مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 125-136

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی رفتار زره‌های سرامیکی تحت اثر ضربه پرتابه ضد زره "اِی پی ام 2" با کالیبر 7/62 میلی متر

علی راشد[1]، مجتبی یزدانی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
2- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
* تبریز، کد پستی 1996- 51335، sut.ac.ir@m.yazdani

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 تیر 1393
پذیرش: 01 شهریور 1393
ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:
نفوذ پرتابه سرعت بالا
زره چند لایه سرامیکی
شکست مخروطی
پرتابه ضد زره "ای پی ام 2"
زره سرامیکی با صفحه پشتیبان شکل‌پذیر

چکیده

در این مقاله رفتار زره سرامیکی چند لایه و زره ترکیبی سرامیک با صفحه پشتیبان شکل‌پذیر در برابر پرتابه ضد زره روکش‌دار "اِی پی ام 2" به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. زره‌های ترکیبی بر طبق کلاس حفاظتی "بی آر 7" باید توانایی مقابله در برابر مهمات ضد زره با کالیبر 7/62 میلی‌متر با سرعت حدود830 متر بر ثانیه را داشته باشند. نتایج حاکی از آن است که سرامیک برخلاف فولاد (هرچند با مقاومت بسیار بالا)، امکان ایجاد نفوذ و خرابی اولیه توسط روکش برنجی و فیلر سربی را نمی‌دهد و با شکست روکش گلوله و سایش هسته، زره سرامیکی مقاومت بالاتری را نسبت به زره فولادی با جرم مشابه نشان می‌دهد. با مقایسه زره‌های سرامیکی این نتیجه حاصل شد که زره سرامیکی با صفحه پشتیبان شکل‌پذیر علاوه بر داشتن خواص فوق، توانایی ضبط روکش گلوله را نیز داراست؛ خاصیتی که در زره چند لایه سرامیکی بدون صفحه پشتیبان دیده نمی‌شود. صفحه پشتیبان شکل‌پذیر سرامیک امکان کاهش 9 برابری سرعت پسماند گلوله را نسبت به زره سرامیکی چند لایه و کاهش 19 برابری را نسبت به زره سخت فولادی به ازای جرم مشابه نشان می‌دهد. نکته دیگر مورد بحث در این پژوهش، مقدار جرم موثر سرامیک می‌باشد که در برابر گلوله مقاومت می‌کند. هر چه این جرم بیشتر باشد مقاومت بالستیک زره سرامیکی بیشتر خواهد بود.

Studying the behavior of ceramic armors impacted by a 7.62-mm APM2 projectile

Ali Rashed[1], Mojtaba Yazdani[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
2- 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 21 July 2014
Accepted 23 August 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
High-velocity penetrators
Multi-layered ceramic armor
Conoid failure
Armor piercing APM2 projectile
Ceramic armor with backing plate

ABSTRACT

In this paper, the behavior of multi-layered ceramic armor and ceramic armor with ductile backing against armor piercing APM2 projectile has been considered numerically. Multi-layered armors in accordance with BR7 ballistic protection class should protect against AP 7.62-mm projectiles with impact velocity of 830m/s. Results show that unlike high strength steel, ceramic resists the initial penetration of brass jacket and lead filler, and, consequently, erodes them at initial stages. This enables higher resistance in ceramic armor with similar mass in comparison with the steel one. It is shown that ceramic armor with ductile backing besides the above characteristics has the capability of bullet jacket strip and capturing brass jacket while the core penetrates through the armor. This characteristic is not observed in multi-layered ceramic armor without the backing plate. Ceramic armor with backing plate reduces a projectile's exit velocity one ninth the residual velocity of multi-layered ceramic armor and one nineteenth the residual velocity of high strength steel armor with similar mass. Another point discussed in this paper is the effective ceramic mass resistance against the projectile. The more mass involved, the more ballistic resistance gained.

1- مقدمه

امروزه صفحات نازک فولادی با مقاومت بالا در سازه‌های شهری و نظامی به عنوان محافظ بالستیک به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند و بر مبنای وزن سازه، قیمت، کاربرد و کارایی بالستیک از آلیاژهای مختلفی استفاده می‌شود[1].

فولادها به علت مقاومت و سختی بالا همراه با شکل‌پذیری و چکش‌خواری بالا و قیمت پایین در مقایسه با زره‌های هم رده خود ارجحیت بالایی دارند و از آنجا که نفوذ سرعت بالا فرآیندی بسیار موضعی و متمرکز است، فولادها به علت داشتن مقاومت و شکل پذیری بالا جاذب‌های انرژی مناسبی محسوب می‌شوند[1].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Rashed, M. Yazdani, Studying the behavior of ceramic armors impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 125-136, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

در سال‌های اخیر با تهدید رو به افزایش اسلحه و گلوله‌های "ای اف پی"[1] و گلوله‌های ضد زره علیه سازه‌های شهری و نظامی، نیاز مبرم برای بهینه‌سازی سازه‌های حفاظتی را فراهم کرده است. سپرهای زرهی در حالت کلی از صفحه فولادی یکپارچه با مقاومت بالا ساخته می‌شوند؛ اما از آنجا که امکان ساخت مواد مورد نظر در ضخامت‌های بالا همیشه امکان پذیر نیست، برای برآورده کردن ملزومات طراحی، زره‌ها به صورت لایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [2].

زره‌های ساخته شده از یک تک ماده جوابگوی گلوله پرتاب شده از سلاح کوچک خواهند بود ولی زره چند جزیی به خصوص با لایه فوقانی سخت سرامیکی و صفحه پشتیبان شکل‌پذیر جوابگوی گلوله‌های ضد زره خواهد بود؛ بدین گونه که سطح سخت سرامیک نوک گلوله را ساییده و کند می‌کند و صفحه پشتیبان شکل‌پذیر موجب جذب انرژی گلوله می‌شود. بورون کارباید، سیلیکون کارباید و یا بورون سیلیکون کارباید از جمله سرامیک‌های مورد استفاده در زره‌ها هستند[3] که در میان انواع سرامیک‌ها، اکسید آلومینیم (آلومینا) از اهمیت بالایی برخوردار است و از علل انتخاب آن می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

ماده خام آن ارزان است و تسلط بر روش تولید آن بیشتر است و فرآیند سینترینگ آن قابل اجرا در فشار اتمسفر است. از معایب آلومینا می‌توان به بالا بودن چگالی ماده نسبت به برخی مواد سرامیکی اشاره کرد [4].

در این میان به علت ارزان بودن و دسترسی راحت‌تر به سلاح‌های سبک، این نوع سلاح‌ها از پرخطرترین انواع سلاح می‌باشند و بیش‌ترین تلفات در آمار درگیری‌ها مربوط به این نوع اسلحه می‌باشد و نیاز به محافظت در برابر آن از نقطه نظر شهری و نظامی حائز اهمیت می‌باشد [1].

گلوله ضد زره روکش‌دار "اِی پی ام 2"[2] جزو گلوله‌هایی است که علیه زره‌های مقاوم فولادی و زره‌های چند جزیی استفاده می‌شود. از جمله زره‌های چند جزیی می‌توان به زره سرامیکی با صفحه پشتیبان چکش‌خوار یا زره فولادی- آلومینیمی اشاره کرد[2].

[المهندس 1996] در گزارشی درباره صفحات یکپارچه فلزی نشان داد که این صفحات در برابر گلوله کالیبر 7/62 میلی متر با سرعت 826 متر بر ثانیه، مقاومت بالاتری نسبت به صفحات لایه‌ای با مجموع ضخامت یکسان نشان می‌دهند.

تحقیقات بسیاری در مورد رفتار اهداف سرامیکی کامپوزیت (چند جزئی) همراه با مواد دیگر، در برابر ضربه انجام شده است. اُرفال و فرانزِن [5] سرامیک‌های بورون کارباید، آلومینیم نیترایدو سیلیکون کارباید را مورد مطالعه قرار دادند. شاکی و همکاران [6] شکست سرامیک‌های محصور را تحت ضربه میله به صورت پدیداری مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که خرد شدن سرامیک و جریان متعاقب، فرآیندی کلیدی است که در اثر حرکت خرده ریزه‌ها در خلاف جهت ضربه و عمود بر آن ایجاد می‌شود. وودوارد و همکاران [7] 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 [8] در مورد پرتابه‌های جرم ثابت، گزارش دادند که میله‌های بلند در مقایسه با میله‌های کوتاه بیشتر سایش می‌یابند.

در تحقیق انجام شده توسط هیزل [9] از گلوله ضد زره روکش‌دار "اف اف وی"[3] با هسته سخت کربید تنگستن با روکش فولادی (با کربن پایین) علیه زره سرامیکی با صفحه پشتیبان ضخیم استفاده شد و تأثیر مخرب روکش گلوله بر میزان نفوذ در صفحه پشتیبان نیمه بی‌نهایت بررسی شده است.

در تحقیق انجام شده توسط چوکرون [10] تأثیر ضربه گلوله "اِی پی ام 2" بر لبه هدف فلزی بررسی شده است. تحقیق مذکور بر مبنای تحلیل تیر تیموشنکو انجام شده است و پارامتر کرنش سایشی روکش گلوله به عنوان پارامتر کلیدی در شبیه‌سازی موفق ضربه گلوله به زره مطرح شده است.

در تحقیق اخیر توسط راشد [11] رفتار زره سرامیکی چند لایه (آلومینا) در برابر پرتابه سرعت بالا و رفتار شکست مخروطی زره چند لایه سرامیک- اپوکسی با مدل ساختاری جانسون– هولمکوییست مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده 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 لایه‌های نازک رویی همراه با لایه‌های ضخیم پشتی، کارایی بالستیک زره تا حد زیادی بالا می‌رود و در حالت کلی زره چند لایه سرامیکی نسبت به زره یکپارچه همراه با/ بدون صفحه محافظ پشتی، مقاومت بالستیک بالاتری خواهد داشت.

