

## بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه‌های سرمخروطی در اهداف فلز کامپوزیت

محمدباقر چپردار\*  
خداداد واحدی

کارشناس ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده فنی مهندسی مکانیک  
دانشیار، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده فنی مهندسی مکانیک

### چکیده

این مقاله به بررسی تحلیلی و عددی نفوذ پرتابه‌های مخروطی در اهداف فلز-کامپوزیت می‌پردازد و هدف از آن، به دست آوردن یک تئوری تحلیلی مناسب برای بیان نفوذ پرتابه‌های سرمخروطی با سرعتی بالاتر از حدبالستیک، در اهداف فلز-کامپوزیت می‌باشد. از آنجاییکه سرعت برخورد پرتابه در این تحلیل چند برابر حدبالستیک هدف فلز-کامپوزیتی می‌باشد، فقط سرعت خروجی پرتابه قابل محاسبه است. تئوری تحلیلی مذکور از کوپل نمودن فرمول تحلیلی پال و زید برای بخش فلزی و فرمول تحلیلی ون، برای قسمت کامپوزیتی حاصل گردیده است. برای صحت‌گذاری بر نتایج حاصل از این تحلیل، نتایج حاصل با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند و همچنین از حل عددی نیز بهره گرفته شده است که برای شبیه‌سازی بخش فلزی از مدل ماده‌ی جانسون-کوک اصلاحی و برای مدل نمودن قسمت کامپوزیتی در نرم‌افزار، از مدل ماده‌ی کامپوزیت استفاده گردیده است.

واژه‌های کلیدی: پرتابه‌های سرمخروطی، تئوری تحلیلی-تلفیقی، اهداف فلز-کامپوزیت، تئوری تحلیلی پال و زید و ون، نرم‌افزار LS.DAYNA

## Analytical and Numerical Investigation Penetration of Conical Projectile into FML Targets

M. B. Chaparda

M.Sc. Student, Imam Hossein Comprehensive University, School and Technical Institute

Kh. Vahedi

Associate professor, Imam Hossein Comprehensive University, School and Technical Institute

### Abstract

In this paper, developing a new analytical model for expressing the penetration of conical projectiles into fiber metal laminates is presented. For this purpose, the Paul&Zaid theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity of projectile after perforation of metal and Wen theory i.e. an analytical model for calculating the residual velocity and ballistic limit of laminate of composite in impact, are combined. Then the results of this new analytical model is compared with numerical results and a good correlation has been observed, comparing the analytical model presented in this paper to the numerical results.

**Keywords:** FML, Penetration, Paul&Zaid and Wen theory, Conical projectile, LSDyna.

## ۱- مقدمه

موضوع نفوذ در مواد و اهداف فلز-کامپوزیت از موضوعات مهمی است که بخشی از پژوهش‌های محققین را به خود اختصاص داده است و این تحقیقات مبین این مهم است که در اغلب اوقات اهداف فلز-کامپوزیت که متشکل از صفحات فلزی و چندلایه‌های کامپوزیتی می‌باشند، می‌توانند انرژی بیشتری را تحمل نموده که این مهم سبب افزایش سرعت حدبالستیک این مواد نسبت به هر یک از صفحات فلزی یا کامپوزیتی می‌گردد.

بسیاری از چندلایه‌های کامپوزیتی در مقایسه با فلزهای انعطاف‌پذیر، ترد و شکننده هستند و مقاومت برشی نسبتاً کمی را تحمل می‌نمایند که این امر باعث تورق آن‌ها تحت برخورد و حتی ضربه‌های نه چندان قوی می‌گردد. فرایند تورق امری کاملاً مطلوب در برخورد می‌باشد چرا که باعث تغییر شکل بهینه در شرایط فوق می‌گردد. تورق همچنین منجر به کاهش سختی خمشی گردیده و اجازه می‌دهد که تغییر شکل عرضی بزرگ‌تری در مناطق دورتر نسبت به محل ضربه رخ دهد. در برخوردهای شدید و با سرعت بالا موج‌های تنش سه‌بعدی در طول ضخامت و دیگر جهات از نقطه برخورد انتشار می‌یابند. اگر مدت زمان برخورد بسیار بیشتر از زمان گذرای عبور امواج در طول ضخامت جسم باشد، پاسخ‌های حاصل از این برخورد را با امواج دو بعدی برشی عرضی همسنگ و برابر در نظر می‌گیرند. این امواج عرضی ممکن است قبل از نفوذ پرتابه به مرزهای هدف نرسند اما در برخورد با سرعت‌های کم، عکس این مطلب رخ می‌دهد و این امواج قبل از نفوذ به مرزهای هدف رسیده و باز می‌گردند. ولوت و کرول [۱] بیان داشتند که افزایش انرژی جذب شده در گلرها<sup>۱</sup> که ناشی از افزایش مقاومت کششی فایبرهای<sup>۲</sup> شیشه‌ای در نرخ کرنش بسیار بالاست امری مهم و قابل ارزیابی می‌باشد. ولوت در ارائه نمودن نظر خویش از یک مدل ضربه الاستیک غیرخطی برای محاسبه‌ی تغییر شکل گذرا و نیروی برخورد در سرعت‌های کم بهره برده‌است اما هیچ سخنی از تورق و شکست گلر که ممکن است در این شرایط رخ دهد به میان نیاورده است. وی همچنین تست تجربی برخورد میله‌ی آلومینیومی با چند لایه‌های گلر را در سرعت کم و هم سرعت بالا انجام داده و نشان داده است که چند لایه‌های گلر مقاومت بهتری نسبت به صفحات آلومینیومی دارند. ولوت نتایج تحقیق فوق را برای حدبالستیک، انرژی جذب شده، خیز مرکزی و شعاع مساحت ناحیه تورق بسط داده است. تعدادی تست برخورد با سرعت کم نیز توسط وو [۲] و با استفاده از وزنه سقوطی<sup>۳</sup> انجام گرفته است که در آن ظرفیت انرژی جذب شده و ناحیه‌ی صدمه دیده در گلر ۴ و گلر ۵ معین شده‌اند. کنترل [۳] به مطالعه‌ی عددی

