

## طراحی بهینه زره سرامیک-کامپوزیت در برابر ضربه بالستیک پرتابه

### به روش الگوریتم ژنتیک

رضا داودی نژاد<sup>۱</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناس ارشد و ۲- دانشیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۴، پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۳۰)

#### چکیده

یکی از موضوعات مهم در پدافند غیرعامل، طراحی سازه‌ها و صفحه‌های مقاوم در برابر نفوذ گلوله است. زره‌های دولایه سرامیک-کامپوزیت، به‌طور گسترده در صفحه‌های ضدگلوله مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی بهینه ضخامت و جنس لایه‌های سرامیک و کامپوزیت، در چند دهه اخیر مورد توجه جدی متخصصین علم بالستیک قرار گرفته است. در این راستا، مدل تحلیلی فلورنس، پیش‌بینی خوبی از سرعت حد بالستیک زره‌های دوجزئی سرامیک-کامپوزیت ارائه داده است. در این مقاله بر مبنای مدل فلورنس و بن دور، یک روش مؤثر برای طراحی بهینه زره‌های دوجزئی سرامیک-کامپوزیت به کمک روش حل الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. هدف این طراحی به دست آوردن کمینه چگالی سطحی زره برای یک سرعت حد بالستیک مشخص، می‌باشد. این طراحی به گونه‌ای انجام شده که زره بالاترین سطح حفاظت را داشته باشد. در این روش جنس و ضخامت لایه‌های سرامیک و کامپوزیت به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج حل بهینه، زره‌هایی برای مقابله با دو نوع گلوله با کالیبرهای ۷/۶۲ و ۱۲/۷ میلی‌متر، برای فواصل مختلف هدف تا محل شلیک، طراحی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** زره سرامیک کامپوزیت، مدل فلورنس، سرعت حد بالستیک، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

## Optimum Design of Ceramic-Composite Armors Against Ballistic Impact of Projectiles by Genetic Algorithm

R. Davoudinejad, H. Khodarahmi\*

Imam Hossein University

(Received: 24/01/2012; Accepted: 18/02/2013)

#### Abstract

One of the most important issues in passive defence is the design of bullet penetration resistant structures and panels. Two-component ceramic-composite armors are widely used in the bulletproof panels. In the recent decades, optimum design of thickness and material of ceramic and composite has been seriously considered by ballistic experts. Florence analytical model provides a good prediction of ballistic limit velocity of ceramic-composite armors. In this paper, based on the Florence and Bendor model, an effective methodology for optimum design of two-component ceramic-composite armors is presented, by a genetic algorithm solving technique. The design goal is achieving a minimum areal density for a given ballistic limit velocity of armor. The criterion is having the highest level of protection. In this method, material and thickness of ceramic and composite layers are considered as the design parameters. Using the results of the optimal solution, armors are designed to be resistant against two types of bullets with 7.62 and 12.7 mm caliber for different distances from target to firing place.

**Keywords:** Ceramic Composite Armor, Florence Model, Ballistic Limit Velocity, Optimization, Genetic Algorithm.

\* Corresponding Author E-mail: hkhdrhmi@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

زره‌های مرکب دو لایه شامل یک لایه رویی سرامیک و یک لایه پشتیبان به علت کارایی بالستیکی بالا و وزن سبک آن‌ها بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. ویلکینز [۱] و فلورنس [۲] از اولین محققان در زمینه مکانیک نفوذ در زره‌های کامپوزیتی بودند. فلورنس یک مدل تحلیلی برای یک زره دو لایه کامپوزیتی، شامل یک لایه سرامیک سخت و یک ماده پشتیبان شکل پذیر، در برابر پرتابه استوانه‌ای صلب ارائه کرده است. این مدل سرعت حد بالستیک را که نشان دهنده مقاومت زره در مقابل نفوذ است، پیش‌بینی می‌کند. مدل فلورنس تطابق رضایت‌بخشی با داده‌های تجربی نشان داده است. این مدل به خاطر سادگی، توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس هترینگتون [۳] یک روش طراحی بهینه برای محاسبه نسبت ضخامت و ضخامت‌های سرامیک و کامپوزیت ارائه داد که بهترین محافظت را برای یک چگالی سطحی داده شده، ایجاد می‌کند.

ونگ [۴] یک معیار طراحی برای محاسبه نسبت ضخامت بهینه ارائه داد، به‌صورتی که کارایی بهینه زره دو جزئی کامپوزیتی را برای یک ضخامت کل مشخص داده شده، تولید می‌کند.

بن دور [۵] یک طراحی بهینه برای زره‌های دو جزئی برای حالت بی‌بعد ارائه کرد که به موجب آن همه خصوصیات پرتابه و زره به‌صورت تابعی از پارامترهای مستقل بی‌بعد بیان شده بود. شی و گرو [۶]، مسائل بهینه‌سازی زره‌های دو جزئی برای دو قید هم‌زمان ضخامت کل و چگالی سطحی را بررسی کردند.

فلوز [۷] روشی برای طراحی بهینه زره‌های کامپوزیتی ارائه داد. در این روش از یک تکنیک جدید جهت بهینه‌سازی زره سرامیک-کامپوزیت استفاده شده است.

از آنجایی که کاهش وزن در وسایل پرنده به کارایی وسیله بسیار کمک می‌کند، در طراحی صفحه‌های ضدگلوله در بدنه وسایل پرنده از قبیل بالگرد و ژایروپلن و ... ارائه روشی برای بهینه‌سازی صفحه با هدف به دست آوردن کم‌ترین چگالی سطحی زره، امری بسیار ضروری است. به‌همین جهت، هدف اصلی این مقاله طراحی ضخامت و جنس زره سرامیک-کامپوزیت به‌گونه‌ای می‌باشد که کم‌ترین وزن ممکن را ایجاد کند.