2- شرح مسئله

در این تحقیق به بررسی رفتار گلوله ضد زره "ای پی ام 2" در برابر زره چند لایه سرامیکی بصورت عددی پرداخته می‌شود. برخلاف تحقیقات پیشین که رفتار گلوله مذکور بر روی اهداف آلیاژ فولادی [10،1] و یا آلومینیمی [12] متمرکز شده است و یا در تحقیقات دیگر [9] رفتار گلوله ضد زره را بر روی هدف سرامیکی با صفحه پشتیبان ضخیم شکل‌پذیر مورد ارزیابی قرار داده است، در این پژوهش رفتار گلوله بر روی زره ترکیبی سرامیک- اپوکسی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طبق تحقیقات پیشین [11] این نوع زره‌ها زرهی موثر و مقاوم در برابر گلوله‌های نوک تیز می‌باشند؛ و با داشتن طراحی بهینه و وزنی سبک‌تر، کارایی بالستیک بالایی از خود نشان می‌دهند.

به علت محدودیت تحقیقات انجام شده در برخورد گلوله ضد زره روکش‌دار بر هدف سرامیکی، باید صحت سنجی دقیقی از لحاظ کیفیت برخورد و نفوذ و کمیت سرعت خروجی و یا عمق نفوذ صورت گیرد. در این پژوهش صحت سنجی به طور دقیق بر روی هدف فولادی صورت گرفته است و داده‌های خروجی شبیه‌سازی عددی با داده‌های تئوری و تجربی منابع دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

3- رده‌بندی حفاظتی زره

در طراحی سازه‌های حفاظتی، تعیین ظرفیت و درجه حفاظتی زره به خصوص در برابر تهدیدات معین و تعریف شده حائز اهمیت است؛ و برای ضربه‌های بالستیک ضوابط و استانداردهای بین‌المللی مختلفی توسعه یافته است. این استانداردها شامل نوع گلوله و محدوده سرعت شلیک می‌باشد که زره مذکور باید توانایی مقابله با آن را داشته باشد تا در ردیف خاصی از زره‌های حفاظتی طبقه‌بندی شود. از جمله این استانداردها، کلاس "بی آر 7"[4] می‌باشد که باید توانایی مقابله در برابر مهمات ضد زره با کالیبر 7/62 میلی‌متر را داشته باشد؛ و سرعت گلوله در این کلاس حدود 830 متر بر ثانیه

1- Explosively Formed Projectiles
2- APM2
3- FFV
4- BR7

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

می‌باشد[1]. از آنجایی که کارایی بالستیک زره متاثر از جزئیات هندسه گلوله‌های مختلف، حتی با کالیبر یکسان، می‌باشد بنابراین گلوله‌های با هندسه متفاوت، در رده‌بندی‌های متفاوتی از زره‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. در ضمن گلوله "اِی پی ام 2" در کلاس زره‌های "بی آر 7" طبقه‌بندی شده است[1]. رده حفاظتی "بی آر 7" بر مبنای معیار اروپایی[1] طبق جدول 1 می‌باشد. زره مورد بحث از جنس "ولدوکس 700 ای"[2] است که ترکیب شیمیایی آن طبق مرجع [1] می‌باشد.

4- مشخصات گلوله "اِی پی ام 2" و مکانیزم نفوذ در زره

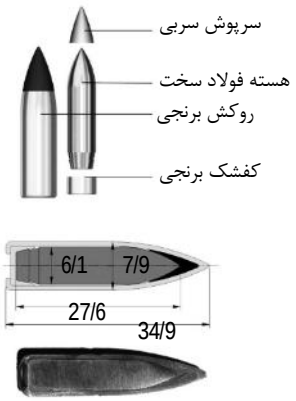
گلوله مورد استفاده در این پژوهش از نوع "اِی پی ام 2" 30-06 کالیبر 7/62 میلی متری است (شکل 1). گلوله ضد زره به صورت نوک تیز بوده و جنس هسته آن فولاد ابزار سخت شده 1007 می‌باشد که در داخل کفشک برنجی جاسازی شده است و سرپوش هسته از جنس سرب می‌باشد. هدف از جاسازی سرپوش سربی، حفظ پایداری گلوله به هنگام شلیک و پایداری در مراحل اولیه نفوذ در هدف می‌باشد. روکش این گلوله نیز از جنس برنج بوده و به طور کامل به هسته مقید شده است[1]. وجود روکش در گلوله جهت محافظت از هسته و ایجاد پیش بار در زره می‌باشد[9]. ابعاد و جرم بخش‌های مختلف گلوله طبق جدول 3 می‌باشد. جرم گلوله در حدود 10/5 گرم است؛ هرچند جرم مذکور بالاتر از جرم مورد نظر رده حفاظتی "بی آر 7" می‌باشد[1]. مکانیزم نفوذ گلوله "اِی پی ام 2"، از جمله در هدف دو لایه فولادی که مورد بحث صحت سنجی نتایج می‌باشد، بدین گونه است که گلوله در حین نفوذ به صفحه فوقانی با ایجاد سوراخ و رشد شعاعی آن در هدف پیش می‌رود. با رسیدن گلوله به صفحه پشتی، دو صفحه از یکدیگر جدا شده و از حالت تماسی خارج می‌شوند و بدین گونه به نظر می‌رسد که گلوله به طور کامل در داخل هدف فرو رفته و محصور شده است. در مرحله بعدی گلوله صفحه پشتی را سوراخ کرده و تکه‌ای از آن را جدا می‌کند[1]. در طی این نفوذ، روکش گلوله به طور کامل خارج شده و بعد به چند تکه شکسته و تقسیم می‌شود و اثر روکش به صورت گودی در ناحیه ضربه هویدا می‌شود(شکل2).

5- مدل‌سازی

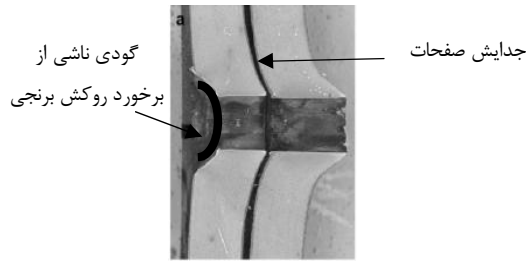
مدل‌سازی موجود در این پژوهش به صورت مدل لاگرانژی متقارن محوری است. این روش به خوبی روش سه بعدی با المان "سالید" قابلیت پیش بینی رفتار ماده در برابر ضربه را دارد. در مرجع [1] از روش لاگرانژی با مدل متقارن محور برای شبیه‌سازی ضربه گلوله 7/62 میلی متری به هدف دو لایه فولادی استفاده شده است و تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی مشاهده شده است. در مرجع [13] برای شبیه‌سازی پرتابه نوک تیز به هدف فولادی، از مدل متقارن محوری استفاده شده است و تطابق نزدیکی بین نتایج تجربی و عددی ارائه شده است.

روش‌های دیگر استفاده شده برای شبیه‌سازی گلوله ضد زره عبارت‌اند از روش "هیدرودینامیک ذرات هموار" که با کوپلینگ المان‌های لاگرانژی به این ذرات استفاده می‌شود[14]. از مزایای این روش جلوگیری از احتمال واپیچش شدید المان‌ها و از معایب آن هزینه محاسباتی بسیار بالا می‌باشد. روش هیدرودینامیک ذرات هموار از فرمول‌بندی لاگرانژی استفاده می‌کند. از روش‌های دیگر محاسباتی، روش لاگرانژی- اویلری اختیاری است که از روش

1- EN1063
2- WELDOX 700E



شکل 1 طرح و هندسه گلوله "اِی پی ام 2" کالیبر 7/62 [1]



شکل 2 تصویر سطح مقطع "ولدوکس 500 ای" با ضخامت 6×2 میلی متر تحت اثر نفوذ گلوله "اِی پی ام 2" [1]

اویلری در واپیچش شدید استفاده می‌کند.

الگوریتم تماسی از نوع دوبعدی با نام رویه واحد اتوماتیک[3] بوده و فاصله‌ای بین اجزای زره در نظر گرفته نشده است. از اصطکاک بین اجزا نیز صرفنظر شده است زیرا منجر به برآورد محافظه‌کارانه می‌شود[1].

6- صحت سنجی مسئله

6-1- مدل‌سازی گلوله ضد زره 7/62 میلی‌متر و هدف"دی12دابلیو"[4] [1،15،16]

مدل مورد بحث این بخش متشکل است از دو لایه چسبیده "ولدوکس 700 ای"[5] تحت عنوان کد "دی 12 دبلیو" [6] [2] به شعاع 50 میلی متر با ضخامت 6 میلی متر برای هر لایه در برابر گلوله "اِی‌پی‌ام 2" (شکل 3).

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزارهای «ال اس داینا»[7] و «انسیس»[8] استفاده شده است. المان مورد استفاده در این بحث، المان 2 بعدی و 4 گرهی با شش درجه آزادی[9] می‌باشد. تعداد المان و گره برای هر جز طبق جدول 2 می‌باشد.

