

تحلیل عددی ضربه سرعت پایین اهداف سرامیکی - فلزی - کامپوزیتی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

مهدی حسینی^{۱*}، سجاد اسمعیلی^۲، مهدی عسکری سده^۳^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

* m.hosseini27@gmail.com

چکیده:

در مقاله حاضر، مسئله ضربه سرعت پایین صفحه‌های از جنس پیکربندی‌های مختلف سرامیکی، آلومینیومی، فولادی و کامپوزیتی (اس-گلس پلی‌استر) به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس تحلیل می‌گردد. پرتابه به صورت یک جسم صلب با سر نیم کروی فرض می‌شود. هم‌چنین به منظور مدل‌سازی رفتار لایه‌های سرامیکی از مدل رفتاری جانسون هولمکوئیست و برای لایه‌های آلومینیومی و فولادی از مدل رفتاری جانسون کوک و برای لایه کامپوزیت نیز از مدل هاشین سه‌بعدی استفاده می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین برای هدف کامپوزیتی، مقایسه با پژوهش‌های پیشین و اطمینان از صحت نتایج، به شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین برای اهداف فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی با پیکربندی‌های مختلف پرداخته می‌شود. نتایج حاکی از آن است که صفحه هدف با پیکربندی سرامیک - فولاد - کامپوزیت بیش‌ترین استحکام را در برابر ضربه دارد و میزان نفوذ پرتابه در این حالت کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۶ دی ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۷ تیر ۱۴۰۰

صفحه ۱۰۵ تا صفحه ۱۱۸

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۳۰۰۳-۲۷۸۳

کلیدواژه:

تحلیل عددی، ضربه سرعت پایین،
اهداف سرامیکی - فلزی -
کامپوزیتی.

20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2

:DOR کد

۱- مقدمه

کامپوزیت و کاربران نهایی بسیار مهم است. دانش زیادی در مورد پاسخ دینامیکی ضربه روی مواد و ساختارهای کامپوزیت منتشر شده است. با این حال، با وجود مواد و فرآیندهای مداوم در حال ظهور، فقدان روابط سیستماتیک

با استفاده روزافزون از کامپوزیت‌ها در صنایع نظامی، وسایل نقلیه هوایی و سازه‌های دریایی، کالاهای ورزشی و صنعت برق، درک مکانیسم ضربه و رفتار دینامیک برای طراحان



ساختار و سازگاری منظم وجود دارد که راهنمایی‌هایی در مورد پاسخ برخورد دینامیکی کامپوزیت‌ها ارائه می‌دهد. مطالعات متعدد به طور تجربی تغییر شکل صفحه کامپوزیت را به دلیل بارگذاری ضربه برای ضخامت‌های مختلف صفحه، جهت‌گیری لایه‌ها، شرایط مرزی، سرعت ضربه و غیره مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل‌های عددی متنوعی وجود دارد که در ادبیات برای پیش‌بینی شروع/ تکامل آسیب در کامپوزیت‌های تحت بارگذاری ضربه‌ای به کار می‌روند (به عنوان مثال سانتوس [۱]، ریکسیو [۲]، دواسکانسلوس [۳]، ملک‌زاده فرد [۴] و فنگ [۵]).

پاسخ ضربه مواد به طور کلی به رژیم‌های سرعت پایین، متوسط، زیاد یا بالستیک و بیش از حد (HVI) طبقه‌بندی می‌شود (گاور و همکاران [۶]، نیشیکاوا و همکاران [۷]). ضربه سرعت پایین (LVI)، همچنین به عنوان برخورد جرم زیاد شناخته می‌شود که از شرایط ناشی از افتادن ابزار در حین عملیات نگهداری حاصل می‌شود (اولون [۸] و پالازوتو [۹]). کامپوزیت‌های ماتریس پلیمر مستعد آسیب داخلی هستند که ناشی از LVI است (ساترلند و گودس [۱۱ و ۱۰]). آسیب LVI می‌تواند به شدت تنش پسماند و طول عمر یک سازه کامپوزیت را کاهش دهد حتی اگر آسیب به سختی قابل مشاهده باشد (مورا [۱۲]). توانایی پیش‌بینی میزان آسیب و فشردگی پس از ضربه به یک ساختار کامپوزیت به طور بالقوه می‌تواند منجر به کاوش در فضای طراحی بزرگ‌تر شود بدون اینکه جریمه‌های قابل توجهی در زمان و هزینه ایجاد کند (وی تان [۱۳]، سینگ [۱۴]). برخی از تحقیقات در مورد این موضوع انجام شده است (به عنوان مثال جونز [۱۵]، باربرو [۱۶، ۱۷] و هاشین [۱۸]). مطالعات مربوط به

آسیب ضربه به کامپوزیت‌ها بر دینامیک ضربه، مکانیک آسیب، خصوصیات پسماند پس از ضربه و مقاومت در برابر آسیب متمرکز شده است (آره [۱۹] و آریاس [۲۰]). توالی واماندگی تأثیر عمده‌ای در آسیب ضربه ایجاد شده در لمینت‌های کامپوزیت دارد (اولسون [۲۱]).

توانایی پیش‌بینی دقیق رفتار مواد کامپوزیتی که در معرض ضربه قرار دارند، نیاز به استفاده از مدل‌های مادی دارد که بیانگر مکانیسم‌های مختلف فیزیکی هستند (ریچاردسون [۲۲] و شرور [۲۳]). مشخص است که در این حالت بارگذاری، حالت‌های شکست مختلف در مواد کامپوزیت وجود دارد، از جمله واماندگی فشاری و کششی الیاف، واماندگی فشاری و کششی ماتریس، لایه‌لایه شدن و سایر موارد (هیتچن و کمپ [۲۴]). محققان متعددی مدل‌هایی را ارائه داده‌اند که سعی در ضبط این مکانیسم‌ها دارند (به عنوان مثال یامادا-سان [۲۵]، هارت اسمیت [۲۶]، هاشین [۱۸] و پاک [۲۷]). مدلی که برای یک مسئله، واقع بینانه در بهترین حالت کار خواهد کرد بستگی به تعدادی از عوامل از جمله مدل رفتار ماده، بارگذاری ساختاری، سرعت ضربه و شرایط مرزی دارد. بنابراین، امکان استفاده از کاربردی‌ترین مدل آسیب و خرابی برای مسئله مورد نظر برای یک تحلیلگر سودمند است (سینگ [۱۴]، جردن [۲۸] و کاپوتو [۲۹]). حالت‌های خرابی بستگی به شرایط بارگیری دارد.

