



بررسی عملکرد زره چند لایه سرامیک - اپوکسی، در برابر ضربه سرعت بالا به روش اجزا محدود

علی راشد¹، مجتبی یزدانی^{*2}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، کد پستی 51335-1996، m.yazdani@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 اسفند 1392
پذیرش: 06 اردیبهشت 1393
ارائه در سایت: 01 آذر 1393
کلید واژگان:
نفوذ پرتابه سرعت بالا
زره چند لایه سرامیکی
شکست مخروطی
مدل ساختاری جانسون - هولمکویست

چکیده

در این مقاله، رفتار زره سرامیکی چند لایه (آلومینا) در برابر پرتابه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته است و رفتار شکست مخروطی زره چند لایه سرامیک - اپوکسی با مدل ساختاری جانسون - هولمکویست در نرم افزار «آل اس داینا» شبیه سازی شده است. نتایج حاکی از این امر است که شکست مخروطی لایه سرامیک فوقانی، منجر به کاهش فشار ناشی از ضربه در لایه سرامیکی بعدی می شود؛ و اپوکسی به عنوان ماده ای حایل، این توزیع فشار را بین لایه های سرامیک میسر می کند. با رشد و توسعه شکست مخروطی و کاهش فشار مرحله به مرحله بین لایه های سرامیک، در نهایت زره مذکور توانایی مقاومت در برابر پرتابه را خواهد داشت. نتایج بدست آمده از شبیه سازی، گویای این مطلب است که با در نظر گرفتن حداقل ضخامت مناسب برای لایه سرامیک و عدم تجاوز این ضخامت از حد تعیین شده و رعایت ترتیب لایه چینی زره با لایه های نازک رویی همراه با لایه های ضخیم پشتی، کارایی بالستیک زره تا حد زیادی بالا می رود و در حالت کلی زره چند لایه سرامیکی نسبت به زره یکپارچه همراه با/ بدون صفحه محافظ پشتی، مقاومت بالستیک بالاتری خواهد داشت. طبق داده های بدست آمده در زره دو تکه سرامیکی بدون صفحه پشتی نسبت به زره با صفحه پشتی، به ازای 25% ضخامت کمتر، سایش پرتابه 14% افزایش و عمق نفوذ در هدف 18% کاهش یافته است.

Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy armor under high velocity impact with finite element method

Mojtaba Yazdani*, Ali Rashed

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

* P.O.B. 51335-1996 Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 March 2014
Accepted 26 April 2014
Available Online 22 November 2014

Keywords:

High-Velocity Penetrators
Multi-Layered Ceramic-Armor
Conoid Failure
Johnson-Holmquist Constitutive Relation

ABSTRACT

In this paper, the behavior of multi-layered Alumina ceramic armor against high velocity projectile has been considered and conoid failure of multi-layered ceramic-epoxy armor has been simulated by means of Johnson & Holmquist constitutive relation in LS-Dyna software. As a result, the conoid failure of top layer ceramic causes the impact pressure to decrease in back layer, and consequently the epoxy interface transfers the pressure distribution between ceramic layers, causing growth and propagation of conoid failure thus distributing the pressure in a larger area, finally resisting against projectile penetration in the armor. Simulation results illustrate that by choosing the proper minimum and maximum thickness of ceramic layers and proper layering of them with thin layers on top backed by thick ceramic layers, higher ballistic performance will be available in designed armors and generally an armor with layered configuration will have higher ballistic resistance than monolithic ceramic tile with/without backing. According to the results, bi-layer ceramic armor with 25% lesser thickness with no backing in comparison with monolithic ceramic layer with backing causes 14% more erosion and 18% less penetration of projectile.

1- مقدمه

ابزارهای گروه های امنیتی که وزن در آن ها از عوامل کلیدی در طراحی است، بسیار چشمگیر است. با افزایش وزن زره، هزینه سوخت در خودروهای نظامی و شخصی و هواپیماها افزایش می یابد و از طرف دیگر قابلیت تحرک ادوات و افراد نظامی با پوشیدن جلیقه/کت و کلاه خودهای سنگین کاهش می یابد [1].

زره ها می توانند به صورت یکپارچه یا به صورت ترکیبی از مواد مختلف،

در چند دهه اخیر، مطالعات بسیاری در مورد محافظت در برابر نفوذ پرتابه های با سرعت بالا صورت گرفته است. وجود پرتابه های با هسته سخت، استفاده از زره های مؤثر با مواد جدید و سیستم حفاظتی جدید را الزامی کرده است. توسعه و پیشرفت زره های سبک برای استفاده در خودرو، هواپیما و

Please cite this article using:

M. Yazdani, A. Rashed, Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy armor under high velocity impact with finite element method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

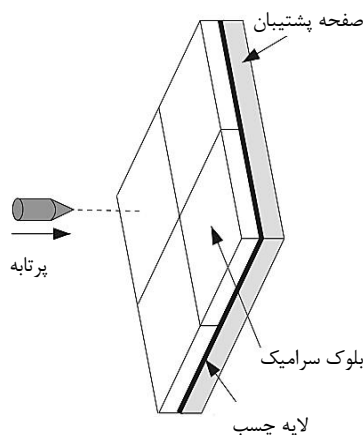
شکست مخروطی در ناحیه ضربه رخ داده و به پشت سرامیک رشد می‌یابد. در زره‌های سرامیکی با صفحه محافظ پشتی شکل‌پذیر، قسمتی از موج فشاری به ورق محافظ انتقال یافته و باقی‌مانده موج به سرامیک منعکس می‌شود. مقدار موج تنش انتقال یافته، به مقاومت مکانیکی² محافظ شکل‌پذیر بستگی دارد. ضخامت لایه اپوکسی بین سرامیک و محافظ، نقش تعیین کننده‌ای در مقدار موج تنش منعکس شده دارد. سطح سخت سرامیک طی فرایند ضربه، موجب سایش و کند شدن نوک پرتابه می‌شود و ورق محافظ انرژی جنبشی پرتابه را جذب کرده و مانع پخش خرده‌های پرتابه و سرامیک شده و در نتیجه مانع آسیب بیشتر می‌شود [2].

در تحقیقات پیشین، تأثیر ضخامت لایه اپوکسی بین قطعات در کارایی زره آلومینیم/آلومینا بررسی شده است [1]. پانل‌های چند تکه با سختی متفاوت برای هر لایه، کارایی بهبود یافته‌تری را نسبت به زره‌های یکپارچه فلزی نشان داده‌اند؛ بطوری که لایه فوقانی با سختی بالا موجب سایش پرتابه شده و لایه نرم‌تر به عنوان جاذب انرژی جنبشی عمل می‌کند [1]. در میان زره‌های مرکب با لایه‌های سخت دوتایی، زره‌های متشکل از بلوک سرامیکی به عنوان لایه سخت و صفحه محافظ از جنس آلایز آلومینیم و یا فولاد با لایه اپوکسی بین آن‌ها از اهمیت بالاتری برخوردار بوده‌اند (شکل 1).

طی برخورد پرتابه به هدف کامپوزیتی سرامیک - فلز در سرعت‌های بالا، انرژی جنبشی پرتابه طی خرد شدن، سایش و شکسته شدن بلوک سرامیکی و همچنین تغییر شکل پلاستیکی صفحه محافظ و ایجاد گرما از بین می‌رود. لایه اپوکسی نیز نقش تعیین کننده‌ای در انتقال انرژی جنبشی پرتابه و موج شوک آن به هدف دارد [9].

بر مبنای آزمایش‌های انجام شده، بلوک‌های سرامیکی غیراکسید از جمله سیلیکون کارباید و بورون کارباید کارایی بهتری را نسبت به سرامیک‌های اکسیدی از جمله آلومینا نشان می‌دهند [9]. در میان این سرامیک‌ها، آلومینا به علت ارزان بودن از اولویت بالاتری در کاربردهای زرهی برخوردار است [1]. لایه‌های متعددی از جمله رزین اپوکسی و پلی اورتان در زره‌ها استفاده می‌شود که در برخی تحقیقات [9] نقش بالای پلی اورتان را نسبت به اپوکسی در افزایش مقاومت به شکست سرامیک در برابر ضربه گزارش کرده‌اند.