نحوه شبکه‌بندی هدف و گلوله بدین گونه است که مقدار نسبت ابعاد[10] [17] در هیچ‌کدام از المان‌های ابتدایی و انتهایی خطوط بیشتر از 3 نیست. در شبکه‌بندی هدف، المان‌های محل ضربه ریزتر و برابر با 0/45 میلی‌متر می‌باشند. در مدل اجزای گلوله نیز المان‌ها در محل ضربه 1/5

3- 2D-Automatic single surface
4- D12W
5- Weldox 700E
6- Double layered Weldox 12mm thickness (D12W)
7- LS-DYNA version971
8- Ansys v.14.0
9- plane 162
10- Spacing ratio

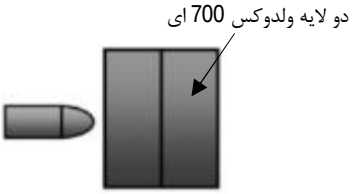
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

جدول 1 رده حفاظتی "بی آر 7" بر مبنای EN1063 [1]

کلاس	سلاح	کالیبر	نوع	جرم (گرم)	سرعت (متر بر ثانیه)	مسافت برخورد (میلی متر)
بی آر 7	تفنگ خان‌دار	7/62×51	روکش با آلیاژ مس/ نوک تیز/ هسته فولادی	9/8 ±0/5	820±10	120±10

جدول 2 تعداد گره و المان برای پرتابه و هدف

اجزای مدل	هدف ولدوکس 700 ای	روکش	هسته	فیلر جلویی	فیلر عقبی
تعداد المان	2400	828	1068	1526	473
تعداد گره	2562	978	1167	1660	532



شکل 3 لایه چینی کد "دی 12 دبلیو" [2]

میلی‌متر بوده و در انتهای گلوله اندکی درشت می‌شوند (با نسبت ابعاد کمتر از 3).

طرح و شبکه بندی مدل مطابق شکل 4 می‌باشد و شرایط مرزی هدف به طور کامل گیردار است. البته اندازه و شرایط مرزی هدف در افزایش یا کاهش مقاومت بالستیک آن در ضربه سرعت بالا تأثیر چندانی ندارد[1].

سرعت ضربه مورد استفاده در این مدل سازی جهت صحت سنجی عبارت‌اند از 800، 950 و 679 متر بر ثانیه.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، صحت سنجی مربوط به گلوله ضد زره روکش‌دار از دو جنبه الف) داده‌های کمی و ب) ضربه و نفوذ کیفی در هدف دارای اهمیت است. از آنجا که منابع تجربی و تئوری قابل دسترسی برای شبیه‌سازی نفوذ این گلوله در زره سرامیکی وجود ندارد بنابراین به بررسی جزیی‌تر صحت سنجی مذکور می‌پردازیم.

6-1-1- مدل ساختاری و معیار شکست گلوله ضد زره و هدف فولادی

مدل ساختاری مورد استفاده برای گلوله و هدف، مدل بهبود یافته جانسون کوک[1] می‌باشد[1]. در این مدل تنش معادل به صورت معادله 1 بیان می‌شود:

$$\sigma_{\rm eq} = \left(A + B\varepsilon_{\rm eq}^{n}\right)\left(1 + \dot{\varepsilon}_{\rm eq}{}^{*}\right)^{C}\left(1 - T^{*m}\right) \qquad (1)$$

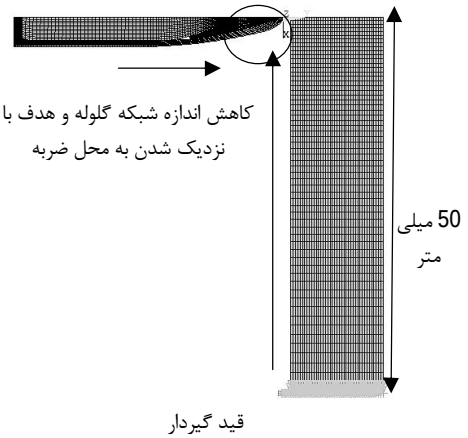
در معادله فوق $\varepsilon_{\rm eq}$ کرنش پلاستیک معادل و A, B, n, C و m مربوط به ضرایب ماده هستند. نرخ کرنش پلاستیک معادل به صورت بی بعد $\dot{\varepsilon}_{\rm eq}{}^{*} = \frac{\dot{\varepsilon}_{\rm eq}}{\dot{\varepsilon}_0}$ می‌باشد. دمای متشابه به صورت $T^{*} = \frac{T-T_r}{T_m-T_r}$ است.

نمو دمایی ناشی از گرمایش بی‌دررو به صورت معادله 2 محاسبه می‌شود.

$$\Delta T = \int_0^{\varepsilon_{\rm eq}} \chi \frac{\sigma_{\rm eq} d\varepsilon_{\rm eq}}{\rho C_{\rm p}} \qquad (2)$$

در معادله فوق χ ضریب تیلور- کوییني می‌باشد که بیانگر نسبت کار

1- Modified Johnson Cook (MJC)



شکل 4 طرح و شبکه‌بندی گلوله و هدف "دی 12 دبلیو"

تبدیل شده پلاستیک به گرما است. معیار شکست مورد استفاده نیز معیار کاک کرافت - لاتام[2] است[1] که مدل آن به صورت معادله 3 می‌باشد.

$$W = \int_0^{\varepsilon_{\rm eq}} \langle\sigma_1\rangle\, d\varepsilon_{\rm eq} \le W_{\rm cr}$$
$$\langle\sigma_1\rangle = \sigma_1 \quad if \quad \sigma_1 \ge 0$$
$$\langle\sigma_1\rangle = 0 \quad if \quad \sigma_1 < 0 \qquad (3)$$

طبق معادله 3 بدیهی است که در وضعیت تنش فشاری هیچ گونه شکستی رخ نخواهد داد. این مدل قادر است رفتار اکثر فولادها را تحت اثر ضربه پیش بینی کند و به میزان توانمندی مدل جانسون کوک قادر است رفتار ماده را تحت اثر نفوذ پیش بینی کند[1].

در مدل بهبود یافته جانسون کوک ضریب TC به عنوان دمای بحرانی جهت سایش المان بکار گرفته می‌شود که در مرجع [1] مقدار آن به صورت T_c=0.9T_m در نظر گرفته شده است. ضریب TC در مراجع مختلف متفاوت است. در ضربه سرعت بالا، تغییر شکل در نرخ کرنش بالا انجام می‌گیرد و حرارت موضعی بسیار بالا می‌رود که تحت عنوان گرمایش بی‌دَررو مطرح می‌شود. این گرمایش موجب نرم شدن ماده و کاهش مقاومت آن می‌شود که تأثیر آن به مراتب بیشتر از تأثیر کرنش سختی است[18].

در شبیه‌سازی ضربه سرعت بالا که اعوجاج شدید المان مطرح است از پارامتر دمای ذوب برای تصحیح و کالیبراسیون شبیه‌سازی استفاده می‌شود زیرا اعوجاج شدید المان موجب خطا در شبیه‌سازی می‌شود؛ تا آنجا که در برخی تحقیقات به صورت T_c=0.5T_m بدون هیچ‌گونه خطا در تطبیق با نتایج تجربی وارد مسئله می‌شود[18]. ضرایب مربوط به مواد طبق جدول 5 می‌باشد.

6-1-2- تطبیق نتایج

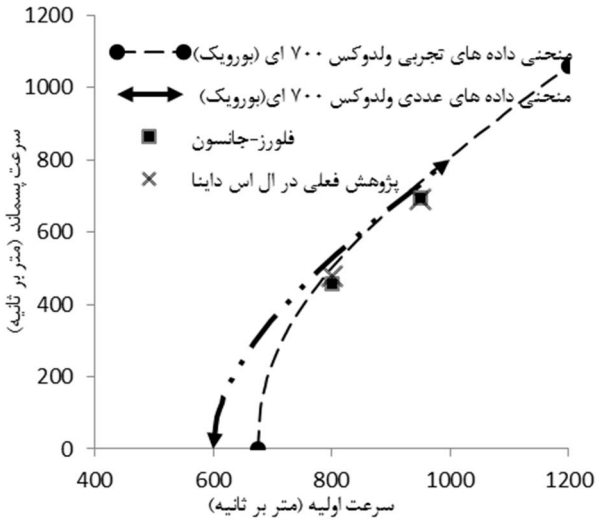
مطابق شکل 5 منحنی داده‌های تجربی سرعت اولیه - سرعت پسماند برای هدف فولادی ارائه شده است[1]. فولاد "ولدوکس 700 ای" نسبت به فولاد

2- Cockcroft-Latham (CL)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

جدول 3 هندسه و جرم قسمت‌های تشکیل دهنده گلوله "اِی‌پی‌ام 2" شامل طول و قطر (میلی متر) و جرم (گرم) (رده "بی آر 7") [1]

روکش برنجی			کفشک برنجی			هسته فولاد سخت			سرپوش سربی		
طول	قطر	جرم	طول	قطر	جرم	طول	قطر	جرم	طول	قطر	جرم
34/9	7/9	4/4	4	6/2	0/4	27/6	6/1	5	9/3	5/1	0/7



شکل 5 منحنی و داده‌های سرعت اولیه-سرعت پسماند برای هدف "دی 12 دبلیو" [1،۲]

"ولدوکس 500 ای" مقاومت بالاتری دارد[1] و درباره رفتار هدف "ولدوکس 700 ای" می‌توان به این نکته اشاره کرد که این ماده در مقایسه با فولاد کم مقاومت‌تر "ولدوکس 500 ای" رفتار کرنش سختی بالاتری را نشان می‌دهد[19]؛ و این با رفتار مشاهده شده در مرجع [1] متناقض است. با استناد به مرجع [1] نیازی به تطبیق جزیی در داده‌های تئوری و تجربی نیست و هدف اصلی پیش بینی صحیح رفتار کلی ضربه است که البته در این پژوهش رفتار بالستیک با دقت بالایی تطبیق داده شده است و مقادیر سرعت پسماند برای هدف "دی 12 دبلیو" به صورت شبیه‌سازی نیز ارائه شده است. داده‌های تجربی بورویک بر مبنای مدل رِشت - ایپسون[1] در مرجع [1] به صورت منحنی موجود در شکل 5 ارائه شده‌اند که تطابق خوبی با داده‌های تجربی گسسته بورویک دارد [1] و به خاطر پراکنده بودن داده‌ها به صورت منحنی ارائه شده است. از آنجا که سرعت بالستیک هدف مزبور به صورت تجربی برابر با 675 متر بر ثانیه است [1]، جهت ارائه کامل مدل رِشت - ایپسون برای مدل عددی بورویک، منحنی تا نقطه صفر پسماند ترسیم شده است در حالی که از سرعت ضربه 675 متر بر ثانیه به بالا معتبر است که البته داده‌های مربوط به شبیه‌سازی همین مرجع [1] سرعت پسماند تجربی را با دقت بالایی تأیید می‌کند. در ضمن داده‌های مربوط به فلورز-جانسون [2] در محدوده سرعت 950-775 متر بر ثانیه است که فقط 2 داده مزبور برای هدف "دی 12 دبلیو" موجود می‌باشد. داده‌های استخراج شده از منحنی‌های فوق و نتایج شبیه‌سازی مرجع [1،۲] طبق جدول 4 می‌باشد. با توجه به جدول 4 مشاهده می‌شود که بیشینه درصد خطا در مقایسه با شبیه‌سازی مراجع پیشین 9/21 % است و در مقایسه با نتایج تجربی 6/73 % می‌باشد. با توجه به مرجع [1] درصد خطای 12-6 % برای آزمایش‌های تجربی مربوط به فولادها، خطایی قابل قبول است و برای نتیجه گیری درباره رفتار ضربه هدف مذکور مناسب می‌باشد.