با LVI می‌توان به عنوان یک رویداد شبه استاتیک برخورد کرد که حد بالایی آن بسته به سفتی هدف، خاصیت مواد و جرم و سختی ضربه زننده می‌تواند از یک تا ده‌ها متر در ثانیه متغیر باشد (اندرسون و موریس [۳۰]). هنگامی که سرعت ضربه زیر ۵ متر در ثانیه باشد، نوع پاسخ به جای



۲- مدل‌های آسیب مواد:

در برخوردهای بالستیک دو جسم، فشارهای بسیار بالایی در اطراف سطح برخورد، طی یک زمان بسیار کوتاه ایجاد می‌شود. این شرایط باعث تولید موج‌های مکانیکی می‌شود. در این مدت زمان کوتاه ماده ممکن است دچار تغییرات فیزیکی مثل ذوب یا تبخیر و همچنین تغییرات مکانیکی که هر دو به کاهش استحکام، شکستگی محلی و خردشدگی کلی می‌انجامد شود. در پژوهش حاضر اغلب مواد مرسوم مثل آلومینیوم [۳۵، ۳۶]، سرامیک (سیلیکون کربید [۳۷، ۳۸]) و کامپوزیت (کربن فایبر/ اپوکسی [۳۹]) را به عنوان جنس صفحه استفاده می‌کند این در حالی است که پرتابه صلب در نظر گرفته شده است. رفتار اساسی فلز توسط پلاستیسته جانسون کوک [۴۰] و معادله حالت می-گرونینز [۴۱] پیش‌بینی می‌شود و هم چنین مدل جانسون هلمکوئیست (Johnson-Holmquist model) [۴۲] برای مطالعه رفتار سرامیک استفاده می‌شود.

۲-۱- مدل رفتاری جانسون کوک

زمانیکه سرعت تغییر شکل یا نرخ کرنش قطعه قابل توجه باشد، تنش اعمالی علاوه بر اینکه به مقدار کرنش بستگی دارد به نرخ کرنش نیز وابسته است. در مواقعی که دمای تغییر شکل نیز در قطعه هم زمان با سرعت تغییر شکل تغییر نماید، تنش لازم برای اعمال یک مقدار مشخص کرنش، وابسته به دمای قطعه و نرخ کرنش خواهد بود. مدل جانسون کوک، رفتار مواد را تحت کرنش‌های بزرگ، نرخ کرنش و دماهای بالا بیان می‌کند، بنابراین برای شبیه‌سازی مسائلی که در آن‌ها تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد، مانند مسائل برخورد و انفجار و بسیار مناسب است.

سرعت ضربه زننده توسط نسبت جرم ضربه زننده به صفحه کنترل می‌شود (اندرسون [۳۱]). در LVI، پاسخ ساختاری دینامیکی از هدف مهم است زیرا مدت زمان تماس به اندازه کافی طولانی است که کل ساختار بتواند به اثر آن پاسخ دهد و در نتیجه انرژی بیش‌تری به صورت الاستیک جذب می‌شود. آبرت [۳۲] و دیویس و رایبسون [۳۳] یک برخورد سرعت کم را به این عنوان تعریف می‌کنند که در آن موج تنش در راستای ضخامت وجود ندارد و نقش مهمی در توزیع تنش ندارد.

در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی برخورد سرعت پایین مواد کامپوزیت لمینیت ساخته شده از اس-گلس پلی‌استر می‌پردازد. سپس، یک مدل المان محدود با شبیه‌سازی برخورد سرعت پایین در لمینت کامپوزیت ایجاد می‌شود. برای به دست آوردن سطوح آسیب دیده شده روی صفحه کامپوزیت، معیار شروع خرابی‌ها شین در مدل المان محدود معرفی شد. در ابتدا شبیه‌سازی برخورد به کامپوزیت اس-گلس پلی‌استر انجام شد که پس از مقایسه نتایج این شبیه‌سازی با پژوهش‌های پیشین [۳۴] و اطمینان از صحت نتایج، به بررسی برخورد به صفحه هدف با پیکربندی‌های مختلف پرداخته شد، به این صورت که صفحات با پیکربندی‌هایی از جنس‌های سرامیک، آلومینیوم، فولاد، سرامیک-کامپوزیت، آلومینیوم-کامپوزیت، فولاد-کامپوزیت، سرامیک-آلومینیوم-کامپوزیت و سرامیک-فولاد-کامپوزیت شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج حاکی از آن است که در حالت صفحه هدف دو لایه، مدل سرامیک-کامپوزیت و در حالت صفحه هدف سه لایه، مدل سرامیک-فولاد-کامپوزیت بیش‌ترین تاثیر را در کاهش نفوذ پرتابه در صفحه هدف دارند.



تنش جریان در مدل جازسون- کوک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

که در آن A, B, C, n و m از ثابت‌های ماده و ε_p کرنش پلاستیک موثر است و

$$\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} = \dot{\varepsilon}_p^* \quad (2)$$

که $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنشی است که ثابت‌های ماده در آن نرخ کرنش به دست می‌آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع شناخته می‌شود. هم چنین T^* نرم شونده‌گی حرارتی ماده را در دماهای بالا تخمین می‌زند که رابطه آن به قرار زیر است:

$$T^{*m} = \begin{cases} 0 & \text{و } T < T_r \\ \frac{T - T_r}{T_m - T_r} & \text{و } T_r < T < T_m \\ 1 & \text{و } T > T_m \end{cases} \quad (3)$$

که در آن T دمای ماده و T_m دمای ذوب ماده و T_r دمای

مرجع است.

همچنین مقدار کرنش شروع شکست طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_D^{PL} = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \eta)}][1 + D_4 \times \ln(\frac{\dot{\varepsilon}_D^{PL}}{\dot{\varepsilon}_0})][1 + D_5 \hat{\theta}] \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، براکت اول نشان دهنده تاثیر مقدار η بر ε_D^{PL} است. براکت دوم بیانگر تاثیر نرخ کرنش بر ε_D^{PL} است. براکت سوم نیز تاثیر دما بر ε_D^{PL} را نشان می‌دهد. ثوابت این معادله برای آلومینیوم، در جداول ۱ و ۲ و برای فولاد در جدول ۳ آمده است.

