

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

عنوان

بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک بر روی اهداف سرامیک/کامپوزیت

نگارنده

حسین جباری

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۹۷/۱۵۵
تاریخ: ۳۹۷/۱۲/۰۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین جباری با شماره دانشجویی ۹۵۰۳۸۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک بر روی اهداف سرامیک/کامپوزیت که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

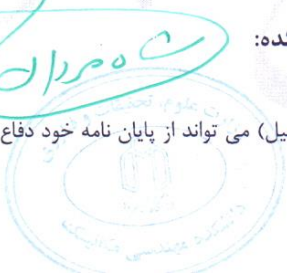
قبول (با درجه: عالی.....) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	استادیار	_____
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر هادی پروز	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر حسین تونزنده جانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم‌نامه

به پاس تعبیر عظیم و انسانیشان از کلمه ایثار و از خود گذشتگی،

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید،

و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

تقدیم به خانواده عزیز و همسر مهربان

سپاس‌گزاری

از استاد صبور و خوش‌خلق جناب آقای دکتر مهدی گردویی که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند و در انجام مراحل این تحقیق صمیمانه وقت گران‌بهای خود را در اختیارم گذاشتند، کمال قدردانی و امتنان را داشته باشم. ایشان در کمال سعه‌ی صدر و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.

از مسئولین محترم آزمایشگاه کامپوزیت پژوهشگاه پلیمر ایران، آزمایشگاه خواص مواد و آزمایشگاه سرامیک پیشرفته که در طی این تحقیق، همکاری صمیمانه‌ای با من داشتند، متشکرم.

و در خاتمه از دوستان ارجمندم که مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند، قدردانی و تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب حسین جباری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک بر روی اهداف سرامیک/کامپوزیت تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مهدی گردویی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این پایان‌نامه فرایند برخورد و نفوذ سرعت بالا به اهداف سرامیک/کامپوزیت به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. سرامیک استفاده شده در این اهداف از جنس آلومینا و کامپوزیت نیز از جنس شیشه/اپوکسی می‌باشد که با روش لایه‌چینی دستی در چهار ضخامت متفاوت ساخته شد. در قسمت تجربی، آزمون‌های ضربه سرعت بالا به وسیله‌ی تفنگ گازی و با پرتابه‌های مخروطی شکل فولادی صورت‌گرفت و کمیت‌های سرعت خروج، فرسایش و وزن پرتابه پس از ضربه، مکانیزم نفوذ، نحوه شکست سرامیک، تغییر شکل و گسیختگی لایه کامپوزیتی و همچنین سرعت حد بالستیک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در قسمت مطالعه عددی این پایان‌نامه فرایند نفوذ توسط نرم‌افزار المان محدود ال‌اس داینا و برطبق نتایج به دست آمده برای سرعت‌ها در آزمایش‌های تجربی مدل‌سازی شد و متغیرهای سرعت خروج پرتابه از هدف، سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک مخصوص محاسبه شد. سپس منحنی سرعت خروجی بر حسب سرعت برخورد برای اهداف با ضخامت‌های مختلف و همچنین نمودارهای سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت لایه سرامیک و کامپوزیت ارائه شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج به دست آمده از آزمون‌های تجربی و دستیابی به یک مدل معتبر در ادامه شبیه‌سازی، فرایند نفوذ توسط دو پرتابه رایج AK-47 (کالیبر ۷/۶۲) و برتا (کالیبر ۹) مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که نرخ کاهش سرعت خروجی در مقایسه با سرعت برخورد، در نزدیکی سرعت حد بالستیک بالاتر است و در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک با افزایش سرعت برخورد نرخ تغییرات سرعت کمتر می‌شود. همچنین در ضخامت‌های پایین سرامیک، افزایش ضخامت کامپوزیت در سرعت‌های بالا، تأثیر بسیار کمی روی تغییرات سرعت پرتابه‌ها دارد ولی با کاهش سرعت پرتابه و نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این تغییرات بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: سرامیک، کامپوزیت، نفوذ، آزمون ضربه سرعت بالا، تحلیل المان محدود

فهرست عنوان‌ها

د	تقدیم‌نامه.....
ه	سپاس‌گزاری.....
و	تعهد‌نامه.....
ز	چکیده.....
ح	فهرست عنوان‌ها.....
ک	فهرست شکل‌ها.....
ن	فهرست جدول‌ها.....
س	فهرست نشانه‌ها.....
۱	فصل ۱ مقدمه.....
۲	۱-۱- پیشینه پژوهش.....
۱۲	۲-۱- تعریف پایان‌نامه.....
۱۳	۳-۱- ضرورت و نوآوری پژوهش.....
۱۵	فصل ۲ ادبیات موضوع (ضربه بالستیک و کامپوزیت).....
۱۵	۱-۲- تعاریف اولیه.....
۱۹	۲-۲- مکانیزم‌های شکست هدف.....
۲۳	۳-۲- پارامترهای مؤثر در نفوذ.....
۲۳	۱-۳-۲ پرتابه‌ها.....
۲۵	۲-۳-۲ اهداف.....

۲-۴- معرفی اهداف سرامیکی ۲۷

۲-۵- معرفی اهداف کامپوزیتی ۳۱

۲-۵-۱ الیاف ۳۲

۲-۵-۲ فاز پیوسته (ماتریس) ۳۵

۲-۶- خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های لیفی ۳۶

فصل ۳ مواد و روش‌های تجربی ۳۹

۳-۱- پرتابه ۳۹

۳-۲- هدف ۴۰

۳-۳- ساخت اهداف سرامیک/کامپوزیت ۴۱

۳-۴- آزمون کشش نمونه کامپوزیتی ۴۲

۳-۵- آزمون بالستیک ۴۴

فصل ۴ شبیه‌سازی عددی ۴۵

۴-۱- حل اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار ال‌اس داینا ۴۵

۴-۲- مراحل مدل‌سازی ۴۷

۴-۲-۱ مدل‌سازی هندسی ۴۷

۴-۲-۲ شبکه‌بندی و مشخصات المان‌ها ۴۸

۴-۳- تحلیل اندازه المان ۴۹

۴-۳-۱ مدل مواد ۵۱

۴-۳-۲ تعریف خواص تماسی ۶۰

۴-۳-۳ شرایط مرزی و شرط اولیه ۶۱

۴-۳-۴ زمان حل ۶۱

۴-۳-۵ سایر تنظیمات ۶۱

۴-۴- طراحی آزمون ۶۲

فصل ۵ نتایج و بحث ۶۵

۵-۱- نتایج تجربی ۶۵

۵-۱-۱- آزمون کشش ۶۵

۵-۱-۲- آزمون بالستیک ۶۶

۵-۲- نتایج عددی ۷۷

۵-۲-۱- تغییر سرعت پرتابه ۷۷

۵-۲-۲- سرعت حد بالستیک ۸۳

۵-۲-۳- انرژی بالستیک مخصوص ۸۶

۵-۲-۴- شکل تخریب هدف سرامیک/کامپوزیت و پرتابه ۹۰

فصل ۶ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها ۹۲

۶-۱- مقدمه ۹۳

۶-۲- نتیجه‌گیری ۹۴

۶-۳- ارائه پیشنهادها ۹۶

منبع‌ها ۹۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ دستگاه تفنگ گازی سبک [۶۳] ۱۸
- شکل ۲-۲ طرح‌واره تفنگ گازی تک مرحله‌ای [۶۴] ۱۸
- شکل ۳-۲ طرح‌واره تفنگ گازی دو مرحله‌ای [۶۵] ۱۹
- شکل ۴-۲ تغییر شکل دائمی یک هدف نازک [۶۶] ۲۰
- شکل ۵-۲ انواع حالت‌های شکست در مسائل برخورد [۶۶] ۲۲
- شکل ۶-۲ شکل دماغه‌ی پرتابه‌های مختلف ۲۴
- شکل ۷-۲ (الف) هدف چندلایه بدون فاصله، (ب) هدف چندلایه با فاصله [۶۴] ۲۷
- شکل ۸-۲ نمونه‌ای از الیاف شیشه [۷۰] ۳۳
- شکل ۹-۲ الیاف کربن [۷۱] ۳۴
- شکل ۱۰-۲ الیاف آرامید [۷۲] ۳۵
- شکل ۱-۳ پرتابه مخروطی آزمون ضربه سرعت بالا. (الف) نقشه، (ب) پرتابه مخروطی ۳۹
- شکل ۲-۳ سرامیک آلومینا ساخته شده در این پژوهش ۴۰
- شکل ۳-۳ الیاف شیشه ۴۰
- شکل ۴-۳ مراحل ساخت نمونه‌های سرامیک/کامپوزیت ۴۲
- شکل ۵-۳ یک نمونه از آزمون کشش ۴۳
- شکل ۶-۳ دستگاه آزمون اینسترون ۸۸۰۲ برای کشش نمونه کامپوزیتی ۴۳
- شکل ۷-۳ دستگاه تفنگ گازی پژوهشگاه پلیمر ایران ۴۴
- شکل ۸-۳ منحنی کالیبراسیون دستگاه تفنگ گازی ۴۴
- شکل ۱-۴ پرتابه‌های مدل شده ۴۷
- شکل ۲-۴ مدل مش‌بندی شده ورق‌های سرامیکی ۴۸
- شکل ۳-۴ مدل شبکه‌بندی شده ورق‌های کامپوزیتی ۴۸

- شکل ۴-۴ نمودار تغییرات سرعت-زمان پرتابه در نمونه CC3B4 ۵۰
- شکل ۴-۵ نمای کلی از مدل جانسون-هولمکوئیست ۵۵
- شکل ۵-۱ نمودار تنش-کرنش صفحه کامپوزیتی ۶۶
- شکل ۵-۲ خردشدگی سرامیک در آزمون ۱ (CC3B2) با سرعت برخورد $244/8 \text{ m/s}$ ۶۷
- شکل ۵-۳ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۱ (CC3B2) با سرعت برخورد $244/8 \text{ m/s}$ ۶۸
- شکل ۵-۴ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۱ پس از برخورد با سرعت $244/8 \text{ m/s}$ به هدف CC3B2 ۶۸
- شکل ۵-۵ شکست سرامیک نمونه CC3B2 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون شماره ۳ ۶۹
- شکل ۵-۶ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۳ (CC3B2) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ۷۰
- شکل ۵-۷ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۳ پس از برخورد با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC3B2 ۷۰
- شکل ۵-۸ شکست سرامیک نمونه CC3B4 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون شماره ۴ ۷۱
- شکل ۵-۹ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۴ (CC3B4) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ۷۲
- شکل ۵-۱۰ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۴ پس از برخورد با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC3B4 ۷۳
- شکل ۵-۱۱ شکست سرامیک نمونه CC5B2 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون ۵ ۷۴
- شکل ۵-۱۲ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۵ (CC5B2) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ۷۴
- شکل ۵-۱۳ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۵ پس از برخورد با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC5B2 ۷۵
- شکل ۵-۱۴ هدف سرامیکی با ضخامت 5 mm در برخورد پرتابه با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون ۵ ۷۵
- شکل ۵-۱۵ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۶ (CC5B4) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ۷۶
- شکل ۵-۱۶ پرتابه فرسایش یافته با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC5B4 ۷۷
- شکل ۵-۱۷ نمودارهای سرعت باقی مانده نسبت به سرعت اولیه برای پرتابه‌های مختلف ۷۸
- شکل ۵-۱۸ تغییرات سرعت پرتابه مخروطی برای سرامیک با ضخامت ثابت ۸۰
- شکل ۵-۱۹ تغییرات سرعت پرتابه AK-47 برای سرامیک با ضخامت ثابت ۸۰
- شکل ۵-۲۰ تغییرات سرعت پرتابه برتا برای سرامیک با ضخامت ثابت ۸۱
- شکل ۵-۲۱ تغییرات سرعت پرتابه مخروطی برای کامپوزیت با ضخامت ثابت ۸۲

- شکل ۵-۲۲ تغییرات سرعت پرتابه AK-47 برای کامپوزیت با ضخامت ثابت ۸۲
- شکل ۵-۲۳ تغییرات سرعت پرتابه برتا برای کامپوزیت با ضخامت ثابت ۸۳
- شکل ۵-۲۴ تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به ضخامت صفحه سرامیکی برای پرتابه‌های مختلف ۸۴
- شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به ضخامت صفحه کامپوزیتی برای پرتابه‌های مختلف ۸۵
- شکل ۵-۲۶ تغییرات انرژی بالستیک مخصوص نسبت به ضخامت کامپوزیت ۸۸
- شکل ۵-۲۷ تغییرات انرژی بالستیک مخصوص نسبت به ضخامت سرامیک ۸۹
- شکل ۵-۲۸ تخریب هدف CC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه مخروطی ۹۰
- شکل ۵-۲۹ تخریب هدف KC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه AK-47 ۹۰
- شکل ۵-۳۰ تخریب هدف BC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه برتا ۹۱
- شکل ۵-۳۱ فرسایش پرتابه مخروطی در آزمایش شماره چهار (CC3B4) ۹۱
- شکل ۵-۳۲ تخریب صفحه کامپوزیتی ۹۲
- شکل ۵-۳۳ توزیع تنش فون مایزرز در آزمایش CC3B4 بر حسب پاسکال ۹۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ خواص مکانیکی چند زره سرامیکی [۶۸] ۲۹
- جدول ۱-۳ خواص مکانیکی سرامیک آلومینا Al_2O_3 [۶۴] ۴۰
- جدول ۲-۳ خواص مکانیکی الیاف شیشه نوع E [۷۶] ۴۱
- جدول ۳-۳ خواص مکانیکی رزین اپوکسی [۷۷] ۴۱
- جدول ۱-۴ تعداد المان‌ها و گره‌ها ۴۸
- جدول ۲-۴ تعداد المان‌ها در هر شبکه‌بندی ۴۹
- جدول ۳-۴ ضرایب جانسون-کوک برای Steel 4340 [۶۶] ۵۱
- جدول ۴-۴ خواص مکانیکی سرامیک آلومینا [۵۹] ۵۶
- جدول ۵-۴ خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه با رزین اپوکسی [۶۲] ۵۹
- جدول ۶-۴ ضریب فرسایش مواد ۶۰
- جدول ۷-۴ جدول طراحی آزمون ۶۳
- جدول ۱-۵ نتایج آزمون کشش کامپوزیت ۶۶
- جدول ۲-۵ سرعت برخورد و خروج پرتابه مخروطی در آزمون‌های مختلف ضربه ۶۷
- جدول ۳-۵ نتایج تحلیل عددی برای سرعت حد بالستیک ۸۴
- جدول ۴-۵ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه مخروطی ۸۷
- جدول ۵-۵ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه AK-47 ۸۷
- جدول ۶-۵ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه برتا ۸۸

فهرست نشانه‌ها

m	توان نرم‌شوندگی گرمایی	A	تنش تسلیم در معیار JC
N	حداکثر مقاومت شکست نرمال	A'	ضریب استحکام اولیه
n	توان کار سختی	B	ثابت کار سختی در معیار JC
n_{ij}	بردار نرمال	B'	ضریب استحکام شکست
P^*	فشار نرمال	C	ضریب حساسیت به نرخ کرنش
P_{HEL}	کسر تبدیل انرژی (ضریب بالک)	C'	توان استحکام شکست
S_1	استحکام کششی طولی	C_2	استحکام فشاری عرضی
S_2	استحکام کششی عرضی	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
S_{12}	استحکام برشی درون صفحه‌ای	D	متغیر آسیب
S_{ij}	ماتریس تنش انحرافی	D_c	آسیب بحرانی
T^*	دمای بی بعد شده	D_{c_1}	آسیب در شروع گلوئی شدن
T_m	دمای ذوب	D_{c_2}	آسیب در نقطه شکست
T_r	دمای محیط	E	مدول کشسان
V_0	سرعت اولیه	G	مدول برشی
β	مدول کشسان حجمی	h	مدول پلاستیک
$\dot{\epsilon}$	نرخ کرنش	K	مدول حجمی
$\dot{\epsilon}_0$	نرخ کرنش مرجع	k	توان تابع تسلیم
ϵ_1	کرنش نرمال موازی با جهت فیبر	M	توان استحکام اولیه

σ_{ut}

استحکام کششی نهایی

 ε_2 کرنش نرمال عمود بر جهت فیبر ε_f کرنش شکست $\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک ε_{p0} کرنش پلاستیک ε_{pd} کرنش آستانه شکست ε_{pf} کرنش پلاستیک مؤثر شکست ε_{pl} کرنش پلاستیک مؤثر μ ضریب تراکم پذیری ν نسبت پواسون ρ چگالی σ_C تنش تسلیم لحظه‌ای σ_D تنش در حالت آسیب σ_{eq} تنش مؤثر σ_f^* تنش مؤثر نرمال شکست σ_i^* تنش مؤثر نرمال اولیه σ_{ij} مؤلفه‌های تانسور تنش σ_m تنش هیدرواستاتیک σ_{max}^f حد کشسان هیوگنیوت σ_T^* تنش کششی هیدرواستاتیک بیشینه

فصل ۱ مقدمه

مکانیک نفوذ یکی از زیرشاخه‌های مکانیک ضربه است. علم مکانیک ضربه به بررسی پاسخ مواد و سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی بسیار شدید در بازه زمانی بسیار کوتاه می‌پردازد. دو جنبه از علم مکانیک ضربه، آن را از شاخه‌های دیگر مکانیک کلاسیک جدا ساخته است که شامل تأثیر اینرسی و نقش انتشار امواج تنش در تحلیل مسائل ضربه می‌باشد. از این‌رو، مسائل ضربه بین دو یا چند جسم، یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی و ساخت اهداف ضد گلوله می‌باشد.

طراحی و ساخت زره و هدف‌های ضد گلوله از دیرباز مورد توجه بشر بوده و در طول تاریخ تحقیقات گسترده و فعالیت‌های زیادی توسط محققین، در این زمینه صورت گرفته است. در طراحی زره از مهم‌ترین عواملی که باید مدنظر قرار گیرد، مقاومت به نفوذ بالای زره و همچنین وزن پایین آن می‌باشد. وزن بالای زره همیشه یک معضل در استفاده از آن می‌باشد و حمل آن را کمی دشوار می‌کند. در طراحی زره‌ها با حداقل وزن، بایستی به این نکته توجه شود که کاهش وزن زره موجب کاهش مقاومت به نفوذ آن نشود. از این‌رو پیشرفت‌های وسیعی در این زمینه صورت گرفته است که از موادی برای ساختن زره استفاده شود که وزن پایین و مقاومت به نفوذ بالایی داشته باشند. به‌عنوان نمونه می‌توان به سرامیک و کامپوزیت اشاره کرد که علاوه بر وزن پایین دارای مقاومت به نفوذ بالایی نیز هستند.