در این مقاله، با استفاده از مدل تئوری بن دور و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک یک روش جدید برای طراحی بهینه ضخامت و جنس لایه‌های سرامیک و کامپوزیت ارائه شده است. بر خلاف مدل‌های طراحی تئوری مرسوم، روش حاضر طرح‌های بهینه‌ای را تعیین می‌کند که با استفاده از آن مواد زره و نسبت ضخامت‌های آن‌ها به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده است.

## ۲. مدل تئوری و فرضیات حاکم

بر اساس نتایج تجربی و تئوری که فلورنس به‌دست آورد، مراحل مختلفی که هنگام برخورد یک پرتابه سخت فولادی با یک صفحه سرامیکی که به‌وسیله یک صفحه انعطاف‌پذیر پشتیبانی می‌شود، به‌صورت زیر است [۲]:

نوک پرتابه پس از برخورد به تکه‌های بسیاری خرد می‌شود. خرد شدن به این علت اتفاق می‌افتد که تنش‌های کششی محیطی و شعاعی به‌شدت از تنش شکست در نوک پرتابه تجاوز می‌کند. خرد شدن باعث افزایش سطح تماس پرتابه و سرامیک و در نتیجه باعث پخش شدن نیرو بر روی صفحه می‌شود.

خردشدگی و ترک در سطح ماده سرامیکی به‌علت یک میدان بزرگ تنش‌های کششی از منطقه برخورد گسترش پیدا می‌کند. سرامیک پودر شده از اطراف سطح برخورد پرتابه خارج می‌شود. حجمی که به‌وسیله سرامیک خرد شده اشغال می‌شود به‌صورت یک مخروط در می‌آید. ترک‌ها در پشت صفحه محل برخورد به سرعت رشد می‌کنند. چگالی ترک با دور شدن از منطقه برخورد به‌علت تضعیف تنش‌های کششی کاهش می‌یابد.

پرتابه و سرامیک شکسته شده بر روی لایه پشتیبان انعطاف‌پذیر در یک سطح دایره‌ای با قطری برابر قطر مخروط سرامیکی، اعمال فشار می‌کنند.

یک مدل ساده برای شرح عمل زره کامپوزیتی دو لایه در شکل (۱) نشان شده است. که در آن پرتابه صلب به‌صورت یک استوانه کوتاه مدل شده است. فرضیات ساده کننده در این مدل عبارتند از [۸]:

- قطر مقطع سطح دایره‌ای که تکانه از طریق آن به لایه پشتیبان انتقال پیدا می‌کند برابر با قطر مخروط شکسته شده در سرامیک، در نظر گرفته می‌شود.

- شعاع مخروط شکسته شده برابر با شعاع پرتابه به‌علاوه دو برابر ضخامت سرامیک در نظر گرفته می‌شود. البته این یک مشاهده تجربی است و در زاویه ۶۳ درجه برای مخروط این نتیجه را می‌دهد.

- در این مدل انرژی شکست سرامیک در نظر گرفته نمی‌شود و فرض می‌شود که همه آن به لایه پشتیبان انتقال پیدا می‌کند.

فلورنس با مساوی قرار دادن انرژی جنبشی اولیه پرتابه با انرژی جذب شده در لایه پشتیبان، یک تقریب برای سرعت حد بالستیک زره سرامیک-کامپوزیت به‌صورت رابطه زیر پیشنهاد داده است [۵]:

$$V_2 = \frac{\varepsilon_2 \sigma_2 h_2 z (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) z + m_p}{0.91 m_p^2} \quad (1)$$

$$z = (a_p + 2h_1)^2 \quad (2)$$

که  $m_p$  جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم،  $V$  سرعت بالستیک بر حسب متر بر ثانیه،  $a_p$  شعاع پرتابه بر حسب متر،  $\rho$  چگالی بر حسب

بنابراین مسئله تبدیل می‌شود به یافتن مقدار مثبت  $\bar{h}_1$  در حالتی که  $\bar{A}$  کمینه شود. سپس مقدار  $\bar{h}_2$  از معادله (۹) به دست می‌آید. مهم است تأکید شود که چگالی سطحی بی‌بعد، تابعی از متغیر  $\bar{h}_1$  و وابسته به دو پارامتر  $\bar{\rho}_1, \bar{w}$  است و کمینه  $\bar{A}$  را ایجاد می‌کند.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نمودار چگالی سطحی بی‌بعد بر حسب ضخامت لایه سرامیکی بی‌بعد دارای یک ناحیه کمینه است و به همین جهت ضخامت لایه سرامیکی با توجه به محدودیت‌های موجود می‌تواند در ناحیه ضخامت بهینه انتخاب شود.

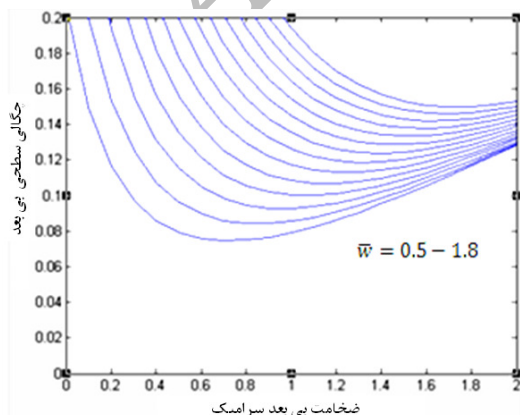
### ۳. روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از زیر مجموعه‌های محاسبات تکامل یافته است که رابطه مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد. الگوریتم ژنتیک می‌تواند یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیکی طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یک سری از جواب‌های مسئله به امید به دست آوردن جواب‌های بهتر، قانون بقای بهترین را اعمال می‌کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب‌ها و تولید مثل جواب‌های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده‌اند، تقریب‌های بهتری از جواب نهایی به دست می‌آید [۱۰]. طرح کلی ارائه شده در زیر چگونگی عملکرد الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد:

۱- الگوریتم ژنتیک با تولید یک جمعیت آغازین تصادفی کار خود را آغاز می‌کند.