۲-۲- مدل ساختاری جانسون هولمکوئیست

مدل خرابی جانسون هولمکوئیست برای مدل‌سازی سرامیک، شیشه و مواد ترد دیگر مناسب است. تنش معادل نرمال بر مبنای پارامتر خرابی D به صورت معادله ۵ است:

جدول ۱- مشخصات آلومینیوم و ثوابت معادله جانسون-کوک

ρ	E	ν	A	B	N
۲۷۵۰	۶۹۰۰۰	۰/۳	۳۲۴	۱۱۴	۰/۴۲
m	θ_{melting}	$\theta_{\text{Transition}}$	C	$\dot{\varepsilon}$	
۱/۶۴	۶۰۰	۵۰	۰/۰۰۲	۱	

جدول ۲- ثوابت خرابی رابطه جانسون- کوک برای آلومینیوم AL6061-T6

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
-۰/۷۷	۱/۴۵	۰/۴۷	۰	۱/۶
Reference strain rate	Expansion coefficient	Specific heat	Conductivity	
۱	$21e^{-6}$	۹۰۰	۱۹۰	

جدول ۳- مشخصات و ثوابت معادله جانسون کوک برای فولاد ST-37

ρ (kg/m ³)	A (MPa)	B (MPa)	n	m	T_{melt} (K)	$T_{\text{transition}}$ (K)
۷۸۳۰	۲۶۳/۵۱	۱۳۰/۰۵	۰/۰۹۱۵	۱	۱۸۰۰	۲۹۳/۲
C	$\dot{\varepsilon}_0$ (s ⁻¹)	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
۰/۰۱۴	۱	۰/۰۵	۳/۴۴	۲/۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۱



صورت معادله ۱۳ تبدیل می‌شود که از اثرهای انرژی صرف نظر می‌شود. بعد از انباشتگی خرابی ($D > 0$) بالکینگ اتفاق می‌افتد و نمو فشار که از ملاحظات انرژی قابل تعیین است، به صورت معادله ۱۴ اضافه می‌شود:

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (12)$$

$$P = K_1\mu\mu < 0 \quad (13)$$

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (14)$$

در جدول ۴ پارامترهای معیار جانسون هولموکویست برای سرامیک آمده است.

جدول ۴- پارامترهای معیار جانسون هولموکویست برای

سرامیک

ρ_0 (kg/m ³)	G (GPa)	A	n	B
۳۲۱۵	۱۹۳	۰/۹۶	۰/۶۵	۰/۴۳
m	C	$\dot{\epsilon}_0$	T (Mpa)	HEL (GPa)
۱	۰/۰۰۹	۱	۷۵۰	۱۱/۷
P_{HEL} (GPa)	β	D_1	D_2	ϵ_{fmax}
۵/۱۳	۱	۰/۴۸	۰/۴۸	۱/۲
ϵ_{fmin}	K_1 (GPa)	K_2 (GPa)	K_3 (GPa)	F_s
۰	۲۲۰	۳۶۱	۰	۰/۶
σ_{lmax} (GPa)		σ_{fmax} (GPa)		
۱۲/۲		۱/۳		

۲-۳- مدل رفتاری هاشین سه بعدی:

این معیار که در آن تخریب بر اساس تنش است، توسط هاشین معرفی شده است [۴۳]. در این معیار تخریب کششی و فشاری الیاف و همچنین تخریب کششی و فشاری ماتریس به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (5)$$

σ_f^* و σ_i^* به ترتیب تنش شکست نرمال و تنش معادل اولیه نرمال می‌باشند.

فرم کلی تنش معادل نرمال به صورت معادله ۶ است:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \quad (6)$$

σ تنش معادل واقعی و σ_{HEL} تنش معادل در حد کشسان هیوگونیوت است. مقاومت اولیه و شکست نرمال به صورت معادله ۷ و ۸ است:

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (7)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (8)$$

فشار نرمال نیز حاصل تقسیم فشار واقعی بر فشار در حد کشسان هاگونیوت است. فشار کششی هیدرواستاتیک پیشینه نرمال نیز به صورت معادله ۹ است که صورت کسر، پیشینه فشار هیدرواستاتیک کششی است که ماده می‌تواند تحمل کند. نرخ کرنش بی بعد نیز از تقسیم نرخ کرنش

واقعی به نرخ کرنش مرجع به دست می‌آید (معادله ۹):

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (9-الف)$$

$$P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (9-ب)$$

T^* پیشینه مقاومت شکست کششی نرمال است:

$$\dot{\epsilon}_0 = 1S^{-1} \quad \text{و انباشتگی خرابی به صورت معادله ۱۰ است:}$$

$$D = \frac{\Sigma \Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \quad (10)$$

ϵ_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت P است. در

صورتیکه کرنش پلاستیک وجود نداشته باشد: $P^* = -T^*$

$$\epsilon_p^f = D_1(T^* + P^*)^{D_2} \quad (11)$$

فشار هیدرواستاتیک قبل از شکست ($D = 0$) به صورت

معادله ۱۲ است. $(\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1)$ که برای فشارهای کششی به



استحکام فشاری طولی، استحکام کششی عرضی، استحکام فشاری عرضی، استحکام برشی طولی و دو استحکام برشی عرضی می‌باشند. در جدول ۵ خواص مکانیکی کامپوزیت و ثوابت مربوط به معیار هاشین آمده است.

۳- شبیه‌سازی مسئله در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس:

در این پژوهش، شبیه‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۹ انجام می‌شود. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی مسئله برخورد از تحلیل غیرخطی و حلگر صریح که در این گونه مسائل از حلگر ضمنی کاربرد بهتری دارد، استفاده می‌شود. صفحه هدف با استفاده از المان‌های انتگرال کاهش یافته چهار ضلعی S4R Abaqus، با حدود ۳۳۵۰ عنصر در عمق صفحه، مش بندی می‌شود. در منطقه برخورد، مش با اندازه المان حدود ۱ میلی متر ریزتر می‌شود. مرکز صفحه پارتیشن بندی شده تا شامل منطقه برخورد باشد. ضربه زننده به صورت یک پرتابه استوانه‌ای صلب با سر نیم کرووی به قطر ۱۶ میلی متر، که محور اصلی آن در

صورت که هرگاه موده‌های تخریب به مقدار واحد رسیدند، تخریب ماده در آن نقطه از ماده نزدیک به شروع شدن است.

این معیار در حالت سه‌بعدی، که در آن از معیارهای تنش بیشینه برای مولفه‌های تنش نرمال عرضی استفاده می‌شود، به صورت روابط زیر بیان می‌گردد.

