فصلنامه‌ی علمی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۱۰، شماره‌ی ۳، پاییز ۱۴۰۰

تحلیل عددی ضربه سرعت پایین اهداف سرامیکی - فلزی - کامپوزیتی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

مهدی حسینی[1*]، سجاد اسمعیلی[2]، مهدی عسکری‌سده[3]

[1] استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ملایر

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر

[3] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

* m.hosseini27@gmail.com

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:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

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 ها شین سه‌بعدی استفاده می‌شود. پس از انجام شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین برای هدف کامپوزیتی، مقایسه با پژوهش های 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.

کلیدواژه:

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

کد DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2

۱- مقدمه

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 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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

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]، د واسکانسلوس [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 می شود (گاور و همکاران [۶]، نیشیکاوا و همکاران [۷]). ضربه سرعت پایین (LVI)، همچنین به عنوان برخورد جرم زیاد شناخته می شود که از شرایط نا شی از افتادن ابزار در حین عملیات نگهداری حاصل می‌شود (اولون [۸] و پالازوتو [۹]). کامپوزیت های ماتریس پلیمر م ستعد آ سیب داخلی ه ستند که ناشی از LVI است (ساترلند و گودس [۱۱ و ۱۰]). آسیب LVI می‌تواند به شدت تنش پ سماند و طول عمر یک سازه کامپوزیت را کاهش دهد حتی اگر آسیب به سختی قابل م شاهده با شد (مورا [۱۲]). توانایی پیش‌بینی میزان آ سیب 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 مو ضوع انجام شده ا ست (به عنوان مثال جونز [۱۵]، باربرو [۱۶، ۱۷] و هاشین [۱۸]). مطالعات مربوط به آسیب ضربه به کامپوزیت‌ها بر دینامیک ضربه، مکانیک آ سیب، خصو صیات پسماند پس از ضربه و مقاومت در برابر آ سیب متمرکز شده ا ست (آره [۱۹] و آریاس [۲۰]). توالی واماندگی تأثیر عمده‌ای در آسیب ضربه ایجاد شده در لمینت های 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 مکانی سم‌ها دارند (به عنوان مثال یامادا– سان [۲۵]، هارت ا سمیت [۲۶]، ها شین [۱۸] و پاک [۲۷]). مدلی که برای یک مسئله، واقع بینانه در بهترین حالت کار خواهد کرد ب ستگی به تعدادی از عوامل از جمله مدل رفتار ماده، بارگذاری ساختاری، سرعت ضربه و شرایط مرزی دارد. بنابراین، امکان ا ستفاده از کاربردی‌ترین مدل آسیب و خرابی برای مسئله مورد نظر برای یک تحلیلگر سودمند ا ست (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 با شد، نوع پا سخ به جای

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

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 می شود. آبرت [۳۲] و دیویس و رابینسون [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 به‌دست آوردن سطوح آسیب دیده شده روی صفحه کامپوزیت، معیار شروع خرابی هاشین در مدل المان محدود معرفی شد. در ابتدا شبیه سازی برخورد به کامپوزیت اس-گلس پلی‌استر انجام شد که پس از مقایسه نتایج این شبیه سازی 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 پیکربندی هایی 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 سه‌لایه، مدل سرامیک-فولاد- کامپوزیت بیش‌ترین تاثیر را در کاهش نفوذ پرتابه در صفحه هدف دارند.

۲- مدل‌های آسیب مواد :

در برخوردهای بالستیک دو جسم، فشارهای بسیار بالایی در اطراف سطح برخورد، طی یک زمان بسیار کوتاه ایجاد می شود. این شرایط باعث تولید موج‌های مکانیکی می شود. 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 می انجامد 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-گرونیزن [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. درمواقعی که دمای تغییر شکل نیز در قطعه هم زمان باسرعت 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 کرنش های بزرگ، نرخ کرنش و دماهای بالا بیان می‌کند، بنابراین برای شبیه سازی مسائلی که در آن‌ها تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد، مانند مسائل برخورد و انفجار و بسیار مناسب است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

