



## بررسی تأثیر امپدانس و ضخامت لایه‌های متفاوت بر خیز لایه هدف در سیستم‌های زرهی لایه‌بندی شده تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از روش تحلیل عددی

علی اصلانی<sup>۱</sup>، جمال زمانی اشنی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴-۱۹۹۹۱، zamani@kntu.ac.ir

### چکیده

سازه‌های چند لایه به‌طور گسترده با هدف ایجاد ساختاری مقاوم در برابر بارگذاری دینامیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. رفتار سازه‌های چند لایه در نرخ کرنش بالا و تأثیر آن‌ها بر میرایی موج شوک و خیز لایه هدف مواردی هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اثر ضخامت لایه‌های سرامیکی، آلومینیومی و فولادی بر خیز لایه هدف، به‌صورت عددی، مورد تحقیق قرار گرفته و مدل ریاضی برای خیز لایه هدف ارائه شده است. برای شبیه‌سازی عددی از نرم افزار LS-DYNA بهره گرفته و از مدل‌های مادی جانسون-هولمکوئیست و جانسون-کوک به‌ترتیب برای مدل‌سازی سرامیک و فلز استفاده شده است. سازه‌های ترکیبی دو لایه و سه لایه با ثابت نگه‌داشتن ضخامت کل قسمت لایه‌بندی شده، شبیه‌سازی و تأثیر آن‌ها بر میزان خیز لایه هدف مطالعه شده است. با توجه به مهم بودن فاکتور وزن در ایجاد یک سازه زرهی، برای مقایسه بهتر سازه‌های چند لایه از نسبت سفتی به وزن استفاده شده و مقایسه بین این موارد انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دو لایه سرامیک در اطراف لایه فلزی باعث افزایش نسبت سفتی به وزن سازه شده و در نتیجه کارایی سیستم زرهی را افزایش می‌دهد. در نهایت، با توجه به نتایج مراحل قبل سیستم چهار لایه متشکل از ترکیب سرامیک و فلز پیشنهاد شده است که علاوه بر داشتن کارایی بهتر در کاهش خیز لایه هدف، وزن کمتری را نیز دارد. در این سیستم از الگوی کاهشی امپدانس در لایه‌ها استفاده شده که تأثیر مثبتی بر کارایی سازه زرهی داشته است.

### اطلاعات مقاله

دریافت: آذر ۹۳

پذیرش: دی ۹۳

### کلیدواژگان:

سازه زرهی چندلایه

بارگذاری دینامیک

LS-DYNA

شبیه‌سازی عددی

نرخ کرنش بالا

## A numerical analysis on effect of impedance and thickness of various layers on deflection of target plate in layered armor systems under explosive loading

Ali Aslani, Jamal Zamani Ashani\*

Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 19991-43344, zamani@kntu.ac.ir

### Keywords

Multi-layered Armor,  
Dynamic Loading,  
LS-DYNA, Numerical  
Simulation,  
High Strain Rate

### Abstract

Multi-layer structures have been widely used for producing resistant structures under dynamic loads. In this article, behavior of multi-layer structures at high strain rates, their effect on the shock wave attenuation and deflection of target layer are investigated. The effect of the thickness of SiC, Al6061 and RHA steel on deflection of target layer was investigated numerically; and mathematical modeling was applied for target layer deflection. LS-DYNA software was used for simulation. The Johnson-Cook and Johnson-Holmquist material models were used for modeling of ceramics and metals, respectively. Two-layer and three-layer composite structures with a constant total thickness of layered system were simulated and their impact on the target layer deflection were studied. Due to the importance of weight factor in creation of a multi-layer armor, for better comparison of multi-layer structures, the stiffness to weight ratio was used. The results show that using two ceramic layers around metal layer increases the stiffness to weight ratio of the structure and improves armored system performance. Consequently, a four-layer system consisting of a combination of ceramics and metals was suggested which has a less weight and better performance. In this system, a reduction pattern for acoustic impedance is used which has positive impact on the performance of armored structure.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Aslani, A. and Zamani Ashani, J., "A numerical analysis on effect of impedance and thickness of various layers on deflection of target plate in layered armor systems under explosive loading" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 11-20, 2015.

۱- مقدمه

سیستم‌های زرهی به طور سنتی از یک لایه متشکل از ورق فولادی با مقاومت بسیار بالا تشکیل شده‌اند [۱-۴]. با این وجود خواسته‌ها در مورد تولید سازه‌های چند لایه با حداکثر محافظت بالستیک با کمترین وزن روبه افزایش است. در سال‌های گذشته سرامیک‌ها و پلیمرها به طور گسترده‌ای در تولید زره‌های محافظتی به کار گرفته شده‌اند [۵، ۶]. زره‌های ترکیبی (کامپوزیتی)، که به عنوان سیستم‌های زرهی چند لایه شناخته می‌شوند، از یک لایه سخت سرامیکی برای مقابله با ضربه و یک ورق پستی از جنس کامپوزیت تقویت شده توسط الیاف تشکیل شده‌اند. کاربرد اصلی لایه سرامیکی تقلیل فشار وارده به ورق پستی، توسط تغییر شکل دادن و فرسایش ضربه زنده می‌باشد. لایه کامپوزیت پستی قسمتی از انرژی جنبشی را جذب می‌کند. همچنین ورق‌های فلزی نیز برای استفاده در لایه پستی در زره‌های چند لایه مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷-۱۰].

زمانی که موج شوک با سرعتی بالا به لایه سخت جلویی برخورد می‌کند، یک موج فشاری تولید می‌شود که از ناحیه برخورد موج در جهت برخورد منتشر می‌شود، پس از اینکه موج به سطح پستی لایه سخت می‌رسد، کسری از آن به صورت موج کششی بازتابش می‌شود، که سبب آسیب زدن به این لایه می‌شود. مطالعاتی بر روی نحوه انتشار موج تنش در زره‌های ترکیبی هم به صورت تحلیلی و هم عددی صورت گرفته است [۱۱-۱۲]. تفاوت بین امپدانس آکوستیک لایه سخت جلویی و لایه پشت آن نقش اساسی در کارایی بالستیک زره ایفا می‌کند [۱۳]. بعلاوه اینکه اضافه کردن یک لایه بین دو لایه پستی و سخت جلویی مشخصاً بر روی انتشار موج و کارایی بالستیک زره تأثیر گذار خواهد بود. آنچه در این مقاله مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است، کارایی زره‌های چند لایه در زمینه اتلاف موج شوک حاصل از ماده منفجره می‌باشد. از جمله عوامل مهم و موثر در این زمینه، امپدانس و مقاومت لایه هستند، که برای تحقیق در این زمینه از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه سازی سیستم لایه‌بندی شده متشکل از لایه‌های متفاوت استفاده شده است. میزان تغییر شکل لایه هدف و همچنین میزان تنش منتقل شده به لایه هدف مواردی هستند که مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین سیستم لایه بندی شده از منظر سختی خمشی و وزن سازه مورد تحقیق قرار گرفته است. در این تحقیق از موادی استفاده شده که بیشترین کاربرد را در تولید سیستم‌های زرهی داشته‌اند. محاسبات انجام شده به پاسخ سریع سازه (کمتر از ۵ میلی ثانیه) محدود شده‌اند. لایه‌های متفاوت طوری در نظر گرفته شده‌اند که به طور کامل و بدون هیچ عیبی با هم در تماس باشند و سطح مشترک بدون عیبی داشته باشند.

۲- شبیه‌سازی عددی، مدل مادی و موج شوک بارگذاری شده بر روی سازه

پیش پردازش شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار LS-PrePost-4.2 انجام گرفته و سپس از تحلیلگر LS-DYNA برای انجام محاسبات استفاده شده است. این تحلیلگر یک نرم‌افزار المان محدود برای تحلیل‌های دینامیک غیر خطی سازه‌های غیر الاستیک می‌باشد. برای شبیه‌سازی موج شوک حاصل از انفجار از روش LBE<sup>۱</sup> کمک گرفته شده و همچنین سازه‌های فلزی و سرامیکی با استفاده از المان‌های جامد و مدل‌های مادی و معادلات حالتی که در ادامه آورده شده، مدل‌سازی شده‌اند. در این تحقیق آلومینیوم ۶۰۶۱، فولاد

زرهی RHA و سیلیکون کارباید<sup>۲</sup> به عنوان لایه‌های محافظ و PMMA<sup>۳</sup> به عنوان لایه هدف بکار گرفته شده‌اند. سیلیکون کارباید توسط مدل مادی جانسون-هولمکوئیست<sup>۴</sup> مدل‌سازی شده است. این مدل مادی برای مدل کردن سرامیک‌ها، شیشه و سایر مواد شکننده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. تنش معادل برای مواد سرامیکی توسط معادله (۱) داده می‌شود [۱۴].