۱-۱- پیشینه پژوهش

• تاریخچه

استفاده از زره‌ها به‌عنوان یک وسیله حفاظتی به ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد باز می‌گردد که از کتان به‌عنوان زره استفاده شد. ۲۰۰۰ سال بعد، از چرم به‌عنوان زره استفاده شد. در قرون ۸ و ۹ میلادی، رومیان از زره‌های فولادی استفاده کردند. استفاده از زره‌های کامل به سال ۱۴۰۰ میلادی باز می‌گردد. در قرن هفدهم، زره‌های مقاوم‌تری طراحی و ساخته شد که باعث افزایش وزن زره تا ۳۰ کیلوگرم شد. در جنگ جهانی دوم، مزایای استفاده از سرامیک‌ها جهت ساخت زره‌های سخت شناخته شد. در سال ۱۹۴۵، از سرامیک به‌عنوان صفحه جلویی و از یک لایه فیبر شیشه به نام دورون^۱ به‌عنوان ماده پشتی استفاده شد. این زره مقاومت به نفوذ بالا و وزن پایین‌تر از زره‌های سرامیکی داشت. در سال ۱۹۶۰ شرکت نورتون^۲، سرامیک‌های برون کاربید^۳ را برای کاربردهای زرهی توسعه داد. چگالی زره‌ها با پایه برون کاربید نسبت به سیستم‌های زرهی اکسید آلومینیوم (آلومینا)^۴ پایین‌تر بود و حدود ۳۰٪ وزن کمتری داشت. به‌دلیل آن‌که سیستم‌های زرهی عمدتاً برای حفاظت شخصی و هلیکوپترها استفاده می‌شدند، وزن فاکتور مهمی بشمار می‌آمد و در نتیجه برون کاربید گزینه بسیار مناسبی برای این امر بود. اخیراً برون کاربید برای زره‌ها و جلیقه‌های شخصی سربازان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دهه ۷۰، دیگر سرامیک‌ها نظیر سیلیکون کاربید^۵ و تیتانیوم بوراید^۶ استفاده و کاربرد موفق‌تری برای سیستم‌های زرهی داشته‌اند. علاوه بر روش‌های ساخت و آزمایشگاهی، از مدل‌های تحلیلی و تئوری جهت طراحی زره‌ها استفاده شده است. استفاده از مدل‌های تحلیلی، از انجام آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر در ساخت زره‌ها جلوگیری می‌نماید و می‌تواند برآورد مناسبی از کارایی زره داشته باشد [۱].

¹ Doron

² Norton

³ Boron carbide (B₄C)

⁴ Aluminium oxide (Alumina)

⁵ Silicon carbide (SiC)

⁶ Titanium boride (TiB₂)

• نفوذ در اهداف سرامیکی و سرامیک/فلز

اولین مدل تحلیلی جهت تعیین سرعت حد بالستیک زره‌های سرامیکی در سال ۱۹۶۲ توسط فلورنس [۲] ارائه گردید. اساس مدل وی این بود که سرامیک نیرو را روی یک ناحیه وسیع پخش می‌کند و مواد پشتی تمام انرژی بعد از برخورد را جذب خواهد کرد. بعد از او ویلکینز [۳]-[۶] در طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۲ طی چهار گزارش رسمی فرایند نفوذ پرتابه‌ها در اهداف سرامیکی را به صورت کیفی ارائه نمود. ایشان در مشاهدات خود تشکیل مخروط سرامیکی پس از برخورد پرتابه به هدف سرامیکی را ارائه نمود. همچنین در ادامه این تحقیقات ویلکینز با ارائه گزارش دیگری مراحل زمانی تشکیل مخروط سرامیکی و مکانیزم تشکیل ترک‌های شعاعی و مخروطی را تشریح نمود. در واقع پس از ارائه نتایج این تحقیقات، تمامی مدل‌های تحلیلی از نتایج کار فوق بهره‌جسته‌اند. در سال ۱۹۷۸ نیز، یک مدل تحلیلی دیگر توسط ویلکینز [۷] ارائه شد که در این مدل برای بررسی مدل‌های شکست، از روش‌های محاسباتی استفاده شده‌است. در این مدل از سرامیک به‌عنوان صفحه جلویی و از آلومینیوم به‌عنوان صفحه پشتی استفاده شده‌است. در سال ۱۹۸۷ مدل دیگری توسط میسلس [۸] ارائه شد که پدیده نفوذ در سرامیک را بررسی کرد و مشاهده شد که انرژی لازم برای شکست سرامیک، تنها کسر کوچکی از انرژی کل پرتابه می‌باشد. بلس [۹] نیز یک مدل تحلیلی برای تشریح نفوذ پرتابه‌های با سرعت بالا روی اهداف سرامیک ارائه نمود. از مدل‌های دیگر در بحث نفوذ پرتابه در اهداف سرامیکی، می‌توان به مدل ارائه شده توسط تیت [۱۰] اشاره کرد، که این مدل بر اساس معادلات اصلاح شده‌ی برنولی در سیالات، برای تعادل فشار روی سطح پرتابه و هدف می‌باشد. این مدل در سال ۱۹۹۰، توسط روزنبرگ [۱۱]، در برخورد پرتابه‌های میله‌ای بلند به اهداف سرامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در همین سال، وودوارد [۱۲] مدلی یک‌بعدی برای نفوذ در زره‌های سرامیکی/کامپوزیتی ارائه نمود. این مدل فرسایش سرامیک و پرتابه را در نظر می‌گرفت و برآورد مناسبی از سرعت پرتابه، جرم کاهش یافته آن و نفوذ یا عدم نفوذ پرتابه و هدف ارائه می‌داد. در ادامه، مدلی توسط دن ریجر [۱۳] ارائه شد که اساس تحلیل آن، روش جرم باقی‌مانده^۱

^۱ Lumped mass

می‌باشد که در آن با استفاده از یکسری معادلات در هر لحظه‌ی زمانی، می‌توان سرعت و جرم پرتابه را تعیین نمود. در واقع این تئوری به نوعی ادامه کار وودوارد می‌باشد. فلوز و بارتون [۱۴] مدلی ارائه دادند که نفوذ پرتابه در زره‌های سرامیکی نیمه بی‌نهایت را پیش‌بینی می‌کند. این مدل، بررسی خواص ماده و تغییرات آرایش زره روی نفوذ را تسهیل می‌کند. نتایج تجربی و تئوری در دو حالت نفوذکننده‌های میله‌ای بلند و پرتابه‌های کروی بررسی شده‌اند و تطابق خوبی بین عمل و تئوری دیده می‌شود. لاندبرگ و همکاران [۱۵] شرایط شکست سطح مشترک پرتابه/هدف و انتقال بین این دو نوار را بررسی نمودند. آنها دو مدل برای فعل و انفعالات و عکس‌العمل‌ها بین یک پرتابه فلزی و هدف سرامیکی ارائه دادند. لی [۱۶] نفوذ پرتابه‌های فولادی در سیستم‌های زرهی سرامیکی را شبیه‌سازی کرده و یک نسبت بهینه بین ضخامت سرامیک به ضخامت ماده پشتی به دست آورده است.

شانظری [۱۷] مدلی تحلیلی ارائه کرد که اساس آن مدل وودوارد بوده و با استفاده از روش تحلیلی جرم باقی‌مانده، سرعت حد بالستیک در اهداف سرامیکی با صفحه پشتیبان فلزی با دقت خوبی محاسبه و پیش‌بینی شد. آریاس و همکاران [۱۸] مدلی عددی جهت نفوذ در سرامیک‌ها با ماده پشتی فلزی ارائه دادند که در حقیقت فاصله سرامیک و ماده پشتی را با کامپوزیت خاصی پر کردند (ترکیبی از ذرات سرامیکی و پلیمرها). گونکالوز و همکاران [۱۹] اثر اندازه دانه و ترکیب شیمیایی سرامیک را در رفتار اهداف سرامیکی به طور کیفی مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند اندازه دانه‌های سرامیک نقش زیادی در عملکرد ضربه‌گیری دارد و با تغییر این پارامتر می‌توان رفتار هدف را تغییر داد. لوپز و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۶ و تاسدمیرسی [۲۱] در سال ۲۰۱۲ به بررسی نقش چسب واسط بین سرامیک و ماده پشتی در اهداف سرامیکی پرداختند و اثر ضخامت این چسب را طی آزمایش‌هایی بررسی کردند. پراکاش و همکاران [۲۲] نیز در یک تحلیل عددی به تأثیر ضخامت لایه چسب واسط بین سرامیک و ماده پشتی در کامپوزیت‌های سرامیکی پرداختند. فعلی و همکاران [۲۳] مدلی تحلیلی ارائه دادند که نفوذ پرتابه‌ها را در سرامیک‌ها با صفحه پشتیبان فلزی بررسی می‌کند. با در نظر گرفتن فرسایش پرتابه معادلات در یک بعد نوشته شدند. معادلات ممنوم جهت توصیف رفتار مخروط سرامیکی به کار رفت و رفتار ماده کار سخت شده و معادلات انرژی جهت بررسی واکنش ماده پشتی

استفاده شد. چی و همکاران [۲۴] در یک مدل نیمه تحلیلی به بررسی مکانیزم نفوذ در سرامیک‌ها با صفحه پشتیبان فلزی پرداختند و یک شبیه‌سازی عددی نیز جهت تأیید تحلیل نفوذ در ترکیب سرامیک/فلز ارائه کردند.

در سال ۲۰۱۳ کامپتون و همکاران [۲۵] به صورت تحلیلی و عددی فرایند برخورد سرعت بالا بر روی سرامیک‌ها را بررسی کردند. در این تحقیق سرعت‌های برخورد مورد نیاز جهت شروع واماندگی و ترک در هدف سرامیکی را هنگام برخورد پرتابه کروی فولادی به آن به دست آوردند. در حقیقت چهار مد غیر الاستیک شامل تسلیم، ایجاد ترک‌های ریز، ترک‌های مخروطی و ترک‌های شعاعی در نظر گرفته شد. فشار و نیروی ناحیه تماسی نیز در تمامی لحظات برخورد محاسبه شد. در سال ۲۰۱۳ طهماسبی و همکاران [۲۶] با بررسی مدل تحلیلی و دودارد یک مدل اصلاحی ارائه داده و با انجام آزمایش نفوذ در ترکیب سرامیک/فلز دقت مدل اصلاحی را بررسی کردند. کودریاتسو و اسپوژنیکو [۲۷] به بررسی عددی اهداف سرامیکی تحت ضربه بالستیک با یک روش ترکیبی DEM/FEM پرداختند. آنها با در نظر گرفتن اصلاح جدیدی از روش المان مجزا^۱ در ال‌اس داینا، برخورد یک کره فولادی به یک صفحه سرامیکی از جنس آلومینا را شبیه‌سازی کردند. پیچ و همکاران [۲۸] مقاومت بالستیکی سه نمونه زره سرامیکی را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. نمونه اول شامل یک صفحه تنگستن کاربرد به همراه یک صفحه متشکل از قرص‌های سرامیکی از جنس آلومینا یا ساچمه‌های فولادی در یک ماتریس پلیمری بود. نمونه دوم نیز از یک چندلایه کامپوزیتی^۲ که دارای ۱۰ لایه پارچه آرامید در یک ماتریس پلیمری از جنس SBS قرار داشت، ساخته شد. در سال ۲۰۱۶ هوگان و همکاران [۲۹] به بررسی خرد شدن سرامیک کاربرد بور پرداختند. آنها در این پژوهش یک اندازه‌گیری دقیق از اندازه قطعات خرد شده و جزئیات نحوه شکست سرامیک را ارائه کردند. نتایج نشان داد که دو مکانیزم مجزای خرد شدن در اثر شکست سرامیک وجود دارد که مکانیزم اول باعث ایجاد تکه‌های ریز سرامیک می‌شود و تکه‌های بزرگتر نیز در نتیجه مکانیزم دوم شکست پدید می‌آید. تانگ و ون [۳۰] یک مدل تحلیلی جهت پیش‌بینی نفوذ پرتابه

¹ Discrete Element Method (DEM)

² Laminate

به اهداف سرامیکی با لایه پشتیبان فلزی یا الیاف تقویت شده ارائه کردند. در این مدل فرض شد که تمام انرژی جنبشی پرتابه صرف تغییر شکل (قارچی شدن) و فرسایش پرتابه، شکست فشاری، برشی و خرد شدن سرامیک و همچنین سوراخ کردن فلز یا الیاف می‌شود. معادلات به‌دست آمده از این پژوهش با پژوهش‌های دیگر مقایسه شد و از انطباق خوبی با نتایج تجربی برخوردار بود. پاوار و همکاران [۳۱] به مقایسه مقاومت بالستیکی اهداف سرامیک/فلز با صفحه سرامیکی از جنس آلومینا و آلومینیوم نیتريد^۱ و صفحه پشتیبان آلومینیومی پرداختند. تحلیل المان محدود توسط نرم‌افزار اتوداین^۲ صورت‌گرفت و از مدل ماده جانسون-کوک^۳ برای آلومینیوم و جانسون-هولمکوئیست^۴ برای سرامیک استفاده شد. نتایج نشان داد که هدف ساخته شده با سرامیک آلومینیوم نیتريد دارای مقاومت بالستیکی بالاتری نسبت به هدف دیگر می‌باشد.

• نفوذ در اهداف کامپوزیتی

در سال ۱۹۸۷ چانگ [۳۲] یک مدل آسیب برای کامپوزیت‌های لایه‌ای شامل یک سوراخ مرکزی که تحت تأثیر نیروی کششی قرار داشتند، ارائه داد. این مدل توانایی ارزیابی آسیب کامپوزیت‌ها در جهت‌گیری‌های دلخواه همچنین پیش‌بینی مقاومت کششی نهایی آنها را دارا بود. یک برنامه المان محدود غیرخطی بر اساس این مدل برای ورقه‌های شامل یک سوراخ مرکزی، توسعه داده شد. نتایج تحلیل عددی با داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و تطابق خوبی بین آنها وجود داشت. واگنر [۳۳] در سال ۱۹۹۸، تحقیقات و مطالعات انجام شده در زمینه ضربه در مواد کامپوزیتی را گردآوری نمود. ضربه سرعت پایین، پیش‌بینی تخریب‌های ناشی از ضربه، استحکام باقی‌مانده پس از ضربه، ضربات بالستیک در اجزاء سازه‌های کامپوزیتی و ضربه روی سازه‌های ساندویچی، از مهم‌ترین عناوین این گردآوری می‌باشد. ابریت [۳۴] در سال ۲۰۱۱ موارد مهم و خاص از ضربه در لمینت‌های کامپوزیتی، پانل‌های ساندویچی و همچنین چندلایه‌های الیافی فلزی را ارائه کرده است. اثر ابعاد هدف در میزان تخریب‌های داخلی تیرها و صفحات چندلایه کامپوزیتی

¹ Aluminium nitride (AlN)

² Autodyn

³ Johnson-Cook (JC)

⁴ Johnson-Holmquist (JH)

که تحت ضربه کم‌سرعت و سرعت بالا قرار گرفته بودند، به وسیله کنتول [۳۵] بررسی گردید. با افزایش سفتی خمشی که به وسیله تغییر زاویه الیاف لایه‌ها یا افزایش تعداد لایه‌ها انجام می‌گیرد، مود تخریب اولیه از شکست در لایه پایینی هدف، به تخریب ناشی از تماس موضعی در لایه بالایی آن تبدیل می‌شد. از سوی دیگر، با افزایش ابعاد هدف، تغییر چندانی در مقدار تخریب ناشی از ضربه سرعت بالا ایجاد نمی‌شود. در ادامه کنتول و مورتون [۳۶] اثر جرم گلوله برخوردکننده به اهداف کامپوزیتی را در میزان تخریب‌های ایجاد شده بررسی کردند. در انرژی ضربه ثابت، با کاهش جرم پرتابه، میزان تخریب افزایش یافته و در نتیجه هدف، استحکام کمتری پس از تحمل ضربه خواهد داشت. از سوی دیگر، پرتابه‌های سبکی که با سرعت زیاد به هدف کامپوزیتی برخورد می‌کنند، سبب تخریب‌های موضعی شدیدی شده و بخش بیشتری از انرژی و سرعت در نقطه برخورد به صورت برش الیاف تلف خواهد شد. در ادامه، یک رابطه تجربی برای تخمین میزان تخریب برشی در برخورد پرتابه‌های کروی با سرعت بالا ارائه کردند. اکبری و همکاران [۳۷] مدل نسبتاً ساده‌ای برای تعیین حد بالستیک کامپوزیت‌های الیاف بافته شده ارائه نموده‌اند. مدل مذکور، بر مبنای محاسبه انرژی لازم برای تخریب تارها و تعمیر آن به پارچه بافته شده و در نهایت کامپوزیت با الیاف بافته شده استوار بود. مدل تحلیلی ارائه شده توسط رید و ون [۳۸] مدلی نسبتاً ساده ولی کارآمد است که بر مبنای تشکیل گروه‌های بی‌بعد پیشنهاد شد و تنها یک ضریب تجربی داشته که بر مبنای شکل دماغه (سرتخت یا نیم‌کروی) قابل تعیین می‌باشد. رابطه به‌دست آمده برای سرعت حد بالستیک به شکل صریح بوده و در عین سادگی از دقت خوبی برخوردار است. چان و همکاران [۳۹] با انجام آزمایش‌هایی اثر زاویه قرارگیری الیاف لایه‌ها را در مقاومت بالستیک و مقدار انرژی جذب‌شده کامپوزیت کربن/اپوکسی که تحت شلیک گلوله‌های سرتخت برنزی قرار داشت بررسی نمودند. حل عددی انجام گرفته به کمک کد اجزاء محدود ال‌اس داینا^۱ نیز انطباق خوبی با پاسخ‌های تجربی داشت. گاما و گیلسی [۴۰] نیز مقایسه‌ای بین انرژی جذب‌شده در نفوذ بین آزمون پانچ و شلیک بالستیک پرتابه سرتخت روی کامپوزیت‌های چندلایه ضخیم بافته شده الیاف شیشه انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که میزان

^۱ Ls-dyna

انرژی جذب شده در ضربه سرعت بالا، بیست درصد بیشتر از نفوذ استاتیکی اندازه گیری شد. چنگ و همکاران [۴۱] بر مبنای تعدادی آزمایش و مشاهدات تجربی، به ارائه مدلی برای تحلیل نفوذ پرتابه شبیه ساز ترکش^۱ در هدف های کامپوزیتی ضخیم پرداختند. طبق بررسی مقطع برش خورده هدف پس از عبور پرتابه، سه ناحیه تخریب پانچ شدگی، شکست الیاف و لایه شدگی قابل تفکیک بود. حل تحلیلی نیز متناظر هر یک از مکانیزم های تخریب انجام می گرفت. با فرض مستقل بودن هر یک از مراحل تخریب، معیار تخریب مشخصی به هر یک از آنها نسبت داده می شد.