در حالت کلی رفتار زره در برابر پرتابه را می‌توان به 3 دسته تقسیم کرد که عبارت‌اند از: الف) ضبط گلوله توسط زره ب) حد بالستیک زره ج) ایجاد



شکل 1 چیدمان زره سبک سرامیکی [1]

استفاده شوند. زرهی که از یک تکه ماده ساخته شده باشد جوابگوی گلوله یک سلاح کوچک خواهد بود؛ ولی برای گلوله‌های ضد زره¹، یک سیستم زرهی چند جزئی متشکل از یک سرامیک با سطح سخت و یک ماده کامپوزیت با الیاف داخلی یا ماده چکش خوار به عنوان محافظ نیاز است [2]. در کنار مواد فلزی و پلیمری، سرامیک‌ها یکی از 3 گروه مورد استفاده در حفاظت‌های زرهی هستند [3].

تحقیقات بسیاری در مورد رفتار اهداف سرامیکی کامپوزیت (چند جزئی) همراه با مواد دیگر، در برابر ضربه انجام شده است. آرفال و فرانزن [4] سرامیک‌های بورون کارباید، آلومینیم نیتراید و سیلیکون کارباید را مورد مطالعه قرار دادند. شاک و همکاران [5] شکست سرامیک‌های محصور را تحت ضربه میله به صورت پدیداری مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که خرد شدن سرامیک و جریان متعاقب، فرایندی کلیدی است که در اثر حرکت خرده ریزه‌ها در خلاف جهت ضربه و عمود بر آن ایجاد می‌شود. وودوارد و همکاران [6] سوراخ شدن و خرد شدن سرامیک‌های محصور و غیر محصور را توسط پرتابه‌های نوک تیز و مسطح مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ایجاد تکه‌های بسیار ریز را در اثر خرد شدن ناحیه جلوی پرتابه و ایجاد تکه‌های درشت را به فعل و انفعالات موج تنش نسبت دادند.

با ادامه مطالعات مربوط به بلوک‌های آلومینا با قید از سمت عقب و قید عرضی، اندرسون و همکاران [7] در مورد پرتابه‌های جرم ثابت، گزارش دادند که میله‌های بلند در مقایسه با میله‌های کوتاه بیشتر سایش می‌یابند. کانیف [8] نیز به این نکته پی برد که بلوک آلومینا با لایه‌های محافظ کولار با لایه‌های چسب عقبی پس از ضربه، پیوستگی و قابلیت آن برای جذب ضربه چندگانه، بهبود یافته و کارایی بالستیک آن کاهش نمی‌یابد.

1-1- خواص مکانیکی و مکانیزم شکست در سرامیک و زره سرامیکی

سرامیک‌ها موادی مرکب از اجزای فلزی و غیر فلزی با پیوندهای بین اتمی هستند که در گستره پیوند خالص یونی تا کوالانسی کامل می‌باشند و خاصیت تردی داشته و سخت هستند [3].

سرامیک‌های مورد استفاده برای محافظت بالستیک باید مشخصات زیر را داشته باشند:

- سختی بالا
- مقاومت در برابر شکست
- مدول الاستیسیته بالا
- وزن کم (به ازای مساحت)

در میان انواع سرامیک‌ها، اکسید آلومینیم (آلومینا) از اهمیت بالایی برخوردار است؛ که از علل انتخاب آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ماده خام آن ارزان است و تسلط بر روش تولید آن بیشتر است. پروسه سینترینگ آن، قابل اجرا در فضای اتمسفر است و از معایب آن می‌توان به بالا بودن چگالی ماده نسبت به برخی مواد سرامیکی اشاره کرد [3].

مکانیک خرابی در زره سرامیکی بدین گونه است که ضربه پرتابه به سطح سرامیک موجب ایجاد موج فشاری و انتشار موج در سرامیک می‌شود و بعد از برخورد به سطح آزاد، به صورت موج کششی منعکس می‌شود. این موج در صورت رسیدن به حد مقاومت کششی دینامیکی سرامیک، موجب شکست آن می‌شود؛ یعنی با ایجاد ترک‌های شعاعی از پایین به بالا در سرامیک،

سوراخ در زره [1] (شکل 2).

بر مبنای کاربردهای مختلف زره، درجه حفاظتی آن متفاوت است. در کاربردهایی از جمله لباس‌های زرهی، درجه حفاظت از فرد زره پوش باید کامل باشد؛ یعنی علاوه بر جلوگیری از ایجاد سوراخ در زره، از پرتاب شدن خرده‌های شکسته شده و حتی خم شدن صفحه محافظ باید ممانعت صورت گیرد [1].

2-1- شرح مسأله

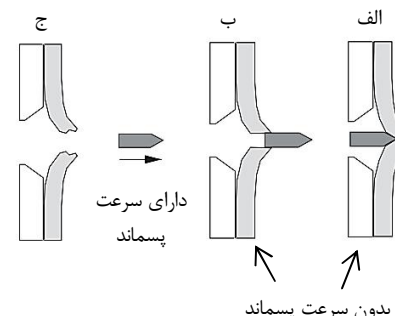
در این تحقیق به بررسی رفتار شکست و مکانیزم خرابی زره سرامیکی بدون صفحه محافظ پرداخته می‌شود. بر خلاف تحقیقات پیشین که لایه یکپارچه سرامیکی با صفحه محافظ پشتی شکل‌پذیر در برابر ضربه بالستیک مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ در این پژوهش، با شبیه‌سازی ضربه بالستیک پرتابه کالیبر 7/62 میلی‌متری به زره صرفاً سرامیکی با سیستم کامپوزیت برای 14 چیدمان لایه‌ای متنوع، رفتار شکست مخروطی سرامیک و نحوه گسترش آن به لایه‌های بعدی سرامیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. معیارهای مقاومت بالستیک در این تحلیل بررسی شده و لایه چینی بهینه از منظر وزن و ضخامت برای مقاومت بالستیک بالاتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قبل از تحلیل اجزا محدود این سیستم، به شبیه سازی اجزا محدود زره ترکیبی آلومینیم - آلومینا با لایه اپوکسی بین آن‌ها پرداخته شده است. نتایج منطبق و دقیق حاصل از این شبیه سازی بر داده‌های موجود [9] حاکی از صحت روند انجام کار است.

2- صحت‌سنجی شبیه‌سازی اجزا - محدود

2-1- مدل‌سازی

شبیه‌سازی موجود [9] عبارت است از: ضربه بالستیک پرتابه فولادی 4340 با کالیبر 7/62 میلی‌متر و طول 34 میلی‌متر با سرعت 830 متر بر ثانیه به صورت عمودی به زره متشکل از لایه سرامیک آلومینا 99/5 % به ضخامت 8 میلی‌متر و لایه آلومینیمی¹ 25 میلی‌متری به عنوان صفحه پشتیبان² و لایه اپوکسی³ بین آنها به ضخامت 1/5 میلی‌متر. مدل مذکور به صورت متقارن محوری دو بعدی با قید گیردار است (شکل 3). طول کلیه قطعات نیز 50 میلی‌متر در حالت دوبعدی متقارن محوری است.