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

که در آن رابطه (۲) برقرار است [۱۴].

$$\sigma_f^* = a(p^* + t^*)^n (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

که بیان کننده رفتار بدون عیب و غیر آسیب دیده است. پارامتر آسیب برای این مدل مادی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۴].

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f^p} \quad (3)$$

که در آن معادله کرنش پلاستیک شکست از معادله (۴) محاسبه می‌شود [۱۴].

$$\epsilon_f^p = d_1 (p^* + t^*)^{d_2} \quad (4)$$

و همچنین رفتار ماده آسیب دیده با استفاده از رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۴].

$$\sigma_f^* = b(p^*)^m (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \leq SFMAX \quad (5)$$

که <sup>۱\*</sup> در این معادله بیانگر کمیت نرمالیزه شده است، تنش‌ها توسط تنش معادل در حد الاستیک هوگونویوت، فشار توسط فشار در حد الاستیک هوگونویوت و نرخ کرنش با نرخ کرنش مرجع. پارامتر  $d_1$  نرخ را که در آن آسیب اتفاق می‌افتد کنترل می‌کند. اگر این مقدار برابر با صفر باشد آسیب کامل در یک گام زمانی به صورت آنی اتفاق می‌افتد. در مواد غیر آسیب دیده، فشار هیدرواستاتیک در حالت فشاری توسط معادله ۶ محاسبه می‌شود [۱۴].

$$P = k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3 \quad (6)$$

و در حالت کششی که  $\mu = \rho / \rho_0 - 1$  از معادله ۷ فشار هیدرواستاتیک محاسبه می‌شود [۱۴].

$$P = K_1 \mu \quad (7)$$

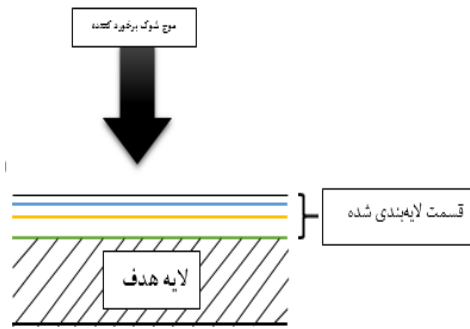
مشخصات مربوط به این مدل برای سیلیکون کارباید در جدول ۱ آورده شده است. برای مدل‌سازی سایر موارد از مدل مادی جانسون-کوک استفاده شده است. این مدل در سال ۱۹۸۳ توسط جانسون و کوک ارائه شده و به طور گسترده‌ای در نرم افزارهای شبیه سازی برای بررسی رفتار فلزات مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مادی جانسون-کوک به صورت رابطه (۸) است [۱۴].

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (8)$$

که در آن  $\bar{\epsilon}^p$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  نرخ بی بعد کرنش در  $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 s^{-1}$  و  $T^*$  دما می‌باشد. پنج ثابت  $A, B, n, C, m$  برای ماده تعریف می‌شوند. اولین پیرانتز این معادله نشان دهنده تنش بر اساس کرنش در  $T^* = 0$ ،  $\dot{\epsilon}_0 = 1$ ، همچنین آنچه در پیرانتزهای دوم و سوم آورده شده به ترتیب تأثیر نرخ کرنش و دما بر تنش است. جدول ۲ نمایانگر ثوابت و مقادیر مورد نیاز در معادله جانسون کوک می‌باشد.

2. SiC  
3. polymethylmethacrylate  
4. Johnson-Holmquist

1. Load Blast Enhanced

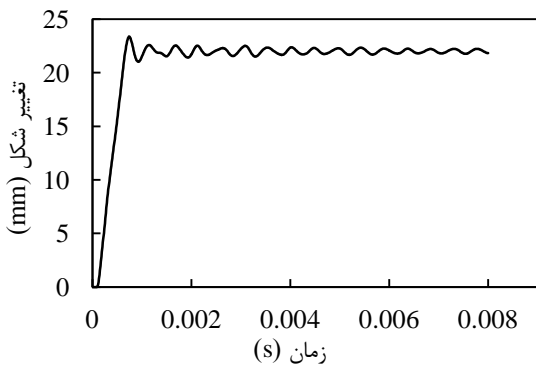


شکل ۱ طرح کلی قرارگیری لایه‌ها

نحوه قرارگیری لایه‌ها به این صورت است که لایه زیرین یا انتهایی به عنوان هدف در نظر گرفته شده و لایه چینی قسمت محافظ بر روی آن صورت گرفته است. در این مطالعه PMMA به عنوان لایه هدف در انتهای سازه در نظر گرفته شده است. حداکثر تعداد لایه‌ای که بر روی این لایه قرار گرفته، ۴ عدد می‌باشد.

از جمله فاکتورهای مورد بررسی، میزان تنش است که توسط موج شوک به لایه هدف منتقل می‌شود و همچنین میزان تغییر شکل این لایه، فاکتور دیگری است که مورد تحقیق قرار گرفته است. برای بررسی اثر لایه‌ها ابتدا قسمت تلف کننده موج شوک که بر روی هدف قرار می‌گیرد به صورت تک لایه متشکل از سیلیکون کارباید، فولاد زرهی و آلومینیوم ۶۰۶۱ در نظر گرفته شده است، تأثیر ضخامت این تک لایه بر روی فاکتورهای خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تعداد لایه‌ها به دو عدد افزایش پیدا کرده است. با افزایش تعداد لایه‌ها به دو عدد تأثیر ضخامت هر لایه بر فاکتورهای خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. به این صورت که با ثابت نگهداشتن مجموع ضخامت دو لایه، با کم کردن ضخامت یک لایه ضخامت دیگری افزایش پیدا کرده است. در حالت بعدی، سه لایه بر روی لایه هدف قرار گرفته و تأثیر ضخامت لایه‌ها بررسی شده است. در این مرحله الگوهای امپدانس متفاوتی نیز برای لایه‌ها در نظر گرفته شده، که در نمودارهای زیر مشخص شده است. مرحله نهایی مربوط به بررسی الگوی کاهش امپدانس در قسمت لایه‌چینی شده و بررسی نتایج آن می‌باشد.

برای صحت سنجی روش مورد استفاده از مقاله [۲۰] بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی خرج ۴۰ گرمی از ماده C4 در فاصله ۲۵۰ میلی‌متری از ورق آلومینیوم EN AW-1050A H24 در نمودار شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲ تغییر شکل نقطه میانی ورق آلومینیومی در بارگذاری ۴۰ گرم خرج C4 در فاصله ۲۵۰ میلی‌متری

جدول ۱ مشخصات سیلیکون کارباید برای مدل جانسون-هولمکوئیست [۱۵]

| پارامتر | پارامتر                    | پارامتر | پارامتر                |
|---------|----------------------------|---------|------------------------|
| ۵/۱۳    | $P_{HEL}(GPa)$             | ۱۹۳     | G (GPa)                |
| ۱       | $\beta$                    | ۰/۹۶    | A                      |
| ۲۲۰     | $K_1(GPa)$                 | ۰/۶۵    | N                      |
| ۳۶۱     | $K_2(GPa)$                 | ۰/۳۵    | B                      |
| ۰       | $K_3(GPa)$                 | ۱/۰     | M                      |
| ۰/۴۸    | $D_1$                      | ۰/۰۰۹   | C                      |
| ۰/۴۸    | $D_2$                      | ۱/۰     | $\dot{\epsilon}_0$     |
| ۱/۲     | $\dot{\epsilon}_{f,max}^p$ | ۰/۷۵    | T (GPa)                |
| ۰/۰     | $\dot{\epsilon}_{f,min}^p$ | ۱۲/۲    | $\sigma_{max}^i (GPa)$ |
| ۰/۲     | FS                         | ۱/۳     | $\sigma_{max}^f (GPa)$ |
| ۰       | Damage                     | ۱۱/۷    | HEL (GPa)              |

جدول ۲ پارامترهای مربوط به معادله جانسون-کوک و مای-گرونیزن

| پارامتر    | آلومینیوم [۱۶] ۶۰۶۱ | فولاد RHA [۱۷] | PMMA [۱۸] |
|------------|---------------------|----------------|-----------|
| $C_1(GPa)$ | ۰/۳۲۴۱              | ۰/۷۹۲۲         | ۰/۰۶۴۸    |
| $C_2(GPa)$ | ۰/۱۱۳۸              | ۰/۵۱۰          | ۰/۰۰      |
| n          | ۰/۴۲                | ۰/۲۶           | ۱/۰       |
| $C_3$      | ۰/۰۰۲               | ۰/۰۱۴          | ۰/۰       |
| m          | ۱/۳۴                | ۱/۰۳           | ۰/۰       |
| $K_2(GPa)$ | ۷۶/۷۴               | ۱۶۳/۹          | ۵/۸۵      |
| $K_2(GPa)$ | ۱۲۸/۳               | ۲۹۴/۳          | ۳۵/۴      |
| $K_3(GPa)$ | ۱۲۵/۱               | ۵۰۰/۰          | ۱/۷۴      |
| $\Gamma_0$ | ۲/۰                 | ۱/۲            | ۰/۸       |

رفتار ماده در هنگام شکست توسط یک مدل آسیب پیوسته<sup>۱</sup> توصیف می‌شود که D به عنوان پارامتر آسیب به صورت رابطه (۹) تعریف خواهد شد [۱۴].