حال به بررسی کیفی و مرحله به مرحله فرآیند نفوذ گلوله روکش‌دار می‌پردازیم. مطابق شکل 6 نفوذ پنج مرحله‌ای گلوله ضد زره روکش‌دار در هدف فولادی مشاهده می‌شود. رفتار جدایش صفحات حین برخورد و جدا شدن روکش گلوله و اثرات گودی در صفحه فوقانی که در بخش‌های پیشین مورد بحث قرار گرفت با شبیه‌سازی مطابقت دارد و به خوبی با مکانیزم نفوذ تجربی شکل 2 مشابهت دارد.

با توجه به نتایج فوق مدل گلوله ضد زره روکش‌دار معتبر بوده و قابل استفاده برای هدف سرامیکی می‌باشد.

2-6- مدل زره سرامیکی چند لایه

زره چند لایه سرامیکی متشکل از لایه‌های سرامیکی با لایه اپوکسی بین سرامیک‌هـــا می‌باشد. طبق مرجع [11] این زره توانـــایی مقابله در برابر پرتابه سرعت بالای 7/62 میلی متری را (با سرعت حدود 830 متر بر ثانیه و بیشتر) داراست و نسبت به نمونه‌های سرامیکی با صفحه پشتیبان طراحی بهینه‌ای دارد. با در نظر گرفتن پارامترهای مربوط به ارزیابی کارایی بالستیک از جمله میزان نفوذ پسماند که تابعی از مقاومت فشاری موثر سرامیک می‌باشد[20] و تاخیر زمانی در ایجاد خرابی سرامیک[2] و سایش بیشتر پرتابه و مکانیزم خرابی سرامیک و سرعت پسماند گلوله، می‌توان به این نکته پی برد که زره سرامیکی چند لایه مقاومت بالستیک بهبود یافته‌تری نسبت به زره یکپارچه سرامیکی یا سرامیک با صفحه پشتیبان دارد[11]. در زره سرامیکی چند لایه، لایه سرامیک فوقانی فشار ناشی از ضربه را توسط لایه‌های اپوکسی به لایه سرامیک بعدی انتقال می‌دهد. این انتقال فشار به صورت گسترش شکست مخروطی و افزایش سطح شکستِ مخروطی شکل بوده و منجر به کاهش مرحله به مرحله میزان فشار پرتابه می‌شود. حین انتقال فشار، پرتابه نوک تیز در اثر برخورد به سطح سخت سرامیک، کند شده و بخش اعظمی از انرژی جنبشی پرتابه تحلیل می‌رود.

مدل ساختاری مربوط به اجزای این زره مطابق بخش بعدی است.

جدول 4 مقادیر سرعت پسماند برای سرعت ضربه مختلف در هدف "دی 12 دبلیو"

نتایج	سرعت ضربه (متر بر ثانیه)	سرعت پسماند (متر بر ثانیه)	درصد خطا در شبیه‌سازی موجود
بورویک (تجربی) [1]	800	500/1	% 4/41
	950	739/8	% 6/73
بورویک (شبیه‌سازی) [1]	800	526/51	% 9/21
	950	736/86	% 6/35
فلورز جانسون [2]	800	456/87	% 4/42
	950	694/12	% 0/59
شبیه‌سازی موجود در این پژوهش	800	478	-
	950	690	-

1- Recht-Ipson

2- dwell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

6-2-1- مدل ساختاری سرامیک آلومینا 99/5 % (مدل جانسون - هولمکوییست سرامیک) [21]

مدل خرابی پلاستیسیته جانسون- هولمکوییست برای مدل‌سازی سرامیک، شیشه و مواد ترد دیگر مناسب می‌باشد و تنش معادل نرمال بر مبنای پارامتر خرابی D به صورت معادله 4 است:

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (4)$$

σ_i^*, σ_f^* به ترتیب تنش شکست نرمال و تنش معادل اولیه نرمال می‌باشند. فرم کلی تنش معادل نرمال به صورت معادله 5 است:

$$\sigma^* = \sigma / \sigma_{\mathrm{HEL}} \quad (5)$$

σ تنش معادل واقعی و σ_{HEL} تنش معادل در حد کِشسان هیوگونیوت[1] است. مقاومت اولیه و شکست نرمال به صورت معادله 6 و 7 است:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (6)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (7)$$

توجه شود که مقاومت شکست نرمال را به صورت $\sigma_f^* \le \sigma_f^*(\max)$ می‌توان محدود کرد. ثوابت ماده A، B، C، M، N و $\sigma_f^*(\max)$ می‌باشد. فشار نرمال نیز حاصل تقسیم فشار واقعی بر فشار در حد کِشسان هیوگونیوت می‌باشد. فشار کششی هیدرواستاتیک بیشینه نرمال[2] نیز به صورت معادله 8 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 مرجع به دست می‌آید(معادله 8):

$$T^* = T / P_{\mathrm{HEL}} \quad (8\text{-الف})$$

$$P^* = P / P_{\mathrm{HEL}} \quad (8\text{-ب})$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0 \quad (8\text{-ج})$$

T^* بیشینه مقاومت شکست کششی نرمال است: $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0\mathrm{s}^{-1}$ و انباشتگی خرابی به صورت معادله 9 می‌باشد.

$$D = \frac{\Sigma \Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \quad (9)$$

ε_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت P است. در صورتی که کرنش پلاستیک وجود نداشته باشد: $P^* = -T^*$ (معادله10)

$$\varepsilon_p^f = D_1 (T^* + P^*)^{D_2} \quad (10)$$

فشار هیدرواستاتیک قبل از شکست (D=0) به صورت معادله 11 است. ($\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$) که برای فشارهای کششی به صورت معادله 12 تبدیل می‌شود که از اثرهای انرژی صرف‌نظر می‌شود. بعد از انباشتگی خرابی(D>0) بالکینگ[3] اتفاق می‌افتد و نمو فشار که از ملاحظات انرژی قابل تعیین است، به صورت معادله 13 اضافه می‌شود.

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (11)$$

$$P = K_1\mu \quad \mu < 0 \quad (12)$$

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (13)$$

خلاصه‌ای از ضرایب تبدیل شده این مدل ساختاری در نرم افزار به صورت جدول 6 می‌باشد.

1- HEL
2- Normalized maximum tensile hydrostatic pressure
3- خرابی ناشی از تغییر حجم

6-2-2- مدل ساختاری اپوکسی (مدل پلاستیک سینماتیک[4])

از آنجا که اپوکسی مقاومت کمی دارد، آن را می‌توان به عنوان سیالی در نظر گرفت که در برابر فشار، مقاومت داشته باشد که مدل نال[5] از آن جمله خواهد بود. ولی از آنجا که در منابع موجود ضرایب کوپر - سیموندز نیز دخیل هستند، مدل ساختاری پلاستیک سینماتیک تمامی شرایط خواسته شده را برآورده خواهد کرد[11]. جدول 7 ضرایب اپوکسی را ارائه می‌دهد.

7- مکانیزم نفوذ گلوله ضد زره در هدف سرامیکی چند لایه

طبق مرجع [11] زره‌های با کدبندی E(1)C(12))2 و E(0.5)C(8)2(E(0.5)C(4))2 به ازای چگالی سطحی معین (93/58 کیلوگرم بر متر مربع) مورد بررسی قرار می‌گیرند. زره اول شامل دو لایه سرامیک با ضخامت هر یک 12 میلی متر با لایه اپوکسی 1 میلی متری پشت هر لایه سرامیک می‌باشد. زره دوم شامل دو لایه سرامیک به ضخامت هر یک 8 میلی متر و دو لایه دیگر 4 میلی متری با لایه اپوکسی 0/5 میلی متری پشت هر لایه سرامیک. زره مورد بحث دیگر زره سرامیکی 8 میلی متری با صفحه پشتیبان 25 میلی متری با لایه اپوکسی 1/5 میلی متری بین لایه‌ای با کد Al(25)E(1.5) C(8) می‌باشد و در این زره نقش لایه شکل‌پذیر همراه با لایه سرامیک در برابر گلوله به تصویر کشیده می‌شود. زره دیگر مورد بحث زره یکپارچه 25 میلی متری با کد E(2)C(25) می‌باشد.

طبق جدول 8 بالاترین کارایی بالستیک در زره‌های بدون صفحه پشتیبان در برابر گلوله ضد زره، به زره شماره 3 اختصاص دارد.

این زره طبق مرجع [11] به خاطر داشتن چیدمان لایه‌ای سرامیک نسبت به زره یکپارچه سرامیکی شماره 2 از مقاومت بالستیک بالایی برخوردار است. پس مشاهده می‌شود که زره شماره 3 چه در برابر گلوله فولادی و چه در برابر گلوله ضد زره روکش‌دار با هسته فولاد سخت، مقاومت بالاتری دارد و این به علت مقاومت فشاری بالای آن و گسترش شکست مخروطی سیستم است.