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار «آل اس داینا»³ و «آنسیس»⁴ استفاده شده است. آلان مورد استفاده در این بحث، آلان 2 بعدی و 4 گرهی با شش



شکل 2 وضعیت‌های نهایی مختلف بعد از برخورد گلوله به زره: الف) ضبط گلوله ب) حد بالستیک ج) ایجاد سوراخ [1]

درجه آزادی⁵ است. مدل تحلیل از نوع اجزا محدود متقارن محوری با مش لاگرانژی با تعداد گره 2522 و تعداد آلان 2315 می‌باشد. نوع مواد و معادله حالت، برگرفته از داده‌های مهندسی نرم‌افزار آنسیس و مرجع مورد استفاده [9] است. از آنجا که نرم‌افزار مورد بحث در مرجع، نرم‌افزار «آتوداین»⁶ می‌باشد؛ تبدیل برخی پارامترهای غیر همنام توسط مقالات و منابع دیگر انجام گرفت [10-13]

برای ارزیابی صحت و سقم تحلیل اجزا محدود، گره شماره 1 در شکل 3 طبق مرجع اصلی [9] مورد بررسی قرار داده شد و تغییرات سرعت گره 1 روی پرتابه برحسب زمان ترسیم شد. انرژی جنبشی و درونی پرتابه و انرژی درونی اجزا زره نیز بر حسب زمان مورد مقایسه قرار گرفته و نفوذ پرتابه در صفحه آلومینیمی نیز بررسی شده است.

2-1-1- مدل ساختاری سرامیک آلومینا 99/5 % (مدل جانسون-هولمکویست سرامیک) [14]

مدل خرابی پلاستیسیته جانسون-هولمکویست برای مدل‌سازی سرامیک، شیشه و مواد ترد دیگر مناسب است که تنش معادل نرمال بر مبنای پارامتر خرابی D به صورت معادله (1) است:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

σ_i^* ، σ_f^* به ترتیب تنش شکست نرمال و تنش معادل اولیه نرمال هستند. فرم کلی تنش معادل نرمال به صورت معادله (2) است:

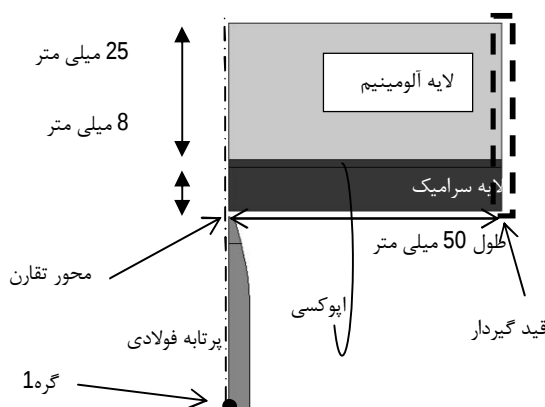
$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{HEL} \quad (2)$$

σ تنش معادل واقعی و σ_{HEL} تنش معادل در حد کشسان هیوگونیوت⁷ است. مقاومت اولیه و شکست نرمال به صورت معادله (3) و (4) است:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (3)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (4)$$

توجه شود که می‌توان مقاومت شکست نرمال را به صورت $\sigma_f^* \leq \sigma_f^*(\max)$ محدود کرد. ثابت ماده A ، B ، C ، M و N و $\sigma_f^*(\max)$ می‌باشد. فشار نرمال نیز حاصل تقسیم فشار واقعی بر فشار در حد کشسان هیوگونیوت است. فشار کششی هیدرواستاتیک بیشینه نرمال⁸ نیز به صورت معادله (5) است که صورت کسر، بیشینه فشار هیدرواستاتیک کششی است که ماده می‌تواند تحمل کند. نرخ کرنش بی بعد نیز از تقسیم نرخ کرنش واقعی به نرخ کرنش



شکل 3 چیدمان زره ترکیبی آلومینا - آلومینیم برای صحت‌سنجی

5- plane 162
6- Autodyn V.12.1
7- HEL
8- Normalized Maximum Tensile Hydrostatic Pressure

1- Al5083 H116
2- Backing Plate
3- LS-DYNA Version971
4- Ansys V.14.0

جدول 1 ضرایب مربوط به آلومینا در "ال اس داینا"

مقدار	پارامتر	نماد(واحد)
مدل جانسون هولمکویست ³		
3800	چگالی	R_o (kg/m ³)
135×10^9	مدول برشی	G (Pa)
0/989	مقاومت اولیه نرمال	A
0/77	مقاومت شکست نرمال	B
0	ثابت نرخ کرنش	C
1	توان مقاومت شکست	M
0/376	توان مقاومت اولیه	N
1	نرخ کرنش مرجع	$EPSI$ (s ⁻¹)
$1/5 \times 10^8$	حداکثر مقاومت کشش	T (Pa)
0/5	حداکثر مقاومت شکست نرمال	$SFMAX$
$5/9 \times 10^9$	حد کشسان هیوگونیت ⁴	HEL (Pa)
2200×10^6	مؤلفه فشار در حد کشسان هیوگنیت	$PHEL$ (Pa)
1	کسر تبدیل انرژی (ضریب بالکینگ)	$BETA$
0/01	پارامتر کرنش پلاستیک در شکست	$D1$
1	توان کرنش پلاستیک در شکست	$D2$
200×10^9	مدول بالک	$K1$ (Pa)
0	ضریب فشار دوم	$K2$ (Pa)
0	ضریب فشار سوم	$K3$ (Pa)
1/5	معیار شکست	FS
	مدل سایشی ⁵	
2	حداکثر کرنش مؤثر در شکست	$EFFEPS$

تدریجی کاهش یابد و به اصطلاح نرم شود. خرابی یک المان به صورت معادله (12) است:

$$D = \Sigma \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (12)$$

که صورت کسر، نمو کرنش پلاستیک معادل و مخرج، کرنش معادل برای شکست است.

عبارت کلی برای کرنش شکست به صورت معادله‌های (13) و (14) است:

$$\varepsilon_p^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (13)$$

$$\varepsilon_p^f = [D_1 + D_2 \exp(1.5 D_3)][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*] \quad (14)$$

در ضمن $\sigma^* = \sigma_m / \sigma$ نسبت تنش - فشار بی بعد است و σ_m متوسط 3 تنش نرمال (اصلی) است و σ تنش معادل ون - مایز و ε^* نرخ کرنش بی بعد و T^* دمای متشابه است.

در این ماده، معادله حالت خطی جهت بررسی رفتار اولیه کشسان تحت بار ضربه‌ای تعریف شده است [9]. مدل سایش نیز طبق گفته پیشین برای جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المان‌ها است.

ضرایب تبدیل شده این مدل ساختاری در نرم‌افزار به صورت جدول 2 است.

جدول 2-3-1-2 مدل ساختاری فولاد (مدل پلاستیسیته و مدل شکست جانسون کوک)

مرجع به دست می‌آید (معادله (5)):

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (5-الف)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (5-ب)$$

$$\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (5-ج)$$

که T^* بیشینه مقاومت شکست کششی نرمال است: $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 s^{-1}$ و انباشتگی خرابی به صورت معادله (6) می‌باشد.

$$D = \frac{\Sigma \Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (6)$$

ε_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت P است. در صورتی که کرنش پلاستیک وجود نداشته باشد: $P^* = -T^*$ (معادله (7))

$$\varepsilon_p^f = D_1 (T^* + P^*)^{D_2} \quad (7)$$

فشار هیدرواستاتیک قبل از شکست ($D=0$) به صورت معادله (8) است. $(\mu = \rho / \rho_0 - 1)$ که برای فشارهای کششی به صورت معادله (9) تبدیل می‌شود که از اثرهای انرژی صرف‌نظر می‌شود. بعد از انباشتگی خرابی ($D>0$) بالکینگ¹ اتفاق می‌افتد و نمو فشار که از ملاحظات انرژی قابل تعیین است، به صورت معادله (10) اضافه می‌شود.