نفوذ در چند لایه‌های گلر روی آورده که تأثیرات اندازه‌ی هدف و اندازه‌ی پرتابه و رفتار نفوذ در منطقه‌ی برخورد را مورد بررسی قرار داده که نتایج قابل قبولی در مقایسه با تست‌های تجربی که توسط خود وی انجام شده، به دست آمده است. گان [۴] نیز به بررسی تجربی و عددی برخورد پرتابه‌ی سرکروی سرعت بالا با اهداف فلز-کامپوزیتی که کامپوزیت آن‌ها از پلی پروپیلن<sup>۴</sup> و فلز آن‌ها پانل‌های<sup>۵</sup> آلومینیومی بوده‌اند پرداخته است؛ وی همچنین کار عددی خود را به وسیله‌ی نرم‌افزار ABAQUS انجام داده است. هوفت [۵] به ارائه‌ی یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی حدبالستیک و انرژی جذب شده در صفحات گلر کاملاً گیردار که در معرض برخورد یک پرتابه سرتخت می‌باشد، پرداخته است. راه حل تحلیلی مد نظر شامل مکانیزم‌های تخریب و جذب انرژی در این مدل ماده می‌باشد. صبوری [۶] به بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه سرتخت در اهداف گلر پرداخته است. نمونه مورد استفاده توسط وی تعدادی گلر ۳ می باشد که لایه‌های کامپوزیتی از جنس ای-گلاس/اپوکسی<sup>۶</sup> و صفحات فلزی تحت برخورد از جنس آلومینیوم می‌باشند وی همچنین بهینه نمودن هدف گلر را در دستور کار خود قرار داده است که برای دست یافتن به این مهم تست‌های تجربی را بر روی انواع لایه چینی‌های مختلف متشکل از لایه‌های آلومینیوم با ضخامت‌های متفاوت انجام داده است.

## ۲- ارائه‌ی مدل تحلیلی-تلفیقی

در این مقاله تلفیق دو تئوری تحلیلی جداگانه مربوط به فلز و کامپوزیت جهت دست یافتن به فرمولی تحلیلی برای بیان نفوذ در اهداف فلز-کامپوزیت و یافتن سرعت خروجی پرتابه پس از نفوذ کامل در این گونه اهداف، مد نظر است. پس از بررسی و مطالعه‌ی تئوری‌های مختلف مربوط به فلز(اعم از تئوری‌های نی شی واکي [۷]، رچ و ایپسون [۸]، تامسون [۹]، لاندکف و گلد اسمیت [۱۰] و پال و زید [۱۱]) و کامپوزیت(تئوری‌های کوکرن و رودریگز [۱۲]، پارگا و لاند [۱۳]، نیک [۱۴] و ون [۱۵]) تئوری تحلیلی پال و زید برای بخش فلزی و تئوری تحلیلی ون برای قسمت کامپوزیتی انتخاب شدند. دلایل مختلفی برای انتخاب این دو تئوری و کوپل نمودن آن‌ها مد نظر است که مهمترین آن سادگی و در عین حال اعتبار بالای این دو تئوری می‌باشد؛ هم چنین پرتابه‌ی مد نظر در هر دوی این تئوری‌ها از نوع پرتابه سرمخروطی است که این امر نیز مزید بر علت شده است.

<sup>4</sup> Polypropylene

<sup>5</sup> Panel

<sup>6</sup> E Glass-Epoxy

<sup>1</sup> GLARE

<sup>2</sup> Fiber

<sup>3</sup> Drop-Weight

در معادله فوق پارامترها بدین شرح می باشند:

$V_r$ : سرعت باقیمانده

$V_s$ : سرعت برخورد

$A$ : حد استحکام الاستیک خطی

$T$ : ضخامت هدف

$\theta$ : زاویه مخروط

$\mu$ : ضریب اصطکاک

$L_n$ : طول دماغه پرتابه مخروطی

$m$ : جرم پرتابه

$B = \beta(\rho_t A)$

$\beta$ : ثابت تجربی

$\rho_t$ : چگالی چندلایه کامپوزیتی

در بیان داشتن این تئوری تلفیقی ممکن است شبهات و ایراداتی مطرح باشد که اهم آنان عبارتند از:

۱- آیا به هم پیوستگی و نزدیکی دو بخش فلزی و کامپوزیتی در سرعت خروجی تأثیرگذار نمی باشد؟ (به بیان دقیق تر آیا نیروی جدایش (debonding) و تأثیر لایه ها بر یکدیگر موجب بروز خطا نمی گردد؟)

۲- آیا پس از خروج پرتابه از صفحه فلزی، پرتابه به همان صورت اولیه و بدون تغییر شکل به بخش کامپوزیتی وارد می شود؟

۳- آیا قبل از نفوذ پرتابه به بخش کامپوزیتی، تغییر شکل ناشی از نفوذ پرتابه در صفحه فلزی موجب تسلیم لایه کامپوزیتی و بروز خطا نمی گردد؟

با فرضیاتی مناسب می توان پاسخ سوالات فوق را بیان نمود.