بررسی رفتار بالستیک اهداف کامپوزیتی بر اساس تئوری انتشار امواج و تعادل انرژی توسط نایک و دوشی [۴۲] و [۴۳] انجام گرفته است. این مطالعه منجر به ارائه مجموعه روابطی برای حل تحلیلی فرایند نفوذ پرتابه سرتخت در کامپوزیت های بافته شده گردید. بر این اساس منابع اتلاف انرژی جنبشی پرتابه عبارتند از: لهیدگی هدف زیر پرتابه سرتخت، برآمدگی هدف زیر پرتابه، فشردگی هدف در ناحیه اطراف پرتابه، کشش در تارها، برش پلاگ، لایه لایه شدگی، شکست ماتریس، اصطکاک میان پرتابه و هدف و تولید گرما در اثر ضربه. در کنار حل تحلیلی و انجام آزمون های بالستیک، اثر بعضی از پارامترها مانند سرعت اولیه، قطر و جرم پرتابه و ضخامت هدف در پاسخ بالستیک بررسی گردید. تحقیقات مشابهی توسط نیک و شریانو [۴۴]-[۴۶] انجام گرفت. مانزلا و همکاران [۴۷] تأثیر ابعاد پانچ و نمونه را در فرآیند نفوذ استاتیکی پانچ برشی، در کامپوزیت شیشه/اپوکسی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که شکست الیاف در راستای ضخامت با یک زاویه خاص رخ می دهد که این زاویه مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است. ایکن و همکاران [۴۸] تأثیر تغییر شعاع ضربه زننده های سرنیم کروی را در برخورد با کامپوزیت شیشه/اپوکسی مورد مطالعه قرار دادند. بعد از انجام آزمایش برخورد سرعت پایین بر روی نمونه ها، استحکام فشاری نمونه ها با آزمایش استاندارد بررسی شد. مشاهده شد که در انرژی ضربه یکسان، حداکثر نیروی تماسی و همچنین بیشترین بار آستانه خرابی در ضربه زننده با شعاع بیشتر روی می دهد. در تمامی موارد، استحکام فشاری بعد از ضربه^۲، با افزایش انرژی ضربه، کاهش و با افزایش قطر

¹ Fragment Simulating Projectile (FSP)

² Compression After Impact (CAI) strength

ضربه‌زننده، افزایش می‌یابد. پل و همکاران [۴۹] تاثیر افزودن نانوذرات خاک رس بر چندلایه‌های کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داد که در آزمایش بالستیک با پرتابه سرتخت، وجود ذرات نانو سبب افزایش قابلیت جذب انرژی و همچنین سطح آسیب دیده هدف می‌شود. گارسیا-کاستیلو و همکاران [۵۰] به بررسی تحلیلی رفتار بالستیکی ورق‌های کامپوزیتی ساخته شده از شیشه/اپوکسی (الیاف بافته شده) پرداختند. مکانیزم اصلی جذب انرژی، در سرعت‌های زیر حد بالستیک، گسیختگی الیاف و در سرعت‌های بالای حد بالستیک، حرکت مخروط و در سرعت حد بالستیک، گسیختگی و تغییر شکل الاستیک الیاف در نظر گرفته شد. در سال ۲۰۱۵، لانگ [۵۱] به بررسی عددی ضربه بالستیک بر روی اهداف کامپوزیتی با ماتریس پلیمری پرداخت. او یک مدل المان محدود سه‌بعدی کامل برای شبیه‌سازی رفتار کامپوزیت ارائه داد و اثرات اندازه و سرعت پرتابه، نحوه چیدمان لایه‌ها و معیار شکست مورد استفاده در پاسخ ضربه بالستیک را بررسی کرد. سویدان و همکاران [۵۲] به بررسی تجربی و عددی یک نمونه زره‌پوش چندلایه متشکل از فیبر سیمان، پارچه کولار و فولاد پرداختند. آنها برای آزمایش‌های تجربی از گلوله mm ۹FMJ و برای شبیه‌سازی نیز از نرم‌افزار انسیس^۱ اتوداین استفاده کردند. در سال ۲۰۱۶ نایاک و همکاران [۵۳] به تحلیل عددی و تجربی ضربه بالستیک یک زره کامپوزیتی از جنس الیاف آرامید و اپوکسی، تحت برخورد پرتابه mm ۷/۶۲ پرداختند. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود پارامترهای سرعت باقی‌مانده، مدت زمان تماس پرتابه با هدف و سرعت حد بالستیک محاسبه شد. همچنین در این تحقیق از فرایند برخورد پرتابه به هدف، توسط یک دوربین سرعت بالا عکس‌برداری شد. بودپاتی و همکاران [۵۴] به مدل‌سازی تجربی و عددی کامپوزیت شیشه/اپوکسی تحت برخورد مایل و مستقیم پرتابه پرداختند. از شبیه‌سازی عددی جهت تخمین سرعت باقی‌مانده پرتابه و شکل آسیب وارد شده به هدف کامپوزیتی استفاده شد. این شبیه‌سازی که توسط نرم‌افزار آباکوس صورت‌گرفت نشان داد سرعت باقی‌مانده پرتابه با افزایش زاویه برخورد و ضخامت هدف کاهش می‌یابد. در این پژوهش همچنین نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شد و از تطابق خوبی با آنها برخوردار بود.

^۱ Ansys

• نفوذ در اهداف سرامیک/کامپوزیت

کوکرون و سانچز [۵۵] یک مدل بسیار ساده یک بعدی و کاملاً تحلیلی از ضربه بالستیک در برابر زره سرامیکی/کامپوزیتی ارائه دادند. در این تحقیق، مدل به سه فاز نفوذی شامل سرامیک سالم، سرامیک شکسته شده و تغییرات اولیه لایه کامپوزیت و شکست تقسیم شد. این مدل همچنین با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه شد و مطابقت نسبتاً خوبی برای سرعت و طول باقی‌مانده پرتابه در بیشتر موارد مقایسه شده وجود داشت. هرچند در نزدیکی سرعت حد بالستیک (جایی که جزئیات شکست دارای اهمیت می‌باشد) اختلاف وجود داشت. از آنجایی که شکست در مدل تحلیلی و رویکردهای المان محدود کاملاً متفاوت است، این اختلاف انتظار می‌رفت. شکریه و جوادپور [۵۶] به تحلیل نفوذ پرتابه به یک زره سرامیکی/کامپوزیتی پرداختند. در این تحقیق زره با ضخامت ثابت مورد بررسی قرار گرفت. این زره شامل دو لایه می‌باشد که یک لایه از جنس سرامیک کاربید برون و لایه دیگر از جنس کامپوزیت کولار^۱ ۱۴۹ است. با استفاده از نرم‌افزار انسیس/ال‌اس داینا سرعت حد بالستیک این زره به دست آمد و معادله هترینگتون^۲ (ضخامت بهینه لایه‌ها) برای ضخامت ثابت زره صحت‌سنجی شد.

مشتاقیان و واحدی [۵۷] یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های سرعت بالا به اهداف سرامیک/کامپوزیت ارائه دادند که پس از تأمین داده‌های ورودی می‌توان سرعت باقی‌مانده، جرم باقی‌مانده، سرعت لحظه‌ای پرتابه و عمق نفوذ در هر لحظه را به‌عنوان خروجی از مدل استخراج نمود. این مدل بر اساس معادلات انرژی و مومنتوم تیت، الکسیوسکی و کوکرون بیان شده است. در این مدل، پدیده نفوذ طی دو فاز بررسی شد. در فاز اول، مخروط سرامیکی در حال شکل‌گیری بوده و هیچ‌گونه نفوذی در الیاف وجود نداشت. در فاز دوم، مخروط سرامیکی شکسته شده به همراه پرتابه به الیاف نفوذ کرد. نتایج نشان داد که مدل تحلیلی ارائه شده در این مقاله حتی برای پرتابه‌ها با هندسه و جرم بسیار کوچک نیز پاسخ‌های قابل قبولی ارائه می‌داد؛ این در حالی است که مدل تحلیلی کوکرون توانایی ارائه پاسخ صحیح به این مدل پرتابه‌ها را نداشت. کریشان و همکاران

¹ Kevlar 49

² Hetherington equation

[۵۸] به شبیه‌سازی عددی زره سرامیکی/کامپوزیتی تحت ضربه بالستیک پرداختند. در این تحقیق از تحلیل المان محدود صریح استفاده شد و چگونگی ساخت مدل‌ها و صحت‌سنجی نتایج تشریح شد. فعلی و عسگری [۵۹] به شبیه‌سازی المان محدود زره سرامیکی/کامپوزیتی تحت ضربه بالستیک پرداختند. در این تحقیق که بر اساس کد ال‌اس داینا انجام شد، یک شبیه‌سازی المان محدود جدید از سوراخ شدن هدف‌های سرامیکی/کامپوزیتی توسط پرتابه‌های استوانه‌ای تنگستنی، ارائه شد. نتایج نشان داد که هنگام برخورد پرتابه به صفحه سرامیک، یک تکه مخروطی شکل از سرامیک شکسته می‌شود و نیم زاویه مخروط سرامیک با افزایش سرعت اولیه کاهش می‌یابد. علاوه بر این بشقابی شدن لایه‌های کامپوزیت در سرعت‌های برخورد بالا و لایه‌لایه‌شدگی لایه‌ها در نزدیکی سرعت حد بالستیک کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۴ سیگنتی و همکاران [۶۰] به بررسی اثر اصطکاک و استحکام ماده واسط سرامیک/کامپوزیت در فرایند نفوذ و برخورد پرداختند. همچنین برخورد زاویه‌دار پرتابه به سرامیک نیز در این تحلیل مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۶ لیو و همکاران [۶۱] به بررسی برخورد سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های سرامیکی با صفحه پشتیبان ساندویچی پرداختند. ترکیب ساندویچی استفاده‌شده شامل یک لایه رویی تیتانیوم آلیاژی، لایه میانی الیاف آرامیدی UHMWPE و یا الیاف کربن و لایه زیرین آلیاژ آلومینیوم و یا تیتانیوم می‌باشد. در تحلیلی که به صورت عددی و تجربی انجام شد کارایی بالستیکی ترکیب‌های مختلف این پنل ساندویچی باهم مقایسه شد. تریا و همکاران [۶۲] یک مدل عددی توسط نرم‌افزار ال‌اس داینا جهت شبیه‌سازی رفتار بالستیکی هدف سرامیک/کامپوزیت متشکل از یک ورق سرامیک آلومینا یا کاربید برون و صفحه پشتیبان از جنس الیاف کولار در برخورد با پرتابه‌های واقعی ارائه دادند.

۱-۲- تعریف پایان نامه

در این پایان نامه، نفوذ سرعت بالا نفوذکننده با دماغه‌ای مخروطی به هدف سرامیکی/کامپوزیتی با چهار ضخامت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیرات تغییر ضخامت سرامیک و کامپوزیت روی سرعت حد بالستیک به دو روش آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود.

• شبیه‌سازی عددی: در بخش عددی از این تحقیق از کد صریح ال‌اس داینا برای مدل‌سازی ضربه بالستیک به یک ورق دو لایه استفاده خواهد شد. هدف^۱ در این پژوهش یک پانل سرامیک/کامپوزیت می‌باشد که سرامیک رویی از جنس آلومینا و کامپوزیت پشتیبان از جنس الیاف شیشه است. پس از دستیابی به یک مدل معتبر شبیه‌سازی برای ضخامت‌های مختلف هدف و پرتابه‌های متفاوت انجام خواهد شد.

• آزمایش‌های تجربی: در بخش تجربی برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی با پیاده‌سازی آزمون ضربه بالستیک به هدف سرامیک/کامپوزیت به کمک دستگاه تفنگ گازی، هندسه هدف پس از ضربه، مکانیزم نفوذ و هندسه گلوله مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. پس از دستیابی به یک مدل عددی معتبر در ادامه شبیه‌سازی دینامیکی برای چند پرتابه با کالیبر کوچک و متوسط، سرعت حد بالستیک^۲ و انرژی بالستیک مخصوص^۳ مورد محاسبه قرار می‌گیرد. سپس منحنی سرعت خروجی بر حسب سرعت برخورد برای اهداف به دست خواهد آمد. همچنین سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت لایه سرامیک و کامپوزیت نیز به دست خواهد آمد.

گام اول در مطالعه هر پدیده‌ای، شناخت و آشنایی با مفاهیم اولیه آن پدیده است، از این رو در فصل دوم به بیان و توضیح مفاهیم اولیه مکانیک برخورد و نفوذ و همچنین آشنایی با سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها پرداخته می‌شود. در فصل سوم، به معرفی مواد اولیه، ساخت نمونه‌های آزمایش و نحوه انجام آزمایش‌های تعیین خواص و آزمایش‌های نفوذ پرداخته می‌شود. در فصل چهارم، مراحل مدل‌سازی عددی فرآیند نفوذ پرتابه در هدف سرامیک/کامپوزیت تشریح می‌گردد. نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده در فصل پنجم ارائه و سپس

¹ Target

² Ballistic limit

³ Specific ballistic energy

پیرامون آنها بحث می‌گردد. نهایتاً در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی جهت ادامه فعالیت‌های پژوهشی آورده می‌شود.

۱-۳- ضرورت و نوآوری پژوهش

مقاومت در برابر برخوردهای سرعت بالا یکی از پارامترهای مهم در طراحی زره است. یک زره زمانی کارایی لازم را دارد که خصوصیتی همچون چگالی پایین، مقاومت به شکست در برابر تنش‌های کششی بزرگ و مدول برشی بالا به منظور عدم نفوذ را داشته باشد. زره‌های تک‌لایه فلزی به دلیل بالا بودن چگالی، همه‌ی خواص فوق را ارضا نمی‌کنند اما مواد سرامیکی غیر از مقاومت در برابر تنش کششی، بقیه موارد را پوشش می‌دهد. از این رو محققین تلاش می‌کنند زره‌های ترکیبی از سرامیک در جلو^۱ و لایه‌ای از کامپوزیت یا فلز به‌عنوان لایه پشتیبان^۲ طراحی کنند که در حالت بهینه خصوصیات یک زره کارآمد را دارا باشد. به همین دلیل زره‌های سرامیک/کامپوزیت به دلیل مقاومت بالا در برابر نفوذ پرتابه‌های کالیبر کوچک و متوسط، در سال‌های اخیر به صورت وسیع به‌عنوان جلیقه و پانل ضدگلوله^۳ مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پایان‌نامه، فرایند برخورد و نفوذ سرعت بالا برای اهداف سرامیک/کامپوزیت ارائه شده است. در بخش تجربی، پس از آزمون نفوذ، تکه‌های خرد شده سرامیک جمع‌آوری و در کنار هم چیده شد و مکانیزم‌های شکست سرامیک به وضوح مشخص شد. در قسمت عددی نیز یک شبیه‌سازی المان محدود جدید از سوراخ شدن هدف‌های سرامیکی/کامپوزیتی توسط پرتابه‌های مخروطی فولادی، AK-47 (کالیبر ۷/۶۲) و برتا (کالیبر ۹) ارائه شد و پیرامون نتایج به‌دست آمده بحث صورت گرفت.

¹ Strike face

² Backing

³ Bulletproof

فصل ۲ ادبیات موضوع (ضربه بالستیک و کامپوزیت)

گام اول در مطالعه هر پدیده‌ای، شناخت و آشنایی با مفاهیم اولیه آن پدیده است. از این‌رو در این فصل مطالب از دیدگاه علم بالستیک، بررسی خصوصیات پرتابه و هدف، تعاریف اصطلاحات علم بالستیک و در نهایت آشنایی با سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها و خصوصیات آنها بیان می‌گردد. طی دهه‌های گذشته گام‌های بلندی در زمینه شناسایی و درک فرآیندهای مختلفی که در مسائل برخورد و نفوذ رخ می‌دهد، برداشته شده است که باعث پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در توانایی پیش‌بینی فرآیند نفوذ گردیده است. در این فصل خلاصه‌ای از نتایج تحقیقات بیان خواهد شد.

۲-۱- تعاریف اولیه

- علم بالستیک^۱: علمی است که به مطالعه و بررسی ضربه، حرکت پرتابه و نحوه رفتار گلوله می‌پردازد. سه واژه کلی برای زمانی که یک شی به هدف اصابت می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

¹ Ballistics

✓ پرتابه^۱: جسمی است که به منظور داشتن کارایی بالستیکی طراحی شده و دارای ساختاری است که عملیات بالستیکی خاصی را پشتیبانی می‌کند.

✓ نفوذکننده^۲: جسمی است که طراحی آن به منظور برخورد و نفوذ به داخل هدف است.

✓ برخوردکننده^۳: هر جسمی که هدفش تنها وارد کردن ضربه است و هیچ‌گونه محدودیتی در نفوذ یا عدم نفوذ ندارد.

• هدف: کوچک‌ترین واحدی که از نظر عملکردی یا ساختاری مستقل است و وظیفه آن مقاومت در برابر نفوذ پرتابه است. هدف، کل آن جسمی است که توسط پرتابه مورد اصابت قرار می‌گیرد، نه فقط ناحیه نفوذ و عبور پرتابه.

• المان هدف^۴: قسمتی از هدف است که مورد ضربه قرار می‌گیرد.

• نفوذ^۵: به معنای داخل شدن پرتابه در هر ناحیه از هدف است.

• سوراخ شدن^۶: به معنی عبور پرتابه از داخل المان هدف است.

• جایگیری (جایدهی)^۷: به معنای توقف کامل پرتابه هنگام تماس با هدف است.

• کمانه کردن^۸: زمانی است که پرتابه از هدف منحرف می‌شود، بدون اینکه متوقف شود یا نفوذ کند.

• آسیب هدف^۹: اشاره به هر تغییر دائمی ایجاد شده در هدف دارد. بهتر است که این واژه از واژه عدم کارایی^{۱۰} متمایز گردد. عدم کارایی به معنای از بین رفتن ساختار هدف بر اثر آسیب وارده است.

¹ Projectile

² Penetrator

³ Striker

⁴ Target element

⁵ Penetration

⁶ Perforation

⁷ Embedment

⁸ Ricochet

⁹ Target damage

¹⁰ Dysfunction

• عمق نفوذ^۱: طول حفره ناشی از نفوذ پرتابه یا ضربه‌زننده در راستای حرکت آن در درون هدف، عمق نفوذ نامیده می‌شود.

• سرعت حد بالستیک^۲: حداقل سرعت لازم جهت نفوذ کامل و عبور پرتابه از هدف [۷].

• سرعت باقی‌مانده^۳: عبارت است از سرعت پرتابه پس از نفوذ کامل و خارج شدن از هدف.

• زاویه برخورد^۴: عبارت است از زاویه بین راستای پرتابه و عمود بر سطح هدف در زمان برخورد. در برخورد قائم یا مستقیم این زاویه صفر درجه بوده و برای پرتابه با برخورد مایل، این زاویه بیش از زاویه صفر درجه می‌باشد.