طبق جدول 8 مشاهده می‌شود که زره‌های لایه‌ای سرامیکی با چگالی سطحی نزدیک به هم نسبت به زره شماره 1 (با همان چگالی سطحی) که از جنس فولاد مقاوم ولدوکس می‌باشد، منجر به سایش بیشتری از نوک گلوله می‌شوند. در مرجع [11] طول سایش پرتابه توسط زره، یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کارایی بالستیک می‌باشد و زره‌های سرامیکی در برابر گلوله ضد زره این خاصیت مهم را از خود نشان می‌دهند.

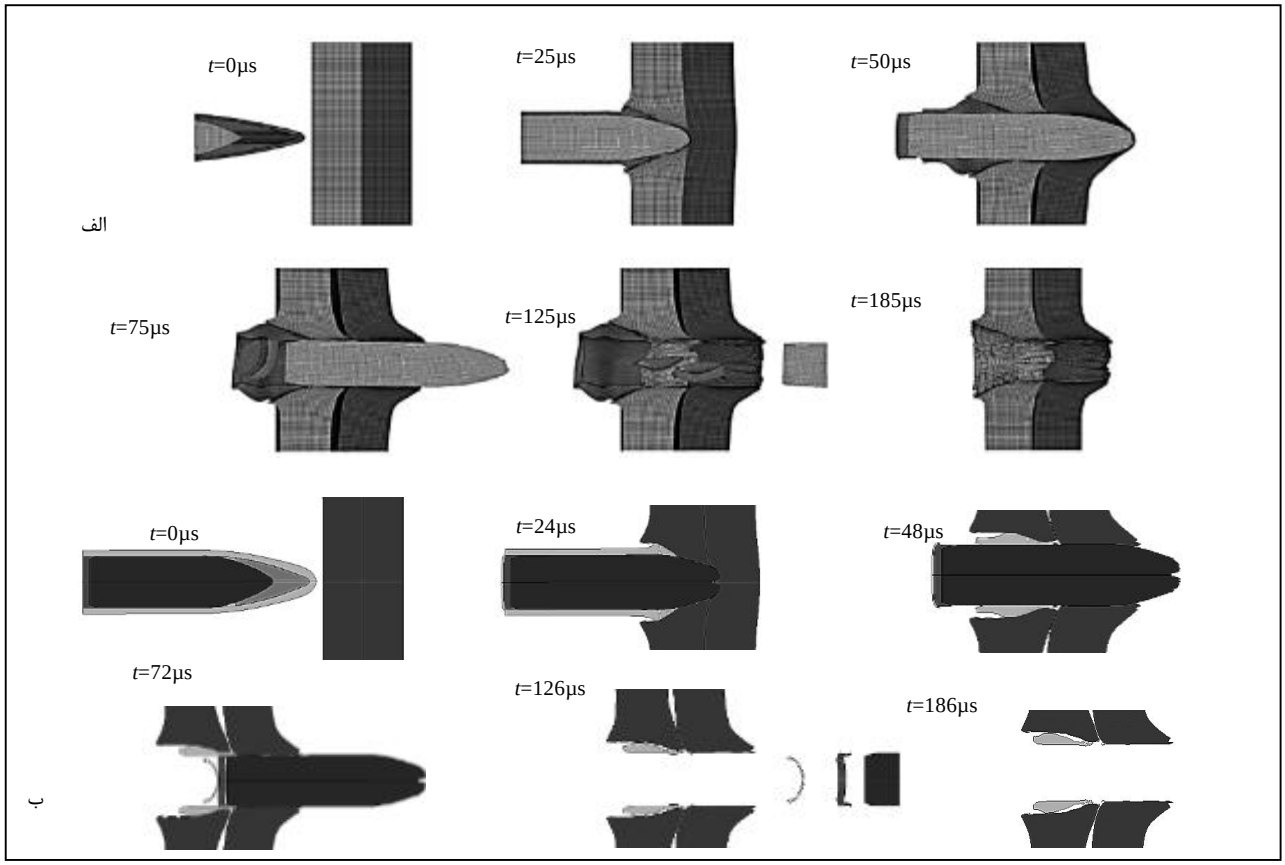
با نگاه اجمالی به شکل 7- الف مشاهده می‌شود که روکش گلوله و فیلر سربی در ابتدای برخورد به سرامیک دچار شکست شده و امکان ایجاد گودی و حفره اولیه در سرامیک وجود ندارد و این برخلاف رفتار زره فولاد سخت ولدوکس می‌باشد که ایجاد گودی و حفره اولیه موجب خرابی موضعی در هدف می‌شود و رفتار هدف در برابر نفوذ هسته، به صورت مقاومت در برابر رشد شعاعی این حفره می‌باشد. در حقیقت این مقاومت بسیار کم خواهد بود و نهایتا موجب افزایش 210 درصدی سرعت پسماند به ازای چگالی سطحی برابر نسبت به زره سرامیکی می‌شود. در ضمن فولاد مقاوم و سخت ولدوکس به میزان سرامیک آلومینا توانایی جلوگیری از ایجاد خرابی اولیه را ندارد بطوری‌که پدیده توقف و شکست گلوله در سطح سرامیک[6] از عوامل موثر در افزایش مقاومت زره سرامیکی می‌باشد [11].

4- Plastic kinematic
5- null
6- dwell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

جدول 5 ضرایب ماده در مدل بهبود یافته جانسون کوک برای قسمت‌های تشکیل دهنده گلوله ضد زره و هدف ولدوکس 700 ای [1]

نماد (واحد)	توضیحات	ماده	ولدوکس 700 ای	هسته فولادی	سرپوش سربی	روکش برنجی
خواص فیزیکی						
$Ro(kg/m^3)$	چگالی	چگالی	7850	7850	10660	8520
E(GPa)	مدول یانگ	مدول یانگ	210	210	1	115
PR	نسبت پواسون	نسبت پواسون	0/33	0/33	0/42	0/31
XSI	ضریب تیلور کوییننی	ضریب تیلور کوییننی	0/9	0/9	0/9	0/9
C_p(J/kgK)	گرمای ویژه	گرمای ویژه	452	452	124	385
$ALPHA(/K)$	ضریب انبساط	ضریب انبساط	$1/2\times10^{-5}$	$1/2\times10^{-5}$	$2/9\times10^{-5}$	$1/9\times10^{-5}$
خواص کرنش سختی						
A(MPa)	-	-	819	1200	24	206
B(MPa)	-	-	308	50000	300	505
N	-	-	0/64	1	1	0/42
خواص نرخ کرنش سختی						
$E0DOT(s^{-1})$	نرخ کرنش مرجع	نرخ کرنش مرجع	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-4}
C	-	-	0/0098	0	0/1	0/01
خواص گرما نرمی						
T_r(K)	دمای مرجع	دمای مرجع	293	293	293	293
T_m(K)	دمای ذوب	دمای ذوب	1800	1800	760	1189
m	-	-	1	1	1	1/68
معیار شکست کاک کرافت-لاتام						
W_{cr}(MPa)	-	-	1486	-	175	914



شکل 6 فرآیند نفوذ گلوله 7/62 ضد زره در صفحات ولدوکس 700 ای با سرعت ضربه 679 متر بر ثانیه الف) فلورز-جانسون (مدل 3 بعدی) [2] ب) شبیه‌سازی موجود (مدل 2 بعدی متقارن محوری)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

جدول 6 ضرایب مربوط به آلومینا در "ال اس داینا" [11]

پارامتر	نماد(واحد)	مقدار
مدل جانسون هولمکوییست[1]		
چگالی	Ro(kg/m³)	3800
مدول برشی	G(Pa)	135×10^{9}
مقاومت اولیه نرمال	A	0/989
مقاومت شکست نرمال	B	0/77
ثابت نرخ کرنش	C	0
توان مقاومت شکست	M	1
توان مقاومت اولیه	N	0/376
نرخ کرنش مرجع	$EPSI$(s^{-1})	1
حداکثر مقاومت کشش	T(Pa)	$1/5\times10^{8}$
حداکثر مقاومت شکست نرمال	$SFMAX$	0/5
حد کِشسان هیوگونیت[2]	HEL(Pa)	$5/9\times10^{9}$
مؤلفه فشار در حد کِشسان هیوگنیت	PHEL(Pa)	2200×10^{6}
کسر تبدیل انرژی (ضریب بال کینگ)	$BETA$	1
پارامتر کرنش پلاستیک در شکست	$D1$	0/01
توان کرنش پلاستیک در شکست	$D2$	1

جدول 7 ضرایب مربوط به اپوکسی در "ال اس داینا" [11]

پارامتر	نماد (واحد)	مقدار
مدل پلاستیک سینماتیک		
چگالی	Ro(kg/m³)	1190
مدول یانگ	E(Pa)	$4/48\times10^{9}$
نسبت پواسون	PR	0/4
تنش تسلیم	$SIGY$(Pa)	$4/5\times10^{7}$
پارامتر نرخ کرنش (کپر سیموندز)	SRC	0
پارامتر نرخ کرنش (کپر سیموندز)	SRP	0

جدول 8 مقادیر سرعت پسماند و سایش گلوله ضد زره روکش‌دار برای 5 زره مختلف با چگالی سطحی مشابه با سرعت ضربه 800 متر بر ثانیه

شماره زره	کد زره	سرعت پسماند(m/s)	سایش گلوله(mm)
1	D12W	478	2/22
2	E(2)C(25)	343	6/35
3	(E(1)C(12))2	226	6/35
4	(E(0.5)C(8))2(E(0.5)C(4))2	456	3/49
5	Al(25)E(1.5)C(8)	26	2/85

در ادامه مرحله نفوذ گلوله، سرامیک توانایی مقاومت در برابر انرژی بالای ناشی از ضربه هسته را نداشته و هسته گلوله در هدف نفوذ کرده (شکل 7- ب و د) و سرانجام به علت تخریب کامل سرامیک، روکش گلوله در هدف محبوس نمی‌شود و همراه با هسته فولادی از هدف بیرون می‌آید.