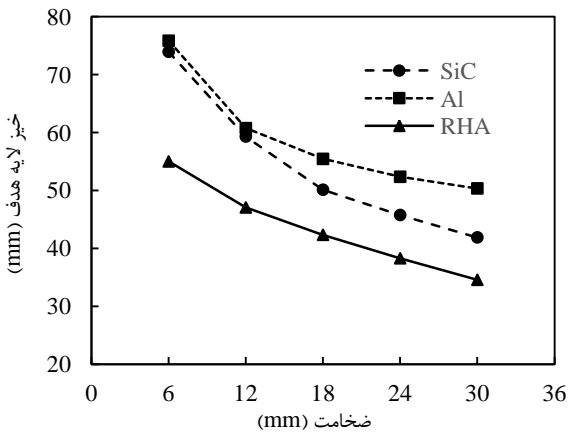
$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \quad (9)$$

که در آن  $\epsilon_p^f$  معادل نرخ کرنش پلاستیک در شکست است. برای استفاده از این مدل در نرم افزار LS-DYNA در صورتی که از المان جامد استفاده شود، باید از یک معادله حالت نیز کمک گرفت. در چنین حالتی معمولاً از معادله حالت مای-گرونیزن<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. این معادله حالت به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۱۴].

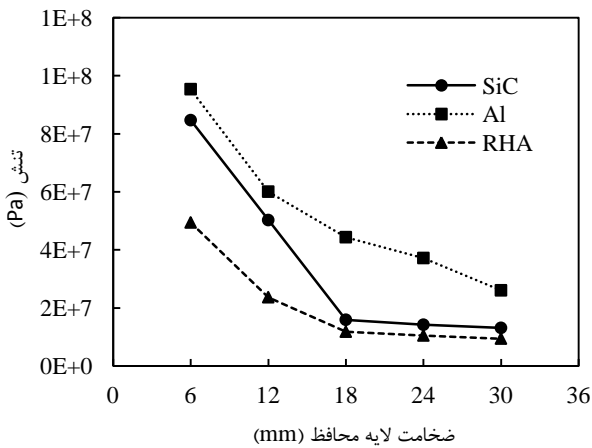
$$P = (k_1 \mu + k_2 \mu^2 + k_3 \mu^3) \left( 1 - \frac{\Gamma \mu}{2} \right) + \Gamma \rho E \quad (10)$$

در این معادله  $K_1$ ،  $K_2$ ،  $K_3$  ثابت ماده هستند، که در آن  $V_0$  و  $V$  به ترتیب حجم ویژه اولیه و حجم ویژه در زمانی است که فشار را بدست می‌آوریم،  $\Gamma$  نسبت گرونیزن (برابر با  $\Gamma_0 (V/V_0)$ ) که  $\Gamma_0$  نسبت گرونیزن اولیه است، و E انرژی داخلی در واحد جرم می‌باشد [۱۹]. ضرایب مربوط به مدل مادی و معادله حالت فلزات در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۱ طرح کلی قرارگیری لایه‌ها را نشان می‌دهد.

1. Continuum damage model  
2. Mie-Gruneisen



شکل ۳ حداکثر تغییر شکل لایه هدف در اثر بارگذاری انفجاری ۶۰۰gr ماده منفجره TNT در فاصله ۱۵۵mm با تغییر جنس و ضخامت لایه محافظ



شکل ۴ حداکثر تنش انتقالی به لایه هدف در اثر بارگذاری انفجاری ۶۰۰gr ماده منفجره TNT در فاصله ۱۵۵mm با تغییر جنس و ضخامت لایه محافظ

می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در ضخامت این لایه پس از ۱۸mm تأثیر کمتری بر تنش عبوری و با توجه به نمودار قبل تأثیر کمتری بر میزان تغییر شکل لایه هدف دارد. این مسئله را در مورد لایه محافظ فولاد زرهی نیز می‌توان بیان کرد. علت این مسائل را می‌توان وجود اختلاف امپدانس بین دو لایه، سرعت صوت درون هر لایه و همچنین میزان میراکنندگی آن‌ها معرفی کرد. بالا بودن سرعت صوت درون لایه باعث پخش سریعتر موج و در نتیجه بهتر شدن آن می‌شود. همچنین اختلاف امپدانس بین دو لایه بر میزان موج عبوری و بازتابش شده در سطح مشترک اثر گذار خواهد بود.

۲-۲- ارائه مدل ریاضی برای تغییر شکل لایه هدف با استفاده از روش RSM برای بررسی دقیق‌تر نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های تک لایه، از روش RSM استفاده شده است و مدل ریاضی برای حداکثر تغییر شکل ورق ارائه شده است. متغیرهای در نظر گرفته شده شامل جنس، ضخامت و Z (فاصله مقیاس شده [۲۲]) می‌باشند. فاصله مقیاس شده رابطه ایست که برای ایجاد ارتباط بین تأثیرات مشابه حاصل از موج بلست در فواصل متفاوت استفاده می‌شود.

این مقیاس نسبت فاصله به ریشه سوم وزن خرج می‌باشد که با استفاده از معادله رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

حداکثر تغییر شکل نقطه میانی ۲۲/۹۳ میلی متر بوده است که در مقایسه با حداکثر خیز بیان شده در آزمایشات تجربی مقاله [۲۰]، که برابر ۲۲ میلی متر بدست آورده شده است، مقدار قابل قبولی است و خطای ۴/۲ درصد را نشان می‌دهد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی حالت تک لایه محافظ

برای بررسی تأثیر ضخامت هر یک از مواد انتخاب شده به عنوان لایه محافظ، یعنی آلومینیوم ۶۰۶۱، فولاد زرهی و سرامیک سیلیکون کارباید، ۵ ضخامت برای هر لایه در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها انجام شده‌اند. تأثیر ضخامت هر یک از لایه‌ها بر حداکثر خیز لایه هدف و همچنین حداکثر تنش انتقالی به لایه هدف مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۳ شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت تک لایه را نشان می‌دهد که برای بررسی تأثیر ضخامت لایه محافظ بر میزان تغییر شکل لایه هدف انجام شده است.

شکل ۳ حداکثر تغییر شکل لایه هدف را در سه نوع از لایه چینی با جنس و ضخامت متفاوت، نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار مشخص است در تمامی ضخامت‌ها، لایه چینی با استفاده از تک لایه فولاد زرهی، در مقایسه با لایه‌های تشکیل شده از دو جنس دیگر با ضخامت مشابه، دارای کمترین مقدار تغییر شکل لایه هدف می‌باشد. کمتر بودن تغییر شکل ایجاد شده در لایه هدف در استفاده از فولاد زرهی به عنوان لایه محافظ، می‌تواند به دو علت (الف) قدرت بالای میراکنندگی فولاد زرهی و (ب) اختلاف بالای امپدانس بین لایه فولادی و لایه هدف از جنس PMMA باشد.

در حالتی که لایه محافظ متشکل از فولاد زرهی باشد، ضریب بازتابش و ضریب عبور موج تنش برخورد کننده را می‌توان از طریق فرمول‌های زیر محاسبه کرد. در این فرمول I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub> به ترتیب امپدانس لایه اول و دوم، R و T به ترتیب ضرایب عبور و بازتابش می‌باشند (رابطه (۱۱)) [۲۱].