۲- الگوریتم در ادامه یک ترتیب از جمعیت‌های جدید را ایجاد می‌نماید. در هر گام الگوریتم از افراد موجود در نسل حاضر برای تولید نسل بعدی استفاده می‌کند. الگوریتم برای تولید نسل جدید مراحل زیر را انجام می‌دهد:

- به هر عضو از جمعیت حاضر یک امتیاز اختصاص می‌دهد. این کار با محاسبه مقدار شایستگی هر یک از افراد حاضر در جمعیت انجام می‌شود.



شکل ۲. نمودار چگالی سطحی بی‌بعد بر حسب ضخامت بی‌بعد صفحه سرامیکی برای سرعت‌های حد بالستیک مختلف

کیلوگرم بر متر مکعب،  $h$  ضخامت بر حسب متر،  $\sigma_2$  مقاومت کششی نهایی بر حسب نیوتن بر متر مربع،  $\epsilon_2$  کرنش شکست و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به سرامیک و کامپوزیت می‌باشد. این رابطه ساده در حالی که اثر پارامترهایی از قبیل الیاف، تعداد و ضخامت لایه‌ها را در نظر نمی‌گیرد، در مقایسه با نتایج تجربی توسط فلورنس صحت سنجی شده است [۲].

بن دور با استفاده از رابطه (۱) و روابطی که در ادامه ارائه شده است، مسئله طراحی بهینه زره با هدف چگالی سطحی کمینه، برای یک زره دو جزئی دلخواه را بررسی کرد و حل تئوری تقریبی برای آن ارائه داد.

چگالی سطحی زره به صورت معادله (۳) تعریف شده است، که بیانگر وزن در واحد سطح زره است:

$$A = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 \quad (3)$$

هدف این تئوری، یافتن ضخامت‌های  $h_1$  و  $h_2$  برای یک سرعت حد بالستیک داده شده، با چگالی سطحی کمینه زره می‌باشد، چرا که کاهش وزن زره در اغلب کاربردها از جمله در به کارگیری زره در وسائل پرنده از اهمیت بالایی برخوردار است. متغیرهای بی‌بعد در روابط (۴) تا (۱۰) تعریف شده است:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{a_p} \quad (4)$$

$$\bar{\rho}_i = \frac{\pi a_p^3 \rho_i}{m} \quad (5)$$

$$\bar{w} = V \sqrt{\frac{0.91 \rho_2}{\alpha \epsilon_2 \sigma_2}} \quad (6)$$

$$\bar{A} = \frac{\pi a_p^2 A}{m} \quad (7)$$

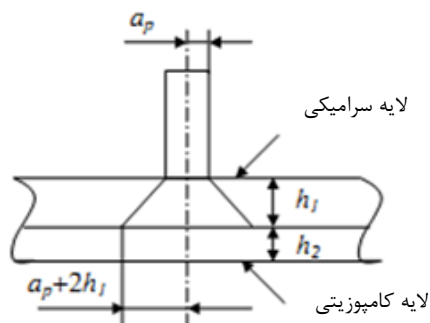
$$\bar{w}^2 = \bar{\rho}_2 \bar{h}_2 \bar{z} [(\bar{\rho}_1 \bar{h}_1 + \bar{\rho}_2 \bar{h}_2) \bar{z} + 1] \quad (8)$$

$$\bar{A} = \bar{\rho}_1 \bar{h}_1 + \bar{\rho}_2 \quad (9)$$

$$\bar{z} = \frac{z}{\pi a_p^2} = (1 + 2\bar{h}_1)^2 \quad (10)$$

معادله (۸) یک معادله درجه ۲ نسبت به  $\bar{\rho}_2 \bar{h}_2$  است. با حل این معادله و جایگزینی مقدار به دست آمده برای  $\bar{\rho}_2 \bar{h}_2$  در معادله (۳) چگالی سطحی بی‌بعد خواهد شد:

$$\bar{A}(\bar{h}_1, \bar{\rho}_1, \bar{w}) = \frac{\bar{\rho}_1 \bar{h}_1 \bar{z} - \sqrt{(\bar{\rho}_1 \bar{h}_1 \bar{z} + 1)^2 + 4\bar{w}^2}}{2\bar{z}} \quad (11)$$



شکل ۱. خصوصیات زره دو لایه سرامیک-کامپوزیت در مدل فلورنس [۹]

در ابتدای این قسمت طراحی بهینه‌ای از ضخامت لایه‌های سرامیک و کامپوزیت، با هدف به دست آوردن کمینه چگالی سطحی زره، در برابر دو نوع پرتابه جدول (۱) از روش الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود و نتایج آن با نتایج مدل بن دور مقایسه می‌گردد.

مواد زره مورد نظر شامل سرامیک آلومینای ۸۵ درصد و GFRP<sup>۱</sup> به ترتیب به عنوان لایه رویی و پشتیبان می‌باشد. خصوصیات مورد نیاز مواد با استفاده از مرجع [۸] در جدول (۲) نشان داده شده است. روابط مدل بن دور با استفاده از نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده و در الگوریتم ژنتیک وارد شده است.