برای تخریب کششی الیاف:

$$f_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (15)$$

برای تخریب فشاری الیاف:

$$f_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1, \quad \sigma_{11} < 0 \quad (16)$$

برای تخریب کششی زمینه:

$$f_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1, \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \geq 0 \quad (17)$$

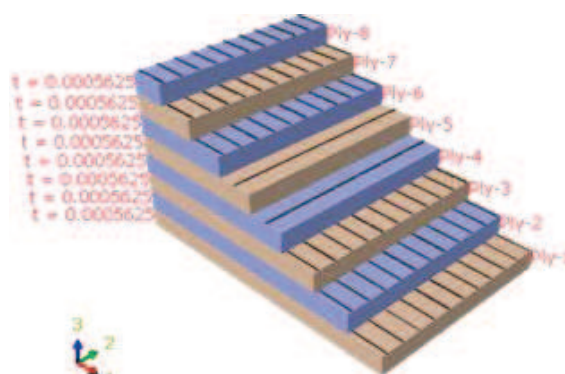
برای تخریب فشاری زمینه:

$$f_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left(\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right) (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq (\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0 \quad (18)$$

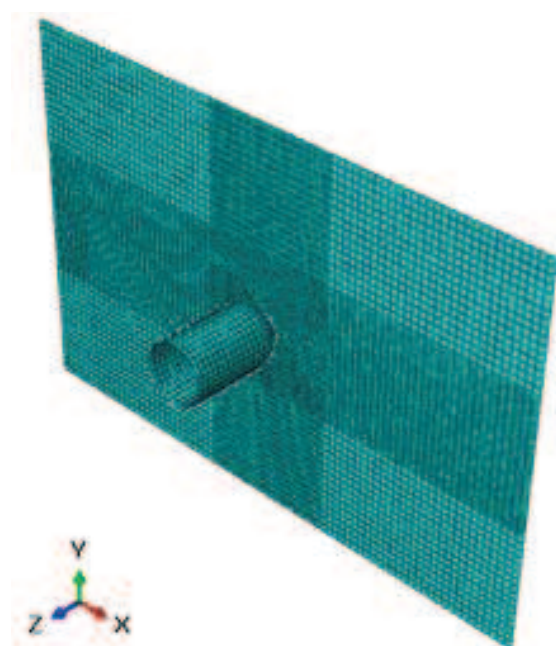
که در این روابط σ_{ij} مولفه های تانسور تنش و $X_c, X_t, Y_c, Y_t, S_{13}, S_{23}, S_{12}$ به ترتیب استحکام کششی طولی،

جدول ۵- خواص مکانیکی و ثوابت معیار هاشین برای کامپوزیت S-Glass Polyester ($V_f=34\%$)

E_1 Young's modulus in X-direction (MPa)	31914.1
E_2 Young's modulus in Y-direction (MPa)	6641.06
E_3 Young's modulus in Z-direction (MPa)	3265.55
G_{12} Shear modulus in XY- plane direction (MPa)	2271.2
G_{13} Shear modulus in XZ- plane direction (MPa)	2247.62
G_{23} Shear modulus in YZ- plane direction (MPa)	2200.47
ν_{12} Poisson's ratio modulus in XY- plane direction	0.15839
ν_{13} Poisson's ratio modulus in XZ- plane direction	0.41522
X_T Tensile strengths in X-direction (MPa)	1544.82
X_C Compressive strengths in X-direction (MPa)	54.88
Y_T Tensile strengths in Y-direction (MPa)	269.56
Y_C Compressive strengths in Y-direction (MPa)	824.58
S_{11} shear strengths in fibre direction (MPa)	112.79
S_{22} Transverse to fibre direction shear strengths (MPa)	65



شکل ۳- پیکربندی کامپوزیت



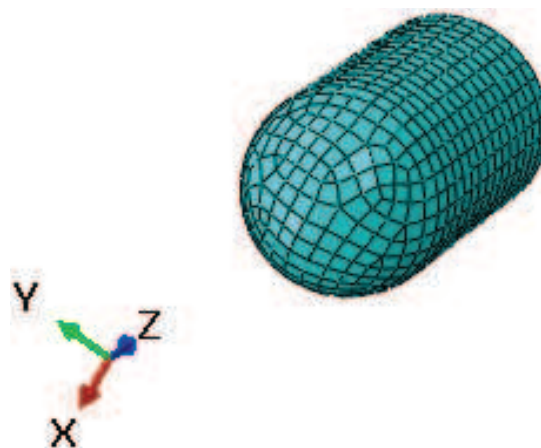
شکل ۴- نمای مونتازی از پرتابه و کامپوزیت

۳-۱- صحت‌سنجی مدل حاضر:

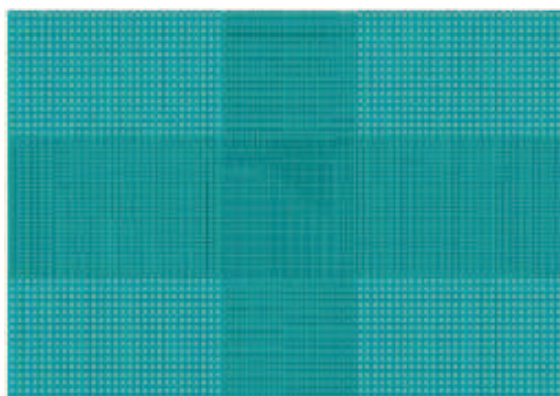
به منظور بررسی صحت و دقت مدل عددی حاضر، مسئله ضربه سرعت پایین بررسی شده در مرجع [۳۴]، در اینجا شبیه‌سازی و تحلیل می‌گردد. مسئله مورد نظر شامل یک صفحه کامپوزیت چند لایه‌ای متشکل از ماتریس پلی‌استر تقویت شده با الیاف اس-گلس می‌باشد که در مرکز خود تحت ضربه سرعت پایین یک پرتابه صلب با سر نیمکره‌ای

جهت نرمال صفحه، مدل شده است. پرتابه با المان هگزاهدرون خطی پیوسته توپر انتگرال کاهشی C3D8R از Abaqus، با حدود ۱۷۰۰ المان در عمق پرتابه و ۱۱۰۴ المان در سراسر قطر پرتابه مش بندی شده است. برای تعیین اینکه هر سطحی به طور بالقوه بتواند با هر سطح دیگری در مدل تماس برقرار کند، یک الگوریتم تماس کلی در این شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

در شکل‌های زیر نحوه مش‌زنی کامپوزیت و پرتابه و پیکربندی کامپوزیت نمایش داده شده است.



شکل ۱- مش‌بندی پرتابه



شکل ۲- مش‌بندی صفحه کامپوزیتی



فولاد- کامپوزیت، سرامیک- آلومینیوم- کامپوزیت، سرامیک- فولاد- کامپوزیت شبیه سازی شده است. لازم به ذکر است که ابعاد هر لایه، مانند حالت صحت سنجی شده با مرجع [۳۴] است. نمودار خیز- زمان برای صفحه هدف های ذکر شده در شکل ۶ آمده است.