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}, T = \frac{2I_2}{I_1 + I_2} \quad (11)$$

با توجه به ضریب بازتابش و ضریب عبور، ۱۳/۲ درصد از موج برخورد کننده عبور کرده و ۸۶/۸ درصد از آن به درون لایه فولادی بازتاب می‌شود. این درحالیست که برای لایه سرامیکی ۱۵ درصد عبور کرده و ۷۵ درصد بازتابش می‌شود و همچنین در لایه آلومینیومی این مقدار برای ضریب عبور ۳۱ درصد و برای ضریب بازتابش ۶۹ درصد می‌باشد. بازتابش زیاد موج به درون لایه محافظ می‌تواند برای این لایه مشکل ساز باشد. وقتی که یک جسم تحت فشار قرار می‌گیرد، موج در درون آن به صورت فشاری منتشر می‌شود که پس از بازتابش موج از سطح پشت ماده کششی خواهد بود. برهم نهی امواج کششی درون ماده باعث ایجاد ترک در ماده می‌شود، که به این پدیده اسپال گویند. به خاطر پایین بودن مقاومت کششی، در لایه محافظ از جنس سیلیکون کارباید در ضخامت‌های ۶ تا ۱۸، بازتابش زیاد موج به صورت موج کششی باعث اتفاق افتادن اسپال در این لایه شده‌است. نمودار تنش عبوری از لایه محافظ به لایه هدف در شکل ۴ تایید می‌کند که عبور تنش از لایه آلومینیومی به لایه هدف نسبت به سایر موارد بیشتر است. نمودار شکل ۴ حداکثر تنش انتقالی از لایه محافظ به لایه هدف را نشان می‌دهد.

از نمودار شکل ۴ می‌توان دریافت که مقدار تنش عبوری با افزایش در ضخامت لایه سرامیکی تا ضخامت ۱۸mm شیب تندتری دارد و پس از آن تا ضخامت ۳۰mm شبیبی نزدیک به صفر دارد.

جدول ۳ شبیه‌سازی انجام گرفته برای تک لایه محافظ

| #  | شناسه | لایه اول    | لایه دوم | لایه سوم | اسپال | وزن TNT (gr) | فاصله خرج از سازه (mm) | نوع تغییر شکل ورق*      | حداکثر تغییر شکل لایه هدف (mm) |
|----|-------|-------------|----------|----------|-------|--------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| ۰  | ۱۰P   | ۱۰mm-PMMA   | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | پاره شدن به صورت گلبرگی | -                              |
| ۱  | ۶R    | ۶mm-RHA     | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۵                             |
| ۲  | ۱۲R   | ۱۲mm-RHA    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۴۷                             |
| ۳  | ۱۸R   | ۱۸mm-RHA    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۴۲/۳                           |
| ۴  | ۲۴R   | ۲۴mm-RHA    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۳۸/۳                           |
| ۵  | ۳۰R   | ۳۰mm-RHA    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۳۴/۵                           |
| ۶  | ۶S    | ۶mm-SiC     | -        | -        | √     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۷۳/۹                           |
| ۷  | ۱۲S   | ۱۲mm-SiC    | -        | -        | √     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۹/۳                           |
| ۸  | ۱۸S   | ۱۸mm-SiC    | -        | -        | √     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۰/۱                           |
| ۹  | ۲۴S   | ۲۴mm-SiC    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۴۵/۷                           |
| ۱۰ | ۳۰S   | ۳۰mm-SiC    | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۴۱/۹                           |
| ۱۱ | ۶A    | ۶mm-Al6061  | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۷۵/۸                           |
| ۱۲ | ۱۲A   | ۱۲mm-Al6061 | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۶۰/۷                           |
| ۱۳ | ۱۸A   | ۱۸mm-Al6061 | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۵/۴                           |
| ۱۴ | ۲۴A   | ۲۴mm-Al6061 | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۲/۳                           |
| ۱۵ | ۳۰A   | ۳۰mm-Al6061 | -        | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵                    | ۱                       | ۵۰/۳                           |

\*نوع تغییر شکل ورق با توجه به موارد ذکر شده در منبع [۲۳] می‌باشد.

صورت فول فاکتوریال<sup>۲</sup> برای بررسی داده‌ها از طریق نرم افزار میننی تب<sup>۳</sup> ارائه شده است. جدول ۴ نتایج آزمایشات طراحی شده با تغییر در متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد.

با بررسی مقدار پی<sup>۴</sup> در جدول آنالیز واریانس پارامترهایی که  $\alpha < 0.005$  دارند به عنوان پارامترهای موثر در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب پارامترهای جنس<sup>۵</sup>، ضخامت<sup>۶</sup>، فاصله مقیاس شده<sup>۷</sup>، توان دوم جنس<sup>۸</sup> و توان دوم ضخامت<sup>۹</sup>

موثر هستند. در مرحله بعد با حذف پارامترهای غیر موثر و انجام مجدد آنالیز واریانس داده‌ها مدل ریاضی رابطه (۱۳) برای تغییر شکل لایه هدف بدست آمده است.

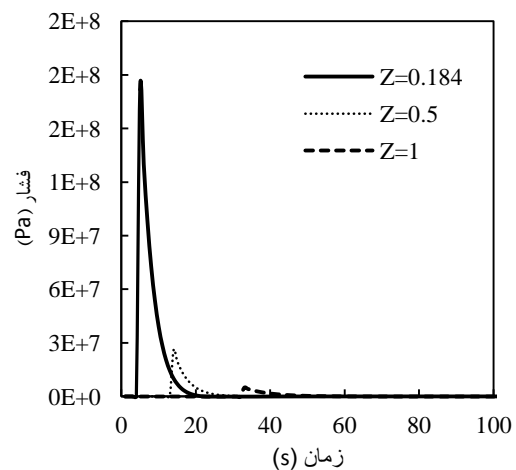
$$D = 28.8966 - 2.193A - 12.8930B - 13.9760C + 13.9760A^2 + 3.50357B \quad (13)$$

که در آن A جنس ماده، B ضخامت لایه محافظ و C فاصله مقیاس شده است. از مدل پیشنهاد شده می‌توان موارد زیر را دریافت:

- حداکثر تغییر شکل لایه هدف با ضخامت لایه محافظ نسبت خطی و مستقیم دارد. هرچند پارامتر B\*B نیز موثر است اما با توجه به ضریب بیشتر B نسبت خطی و مستقیم در نظر گرفته می‌شود.
- حداکثر تغییر شکل لایه هدف به عنوان تابعی درجه دو از جنس ماده می‌باشد. هرچند پارامتر A نیز در مدل وجود دارد اما به علت بیشتر بودن ضریب A\*A در معادله این پارامتر غالب خواهد بود.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (12)$$

که در آن R فاصله از خرج و W وزن خرج می‌باشد. برای Z های مورد استفاده نمودار فشار وارده به مرکز ورق (با توجه به کروی بودن موج این مقدار بیشینه فشار وارد به ورق می‌باشد) در شکل ۵ آورده شده است. کاملاً مشخص است که با افزایش مقدار Z فشار اعمال شده توسط بارگذاری انفجاری کاهش یافته است.

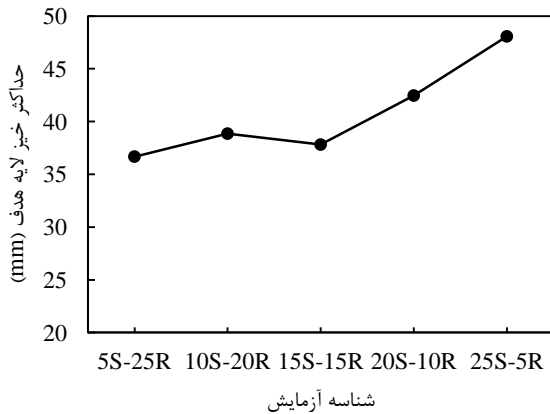


شکل ۵ نمودار فشار-زمان در مرکز ورق برای بارگذاری انفجاری با سه مقدار متفاوت برای Z

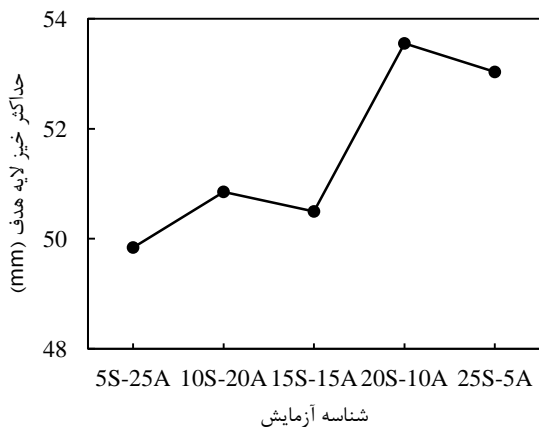
در این تحلیل به دلیل اینکه در شبیه‌سازی‌ها انجام تکرار آزمایش موجب می‌شود تا جواب‌های یکسانی داشته باشیم، تعداد نقاط مرکزی برابر یک در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول ۴ مشخص است، ۱۵ آزمایش به