فرضیات مربوط به تئوری تلفیقی به شرح ذیل است:

۱- انرژی تلف شده مربوط به جدایش لایه ها ناچیز فرض می گردد.

۲- پرتابه صلب و به شکل سرمخروطی است.

۳- قبل از تسلیم بخش کامپوزیتی، با توجه به این که سرعت برخورد بالا بوده (۲ تا ۷ برابر سرعت حدبالستیک) و پرتابه از نوع سرمخروطی است، نفوذ در لایه فلزی کامل رخ داده است و پرتابه شروع به نفوذ در بخش کامپوزیتی می نماید.

۴- سرعت برخورد در حدود چند برابر سرعت حد بالستیک صفحه فلزی می باشد.

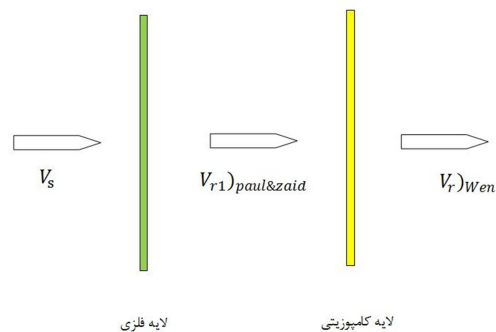
۵- تنها و تنها سرعت خروجی را می توان به وسیله این تئوری به دست آورد.

در ادامه برای صحت سنجی عمل فوق از حل عددی کمک گرفته می شود اما از آنجاییکه خود حل عددی به عنوان ملاک و مرجع قضاوت درباره ی درستی یا عدم درستی تئوری تلفیقی مورد استفاده است، با حل عددی چند نمونه ی تجربی و تحلیلی مربوط به فلز، کامپوزیت و فلز-کامپوزیت و مقایسه ی نتایج

البته شایان ذکر است که سرمخروطی بودن پرتابه بسیار حائز اهمیت است چرا که این امر در سرعت های بالا باعث می گردد که پرتابه سریعاً به داخل لایه های مختلف نفوذ کند بدون این که تأثیر چندانی در لایه بعد از خود ایجاد نماید و این فرض مهم ترین پیش فرض لازم برای صحت گزاردن بر این رویه موجود که همان تلفیق و کوپل نمودن دو تئوری مختلف است، می باشد.

## ۲-۱- مدل تحلیلی-تلفیقی

در شکل ۱ طرحواره جهت توضیح و تبیین این مطلب آورده شده است:



شکل ۱- نمایی طرحواره برای بیان تلفیق تئوری های پال و زید و ون

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می گردد پرتابه ی سرمخروطی ابتدا با سرعت  $V_s$  با صفحه فلزی برخورد کرده و پس از نفوذ کامل سرعت خروجی آن به وسیله تئوری پال و زید (معادله (۱)) محاسبه می گردد؛ حال این سرعت خروجی از فلز، به عنوان سرعت ورودی لایه ی کامپوزیتی در نظر گرفته می شود؛ در این مرحله سرعت خروجی از لایه کامپوزیتی با استفاده از تئوری ون (معادله (۲)) محاسبه می گردد. البته توضیحات فوق تنها برای هدف دو لایه ای متشکل از یک لایه فلزی و یک لایه کامپوزیتی بیان گردیده است که تعمیم این رویه را برای تعداد لایه های بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\Delta V_{total} = \frac{\pi \rho h_0 \alpha^2}{m} V_s \sin(\alpha)$$

$\rho$ : چگالی پرتابه

$h_0$ : ضخامت هدف

$\alpha$ : نیم زاویه مخروط

$m$ : جرم پرتابه

$V_s$ : سرعت برخورد پرتابه با اهداف

$$V_r = V_s - \frac{A}{B} \cdot \ln \left[ \frac{1 + \frac{B}{A V_s}}{1 + \frac{A}{B V_r}} \right] - \frac{\pi B T L_n^2 \tan^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \left[ \mu + \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right]}{m}$$

تنش ون میسز معادل در این مدل ماده به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma_{eq} = [1 - D][A + Br^n][1 + r^*]^C [1 - T^{*m}] \quad (3)$$

که در آن  $D$  متغیر و ضریب صدمه دیدن و  $A, B, C, n$  و  $m$  ثابت‌های ماده انتخابی می‌باشند.  $r$  کرنش پلاستیک جزئی ناشی از صدمه دیدن ماده هدف بوده که برابر است با:

$$r^* = (1 - D)p \quad (4)$$

که در معادله بالا  $p$  کرنش پلاستیک جزئی و  $r^* = \frac{r}{r_0}$  نرخ کرنش بدون بعد و همچنین  $r_0$  نرخ کرنش اولیه و پایه می‌باشد. لازم به ذکر است  $T^*$  برابر است با:

$$T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0) \quad (5)$$

که در آن  $T$  دمای مطلق و  $T_0$  دمای محیط و  $T_m$  دمای ذوب ماده هدف می‌باشد.