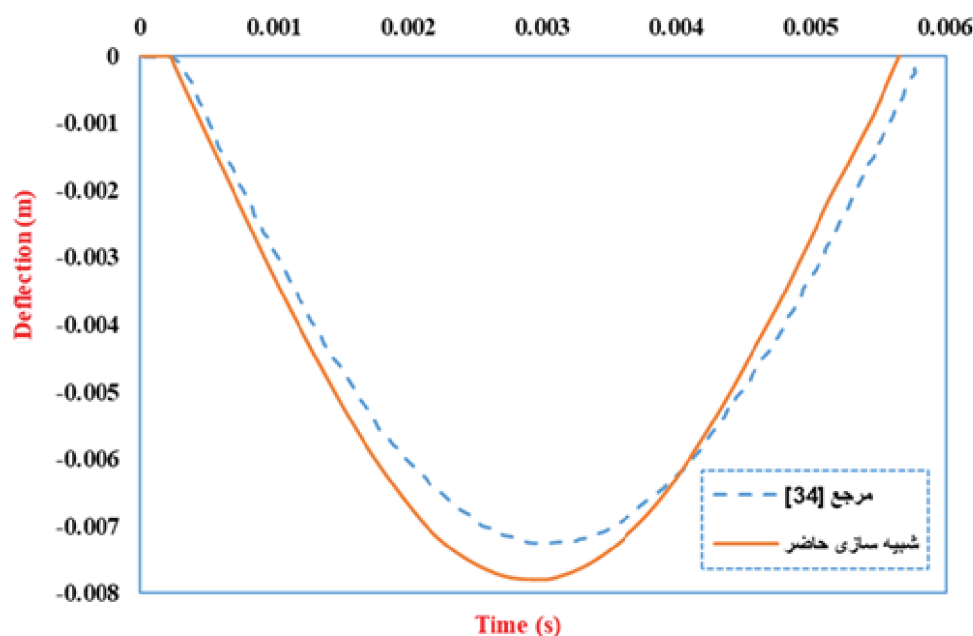
۳-۳- بررسی جذب انرژی در صفحه هدف های مختلف

در این قسمت، مقادیر جذب انرژی کل در صفحه هدف های مختلف، طی برخورد جسم صلب به ازای شرایط اولیه یکسان با مرحله قبل به صورت جداگانه برای هر صفحه هدف ارائه شده است. مقدار تاریخچه انرژی درونی برای کل پیکربندی هر صفحه هدف، طی زمان برخورد در شکل ۷ رسم شده است و مقادیر بیشینه هر نمودار و زمان رخداد این مقدار برای نتیجه گیری حائز اهمیت می باشد.

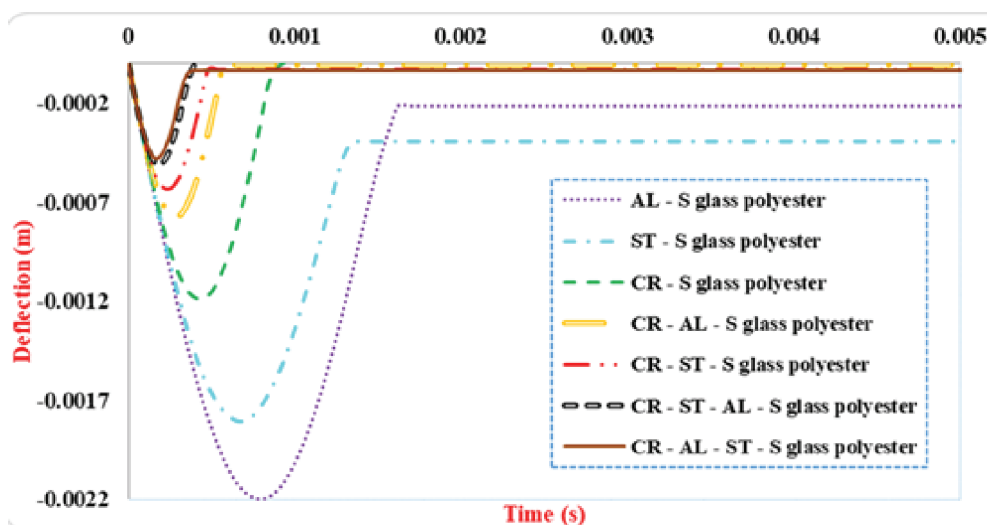
قرار دارد. ابعاد صفحه ۱۵۰ × ۴/۵ × ۱۰۰ میلی متر، و لایه چینی صفحه به صورت $s[0.3/90]$ ، قطر پرتابه ۱۶ میلی متر، جرم پرتابه ۱/۸۲۵ کیلوگرم و سرعت پرتابه ۴/۴۲۹ متر بر ثانیه است. در شکل (۵)، تاریخچه خیز نقطه مرکز صفحه به دست آمده از شبیه سازی حا ضر با نتیجه حاصل از مرجع [۳۴] مقایسه می گردد. مشاهده می شود که تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد که خود مبین صحت و درصد خطای پایین شبیه سازی حاضر می باشد.

۳-۲- بررسی برخورد به اهداف مختلف

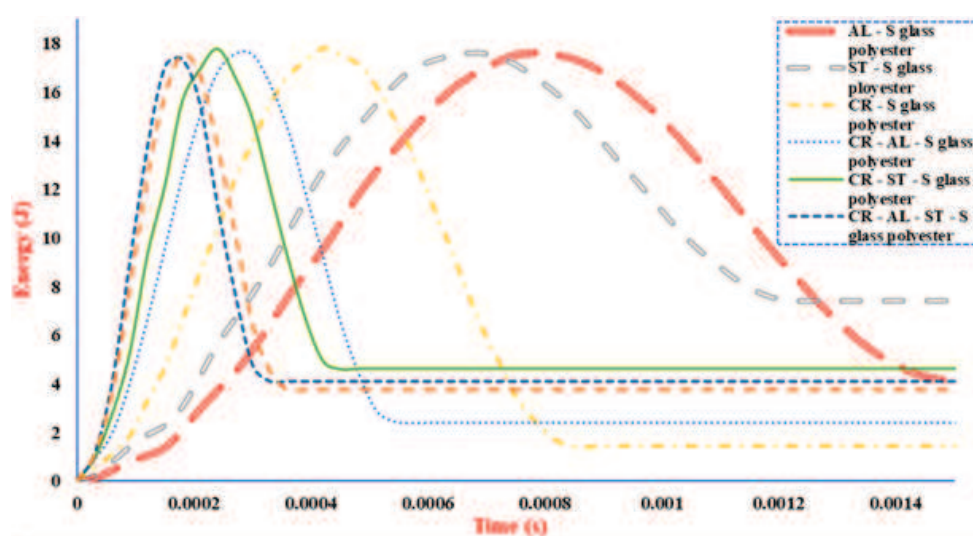
بعد از اطمینان از صحت شبیه سازی برخورد به صفحه کامپوزیتی، برخورد پرتابه به صفحه هدف با جنس های سرامیکی، آلومینیومی و فولادی و همچنین پیکربندی های سرامیک- کامپوزیت، آلومینیوم- کامپوزیت،