تنش جریان در مدل جانسون– کوک از رابطه زیر به د ست می‌آید:

$$\sigma = (A + B\,\varepsilon_p^n)\,(1+C \ln \dot{\varepsilon}_p^*)\,(1- T^{*m}) \quad (۱)$$

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

$$\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} = \dot{\varepsilon}_p^* \quad (۲)$$

که $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنشـــی اســـت که ثابت های ماده در آن نرخ کرنش به دست می‌آیند و به عنوان نرخ کرنش مرجع شناخته می‌شـــود. هم چنین T^* نرم شـــوندگی حرارتی ماده را در دماهای بالا تخمین می‌زند که رابطه آن به قرار زیر است:

$$T^{*m} = \begin{cases} 0 & \text{و} \quad T < T_r \\ \dfrac{T - T_r}{T_m - T_r} & \text{و} \quad T_r < T < T_m \\ 1 & \text{و} \quad T > T_m \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن T، دمای ماده و T_m دمای ذوب ماده و T_r دمای مرجع است.

همچنین مقدار کرنش شـروع شـکسـت طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_D^{pL} = [D_1 + D_2 e^{(D_3\,\eta)}][1+D_4 \times Ln(\frac{\dot{\varepsilon}^{pL}}{\dot{\varepsilon}})][1+D_5\,\hat{\theta}] \quad (۴)$$

که در رابطه (۴)، براکت اول نشـــان دهنده تاثیر مقدار η بر ε_D^{pL} ا ست. براکت دوم بیانگر تاثیر نرخ کرنش بر ε_D^{pL} ا ست. 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 جانســـون هولمکوئیســـت برای مدل‌ســـازی 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	υ	A	B	N
۲۷۵۰	۶۹۰۰۰	۰/۳	۳۲۴	۱۱۴	۰/۴۲
m	$\theta_{melting}$	$\theta_{Transition}$		C	ε̇
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		$۲۱e^{-۶}$	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)	$T_{transition}$ (K)
۷۸۳۰	۲۶۳/۵۱	۱۳۰/۰۵	۰/۰۹۱۵	۱	۱۸۰۰	۲۹۳/۲
C	$\dot{\varepsilon}_o$ (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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

$$\sigma^* = \sigma^*_i - D(\sigma^*_i - \sigma^*_f) \quad (۵)$$

σ^*_i و σ^*_f به ترتیب تنش شکست نرمال و تنش معادل اولیه نرمال می‌باشند.

فرم کلی تنش معادل نرمال به صورت معادله ۶ است:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \quad (۶)$$

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:

$$\sigma^*_i = A(P^* + T^*)^N(1+C\,Ln\dot{\varepsilon}^*) \quad (۷)$$

$$\sigma^*_f = B(P^*)^M(1+C\,Ln\dot{\varepsilon}^*) \quad (۸)$$

فشار نرمال نیز حاصل تقسیم فشار واقعی بر فشار در حد کشسان هاگونیوت است. فشار کششی هیدروستاتیک بیشینه نرمال نیز به صورت معادله ۹ است که صورت کسر، بیشینه فشار هیدروستاتیک 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):

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (۹\text{- الف})$$

$$P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (۹\text{- ب})$$

T^* بیشینه مقاومت شکست کششی نرمال است:

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

$$D = \frac{\Sigma\Delta\varepsilon_P}{\varepsilon_p^f} \quad (۱۰)$$

ε_p^f کرنش پلاستیک شکست تحت فشار ثابت P است. در صورتیکه کرنش پلاستیک وجود نداشته باشد: $P^* = -T^*$

$$\varepsilon_p^f = D_1(T^* + P^*)^{D_2} \quad (۱۱)$$

فشار هیدروستاتیک قبل از شکست ($D = 0$) به صورت معادله ۱۲ است. ($\mu = \frac{\rho}{\rho_0}$-1) که برای فشارهای کششی به صورت معادله ۱۳ تبدیل می‌شود که از اثر های انرژی صرف نظر می شود. 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:

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 \quad (۱۲)$$

$$P = K_1\mu\mu < 0 \quad (۱۳)$$

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad (۱۴)$$

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

جدول ۴- پارامترهای معیار جانسون هولمکوئیست برای سرامیک

ρ_0 (kg/m3)	G (GPa)	A	n	B
۳۲۱۵	۱۹۳	۰/۹۶	۰/۶۵	۰/۴۳
m	C	$\dot{\varepsilon}_o$	T (Mpa)	HEL (GPa)
۱	۰/۰۰۹	۱	۷۵۰	۱۱/۷
P_{HEL} (GPa)	β	D_1	D_2	$\epsilon_{f\,max}$
۵/۱۳	۱	۰/۴۸	۰/۴۸	۱/۲
$\epsilon_{f\,min}$	K_1 (GPa)	K_2 (GPa)	K_3 (GPa)	F_S
۰	۲۲۰	۳۶۱	۰	۰/۶
$\sigma_{1\,max}$ (GPa)		$\sigma_{f\,max}$ (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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

صـورت که هرگاه مودهای تخریب به مقدار واحد رسـیدند، تخریب ماده در آن نقطه از ماده نزدیک به شـروع شـدن است.

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

برای تخریب کششی الیاف:

$$f_{ft} = (\frac{\sigma_{11}}{X_t})^2 \geq 1 , \quad \sigma_{11} \geq 0 \qquad (۱۵)$$

برای تخریب فشاری الیاف:

$$f_{fc} = (\frac{\sigma_{11}}{X_c})^2 \geq 1 , \quad \sigma_{11} < 0 \qquad (۱۶)$$

برای تخریب کششی زمینه:

$$f_{mt} = (\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{Y_t})^2 + \frac{\sigma_{23}^2+\sigma_{22}\,\sigma_{33}}{S_{23}^2} + (\frac{\sigma_{12}}{S_{12}})^2 + (\frac{\sigma_{13}}{S_{13}})^2 \geq 1 , \quad (\sigma_{22}+\sigma_{33}) \geq 0 \qquad (۱۷)$$

برای تخریب فشاری زمینه:

$$f_{mc} = \frac{1}{Y_C}\left((\frac{Y_C}{2S_{23}})^2 - 1\right)(\sigma_{22}+\sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2+\sigma_{22}\,\sigma_{33}}{S_{23}^2} + (\frac{\sigma_{13}}{S_{13}})^2 \geq 1 , \quad (\sigma_{22}+\sigma_3) < 0 \qquad (۱۸)$$

که در این روابط σ_{ij} مولفه های تانسـور تنش و X_t، X_c، Y_t، Y_C، S_{12}، S_{23}، S_{13} به ترتیب اسـتحکام کشـشـی طولی، استحکام فشاری طولی، استحکام کششی عرضی، استحکام فشاری عرضی، استحکام برشی طولی و دو استحکام برشی عرضـی می‌باشـند. در جدول۵ خواص مکانیکی کامپوزیت و ثوابت مربوط به معیار هاشین آمده است.

۳- شبیه‌سـازی م سئله در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس:

در این پژوهش، شبیه‌سازی اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۹ انجام می شود. در پژوهش حا ضر، برای شبیه سازی م سئله برخورد از تحلیل غیرخطی و حلگر صریح که در این گونه مسـائل از حلگر ضـمنی کاربرد بهتری دارد، استفاده می‌شود. صفحه هدف با استفاده از المان‌های انتگرال کاهش‌یافته چهار ضـلعی S4R Abaqus، با حدود ۳۳۵۰ عنصـر در عمق صـفحه، مش بندی می‌شـود. در منطقه برخورد، مش با اندازه المان حدود ۱ میلی متر ریزتر می‌شود. مرکز صـفحه پارتیشـن بندی شـده تا شـامل منطقه برخورد با شد. ضربه زننده به صورت یک پرتابه ا ستوانه‌ای صلب با سر نیم کروی به قطر ۱۶ میلی متر، که محور ا صلی آن در