جدول ۲. خصوصیات مواد به کار رفته در مدل بن دور [۸]

GFRP	آلومینا ۸۵ درصد	خصوصیات فیزیکی
۲۲۲۹	۳۴۹۹	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
۱	--	مقاومت نهایی $\sigma$ (GPa)
۰/۰۴	--	کرنش شکست $\varepsilon$

پایاده‌سازی مسئله در الگوریتم ژنتیک به صورت زیر می‌باشد:

تابع هدف: کمینه کردن چگالی سطحی

$$\text{Min } \bar{A}(\bar{h}_1, \bar{\rho}_1, \bar{w}) = \frac{\bar{\rho}_1 \bar{h}_1 \bar{z} - \sqrt{(\bar{\rho}_1 \bar{h}_1 \bar{z} + 1)^2 + 4\bar{w}^2}}{2\bar{z}}$$

متغیر:

$\bar{h}_1$

حدود متغیر:

$$.001 \leq \bar{h}_1 \leq T$$

در تنظیمات الگوریتم ژنتیک، اندازه جمعیت، تعداد افراد نخبه و احتمال تلفیق به ترتیب برابر ۲۰، ۲ و ۰/۸ در نظر گرفته شده و تعداد نسل‌ها برای معیار پایان برابر ۱۰۰ قرار داده شده است.

در جدول‌های (۳) و (۴) نتایج طراحی بهینه برای سرعت‌های حد بالستیک مختلف (V<sub>BL</sub>) ارائه شده است. در این جدول‌های ضخامت بهینه لایه‌های سرامیک آلومینا ۸۵ درصد و کامپوزیت GFRP، نسبت ضخامت‌ها و چگالی سطحی زره در طراحی بهینه در برابر گلوله‌های ۷/۶۲ و ۱۲/۷ از روش بن دور (BD) و الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه شده است، که تطابق بالای نتایج دو روش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که با افزایش کالیبر گلوله، ضخامت‌های لایه سرامیکی و لایه پشتیبان و همچنین چگالی سطحی افزایش می‌یابد، ولی نکته مهم این‌که نسبت ضخامت لایه سرامیکی به لایه پشتیبان تغییر چندانی نمی‌کند.

شکل (۳) تغییرات نسبت ضخامت لایه سرامیک به کامپوزیت با سرعت حد بالستیک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده

- امتیازهای شایستگی به دست آمده به کمک مقیاس‌بندی به محدوده قابل استفاده‌تری از مقادیر تبدیل می‌شوند.

- والدین بر اساس میزان شایستگی‌های اختصاص یافته به افراد تبدیل می‌شوند. در واقع از افراد شایسته‌تر به عنوان والدین استفاده می‌شود.

- فرزندان به کمک والدین تولید می‌گردند. فرزندان با ایجاد تغییرات تصادفی روی یکی از والدین (جهش) و یا ترکیب بردارهای مربوط به هر دوی والدین (تلفیق) تولید می‌شوند.

- جمعیت حاضر با فرزندان جایگزین می‌شوند و نسل بعدی شکل می‌گیرد.

۳- الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از شرایط توقف محقق شود.

اگر معیارهای توقف ارضاء شوند برنامه متوقف می‌شود و در غیر این صورت به مرحله دوم می‌رود. در هر دور محاسباتی باید اطلاعات مورد نیاز ذخیره شود. طراحی بهینه زره دو جزئی سرامیک-کامپوزیت با قیده‌های مشخص توسط الگوریتم ژنتیک به صورت روابط زیر نشان داده می‌شود:

$$\text{Max } f(x_1, \dots, x_k) \quad (12a)$$

$$\text{s.t. } g_i(x_1, \dots, x_k) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (12b)$$

$$q_j(x_1, \dots, x_k) = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (12c)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, k \quad (12d)$$

رابطه (۱۲) صورت کلی یک مسئله الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد، به طوری که  $f(x_1, \dots, x_k)$  تابع هدف،  $g_i(x_1, \dots, x_k)$  و  $q_j(x_1, \dots, x_k)$  توابع قید،  $x_i$  ( $i = 1, \dots, k$ ) امین متغیر بهینه‌سازی،  $x_i^{\min}$  و  $x_i^{\max}$  کمینه و بیشینه مقدار  $x_i$  و  $k$  برابر تعداد متغیرهای بهینه‌سازی است [۷].

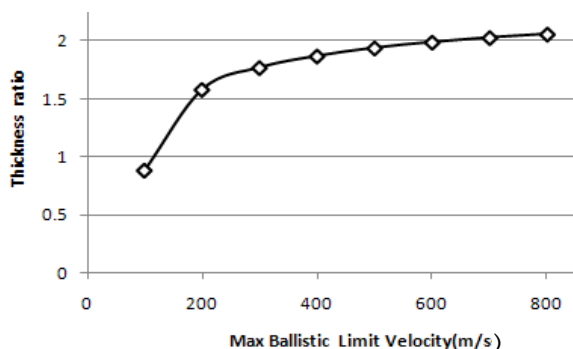
#### ۴. طراحی بهینه زره و مقایسه نتایج

هدف از طراحی زره، متوقف کردن پرتابه‌هایی با مشخصات معلوم است. در طراحی زره برای بالا بردن ضریب اطمینان از تغییر فرم پرتابه‌ها صرف‌نظر و پرتابه‌ها صلب فرض می‌شود. مشخصات پرتابه‌های مورد نظر در جدول (۱) خلاصه شده است:

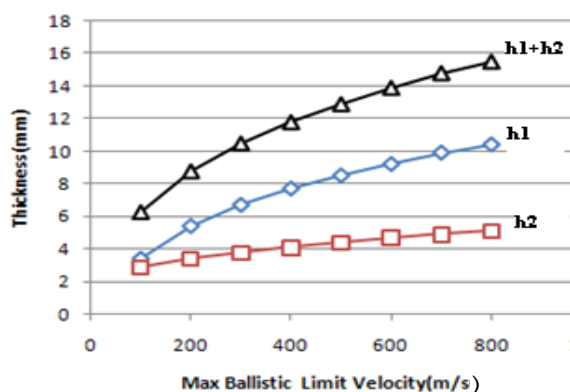
جدول ۱. مشخصات دو نوع پرتابه مورد نظر [۸]

نوع پرتابه	قطر (mm)	جرم (g)	سرعت دهان (m/s)
نوع اول	۷/۶۲	۸	۷۱۰
نوع دوم	۱۲/۷	۴۲/۹	۸۰۰