شکل ۵- مقایسه تاریخچه خیز مرکز صفحه



شکل ۶- نمودار خیز- زمان با صفحه هدف های مختلف

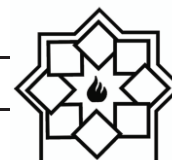


شکل ۷- نمودار انرژی کل برای صفحه هدف های مختلف

۳-۴- بررسی میزان جذب انرژی برای هر لایه از بهترین پیکربندی

شکل ۸ تاریخچه جذب انرژی هر لایه را از پیکربندی سرامیک- آلومینیوم- فولاد- کامپوزیت را به عنوان بهترین

حالت نشان می‌دهد، همانطور که می‌توان دید بیش‌ترین سهم به ترتیب مربوط به لایه سرامیک، لایه فولاد، لایه آلومینیوم و در نهایت کامپوزیت می‌باشد. همانطور که می‌توان دید بی‌شینه منحنی‌ها به ترتیب قرار گرفتن لایه اتفاق می‌افتد.



۳-۵- بررسی بیشینه جذب انرژی و نیروی عکس

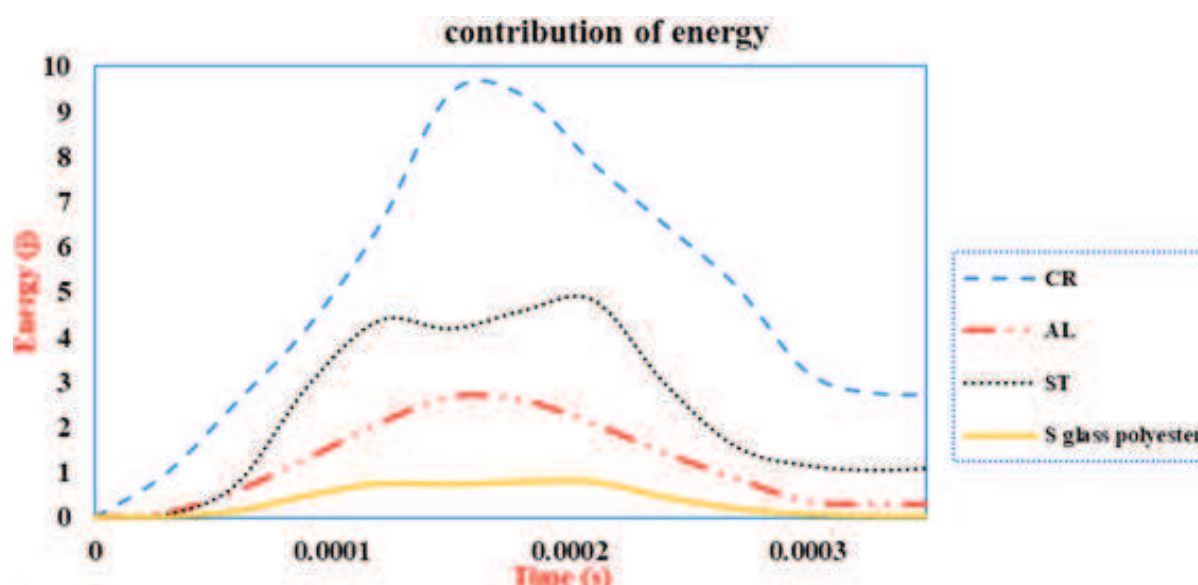
العمل متناظر با آن

جدول ۶ میزان جذب انرژی صفحات هدف و نیروی عکس العمل هر یک را در راستای برخورد نشان می‌دهد. با تقسیم بیشینه انرژی بر نیروی عکس العمل هدف، یک مقدار تعدیل شده از مقدار جذب انرژی به ازای واحد نیروی

عکس العمل به دست می‌آید.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر این واقعیت را برجسته می‌کند که در مرحله اول یک ترکیب از لایه‌های صفحه هدف و در مرحله دوم ترتیب قرارگیری آن‌ها به طور قابل توجهی مقاومت نسبت



شکل ۸- نمودار انرژی کل به ازای هر لایه برای پیکربندی

جدول ۶- میزان جذب انرژی و نسبت انرژی به نیروی عکس العمل برای پیکربندی‌های مختلف

Configuration	Energy absorption (mJ)	Maximum reaction force (N)	Energy absorption/Maximum reaction force
AL - S glass polyester	۱۷/۶۱۹۹	۱۱/۴	۱/۵۴۵۶
ST - S glass polyester	۱۷/۸۵۴۲	۴۴/۱۳	۰/۴۰۴۵
CR - S glass polyester	۱۷/۸۱۴۳	۱۷/۹۶	۰/۹۹۱۸
CR - AL - S glass polyester	۱۷/۵۸۰۵	۱۸/۲۴	۰/۹۶۳۸
CR - ST- S glass polyester	۱۷/۷۹۱۴	۴۷/۸۸	۰/۳۷۱۵
CR - Al - ST - S glass polyester	۱۷/۳۵۵۸	۳۷/۴۷	۰/۴۶۳۱



فولاد بعد از سرامیک قرار میگیرد، بهتر عمل کند اما برعکس؛ نتایج حاکی از آن بود که ترتیب سرامیک-آلومینیوم- فولاد- کامپوزیت کمترین خیز پسماند را دارد هرچند اختلاف در این حالت مقدار ناچیزی بود اما خلاف دیدگاه ایجاد شده در حالت سه لایه بود.

۴- مقدار انرژی جذب شده تعدیل شده با نیرو، هرچقدر بیش تر باشد، صفحه هدف، مناسب کاربردهای جذب انرژی می باشد و بهترین حالت مربوط به پیکربندی سرامیک- کامپوزیت می باشد، زیرا به ازای واحد نیروی عکس العمل ایجاد شده بیشترین جذب انرژی را انجام می دهد و این در کاربردهای جاذب های انرژی در تصادفات بسیار مطلوب محسوب می شود.

۵- در خصوص تاریخچه جذب انرژی حالت آلومینیوم- کامپوزیت، می توان دید که زمان برخورد نسبت به سایر حالات به بیشترین مقدار می رسد. هرچه زمان برخورد بیش تر باشد خیز صفحه هدف بیش تر می شود و انرژی پرتابه، صرف تغییر شکل آن می شود و در نتیجه مقدار نیروی عکس العمل وارد شده به صفحه کم تر می شود، پس نمودارهای انرژی، مقادیر نفوذ را نیز تایید می کنند.