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

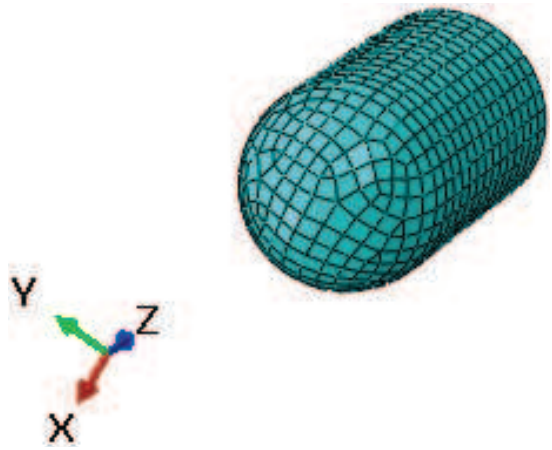
E_1 Young's modulus in X-direction (MPa)	31914.1
E_2 Young's modulus in Y-direction (MPa)	6641.06
E_3 Young's modulus in Z-direction (MPa)	3265.55
G_{12} Shear modulus in XY- plane direction (MPa)	2271.2
G_{13} Shear modulus in XZ- plane direction (MPa)	2247.62
G_{23} Shear modulus in YZ- plane direction (MPa)	2200.47
υ_{12}Poisson's ratio modulus in XY- plane direction	0.15839
υ_{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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

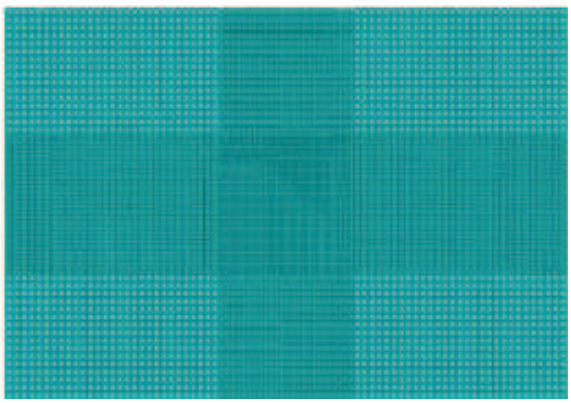
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

جهت نرمال صـــفحه، مدل شـــده اســـت. پرتابه با المان هگزاهدرون خطی پیوسته توپر انتگرال کاهشی C3D8R از Abaqus، با حدود ۱۷۰۰ المان در عمق پرتابه و ۱۱۰۴ المان در ســراســر قطر پرتابه مش بندی شـده اسـت. برای تعیین اینکه هر ســـطحی به طور بالقوه بتواند با هر ســـطح دیگری در مدل تماس برقرار کند، یک الگوریتم تماس کلی در این شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

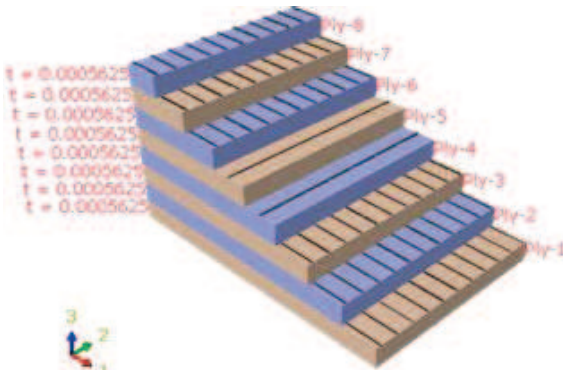
در شـــکل های زیر نحوه مش‌زنی کامپوزیت و پرتابه و پیکربندی کامپوزیت نمایش داده شده است.