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 \quad (8)$$

$$P = K_1 \mu \quad \mu < 0 \quad (9)$$

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 + \Delta P \quad (10)$$

ضرایب تبدیل شده این مدل ساختاری در نرم‌افزار به صورت جدول 1 است. در این داده‌ها مدل سایشی نیز گنجانده شده است. وظیفه این مدل، سایش المان‌ها در زمان رسیدن کرنش و یا موارد دیگر تعریف شده به کرنش معین و غیره می‌باشد. در بحث‌های ضربه و نفوذ، این مدل کاربرد فراوانی دارد. از یک جهت، سایش المان مبنای خرابی و شکست در مدل نفوذ است [9] و از جهتی دیگر در این گونه مسائل، المان‌ها ممکن است اعوجاج بیش از حدی داشته و موجب ایجاد "المان‌های بد ساختار"² و نقاط گاوسی منفی شوند و شبیه‌سازی ناپایدار گشته و موجب خطا در تحلیل شوند [10]. برای جلوگیری از اعوجاج‌های بیش از حد المان‌ها، وجود این مدل ضروری است.

جدول 2-1-2 مدل ساختاری آلومینیم (مدل پلاستیسیته و مدل شکست جانسون کوک) [15]

مدل جانسون کوک تنش تسلیم را به صورت معادله (11) بیان می‌کند:

$$\sigma = [A + B \varepsilon^N][1 + C \ln \varepsilon^*][1 - T^{*M}] \quad (11)$$

ε کرنش پلاستیک معادل؛ $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ ؛ نرخ کرنش بی بعد؛ $\dot{\varepsilon}_0 = 1 s^{-1}$ ؛ T^* دمای متشابه که به صورت $T^* = T - T_r / T_m - T_r$ است؛ P فشار هیدرواستاتیک؛ $0 \leq T^* \leq 1$ و A و B از جنس تنش و M ، N و C بی بعد هستند. این مدل در عین تجربی بودن، مدلی انعطاف‌پذیر و قوی و حاوی اثر پارامترهای مهمی است. با نزدیک شدن دما به دمای ذوب ($T^* = 1$) مقاومت به صفر میل می‌کند.

مدل شکست جانسون کوک بر مبنای انباشتگی خرابی است. یعنی با رسیدن خرابی به $D=1$ المان می‌شکند. بعد از شکست، ماده به صورت مایع عمل می‌کند؛ زیرا هیچ گونه مقاومتی ندارد (هیچ تنش برشی و انحرافی) و تنش کششی هیدرواستاتیک نمی‌تواند ایجاد کند و فقط قادر به تحمل فشار هیدرواستاتیک است. ضمناً با افزایش خرابی ممکن است مقاومت به طور

3- Johnson Holmquist
4- Hugoniot Elastic Limit
5- Add Erosion

1- خرابی ناشی از تغییر حجم

2- Bad Element

جدول 2 ضرایب مربوط به آلومینیم در "ال اس داینا"		
پارامتر	نماد(واحد)	مقدار
مدل جانسون کوک ⁴		
چگالی	$Ro(kg/m^3)$	2700
مدول برشی	$G(Pa)$	$2/69 \times 10^{10}$
مدول الاستیسیته	$E(Pa)$	70×10^9
نسبت پواسون	PR	0/3
تنش تسلیم اولیه	$A(Pa)$	$1/67 \times 10^8$
ثابت سختی ⁵	$B(Pa)$	$5/96 \times 10^8$
ثابت نرخ کرنش	C	0/001
توان نرمی گرمایی	M	0/859
توان سختی	N	0/551
دمای ذوب	$TM(K)$	893
دمای اتاق	$TR(K)$	300
نرخ کرنش مرجع (آستانه شبه استاتیک)	$EPSO(s^{-1})$	1
گرمای ویژه	$CP(Jkg^{-1}K^{-1})$	910
تنش شکست	$PC(Pa)$	$-1/5 \times 10^9$
پارامتر شکست اول	$D1$	0/0261
پارامتر شکست دوم	$D2$	0/263
پارامتر شکست سوم	$D3$	-0/349
پارامتر شکست چهارم	$D4$	0/247
پارامتر شکست پنجم	$D5$	16/8
مدل سایشی		
حداکثر کرنش مؤثر در شکست	$EFFEPS$	2
معادله حالت چندجمله‌ای خطی		
مدول بالک	$C1(Pa)$	$5/83 \times 10^{10}$

ابتدا برای چیدمان لایه‌ها، کدبندی تعریف می‌شود. طبق جدول 5 مشاهده می‌شود که حروف بزرگ AI مربوط به آلومینیم و C مربوط به سرامیک آلومینا و E مربوط به اپوکسی است و اعداد داخل پرانتز، مربوط به ضخامت این مواد به واحد میلی‌متر است. ترتیب قرارگیری لایه‌ها نیز از لایه عقبی هدف به سمت لایه روبرویی پرتابه، معادل کد تعریف شده از چپ به راست است. یعنی آخر کد، مربوط به ماده رویی مقابل پرتابه است. اعداد خارج از پرانتز نیز مربوط به تعداد لایه چینی مربوطه است. به دو مثال زیر توجه شود.

کد $(E(0.5)C(8))2(E(0.5)C(4))2$ یعنی لایه‌ها از لایه پشتی به لایه رویی عبارت‌اند از: دو لایه متوالی اپوکسی - سرامیک به ترتیب به ضخامت 0/5 و 8 میلی‌متر و توالی آن، دو لایه متوالی اپوکسی - سرامیک به ترتیب به ضخامت 0/5 و 4 میلی‌متر. کد $E(0.3)C(12-8-4)$ یعنی سه لایه سرامیک 12 و 8 و 4 میلی‌متری با لایه اپوکسی بین آن‌ها به ضخامت 0/3 میلی‌متر. نمونه‌ای از این کد، طبق شکل 6 است.

فولاد نیز از مدل جانسون کوک تبعیت می‌کند و معادله حالت و مدل سایشی آن نیز مشابه آلومینیم است که ضرایب آن به صورت جدول 3 است:

2-1-4- مدل ساختاری اپوکسی (مدل پلاستیک سینماتیک¹)

از آنجا که اپوکسی مقاومت کمی دارد، آن را می‌توان به عنوان سیالی در نظر گرفت که در برابر فشار، مقاومت داشته باشد [1] که مدل نال² از آن جمله خواهد بود. ولی از آنجا که در منابع موجود [9] ضرایب کوپر - سیموندز نیز دخیل هستند، مدل ساختاری پلاستیک سینماتیک تمامی شرایط خواسته شده را برآورده خواهد کرد. این مدل نیز همانند مدل جانسون - هولمکوپیست معادله حالت ندارد [12].

ضرایب تبدیل شده این مدل ساختاری در نرم‌افزار به صورت جدول 4 است.

2-2- نتایج صحت سنجی

طبق شکل 4 سرعت گره 1 موجود در شکل 3 بر حسب زمان بر مبنای شبیه‌سازی‌های انجام شده با مدل‌های ساختاری بیان شده، ترسیم می‌شود. این نتیجه با نتایج موجود در مرجع [9] مقایسه شده است. طبق داده‌های موجود، رفتار این دو نمودار به خصوص در لحظه توقف پرتابه تطابق بسیار خوبی با هم دارند. از آنجا که در تطبیق مراجع با شبیه‌سازی‌های موجود، معمولاً سرعت بالستیک و آزمایش عمق نفوذ، پایه مقایسه قرار می‌گیرد، تطبیق تاریخچه زمانی سرعت پرتابه در این پژوهش، مبین دقت بالای پارامترهای وارد شده در نرم‌افزار "ال اس داینا" است. به خصوص در نقطه‌ی کلیدی لحظه توقف پرتابه که درصد خطای آن برابر با 3/03% است.