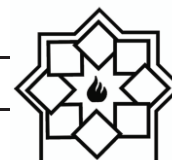
۶- در خصوص بهترین پیکربندی صفحه هدف از نظر میزان نفوذ، یعنی حالت چهار لایه سرامیک- آلومینیوم- فولاد- کامپوزیت، بیشترین سهم جذب انرژی توسط لایه ها به ترتیب مربوط به سرامیک، فولاد، آلومینیوم و کامپوزیت می باشد و سرامیک چندین برابر سایر حالت ها سهم جذب انرژی دارد که علت آن را می توان در سختی بالای این ماده توجیه کرد، همچنین انرژی پسماند لایه پس از پیک انرژی ایجاد شده توسط برخورد نشان دهنده ریکاوری آن لایه و بازگشت به شکل اولیه می باشد که

به جابجایی را افزایش می دهد. همچنین محاسبه کسر جذب انرژی مربوط به هر لایه می تواند مسیر مناسبی را جهت مقایسه مقاومت به جابجایی، برای هر نوع ترکیب صفحه هدف نشان دهد و بی بعد سازی انرژی توسط نیروی عکس العمل، می تواند با هدف بهینه سازی صفحه هدف در جهت جذب انرژی، کمک قابل توجهی ارائه دهد. این ها با شبیه سازی دقیق اجزای محدود و صحنه سنجی آن با ادبیات پیشین، پشتیبانی می شود. بر این اساس نتایج به صورت زیر هستند:

۱- در خصوص حالت های صفحه هدف دو لایه، می توان دید که با توجه به گستردگی بیش تر ناحیه الاستیک فولاد نسبت به آلومینیوم، خیز الاستیک سهم بیشتری در فولاد دارد و خیز پسماند سهم کم تر، اما در خصوص سرامیک با توجه به حد الاستیک بالا و انرژی جنبشی کم، نسبت به انرژی الاستیک قابل ذخیره علی رغم، ناحیه پلاستیک کوچک، سهم خیز الاستیک به بیش ترین حد خود در بین حالات صفحه هدف دو لایه ای پندل می رسد.

۲- در خصوص حالت های صفحه هدف سه لایه ای، سرامیک به دلیل سختی بسیار بالا به عنوان لایه اول جهت برخورد با پرتابه و لایه کامپوزیت به عنوان لایه آخر اتخاذ شد و در بین این دو لایه، لایه های فولاد و آلومینیوم بررسی شدند که با توجه به ناحیه الاستیک وسیع تر در فولاد نسبت به آلومینیوم، خیز پسماند در حالت پندل دارای فولاد کم تر از پندل دارای آلومینیوم می باشد.

۳- در خصوص حالت صفحه هدف چهار لایه، انتظار می رفت با توجه به عملکرد مناسب فولاد، پندلی که در آن



در خصوص کامپوزیت این خاصیت بیشترین و در خصوص سرامیک کمترین می باشد.

فهرست علائم

$\epsilon_f \min$	کرنش واماندگی کمینه	GPa	گیگاپاسکال
K_1	ثابت معادله حالت	MPa	مگاپاسکال
K_2	ثابت معادله حالت	E	مدول یانگ
K_3	ثابت معادله حالت	E_1	مدول یانگ در راستای محور X
F_s	کرنش واماندگی	E_2	مدول یانگ در راستای محور Y
G_{12}	مدول برشی در صفحه XY	E_3	مدول یانگ در راستای محور Z
G_{13}	مدول برشی در صفحه XZ	ρ	چگالی
G_{23}	مدول برشی در صفحه YZ	G	مدول برشی
ν_{12}	نسبت پواسون در صفحه XY	ν	نسبت پواسون
ν_{13}	نسبت پواسون در صفحه XZ	A	تنش تسلیم
ν_{23}	نسبت پواسون در صفحه YZ	B	ثابت سخت شوندگی
X_t	استحکام کششی طولی	n	توان سخت شوندگی
X_c	استحکام فشاری طولی	m	ضریب گرمایی مربوط به نرم شوندگی
Y_t	استحکام کششی عرضی	C	پارامتر تاثیر نرخ کرنش
Y_c	استحکام فشاری عرضی	ϵ_0	نرخ کرنش مرجع
S_{12}	استحکام برشی طولی	T	استحکام کششی
S_{23}	استحکام برشی عرضی	$\sigma_{\max}$	استحکام اولیه ماده
S_{13}	استحکام برشی عرضی	$\sigma_f \max$	استحکام ماده گسیخته شده

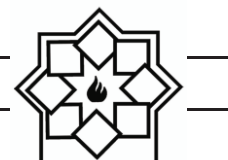
مراجع

- [1] Santos MJ, Santos JB, Amaro AM, Neto MA. Low velocity impact damage evaluation in fiber glass composite plates using PZT sensors. Compos Part B Eng 2013; 55:269e76.
- [2] Riccio A, De Luca A, Di Felice G, Caputo F. Modelling the simulation of impact induced damage onset and evolution in composites. Compos Part B Eng 2014; 66:340e7.
- [3] de Vasconcellos DS, Sarasini F, Touchard F, Chocinski-Arnault L, Pucci M, Santulli C, et al. Influence of low velocity impact on fatigue behaviour of woven hemp fibre

HEL	حد الاستیک هاگونیوت
P_{HEL}	فشار در حد الاستیک هاگونیوت
β	نسبت انرژی آسیب به فشار داخلی
D_1	ثابت مواد
D_2	ثابت مواد
$\epsilon_f \max$	کرنش واماندگی بیشینه