شکل ۱- مش‌بندی پرتابه



شکل ۲- مش‌بندی صفحه کامپوزینی



شکل ۳- پیکربندی کامپوزیت



شکل ۴- نمای مونتاژی 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 شبیه سازی و تحلیل می‌گردد. مسئله مورد نظر شامل یک صفحه کامپوزیت چند لایه‌ای متشکل از ماتریس پلی‌استر تقویت شـده با الیاف اس- گلس می‌باشـد که در مرکز خود تحت ضربه سرعت پایین یک پرتابه صلب با سر نیمکروی

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

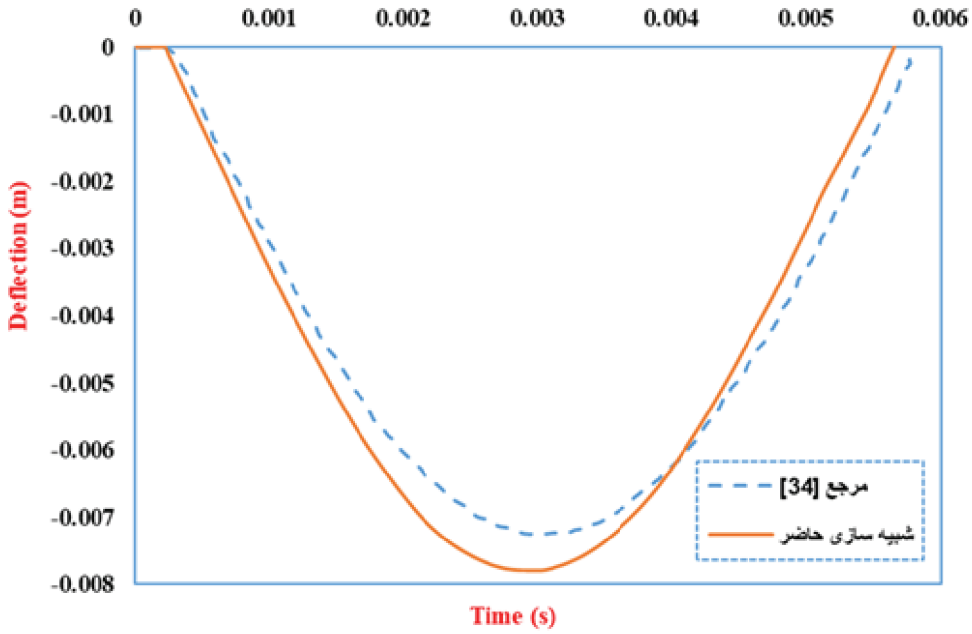
قرار دارد. ابعاد صفحه ۱۵۰ × ۴/۵ × ۱۰۰ میلی‌متر، و لایه چینی صفحه به صورت s[۰۳/۹۰]، قطر پرتابه ۱۶ میلی‌متر، جرم پرتابه ۱/۸۲۵ کیلوگرم و سرعت پرتابه ۴/۴۲۹ متر بر ثانیه است. در شکل (۵)، تاریخچه خیز نقطه مرکز صفحه به دست آمده از شبیه سازی حاضر با نتیجه حاصل از مرجع [۳۴] مقایسه می‌گردد. مشاهده می‌شود که تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد که خود مبین صحت و درصد خطای پایین شبیه‌سازی حاضر می‌باشد.

۳–۲– بررسی برخورد به اهداف مختلف

بعد از اطمینان از صحت شبیه‌سازی برخورد به صفحه کامپوزیتی، برخورد پرتابه به صفحه هدف با جنس‌های سرامیکی، آلومینیومی و فولادی و همچنین پیکربندی‌های سرامیک– کامپوزیت، آلومینیوم– کامپوزیت، فولاد– کامپوزیت، سرامیک– آلومینیوم– کامپوزیت، سرامیک– فولاد– کامپوزیت شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که ابعاد هر لایه، مانند حالت صحت‌سنجی شده با مرجع [۳۴] است. نمودار خیز– زمان برای صفحه هدف‌های ذکر شده در شکل۶ آمده است.