ضریب آسیب  $D$  مقادیری بین صفر (بدون آسیب و صدمه) و یک (شکست کلی) را اتخاذ می‌کند. به هر حال مقدار بحرانی آسیب عموماً کوچک‌تر از یک بوده و از این‌روی شکست هنگامیکه رخ می‌دهد که:

$$D = D_c \leq 1 \quad (6)$$

قانون آسیب و صدمه به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$D = \begin{cases} 0 & p < p_d \\ \frac{D_c}{p_f - p_d} p & p \geq p_d \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $D_c$  آسیب بحرانی و  $p$  نرخ کرنش پلاستیک،  $p_d$  آسیب آستانه و  $p_f$  کرنش شکست است که به تنش‌های سه محوری، نرخ کرنش و دما بستگی دارد.

بر اساس فرضیات مربوط به تست‌های تجربی ۹۰ درصد کار پلاستیک تحت شرایط آدیاباتیک به شکل گرما تلف می‌گردد؛ این در حالی است که هرگونه انتقال گرما با محیط در این بررسی نادیده گرفته می‌شود.

برای این که در طول نفوذ رشد ترک‌ها ممکن باشد مدل استفاده شده در این نرم‌افزار با یک الگوریتم تلفیق و جفت می‌گردد تا المان‌های آسیب دیده در مش‌های موجود، هنگامی که متغیر صدمه ( $D$ ) به مقدار بحرانی ( $D_c$ ) رسید، حذف گردند.

چهار تست کشش مختلف جهت مشخص کردن ثابت‌های ماده‌ی مورد استفاده لازم است:

تست کشش شبه استاتیکی برای مشخص کردن ثابت‌های الاستیک  $E$  و  $\nu$  و تنش تسلیم ماده  $A$ ؛

تست کشش بر روی نمونه شیاردار جهت تعیین ثابت‌های کرنش سختی  $n$  و  $B$  و صدمه بحرانی  $D_c$  و ثابت‌های کرنش شکست  $D_1, D_2$  و  $D_3$ ؛

تست کشش دینامیک برای به‌دست آوردن ثابت ویسکوالاستیک  $C$  و ثابت کرنش شکست  $D_4$  و در نهایت؛

حاصل از این حل عددی با نتایج تجربی و تحلیلی، به این ادعا که شبیه‌سازی نفوذ توسط نرم‌افزار LS-Dyna امری مطلوب و نزدیک به واقعیت است، صحت گزارد.

### ۳- حل عددی

نرم‌افزار LS-Dyna با داشتن تقریباً ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۴ نوع معادله‌ی حالت و انواع روش‌های تماس سطوح (contact) این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده‌است که می‌تواند در بسیاری از مسائل انفجار و ضربه مورد استفاده قرار گیرد، اما آنچه که مهمتر از نرم‌افزار مورد استفاده می‌باشد، انتخاب نوع مدل ماده و معادله‌ی حالت مناسب، داشتن اطلاعات مربوط به خواص مواد و پارامترهای مورد نیاز در مدل ماده و معادله‌ی حالت، شرایط اولیه و مرزی، تعریف مناسب سطوح تماس و نوع مش‌بندی است.

نوع روش حل نیز تأثیر بسزایی در نتایج حاصله دارد. روش‌های حل لاگرانژی، اوپلری، کوپل لاگرانژی- اوپلری و SPH را می‌توان بکار برد که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. برای انتخاب روش حل مناسب بایستی با توجه به نوع مساله روش مناسب را انتخاب نمود.

### ۳-۱- شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه سرتخت از جنس Ti-

#### 6Al-4V در هدف فلزی AL 2024 T3

مرجع این شبیه‌سازی عددی، کار تجربی هوفت است. در این کار تجربی هدف به دست آوردن حدبالستیک برای چهار ضخامت متفاوت ۰/۴ و ۱/۶ و ۳/۲ و ۶/۴ میلی‌متر می‌باشد.

به صراحت می‌توان گفت که به منظور به دست‌آوردن نتایج مطلوب، انتخاب مواد تحت بارگذاری ضربه‌ای اهمیت بسیاری دارد. در نرم‌افزار موجود انواع مختلفی از این نوع رفتار مواد وجود دارد. حساس‌ترین بخش مسئله انتخاب دقیق ثوابت مربوط به هر یک از مدل‌های ماده می‌باشد؛ صراحتاً می‌توان گفت که اصلی‌ترین بخش حل عددی انتخاب مدل متناسب با ماده مد نظر انتخابی و اختصاص دقیق ثابت‌های مربوط به آن است. در شبیه‌سازی صورت گرفته رفتار ماده پرتابه مطابق با مدل ماده‌ی صلب (مدل ماده شماره ۲۰) و برای هدف فلزی مدل ماده‌ی جانسون-کوک اصلاح شده (مدل ماده شماره‌ی ۱۰۷) انتخاب گردیده‌اند.

برای مدل کردن هدف فلزی از ماده‌های استاندارد مختلفی استفاده می‌گردد؛ البته با توجه به سرعت برخورد پرتابه به هدف، این مدل‌ها می‌توانند متفاوت انتخاب شوند اما در سرعت‌های بالا و نرخ کرنش بسیار زیاد این مدل ماده بسیار خوب و مناسب می‌باشد.