<sup>۱</sup> Glass Fiber Reinforced Plastic



شکل ۳. تغییرات نسبت ضخامت سرامیک به کامپوزیت با سرعت حد بالستیک در طراحی بهینه برای گلوله ۷/۶۲ میلی متری



شکل ۴. تغییرات ضخامت سرامیک و کامپوزیت و ضخامت کل با بیشینه سرعت حد بالستیک در طراحی بهینه برای گلوله ۷/۶۲ میلی متری

جدول ۳. نتایج طراحی بهینه با هدف کمینه چگالی سطحی برای گلوله ۷/۶۲ میلی متری برای سرعت‌های حد بالستیک مختلف

A (kg/m <sup>3</sup> )		h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>		h <sub>2</sub> (mm)		h <sub>1</sub> (mm)		V <sub>BL</sub> (m/s)
GA	BD	GA	BD	GA	BD	GA	BD	
۳۵/۹۵۶۵	۳۵/۹۵۶۵	۱/۸۷۵۵	۱/۸۷۶۱	۴/۰۸۹۸	۴/۰۸۹۰	۷/۶۷۰۸	۷/۶۷۱۴	۴۰۰
۴۲/۴۱۵۹	۴۲/۴۱۵۹	۱/۹۹۵۸	۱/۹۹۵۸	۴/۶۰۴۲	۴/۶۰۴۱	۹/۱۸۹۲	۹/۱۸۹۳	۶۰۰
۴۷/۴۸۷۹	۴۷/۴۸۷۹	۲/۰۶۵۱	۲/۰۶۴۹	۵/۰۲۲۵	۵/۰۲۳۰	۱۰/۳۷۲	۱۰/۳۷۲	۸۰۰

جدول ۴. نتایج بهینه با هدف کمینه چگالی سطحی برای گلوله ۱۲/۷ میلی متری برای سرعت‌های حد بالستیک مختلف

A (kg/m <sup>3</sup> )		h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>		h <sub>2</sub> (mm)		h <sub>1</sub> (mm)		V <sub>BL</sub> (m/s)
GA	BD	GA	BD	GA	BD	GA	BD	
۶۳/۳۹۶۴	۶۳/۳۹۶۴	۱/۸۹۸۷	۱/۸۹۸۳	۷/۱۴۵۱	۷/۱۴۶۲	۱۳/۵۶۶۷	۱۳/۵۶۶۰	۴۰۰
۷۴/۷۰۱۴	۷۴/۷۰۱۴	۲/۰۱۵۳	۲/۰۱۵۶	۸/۰۴۹۲	۸/۰۴۸۳	۱۶/۲۲۱۷	۱۶/۲۲۲۳	۶۰۰
۸۳/۵۷۸۷	۸۳/۵۷۸۷	۲/۰۸۳۲	۲/۰۸۲۹	۸/۷۸۰۹	۸/۷۸۱۹	۱۸/۲۹۲۷	۱۸/۲۹۲۰	۸۰۰

جدول ۵. مواد سرامیکی جهت استفاده در لایه رویی زره [۱۱]

ردیف	سرامیک	چگالی(kg/m <sup>3</sup> )
۱	Boron Carbide	۲۵۰۰
۲	Alumina 99.5%	۳۷۰۰
۳	Boron Silicon Carbide	۲۷۵۰
۴	Nitride Aluminum	۳۲۵۰
۵	Silicon carbide	۳۱۰۰
۶	Nitride Titanium	۴۴۰۰
۷	Silicon nitride	۳۱۵۰

ضخامت‌ها و جنس لایه‌های سرامیک و پشتیبان با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، بهینه می‌شود تا کم‌ترین چگالی سطحی زره که می‌تواند یک سرعت حد بالستیک مشخص را ایجاد کند، تعیین شود. این مسئله به صورت زیر در الگوریتم ژنتیک تعریف شده است:

تابع هدف: کمینه کردن چگالی سطحی (مشابه قبل)

متغیرها:  $\bar{h}_1$  و شماره ماده سرامیک ( $h_3$ ) و شماره ماده کامپوزیت ( $h_4$ )

می‌شود، با افزایش سرعت حد بالستیک نسبت ضخامت لایه سرامیک به کامپوزیت افزایش می‌یابد. البته با افزایش سرعت حد بالستیک، نرخ افزایش نسبت ضخامت کاهش می‌یابد، به طوری که از سرعت حد بالستیک بالاتر از ۵۰۰ متر بر ثانیه نسبت ضخامت در حدود ۲ تقریباً ثابت می‌ماند.

در شکل (۴) تغییرات ضخامت سرامیک، کامپوزیت و ضخامت کل برحسب بیشینه سرعت حد بالستیک در طراحی بهینه نشان داده شده است. با افزایش سرعت حد بالستیک، ضخامت‌های سرامیک و کامپوزیت و ضخامت کل تقریباً به صورت تابع درجه دو با جهت تقعر منفی افزایش می‌یابند.

در قسمت قبل با انتخاب دو جنس مشخص آلومینای ۸۵ درصد و GFRP برای سرامیک و کامپوزیت، طراحی زره بهینه با تعیین ضخامت هر لایه انجام گردید. به منظور بهبود عملکرد زره، چنانچه انتخاب‌های متعددی برای جنس لایه‌های سرامیک و پشتیبان وجود داشته باشد، می‌توان به کمک الگوریتم ژنتیک از میان جدول‌های مربوط به سرامیک‌ها و مواد پشتیبان (جدول‌های ۵ و ۶) بهترین انتخاب را برای بهینه‌سازی هرچه بهتر زره انجام داد.

هدف از این تحقیق یافتن کمینه چگالی سطحی زره می‌باشد. بدین ترتیب، از طریق الگوریتم ژنتیک هفت نوع سرامیک (جدول ۵) و یازده نوع ماده پشتیبان (جدول ۶)، جنس و ضخامت‌های لازم به دست آمده و زره بهینه طراحی شده است.