۳–۳– بررسی جذب انرژی در صفحه هدف‌های مختلف

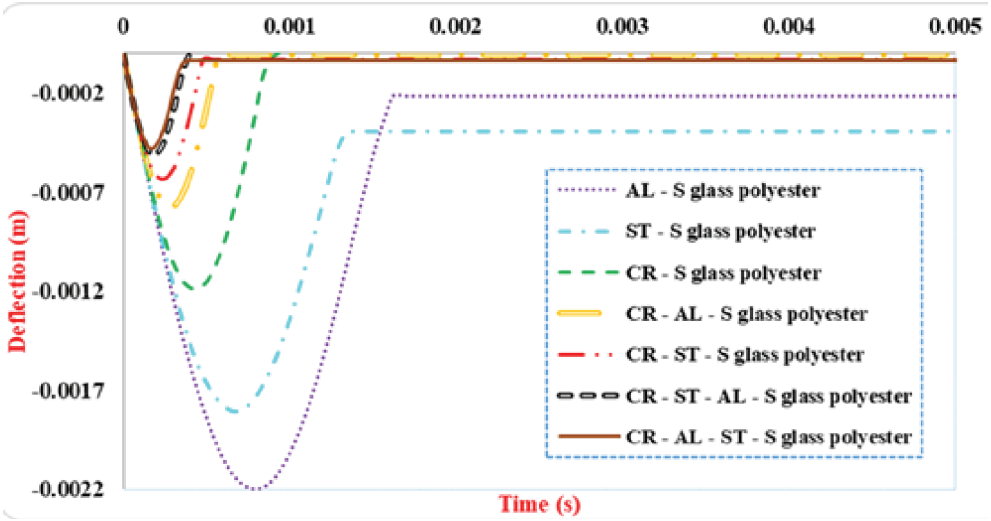
در این قسمت، مقادیر جذب انرژی کل در صفحه هدف‌های مختلف، طی برخورد جسم صلب به ازای شرایط اولیه یکسان با مرحله قبل به صورت جداگانه برای هر صفحه هدف ارائه شده است. مقدار تاریخچه انرژی درونی برای کل پیکربندی هر صفحه هدف، طی زمان برخورد در شکل ۷ رسم شده است و مقادیر بیشینه هر نمودار و زمان رخداد این مقدار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



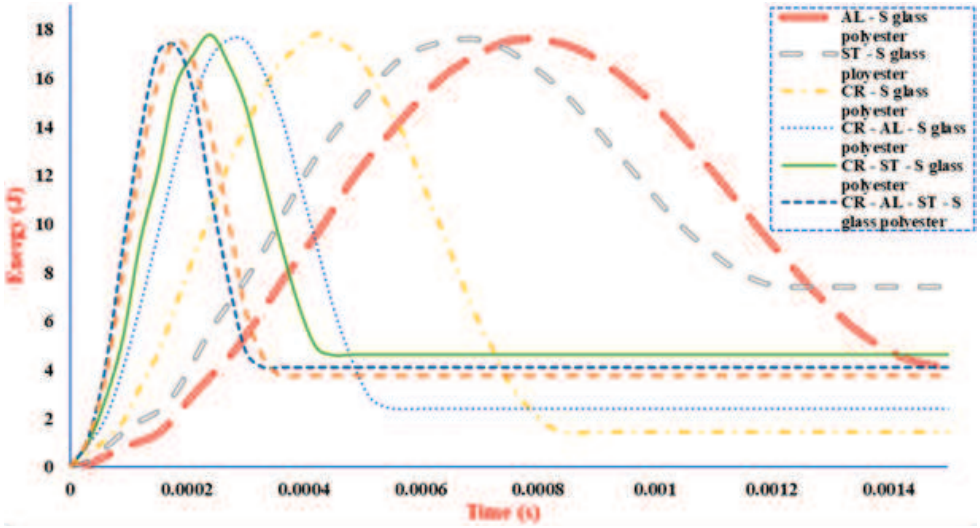
شکل ۵– مقایسه تاریخچه خیز مرکز صفحه

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]



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.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