• تفنگ گازی^۵: تجهیزاتی است برای شلیک پرتابه با سرعت‌های بسیار زیاد که دارای انواع مختلفی با مکانیزم خاص خود می‌باشد (شکل ۲-۱). در شکل ۲-۲ طرح‌واره یک تفنگ گازی تک مرحله‌ای نمایش داده شده است. در این دستگاه، پرتابه با جرم کم، با استفاده از گاز فشرده در لوله تفنگ به جلو رانده می‌شود. گاز فشرده با فشار زیاد به درون مخزن فرستاده شده و به وسیله تنظیم کننده فشار، به فشار کنترل شده می‌رسد. با تغییر فشار گاز، سرعت اولیه پرتابه تنظیم می‌شود. فشار به کمک یک شیر سلونوئیدی آزاد می‌شود. پرتابه از درون لوله تفنگ گذشته و در آستانه خروج از روی یک دستگاه سرعت‌سنج عبور می‌کند. دستگاه سرعت‌سنج شامل یک دیود ساطع کننده پرتو نور منفرد و یک آشکارساز پرتو نور است. پرتابه که طول مشخصی دارد، پرتو نور را قطع کرده و سرعت پرتابه با استفاده از مدت زمان قطع شدن اندازه‌گیری شده و با حسگر محاسبه می‌شود.

¹ Penetration depth

² Ballistic limit velocity

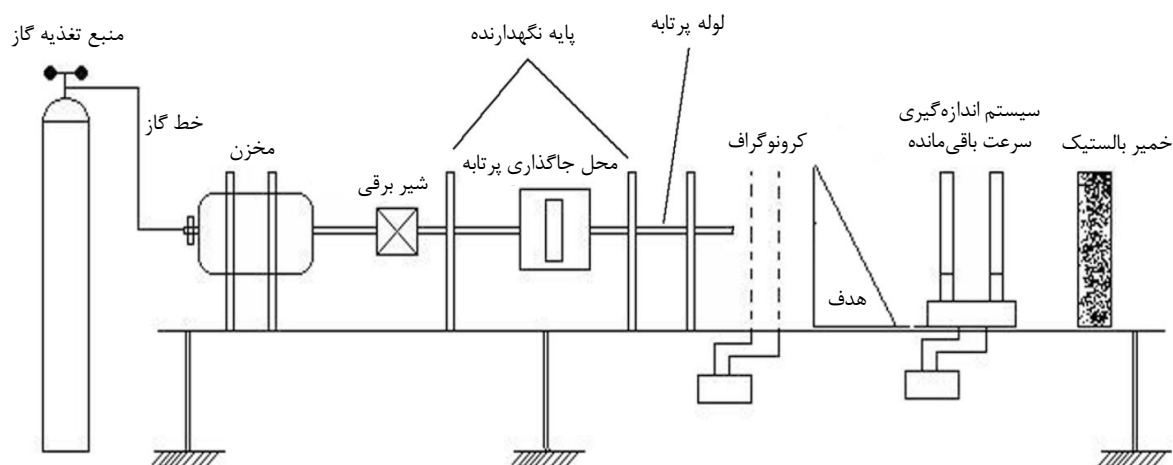
³ Residual velocity

⁴ Impact angle

⁵ Gas gun

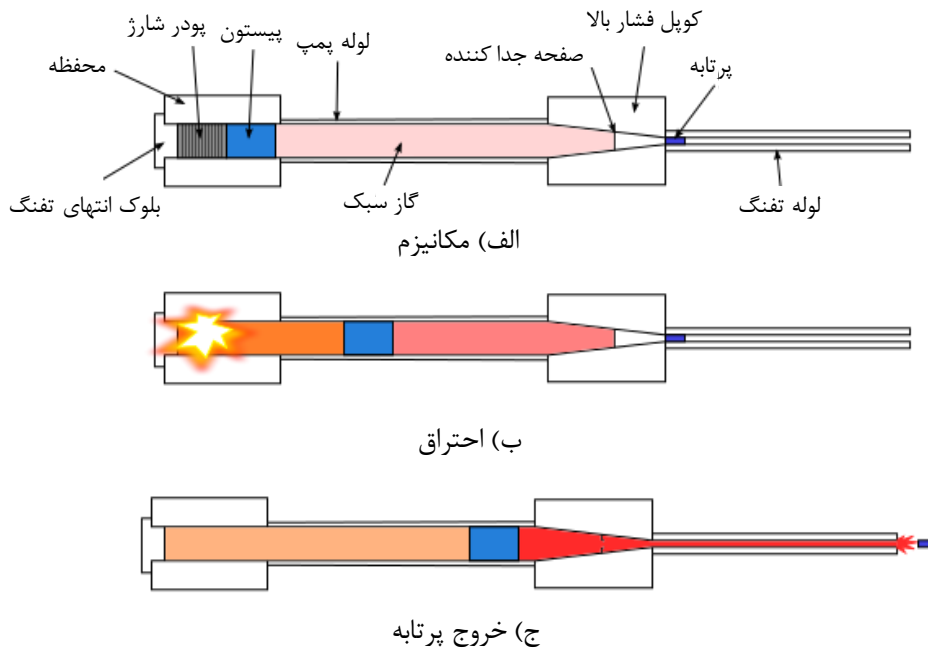


شکل ۱-۲ دستگاه تفنگ گازی سبک [۶۳]



شکل ۲-۲ طرحواره تفنگ گازی تک مرحله‌ای [۶۴]

یکی دیگر از انواع این تفنگ‌ها که به تفنگ گاز سبک دو مرحله‌ای مشهور می‌باشد علاوه بر مکانیزم گفته شده در قسمت قبل، شامل پودر شارژ نیز می‌باشد و با استفاده از نیروی آزاد شده توسط انفجار، سبب رسیدن پرتابه به سرعت‌های تا حدود ۱۰ کیلومتر بر ثانیه قبل از برخورد به هدف می‌شود (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ طرح‌واره تفنگ گازی دو مرحله‌ای [۶۵]

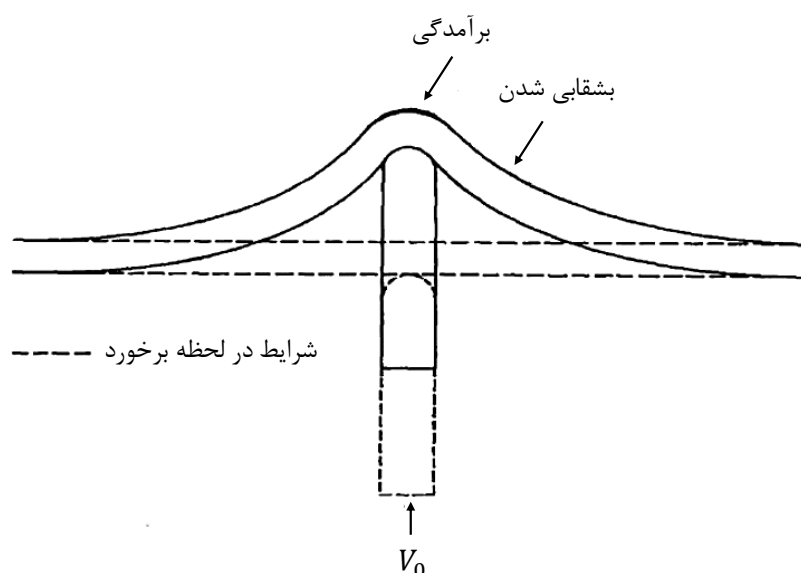
- خمیر بالستیک: ماده‌ای خمیری شکل جهت نگه داشتن پرتابه‌های خارج شده از هدف. از خمیر بالستیک برای محاسبه میزان برآمدگی صفحه پشتیبان در اهداف دو یا چندلایه نیز استفاده می‌شود. همچنین در برخی موارد، خمیر بالستیک جهت نگهداری و عدم پخش شدن قطعات سرامیک در اهداف سرامیکی نیز استفاده می‌شود.
- کرونوگراف: تجهیزاتی جهت اندازه‌گیری زمان با دقت بسیار بالا.

۲-۲- مکانیزم‌های شکست هدف

تغییر شکل دائمی ایجاد شده در هدف که از برخورد پرتابه ایجاد می‌گردد، ممکن است شامل چندین فرآیند مکانیکی جدا یا ترکیبی باشد. همان‌طور که در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود، حالت‌های گسیختگی نفوذ پرتابه (تا قبل از سوراخ شدن) شامل دو نوع جابجایی عرضی المان‌های نازک به علت تغییر شکل پلاستیک است:

الف) در زیر محل برخورد تغییر شکلی به وجود می‌آید که برآمدگی یا شکم دادن^۱ نامیده می‌شود که در آن المان هدف به شکل دماغه پرتابه درمی‌آید.

ب) تغییر شکلی که به دلیل خمش به وجود می‌آید و بشقابی شدن^۲ نامیده می‌شود. این تغییر شکل ممکن است تا فواصل قابل توجهی از ناحیه ضربه پیشروی کند.



شکل ۲-۴ تغییر شکل دائمی یک هدف نازک [۶۶]

اگر ضخامت المان هدف افزایش پیدا کند، حالت‌های گسیختگی کمتر می‌شود و تغییر شکل به وجود آمده شامل جابجایی‌هایی است که تمایل دارد سطوح جلویی و عقبی هدف را تحت تأثیر قرار دهد. تغییر شکل به وجود آمده در هدف‌های بسیار ضخیم قیفی شدن^۳ (ایجاد حفره) نام دارد.

در مورد اهداف دارای ضخامت نازک یا متوسط، گسیختگی همراه با شکست است، یعنی پرتابه می‌تواند به طور کامل در هدف نفوذ نماید. این گسیختگی‌ها به دلیل اثر متقابل چندین مکانیزم با یک عامل غالب است. نوع گسیختگی بستگی به خواص مواد، خصوصیات هندسی و سرعت برخورد دارد. معمول‌ترین انواع گسیختگی که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، به صورت زیر است:

¹ Bulging

² Dishing

³ Cratering

- شکست ناشی از انعکاس موج تنش اولیه در شکل ۲-۵-الف مشخص است. این نوع شکست زمانی اتفاق می‌افتد که شدت موج تنش از استحکام کششی نهایی قوی‌تر است و معمولاً اهدافی که ضعیف هستند و یا دارای چگالی پایینی می‌باشند، دچار این نوع شکست می‌شوند.
- شکل ۲-۵-ب معرف شکست شعاعی است و معمولاً زمانی رخ می‌دهد که هدف مورد نظر دارای مقاومت کششی کمتری نسبت به مقاومت فشاری است؛ مانند اهداف ترد مثل سرامیک.
- اسپالینگ^۱ در شکل ۲-۵-ج مشخص است و عبارت است از گسیختگی کششی ماده در اثر انعکاس موج فشاری از سطح پشتی هدف. اسپالینگ یک پدیده معمول در بارگذاری انفجاری است. اسکینگ^۲ نیز از نظر ظاهر به همین شکل است با این تفاوت که با تغییر شکل‌های زیاد و ناهماهنگی در سطح همراه است.
- در شکل ۲-۵-د گسیختگی پلاگینگ^۳ مشخص شده است و زمانی است که قسمتی از هدف که تقریباً هم‌قطر با پرتابه استوانه‌ای است، جدا می‌شود و همراه پرتابه به جلو حرکت می‌کند. در این حالت گسیختگی به دلیل تنش برشی بزرگی است که اطراف پلاگ به وجود آمده است. پلاگینگ معمولاً زمانی رخ می‌دهد که یک پرتابه سر تخت به یک ورق سخت با ضخامت کم یا متوسط برخورد می‌کند.
- شکل ۲-۵-ه و شکل ۲-۵-و نشان‌دهنده پتالینگ یا گلبرگی شدن^۴ است و به دلیل تنش‌های کششی شعاعی و محیطی بزرگ به وجود می‌آید. این تغییر شکل نتیجه یک لنگر خمشی است که با حرکت رو به جلوی ماده هدف در امتداد پرتابه به وجود می‌آید.
- خردشدگی^۵ نوعی گسیختگی است که معمولاً در اثر برخورد پرتابه با اهداف ترد به وجود می‌آید و در شکل ۲-۵-ز مشخص است.
- شکل ۲-۵-ح توسعه حفره نرم^۶ را نشان می‌دهد که در اثر برخورد پرتابه با هدف نرم و ضخیم روی می‌دهد.

¹ Spalling

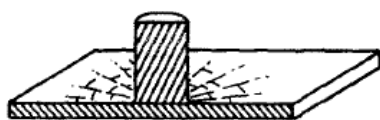
² Scabbing

³ Plugging

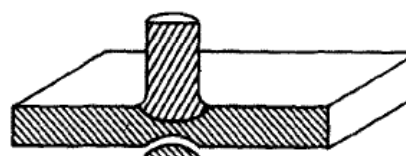
⁴ Petaling

⁵ Fragmentation

⁶ Ductile hole enlargement



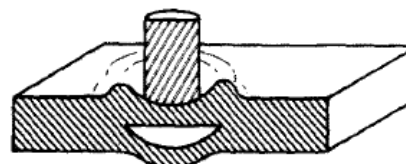
ب) شکست شعاعی در یک هدف



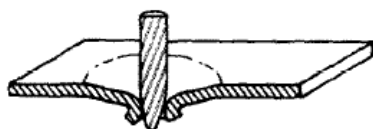
الف) شکست ناشی از موج تنش اولیه



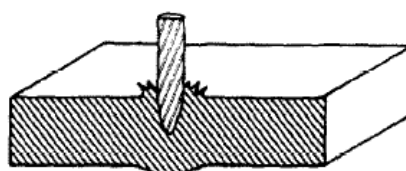
د) گسیختگی پلاگینگ



ج) گسیختگی اسپالینگ



و) گسیختگی پتالینگ



ه) گسیختگی پتالینگ



ح) توسعه حفره نرم



ز) خرد شدن

شکل ۲-۵ انواع حالت‌های شکست در مسائل برخورد [۶۶]

به طور کلی در پدیده نفوذ دو بعد مهم وجود دارد، ضخامت هدف و شعاع پرتابه که برابر است با شعاع ناحیه بارگذاری در هدف مذکور؛ بنابراین، در یک مسئله برخورد که پرتابه به صورت عمودی به هدف برخورد می‌کند، زمانی هدف ضخیم نامیده می‌شود که در آن نسبت ضخامت هدف به شعاع پرتابه بزرگ‌تر از یک باشد و زمانی که این مقدار کمتر از یک باشد، هدف را نازک می‌نامند. نسبت ضخامت هدف به شعاع پرتابه در مواردی که پرتابه با زاویه‌ای غیر از ۹۰ درجه به هدف برخورد می‌کند (با تغییر زاویه برخورد)، تغییر می‌کند [۶۶].

۲-۳- پارامترهای مؤثر در نفوذ

در فرایند نفوذ، پارامترهای جنس پرتابه و هدف، جرم و قطر پرتابه، خواص مکانیکی هدف و پرتابه، ضخامت هدف، زاویه برخورد پرتابه به هدف، یک یا چندلایه بودن هدف و نحوه قرارگیری لایه‌ها دارای اهمیت است که در ادامه، اثرات این پارامترها تشریح شده است.

۲-۳-۱ پرتابه‌ها

• پارامترهای پرتابه

به منظور اینکه پرتابه بر ماده هدف غلبه کند و بتواند آن را کنار بزند، باید تنش زیادی توسط ضربه پرتابه در محل برخورد به وجود بیاید. مهم‌ترین پارامترهای پرتابه که در نحوه عملکرد آن مؤثر هستند، عبارتند از: سرعت، جنس ماده سازنده و مشخصات هندسی.

الف) شکل هندسی پرتابه

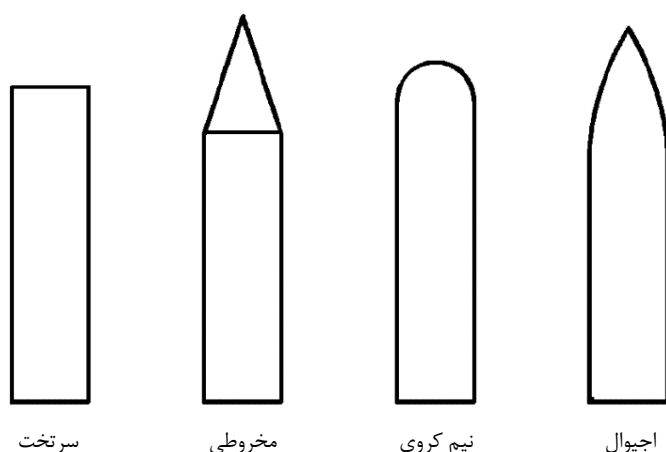
شکل هندسی پرتابه در تعیین حالت گسیختگی و همچنین مقاومت به نفوذ هدف، تأثیر زیادی دارد. مطابق شکل ۲-۶ انواع دماغه‌های متداول عبارتند از: دماغه سرتخت^۱، دماغه مخروطی^۲، دماغه نیمکره^۳، دماغه اجیوال^۴. در پرتابه‌های نوک‌تیز (مخروطی یا اجیوال با زاویه دماغه کم) گسیختگی هدف حول محور پرتابه متمرکز است. در پرتابه‌های سرتخت، معمولاً حالت گسیختگی به صورت پلاگینگ است. برای تعیین دقیق حالت گسیختگی باید رابطه بین شکل هندسی و خواص ماده مشخص شود [۷].

^۱ Blunt

^۲ Conical

^۳ Hemispherical

^۴ Ogival



شکل ۲-۶ شکل دماغه‌ی پرتابه‌های مختلف

(ب) جنس پرتابه

پرتابه‌ها از نظر جنس به دو دسته‌ی صلب و شکل‌پذیر تقسیم می‌شوند. در پرتابه‌های صلب، از تغییر شکل پرتابه بعد از برخورد صرف نظر می‌شود؛ که این پرتابه‌ها معمولاً از فولادهای آلیاژی با درصد بالایی از عناصر آلیاژی، مانند تنگستن، ساخته شده‌اند. پرتابه‌های شکل‌پذیر، پس از برخورد با هدف، تغییر شکل می‌دهند که معمولاً از جنس آلومینیوم و مس ساخته می‌شوند. در پرتابه‌های میله‌ای بلند، معمولاً فرسایش و قارچی شدن پرتابه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

- سرعت برخورد

به دلیل اهمیت عامل سرعت برخورد و تأثیرگذاری زیاد آن در به وجود آمدن پدیده‌های مختلف در فرآیند نفوذ، تقسیم‌بندی مسائل ضربه بر اساس محدوده سرعت اولیه از اهمیت خاصی برخوردار است. به طور کلی مسائل برخورد را از نقطه نظر سرعت می‌توان به پنج دسته کلی طبقه‌بندی کرد [۶۷]:

✓ محدوده سرعت پایین (صفر تا ۲۵ m/s): این بازه سرعت در محدوده سرعت نهایی پرتابه‌های سقوط آزاد است؛ بنابراین، در آزمایشگاه می‌توان با دستگاه چکش افتان^۱ این سرعت را تأمین نمود.