حال با بررسی شکل 8 به تحلیل نحوه خارج شدن روکش از هسته فولادی گلوله در برخورد به زره سرامیکی می‌پردازیم. در این شکل نمودار سرعت - زمان گلوله در برخورد به زره دو لایه سرامیکی E(1)C(12))2 و زره فولادی D12W ترسیم شده است. در این نمودار سرعت هسته گلوله به صورت "سرعت جسم صلب"[3] در نظر گرفته شده است و سرعت روکش جدا شده توسط گره واقع بر روی این تکه محاسبه شده و سرانجام "سرعت جسم صلب" روکش یکپارچه گلوله، در لحظه اولیه قبل از تکه تکه شدن آن ترسیم شده است. "سرعت جسم صلب" برای روکش گلوله در تمامی لحظات نفوذ امکان پذیر نیست؛ زیرا بعد از تکه تکه شدن به صورت میانگین تکه‌های جدا شده محاسبه می‌شود و نتیجه درستی نخواهد داد؛ بنابراین بعد از جدا شدن، از طریق گرهی واقع بر روی جسم تحلیل می‌شود.

با مقایسه مسیر 2-1 و 3-1 از شکل 8 مشاهده می‌شود که روکش و هسته گلوله در نقطه 1 یعنی شروع حرکت گلوله و قبل از برخورد به هدف سرعت یکسان 800 متر بر ثانیه دارند. مشاهده می‌شود که در بازه زمانی 0 تا 12 میکروثانیه هسته گلوله مسیر 2-1 و روکش گلوله مسیر 3-1 را طی می‌کند بطوری‌که اختلاف سرعت هسته گلوله و روکش در لحظه 12 میکرو ثانیه برابر با 126 متر بر ثانیه است؛ یعنی در این بازه زمانی روکش برنجی در اثر برخورد با هدف کاهش سرعت دارد و هسته با سرعت اولیه بدون تماس با هدف در حال حرکت است (شکل 7- الف). مشخصه گلوله ضد زره این است که در هدف فولادی، ابتدا روکش و فیلر سربی در هدف نفوذ می‌کند و هسته در لحظه اولیه سالم باقی می‌ماند. بعد از ایجاد خرابی، وظیفه هسته باز کردن شعاعی (گشاد کردن) این سوراخ می‌باشد که مانع از خرابی و سایش نوک هسته گلوله می‌شود و هدف به راحتی تخریب می‌شود (شکل 6). در هدف سرامیکی توقف لحظه‌ای گلوله و خرابی آن، مانع از ایجاد سوراخ در هدف می‌شود و به صورت ایجاد ترک در سرامیک، موجب شروع خرابی می‌شود. در نمودار شکل 8 امکان نشان دادن توقف گلوله در سطح سرامیک وجود ندارد زیرا در لحظه خرابی نوک گلوله، مجموعه نقاط متشکله هسته و روکش در حال حرکت هستند (حرکت جسم صلب) در حالی که نوک گلوله در حال سایش است.

بعد از نقطه 2 مسیر سرعت - زمان هسته گلوله در زره فولادی و سرامیکی از هم جدا می‌شود. در این نقطه در زره سرامیکی نوک روکش برنجی ساییده شده است و هسته با زره درگیر است ولی در زره فولادی به علت سایش کمتر روکش، هسته با روکش و زره درگیر است و زره سرامیکی چند لایه به علت داشتن مقاومت فشاری بالا توانایی بیشتری در کاهش سرعت هسته گلوله دارد (شکل 7- ب). مسیر 2-5 و 2-6 نشان دهنده درگیری هسته گلوله با هدف است. در بازه زمانی 12 تا 42/5 میکروثانیه (نقطه 2 تا 4) که مقارن با درگیری هسته با هدف است، روکش برنجی نقشی در خرابی زره ندارد و به علت کاهش ناگهانی شتاب هسته گلوله در مسیر 5-2 و 2-6 در برخورد به هدف، روکش از قسمت انتهایی پاره شده و با سرعت بیشتری نسبت به هسته گلوله حرکت می‌کند (مسیر 4-2) و مشاهده می‌شود که مسیر سرعت روکش برنجی در هر دو هدف تا نقطه 4 به علت مقاومت نکردن در برابر هدف، سرعت یکسانی دارند.

بعد از نقطه 4 که تقریبا مقارن با نقاط 5 و 6 می‌باشد، طبق مطالب بیان شده به علت سرعت بالاتر روکش نسبت به گلوله، روکش قبل از هسته با هدف درگیر شده و موجب خرابی زره می‌شود (شکل 7-ج و د) و سرعت روکش در مسیر 7-4 و 8-4 کاهش می‌یابد و همزمان با آن در نقاط 5 (44 میکروثانیه) و 6 (52 میکروثانیه) هسته به سرعت پایدار و ثابتی می‌رسد زیرا دیگر هسته با زره درگیر نیست و روکش عملیات تخریب را انجام می‌دهد. با مقایسه مسیر 7-4 و 8-4 مشاهده می‌شود که کاهش شتاب روکش در زره

1- Johnson Holmquist
2- Hugoniot elastic limit
3- Rigid body velocity

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

فولادی بیشتر است و این به علت شکل‌پذیر بودن زره فولادی نسبت به زره سرامیکی است. در این بازه زمانی روکش توسط زره فولادی ضبط شده و داخل زره گیر می‌کند (شکل 6- ب) و با کاهش ناگهانی شتاب روکش، سرعت در لحظه 62 میکروثانیه به صفر می‌رسد (شکل 8) ولی در زره سرامیکی به علت مقاومت فشاری سرامیک، سرعت روکش پایین آمده و در لحظه 83 میکروثانیه به سرعت ثابت 358 متر بر ثانیه می‌رسد و ضبط روکش امکان پذیر نیست (البته ضبط روکش توسط زره در مورد لایه سرامیکی بسیار ضخیم ممکن است روی دهد). بعد از ثابت شدن سرعت روکش و هسته گلوله در برخورد به زره سرامیکی، به علت بالا بودن سرعت روکش نسبت به هسته، روکش به صورت پرتابه به بیرون شلیک می‌شود. این رفتار ضبط روکش گلوله شاید به ظاهر مزیتی برای زره فولادی محسوب شود، ولی در کل سرعت پسماند گلوله در هدف سرامیکی کمتر است و با افزایش ضخامت منجر به ضبط مجموعه گلوله 4 تکه خواهد شد بطوریکه زره فولادی توانایی آن را به ازای چگالی سطحی یکسان نخواهد داشت.

حال برای تحلیل جزیی رفتار بالستیک زره سرامیکی و مکانیزم شکست نیاز به مطالعه نحوه رشد شکست مخروطی می‌باشد.

یکی از پارامترهای مورد نظر این بحث در مکانیزم شکست سرامیک، محل شروع گسترش مخروطی ترک و زاویه گسترش آن است. موضوعی که پیش از این به آن پرداخته نشده است.

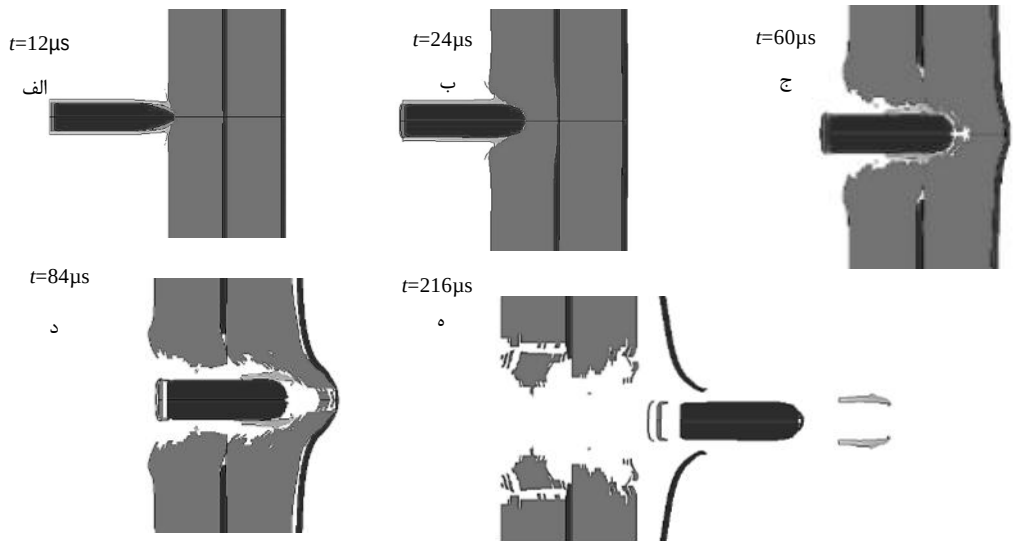
8- ارزیابی کارایی بالستیک در زره چند لایه سرامیکی در برابر گلوله ضد زره

طبق شکل 9 مشخصات هندسی ناحیه شکست یافته در سه زره سرامیکی 2 و 3 و 4 از جدول 8 مشهود است. شکست مخروطی مشخصه اصلی در زره سرامیکی است و شناخت نحوه استفاده از این پتانسیل برای بهبود مقاومت، شاخصه اصلی کار مهندسی است[11]. پارامترهای مختلفی جهت شناخت مکانیزم شکست مخروطی می‌توان ارائه داد. طبق شکل 9 طول نهایی شکست مخروطی در حالت دو بعدی (سطح نهایی شکست در حالت سه بعدی) یکی از عوامل موثر در توزیع فشار ضربه ناشی از گلوله می‌باشد. هر چه این سطح بیشتر باشد، نیروی منتقل شده به صفحه پشتی (اپوکسی) به ازای مساحت شکست یافته (تحت عنوان فشار) کمتر خواهد بود؛ بنابراین زره شماره 3 و 2 (شکل 9- ب و ج) کاراترین زره در بین 3 زره مذکور می‌باشد زیرا طول شکست در حالت دو بعدی 32 میلی متر بوده و بیشتر از طول بقیه زره‌ها می‌باشد.