مقایسه نتایج مرجع پراکاش [9] با شبیه‌سازی موجود برای انرژی داخلی و جنبشی پرتابه و انرژی داخلی اجزای هدف در شکل 5 نمایان است. درصد خطای نقاط شروع و پایانی برای انرژی جنبشی پرتابه در دو نتیجه به صفر میل می‌کند. درصد خطای انرژی داخلی نیز برای فولاد برابر با 5/73% و برای آلومینیم 16/46% و برای آلومینا 48% است که این امر برای آلومینیم و بالأخص آلومینا امری طبیعی است زیرا با سایش المان‌ها مقدار جرم آن کاهش می‌یابد و در نرم‌افزار "ال اس داینا" با صفر قرار دادن کلید "ی ان مس"³ جرم آن هنگام سایش المان‌ها کاهش می‌یابد [13] و بالطبع انرژی داخلی کمتر می‌شود [9] و این سایش در آلومینا چون ماده‌ای ترد است، بیشترین مقدار را دارد. برای شبیه‌سازی واقعی پدیده ضربه نیز، نیاز به سایش المان‌ها است؛ زیرا در سرامیک بعد از خرد شدن ماده، و پرتاب شدن خرده‌های آن به اطراف، عملاً هیچ گونه اینرسی از مواد خرد شده باقی نمی‌ماند که در برابر انرژی جنبشی پرتابه مقاومت کند. در ضمن مقدار عمق نفوذ پرتابه در صفحه محافظ با نتایج مرجع مذکور [9] همخوانی دارد. با اطمینان از صحت نتایج دریافتی، به تحلیل زره سرامیکی چند لایه بدون صفحه محافظ پرداخته می‌شود.

3- زره سرامیکی چند لایه ترکیبی

3-1- لایه چینی

حال به شبیه‌سازی زره چند لایه سرامیکی آلومینا با لایه‌های اپوکسی پرداخته می‌شود. مدل‌های ساختاری صحت‌سنجی شده آلومینا و اپوکسی و فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

1- Plastic Kinematic
2- Null
3- ENMASS

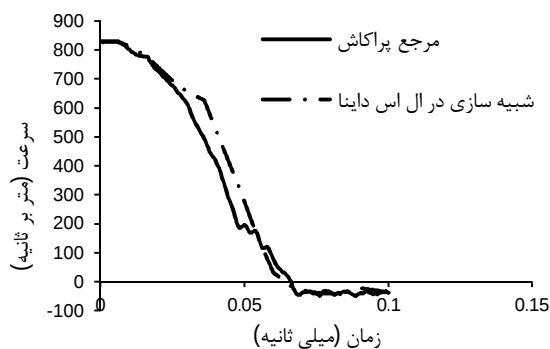
4- Johnson Cook
5- Hardening Constant

کارایی بالستیک، مقایسه میزان نفوذ پسماند (زنبرگ 1998) است که در آن مقاومت فشاری مؤثر را مبنای کاری قرار می‌دهند [16] و در اهداف نازک صحت نتایج را نشان می‌دهد. از پارامترهای دیگر ارزیابی کارایی بالستیک، تأخیر زمانی در ایجاد خرابی¹ و به تبع آن، سایش بیشتر بلوک‌های سرامیکی می‌باشد و در آن رابطه مستقیم سایش بیشتر پرتابه و کارایی بالستیک بهبود یافته‌تر زره اثبات می‌شود [17]. پارامتر دیگر مهم در کارایی بالستیک زره، نحوه ایجاد ناحیه خرد شده² است که با تغییر در مکانیزم شکست و خرابی، و بالطبع تقابل اثر حجم بیشتری از سرامیک با پرتابه، می‌توان کارایی زره را بهبود داد [17]. پارامتر دیگر که در بسیاری از منابع استفاده شده است عبارت‌اند از: سرعت پسماند گلوله که به لحاظ فیزیکی و از پارامترهای فوق، قابل درک‌تر است. در نتایج حاصل از شبیه سازی طبق جدول 5 پارامترهای مورد نظر بدست آمده‌اند.

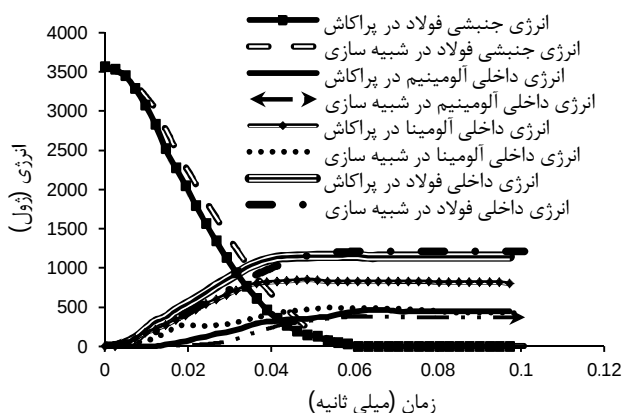
3-3- نتایج شبیه سازی نفوذ و مقایسه عوامل مؤثر در مقاومت بالستیک

3-3-1- تأثیر حداقل ضخامت بلوک سرامیکی

با مقایسه نتایج زره‌های شماره 2 و 3 مشاهده می‌شود که به ازای ضخامت و چگالی سطحی یکسان، کارایی بالستیک زره شماره 2 بالاتر است. یعنی طبق موارد یاد شده، سرعت پسماند زره 2 کمتر است و تأییدی است بر نتایج صرف



شکل 4 خروجی سرعت - زمان گره 1 در پرتابه در مرجع پراکاش [9] و شبیه‌سازی در نرم‌افزار "ال اس داینا"



شکل 5 تغییرات انرژی داخلی و جنبشی در پرتابه و هدف بر حسب زمان

جدول 3 ضرایب مربوط به فولاد در "ال اس داینا"		
پارامتر	نماد(واحد)	مقدار
مدل جانسون کوک		
چگالی	$R_o (kg/m^3)$	7860
مدول برشی	$G (Pa)$	$8/18 \times 10^{10}$
مدول الاستیسیته	$E (Pa)$	$20/9 \times 10^{10}$
نسبت پواسون	PR	0/28
تنش تسلیم اولیه	$A(Pa)$	$7/92 \times 10^8$
ثابت سختی	$B(Pa)$	$5/1 \times 10^8$
ثابت نرخ کرنش	C	0/014
توان نرمی گرمایی	M	1/03
توان سختی	N	0/26
دمای ذوب	$TM (K)$	1790
دمای اتاق	$TR (K)$	300
نرخ کرنش مرجع (آستانه شبه استاتیک)	$EPSO (s^{-1})$	1
گرمای ویژه	$CP (J/kg \cdot K^{-1})$	477
پارامتر شکست اول	$D1$	0/05
پارامتر شکست دوم	$D2$	3/44
پارامتر شکست سوم	$D3$	-2/12
پارامتر شکست چهارم	$D4$	0/002
پارامتر شکست پنجم	$D5$	0/61
مدل سایشی		
حداکثر کرنش مؤثر در شکست	$EFFEPS$	2/1
معادله حالت چندجمله‌ای خطی		
مدول بالک	$C1 (Pa)$	$1/59 \times 10^{11}$

جدول 4 ضرایب مربوط به اپوکسی در "ال اس داینا"		
پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
مدل پلاستیک سینماتیک		
چگالی	$R_o (kg/m^3)$	1190
مدول یانگ	$E (Pa)$	$4/48 \times 10^9$
نسبت پواسون	PR	0/4
تنش تسلیم	$SIGY (Pa)$	$4/5 \times 10^7$
پارامتر نرخ کرنش (کپر سیموندز)	SRC	0
پارامتر نرخ کرنش (کپر سیموندز)	SRP	0
مدل سایشی		
حداکثر کرنش مؤثر در شکست	$EFFEPS$	1/5

3-2- ارزیابی کارایی بالستیک

در مطالعاتی که مبنای کار آن توسط ویلکینز (1996) بنا نهاده شده است، کارایی بالستیک بر مبنای سرعت حد بالستیک مورد مقایسه قرار می‌گیرد و به پارامترهای دخیل و مؤثر دیگر، کمتر توجه می‌شود. روش دوم ارزیابی

1- dwell
2- Pulverized Zone

از شکست مخروطی و گسترش آن و تقابل اثر حجم معینی از سرامیک با پرتابه می‌باشد [17]. با مقایسه زره‌های شماره 6 و 7 مشاهده می‌شود به ازای ضخامت و چگالی سطحی برابر، زره 6 سرعت پسماند صفر و سایش بیشتری از پرتابه را منجر می‌شود. در مقایسه زره‌های 9 و 14 با ضخامت و چگالی سطحی برابر، زره 9 به ازای سایش نسبتاً مساوی پرتابه، عمق نفوذ کمتری را دچار می‌شود و پرتابه را بسیار سریع‌تر (5 برابر سریع‌تر) از زره 14 متوقف می‌کند. با این چیدمان و چیدمان قبلی مشاهده می‌شود که لایه‌های سرامیکی رویی زره با ضخامت کمتر همراه با لایه‌های عقبی با ضخامت بیشتر کارایی بالستیک بیشتری را از خود نشان می‌دهند. این امر در مقایسه زره‌های 6 و 7 نیز به وضوح دیده می‌شود.