2. Full Factorial  
3. Minitab  
4. P value  
5. Material  
6. Thickness  
7. Z  
8. Material\*Material  
9. Thickness\*Thickness

1. Center Point



شکل ۶ تغییر شکل لایه هدف در اثر بارگذاری ۶۰۰ گرم TNT در فاصله ۱۵۵ میلی متری برای لایه چینی دو لایه فولاد زرهی-سرامیک بر روی لایه هدف



شکل ۷ تغییر شکل لایه هدف در اثر بارگذاری ۶۰۰ گرم TNT در فاصله ۱۵۵ میلی متری برای لایه چینی دو لایه آلومینیوم ۶۰۶۱ - سرامیک بر روی لایه هدف

سرعت بالای صوت در لایه سرامیکی و همچنین اختلاف امپدانس موجود بین این لایه و لایه آلومینیومی باعث می‌شود موج در هنگام رسیدن به سطح مشترک یک حالت ضربه‌ای ایجاد کند که افزایش تغییر شکل را نتیجه می‌دهد. لایه دوم یعنی آلومینیوم سرعت بسیار پایین تری برای انتشار موج دارد و به همین دلیل از این ضربه می‌کاهد و در نتیجه تغییر شکل کاهش خواهد یافت. پس تا زمانی که ضخامت لایه‌های آلومینیومی و سرامیکی برابر می‌شود عامل اول یعنی میرا کنندگی لایه سرامیکی موثرتر بوده و در نتیجه با افزایش ضخامت آن تا ۱۵ میلی‌متر خیز لایه هدف کاهش یافته است. وجود ضخامت بالاتر آلومینیوم در این حالات یعنی 5S-25A، 10S-20A، 15S-15A در کمرنگ کردن ایجاد ضربه موثر است. این در حالی است که با افزایش ضخامت سرامیک به بیش از ۱۵ میلی‌متر عامل دوم یعنی اختلاف امپدانس بین لایه‌ها و در نتیجه ایجاد ضربه در سطح مشترک موثرتر خواهد بود. در این حالات با افزایش ضخامت سرامیک و کاهش ضخامت آلومینیوم، خیز لایه هدف افزایش یافته است. جدول ۶ ترتیب قرارگیری لایه‌ها، ضخامت هر لایه، نوع تغییر شکل و حداکثر تغییر شکل لایه هدف در سیستم زرهی ترکیبی سه لایه را نشان می‌دهد.

• حداکثر تغییر شکل لایه هدف با فاصله مقیاس شده رابطه مستقیم و خطی دارد.

جدول ۴ نتایج بدست آمده از آزمایشات طراحی شده با متغیرهای جنس لایه محافظ،

| ضخامت لایه محافظ و Z |        |                  |       |                                      |
|----------------------|--------|------------------|-------|--------------------------------------|
| ردیف                 | جنس    | ضخامت (میلی متر) | Z     | حداکثر تغییر شکل لایه هدف (میلی متر) |
| ۱                    | Al6061 | ۶                | ۰/۱۸۴ | ۷۵/۸۵                                |
| ۲                    | SiC    | ۶                | ۰/۱۸۴ | ۷۳/۹۵                                |
| ۳                    | Al6061 | ۳۰               | ۰/۱۸۴ | ۵۰/۳۵                                |
| ۴                    | SiC    | ۳۰               | ۰/۱۸۴ | ۴۱/۸۹                                |
| ۵                    | Al6061 | ۶                | ۱     | ۴۴/۹۳                                |
| ۶                    | SiC    | ۶                | ۱     | ۴۱/۵۳                                |
| ۷                    | Al6061 | ۳۰               | ۱     | ۲۲/۸۹                                |
| ۸                    | SiC    | ۳۰               | ۱     | ۱۷/۸۲                                |
| ۹                    | Al6061 | ۱۸               | ۰/۵   | ۴۴/۲۶                                |
| ۱۰                   | SiC    | ۱۸               | ۰/۵   | ۴۱/۱۶                                |
| ۱۱                   | RHA    | ۶                | ۰/۵   | ۴۵/۲۶                                |
| ۱۲                   | RHA    | ۳۰               | ۰/۵   | ۱۹/۶۴                                |
| ۱۳                   | RHA    | ۱۸               | ۰/۱۸۴ | ۴۲/۳۳                                |
| ۱۴                   | RHA    | ۱۸               | ۱     | ۱۷/۴۴                                |
| ۱۵                   | RHA    | ۱۸               | ۰/۵   | ۲۶/۸۲                                |

### ۳-۳- نتایج شبیه سازی‌های دو لایه

پنل‌های دوگانه یا دو تایی کارایی بهتری را نسبت به زره‌های تشکیل شده از یک لایه از خود نشان می‌دهند [۲۴]. از اینرو مرحله دوم از شبیه‌سازی‌ها مربوط به لایه چینی با استفاده از دو لایه محافظ بر روی لایه هدف در نظر گرفته شده‌است. هدف از این مرحله رسیدن به نسبتی بین ضخامت فولاد زرهی-سرامیک و آلومینیوم - سرامیک می‌باشد که در آن نسبت، خیز کمتری برای لایه هدف اتفاق بیافتد. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این مرحله به این صورت است که با ثابت نگاه داشتن ضخامت لایه محافظ که متشکل از دو لایه فولاد زرهی-سرامیک یا آلومینیوم - سرامیک است، به مقدار ۳۰ میلی متر، از ضخامت یکی از لایه‌ها کم کرده و به دیگری افزوده شده است. جدول ۵ شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و نتایج حاصل از آن را نشان می‌دهد.

نمودار شکل ۶ نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو لایه فولاد زرهی-سرامیک را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۶ آزمایشات 5S-25R و 15S-15R نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهند. نتایج بدست آمده در این مرحله برای شبیه‌سازی‌های سه لایه مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لایه سرامیکی تأثیر کمتری در اتلاف موج تنش دارد و با توجه به نتایج بدست آمده با زیاد شدن ضخامت این لایه در هر دو نوع از شبیه‌سازی‌های دو لایه میزان حداکثر تغییر شکل ورق افزایش یافته است. با توجه به نمودار شکل ۷ آزمایشات 5S-25A و 15S-15A نتایج بهتری را از خود نشان داده‌اند.

از ویژگی‌های لایه سرامیکی سرعت بالای صوت درون این لایه است. دو عامل موثر در رسیدن موج به لایه هدف عبارتند از: ۱- میزان میرا کنندگی لایه؛ ۲- تفاوت امپدانس موجود بین دو لایه.

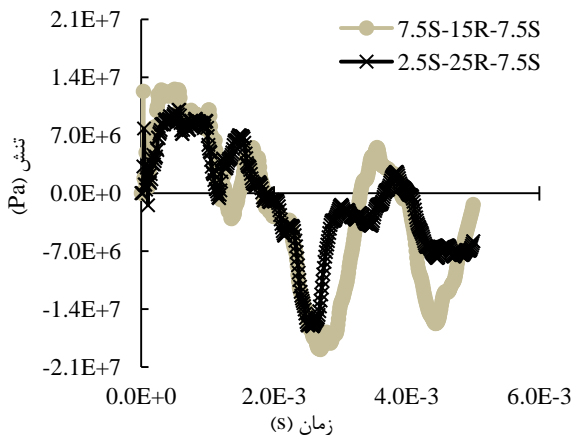
جدول ۵ ترتیب قرارگیری لایه‌ها، ضخامت هر لایه، نوع تغییر شکل و حداکثر تغییر شکل لایه هدف در سیستم زرهی ترکیبی دو لایه

| ردیف | شناسه   | لایه اول  | لایه دوم      | لایه سوم | اسپال | وزن TNT (gr) | SOD (mm) | نوع تغییر شکل ورق | حداکثر تغییر شکل لایه هدف (mm) |
|------|---------|-----------|---------------|----------|-------|--------------|----------|-------------------|--------------------------------|
| ۱۶   | 5S-25R  | ۰/۵cm-SiC | ۲/۵cm-RHA     | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۳۶/۶                           |
| ۱۷   | 10S-20R | ۱cm-SiC   | ۲cm-RHA       | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۳۸/۸۶                          |
| ۱۸   | 15S-15R | ۱/۵cm-SiC | ۱/۵cm-RHA     | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۳۷/۸۱                          |
| ۱۹   | 20S-10R | ۲cm-SiC   | ۱cm-RHA       | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۴۲/۴۶                          |
| ۲۰   | 25S-5R  | ۲/۵cm-SiC | ۰/۵cm-RHA     | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۴۸/۰۷                          |
| ۲۱   | 5S-25A  | ۰/۵cm-SiC | ۲/۵cm-Al 6061 | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۴۹/۸۴                          |
| ۲۲   | 10S-20A | ۱cm-SiC   | ۲cm-Al 6061   | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۵۰/۸۵                          |
| ۲۳   | 15S-15A | ۱/۵cm-SiC | ۱/۵cm-Al 6061 | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۵۰/۴۹                          |
| ۲۴   | 20S-10A | ۲cm-SiC   | ۱cm-Al 6061   | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۵۳/۵۵                          |
| ۲۵   | 25S-5A  | ۲/۵cm-SiC | ۰/۵cm-Al 6061 | -        | -     | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۵۳/۰۳۲                         |

