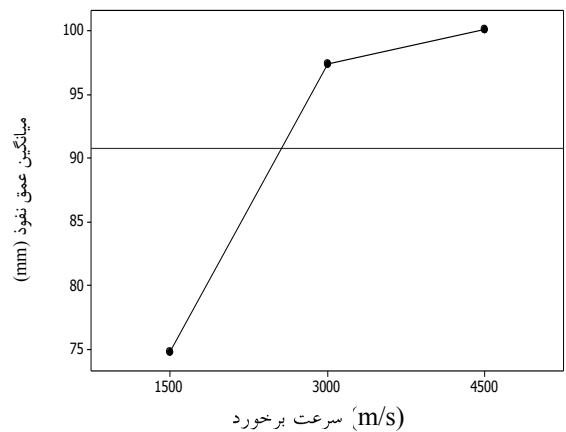
۴- نتیجه‌گیری

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 اهداف سرامیکی ارائه گردید. بر این اساس با شناخت و فهم دقیق مدل‌های عددی، شبیه‌سازی عددی جایگاه ویژه‌ای در ارائه مدل‌های 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-1، JH-2 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 به‌کارگیری VUmat ماده سرامیکی ابتدا نفوذ یک پرتابه با سرعت بالا در یک هدف سرامیکی شبیه‌سازی و صحنه‌گذاری گردید. پس از اطمینان از نتایج (صحت داده‌های ورودی برای مدل‌های مادی سرامیک و طلا، عملکرد صحیح کد شبیه‌سازی) 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 مدل 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 شبیه‌سازی‌ها 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 بی‌نهایت را بهینه‌سازی نمود. یکی از بهترین روش‌ها، برای ارائه مدل‌هایی که بتوانند مکانیک نفوذ پرتابه‌ها و اهداف با ساختار پیچیده همچون پرتابه‌های تکه‌ای و اهداف سرامیکی توصیف کنند، استفاده از ترکیب شبیه‌سازی‌های معتبر و طراحی آزمایش و تحلیل داده‌هاست. 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 ۳۰۰۰ m/s مربوط به بهره‌گیری از فاز پس‌جریان نفوذ است. به عبارتی رژیم سرعتی ۳۰۰۰ m/s مرز اثر فازهای اولیه و پس

نمودار شکل (۱۱) نشان می‌دهد طول تکه در سرعت ۱۵۰۰ تأثیری بر کارایی عمق نفوذ ندارد. درحالی‌که 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 بیشتر خواهد گردد. این موضوع موید 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 نمودار اول به صورت خطوط موازی است درحالی‌که نمودارهای دوم و سوم انحنای 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 ۱۰ میلی‌متر عمق نفوذ اندکی بهتر می‌شود. این موضوع موید این نظر است که فاصله ۱۰ میلی‌متر حدود فاصله بهینه برای به دست آوردن عمق نفوذ حداکثر است.



شکل ۱۱- نمودار برهم‌کنش طول تکه‌ها و سرعت برخورد.



شکل ۱۲- نمودار اثر فاکتور اصلی: سرعت برخورد.

	آن نفوذ رخ نمی دهد
\bar{v}_c	$\bar{v}_c = v_c / \sqrt{\sigma_{yp} / \rho_p}$
x	مکان هندسی نوک پرتابه در حال نفوذ
\bar{x}	$\bar{x} = x / L$
y	مکان هندسی انتهای پرتابه در حال نفوذ
\bar{y}	$\bar{y} = y / L$
Y_p	مقاومت هیدرودینامیکی پرتابه
z	مختصه‌ای که موقعیت انتهای تکه در حال نفوذ را نسبت به تکه‌ای که هنوز به شروع ننموده است نشان می دهد
μ	$\sqrt{\rho_p / \rho_t}$
ρ_p	چگالی پرتابه
σ_{yp}	مقاومت دینامیکی فشاری پرتابه
σ_{yt}	مقاومت دینامیکی فشاری هدف