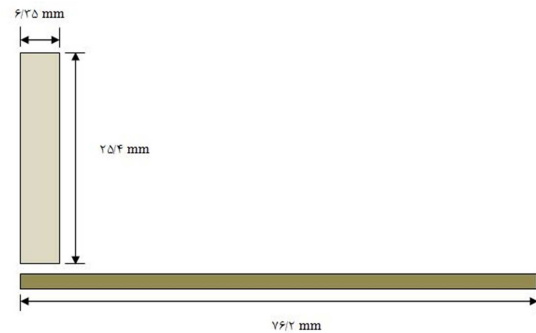
جدول ۱- ضرایب مورد نیاز پرتابه و هدف [۱۱-۱۲]

مشخصات پرتابه	
$\rho = 4430 \text{ kg/m}^3$	چگالی
$E = 113.8 \text{ GPa}$	مدول یانگ
$\nu = 0.342$	نسبت پواسون
مشخصات هدف	
ضرایب الاستیک و چگالی	
$E = 72 \text{ GPa}$	
$\nu = 0.3$	
$\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$	
تنش تسلیم و کرنش سختی	
$A = 369 \text{ MPa}$	
$B = 684 \text{ MPa}$	
$n = 0.73$	
نرخ کرنش سختی	
$p_0 \text{ و } r_0 = 0.00011/\text{s}$	
$C = 0.0083$	
ضرایب آسیب	
$D_c = 0.9$	
$P_d = 0$	
دما و ضرایب انتقال گرما	
$C_p = 875 \text{ J/Kg K}$	
$\alpha = 0.9$	
$\bar{\alpha} = 0.00023$	
$T_m = 775 \text{ K}$	
$T_0 = 293 \text{ K}$	
$m = 1.7$	
ضرایب کرنش شکست	
$D_1 = 0.13$	
$D_2 = 0.13$	
$D_3 = -1.5$	
$D_4 = 0.11$	
$D_5 = 0$	

لازم به ذکر است که برای دستیابی به سرعت حدبالستیک در حل عددی، با تغییر سرعت برخورد و به دست آوردن سرعت باقیمانده پرتابه پس از برخورد پرتابه با هدف، بیشترین سرعت برخوردی که منجر به ایست کامل پرتابه شود و یا به بیانی صریح تر، بیشترین سرعت برخوردی که سرعت باقیمانده متناظر با آن صفر می گردد، به عنوان سرعت حدبالستیک منظور می شود.

تست کشش در دمای بالا که ثابت تأثیر گرما بر منحنی تنش-کرنش  $m$  و ثابت کرنش شکست  $D_5$  را می دهد.

در ادامه نیز ابعاد پرتابه و هدف مورد استفاده در این تست تجربی آورده شده است. همچنین از آنجایی که این مسئله متقارن می باشد تنها یک چهارم آن شبیه سازی می گردد.



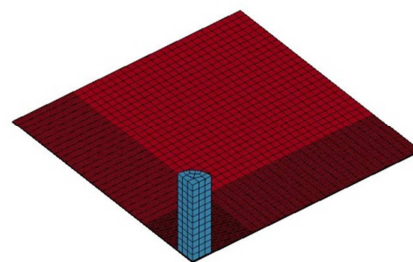
شکل ۲- ابعاد پرتابه و هدف

خواص و ضرایب مورد استفاده برای معرفی پرتابه و هدف در نرم افزار LS-Dyna در جداول ذیل آورده شده اند:

حال با دانستن نوع مدل ماده برای هدف و پرتابه و داشتن ضرایب مورد نیاز براع تعریف آن ها در نرم افزار، براحتی شبیه سازی انجام می گیرد.

در شکل ۳ پرتابه و هدف با ضخامت ۰/۴ میلی متر را پس از مش بندی و اعمال شرایط مرزی که شامل تقارن و گیردار بودن مرز هدف می باشد، به نمایش گذاشته شده است.

پس از مدل نمودن مسئله ی مطروحه، نوبت به حل و بیان داشتن نتایج حاصل از آن می رسد. در جدول ۲ نتایج حاصل از حل عددی و کار تجربی مقایسه گردیده اند که همان گونه که ملاحظه می شود درصد خطا ناچیز می باشد.



شکل ۳- پرتابه و هدف پس از مش بندی

جدول ۲- مقایسه‌ی نتایج تجربی هوفت با نتایج عددی

خطا هدف	حدبالستیک تجربی (%)	حدبالستیک شبیه‌سازی (m/s)	ضخامت هدف (mm)
۰,۴	۶۸,۵	۶۳	۱,۶
۱,۶	۱۳۱	۱۴۲	۳,۲
۷,۲	۱۹۴	۱۸۰	۶,۴
۷,۹	۲۱۵	۲۳۲	

جدول ۳- خواص و ضرایب مورد نیاز [E glass/epoxy]

مقدار	واحد	نماد	خواص
۱۸۲۳	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	چگالی
۳۶	GPa	$E_{11}$	مدول کششی در جهت ۱
۷,۶	GPa	$E_{22}$	مدول کششی در جهت ۲
۷,۶	GPa	$E_{33}$	مدول کششی در جهت ۳
۰,۲۵	-	$\nu_{21}$	نسبت پواسون ۱۲
۰,۲۵	-	$\nu_{31}$	نسبت پواسون ۳۱
۰,۳۰۱	-	$\nu_{32}$	نسبت پواسون ۳۲
۲,۶	GPa	$G_{12}$	مدول برشی ۱۲
۲,۸۶	GPa	$G_{23}$	مدول برشی ۲۳
۲,۷	GPa	$G_{13}$	مدول برشی ۱۳
۵۵۴	MPa	$X_t$	استحکام کششی طولی
۱۵,۴	MPa	$Y_t$	استحکام کششی عرضی
۱۵,۴	GPa	$Y_c$	استحکام فشاری عرضی
۱۶,۶	MPa	$S$	استحکام برشی درون صفحه‌ای
۰,۰۱۵۴	-	$\epsilon_f$	کرنش کششی نهایی
۰,۱۴۶	-	$\gamma_f$	کرنش برشی نهایی
۵,۶۳۱	GPa	$K$	مدول بالک