حدود متغیرها:

$$0.001 \leq \bar{h}_1 \leq T \quad 1 \leq h_3 \leq 7 \quad \text{و} \quad 1 \leq h_4 \leq 11$$

نتایج به دست آمده در جدول‌های (۷) و (۸) ارائه شده است.

مواد انتخابی توسط روش الگوریتم ژنتیک شامل ماده ۱ از جدول ۱ است. مواد پشمی‌ها یعنی کامپوزیت‌ها یعنی اسپکترا می‌باشد. به نظر می‌آید، علت انتخاب کامپوزیت بور توسط الگوریتم ژنتیک چگالی پایین آن و علت انتخاب اسپکترا نیز چگالی پایین و خواص خوب بالستیکی آن می‌باشد.

جدول ۶. مواد جهت استفاده در لایه پشتیبان زره [۱۲]

Failure strain	UTS (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Composite	ردیف
۰/۰۴	۱	۱۸۰۰	GFRP	۱
۰/۰۰۹	۱/۷۲	۲۰۲۰	Carbon	۲
۰/۰۲۵	۳/۴۵	۲۵۴۰	E-Glass	۳
۰/۰۴۸	۳/۱۶	۲۴۹۰	C-Glass	۴
۰/۰۵۷	۴/۵۹	۲۴۹۰	S-Glass	۵
۰/۰۳۵	۲/۷۶	۱۴۴۰	Kevlar29	۶
۰/۰۲۵	۳/۲۹۶	۱۴۷۹	Kevlar49	۷
۰/۰۴۵	۲/۵۸	۹۷۰	Spectra900	۸
۰/۰۴	۲/۷۵	۱۲۳۰	Twaron	۹
۰/۱۷	۰/۳۱	۲۷۱۲	Aluminum6061	۱۰
۰/۲۱	۰/۴۸	۷۸۰۰	Steel	۱۱

جدول ۷. نتایج طراحی بهینه ضخامت و جنس زره با هدف کمینه کردن

چگالی سطحی برای گلوله ۷/۶۲ میلی‌متری

A kg/m <sup>2</sup>	h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	$\bar{A}$	Mat# <sub>2</sub>	Mat# <sub>1</sub>	V <sub>BL</sub> m/s
۱۹/۰۸	۰/۹۳	۵/۹	۵/۴	۰/۱۱	۸	۱	۴۰۰
۲۳/۱۳	۱/۰۵	۶/۵	۶/۸	۰/۱۳	۸	۱	۶۰۰
۲۶/۲۴	۱/۱۲	۷	۷/۸	۰/۱۵	۸	۱	۸۰۰

جدول ۸. نتایج طراحی بهینه ضخامت و جنس زره با هدف کمینه کردن

چگالی سطحی برای گلوله ۱۲/۷ میلی‌متری

A kg/m <sup>2</sup>	h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	$\bar{A}$	Mat# <sub>2</sub>	Mat# <sub>1</sub>	V <sub>BL</sub> m/s
۳۳/۷۴	۰/۹۴	۱۰/۲	۹/۶	۰/۱۰	۸	۱	۴۰۰
۴۰/۸۱	۱/۰۶	۱۱/۳	۱۲	۰/۱۲	۸	۱	۶۰۰
۴۶/۲۶	۱/۱۴	۱۲/۲	۱۳/۹	۰/۱۳	۸	۱	۸۰۰

جدول ۹. طراحی بهینه ضخامت و جنس زره در برابر گلوله ۷/۶۲

میلی‌متری (با حذف کامپوزیت بور و اسپکترا از جدول مواد)

A kg/m <sup>2</sup>	h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	$\bar{A}$	Mat# <sub>2</sub>	Mat# <sub>1</sub>	V <sub>BL</sub> m/s
۲۰/۸۶	۲/۱۸	۲/۵	۵/۶	۰/۱۰	۵	۳	۴۰۰
۲۵/۲۴	۲/۴۶	۲/۸	۶/۸	۰/۱۴	۵	۳	۶۰۰
۲۸/۶۱	۲/۶۲	۳	۷/۸	۰/۱۶	۵	۳	۸۰۰

جدول ۱۰. طراحی بهینه ضخامت و جنس زره در برابر گلوله ۱۲/۷

میلی‌متری (با حذف کامپوزیت بور و اسپکترا از جدول مواد)

A kg/m <sup>2</sup>	h <sub>1</sub> /h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	$\bar{A}$	Mat# <sub>2</sub>	Mat# <sub>1</sub>	V <sub>BL</sub> m/s
۳۶/۸۹	۲/۲۲	۴/۳	۹/۶	۰/۱۱	۵	۳	۴۰۰
۴۴/۵۴	۲/۴۹	۴/۸	۱۱/۹	۰/۱۳	۵	۳	۶۰۰
۵۰/۴۴	۲/۶۵	۵/۲	۱۳/۷	۰/۱۵	۵	۳	۸۰۰

#### ۵-۱. افت سرعت گلوله در طی مسیر حرکت

هنگامی که گلوله در هوا حرکت می‌کند، نیروهای اصلی که بر روی آن وارد می‌شود، عبارتند از نیروی مقاومت هوا (درگ) و نیروی وزن گلوله. مقدار نیروی مقاومت هوا به صورت زیر است [۱۳]:

$$R = \frac{1}{2} D \rho A v^2 = b v^2 \quad (13)$$

که  $\rho$  چگالی هوا،  $A$  سطح مقطع پرتابه عمود بر جهت حرکت و  $D$  یک مقدار تجربی بی‌بعد است که ضریب درگ نامیده می‌شود. ضریب درگ برای گلوله‌های با هندسه اجایو مورد نظر ۰/۲۹۵ در نظر گرفته شده است.