^۱ Drop hammer apparatus

✓ محدوده سرعت پایین تر از سرعت شلیک جنگ افزارها^۱ (۲۵ m/s تا ۵۰۰ m/s): این محدوده سرعت زیر سرعت گلوله های جنگی است، بنابراین، در آزمایشگاه می توان با دستگاه تفنگ گازی تک مرحله ای یا وسایل آزمایشگاهی دیگر این سرعت را به وجود آورد.

✓ محدوده سرعت شلیک جنگ افزارها^۲ (۵۲۵ m/s تا ۱۳۰۰ m/s): معمول ترین وسایلی که به کمک آنها می توان سرعت پرتابه ها را به این محدوده رساند، تفنگ های جنگی و دستگاه تفنگ گازی دو مرحله ای هستند.

✓ محدوده سرعت بالاتر از سرعت شلیک جنگ افزارها^۳ (۱۳۰۰ m/s تا ۳۰۰۰ m/s): در این محدوده می توان توسط ترکش های موشکی یا تفنگ گازی دو مرحله ای به این سرعت دست یافت.

✓ سرعت های بالاتر از ۳۰۰۰ متر بر ثانیه محدوده سرعت های بسیار بالا^۴ است. در این محدوده از تفنگ های گازی دو و یا سه مرحله ای استفاده می شود.

• زاویه برخورد

نوع برخورد از نظر زاویه را می توان به برخورد قائم و برخورد مایل، تقسیم بندی کرد. در برخورد قائم، زاویه برخورد برابر با صفر درجه بوده و در حالی که این زاویه، در برخورد مایل کمتر از ۹۰ درجه می باشد. نوع زاویه برخورد پرتابه به هدف در حد بالستیک تأثیرگذار بوده و در برخورد مایل، سرعت حد بالستیک در مقایسه با برخورد قائم بیشتر است.

۲-۳-۲ اهداف

عوامل مهمی که در نحوه عملکرد اهداف در مقابله با پرتابه ها مؤثر هستند عبارتند از: جنس، ضخامت، خواص مکانیکی، لایه لایه یا یکپارچه بودن و نحوه چیدمان لایه ها.

• جنس اهداف

¹ Subordnance velocity range

² Ordnance velocity range

³ Ultraordnance velocity range

⁴ Hypervelocity range

جنس هدف معرف پارامترهایی چون چگالی، تنش تسلیم، تنش نهایی و سفتی هدف می‌باشد که هر کدام به نوعی در مقاومت به نفوذ پرتابه مؤثر است. چگالی هدف با انرژی دینامیکی مصرفی در فرایند نفوذ، رابطه مستقیم دارد و با افزایش چگالی، کار دینامیکی افزایش می‌یابد. در بررسی فرایند نفوذ، در لحظه شکست، فرض می‌شود که تنش ایجاد شده در هدف برابر با تنش تسلیم می‌باشد. در فرایند نفوذ با نرخ کرنش بالا، از تنش تسلیم دینامیکی استفاده می‌شود که اثر این نرخ کرنش را به صورت ضریبی در تنش استاتیکی اعمال می‌کنند.

• ضخامت هدف

از دیگر پارامترهای مؤثر در فرایند نفوذ، ضخامت هدف می‌باشد که با افزایش ضخامت هدف، مقاومت بالستیکی افزایش می‌یابد. نسبت ضخامت هدف به قطر پرتابه از جمله عوامل مؤثر در بررسی تحلیل نفوذ و انتخاب مدل نفوذ می‌باشد. در دسته‌بندی اهداف از نظر ضخامت، یکی از معیارهای اساسی، نسبت ضخامت هدف به قطر پرتابه است. معمولاً اهداف را بر اساس ضخامت به صورت زیر طبقه‌بندی می‌کنند:

- ✓ هدف نیمه بی‌نهایت^۱: هنگامی است که مرز پشتی هدف تأثیری بر فرایند نفوذ ندارد.
- ✓ هدف ضخیم^۲: زمانی هدف ضخیم نامیده می‌شود که تأثیر مرزهای پشتی آن، فقط هنگامی که پرتابه به داخل هدف نفوذ کرد، مشاهده شود.
- ✓ هدف متوسط^۳: اگر سطح پشتی هدف بر فرایند تغییر شکل طی نفوذ پرتابه، تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد، به آن هدف متوسط می‌گویند.
- ✓ هدف نازک^۴: هنگامی است که گرادیان تنش و تغییر شکل در راستای ضخامت هدف به قدری کم باشد که قابل صرف‌نظر است؛ به عبارت دیگر اگر نسبت ضخامت هدف به قطر پرتابه کوچک باشد، به آن، هدف نازک گفته می‌شود. در صورتی که این مقدار خیلی کوچکتر از یک باشد، هدف مورد نظر، هدف خیلی نازک نامیده می‌شود. در اهداف نازک، شکست ماده بیشتر از نوع پتالینگ است. در اهداف متوسط، شکست از نوع

¹ Semi-infinite target

² Thick target

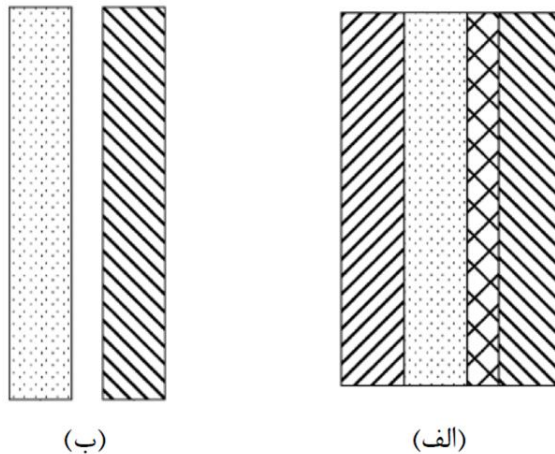
³ Intermediate target

⁴ Thin target

بالجینگ بوده و به همراه اسکابینگ و یا تشکیل پلاگ می‌باشد. در اهداف ضخیم نیز معمولاً شکست از نوع پلاگینگ می‌باشد.

• اهداف چندلایه

به طور کلی دو روش در استفاده از اهداف چندلایه وجود دارد، روش اول حالتی است که لایه‌ها بدون فاصله در کنار یکدیگر قرار دارند و دیگری زمانی است که لایه‌ها با فاصله (فاصله هوایی) کنار هم قرار داده می‌شوند (شکل ۷-۲). در اهداف چندلایه که لایه‌ها با هم در تماس هستند، لایه‌ها روی هم تأثیر می‌گذارند. ولی در هدف‌های با فاصله، این تأثیر صرفاً به واسطه برخورد پتال یا پلاگ ایجاد شده در لایه قبلی با لایه بعدی بوده و کمتر از حالت اول است. عملکرد بالستیکی هدف‌های یکپارچه و چندلایه متفاوت است و بسته به جنس و ضخامت هدف ممکن است هدف‌های چندلایه از هدف‌های یکپارچه قوی‌تر یا ضعیف‌تر باشند [۶۷].



شکل ۷-۲ الف) هدف چندلایه بدون فاصله، ب) هدف چندلایه با فاصله [۶۴]

۲-۴- معرفی اهداف سرامیکی

سرامیک از کلمه یونانی کراموس^۱ به معنی سفال یا گل پخته، گرفته شده است. در واقع، برای معرفی سرامیک باید گفت که عبارت است از هنر و علم ساختن و کاربرد اشیاء جامد و شکننده‌ای که ماده اصلی و عمده آن خاک می‌باشد. صنعت سرامیک محدود به ساخت ظروف و وسایل ساده و سفالی گذشته نیست و کاربرد شگرف

^۱ kamos

در همه ابعاد تمدن و تکنولوژی بشر امروز دارد. تمامی مواد غیر آلی بجز فلزات و آلیاژهای فلزی، در محدوده پلی کریستال‌ها و شیشه‌ها جزء مواد ترد بوده و نمودار تنش-کرنش در آنها به صورت خطی بوده و از استحکام فشاری بالایی در مقیاس با استحکام کششی برخوردار هستند.

• دسته‌بندی و کاربرد سرامیک

سرامیک‌ها به دو دسته سرامیک‌های سنتی و سرامیک‌های پیشرفته تقسیم می‌شوند. سرامیک‌های سنتی شامل مواد خاکی و رسی، سیلیکاتی و چینی هستند که از دیرباز هم در زندگی بشر وجود داشتند. دسته بعدی، سرامیک‌های پیشرفته و جدید بوده و همه روزه در حال توسعه می‌باشند که می‌توان به‌عنوان نمونه به آلومینا، منیزیا، زیرکونیا و برون‌کارباید اشاره کرد.

استفاده از سرامیک‌ها نه تنها محدود به اشیاء سفالی و چینی و یا سفال‌های تزئینی و سرامیک‌های ساختمانی بوده بلکه از سرامیک‌ها در صنایع مختلفی از جمله در وسایل حرارتی، فیوزهای الکتریکی، شمع اتومبیل، محصولات شیشه‌ای، بدنه سفینه‌های فضایی و هزاران مورد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند و روزه‌روز به اهمیت و کاربرد آنها در زندگی بشر افزوده شده و توسعه می‌یابند. از سرامیک به طور وسیعی در ساخت زره‌ها استفاده می‌شود. سرامیک به‌علت سختی و شکنندگی بالا و همچنین وزن پایینی که دارد به‌عنوان صفحه جلویی در کامپوزیت‌های سرامیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هدف‌های سرامیکی، نقش اصلی سرامیک فرسایش و شکستگی پرتابه می‌باشد [۲۶].

• زره سرامیکی و ساختار آن

سرامیک به‌علت چگالی پایین و سختی بالا به طور وسیعی در حوزه نظامی و غیر نظامی کاربرد دارد. در این بخش، سرامیک و هدف‌های سرامیکی به طور مختصر معرفی شده است. یکی از معایب سرامیک، تردی و یا به عبارتی پایین بودن استحکام کششی آن است که البته با افزودن ترکیبات مختلف در سرامیک تا حدودی این استحکام کششی تقویت شده است. سرامیک به‌علت مقاومت فرسایشی و تنش تسلیم بالا در مقایسه با زره‌های فولادی و کامپوزیتی ارجح است.

از جمله سرامیک‌های مورد استفاده در زره‌های سرامیکی می‌توان به اکسید آلومینیوم (آلومینا) و برون کاربید و یا سیلیسیم کاربید اشاره کرد. برون کاربید اصلاح شده که از مخلوط برون کاربید و سیلیسیم کاربید تشکیل شده است، از سختی و در عین حال انعطاف‌پذیری بالا برخوردار بوده و در جلیقه‌های ضد گلوله کاربرد دارد. در جدول ۱-۲، خواص مکانیکی چند زره سرامیکی ارائه شده است.

جدول ۱-۲ خواص مکانیکی چند زره سرامیکی [۶۸]

ماده	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	سختی (GPa)	استحکام خمشی سه نقطه‌ای (GPa)	استحکام خمشی چهار نقطه‌ای (GPa)	استحکام کششی (GPa)
Al ₂ O ₃	۳۹۹۰	۳۸۰	۹/۴-۱۴/۵	۳۲۳	-	۲۸۰-۳۰۰
AlN	۳۲۶۰	۳۱۰	۱۰-۱۱	-	۳۵۰-۴۰۰	۱۲۵
B ₄ C	۲۵۲۰	۴۲۰	۲۰-۲۵	۳۰۰	۵۰۰	۳۵۰
SiC	۳۲۱۰	۴۰۰	۲۰-۲۶	-	۳۵۰-۴۵۰	۱۸۰-۲۸۰

ساختار یک زره سرامیکی متشکل از صفحه جلویی سرامیکی و یک ماده کامپوزیت یا ورق فلزی یا آلیاژی به‌عنوان صفحه پشتی می‌باشد که این دو ماده با چسب به ضخامت بسیار ناچیز برای جلوگیری از لغزش دو ماده و همچنین برای کاهش ناحیه تخریب شده‌ی سرامیک، به هم چسبیده شده‌اند. از موادی که به‌عنوان صفحه پشتی در اهداف سرامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به آلومینیوم‌های Al 6061 - T6، Al 7075، 2024 - T3، الیاف شیشه‌ای نازک در یک رزین پلاستیکی و یا استفاده از چندین لایه کامپوزیتی با الیاف شیشه‌ای اشاره کرد.

• شکست سرامیک

سرامیک‌ها جزء مواد ترد بوده و شکست^۱ در آنها از نوع ترد می‌باشد. زمانی که سرامیک در معرض برخورد یک پرتابه قرار می‌گیرد، در اثر ایجاد تمرکز تنش در محل ضربه ترک ایجاد شده و این ترک‌ها به صورت شعاعی و اسپال توسعه یافته و باعث خرد شدن و شکست سرامیک می‌شوند. از جمله موارد اثرگذار در شکست سرامیک

¹ Fracture

می‌توان به وجود محفظه‌های هوایی بسیار کوچک در ساختار سرامیک اشاره کرد و یا همچنین ترک‌هایی که به علت ماشین‌کاری و برخورد، به وجود می‌آیند نیز در شکست سرامیک اثرگذار است.

زمانی که یک هدف سرامیکی در معرض برخورد یک پرتابه با انرژی بالا قرار می‌گیرد، در سطح تماس پرتابه با سرامیک، بارهای ضربه‌ای تولید می‌شوند که این امواج و بارهای ضربه‌ای به صورت فشاری، درون سرامیک توسعه یافته و به پشت سرامیک رسیده و به صورت بارهای کششی منعکس شده و باعث خرد شدن سرامیک می‌شوند. در لحظه برخورد پرتابه به هدف، سرامیک با سختی بالایی که دارد، سرعت پرتابه را کند می‌کند و باعث فرسایش پرتابه می‌شود و همچنین در اثر ضربه‌ای که به سرامیک وارد می‌شود سرامیک خرد می‌شود و این سرامیک خرد شده، به صورت یک مخروط ناقص می‌باشد که بار ضربه‌ای را روی صفحه پشتی پخش می‌کند و این انرژی حاصل از ضربه، توسط ماده پشتی جذب می‌شود.

شکست زرهی سرامیکی علاوه بر خواص فیزیکی و ذاتی هدف، به سرعت نفوذ نیز وابسته است. بر این اساس، سه حالت اصلی در تخریب زره‌های سرامیکی قابل بررسی است:

حالت اول مربوط به سرعت پایین پرتابه می‌باشد که شکست ماده به صورت ترد بوده و توسط مکانیک شکست الاستیک خطی، قابل بررسی است. حالت دوم برای سرعت بالای پرتابه (معمولاً بیش از 500 m/s) اتفاق می‌افتد. در این محدوده از سرعت، بارهای اعمالی با پیشرفت موج‌های ضربه‌ای^۱ توسعه می‌یابد و در نرخ کرنش^۲ S^{-1} ۱۰۰۰ اتفاق می‌افتد. حالت سوم مربوط به سرعت‌های بسیار بالای پرتابه می‌باشد که در این سرعت‌ها، تخریب سرامیک توسط اثرات داخلی و آدیاباتیک^۳ هدف، صورت می‌گیرد و منجر به ذوب هدف می‌شود.

¹ Impact waves

² Strain rate

³ Adiabatic

۲-۵- معرفی اهداف کامپوزیتی

در گذشته کامپوزیت‌ها بیشتر در ساخت سازه‌های فرعی تقویت کننده استفاده می‌شدند؛ اما امروزه به دلیل افزایش آگاهی درباره نحوه شکل‌دهی این مواد و افزایش رقابت در بازارهای جهانی برای ساخت قطعات سبک، در بسیاری از کاربردهای مهندسی با فناوری پیشرفته، کامپوزیت‌ها ماده انتخابی اصلی می‌باشند. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر نسبت استحکام و سفتی به وزن زیاد، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و به‌ویژه خواص ضربه‌ای زیاد، آنها را برای استفاده در بسیاری از اجزای سازه‌های خودرو، هواپیما و کشتی مورد توجه قرار داده است. در تهیه کامپوزیت‌ها توجه به افزایش خواص مکانیکی مانند استحکام، سختی و چقرمگی و همچنین توانایی کاربرد مواد در دماهای بالا وجود دارد. هندسه تقویت کننده تأثیر بسزایی روی استحکام هدف دارد. بدین ترتیب از یک دیدگاه مناسب، می‌توان مواد کامپوزیتی را بر اساس هندسه تقویت کننده به دو دسته کلی کامپوزیت‌های ذره‌ای^۱ و لیفی^۲ طبقه‌بندی کرد. کامپوزیت‌های الیافی به صورت تک لایه یا چندلایه ساخته می‌شوند که الیاف در این کامپوزیت‌ها به صورت پیوسته یا ناپیوسته است. کامپوزیت‌های الیاف پیوسته^۳ به دو دسته تقویت‌کنندگی تک محوره و دو محوره (بافته شده) تقسیم می‌شوند.

مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف، شامل رشته‌هایی با مقاومت بالا هستند که درون فاز پیوسته کامپوزیت (ماتریس^۴)، قرار می‌گیرند، به صورتی که دارای مرزهای مشخص هستند. در این حالت ماتریس و الیاف هر دو خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ می‌کنند. درحالی که ترکیبی از خصوصیات را به وجود می‌آورند که هریک از اجزا به صورت مجزا نمی‌توانند ایجاد کنند. به طور کلی، الیاف، بخش اصلی تحمل‌کننده بار هستند و نقش اصلی ماتریس، نگهداری رشته‌ها، جهت‌دهی مطلوب، انتقال بار بین الیاف و محافظت از آسیب‌های محیطی است.

¹ Particulate composites

² Fibrous composites

³ Continuous fiber reinforced Composite

⁴ Matrix

از الیاف اصلی که کاربردهای تجاری زیادی دارند می‌توان به الیاف شیشه، کربن و کولار اشاره کرد. الیاف دیگر مانند رشته‌های بور^۱، کاربید سیلیکون و اکسید آلومینیوم کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. جنس ماتریس می‌تواند پلیمر، فلز یا سرامیک باشد. اصلی‌ترین شکل کار برای استفاده از کامپوزیت‌ها به صورت ورقه ورقه‌ای (لمینیت) است که از انباشتن تعدادی لایه نازک ماتریس و الیاف و به دست آوردن ضخامت معادل مطلوب، ایجاد می‌گردد. جهت‌گیری الیاف در هر لایه می‌تواند کنترل شود تا خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوتی برای کامپوزیت، حاصل شود [۱۷].

۲-۵-۱ الیاف

تولید یک ساختار کامپوزیتی، با اتصال تعداد زیادی از الیاف به لایه نازکی از ماتریس، به منظور ایجاد یک ورقه (لمینا^۲) شروع می‌شود. ضخامت یک لمینا معمولاً در حدود ۰/۱ mm تا ۱ mm است. اگر از الیاف پیوسته (بلند) برای ساخت لمینا استفاده شود، این الیاف ممکن است به صورت یک جهته، دو جهته یا چند جهته قرار بگیرند. با قرار دادن لمینا در کنار یکدیگر می‌توان ورق‌های کامپوزیتی (لمینیت) با ضخامت مطلوب را به دست آورد. جهت‌گیری الیاف در لایه‌های یک لمینیت می‌تواند یکسان یا متفاوت باشد. لایه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف، همچنین می‌توانند با ورق‌های فلزی نازک ترکیب گردند و کامپوزیت‌های الیاف فیبر/فلز^۳ هستند را به وجود آورند.