### ۳-۲- شبیه‌سازی عددی نفوذ پرتابه سرتخت از جنس فولاد در هدف فلز- کامپوزیت

در این قسمت به مدل‌سازی عددی یک هدف ترکیبی که متشکل از لایه‌های فلز AL 2024 T3 و لایه‌های کامپوزیتی E glass/epoxy می‌باشند، مد نظر است. لازم به ذکر است که لایه چینی هدف به صورت [Al/0/90/Al] بوده و نتایج حاصل از این کار عددی با کار تجربی صیوری [۶] که در آن یافتن حدبالستیک مدنظر است، مقایسه شده است. بخش فلزی این هدف به وسیله‌ی مدل ماده‌ی ۱۰۷ (مدل ماده Modified Johnson-Cook) و قسمت کامپوزیتی آن توسط مدل ماده‌ی شماره‌ی ۲۲ (مدل ماده Composite Damage) و پرتابه نیز با مدل ماده شماره‌ی ۲۰ (مدل ماده Rigid) در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده‌اند. باز هم از آنجایی که این شبیه‌سازی کاملاً متقارن است تنها یک چهارم آن در دستور کار قرار گرفته است. ابعاد پرتابه و قسمت‌های مختلف هدف در شکل ۴ آورده شده‌اند.

جدول ۴- ضرایب پرتابه‌ی فولادی [V]

مقدار	واحد	نماد	خواص
۷۸۰۰	kg/m <sup>3</sup>	$\rho$	چگالی
۲۱۰	GPa	$E$	مدول یانگ
۰,۳	-----	$\nu$	نسبت پواسون

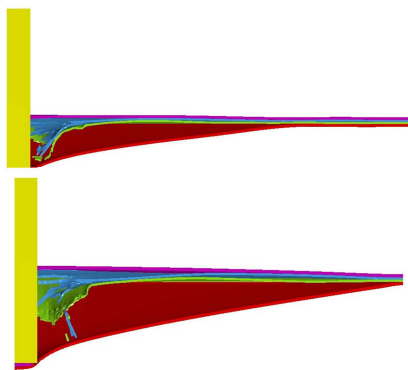
با در اختیار داشتن ضرایب فوق می‌توان شبیه‌سازی را انجام داده و نتیجه‌ی حاصل از حل عددی را با نتیجه‌ی کار تجربی مقایسه نمود.

در شکل ۵ تغییرات برای برخورد پرتابه‌ی سرتخت با سرعت حدبالستیک به هدف فلز-کامپوزیتی در گام‌های زمانی متوالی قابل مشاهده است.

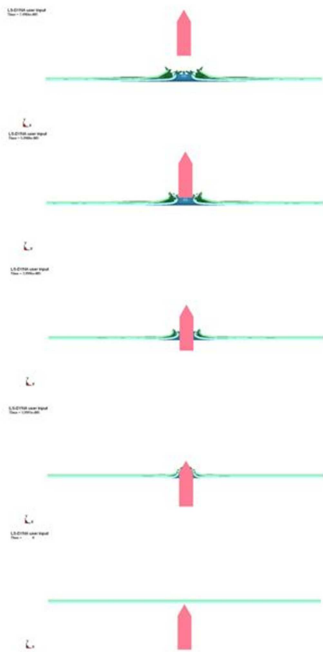


شکل ۴- ابعاد پرتابه و هدف و لایه چینی مد نظر برای هدف ترکیبی

ضخامت صفحه‌ی فلزی ۰,۵ و چند لایه‌های کامپوزیتی ۰,۳۵ میلی‌متر است. ضرایب مورد نیاز برای فلز AL 2024 T3 در بخش قبل آورده شد و در اینجا فقط به ضرایب مورد نیاز کامپوزیت E glass/epoxy و پرتابه فولادی اشاره خواهد شد.



شکل ۵- تغییرات بوجود آمده در هدف فلز-کامپوزیت در برخورد پرتابه‌ی سرتخت با سرعت حد بالستیک



شکل ۷- نحوه نفوذ پرتابه‌ی سرمخروطی در هدف دولایه‌ای

در ادامه نیز نتایج مربوط به ضخامت‌های ۵-۵ و ۱۰-۱۰ میلی‌متر آورده شده است.

جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و عددی برای ضخامت ۵-۵ میلی‌متر

خطا (%)	سرعت باقیمانده عددی (m/s)	سرعت باقیمانده تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)
۵۹٫۷	۱۲۰٫۸	۱۹۳٫۰۲	۲۵۰
۹٫۵	۴۰۱٫۶	۴۳۹٫۹	۵۰۰
۱٫۲	۶۲۷٫۸	۶۸۱٫۴	۷۵۰
۱٫۰۴	۹۳۱٫۵	۹۲۱٫۷	۱۰۰۰

جدول ۷- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و عددی برای ضخامت ۱۰-۱۰ میلی‌متر

خطا (%)	سرعت باقیمانده عددی (m/s)	سرعت باقیمانده تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)
۳۳٫۹	۲۸۲٫۴	۳۷۸٫۴	۵۰۰
۳٫۸	۵۸۹٫۵	۶۱۲٫۱	۷۵۰
۱٫۲	۸۶۱٫۷	۸۴۳	۱۰۰۰
۳٫۹	۱۱۱۶٫۸	۱۰۲۷٫۸	۱۲۵۰