مراجع

- [1] Kruczynski, D.; Massey, D.; Milligan, R.; E. Vigil, Landers, B.; Meneguzzi, M. "Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration"; DTIC Document, 2007.
- [2] Zukas, J. A. "High Velocity Impact Dynamics"; Wiley-Interscience, 1990.
- [3] Vahedi, K.; H. Zohoor, Nezamabadi, A.; Zolfaghari, M. "Performance Optimization of Long Rod Penetrator Penetrating into a Semi-Infinite Target Considering Bendig Characteristics"; Turkish J. Eng. Env. Sci. 2009, 33, 9-20.
- [4] Alavi Nia, A.; Zolfaghari, M.; Mahmoudi, A.; Nili, M.; 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.
- [6] Normandia, M. J.; Lee, M. "Penetration Performance of Multiple Segmented Rods at 2.6 km/s"; Int. J. Impact Eng. 1999, 23, 675-686.
- [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.
- [9] Wang, X.; Zhao, G.; Shen, P.; Zha, H. "High Velocity Impact of 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.

جریان در نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف سرامیکی است. بین سه عامل موثر در کارایی نفوذ پرتابه‌های تکه‌ای در اهداف نیمه بی‌نهایت، مهم‌ترین عامل سرعت است. همچنین افزایش فاصله بین تکه‌ها از حدی بیشتر تأثیر منفی بر کارایی نفوذ دارد. این تأثیر می‌تواند به واسطه تأثیر منفی بر فاز پس جریان نفوذ باشد. علاوه بر این با توجه به بالا بودن سرعت برخورد و در نتیجه اندک بودن کاهش سرعت در خلال نفوذ، افزایش فاصله بین تکه‌ها اثر کند شونده بازتاب موج تنش را تقویت می‌نماید. نتایج نشان می‌دهد شکل ایده‌آل تکه‌های پرتابه - با توجه به اینکه قطر ثابت و برابر ۸ mm است - جهت افزایش کارایی نفوذ شکل دیسکی است. در سرعت‌های پایین، تکه‌ای بودن پرتابه هیچ اثری ندارد. برای سرعت‌های ۳۰۰۰ و ۴۵۰۰ با کاهش طول تکه‌ها کارایی نفوذ افزایش می‌یابد که معنای فیزیکی این موضوع دیسکی شدن شکل تکه‌ها است. مدل ارائه شده، به صورت مستقیم و یا در ضمن یک برنامه در طراحی پرتابه‌های ضد زره و نیز جلیقه‌های ضد گلوله و نیز بدنه تجهیزات زرهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. داشتن چنین رابطه‌ای این امکان را ایجاد می‌نماید که با قرار دادن آن در یک برنامه به پارامترهای اصلی در طراحی زره و گلوله رسید.

۵- علائم اختصاری

b	$(R_t - Y_p) / \sigma_{yp}$
D	قطر هر تکه
E_t	مدول یانگ هدف
L	طول اولیه پرتابه
l	طول لحظه‌ای تکه پرتابه
l_f	طول نهایی تکه پرتابه نفوذکننده
\bar{l}	l / L
\bar{l}_f	l_f / L
R_t	مقاومت هیدرودینامیکی هدف
S	فاصله بین دو تکه
t	زمان
\bar{t}	$L(\rho_p / \sigma_{yp})^{1/2}$
u	سرعت لحظه‌ای نفوذ تکه پرتابه
U	سرعت نفوذ اولیه
\bar{U}	$\bar{U} = v / \sqrt{\sigma_{yp} / \rho_p}$
V	سرعت برخورد
\bar{V}	$\bar{V} = v / \sqrt{\sigma_{yp} / \rho_p}$
v	سرعت لحظه‌ای تکه پرتابه
\bar{v}	$\bar{v} = v / \sqrt{\sigma_{yp} / \rho_p}$
v_c	سرعت حدی نفوذ = سرعت برخوردی که کمتر از

- [19] Holmquist, 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.

Archive of SID