در یک کامپوزیت لیفی، الیاف بیشترین حجم از لمینیت را اشغال می‌کند و همچنین بخش اعظمی از بار وارد شده به ساختار کامپوزیتی، توسط الیاف تحمل می‌شود. انتخاب درست نوع، نسبت حجمی، طول و جهت‌گیری الیاف بسیار مهم است. تارهای الیاف به علت داشتن سطح مقطع کوچک استحکام کششی بالاتری نسبت به حالت حجیم، از خود نشان می‌دهند [۶۹].

¹ Boron

² Lamina

³ Fiber Metal Laminates (FML)

• الیاف شیشه

الیاف شیشه که نمونه‌ای از آن در شکل ۲-۸ نشان داده شده است، متعارف‌ترین رشته تقویت‌کننده برای کامپوزیت‌های پلیمری است. مزیت‌های اصلی الیاف شیشه عبارتند از: قیمت پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایقی عالی. اشکالاتی که به این نوع الیاف وارد است عبارتند از: سختی کششی نسبتاً پایین، چگالی بالا (بین الیاف تجاری)، حساسیت به ساییدگی حین جابجایی و مقاومت خستگی نسبتاً پایین. دو نوع از الیاف شیشه که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند الیاف شیشه نوع E و نوع S^۱ هستند. الیاف شیشه نوع E به علت قیمت پایین‌تر استفاده بیشتری در صنایع دارد. الیاف شیشه نوع S در ابتدا برای استفاده در اجزای هواپیما و پوشش لوله اسلحه، گسترش پیدا کرد و مابین الیاف شیشه موجود، دارای بالاترین استحکام کششی است. الیاف شیشه، بی‌شکل (غیر بلوری) و همسانگرد است. الیاف شیشه، معمولاً به صورت رشته‌های ریز شده، رشته‌های پیوسته بلند و رشته‌های بافته شده تولید می‌شوند. استحکام الیاف شیشه در حضور آب و همچنین تحت شرایط بارگذاری طولانی مدت کاهش پیدا می‌کند.

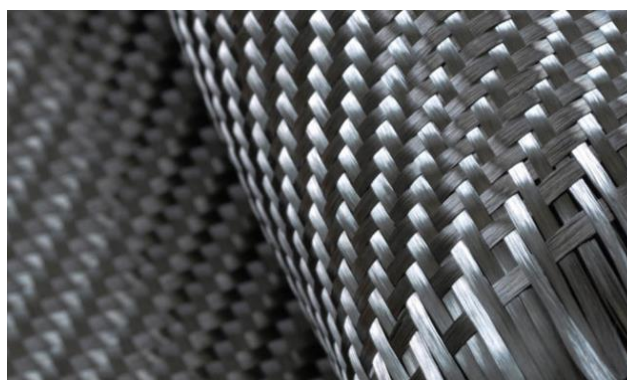


شکل ۲-۸ نمونه‌ای از الیاف شیشه [۷۰]

^۱ E-glass and S-glass fibers

- الیاف کربن

الیاف کربن تجاری در محدوده‌های مختلف مدول کششی از ۲۰۷ GPa تا ۱۰۳۵ GPa وجود دارند. از مزایای الیاف کربن می‌توان به نسبت استحکام کششی به وزن بالا، نسبت سختی کششی به وزن بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، استحکام خستگی بالا و هدایت حرارتی بالا اشاره کرد. از اشکالات این نوع الیاف نیز، می‌توان به کرنش شکست پایین، مقاومت ضربه‌ای پایین و هدایت الکتریکی بالا اشاره کرد. قیمت بالای این نوع الیاف مانع گسترش استفاده از آن شده است. الیاف کربن اکثراً در صنایع هوایی که عامل وزن بسیار مهم‌تر از قیمت است، استفاده می‌شود. در شکل ۹-۲ نمونه‌ای از الیاف کربن نشان داده شده است.



شکل ۹-۲ الیاف کربن [۷۱]

- الیاف آرامید

الیاف آرامید که در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است دارای پایین‌ترین چگالی و بالاترین نسبت استحکام به وزن، در بین الیاف تقویت‌کننده موجود است. کولار ۱۴۹ نام تجاری یکی از الیاف آرامید موجود در بازار است. الیاف آرامید به‌عنوان تقویت‌کننده، در بسیاری از کاربردهای دریایی و فضایی، با وزن سبک، استحکام کششی و مقاومت ضربه‌ای بالا، استفاده می‌شود. از اشکالات عمده این نوع الیاف، استحکام فشاری پایین و سختی در برش و ماشین‌کاری است. کامپوزیت ساخته شده با این الیاف حد خرابی بالاتری در برابر بارهای ضربه‌ای و دینامیکی از خود نشان دهد. لذا یکی از کاربردهای این الیاف در زره‌پوش‌های ضدگلوله انعطاف‌پذیر و سبک و

¹ Kevlar 49

همچنین استفاده در کلاه‌خودهای نظامی است. از دیگر الیاف مورد استفاده در صنعت می‌توان به الیاف نومکس^۱، بور، آلومینا، PBO، پلی اتیلن، وکتران^۲ و M5 اشاره کرد. البته برخی از این الیاف هنوز به‌عنوان الیاف مقاوم بالستیکی در بازار عرضه نمی‌شود اما با تغییر و اصلاح در آنها این امکان وجود دارد که در آینده رقیب جدی برای الیاف بالستیکی محسوب شوند.



شکل ۲-۱۰ الیاف آرامید [۷۲]

۲-۵-۲ فاز پیوسته (ماتریس)

وظایف اصلی ماتریس در یک کامپوزیت لیفی عبارتند از: نگهداری الیاف کنار هم، انتقال تنش بین الیاف، ایجاد مانع در برابر مضررات محیطی (مانند مواد شیمیایی و رطوبت) و حفظ سطح الیاف از افت خواص مکانیکی (مانند سایش). ماتریس نقش کمتری در تحمل بار کششی در یک ساختار کامپوزیتی ایفا می‌کند، اگرچه انتخاب یک ماتریس مناسب تأثیر زیادی بر خصوصیات برشی بین لایه‌ای و درون صفحه‌ای ماده کامپوزیتی دارد. ماتریس یک حمایت جانبی برای الیاف به وجود می‌آورد که مانع کمانش الیاف تحت بارهای فشاری می‌شود. استحکام برشی بین لایه‌ای^۳ یک عامل مهم در طراحی ساختارهای تحت بارهای خمشی است، درحالی‌که استحکام برشی درون صفحه‌ای^۴ تحت بارهای پیچشی اهمیت پیدا می‌کند. برهم‌کنش بین الیاف و

¹ Nomex

² Vectran

³ Interlaminar shear strength

⁴ In-plane shear strength

ماتریس نیز یک عامل مهم در طراحی ساختارهای تحت خرابی است. چند نمونه از ماتریس‌های پرکاربرد عبارتند از: ماتریس‌های پلیمری، ماتریس‌های فلزی و ماتریس‌های سرامیکی [۶۹].

۲-۶- خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های لیفی

خواص ضربه‌ای یک ماده بیانگر ظرفیت آن ماده در جذب و پراکنده کردن انرژی‌های ناشی از ضربه یا بارگذاری‌های ناگهانی است. در عمل، شرایط ضربه ممکن است از حالت افتادن تصادفی ابزار تا حالت برخوردی‌های پرسرعت تغییر کند و واکنش سازه می‌تواند از آسیب محلی تا فروپاشی کلی اتفاق بیافتد. اگر خواص یک ماده وابسته به نرخ کرنش باشد، از خواص استاتیکی آن نمی‌توان در طراحی در برابر بارهای ضربه‌ای استفاده کرد. گذشته از این، حالت‌های گسیختگی در شرایط بارگذاری ضربه‌ای، از آنچه در بارگذاری استاتیکی مشاهده شد، کاملاً تفاوت دارد. برای بررسی آثار نرخ کرنش بر رفتار مواد، نیاز به استفاده از دستگاه آزمون مناسبی است که قابلیت انطباق و مدل‌سازی شرایط دقیق رخداد را داشته باشد. به همین دلیل، مطالعات آزمایشگاهی بیشتر روی ایجاد شرایط واقعی در شرایط کنترل شده، متمرکز شده‌اند.

روش‌های آزمون مختلف دارای مزیت‌ها و محدودیت‌های متفاوتی است و برای ارائه نتایج خوب و قابل استناد باید دستگاه و روش آزمون به طور مناسب انتخاب شوند. برای کاهش هزینه، اغلب آزمون‌ها روی اندازه کوچک‌تری از مدل اصلی انجام می‌شود. در برخی موارد برای اطمینان از صحت نتایج، تجزیه و تحلیل روی دو نمونه با اندازه‌های مختلف اجرا می‌شود. به بیان دیگر، شرایط آزمون باید شرایط واقعی رخداد روی سازه حقیقی را شبیه‌سازی کند، بنابراین انتخاب دستگاه آزمون مناسب بسیار حائز اهمیت است. در ادامه به انواع روش‌های آزمون ضربه با سرعت‌های بارگذاری مختلف، اشاره شده است [۵۱، ۵۲].

• دستگاه آزمون پاندولی

به طور عمومی برای ایجاد ضربه با سرعت کم از سامانه‌های پاندولی استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها شامل یک ضربه‌زننده فولادی آویخته‌اند. سازکار این دستگاه معمولاً شامل یک سر فولادی است که به انتهای یک تیر انعطاف‌پذیر بسته شده است. به طوری که با عقب کشیدن تیر و رها کردن آن، ضربه به جسم وارد می‌شود.

- دستگاه‌های آزمون ثقلی

این دستگاه‌ها با طرح‌های مختلف در اعمال ضربه با سرعت کم کاربرد بسیار زیادی دارند. این نوع آزمایش با تغییرات نرخ کرنش به سادگی قابل انجام است و جزء آزمایش‌های کم هزینه است. هرچند استفاده از این روش برای افزایش حد بالای نرخ کرنش، هنگامی که سرعت به طور مستقیم به ارتفاع سقوط وابسته است، مشکل است. سازکار این ابزار شامل یک ضربه‌زننده با جرم مشخص است که از ارتفاع معینی رها می‌شود و به هدف اصابت می‌کند. برای دستیابی به انرژی ضربه مطلوب، جرم ضربه‌زننده و ارتفاع سقوط قابل تغییر است.

- دستگاه‌های آزمون تفنگ گازی

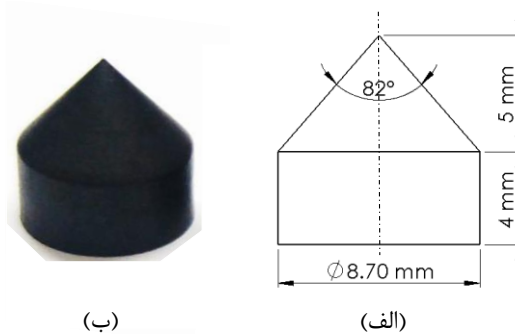
این دستگاه‌ها معمولاً برای آزمون ضربه با سرعت‌های متوسط و زیاد استفاده می‌شوند. نحوه عملکرد این دستگاه‌ها در بخش ۱-۲ توضیح داده شده است.

فصل ۳ مواد و روش‌های تجربی

در این بخش به معرفی روش تجربی شامل چگونگی ساخت پرتابه و هدف و خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده‌ی آنها، تجهیزات آزمایشگاهی و همچنین چگونگی آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۱- پرتابه

پرتابه‌های استوانه‌ای با شکل دماغه مخروطی از فولاد SPK، با قطر 8.70 mm و زاویه مخروط 82° برای هر یک از اهداف ساخته شد. نقشه پرتابه‌های ساخته شده و همچنین پرتابه‌ها با دماغه مخروطی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، در شکل ۳-۱ مشخص است. به منظور کاهش تغییر شکل و عدم شکست پرتابه‌ها حین فرایند نفوذ، سخت‌کاری آنها تا 55 HRC انجام شد.



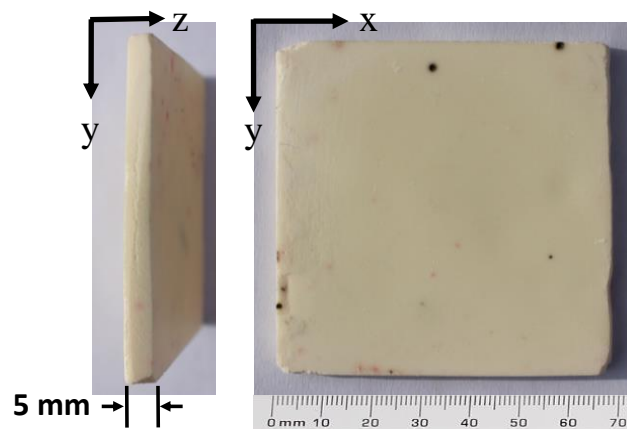
شکل ۳-۱ پرتابه مخروطی آزمون ضربه سرعت بالا. الف) نقشه، ب) پرتابه مخروطی

۲-۳- هدف

- سرامیک: سرامیک رویی از جنس آلومینا به ابعاد $70 \times 70 \text{ mm}^2$ و با دو ضخامت ۳ mm و ۵ mm می‌باشد (شکل ۲-۳). در جدول ۱-۳ خواص این نوع سرامیک آورده شده است.

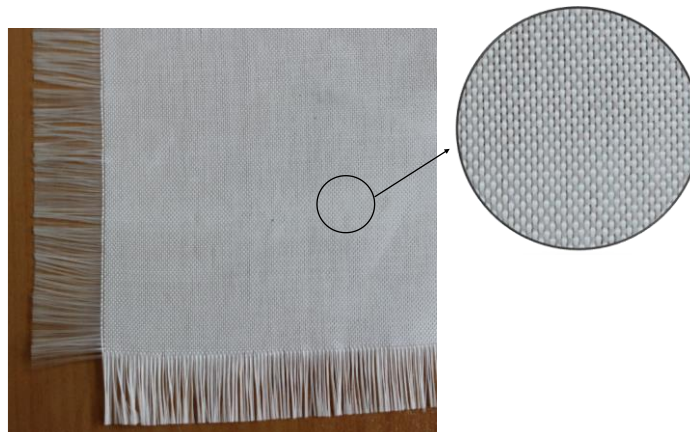
جدول ۱-۳ خواص مکانیکی سرامیک آلومینا Al_2O_3 [۶۴]

چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	سختی (GPa)	استحکام کششی سه نقطه‌ای (MPa)	درصد خلوص
۳۸۰۰-۳۸۸۰	۳۵۰	۱۵	۳۵۰	٪۹۸



شکل ۲-۳ سرامیک آلومینا ساخته شده در این پژوهش

- کامپوزیت: هدف کامپوزیتی ارائه شده در این تحقیق، یک ماده مرکب پایه پلیمری چندلایه است. برای ساخت ماده مرکب مذکور از الیاف شیشه نوع E دارای بافت دوبعدی و خواص طولی و عرضی مساوی، استفاده شده است. شکل ۳-۳ الیاف استفاده شده برای ساخت چندلایه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. در جدول ۲-۳ برخی از خواص مکانیکی الیاف شیشه نوع E ارائه شده است.



شکل ۳-۳ الیاف شیشه

جدول ۲-۳ خواص مکانیکی الیاف شیشه نوع E [۷۶]

چگالی (kg/m ³)	استحکام فشاری (GPa)	مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی (MPa)	نسبت پواسون	مدول برشی (GPa)
۲۵۵۰-۲۶۰۰	۴-۵	۷۲-۸۵	۱۹۵۰-۲۰۵۰	۰/۲۱-۰/۲۳	۳۰-۳۶

• رزین: رزین‌های اپوکسی به دلیل تنوع و داشتن خواص ویژه، در کاربردهای گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقاومت شیمیایی عالی، چسبندگی خوب به بسترهای مختلف، استحکام کششی و خمشی بالا، پایین بودن جمع‌شدگی پخت، پایداری ابعادی، عایق الکتریسیته عالی، دوام بالا در شرایط سخت، مقاومت خستگی بسیار خوب و بدون بو بودن از جمله خواص رزین‌های اپوکسی است. رزین مورد استفاده در این تحقیق از خانواده اپوکسی و به صورت دو جزئی شامل رزین اپوکسی CR122 و سخت‌کننده CH122 ساخت شرکت آکسون^۱ می‌باشد. نسبت اختلاف جزء سخت‌کننده به پایه پلیمر، طبق پیشنهاد شرکت سازنده ۳۰:۱۰۰ انتخاب شد. از خصوصیات بارز این سخت‌کننده می‌توان به چگالی پایین، زمان واکنش بالا و ایجاد مقاومت ضربه‌ای بالا اشاره نمود. در جدول ۳-۳ برخی از خواص این رزین آورده شده است.

جدول ۳-۳ خواص مکانیکی رزین اپوکسی [۷۷]

چگالی (kg/m ³)	استحکام فشاری (MPa)	مدول خمشی (MPa)	استحکام خمشی (MPa)	کرنش نهایی (MPa)	مدول کششی (MPa)
۱۱۷۰	۱۱۰	۲۹۰۰	۱۲۵	۶/۳	۲۹۰۰

۳-۳- ساخت اهداف سرامیک/کامپوزیت

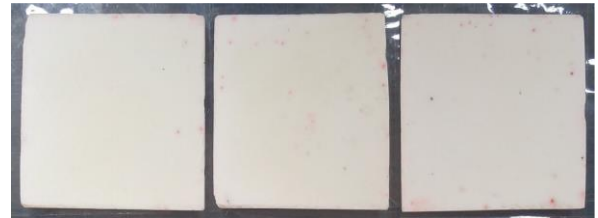
دو سری ورق کامپوزیتی با ۲۰ و ۴۰ لایه الیاف شیشه بافته شده، به روش لایه چینی دستی تولید شد. با توجه به این که سخت‌کننده CH122 زمان واکنش نسبتاً بالایی در دمای محیط دارد، استفاده از آن در این روش ساخت که نیازمند زمان نسبتاً زیادی است، بسیار مناسب است. صفحات سرامیکی نیز در هنگام لایه‌چینی به الیاف شیشه چسبانده شد و پس از اتمام کار به مدت ۸ ساعت در دمای محیط تحت فشار قرار گرفت. در

¹ Axson

نهایت بعد از آماده شدن، نمونه‌ها در ابعاد $70 \times 70 \text{ mm}^2$ ، برای قرارگیری در فیکسچر، بریده شد و در مجموع ۱۴ نمونه برای انجام آزمایش‌های نفوذ آماده شد. شکل ۳-۴ مراحل ساخت اهداف سرامیک/کامپوزیت را نشان می‌دهد.