با داشتن چگالی هوا و سطح مقطع گلوله و ضریب درگ که از آزمایش به دست می‌آید، مقدار ضریب سرعت از رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$b = \frac{1}{2} D \rho A \quad (14)$$

در جدول‌های زیر، واحد سرعت حد بالستیک، ضخامت‌ها و چگالی سطحی به ترتیب متر بر ثانیه، میلی‌متر و کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد. الگوریتم ژنتیک ماده‌های کامپوزیت سیلیکون کاربید بور و کامپوزیت شیشه نوع S را به خاطر چگالی پایین و ضریب درگ و چگالی پایین و خواص خوب بالستیکی کامپوزیت انتخاب کرده است.

با توجه به اینکه ممکن است دسترسی به مواد انتخاب شده مشکل باشد، مسئله یک‌بار دیگر با حذف مواد کاربید بور و اسپکترا از جدول مواد حل می‌شود. جدول‌های (۹) و (۱۰) نتایج طراحی بهینه توسط الگوریتم ژنتیک را در این مرحله نشان می‌دهد.

#### ۵. تأثیر فاصله اولیه پرتابه بر ضخامت بهینه زره

از آنجایی که در طراحی زره کامپوزیت-سرامیک-انرژی پرتابه و سرعت آن نقش بسیار مهمی را بازی می‌کند و با توجه به اینکه سرعت پرتابه در طی مسیر حرکت آن کاهش می‌یابد، در طراحی زره مقاوم در فاصله مشخص، لازم است افت سرعت گلوله در طی مسیر حرکت آن در هوا به دست آید.

مربع می‌باشد و جنس زره از ترکیب برن کاربید و اسپکترا خواهد بود. ولی برای فواصل دورتر شلیک، می‌توان زره‌هایی با چگالی سطحی پایین‌تری را طراحی نمود. مثلاً برای گلوله ۷/۶۲ میلی‌متری در فواصل ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری، چگالی سطحی از ۲۳/۷۶ به ۱۴/۳۹ کیلوگرم بر متر مربع کاهش می‌یابد. همچنین برای گلوله ۱۲/۷ میلی‌متری در فواصل ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری، چگالی سطحی از ۴۵/۱۵ به ۳۵/۹۶ کیلوگرم بر متر مربع می‌رسد. بنابراین طراحی زره نه لزوماً بر اساس سرعت دهانه، بلکه می‌تواند بر مبنای سرعت برخورد مورد نظر در فواصل مختلف شلیک صورت گیرد، که در این صورت چگالی سطحی زره به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش مؤثر برای طراحی بهینه زره‌های دو جزئی با استفاده از پیاده کردن مدل فلورنس و بن دور در الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. این روش طرح‌های بهینه‌ای را ارائه می‌نماید که به موجب آن مواد زره و ضخامت لایه‌های زره به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. در این روش، ضخامت‌ها و جنس لایه‌های سرامیک و کامپوزیت به گونه‌ای طراحی شده است، تا کم‌ترین چگالی سطحی زره‌ای که می‌تواند یک سرعت بالستیک مشخص را ایجاد کند، تعیین شود.

مقایسه نتایج به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک با نتایج ارائه شده توسط بن دور تطابق بسیار زیادی نشان می‌دهد. در حالی که برتری مهم روش الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه زره‌های دو جزئی نسبت به روش‌های تئوری فیزیکی این است که:

اولاً در این روش تابع هدف می‌تواند کمینه کردن چگالی سطحی، بیشینه کردن سرعت حد بالستیک و یا موضوعات دیگر باشد.

ثانیاً: قیود طراحی می‌تواند محدودیت وزن، ضخامت و یا پارامترهای دیگر در نظر گرفته شود، در حالی که در روش‌های تئوری قبلی تابع هدف و قید طراحی کاملاً معین است و امکان تغییر ندارد.

اثرات تغییر شعاع و جرم پرتابه برای دو نوع پرتابه با مشخصات مختلف نشان می‌دهد که با افزایش جرم و شعاع گلوله، ضخامت‌های لایه سرامیکی و لایه پشتیبان و همچنین چگالی سطحی زره افزایش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد نسبت ضخامت لایه سرامیکی به لایه پشتیبان با افزایش جرم و شعاع گلوله تغییری نمی‌کند.

در طراحی زره با هدف کمینه چگالی سطحی، با افزایش سرعت حد بالستیک زره، نسبت ضخامت لایه سرامیک به کامپوزیت، افزایش می‌یابد. البته با افزایش سرعت حد بالستیک، نرخ افزایش نسبت ضخامت کاهش می‌یابد، به طوری که از سرعت حد بالستیک بالاتر از ۵۰۰ متر بر ثانیه، نسبت ضخامت بهینه در حدود ۲ ثابت می‌ماند.

در طراحی بهینه زره سرامیک-کامپوزیت با هدف کمینه چگالی سطحی زره، این نتیجه حاصل شد که سرامیک برن کاربید و برن

با کوچک فرض کردن زاویه امتداد سرعت گلوله با افق، تنها نیرویی که در راستای افق به گلوله وارد می‌شود برابر نیروی مقاومت هوا R خواهد بود. بنابراین از قانون دوم نیوتن در راستای افقی، می‌توان نوشت:

$$-bv_x^2 = ma_x = mv_x \frac{dv_x}{dx} \quad (15)$$

با انتگرال گیری به‌دست می‌آید:

$$\frac{-b}{m} x = \ln\left(\frac{v_x}{v_0}\right) \quad (16)$$

و در نهایت خواهد شد:

$$v_x = v_0 e^{\frac{-b}{m}x} \quad (17)$$

بدین ترتیب رابطه بین سرعت گلوله و مسافت طی شده در هوا از معادله (۱۷) به‌دست می‌آید.