3-3-4- تأثیر ضخامت لایه اپوکسی

طبق تحقیقات انجام شده در مورد لایه‌های اپوکسی بین بلوک‌های فلزی/ غیرفلزی و تأثیر آن‌ها در کارایی بالستیک زره‌های ترکیبی [9، 1] و حصول صحت نتایج بالستیک برای یکی از آن‌ها در بخش‌های قبلی به بررسی چند نمونه از زره‌های کامپوزیت سرامیکی پرداخته می‌شود.

با مقایسه زره‌های 9 و 11 با شرایط ضربه برابر مشاهده می‌شود که زره 9 علیرغم چگالی سطحی پایین و ضخامت کمتر (نصف) لایه اپوکسی، کارایی بالاتری را نسبت به زره 11 از خود نشان می‌دهد و عمق نفوذ در آن کمتر است. با مقایسه زره‌های 10 و 12 نیز تحت سرعت ضربه برابر 1000 متر بر ثانیه مشاهده می‌شود که زره 10 علیرغم چگالی سطحی پایین و ضخامت کمتر (نصف) لایه اپوکسی، کارایی بالاتری را نسبت به زره 12 از خود نشان می‌دهد و سرعت پسماند کمتری را دارد. زره 13 نیز با ضخامت و چگالی سطحی کمتر نسبت به زره‌های 10 و 12 سایش بیشتر پرتابه و سرعت پسماند کمتر را به دنبال دارد که با نتایج تحقیقات پیشین [1] منطبق است که در آن اشاره شده است: ضخامت بهینه لایه‌ای اپوکسی جهت افزایش کارایی بالستیک 0/3 میلی‌متر است که زره 13 با همین ضخامت اپوکسی، 2/8 و 1/7 برابر سرعت پسماند کمتری را نسبت به دو زره قبل دارد.

4- نتایج و بحث

با توجه به ملاحظه تأثیر پارامترهای گوناگون در تعیین کارایی بالستیک و عوامل تأثیرگذار در افزایش کارایی زره تحت اثر ضربه، نحوه توسعه خرابی در زره توصیف می‌شود.

تمامی عوامل یاد شده متأثر از شکست مخروطی سرامیک است و مکانیزم شکست مخروطی در سرامیک نقش اساسی در وارد شدن این ماده ترد و شکننده در حجم وسیعی از زره‌های پیشرفته با فناوری بالای امروزی دارد. با شناخت این مکانیزم و هدایت آن در راستای افزایش مقاومت اهداف در برابر پرتابه‌های گوناگون نوک تیز و مسطح و گلوله‌های ضد زره و مخرب، گامی نوین در ارتقای زره‌های پیشرفته امروزی برداشته می‌شود.

با توجه به شکل 7 مقایسه بهتری از نتایج مربوط به زره‌هایی که سرعت پسماند صفر دارند حاصل می‌شود. از آنجا که سایش بیشتر پرتابه و کاهش نفوذ پرتابه به هنگام برخورد به زره، در ارزیابی کارایی بالستیک سیستم زرهی مزیت محسوب می‌شود؛ با مقایسه نسبت سایش پرتابه به عمق نفوذ پرتابه، کارایی بالستیک زره‌ها نمایان می‌شود.

با توجه به شکل 8 مقایسه‌ای بین زره‌هایی که پرتابه موجب سوراخ شدن آن‌ها شده است، صورت می‌گیرد. نسبت سرعت برخورد پرتابه به سرعت پسماند نمایانگر کارایی بالستیک در این نوع زره‌ها خواهد بود.

تجربی به دست آمده [17] با این مضمون که ضخامت سرامیک در برابر پرتابه سرعت بالا، باید دارای حد پایینی باشد؛ زیرا در ضخامت‌های بسیار کوچک، ناحیه خردشده سرامیک، شکل‌دهی مناسبی نداشته و مقاومت مناسبی در برابر ضربه نخواهد داشت. پس مشاهده می‌شود با ضخامت بلوک 4 میلی‌متری با تعداد بیشتر، مقاومت بالستیک زره کاهش می‌یابد و ضخامت بلوک 6 میلی‌متری با تعداد کمتر، مقاومت بهتری در زره خواهد داشت. با مقایسه زره‌های شماره 2 و 4 تأثیر حداقل ضخامت نمایان است؛ زیرا زره شماره 4 با وجود ضخامت و چگالی سطحی کمتر، سرعت پسماند صفر دارد. یعنی طبق گفته‌های پیشین پدیده ضبط گلوله رخ داده؛ هر چند این زره، بلوک‌های کمتر ولی با ضخامت بیشتر را دارد که البته ضخامت و چگالی سطحی کل زره کمتر است.

با مقایسه زره‌های شماره 4 و 8 مشاهده می‌شود که زره شماره 8 با تعداد بلوک سرامیکی کمتر، سرعت پسماند صفر را داراست. پس از معیار دیگری نیز استفاده می‌شود که کارایی بالستیک را بیشتر آشکار سازد.

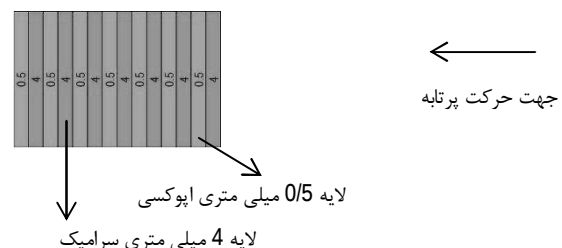
معیار دوم در این مقایسه، زمان توقف پرتابه است که مشاهده می‌شود در زره شماره 8 این توقف زودتر است؛ ولی به علت نزدیک بودن این زمان‌ها از معیار سوم به نام سایش پرتابه استفاده می‌شود که زره شماره 8 سایش بیشتری در گلوله به ازای زمان توقف کمتر، ایجاد می‌کند. معیار دیگر، عمق نفوذ پرتابه است که باز مشاهده می‌شود عمق نفوذ در زره شماره 8 کمتر است و این دلیل دیگری بر کارایی بالستیک بالای این زره است.

3-3-2- تأثیر حداکثر ضخامت بلوک سرامیک

آیا در افزایش ضخامت بلوک‌ها محدودیتی وجود دارد؟ یا با یکپارچه کردن کل زره، کارایی بالستیک آن ایده آل خواهد شد. با مقایسه زره‌های ردیف 8 و 5 مشاهده می‌شود که با زمان توقف نزدیک به هم در هر دو و سایش برابر پرتابه، مقدار عمق نفوذ در زره ردیف 5 بیش از 3/5 برابر زره شماره 8 است و پرتابه از هدف عبور کرده؛ منتها در آستانه بالستیک هدف، شلیک صورت گرفته است که به طور آشکار زره ردیف 5 کارایی لازم را نخواهد داشت زیرا جابجایی سطح انتهایی زره بسیار زیاد خواهد بود که به عنوان مثال در جلیقه ضد گلوله می‌تواند به نفرات و در خودروها و یا وسایل نقلیه به سیستم آسیب بزند که از لحاظ کارایی بالستیک قابل قبول نخواهد بود و محدودیت جابجایی سطح پشتی نیز از عوامل کلیدی در طراحی زره است [1]. پس مشاهده می‌شود که زره یکپارچه و یا زره با بلوک‌های بسیار ضخیم نمی‌تواند کارایی لازم را در برابر این ضربه بالستیک از خود نشان دهد.