ارتفاع پای اولین شکست مخروطی نیز عامل دیگری در زمان شروع توزیع فشار به صورت شکست مخروطی است. هر چه مقدار ارتفاع کمتر باشد، زره پتانسیل بیشتری برای گسترش این شکست خواهد داشت. طبق مطالب فوق زره شماره 4 (شکل 9-الف) کمترین ارتفاع (10 میلی متر) را داشته و موجب رشد مخروط دوم با مساحت بزرگ‌تری در لایه بعدی شده است.

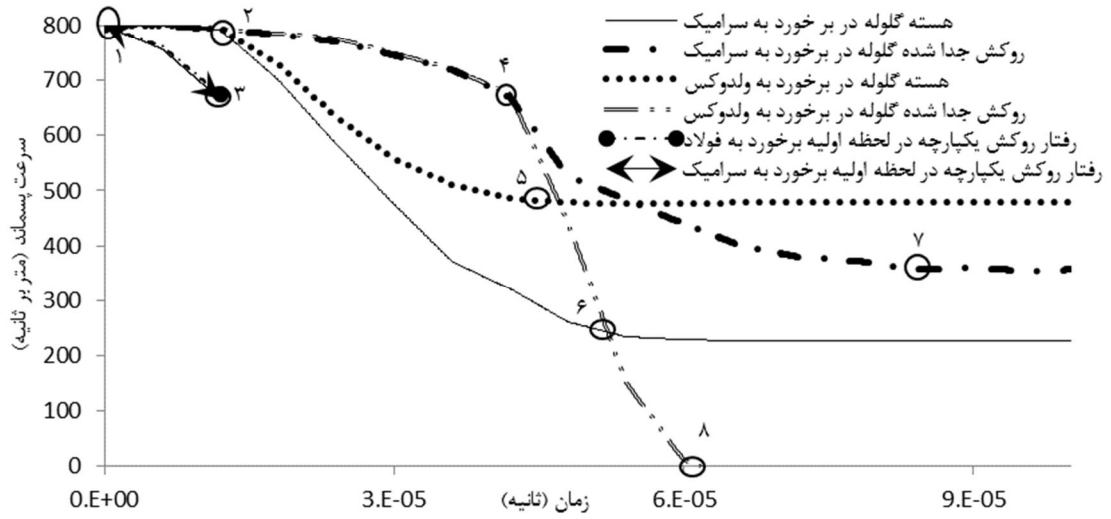
پارامتر دیگر موثر در افزایش بازدهی شکست مخروطی، زاویه گسترش مخروط است. این عامل از لحاظ هندسی به طور کامل قابل توجیه است زیرا با افزایش زاویه، سطح توزیع فشار با در نظر گرفتن عمق مخروط، بیشتر خواهد شد و به عبارت دیگر زاویه مخروطی به نوعی دخیل کردن عمق مخروط است و عمق کمتر به ازای مساحت شکست ثابت، زاویه بیشتری از مخروط را منجر می‌شود و کارایی بهبود یافته‌تری را با احتساب ضخامت یا بدون آن نشان می‌دهد. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر فوق در زره شماره 4 (شکل 9- الف) به خوبی نمایان است.

حال با توجه به مطالب فوق مشاهده می‌شود که پارامترهای مذکور همگی در زره بخصوصی نمایان نیست. با کمی دقت می‌توان به این نکته پی برد که زاویه و عمق مخروط و زمان شروع شکست مخروطی (ارتفاع پای مخروط) رابطه‌ای با حجم و جرم موثر در برابر ضربه پرتابه دارد؛ یعنی مقدار جرمی از هدف که در برابر پرتابه مقاومت کرده و شکست می‌یابد؛ و به عبارت دیگر تقابل اثر حجم معینی از هدف در برابر پرتابه [22]، معیاری از مقاومت بالستیک زره می‌باشد.با توجه به جدول 9 مقدار جرم موثر در برابر پرتابه که به تنش بحرانی و یا کرنش پلاستیک رسیده، ارائه شده است. همانطور که قابل پیش بینی است زره شماره 3 بالاترین جرم از دست رفته را دارد که کارایی بالستیک آن نیز بالاتر است و سپس زره شماره 2 که مقاومت بالستیک آن در رده دوم قرار دارد و در آخر زره شماره 4 که کمترین جرم موثر و مقاومت بالستیک را دارد.

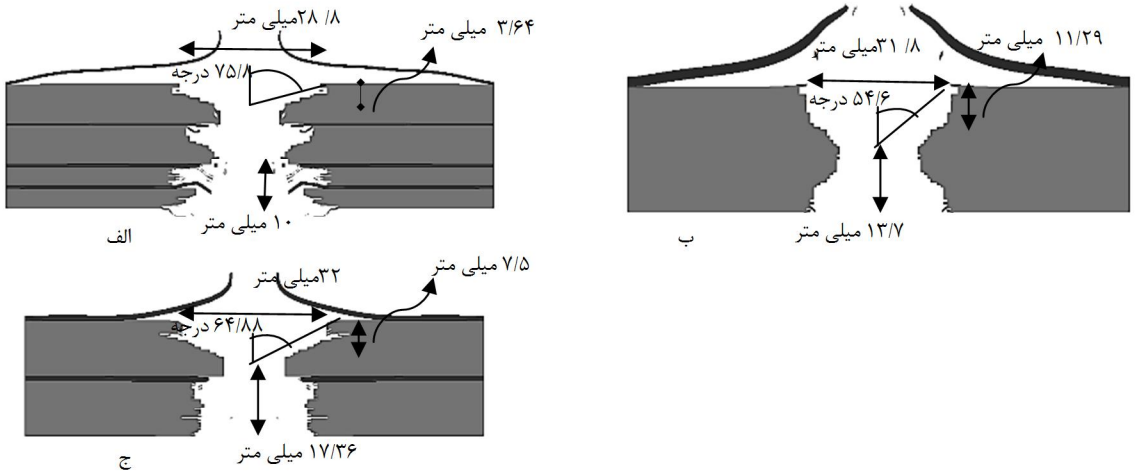


شکل 7 مکانیزم نفوذ گلوله ضد زره روکش‌دار در هدف سرامیکی دو لایه 2((E(1)C(12)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]



شکل ۸ نمودار سرعت- زمان برای هسته و روکش گلوله در برخورد به زره سرامیکی 2(E(1)C(12)) و زره فولادی D12W با سرعت ضربه ۸۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۹ مشخصات هندسی عمق، زاویه، طول و ارتفاع پای شکست مخروطی در زره سرامیکی الف) 2(E(0.5)C(4))2(E(0.5)C(8)) ب) E(2)C(25) ج) 2(E(1)C(12))2

نتیجه بسیار مهمی که از داده‌های فوق گرفته می‌شود، هدایت شکست مخروطی به سمت و سویی است که حداکثر تقابل اثر جرمی وجود داشته باشد. در بحث آخر به بررسی کارایی بالستیک زره ترکیبی سرامیک با صفحه پشتیبان شکل‌پذیر پرداخته می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده، گلوله ضد زره روکش‌دار با ایجاد خرابی اولیه در زره توسط روکش شکل پذیر، موجب نفوذ هسته سخت و مقاوم فولادی در زره می‌شود. برای مهار کردن چنین پرتابه‌ای نیاز به شناخت دقیق مکانیزم شکست زره می‌باشد. با توجه به داده‌های ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که لایه سرامیکی در زره از امکان ایجاد سوراخ و نفوذ اولیه توسط روکش جلوگیری می‌کند و لایه فولادی که در مقایسه با سرامیک، ماده‌ای شکل‌پذیر محسوب می‌شود از احتمال خروج روکش پرتابه ممانعت می‌ورزد. چنین مکانیزمی برای مهار کردن سهم انرژی جنبشی روکش برنجی بسیار اهمیت دارد؛ زیرا روکش همانند پرتابه‌ای که از هدف عبور کرده بسیار مهلک است و انرژی بالایی به فرد یا وسیله زره پوش وارد می‌کند.

امروزه از زره‌های ترکیبی برای مهار کردن چنین پرتابه‌هایی استفاده می‌شود. طبق مرجع [۱۱] زره سرامیکی چند لایه بدون صفحه پشتیبان جایگزین مناسبی برای زره ترکیبی با لایه فوقانی سرامیک و صفحه پشتیبان شکل‌پذیر می‌باشد؛ البته پرتابه مورد بحث در مرجع مذکور بدون روکش بوده و فقط تک ماده فولادی است. در این بخش به بررسی اثر ترکیبی زره سرامیک با صفحه پشتیبان شکل‌پذیر پرداخته می‌شود تا اثر شکست روکش توسط سرامیک سخت فوقانی و ضبط گلوله توسط صفحه پشتیبان بررسی شود.

۹- ارزیابی کارایی بالستیک در زره ترکیبی سرامیک با صفحه پشتیبان شکل پذیر

زره مورد بحث شامل لایه فوقانی از جنس سرامیک آلومینا با صفحه پشتیبان آلومینیمی می‌باشد. مطابق شکل ۱۰ گلوله ضد زره در زمان ۶ میکروثانیه به هدف برخورد کرده و روکش برنجی روی سطح سرامیک شکست می‌یابد که همین امر در بازه زمانی ۱۲ میکروثانیه روی فیلر[۱] سربی مشاهده می‌شود. این پدیده که به اصطلاح توقف پرتابه روی سرامیک نامیده می‌شود، در بحث ضربه به سطح سختی مثل سرامیک مطرح است که گلوله مدت زمانی روی

۱- ماده پرکننده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

جدول 9 میزان جرم ساییده شده و موثر در برابر پرتابه ضد زره

شماره زره	کد زره	جرم اولیه (gr)	جرم ساییده شده(gr)
2	E(2)C(25)	745/75	39/75
3	(E(1)C(12))2	715/92	47/92
4	(E(0.5)C(8))2(E(0.5)C(4))2	715/92	27/92

سرامیک تخریب می‌شود [23]. پس مشاهده می‌شود که در برابر پرتابه‌های ضد زره وجود لایه فوقانی سرامیک بسیار لازم و ضروری است

.با دنبال کردن حرکت گلوله در زمان 30 میکروثانیه مشاهده می‌شود که به علت وجود صفحه پشتیبان شکل‌پذیر آلومینیمی، روکش گلوله از هسته جدا شده و در زره ضبط می‌شود و تا زمان نفوذ کامل، فقط هسته قادر به خروج از زره می‌باشد که این مزیتی برای وجود صفحه پشتیبان می‌باشد؛ بطوری‌که در زره‌های لایه‌ای سرامیکی، پتانسیل ضبط روکش گلوله وجود ندارد.