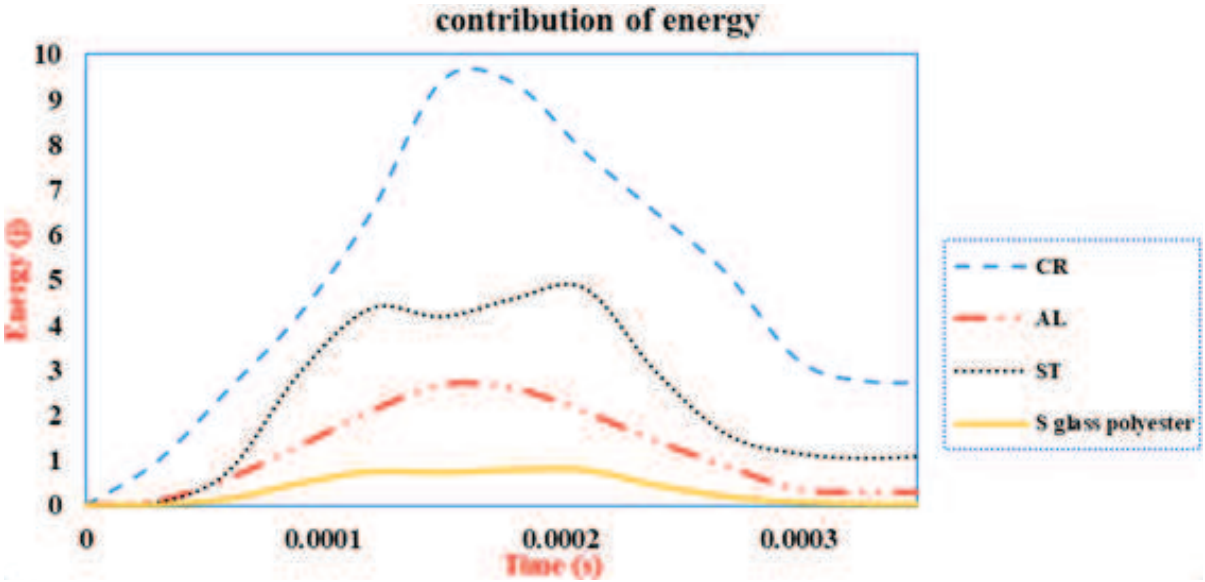
[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

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 عکس‌العمل هدف، یک مقدار تعدیل شـــده از مقـدار جـذب انرژی بـه ازای واحـد نیروی عکس‌العمل به دست می‌آید.

۴– نتیجه‌گیری

پژوهش حا ضر این واقعیت را برج سته می‌کند که در مرحله اول یک ترکیب از لایه‌های صـــفحه هدف و در مرحله دوم ترتیب قرارگیری آن‌ها به طور قابل توجهی مقاومت نسبت



شکل ۸– نمودار انرژی کل به ازای هر لایه برای بهترین پیکربندی

جدول ۶– میزان جذب انرژی و نسبت انرژی به نیروی عکس‌العمل 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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

به جابجایی را افزایش می‌دهد. همچنین محاسبه کسر جذب انرژی مربوط به هر لایه می‌تواند 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، می‌تواند با هدف بهینه‌سازی صفحه هدف در جهت جذب انرژی، کمک قابل توجهی ارائه دهد. این‌ها با شبیه سازی دقیق اجزای محدود و صحه‌سنجی آن با ادبیات پیشین، پشتیبانی می‌شود. بر این اساس نتایج به صورت زیر هستند:

۱- در خصوص حالت‌های صفحه هدف دو لایه، می‌توان دید که با توجه به گستردگی بیش‌تر ناحیه الاستیک فولاد نسبت به آلومینیوم، خیز الاستیک سهم بیش‌تری در فولاد دارد و خیر پسماند سهم کم‌تر، اما در خصوص سرامیک با توجه به حد الاستیک بالا و انرژی جنبشی کم، نسبت به انرژی الاستیک قابل ذخیره علی‌رغم، ناحیه پلاستیک کوچک، سهم خیز الاستیک به بیش ترین حد خود در بین حالات صفحه هدف دولایه ای پنل می‌رسد.