جدول ۶ ترتیب قرارگیری لایه‌ها، ضخامت هر لایه، نوع تغییر شکل و حداکثر تغییر شکل لایه هدف در سیستم زرهی ترکیبی سه لایه

| ردیف | شناسه         | لایه اول  | لایه دوم    | لایه سوم  | وزن TNT (gr) | SOD (mm) | نوع تغییر شکل ورق | حداکثر تغییر شکل لایه هدف (mm) |
|------|---------------|-----------|-------------|-----------|--------------|----------|-------------------|--------------------------------|
| ۲۶   | 2/5S-25R-2/5S | ۲/۵mm-SiC | ۲۵mm-RHA    | ۲/۵mm-SiC | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۳۶/۵۱                          |
| ۲۷   | 7/5S-15R-7/5S | ۷/۵mm-SiC | ۱۵mm-RHA    | ۷/۵mm-SiC | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۳۹/۲۲۸                         |
| ۲۸   | 2/5S-25A-2/5S | ۲/۵mm-SiC | ۲۵mm-Al6061 | ۲/۵mm-SiC | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۴۹/۷۲                          |
| ۲۹   | 7/5S-15A-7/5S | ۷/۵mm-SiC | ۱۵mm-Al6061 | ۷/۵mm-SiC | ۶۰۰          | ۱۵۵      | ۱                 | ۴۹/۷۱                          |

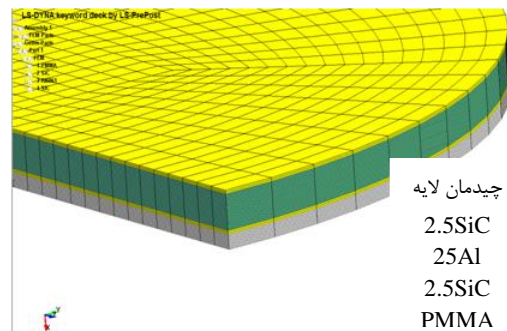
همانطور که در شکل ۹ مشخص است میزان تنش انتقالی به لایه هدف در چیدمان لایه‌ها به صورت افزایش-کاهش، در حالتی که ضخامت لایه سرامیکی کمتر باشد، کمتر شده و در نتیجه میزان تغییر شکل ایجاد شده در لایه هدف کمتر شده است.



شکل ۹ نمودار تنش انتقالی به لایه هدف در آزمایشات 7.5S-15R- و 2.5S-25R-7.5S در بارگذاری ۶۰۰ گرم TNT در فاصله ۱۵۵ میلی متری

علت انتخاب لایه سرامیکی و استفاده از آن در زره‌های چند لایه، مقاومت و سختی بالای این لایه در برابر ضربه وارده توسط موج شوک یا در صورت وجود پرتابه، مقاومت در برابر نفوذ و ضربه حاصل از آن می‌باشد. همچنین سرعت بالای حرکت موج درون لایه سرامیکی باعث می‌شود تا بار وارد شده به این لایه با سرعت بیشتری پخش شده و تمرکز بار ناگهانی ایجاد شده در اثر جبهه کروی موج شوک کاهش یابد [۲۵]. به همین دلیل این لایه

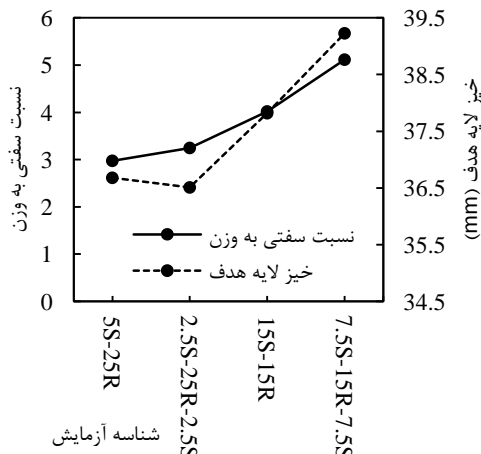
الگوهای امپدانسی کاهش-افزایش در استفاده از دو لایه سرامیک سیلیکون کارباید و آلومینیوم و همچنین الگوی افزایش-کاهش با استفاده از دو لایه فولاد زرهی و سرامیک سیلیکون کارباید ایجاد شده است. شکل ۸ ضخامت در نظر گرفته شده برای هر یک از این موارد با توجه به نسبت ضخامت موثر در کاهش حداکثر تغییر شکل لایه هدف در قسمت قبل انتخاب شده است. در نسبت ضخامت سیلیکون کارباید به فولاد زرهی و همچنین نسبت ضخامت سیلیکون کارباید به آلومینیوم برابر با ۱ و ۰/۲، حداکثر تغییر شکل لایه هدف در کمترین مقدار خود بوده است (این نسبت‌ها از تقسیم ضخامت سرامیک بر ضخامت آلومینیوم یا فولاد در حالتی که کمترین خیز را داشته‌ایم، بدست آمده است). با توجه به این نسبت‌ها و ثابت بودن ضخامت قسمت لایه چینی شده در ۳۰ میلی متر، آزمایشات به صورتی که در جدول ۶ نمایش داده شده است، طراحی شده‌اند. نمودار تنش انتقالی به لایه هدف در آزمایشات سه لایه ۲۶ و ۲۷ در شکل ۸ نشان داده شده است.



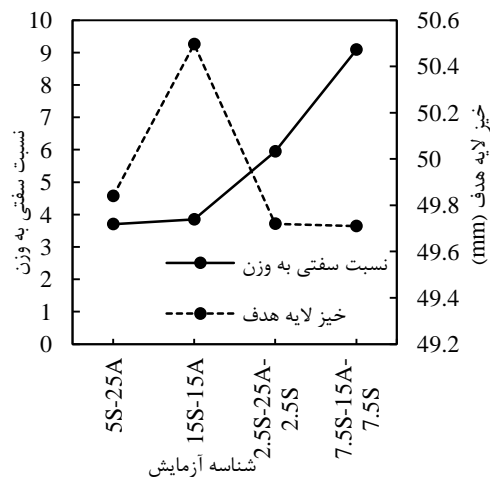
شکل ۸ شبیه سازی سه لایه 2.5S-25R-2.5S

۳-۴-۱- نسبت سفتی به وزن

به این خاطر که وزن یکی از فاکتورهای موثر در طراحی سازه چند لایه محافظ می‌باشد، برای مقایسه بین لایه چینی به صورت دولایه و سه لایه از نسبت سفتی خمشی به وزن سازه استفاده شده‌است. همچنین این نسبت امکان را به ما می‌دهد که در تعداد لایه‌های متفاوت بتوانیم مقایسه بهتری را انجام دهیم. افزایش سفتی و همچنین کاهش وزن و در نتیجه افزایش نسبت سفتی به وزن می‌تواند باعث تولید لایه محافظ مقاوم‌تری شود. در شکل ۱۱ نمودار نسبت سفتی به وزن برای لایه بندی با استفاده از فولاد زرهی و آلومینیوم نشان داده شده است. همانطور که در نمودار بالا مشخص است حالت 7.5S-15R-7.5S دارای بیشترین مقدار نسبت سفتی به وزن است و از این نظر کارایی بهتری نسبت به سایر موارد دارد. اما اگر میزان تغییر شکل لایه هدف را به عنوان شاخص در نظر بگیریم حالت‌های 2.5S-25R-2.5S و 5S-25R بهترین عملکرد را دارند. که مورد 2.5S-25R-2.5S از نظر نسبت سفتی خمشی به وزن در وضعیت بهتری است. در شکل ۱۲ نمودار مربوط به نسبت سفتی به وزن را برای لایه چینی دو لایه و سه لایه با استفاده از آلومینیوم و سرامیک را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱۱ نمودار نسبت سفتی به وزن قسمت لایه چینی شده و تغییر شکل لایه هدف در لایه چینی به صورت دو لایه و سه لایه با استفاده از فولاد زرهی و سرامیک



شکل ۱۲ نمودار نسبت سفتی به وزن قسمت لایه چینی شده و تغییر شکل لایه هدف در لایه چینی به صورت دو لایه و سه لایه با استفاده از آلومینیوم و سرامیک، خط چین تغییر شکل و خط ممتد نسبت سفتی به وزن را نشان می‌دهد.