## ۵-۲. طراحی زره بهینه برای فواصل مختلف شلیک

همان‌طور که در بخش ۳ مشاهده شد، الگوریتم ژنتیک، زره کاربید بور - اسپکترا را به‌عنوان سبک‌ترین زره با بهترین محافظت، پیشنهاد کرد. در این قسمت این زره برای گلوله‌های ۷/۶۲ و ۱۲/۷ میلی‌متری با سرعت‌های اولیه به ترتیب ۷۱۰ و ۸۰۰ متر بر ثانیه، برای فاصله‌های مختلف هدف تا محل شلیک، طراحی می‌شود. ابتدا با استفاده از رابطه (۱۷) سرعت گلوله در لحظه برخورد به هدف با توجه به فاصله محل شلیک تا هدف به‌دست می‌آید و سپس با استفاده از روشی که در قسمت ۳ توضیح داده شد، ضخامت‌های بهینه طراحی می‌شود. نتایج در جدول‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.

**جدول ۱۱.** طراحی بهینه برای زره کاربید بور - اسپکترا در برابر گلوله ۷/۶۲ میلی‌متری با سرعت اولیه ۷۱۰ متر بر ثانیه برای فواصل مختلف شلیک

فاصله تا هدف (m)	۰	۱۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
سرعت برخورد (m/s)	۷۱۰	۶۳۷	۴۶۰	۲۹۸	۲۳۹
$h_1$ (m)	۷/۴	۷	۵/۹	۴/۵	۳/۸
$h_2$ (m)	۶/۸	۶/۶	۶/۱	۵/۵	۵/۳
A (kg/m <sup>2</sup> )	۲۴/۹۲	۲۳/۷۶	۲۰/۴۴	۱۶/۳۵	۱۴/۳۹

**جدول ۱۲.** طراحی بهینه برای زره کاربید بور - اسپکترا در برابر گلوله ۱۲/۷ میلی‌متری با سرعت اولیه ۸۰۰ متر بر ثانیه برای فواصل مختلف شلیک

فاصله تا هدف (m)	۰	۱۰۰	۴۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
سرعت برخورد (m/s)	۸۰۰	۷۵۶	۶۳۹	۵۱۰	۴۵۶
$h_1$ (m)	۱۳/۸	۱۳/۵	۱۲/۴	۱۱	۱۰/۴
$h_2$ (m)	۱۲/۲	۱۲	۱۱/۵	۱۰/۸	۱۰/۵
A (kg/m <sup>2</sup> )	۴۶/۲۵	۴۵/۱۵	۴۱/۹۷	۳۷/۹	۳۵/۹۶

از نتایج مشخص شد که کم‌ترین چگالی سطحی زرهی که برای گلوله ۷/۶۲ و ۱۲/۷ میلی‌متری به ترتیب سرعت بالستیک ۷۱۰ و ۸۰۰ متر بر ثانیه را ایجاد کند، برابر ۲۴/۹۲ و ۴۶/۲۵ کیلوگرم بر متر

- [5] Ben-Dor, G.; Dubinsky, A.; Elperin, T.; Frage, N. "Optimization of Two Component Ceramic Armor for a Given Impact Velocity"; *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2000, 33, 90-185.
- [6] Shi, J.; Grow, D. "Effect of Double Constraints on the Optimization of Two-Component Armor Systems"; *Compos. Struct.* 2007, 79, 445-453.
- [7] Fawaz, Z. "Optimum Design of Two-Component Composite Armors Against High-Speed Impact"; *Compos. Struct.* 2006, 73, 253-262.
- [8] Hetherington, J. G. ; Rajagopalan, B. P. "An Investigation into the Energy Absorbed During Ballistic Perforation of Composite Armors"; *Int. J. Impact Eng.* 1991, 11, 33-40.
- [9] Feli, S.; Asgari, M. R. "An Analytical Model for Perforation of Ceramic/Multi-Layered Planar Woven Fabric Targets by Blunt Projectiles"; *Compos. Struct.* 2011, 93, 548-556.
- [10] Kia, M. "Genetic Algorithm in MATLAB"; Kia Rayaneh Press, 2010 (In Persian).
- [11] Holmquist, T. J. "A Ceramic Armor Material Database "; Tacom Research Development and Eng. Center (Warren. MI), 1999.
- [12] Shakib, M. M.; "Mechanics of Composite Structures"; Imam Hossein Univ. Press, First Ed., 2006 (In Persian).
- [13] Walker, J.; Halliday, D.; Resnick, R. "Fundamental of Physics"; *Classical Mech.*, Wiley Press, 8<sup>th</sup> Edition, 2003.

سیلیکون کاربرد به‌خاطر چگالی پایین و مقاومت بالا در اولویت استفاده قرار دارند. برای ماده کامپوزیتی پشتیبان نیز، از بین آرامیدها ماده اسپکترا و از بین انواع شیشه، نوع S توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است.

استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی بهینه‌سازی با استفاده از رابطه سرعت گلوله با مسافت طی شده در هوا تا لحظه برخورد به هدف و تعیین سرعت برخورد در فواصل شلیک مختلف، طراحی زره‌های سرامیک- کامپوزیت بهینه برای گلوله‌های ۷/۶۲ و ۱۲/۷ میلی‌متری انجام شده است. طراحی زره بهینه نشان می‌دهد که چگالی سطحی زره برای بردهای دورتر کاهش قابل توجهی دارد.

## ۷. مراجع

- [1] Wilkins, M. L. "Mechanics of Penetration and Perforation"; *Int. J. Eng. Sci.* 1987, 16, 793-807.
- [2] Florence, A. L. "Interaction of Projectiles and Composite Armor"; Stanford Research Institute, August 1969.
- [3] Hetherington, J. G. "Optimization of Two Component Composite Armors"; *Int. J. Impact Eng.* 1993, 123, 409-14.
- [4] Wang, B.; Lu, G. "On the Optimization of Two-Component Plates Against Ballistic Impact"; *J. Mater. Proc. Tech.* 1996, 57, 141-145.

Archive of SID