3-3-3- تأثیر لایه چینی بلوک‌های سرامیکی

حال به مقایسه نحوه چیدمان بلوک‌های سرامیکی پرداخته می‌شود که متأثر



شکل 6 نمونه‌ای از لایه چینی مربوط به کد 7(4)C(0.5)E

جدول 5 مشخصات هدف و نتایج مربوط به معیارهای آزمایش بالستیک حاصل از شبیه سازی در نرم افزار ال اس داینا

شماره هدف	کد هدف	ضخامت هدف (mm)	چگالی سطحی هدف (kg/m ²)	سرعت برخورد پرتابه (m/s)	سرعت پسماند پرتابه (m/s)	لحظه توقف پرتابه (ms)	عمق نفوذ پرتابه در کل هدف (mm)	طول سایش پرتابه (mm)
1	Al(25)E(1.5) C(8)	34/5	99/685	830	0	0/064	11/36	18/09
2	(E(1.5)C(6))4	30	98/34	830	73/1	-	-	13/72
3	(E(1)C(4))6	30	98/34	830	236/4	-	-	10/23
4	(E(1)C(8))3	27	94/77	830	0	0/087	12/24	18/96
5	E(2)C(25)	27	97/38	830	0	0/6	33/1	20/7
6	(E(0.5)C(8))2(E(0.5)C(4))2	26	93/58	830	0	0/096	16/28	16/34
7	(E(0.5)C(4))2(E(0.5)C(8))2	26	93/58	830	52/08	-	-	15/47
8	(E(1)C(12))2	26	93/58	830	0	0/064	9/34	20/7
9	E(1)C(12-8-4)	27	94/77	830	0	0/078	13/32	18/09
10	E(1)C(12-8-4)	27	94/77	1000	170/9	-	-	18/08
11	E(2)C(12-8-4)	30	98/34	830	0	0/084	16/23	18/08
12	E(2)C(12-8-4)	30	98/34	1000	280	-	-	18/96
13	E(0.3)C(12-8-4)	25/2	92/628	1000	99/9	-	-	20/7
14	E(1)C(4-8-12)	27	94/77	830	0	0/39	15/3	18/96

5- نتیجه گیری

همان طور که طی بخش های پیشین بیان شد کارایی زره سرامیکی به طور قابل توجهی به پیکربندی سیستم بستگی دارد.

با طولانی تر کردن زمان فاز خردشدگی اولیه طی نفوذ و افزایش بازدهی فرایند سایش با استفاده از مواد خرد شونده سرامیک، افزایش بازده زره میسر خواهد بود [17].

در ضمن با افزایش ناحیه تغییر شکل در صفحه شکل پذیر پستی از جنس اپوکسی یا ماده دیگر، مقدار هدر رفت انرژی بالاتر خواهد رفت [1].

با توجه به داده های فوق نتایج زیر حاصل می شود:

- زره کامپوزیت سرامیک- اپوکسی چند لایه موجب کند شدن پرتابه و کاهش شدت فشار ضربه به لایه های بعدی سرامیک می شود.

- حداقل ضخامت لایه بلوک سرامیکی باید با توجه به سرعت پرتابه در نظر گرفته شود تا زره کارایی خود را از دست ندهد.

- حداکثر ضخامت هر بلوک سرامیکی نیز باید مد نظر قرار گیرد تا گسترش شکست مخروطی موجب ارتقای مقاومت بالستیک در زره شود.

- ضخامت لایه اپوکسی نقشی تعیین کننده در افزایش کارایی بالستیک دارد که مقدار بهینه آن طبق مراجع یادشده برابر با 0/3 میلی متر است.

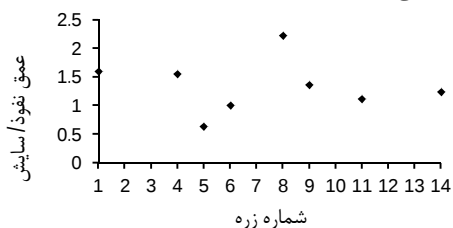
- نحوه لایه چینی بلوک های سرامیکی حائز اهمیت است و طبق تحقیقات جاری، صفحات رویی مقابل پرتابه باید نسبت به صفحات پستی ضخامت کمتری داشته باشند تا به ازای چگالی سطحی یکسان، کارایی زره ارتقا یابد.

6- با ساخت زره کامپوزیت آلومینا- اپوکسی طبق جدول 5 مشاهده شد که به ازای 25 % ضخامت کمتر و 93/8 % جرمی زره با صفحه محافظ، سایش پرتابه 14 % افزایش و عمق نفوذ در هدف 18 % کاهش یافته است؛ که این امر با مقایسه زره کلاسیک شماره 1 و زره معرفی شده شماره 8 قابل درک است.

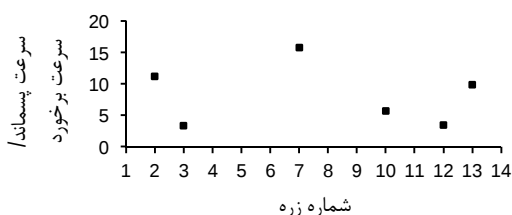
- با توجه به شکل 7 مشاهده می شود که بهترین زره در مجموعه مذکور از منظر کارایی بالستیک، زره شماره 8 است. این زره با دو لایه سرامیک با

با توجه به شکل 9 و شکل 10 مشاهده می شود که اپوکسی به عنوان جاذب انرژی و منتقل کننده تنش وارده به لایه های سرامیک، موجب انتقال فشار ناشی از ضربه به لایه های بعدی سرامیک می شود و با گسترش شکست مخروطی، سطح تنش وارده کمتر می شود و با سایش پرتابه توسط سرامیک، در نهایت بخش اعظمی از انرژی جنبشی پرتابه جذب و یا پرتابه به کلی متوقف می شود.

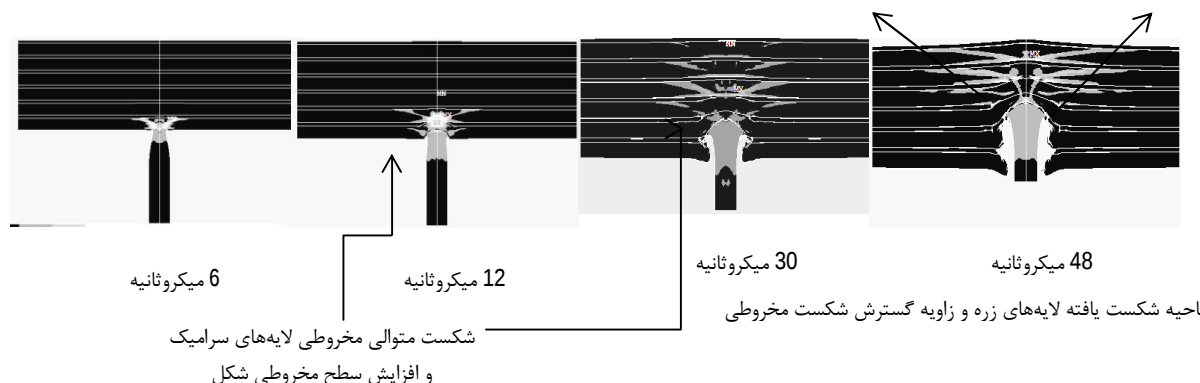
با توجه به شکل 11 مقایسه کارایی بالستیک در هر دو نوع هدف با محورهای قائم مجزا صورت گرفته است. در این مقایسه، کارایی بالستیک توسط عوامل زمان توقف پرتابه و جرم هدف نرمال شده است تا مقایسه بهینه ای از منظر وزن زره و مقاومت در برابر پرتابه صورت پذیرد. البته باید یادآور شد که عوامل زمان توقف پرتابه و سایش آن، در سرعت پسماند صفر، مفهوم بیشتری می یابد (شکل 11).