پس از برخورد موج شوک با آن و گرفتن ضربه، باید توسط یک لایه با امپدانس نزدیک حمایت شود تا از بازگشت زیاد موج برخورد کننده به سطح انتهایی لایه سرامیکی، جلوگیری شود. در صورتی که این موج به میزان زیادی بازتابش یابد، موج کششی ایجاد شده موجب بروز پدیده اسپال در لایه سرامیکی می‌شود. در اصل لایه سرامیکی ضربه را گرفته، مقدار زیادی از موج را به لایه بعدی انتقال می‌دهد و این لایه یا لایه‌های بعدی هستند که انرژی جنبشی را جذب می‌کند [۸]. همانطور که در نتایج بدست آمده نیز مشخص است، ضخامت لایه سرامیکی تأثیر کمتری بر اتلاف موج شوک و تغییر شکل لایه هدف دارد. از اینرو برای انتخاب ضخامت این لایه مقادیر زیر ۶ میلی متر انتخاب می‌شود. انتخاب این مقادیر احتمال ایجاد اسپال را افزایش می‌دهد که باید با انتخاب لایه بعدی با امپدانس نزدیک به سرامیک و توانایی اتلاف موج شوک، این احتمال را از بین برد. آنچه از نتایج بدست آمده از آزمایشات برداشت می‌شود، قدرت بالای اتلاف انرژی موج شوک توسط لایه فولاد زرهی است. اما محدودیت دیگری در اینجا وجود دارد و آن وزن زره لایه بندی شده است که باید در نظر گرفته شود.

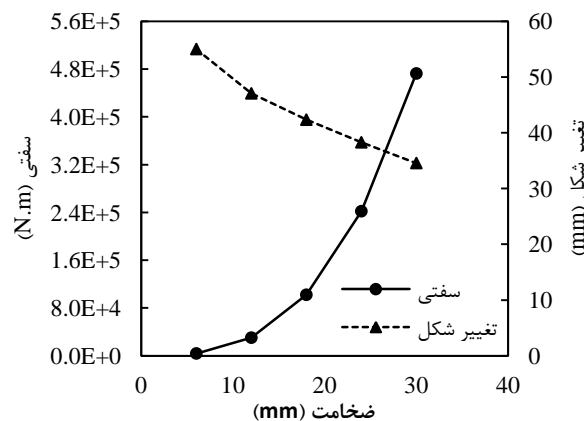
۳-۴-۲- بررسی زره لایه بندی شده بر اساس سفتی خمشی

مقاومت یک ماده نسبت به تغییر شکل یا خمیدگی الاستیکی را سفتی یا صلبیت می‌گویند. ماده‌ای که تغییر شکل کمی تحت بار نشان می‌دهد، سفتی بیشتری دارد. برای بدست آوردن سفتی خمشی سازه چند لایه قرار گرفته بر روی لایه هدف از روش ارائه شده در منبع [۲۶] کمک گرفته شده است. برای محاسبه سفتی از معادله (۱۴) استفاده می‌شود [۲۶].

$$S = \frac{EI}{b} \quad (14)$$

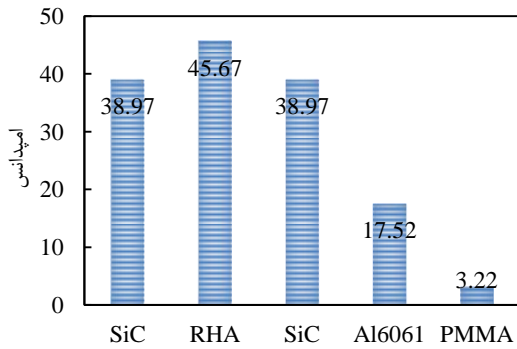
که در آن E مدول الاستیسیته، I ممان اینرسی و b عرض لایه می‌باشد. این در حالیکه برای بدست آوردن سفتی خمشی سیستم‌های چند لایه، با توجه به متفاوت بودن جنس در طول سازه، موقعیت تار خنثی باید با معادل سازی عرض لایه و در نتیجه یکسان کردن مدول الاستیسیته آن‌ها محاسبه شود [۲۶].

با افزایش میزان سفتی خمشی در لایه محافظ تک لایه، همانطور که در نمودار شکل ۱۰ مشخص است، میزان تغییر شکل لایه هدف کاهش می‌یابد و در نتیجه کارایی سازه افزایش می‌یابد. این حالت برای هر سه جنس در حالی که به صورت تک لایه بر روی لایه هدف قرار گرفته باشند، روند مشابهی داشته است.



شکل ۱۰ تغییرات سفتی و تغییر شکل لایه هدف با تغییر در ضخامت تک لایه محافظ فولاد زرهی





شکل ۱۴ تغییر امپدانس در سیستم زرهی لایه بندی شده متشکل از چهار لایه

آنچه از نتیجه بدست آمده قابل توجه است، کارایی بالای سازه در کاهش حداکثر خیز لایه هدف و همچنین کم بودن وزن سازه نسبت به آزمایشات 30R و 2.5S-25R-2.5S می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌ها و کاهش تدریجی امپدانس در سیستم لایه بندی شده، علاوه بر اتلاف بیشتر و موثرتر موج شوک، وزن سازه نیز کاهش یافته در نتیجه سازه‌ای با کارایی بالاتر ایجاد شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مدلسازی عددی انجام شده در این مطالعه با استفاده از نرم افزار LS-DYNA انجام و لایه چینی‌های متفاوت و ایجاد یک سیستم ترکیبی برای اتلاف موج شوک با استفاده از این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده‌اند. تاثیر ضخامت هر نوع از لایه‌ها بر تغییر شکل لایه هدف و میزان تنش انتقالی به این لایه مورد بررسی قرار گرفته و مدل ریاضی برای بدست آوردن خیز لایه هدف بر اساس ضخامت لایه محافظ، جنس لایه محافظ و Z ارائه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که خیز لایه هدف با Z و ضخامت لایه محافظ رابطه مستقیم و خطی دارد. همچنین دریافتیم که تغییر در ضخامت لایه سرامیکی نسبت به تغییر در ضخامت آلومینیوم و فولاد زرهی، تاثیر کمتری بر حداکثر خیز لایه هدف دارد.

استفاده از لایه فلزی در پشت لایه سرامیکی باعث می‌شود لایه سرامیکی تا ضخامت‌های پایین ۲ میلی متری دچار اسپال نشود، این در حالی است که در صورت عدم وجود لایه پشتی پدیده اسپال برای بارگذاری مشابه تا ضخامت ۱۸ میلی متری لایه سرامیکی اتفاق افتاده است.

در پنل‌های دوگانه طراحی شده حالتی که در آن نسبت ضخامت سرامیک به آلومینیوم یا ضخامت سرامیک به فولاد زرهی برابر ۰/۲ یا ۱ باشد، اتلاف موج شوک بیشتر در پنل و تغییر شکل کمتری در لایه هدف را از خود نشان داده است. در مقایسه بین سیستم‌های دوگانه و سه‌گانه حالتی که دو لایه سرامیکی در اطراف لایه فلزی قرار گرفته‌اند، کارایی بهتری داشته‌اند.

در صورتی که وزن سازه زرهی به عنوان عامل تاثیرگذار در نظر گرفته نشود، سیستم زرهی تک لایه متشکل از RHA بهترین عملکرد را خواهد داشت.

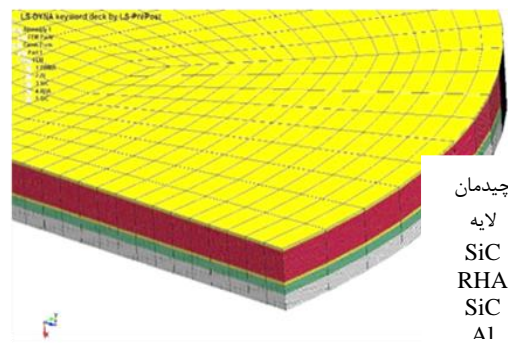
استفاده از الگوی کاهشی امپدانس باعث می‌شود که اتلاف موج شوک به صورت کارآمدتر انجام شود. همچنین استفاده از الگوی کاهشی امپدانس و لایه‌های مختلف فلزی در سیستم زرهی باعث کاهش قابل توجه وزن سازه خواهد شد.