- behaviour of composite laminates. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015; 71(0):212e26.
- [14] Singh H, Namala KK, Mahanjan P. A damage evolution study of E-glass/epoxy composite under low velocity impact. *Compos Part B Eng* 2015; 76:235e48.
- [15] JONES RM. In: Francis T, editor. *Mechanics of composite materials*. 2 ed. USA Publishing Office: Taylor & Francis; 1999. p. 102e18.
- [16] Barbero EJ. *Finite element analysis of composite materials*. CRC Press LLC, Taylor & Francis Group; 2007. p. 255e97.
- [17] Barbero EJ. *Introduction to composite materials design 2ed*. Philadelphia. PA. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group; 2011. p. 267e85.
- [18] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. *J Appl Mech Trans ASME* 1980; 47(2):329e34.
- [19] Aare M, Kleiven S. Evaluation of head response to ballistic helmet impacts using the finite element method. *Int J Impact Eng* 2007; 34(3):596e608.
- [20] Arias A, Rodríguez-Martínez JA, Rusinek A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles. *Eng Fract Mech* 2008; 75(6):1635e56.
- [21] Olsson R. Analytical prediction of damage due to large mass impact on thin ply composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2015; 72(0):184e91.
- [22] Richardson MOW, Wisheart MJ. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 1996; 27(12):1123e31.
- [23] Shyr T-W, Pan Y-H. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Compos Struct* 2003; 62(2):193e203.
- [24] Hitchen SA, Kemp RMJ. The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite. *Composites* 1995; 26(3):207e14.
- [25] Yamada SE, Sun CT. Analysis of reinforced epoxy composites. *Compos Part B Eng* 2014; 66:46e57.
- [4] MalekzadehFard K, Khalili SMR, Forooghy SH, Hosseini M. Low velocitytransverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor. *Compos Part B Eng* 2014; 63:111e22.
- [5] Feng D, Aymerich F. Damage prediction in composite sandwich panels subjected to low-velocity impact. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2013; 52:12e22.
- [6] Gower HL, Cronin DS, Plumtree A. Ballistic impact response of laminated composite panels. *Int J Impact Eng* 2008; 35(9):1000e8.
- [7] Nishikawa M, Hemmi K, Takeda N. Finite-element simulation for modeling composite plates subjected to soft-body, high-velocity impact for application to bird-strike problem of composite fan blades. *Compos Struct* 2011; 93(5):1416e23.
- [8] Ulven CA, Vaidya UK. Impact response of fire damaged polymer-based composite materials. *Compos Part B Eng* 2008; 39(1):92e107.
- [9] Palazotto AN, Gummadi LNB, Vaidya UK, Herup EJ. Low velocity impact damage characteristics of Z-fiber reinforced sandwich panels d an experimental study. *Compos Struct* 1998; 43(4):275e88.
- [10] Sutherland LS, GuedesSoares C. Impact on low fibre-volume, glass/polyester rectangular plates. *Compos Struct* 2005; 68(1):13e22.
- [11] Sutherland LS, GuedesSoares C. Impact characterisation of low fibre-volume glass reinforced polyester circular laminated plates. *Int J Impact Eng* 2005; 31(1):1e23.
- [12] de Moura MFSF, Marques AT. Prediction of low velocity impact damage in carboneepoxy laminates. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2002; 33(3):361e8.
- [13] Tan W, Falzon BG, Chiu LNS, Price M. Predicting low velocity impact damage and compression-after-impact (CAI)



- Bhargava, Ballistic performance and energy absorption characteristics of thin aluminium plates, *Int. J. Impact Eng.* 77 (2015)1-15.
- [36] T. Børvik, M.J. Forrestal, T.L. Warren, Perforation of 5083-H116 aluminium armour plates with ogive-nose rods and 7.62 mm APM2 bullets, *Proc. Soc. Exp. Mech.* 67 (2010) 969–978.
- [37] R.T. Tang, H.M. Wen, Predicting the perforation of ceramic-faced light armours subjected to projectile impact, *Int. J. Impact Eng.* 102 (2017) 55–61.
- [38] K. Rassiah, M. Ahmad, A. Ali, Ballistic impact performance of the layered and laminated composites: a reviews, *Pertanika J. Sci. Technol.* 23 (2) (2015) 177–185.
- [39] M. Lee, Y.H. Yoo, Analysis of ceramic/metal armour systems, *Int. J. Impact Eng.* 25 (9) (2001) 819–829.
- [40] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Eng. Fract. Mech.* 21 (1) (1985) 31–48.
- [41] A. Pineau, A.A. Benzerga, T. Pardoen, Failure of metals I, brittle and ductile fracture, *Acta Mater.* 103 (2016) 424 – 483.
- [42] G.R. Johnson, T.R. Holmquist, An improved computational constitutive model for brittle materials, *High-Pres. Sci. Technol.* 309 (1) (1994) 981–984
- [43] Hashin, Z., “Failure Criteria For Unidirectional Fiber Composites,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, No. 2, pp. 329–334, 1980.
- laminare strength and its distribution. *J Compos Mater* 1978; 12(JUL):275e84.
- [26] Hart-Smith LJ. A new approach to fibrous composite laminate strength prediction. In: 8th DOD/NASA/FAA Conference on Fibrous Composites in Structural Design; November 1989. p. 663e93. NASA CP-3087 ed. Norfolk, VA. 28-30.
- [27] Puck A, Schurmann H. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Compos Sci Technol* 2002; 62(12e13):1633e62.
- [28] Jordan JB, Naito CJ, Haque BZ. Progressive damage modeling of plain weave Eglass/ phenolic composites. *Compos Part B Eng* 2014; 61(0):315e23.
- [29] Caputo F, De Luca A, Lamanna G, Borrelli R, Mercurio U. Numerical study for the structural analysis of composite laminates subjected to low velocity impact. *Compos Part B Eng* 2014; 67(0):296e302.
- [30] Anderson Jr CE, Morris BL. The ballistic performance of confined Al₂O₃ ceramic tiles. *Int J Impact Eng* 1992; 12(2):167e87.
- [31] Anderson Jr CE. An overview of the theory of hydrocodes. *Int J Impact Eng* 1987; 5(1e4):33e59.
- [32] Abrate S. Modeling of impacts on composite structures. *Compos Struct* 2001; 51(2):129e38.
- [33] Robinson P, Davies GAO. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. *Int J Impact Eng* 1992; 12(2): 189e207.laminated composites. *Int J Impact Eng* 1992; 12(2): 189e207 .
- [34] Kamel, Zouggar & Boukhoulda, Farouk & Haddag, Badis & Nouari, Mohammed. (2015). Numerical and experimental investigations of S-Glass/Polyester composite laminate plate under low energy impact. *Composites Part B: Engineering.* 89. 10.1016/j.compositesb.2015.11.021.
- [35] M.A. Iqbal, G. Tiwari, P.K. Gupta, P.

Numerical Analysis of Low Velocity Impact on Ceramic-Metal-Composite Targets

Mehdi Hosseini^{*1}, Sajad Esmacili², Mahdi Askari Sedeh³

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

²Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

³Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

* m.hosseini27@gmail.com

Abstract: In the present paper, the problem of low velocity impact of plates made from different configurations of ceramic, aluminum, steel and composite (S-glass polyester) is analyzed numerically using Abaqus finite element software. The projectile is assumed to be a rigid body with a hemispherical head. Also, for ceramic layers, Holmquist constitutive model, for aluminum and steel layers, Johnson Cook behavioral model and for composite layer, three-dimensional Hashin model is used to model the material behavior. After doing the low velocity impact simulation for the composite target, comparing it with previous researches and ensuring the accuracy of the results, the low velocity impact simulation is performed for metal, ceramic and composite targets with different configurations. The results indicate that the target plate with ceramic-steel-composite configuration has the highest impact strength and the projectile penetration is reduced in this case.

Keywords: Numerical analysis, low velocity impact, composite-metal-ceramic targets.