۲- در خصوص حالت‌های صفحه هدف سه‌لایه‌ای، سرامیک به دلیل سختی بسیار بالا به عنوان لایه اول جهت برخورد با پرتابه و لایه کامپوزیت به‌عنوان لایه آخر اتخاذ شد و در بین این دو لایه، لایه های فولاد و آلومینیوم بررسی شدند که با توجه به ناحیه الاستیک وسیع‌تر در فولاد نسبت به آلومینیوم، خیز پسماند در حالت پنل دارای فولاد کم‌تر از پنل دارای آلومینیوم می باشد.

۳- در خصوص حالت صفحه هدف چهارلایه، انتظار می رفت با توجه به عملکرد مناسب فولاد، پنلی که در آن 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 سه‌لایه بود.

۴- مقدار انرژی جذب‌شده تعدیل‌شده با نیرو، هرچقدر بیش تر باشد، صفحه هدف، مناسب کاربردهای جذب انرژی می‌باشد و بهترین حالت مربوط به پیکربندی سرامیک- کامپوزیت می‌باشد، 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 می‌شود.

۵- در خصوص تاریخچه جذب انرژی حالت آلومینیوم- کامپوزیت، می‌توان دید که زمان برخورد نسبت به سایر حالات به بیش‌ترین مقدار می‌رسد. هرچه زمان برخورد بیش‌تر باشد خیز صفحه هدف بیش‌تر می‌شود و انرژی پرتابه، صرف تغییر شکل آن می‌شود و در نتیجه مقدار نیروی عکس‌العمل وارد شده به صفحه کم‌تر می‌شود، پس نمودارهای انرژی، مقادیر نفوذ را نیز تایید می‌کنند.

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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

در خصوص کامپوزیت این خاصیت بیش‌ترین و در خصوص سرامیک کم‌ترین می‌باشد.

فهرست علائم

GPa	گیگاپاسکال
MPa	مگاپاسکال
E	مدول یانگ
E_1	مدول یانگ در راستای محور X
E_2	مدول یانگ در راستای محور Y
E_3	مدول یانگ در راستای محور Z
ρ	چگالی
G	مدول برشی
υ	نسبت پواسون
A	تنش تسلیم
B	ثابت سخت‌شوندگی
n	توان سخت‌شوندگی
m	ضریب گرمایی مربوط به نرم شوندگی
C	پارامتر تاثیر نرخ کرنش
$\dot{\varepsilon}_o$	نرخ کرنش مرجع
T	استحکام کششی
σ_1 max	استحکام اولیه ماده
σ_f max	استحکام ماده گسیخته‌شده
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
ϵ_f max	کرنش واماندگی بیشینه
ϵ_f min	کرنش واماندگی کمینه
K_1	ثابت معادله حالت
K_2	ثابت معادله حالت
K_3	ثابت معادله حالت
F_S	کرنش واماندگی
G_{12}	مدول برشی در صفحه XY
G_{13}	مدول برشی در صفحه XZ
G_{23}	مدول برشی در صفحه YZ
ϑ_{12}	نسبت پواسون در صفحه XY
ϑ_{13}	نسبت پواسون در صفحه XZ
ϑ_{23}	نسبت پواسون در صفحه YZ
X_t	استحکام کششی طولی
X_c	استحکام فشاری طولی
Y_t	استحکام کششی عرضی
Y_C	استحکام فشاری عرضی
S_{12}	استحکام برشی طولی
S_{23}	استحکام برشی عرضی
S_{13}	استحکام برشی عرضی

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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

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) behaviour of composite laminates. Compos Part A Appl Sci Manuf2015; 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

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

laminate 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. 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.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]

Iranian Journal of
Ceramic Science & Engineering
Vol. 10, No. 3, 2021

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

Mehdi Hosseini[*1], Sajad Esmaeili[2], Mahdi Askari Sedeh[3]

[1]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran
[2]Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran
[3]Department 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 velosity impact, composite-metal-ceramic targets**.**

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1400.10.0.9.2]