با توجه به موارد اشاره شده در مورد کاهش کارایی میرا کنندگی سازه در صورت زیاد بودن ضخامت لایه سرامیکی، می‌توان اینگونه گفت که حالت 2.5S-25R-2.5S با داشتن ضخامت کم لایه سرامیک و همچنین نسبت سفتی به وزن بیشتر نسبت به 5S-25R از سایر موارد کارایی بهتری را داشته است. با توجه به شکل (۱۲)، حالت 7.5S-15A-7.5S دارای بیشترین نسبت سفتی به وزن می‌باشد و با توجه به شاخص تغییر شکل لایه هدف حالت 2.5S-25A-2.5S نیز عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.

#### ۳-۵- بررسی سیستم زرهی ترکیبی از منظر الگوی کاهشی امپدانس

با در نظر گرفتن وزن سازه زرهی، همچنین وجود لایه سخت با مقاومت بالا برای مقاومت در برابر ضربه و وجود لایه‌ای از جنس فلز پس از لایه سخت برای جذب انرژی جنبشی موج شوک وارد شده به سیستم زرهی ترکیبی، می‌توان سیستمی را طراحی کرد که تمامی این شرایط را دارا باشد و کارایی کافی را در استفاده از خود نشان دهد.

استفاده از سیستم‌های ترکیبی ساخته شده از چند لایه مختلف با توجه به بازتابش و عبور موج در چند سطح مشترک به تقلیل موج شوک کمک می‌کند. با استفاده از چند لایه که دارای اختلاف امپدانس هستند، هم می‌توان سازه را در برابر نفوذ پرتابه مقاوم کرد و هم می‌توان انرژی بیشتری را تلف کرد. هدف، طراحی مدلی است که با داشتن ضخامت مشابه به سیستم تک لایه و حداقل تعداد لایه و داشتن یک شیب تغییر و نه یک تغییر ناگهانی در امپدانس، اتلاف موج شوک بیشتر و کمترین تغییر شکل و واماندگی را در ماده داشته باشد. برای این منظور از طراحی 2.5S-25R-2.5S که وضعیت مناسب‌تری را از نظر خیز ایجاد شده در لایه هدف و نسبت سفتی به وزن دارد کمک گرفته و همچنین با در نظر گرفتن افزایش وزن سازه در اثر وجود ضخامت بالای فولاد زرهی، بخشی از ضخامت به آلومینیوم اختصاص یافته می‌دهیم. چیدمان نهایی لایه‌ها در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۳ نحوه لایه چینی بر اساس الگوی امپدانس در سیستم زرهی ترکیبی

همانطور که اشاره شد در این الگو سعی شده تا امپدانس لایه‌ها به تدریج کاهش یابد و کاهش ناگهانی در امپدانس اتفاق نیافتد. نمودار شکل ۱۴ تغییرات امپدانس در طول سیستم زرهی ترکیبی را نشان می‌دهد.

جدول ۷ ترتیب قرارگیری لایه‌ها و همچنین ضخامت هر لایه را مشخص کرده است. با ثابت نگاه داشتن نسبت موثر ضخامت بین سرامیک و فولاد، یعنی ۰/۲، از ضخامت این دو لایه کاسته شده و برای ایجاد الگوی امپدانس کاهشی آلومینیوم با ضخامت ۶ میلی متر در بین لایه سرامیک دوم و لایه هدف قرار گرفته است.

جدول ۷ ترتیب قرارگیری لایه‌ها و ضخامت هر لایه در سیستم زرهی ترکیبی چهار لایه

| وزن زره لایه بندی<br>در سطح ده سانتی<br>متر مربع (گرم)<br>$V = (10\text{cm}^2 \times t)$ | حداکثر تغییر<br>شکل لایه هدف<br>(میلی متر) | نوع تغییر<br>شکل ورق | لایه چهارم | لایه سوم | لایه دوم | لایه اول | شناسه        | ردیف |
|--|--|----------------------|------------|----------|----------|----------|--------------|------|
| ۱۸۵/۵  | ۳۶/۷                                       | I                    | ۶mm-Al     | ۲mm-SiC  | ۲۰mm-RHA | ۲mm-SiC  | 2S-20R-2S-6A | ۳۰   |

۵- مراجع

[20] Spranghers, K. Vasilakos, I. Lecompte, D. Sol, H. Vantomme, J. "Full-field deformation measurements of aluminum plates under free air blast loading", *Experimental mechanics*, Vol. 52, No. 9, pp. 1371-1384, 2012.

[21] Shull, P. J., "Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications", CRC press, 2002.

[22] Rajendran, J. M. L. R., "Blast loaded plates", Elsevier, 2008.

[23] Nurick, G. Shave, G., "The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads—an experimental study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 99-116, 1996.

[24] M. Lee, Y. Yoo, Analysis of ceramic/metal armour systems, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 9, pp. 819-829, 2001.

[25] Wang, Y. Wang, F. Yu, X. Ma, Z. Gao, J. Kang, X., "Effect of interlayer on stress wave propagation in CMC/RHA multi-layered structure", *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 12, pp. 1669-1673, 2010.

[26] Wyser, Y. Pelletier, C. Lange, J. "Predicting and determining the bending stiffness of thin films and laminates", *Packaging Technology and Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 97-108, 2001.

[1] Bórvik, T. Langseth, M. Hopperstad, O. Malo, K., "Ballistic penetration of steel plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 855-886, 1999.

[2] Gupta, N. Madhu, V., "Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates", *International journal of impact engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 333-343, 1992.

[3] Littlefield, D. L. Anderson Jr, C. E. Partom, Y. Bless, S. J., "The penetration of steel targets finite in radial extent", *International journal of impact engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 49-62, 1997.

[4] Sorensen, B. Kimsey, K. Silsby, G. Scheffler, D. Sherrick, T. De Rosset, W., "High velocity penetration of steel targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 107-119, 1991.

[5] Tasdemirci, A. Hall, I. "Numerical and experimental studies of damage generation in multi-layer composite materials at high strain rates", *International journal of impact engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 189-204, 2007.

[6] Gupta, Y. Ding, J. "Impact load spreading in layered materials and structures: concept and quantitative measure", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 277-291, 2002.

[7] Gooch, W. A., Chen, B. Burkins, M. Palicka, R. Rubin, J. J. Ravichandran, R., "Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique, in Proceeding of", *Trans Tech Publ*, pp. 614-621.

[8] López-Puente, J. Arias, A. Zaera, R. Navarro, C., "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, No. 1, pp. 321-336, 2005.

[9] Roeder, B. Sun, C., "Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modeling", *International journal of impact engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 169-185, 2001.

[10] Zuoguang, Z. Mingchao, W. Shuncheng, S. Min, L. Zhijie, S., "Influence of panel/back thickness on impact damage behavior of alumina/aluminum armors", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 30, No. 4, pp. 875-887, 2010.

[11] R. Mines, A one-dimensional stress wave analysis of a lightweight composite armour, *Composite structures*, Vol. 64, No. 1, pp. 55-62, 2004.

[12] Gama, B., "Study of through-thickness wave propagation in multi-layer hybrid lightweight armor", in *Proceeding of*, 1998.

[13] D. Hui, P. K. Dutta, A new concept of shock mitigation by impedance-graded materials, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 8, pp. 2181-2184, 2011.

[14] Hallquist, J. O., "LS-DYNA keyword user's manual", Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[15] Zhu, D. Yan, S. Li, B. "Single-grit modeling and simulation of crack initiation and propagation in SiC grinding using maximum undeformed chip thickness", *Computational Materials Science*, Vol. 92, pp. 13-21, 2014.

[16] Takaffoli, M. Papini, M., "Numerical simulation of solid particle impacts on Al6061-T6 Part II: Materials removal mechanisms for impact of multiple angular particles", *Wear*, Vol. 296, No. 1, pp. 648-655, 2012.

[17] Espinosa, H. Dwivedi, S. Zavattieri, P. Yuan, G. "A numerical investigation of penetration in multilayered material/structure systems", *International journal of solids and structures*, Vol. 35, No. 22, pp. 2975-3001, 1998.

[18] Dorogoy, A. Rittel, D. Brill, A., "A study of inclined impact in polymethylmethacrylate plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 3, pp. 285-294, 2010.

[19] Robbins, J. Ding, J. Gupta, Y. "Load spreading and penetration resistance of layered structures—a numerical study", *International journal of impact engineering*, Vol. 30, No. 6, pp. 593-615, 2004.