ب) لایه‌چینی دستی



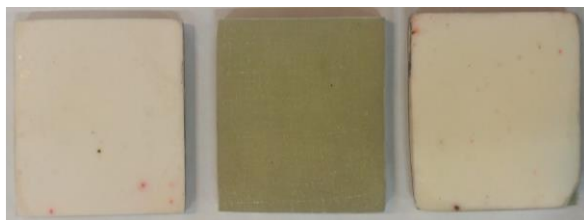
الف) قرارگیری سرامیک‌ها



د) قراردهی پارچه آستری و نمد



ج) اتمام لایه‌چینی



و) نمونه‌های برش خورده



ه) نمونه‌های آماده شده قبل از برش

شکل ۳-۴ مراحل ساخت نمونه‌های سرامیک/کامپوزیت

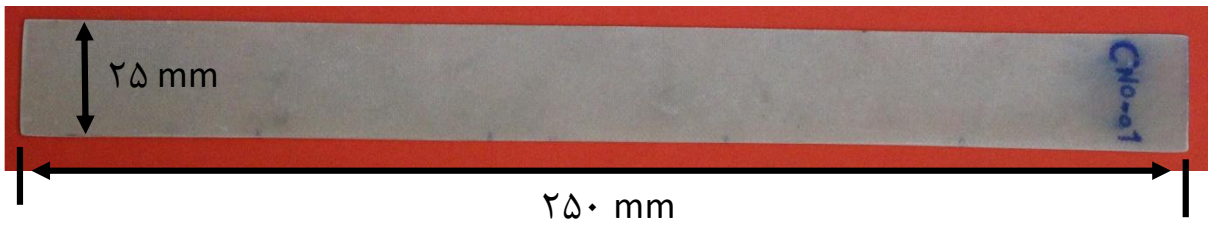
۴-۳-۴ آزمون کشش نمونه کامپوزیتی

برای استخراج خواص مکانیکی نمونه کامپوزیتی آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM D3039 [۷۸] انجام شد. به منظور اطمینان از دقت و تکرارپذیری آزمون، تعداد سه نمونه با ابعاد $25 \times 25 \text{ mm}^2$ مطابق شکل ۳-۵ ساخته و با سرعت بارگذاری 2 mm/min تحت کشش قرار گرفت و بارگذاری تا شکست کامل نمونه ادامه یافت. نیروی اعمالی بر نمونه توسط نیروسنج^۱ و کرنش قطعه توسط تغییر طول سنج^۲ اندازه‌گیری شد. این

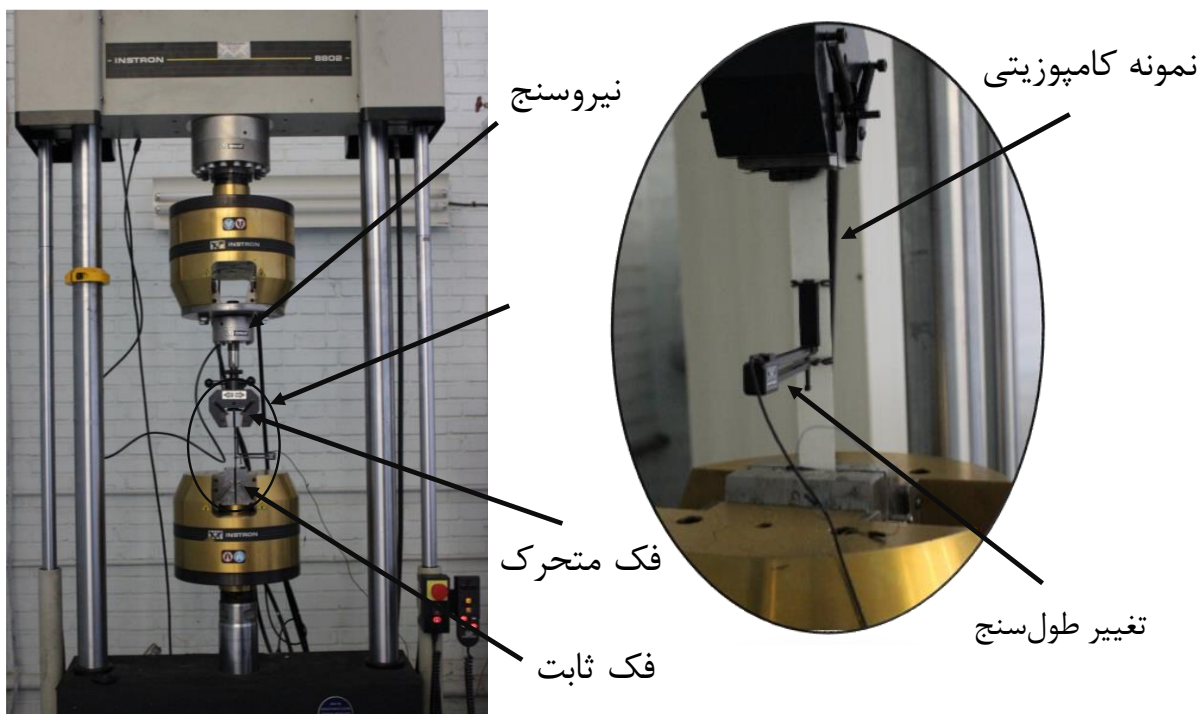
^۱ Load cell

^۲ Extensometer

آزمون به کمک دستگاه آزمون کشش اینسترون ۸۸۰۲ موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است انجام گرفت.



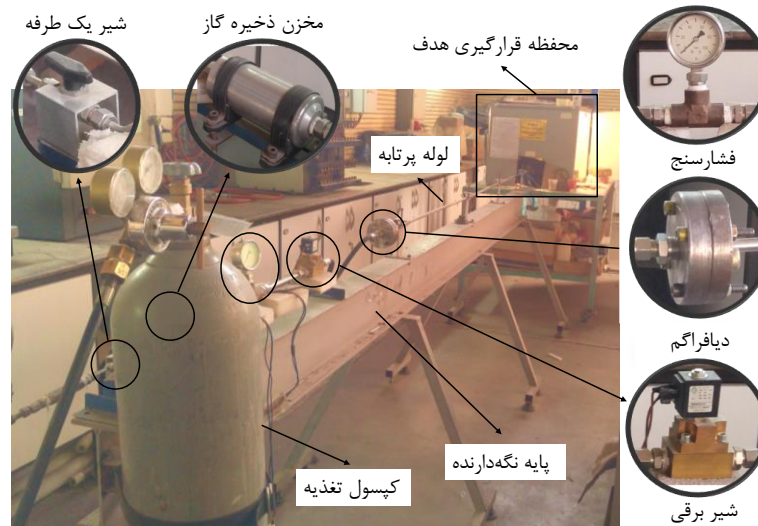
شکل ۳-۵ یک نمونه از آزمون کشش



شکل ۳-۶ دستگاه آزمون اینسترون ۸۸۰۲ برای کشش نمونه کامپوزیتی

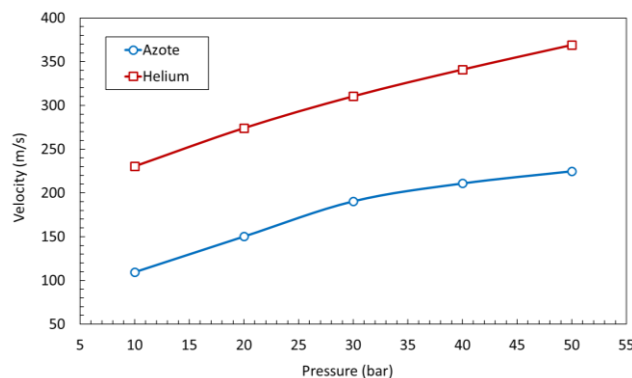
۳-۵- آزمون بالستیک

- دستگاه تفنگ گازی: آزمایش‌های ضربه سرعت بالا به وسیله دستگاه تفنگ گازی پژوهشگاه پلیمر ایران (شکل ۳-۷) انجام شد. سرعت پرتابه، قبل و بعد از برخورد با هدف به وسیله سرعت‌سنج لیزری محاسبه می‌شود.



شکل ۳-۷ دستگاه تفنگ گازی پژوهشگاه پلیمر ایران

- منحنی کالیبراسیون دستگاه تفنگ گازی: همان‌طور که گفته شد، سرعت اولیه پرتابه توسط فشار هوا در مخزن ذخیره تأمین می‌شود. این منحنی بیان‌کننده سرعت پرتابه در فشارهای مختلف گاز می‌باشد. در هر آزمون، سرعت اولیه پرتابه توسط سرعت‌سنج لیزری محاسبه می‌شود. برای به‌دست آوردن منحنی کالیبراسیون دستگاه چندین آزمون آزاد در فشارهای مختلف انجام و سرعت خروج پرتابه از لوله دستگاه اندازه‌گیری شد. منحنی سرعت شلیک پرتابه برحسب فشار مخزن برای دو گاز ازت و هلیوم به صورت شکل ۳-۸ ارائه شد.



شکل ۳-۸ منحنی کالیبراسیون دستگاه تفنگ گازی

فصل ۴ شبیه‌سازی عددی

در این فصل، شرح مدل‌سازی عددی پدیده نفوذ پرتابه در اهداف سرامیک/کامپوزیت با استفاده از روش المان محدود بیان شده است. متغیر مورد بررسی ضخامت اجزاء هدف بوده و تأثیر آن بر فرآیند نفوذ پرتابه و رفتار شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد. اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده با آزمایش‌های بالستیک تجربی انجام می‌شود.

۴-۱- حل اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار ال‌اس داینا

روش اجزای محدود^۱ یکی از روش‌های عددی حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر یک جسم و یا سازه است. این روش نیز مانند روش‌های دیگر عددی نظیر تفاضل محدود^۲، اجزای مرزی^۳، حجم‌های محدود^۴ و روش اجزای محدود بدون شبکه^۵، برای حل تقریبی بسیاری از مسائل در مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزارهای

^۱ Finite Element (FE)

^۲ Finite difference

^۳ Boundary elements

^۴ Finite volumes

^۵ Meshless

اجزای محدود عموماً از سه بخش مجزا تشکیل می‌شوند که عبارتند از: پیش پردازنده^۱، پردازشگر^۲ و پس پردازنده^۳. پیش پردازنده‌ها برای تولید شبکه اجزای محدود یا اصطلاحاً مدل اجزای محدود و نیز تعریف شرایط هندسی، مرزی، قیود و سایر مشخصات مسئله و در نهایت ساخت فایل ورودی به پردازنده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پردازشگر کد عددی حل مسئله و پس‌پردازشگر محیط گرافیکی ارائه نتایج است.

نرم‌افزار ال‌اس داینای یک هیدروکد المان محدود قوی می‌باشد که قابلیت‌های بسیار بالایی در حل مسائل دینامیکی غیرخطی دارد. توان بالای این کد در تحلیل مسائل انفجار، انتشار امواج شوک، شکل‌دهی فلزات با تغییر شکل‌های زیاده، برخورد اجسام، نفوذ پرتابه در هدف و... و با داشتن تقریباً ۲۰۰ نوع مدل ماده و ۱۳ نوع معادله حالت و انواع روش‌های تماس سطوح، این کد را به یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی تبدیل کرده است.

این بسته نرم‌افزاری که نسخه کامل شده نرم‌افزار داینای تری‌دی^۴ می‌باشد، اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط دکتر هالکوئیست^۵ رئیس پژوهشگاه ملی لورنس لیورمور^۶ ارائه شد. این نرم‌افزار در آن زمان ب شبیه‌سازی برخوردهای سرعت پایین (سرعت‌های کمتر از ۴۰ m/s) در راکتورهای اتمی استفاده شد. از آن پس به تدریج با اضافه نمودن مدل ماده‌های مختلف، قابلیت مدل‌سازی تیرها، پوسته‌ها، اجسام صلب، سازه‌های کامپوزیتی و... نسخه‌های کامل‌تر و سریع‌تری از این نرم‌افزار ارائه گردید و به‌کارگیری این نرم‌افزار در مسائل مختلف دینامیکی، برخورد و انفجار گسترش بیشتری یافت. مدل‌سازی و مشاهده نتایج این پژوهش در LS-DYNA 6.1 و در محیط پیش‌پردازنده و پس‌پردازنده LS-PrePost 3.2 و پردازش مسئله در قسمت تحلیل LS-DYNA 4.2 صورت گرفت.

¹ Preprocessor

² Solver

³ Postprocessor

⁴ Dyna 3D

⁵ Hallquist

⁶ Lawrence Livermore

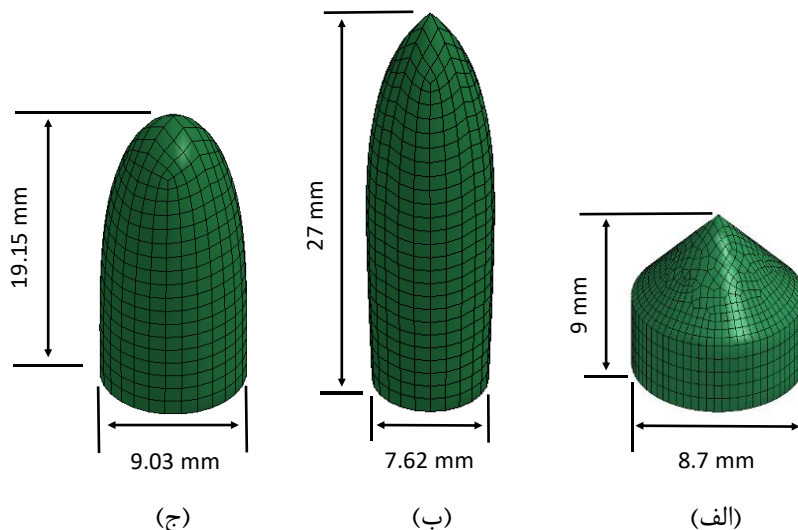
۴-۲- مراحل مدل‌سازی

در این قسمت ابتدا مدل‌سازی هندسی پرتابه و هدف و در ادامه مدل‌های مواد استفاده‌شده برای کامپوزیت و سرامیک تشریح خواهد شد و پس از آن به روش حل مسئله پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱ مدل‌سازی هندسی

۱- پرتابه

مطابق شکل ۴-۱ از سه نوع پرتابه مخروطی، AK-47 و برتا^۱ در تحلیل عددی استفاده شد. طراحی و شبکه‌بندی این پرتابه‌ها در نرم‌افزار آباکوس صورت‌گرفت و سپس به نرم‌افزار ال‌اس داینا انتقال یافت. مطابق آزمون تجربی، پرتابه مخروطی دارای قطر ۸/۷ mm و شعاع مخروط ۸۲° درجه است. در شکل ۴-۱-الف پرتابه طراحی شده و شبکه‌بندی آن نشان داده شده. پرتابه AK-47 در این شبیه‌سازی به صورت یکپارچه و فولادی در نظر گرفته شد. این پرتابه دارای جرم ۵/۱ gr و سرعت ۷۱۰ m/s می‌باشد. در شکل ۴-۱-ب مدل طراحی و شبکه‌بندی شده پرتابه AK-47 نشان داده شده. پرتابه برتا که با نام پرتابه ۹ mm پارابلوم^۲ شناخته می‌شود دارای جرم ۷/۵۲ gr و سرعت ۳۸۰ m/s می‌باشد. مدل طراحی شده از این پرتابه در شکل ۴-۱-ج آمده است.



شکل ۴-۱ پرتابه‌های مدل شده، (الف) مخروطی، (ب) AK-47، (ج) برتا

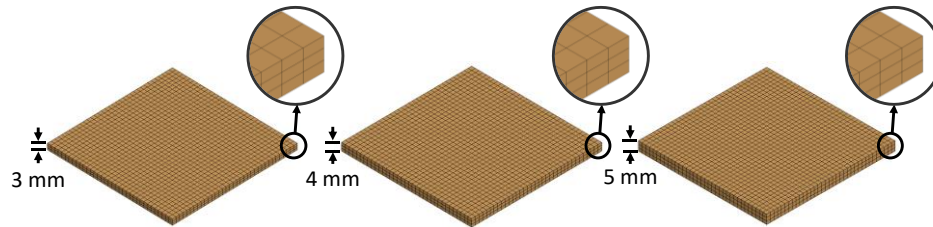
^۱ Beretta

^۲ 9mm Parabellum

۲- هدف

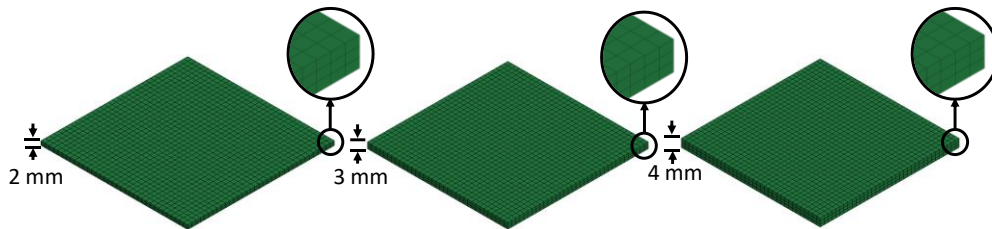
مدل هندسی اهداف در این پروژه به دو بخش تقسیم می‌شود که عبارتند از:

الف) ورق سرامیکی: ابعاد ورق $70 \times 70 \text{ mm}^2$ با ضخامت‌های ۳، ۴ و ۵ mm در نظر گرفته شده‌است (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ مدل شبکه‌بندی شده ورق‌های سرامیکی

ب) ورق کامپوزیتی: ابعاد آن $70 \times 70 \text{ mm}^2$ با ضخامت ۲، ۳ و ۴ mm در نظر گرفته شده‌است (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ مدل شبکه‌بندی شده ورق‌های کامپوزیتی

۴-۲-۲ شبکه‌بندی و مشخصات المان‌ها

از المان حجمی هشت گرهی تنش ثابت با یک نقطه انتگرال‌گیری برای شبکه‌بندی هر یک از قطعات استفاده

شد. همه‌ی گره‌ها دارای ۶ درجه آزادی می‌باشند. تعداد المان‌ها و گره‌ها برای این شبیه‌سازی در جدول ۴-۱

ذکر شده است.