### ۳-۴- مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

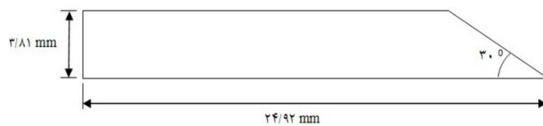
در این قسمت از مقاله به بررسی انواعی از ترکیب‌های هدف فلز کامپوزیتی که به صورت چند لایه‌ای بوده و حاصل از بسط تئوری فوق برای اهداف چند لایه می باشند، پرداخته شده است

حدبالستیک برابر با  $۸۲\text{m/s}$  می‌باشد که این عدد برای حل تجربی صوری برابر با  $۸۹\text{m/s}$  است که این یعنی خطای حاصل برابر با  $۷٫۸\%$  درصد است. در پایان این بخش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نرم‌افزار **LSDyna** به عنوان سنجش تئوری تلفیقی می‌تواند امری مطلوب و نزدیک به واقعیت باشد.

لازم بذکر است در حل عددی مورد بررسی در این مقاله شکل پرتابه مورد توجه نمی باشد چرا که تنها یافتن مدل ماده مناسب و تخصیص ضرایب صحیح به آن، مهم و قابل توجه است و با توجه به نتایج فوق ملاحظه می گردد که این مهم به خوبی صورت گرفته است.

### ۳-۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از تئوری تلفیقی با حل عددی

در این قسمت از مقاله به بررسی ترکیب هدف فلز-کامپوزیتی که به صورت **AL 2024 T3/E glass epoxy** می‌باشد پرداخته و نتایج حاصل از تئوری تلفیقی با نتایج حاصل از نرم‌افزار مقایسه خواهند شد. همان طور که در قبل نیز ملاحظه گردید نوع مدل ماده و ضرایب صحیح مربوط به آن ها بیان شده اند و مورد توجه است که پرتابه‌ی مورد استفاده در تئوری تلفیقی سرمخروطی بوده که ابعاد آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- ابعاد پرتابه‌ی سرمخروطی

ترکیب‌های مختلف مد نظر برای این هدف دو لایه‌ای ضخامت‌های ۱-۱، ۵-۵ و ۱۰-۱۰ میلی‌متر در نظر است که نتایج حاصل برای سرعت‌های برخورد مختلف به صورت جدول آورده خواهد شد. همچنین برای نشان دادن نحوه نفوذ پرتابه در هدف دولایه‌ای، تصویر برش خورده‌ی نفوذ این پرتابه در زمان‌های مختلف برای ضخامت ۱-۱ میلی‌متر و با سرعت پرتابه‌ی ۵۰۰ متر بر ثانیه آورده شده است (شکل ۷).

جدول ۵- مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و عددی برای ضخامت ۱-۱ میلی‌متر

خطا (%)	سرعت باقیمانده عددی (m/s)	سرعت باقیمانده تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)
۱۲٫۳	۹۹٫۹	۱۱۲٫۳	۱۲۵
۱٫۲	۲۳۶٫۱	۲۳۸٫۹	۲۵۰
۰٫۳	۴۸۶٫۶	۴۸۸٫۰۶	۵۰۰
۰٫۳۲	۷۳۸٫۷	۷۳۶٫۳۳	۷۵۰
۰٫۱۲	۹۸۳٫۲	۹۸۴٫۳۸	۱۰۰۰

و نتایج حاصل از تئوری تلفیقی با نتایج تجربی دادرند [۱۶] مقایسه شده اند.

فلز مورد استفاده از جنس AL 2024 T3 با ضخامت‌های متفاوت ۰/۵۰۸ میلی متر (۰/۲۰ اینچ) و ۰/۸۱۲۸ میلی متر (۰/۳۲ اینچ) و کامپوزیت مد نظر برای هدف ترکیبی از جنس کولار می‌باشند که انواع ترکیب‌های مد نظر در جدول نتایج آورده شده اند.

هم چنین پرتابه مورد بررسی در این مطالعه نیز همان پرتابه مربوط به حل عددی (شکل ۶) می باشد.

#### جدول ۸- مقایسه نتایج سرعت خروجی حاصل از تئوری تلفیقی و

تست تجربی

خطا (%)	سرعت خروجی تجربی (m/s)	سرعت خروجی تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)	ترکیب ۲ ضخامت کل هدف ۳ میلی‌متر
۱،۵۹	۲۳۶،۷۵	۲۴۰،۵۲	۲۵۳،۱۷	۲۰/۱۶K/AL۲۰
۰،۴۲	۲۳۸،۵۷	۲۳۹،۵۶	۲۵۲،۲۱	AL

خطا (%)	سرعت خروجی تجربی (m/s)	سرعت خروجی تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)	ترکیب ۳ ضخامت کل هدف ۳ میلی‌متر
۳،۳	۲۴۵،۸۹	۲۵۴،۰۴	۲۶۵،۲۲	۶K/AL۲۰
۳،۳	۲۳۸،۵۷	۲۴۶،۴۷	۲۵۷،۱۴	۶k/AL۲۰/AL۲۰

خطا (%)	سرعت خروجی تجربی (m/s)	سرعت خروجی تحلیلی (m/s)	سرعت برخورد (m/s)	ترکیب ۱ ضخامت کل هدف ۳ میلی متر
۴،۴۹	۲۲۹،۳	۲۳۹،۶۰۷۹	۲۵۰،۶	۳۲/۱۰K/AL۳۲
۵،۱۵	۲۲۵،۸	۲۳۷،۴۴۲۳	۲۸۴،۲	*AL

\*AL۳۲ بدان معناست که آلومینیوم ۰/۳۲ اینچ و ۱۰k بدان معناست که از ۱۰ لایه کولار استفاده شده است.