شکل 7 مقایسه نتایج سایش - عمق نفوذ به صورت بی بعد برای زره های در شرایط ضبط گلوله

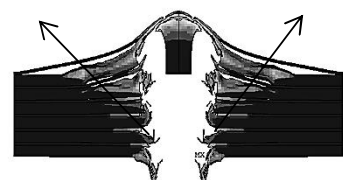


شکل 8 مقایسه نتایج سرعت برخورد - سرعت پسماند به صورت بی بعد برای زره های سوراخ شده



شکل 9 نحوه ایجاد تمرکز تنش و گسترش شکست مخروطی در زره کامپوزیت سرامیک - اپوکسی با لایه چینی 6(E1)C(4)

شده است. با کمی دقت مشاهده می‌شود که زره شماره 14 طبق شکل 7 نسبت به زره‌های 6 و 11 کارایی بالاتری دارد ولی با در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های مربوط به کارایی بالستیک طبق شکل 11، زره بهینه‌ای نسبت به آن دو محسوب نمی‌شود زیرا نتوانسته پرتابه را نسبت به زره شماره 11 سریع‌تر متوقف کند و وزن آن به ازای تشابه مجموع شرایط دیگر، نسبت به زره شماره 6 بالاتر است.



0	.693812	1.38762	2.08144	2.77525
	.346906	1.04072	1.73453	2.42834

شکل 10 کانتور کرنش مجموع برای زره 6(E1)C(4) در لحظه 168 میکروثانیه

6- فهرست علائم

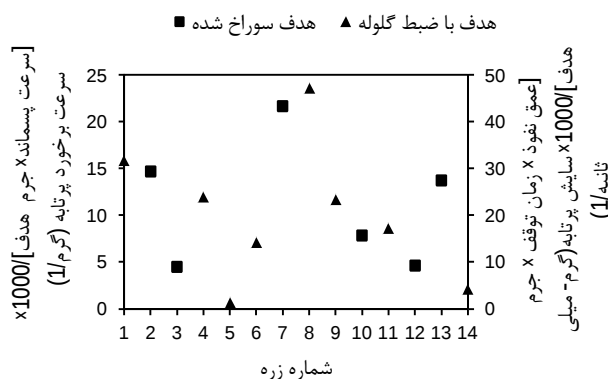
T^* بیشینه مقاومت شکست کششی نرمال / دمای متشابه
 D خرابی
 P فشار هیدرواستاتیک (Pa)

علائم یونانی

σ_f^* تنش شکست نرمال
 σ_i^* تنش معادل اولیه نرمال
 σ_{HEL} تنش معادل در حد کِشسان هیوگونیوت (Pa)
 σ تنش معادل واقعی (Pa)
 $\bar{\sigma}$ تنش معادل ون مایرز (Pa)
 ρ چگالی (kgm-3)
 ρ_0 چگالی اولیه (kgm-3)
 ϵ_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت
 μ کرنش حجمی
 σ_m متوسط 3 تنش نرمال (Pa)
 ϵ^* نرخ کرنش بی بعد
 ϵ_0 نرخ کرنش مرجع (s-1)
 σ^* نسبت تنش - فشار بی بعد

زیرنویس‌ها

AI5083 H116 آلایژ آلومینیومی
 Ansys نرم‌افزار تحلیلی اجزا محدود بروش صریح / ضمنی
 AP گلوله ضد زره
 Autodyn نرم‌افزار تحلیلی اجزا محدود
 Backing plate صفحه محافظ
 Bad element المان با نقاط گاوسی منفی



شکل 11 مقایسه کارایی بالستیک در هر دو هدف الف) هدف با ضبط گلوله با محور قایم سمت راست ب) هدف سوراخ شده با محور قایم سمت چپ

ایجاد سایش بیشتر پرتابه، مقاومت بالاتری در برابر پرتابه از خود نشان می‌دهد. در این مجموعه ضعیف‌ترین زره، سیستم یکپارچه سرامیکی شماره 5 است که بدون انتقال شکست مخروطی، عمق نفوذ بیشتری را متحمل می‌شود. در شکل 8 نیز زره شماره 7 علی‌رغم لایه‌چینی ضخیم فوقانی، کاراترین زره در مجموعه خود است. این زره از لحاظ کارایی بالستیک با زره شماره 6 قابل مقایسه نیست ولی به علت داشتن دو لایه ضخیم‌تر از مقدار حداقل، نسبت به زره شماره 3 کارایی بسیار بالاتری دارد.

- طبق شکل 11 زره شماره 8 کاراترین و بهینه‌ترین زره در مجموعه خود است و زره شماره 7 کاراترین و بهینه‌ترین زره در مجموعه زره‌های سوراخ

- [6] R. L. Woodward, W. A. Gooch, R. G. O. D. JR, W. J. Perciballi, B. J. Baxter, S. D. Pattie, A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics, *International Journal Impact Engng*, Vol. 15, No. 5, pp. 605-618, 1994 .
- [7] E. C. Anderson, JR & B. L. Morris, The ballistic performance of confined Al₂O₃ ceramic tiles, *International Journal Impact Engng* Vol. 12, No. 2, pp. 167-187, 1992 .
- [8] P. Cunniff, Assessment of small arms (ball round) body armor performance, *Proceedings of 18th international symposium on ballistics*, 1999 .
- [9] A. Prakash, J. Rajasankar, N. Anandavalli, M. Verma, N. R. Iyer, Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets, *International Journal of Adhesion & Adhesives* Vol. 41, pp. 186-197, 2013 .
- [10] ansys v.14.0 help .
- [11] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar, G. E. B. Tan, Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 52, No. 37-46, 2013 .
- [12] J. O. Hallquist, LS-DYNA theory manual, 2006 .
- [13] LS-DYNA Keyword user's manual version 971, Vol. I & II, 2007 .
- [14] D. S. Cronin, K. Bui, C. Kaufmann, G. McIntosh, T. Berstad, Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna, *4th European LS-Dyna Users Conference*, Material I .
- [15] G. R. Johnson, R. A. Stryk, T. J. Holmquist, S. R. Beissel, Numerical Algorithms in a Lagrangian Hydrocode, *Defense Technical Information Center*, 1997 .
- [16] Z. Rozenberg, Y. Yeshurun, the relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles, *International Journal Impact Engng*, Vol. 7, No. 3, pp. 357-362, 1988 .
- [17] S. Sarva, S. Nemat-Nasser, J. McGee, J. Isaacs, The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 277-302, 2007 .

مقاومت بالستیک	Ballistic resistance
تأخیر زمانی در شکست	dwell
حد کشسان هیوگونیوت	HEL
نرم افزار تحلیلی اجزا محدود به روش صریح	LS-Dyna
مقاومت مکانیکی	Mechanical impedance
فشار کششی هیدرواستاتیک بیشینه نرمال	Normalized maximum tensile hydrostatic pressure
نوعی المان 2 بعدی 4 گرهی	Plane162
منطقه خرابی و ناحیه خردشده	Pulverized zone

7- مراجع

- [1] J. Lo'pez-Puente, A. Arias, R. Zaera, C. Navarro, The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 321-336, 2005 .
- [2] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, S. D. Rajan, Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact, *Composites: Part B*, Vol. 41, pp. 583-593, 2010 .
- [3] A. P. T. M. J. Lamberts, Numerical simulation of ballistic impacts on ceramic material, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, *Materials Technology*, 2007 .
- [4] D. Orphal, R. Franzen, Penetration of confined silicon carbide targets by tungsten long rods at impact velocities from 1.5 to 4.6 km/s, *International Journal Impact Eng* Vol. 19(1), No. 1, 1997 .
- [5] D. Shockey, A. Marchand, S. Skaggs, G. Cort, M. Burkett, R. Parker, Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods, *International Journal Impact Eng* Vol. 9(3):263, 1990 .