10- نتیجه گیری

طبق مطالب ارائه شده زره فولادی ولدوکس 700 ای به علت سختی و مقاومت بالای آن نسبت به فولادهای مورد استفاده دیگر در سایر زره‌ها در برابر گلوله‌های ضد زره به طور معمول استفاده می‌شود. این نوع زره‌ها به علت شکل پذیری، توانایی جذب انرژی گلوله از جمله ضبط کامل روکش گلوله را دارند.

از طرف دیگر زره چند لایه سرامیکی طبق تحقیقات پیشین توانایی مقابله با گلوله فولادی کالیبر 7/62 را دارا می‌باشد. این نوع زره با رشد شکست مخروطی مرحله به مرحله، فشار ناشی از ضربه گلوله را کم می‌کند و بخصوص با سایش گلوله بخش اعظمی از انرژی جنبشی گلوله را به هدر می‌دهد و با کند شدن اولیه نوک گلوله، توانایی نفوذ در داخل زره، از بین می‌رود. درباره گلوله ضد زره چندین مسئله مطرح است:

الف) وزن گلوله ضد زره نسبت به گلوله فولادی بدون روکش بالاتر است.

ب) سختی و مقاومت هسته گلوله چندین برابر گلوله معمولی فولادی است. جنس این هسته از فولاد ابزار با سختی و کرنش سختی بسیار بالاست.

ج) وجود روکش و فیلر سربی در ایجاد خرابی اولیه بسیار موثر است و هسته دیرتر و به ندرت آسیب می‌بینند.

حال با توجه به رفتار زره فولادی در برابر گلوله ضد زره مسئله زیر مطرح است:

زره سخت فولادی توانایی لازم برای جلوگیری از خرابی اولیه ناشی از برخورد روکش را ندارد. حتی در برابر هسته این گلوله نیز مقاومت لازم را ندارد و طبق مرجع [1] سرعت پسماند با روکش برنجی و بدون آن در برخورد به زره فولادی تفاوت چندانی ندارد.

با توجه به رفتار زره چند لایه سرامیکی مسایل زیر وجود دارد:

زره چند لایه سرامیکی به خاطر مقاومت فشاری بالا، خرابی اولیه ناشی از ضربه روکش را دفع می‌کند و با ایجاد شکست اولیه در روکش برنجی و فیلر سربی، هسته را در لحظه‌های اولیه وارد عمل می‌کند. این زره با ایجاد سایش در هسته، انرژی آن را تحلیل می‌برد. منتها به علت سختی بسیار بالای آن، مقدار سایش نسبت به گلوله معمولی فولادی کمتر است.

در ضمن این زره توانایی ضبط روکش را ندارد و ممکن است روکش خارج شده از زره سرعت پسماند بسیار بالایی داشته باشد. البته با افزایش ضخامت لایه‌های سرامیک، ضبط روکش میسر است ولی طراحی آن بهینه نیست.

با ترکیب خاصیت هر دو زره یعنی با ساخت زره ترکیبی با لایه فوقانی سرامیکی و صفحه پشتیبان شکل‌پذیر پشتی، امکان سایش و تخریب اولیه گلوله همراه با ضبط روکش گلوله فراهم می‌شود بطوری‌که به ازای سرعت پرتاب 800 متر بر ثانیه، سرعت پسماند 25 متر بر ثانیه حاصل می‌شود (شکل 10). مقدار سایش گلوله در این زره هرچند کمتر است (برابر با 2/89 میلی متر)، اما سرعت پسماند کمتر گلوله برتری بالایی نسبت به سایش گلوله دارد. بطوریکه به ازای 45 % سایش گلوله توسط زره ترکیبی نسبت به زره سرامیکی دو لایه، سرعت پسماند 9 برابر کاهش یافته است. این کاهش سرعت نسبت به زره فولادی ولدوکس 19 برابر است در صورتی که جرم فقط 1/05 برابر است. با مطالعه شکست مخروطی سرامیک این نتیجه حاصل شد که با طراحی بهینه زره چند لایه سرامیکی، امکان بهبود پارامترهایی مثل تسریع زمان شروع شکست مخروطی و عمق شکست و زاویه شکست وجود دارد که همگی تابعی از حجم موثر سرامیک می‌باشد که در برابر پرتابه مقاومت می‌کند. هر چقدر این مقدار حجم بیشتر باشد، مقاومت بالستیک زره سرامیکی بیشتر خواهد بود.

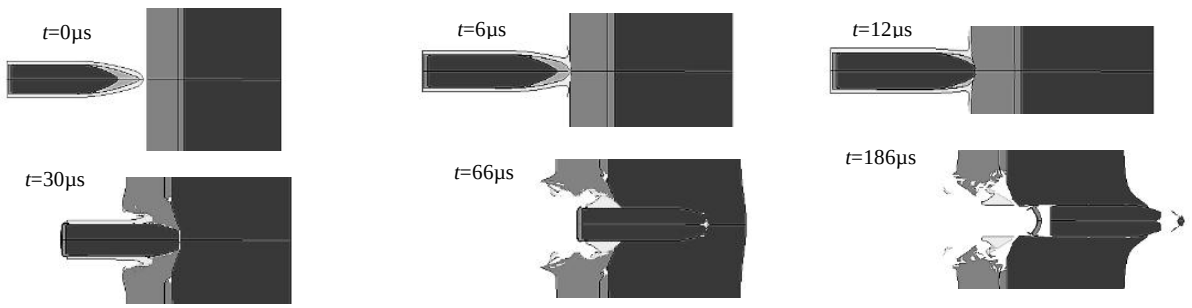
11- مراجع

[1] T. Børvik, S. Dey, A. H. Clausen, Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 36, pp. 948–964, 2009 .

[2] E. A. Flores-Johnson, M. Saleh, L. Edwards, Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 38, pp. 1022-1032, 2011 .

[3] 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 .

[4] A. P. T. M. J. Lamberts, Numerical simulation of ballistic impacts on double-layered steel plates: an experimental and numerical investigation*, Int J Solids Struct* Vol. 44, pp. 6701-23, 2007 .



شکل 10 مکانیزم نفوذ گلوله ضد زره روکش‌دار به هدف ترکیبی سرامیک با صفحه پشتیبان شکل پذیر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]

ceramic material, *Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering,* Materials Technology, 2007 .

[5] 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, *Int J Impact Eng Vol*. 19(1), No. 1, 1997 .

[6] D. Shockey, A. Marchand, S. Skaggs, G. Cort, M. Burkett, R. Parker, Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods, *Int J Impact Eng* Vol. 9(3):263, 1990 .

[7] 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, *Int. J. Impact Engng,* Vol. 15, No. 5, pp. 605-618, 1994 .

[8] E. C. Anderson, J. a. B. L. Morris, The ballistic performance of confined Al2O3 ceramic tiles*, Int. J. Impact Engng* Vol. 12, No. 2, pp. 167-187, 1992 .

[9] P. J. Hazell, G. J. Appleby-Thomas, D. Philbey, W. Tolman, The effect of gliding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile*, International Journal of Impact Engineering,* Vol. 54, pp. 11-18, 2013 .

[10] S. Chocron, C. E. A. Jr., D. J. Grosch, C. H. Popelar, Impact of the 7.62-mm APM2 projectile against the edge of a metallic target, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 25, pp. 423-437, 2001 .

[11] A. Rashed, M. Yazdani, Studying the performance of multi-layered ceramic-epoxy armor under high velocity impact with finite element method*, Journal of Modares Mechanical Engineering* (in persian), 2014 .

[12] T. Demir, M. Übeyli, R. O. Yıldırım, nvestigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials and Design,* Vol. 29, pp. 2009–2016, 2008 .

[13] S. Dey, Børvik, X. Teng, W. T, O. Hopperstad, On the ballistic resistance of

[14] N. Kılıç, B. Ekici, Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition, *Materials and Design,* Vol. 44, pp. 35-48, 2013 .

[15] J. O. Hallquist, *LS-DYNA theory manual,* 2006 .

[16] LS-DYNA Keyword user's manual version 971, Vol. I & II, 2007 .

[17] ansys v.14.0 help .

[18] D. Mohotti, Numerical Simulation of Impact and Penetration of Ogvial Shaped Projectiles through Steel Plate Structures, *Department of Infrastructure Engineering,* The University of Melbourne .

[19] S. Dey, T. Børvik, O. Hopperstad, J. Leinum, M. Langseth, The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes, *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 30, No. 8-9, pp. 1005-38, 2004 .

[20] Z. Rozenberg, Y. Yeshurun, THE RELATION BETWEEN BALLISTIC EFFICIENCY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CERAMIC TILES, Int. J. *Impact Engng,* Vol. 7, No. 3, pp. 357-362, 1988 .

[21] 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* .

[22] 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 .

[23] T. J. Holmquist, G. R. Johnson, The failed strength of ceramics subjected to high-velocity impact, *Journal of Applied Physics,* Vol. 104, No. 1, Jul 1, 2008. English

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.13.8]