همان طور که در جداول فوق مشاهده می‌گردد خطای موجود بین نتایج تجربی و نتایج تئوری تلفیقی بسیار ناچیز می‌باشد که این امر نشان از اعتبار بسیار بالای تئوری تلفیقی پیشنهادی در این مقاله می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

یک مدل تحلیلی، از تلفیق تئوری پال و زید برای صفحه‌ی فلزی و تئوری ون برای چند لایه کامپوزیتی ارائه گردیده است که سرعت خروجی پرتابه سرمخروطی را پس از نفوذ کامل به دست می‌آورد و نتایج حاصل از آن، با حل عددی و تجربی مقایسه شده اند. بیان چند مسئله‌ی تجربی و حل عددی آن‌ها در این مقاله، حاکی از این امر است که با رعایت نکات مهمی از قبیل انتخاب مدل ماده مناسب و ...، حل عددی مرجعی مناسب جهت صحت سنجی نتایج بوده و نتایج حاصل از آن خطای ناچیزی نسبت به تست های تجربی را دارا می باشد. نتایج حاصل اذعان می دارند که تئوری تحلیلی- تلفیقی برای سرعت‌های بالاتر از حدبالستیک اعتبار بالایی داشته که دلیل اصلی این امر استفاده از تئوری پال و زید می باشد چرا که این تئوری برای محدوده‌ی سرعت‌های بیشتر از حدبالستیک نتایج مطلوبی را در بردارد. در ادامه نیز به مقایسه نتایج حاصل از این تئوری با نتایج تست های تجربی متعدد پرداخته شده است که در این مقایسه نیز درصد خطا بسیار پایین بوده و این امر دلیلی متقن بر کارآمد بودن تئوری تحلیلی- تلفیقی ارائه شده، است.

همچنین با توجه به ارائه ی این روش بدیع و نو در تلفیق تئوری های مختلف جهت بیان داشتن نفوذ پرتابه ها در اهداف ترکیبی، می توان این رویه را برای دیگر اهداف ترکیبی مانند سرامیک فلز و سرامیک کامپوزیت پیشنهاد نمود. شایان ذکر است که یکی دیگر از دستاوردهای مهم این مقاله به دست آوردن ضرایب صحیح برای حل عددی در نرم افزار LSDyna می باشد که مرجعی مناسب برای دیگر محققین در این امر است.

#### مراجع

- [1] Vlot A., Krull M., "Impact Damage Resistance of Various Fiber Metal Laminates, J.Phys IV., pp. 1045-1050, 1997.
- [2] Wu G., Yang J. M., Halm H., " The impact properties and damage tolerance and bi-directionally reinforced fiber metal laminates " , J. of Mater. Sci., 42(3), pp. 448-957, 2007.
- [3] Abdullah M. R., Cantwell W.J., "The impact resistae of polypropylene-based fibre-metal laminates", Composites Sci. and Tech., 66, pp.1682-1693, 2006.
- [4] Guan Z. W., Cantwell W. J., "Numerical Modeling of the Impact Response of Fiber-Metal Laminates", Polymer Composites, 30, pp. 603-611, 2009.
- [5] HooFatt M. S., Lin C., Revilock D. M., Hopkins D.A., "Ballistic Impact of GLAREe Fiber-Metal Laminates", Composite Structures, 61, pp.73-88, 2003.



- [6] Sabouri H., Liaghat G. H., Ahmadi H., "Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets", The 2nd International Conference on Composites, 2010.
- [7] Nishiwaki N. P., "The Penetration Into Thin Metal Plate", Int. J. Impact Engng.4, pp. 25-39, 1986.
- [8] Retch R.F. and Ipson, T.W., "Ballistic Perforation Dynamics", J. Appl. Mech.30, pp. 885-991, 1963.
- [9] Thomson W. T., "An Approximate Theory of Armour Penetration", J. Appl. Phys. 26, pp. 80-82, 1955.
- [10] Landkof and Goldsmith, "Petalling of Thin Metallic Plates During Penetration by Cylindro-Conical Projectiles", Int. J. Solids Structures. 21, pp. 245-266, 1985.
- [11] Paul, B.; Zaid, M. "Normal Perforation of a Thin Plate by Truncated Conical Projectiles", J. Franklin Inst., 265, 317-336, 1958.
- [12] Chocron B., Rodriguez J. and Shchez Galvez V., "A Simple Analytical Model for Ballistic Impact in Composite", Colloque C3, Supplement au de physique I11 d'aoiit 1997.
- [13] Praga-Landa B., Hernandez-Olivarez F., "An Analytical Model to Predict Impact Behaviour of Soft Armours", Int.J.Impact Engng., 16, pp. 455-466, 1995.
- [14] Naik N. K., Shirao P., "Composite structures under ballistic impact", Composite structures, 66, pp. 579-590, 2004.
- [15] Wen H.M., He T., Qin Y., "Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Transversely by Conical-Nosed Projectiles", Composite structure, 81, pp. 243-252, 2007.
- [۱۶] دادرند قاسم، "بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه در اهداف چند لایه فلز کامپوزیت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین (ع)، ۱۳۹۱.