جدول ۴-۱ تعداد المان‌ها و گره‌ها

نمونه	تعداد المان	تعداد گره
ورق سرامیکی	۳۶۷۵	۵۱۸۴
ورق کامپوزیتی	۳۶۷۵	۵۱۸۴
پرتابه مخروطی	۳۱۱۵	۳۹۴۸
پرتابه AK-47	۱۵۳۶	۱۰۲۳
پرتابه برتا	۱۴۱۶	۱۷۶۴

۳-۴- تحلیل اندازه المان

با توجه به ماهیت ضربه بالستیک که در سرعت‌های بالا و زمان بسیار کم اتفاق می‌افتد، حساسیت به شبکه‌بندی در مدل المان محدود بسیار بالا می‌باشد و افزایش تعداد المان‌ها لزوماً منجر به رسیدن به جواب دقیق‌تر نمی‌شود بلکه ما را از جواب دقیق دور می‌کند. استفاده از المان‌های درشت نیز همین اثر را روی شبیه‌سازی دارد. مشکل دیگری که افزایش تعداد المان‌ها ایجاد می‌کند، افزایش شدید زمان حل مسئله است. پس پیدا کردن تعداد المان‌های مناسب یک امر ضروری برای دستیابی به یک مدل صحیح می‌باشد. برای پیدا کردن شبکه‌بندی مناسب، یکی از آزمایش‌های تجربی که در آن سرعت حد بالستیک به دست آمد انتخاب می‌شود. پس از مدل‌سازی، تعداد المان‌ها در دو مرحله تغییر داده می‌شود. در مرحله اول، تغییر تعداد المان‌ها در سطح هدف صورت می‌گیرد و تعداد المان‌های هدف در ضخامت (تعداد لایه‌ها) ثابت نگه داشته می‌شود و در مرحله بعد بالعکس. در جدول ۲-۴ تعداد المان‌های هدف در هر دو مرحله آمده است.

جدول ۲-۴ تعداد المان‌ها در هر شبکه‌بندی

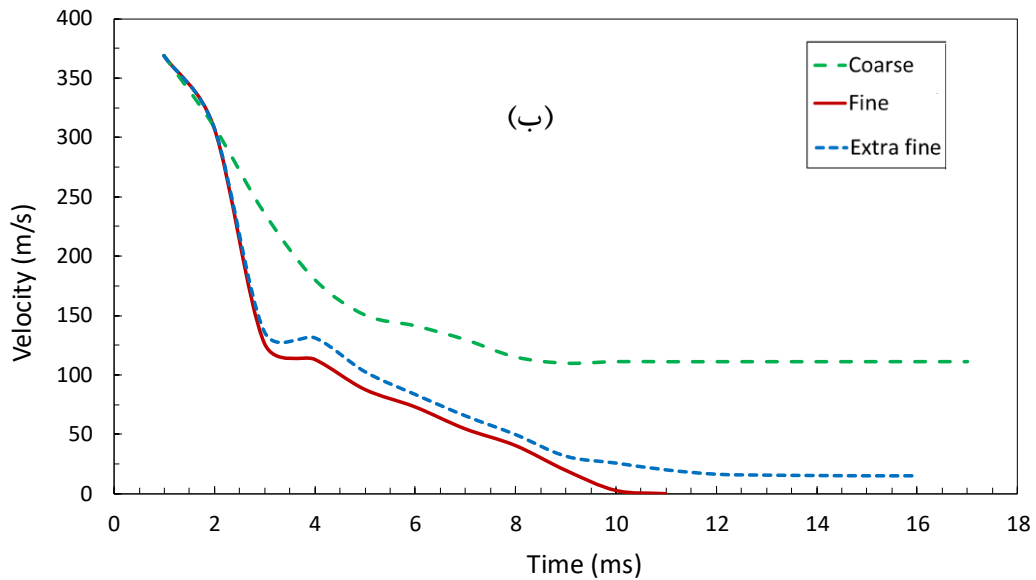
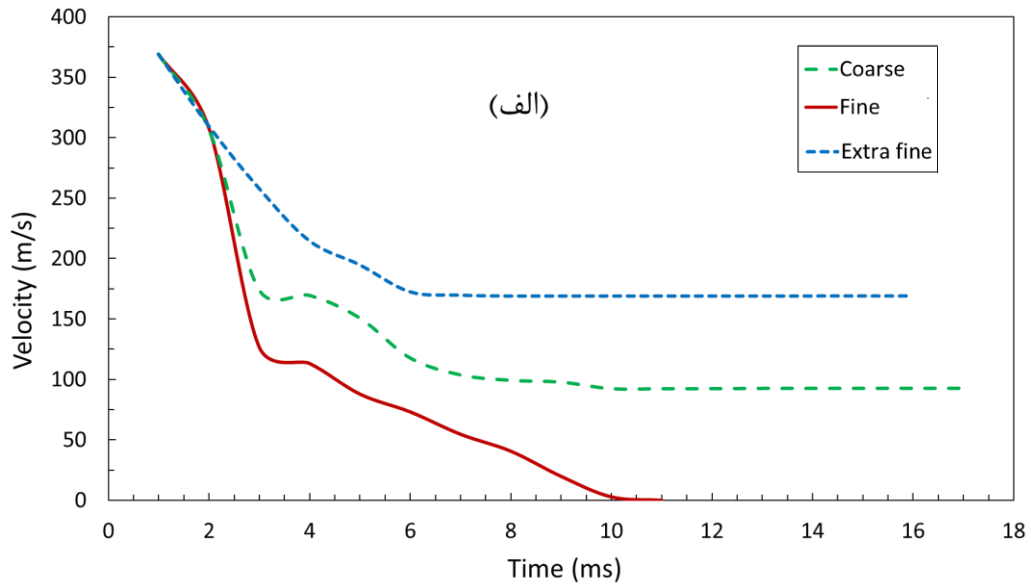
تعداد المان		شبکه‌بندی
تغییر المان در ضخامت	تغییر المان در سطح	
۴۹۰۰	۵۴۰۰	شبکه‌بندی درشت ^۱
۷۳۵۰	۷۳۵۰	شبکه‌بندی ریز ^۲
۹۸۰۰	۹۶۰۰	شبکه‌بندی بسیار ریز ^۳

برای به دست آوردن تعداد المان بهینه، نمودار تغییرات سرعت-زمان پرتابه برای شبکه‌بندی‌های مختلف هدف، به وسیله شبیه‌سازی، به صورت شکل ۴-۴ به دست می‌آید.

^۱ Coarse mesh

^۲ Fine mesh

^۳ Extra fine mesh



شکل ۴-۴ نمودار تغییرات سرعت-زمان پرتابه در نمونه CC3B4، (الف) تغییر المان در سطح، (ب) تغییر المان در ضخامت

همان‌طور که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود، در شبکه‌بندی ریز، با گذشت زمان، سرعت پرتابه به صفر رسید و سرعت حد بالستیک تجربی به دست آمد. با افزایش و کاهش تعداد المان‌ها، چه در سطح و چه در ضخامت، پرتابه از هدف عبور کرده نتیجه درستی به ما نمی‌دهد.

۴-۳-۱ مدل مواد

• پرتابه

در این شبیه‌سازی مدل ماده جانسون-کوک برای پرتابه مورد استفاده قرار گرفت و جنس پرتابه‌ها Steel 4340 در نظر گرفته شد. ثوابت مورد نیاز برای این ماده در جدول ۴-۳ آورده شده است.

جدول ۴-۳ ضرایب جانسون-کوک برای Steel 4340 [۶۶]

مقدار	نماد	کمیت
۷۸۶۰	ρ (kg m ³)	چگالی
۸۱/۸	G (GPa)	مدول برشی
۲۰۹	E (GPa)	مدول یانگ
۰/۲۸	ν	نسبت پواسون
۰/۷۹۲	A (GPa)	تنش تسلیم
۰/۵۱	B (GPa)	ثابت کار سختی
۰/۰۱۴	C	نرخ کرنش
۱/۰۳	m	توان نرم شونده‌گی گرمایی
۰/۲۶	n	توان کارسختی
۱۷۹۰	T_m (K)	دمای ذوب
۳۰۰	T_r (K)	دمای محیط
۱	EPSO (S ⁻¹)	نرخ کرنش مرجع
۴۷۷	C_p (J/kgK)	ظرفیت گرمایی ویژه
۰/۰۵	D_1	پارامتر شکست
۳/۴۴	D_2	
-۲/۱۲	D_3	
۰/۰۰۲	D_4	
۰/۶۱	D_5	

در چهارچوب پلاستیسیته تراکم‌ناپذیر، تابع تسلیم فون مایز به صورت زیر است:

$$\Phi = \sqrt{\frac{2}{3} S_{ij} S_{ij}} - \sigma_c = 0$$

۱-۴

که S_{ij} تانسور تنش انحرافی و σ_c تنش تسلیم لحظه‌ای می‌باشد.

قانون جریان معیار فون مایزر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$d\varepsilon_{pq}^p = \frac{1}{h} (dS_{ij} n_{ij}) n_{pq} \quad ۲-۴$$

بردار نرمال n_{ij} برابر است با:

$$n_{ij} = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}}}{\left| \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} \right|} \quad ۳-۴$$

h نیز مدول پلاستیک می‌باشد.

معیار جانسون-کوک تنش مؤثر را به صورت زیر بیان کردند [۷۹]:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \quad ۴-۴$$

A, B, C, m و n ضرایب ثابت می‌باشند. ε^* نرخ کرنش بی‌بعد شده می‌باشد و برابر است با:

$$\varepsilon^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \quad ۵-۴$$

$\dot{\varepsilon}_p$ نرخ کرنش پلاستیک و T^* دمای بی‌بعد شده می‌باشد که برابر است با:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad ۶-۴$$

از روابط سازگاری داریم:

$$d\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma_c} d\sigma_c = 0 \quad ۷-۴$$

با استفاده از روابط (۴-۱) تا (۴-۷)، مدول پلاستیک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h = \frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_p} \quad ۸-۴$$

معیار شکست ارائه شده توسط هانکوک و مکنزی به وسیله‌ی جانسون-کوک توسعه داده شد تا اثرات تنش

سه محوره، دما، نرخ کرنش و مسیر کرنش بر کرنش شکست اعمال شود. این مدل فرض می‌کند که آسیب

انباشته شده در المان ماده پس از رسیدن به یک مقدار بحرانی به طور ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. D به‌عنوان

متغیر آسیب تعریف می‌شود که از بازه ۰ (بدون آسیب) تا ۱ (شکست کامل) تغییر می‌کند. معیار شکست بر

اساس مقدار کرنش پلاستیک مؤثر در نقاط انتگرال‌گیری المان می‌باشد. شکست هنگامی رخ می‌دهد که D به

مقدار واحد برسد. D برابر است با [۸۰]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pf}} \quad 9-4$$

$\Delta \varepsilon_{pl}$ یک نمو از کرنش پلاستیک مؤثر و ε_{pf} کرنش پلاستیک مؤثر در شکست می‌باشد و جمع‌بندی بر روی تمامی نموها تغییر شکل اعمال می‌شود. هرچند که مقدار بحرانی متغیر شکست یعنی مقداری که در آن ریزترک‌ها اتفاق می‌افتند، کمتر از یک است. بنابراین معیار شکست برابر می‌شود با:

$$D = D_c \leq 1 \quad 10-4$$

علاوه بر این، آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار آسیب در هنگام تشکیل ریزترک‌ها برابر با صفر باقی می‌ماند. ممکن است در آنجا یک آستانه از کرنش پلاستیک انباشته شده که در آن آسیب شروع به تکامل می‌کند وجود داشته باشد. بر اساس این مشاهدات یک قانون شکست به صورت زیر می‌توان پیشنهاد شود:

$$D^* = \begin{cases} 0 & \varepsilon_{pl} < \varepsilon_{p,d} \\ \frac{D_c}{\varepsilon_f - \varepsilon_{p,d}} \varepsilon_{pl}^* & \varepsilon_{pl} \geq \varepsilon_{p,d} \end{cases} \quad 11-4$$

D_c آسیب بحرانی، $\varepsilon_{p,d}$ کرنش آستانه شکست و ε_f کرنش شکست می‌باشد.

آسیب در دو مرحله اتفاق می‌افتد، در مرحله اول نرخ رشد بسیار آهسته می‌باشد. قانون رشد آسیب یک رابطه خطی از کرنش پلاستیک معادل می‌باشد.

$$\dot{D} = \frac{D_{c1}}{\varepsilon_{p0}} \dot{\varepsilon}_{p,eq} \quad 12-4$$

ε_{p0} کرنش پلاستیک و D_{c1} آسیب در نقطه نهایی (شروع گلویی شدن) می‌باشد. فرض می‌شود که D_{c1} مقدار کمی (حدود ۲ درصد) را به خود اختصاص می‌دهد. در حین گلویی شدن میزان رشد آسیب شدت می‌یابد و افزایش آن به صورت غیر خطی می‌باشد و برابر است با:

$$\dot{D} = \frac{D_{c2} - D_{c1}}{D_{c2} - D} \dot{\varepsilon}_{p,eq} \quad 13-4$$

در اینجا D_{c2} آسیب بحرانی در نقطه شکست می‌باشد (برابر با ۰/۸ فرض شده است).

مدل جانسون-کوک، ε_f را وابسته به تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر می‌گیرد و به صورت زیر محاسبه می‌کند:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln(\varepsilon_p^*)][1 + D_5 T^*] \quad ۱۴-۴$$

که D_1 تا D_5 ثوابت ماده، $\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}$ نسبت تنش سه محوره و σ_m تنش هیدرواستاتیک می‌باشد. همچنین از آنجایی که آسیب میزان استحکام ماده را در حین تغییر شکل کاهش می‌دهد، معادله ساختاری برای ماده آسیب دیده برابر است با:

$$\sigma_D = (1 - D)\sigma_{eq} \quad ۱۵-۴$$

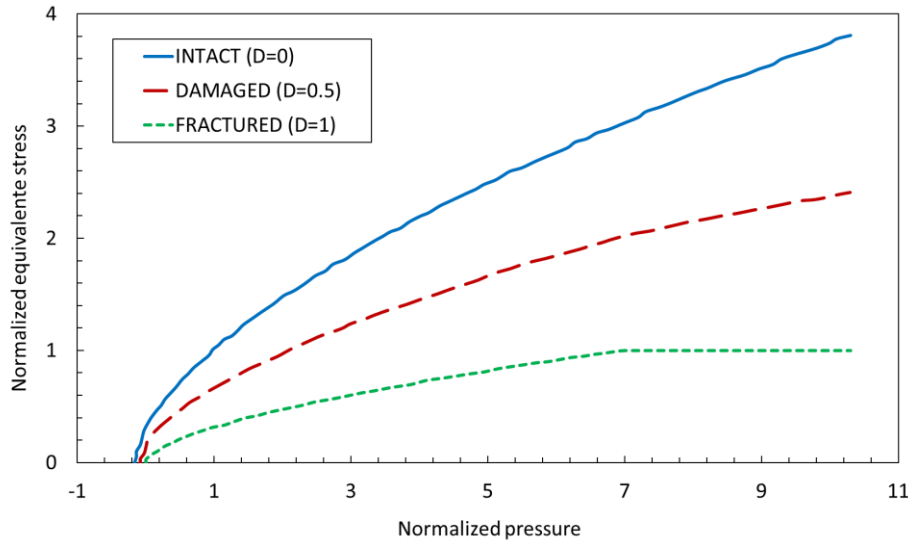
که σ_D تنش در حالت آسیب می‌باشد و σ_{eq} نیز از رابطه ساختاری جانسون-کوک برای ماده اصلی (قبل از آسیب) مطابق رابطه (۴-۵) محاسبه می‌شود.

• سرامیک

مدل ماده مورد استفاده برای سرامیک، معیار جانسون-هولمکوئیست می‌باشد. این معیار یک مدل ساختاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار مواد شکننده، در معرض بارگذاری بسیار شدید است. ویژگی‌های اصلی این مدل عبارت‌اند از: مقاومت وابسته به فشار، آسیب و شکست، استحکام قابل توجه بعد از شکست، فشرده‌شدن و اثرات نرخ کرنش. یک نمای کلی از مدل JH از نظر استحکام در نشان داده شده است. ایده این مدل بر این اساس است که هنگامی که آسیب شروع به انباشته شدن می‌کند، ماده شروع به نرم شدن می‌کند ($D > 1$). این ایده به مواد اجازه می‌دهد که تحت افزایش کرنش پلاستیک به تدریج نرم شوند. به طور کلی استحکام یک تابع از پارامتر شکست، استحکام اولیه، نرخ کرنش و آسیب می‌باشد. تنش مؤثر نشان داده شده در شکل ۴-۵ به صورت زیر تعریف می‌شود [۸۲]:

$$\sigma^* = \sigma_1^* - D(\sigma_1^* - \sigma_f^*) \quad ۱۶-۴$$

که σ_1^* و σ_f^* به ترتیب تنش‌های مؤثر نرمال اولیه و شکست می‌باشد و D مؤلفه آسیب است ($0 < D < 1$).



شکل ۴-۵ نمای کلی از مدل جانسون-هولمکوئیست

استحکام نرمال اولیه و شکست به ترتیب برابرند با:

$$\sigma_i^* = A(P^* + \sigma_T^*)^N (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad ۱۷-۴$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad ۱۸-۴$$

A ، B ، C ، M و N ثوابت ماده و P^* و σ_T^* به ترتیب فشار نرمال و تنش کششی هیدرواستاتیک بیشینه می‌باشد.

$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ نرخ کرنش بی‌بعد شده می‌باشد که $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش واقعی و $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش اولیه است. شکست، مشابه

با مدل شکست جانسون-کوک محاسبه می‌شود و برابر است با [۱۸۰]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f^p} \quad ۱۹-۴$$

$\Delta \varepsilon_p$ مقدار افزایش کرنش پلاستیک مؤثر در طول یک سیکل انتگرال‌گیری و $\varepsilon_f^p = f(P)$ کرنش پلاستیک

برای شکست تحت فشار ثابت می‌باشد. ε_f^p از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_f^p = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad ۲۰-۴$$

D_1 و D_2 ثوابت ماده می‌باشند. تنش‌های هیدرواستاتیک به وسیله معادله حالت زیر تعریف می‌شوند:

$$P = K_1 \mu + K_2 \mu^2 + K_3 \mu^3 \quad ۲۱-۴$$

K_1 مدول حجمی، K_2 و K_3 ثوابت ماده و μ ضریب تراکم‌پذیری می‌باشد.

بعد از اینکه آسیب شروع به انباشته شدن می‌کند ($D > 0$)، فشرده شدن می‌تواند رخ دهد. به همین دلیل یک پارامتر افزایش فشار (ΔP) به معادله اضافه می‌شود.

$$P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta P \quad ۲۲-۴$$

این افزایش فشار به وسیله‌ی سنجش انرژی تعیین می‌شود و از $\Delta P = 0$ در $D = 0$ تا $\Delta P = \Delta P_{max}$ در $D = 1$ متغیر است. ضرایب مورد نیاز مدل ماده جانسون-هولمکوئیست برای سرامیک آلومینا در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۴ خواص مکانیکی سرامیک آلومینا [۵۹]

مؤلفه	نماد	مقدار
چگالی	ρ (kg/m ³)	۳۷۰۰
مدول برشی	G (GPa)	۹۰/۱۶
ضریب استحکام اولیه	A'	۰/۹۳
ضریب استحکام شکست	B'	۰/۳۱
توان استحکام شکست	C'	۰
توان استحکام اولیه	M	۰/۶
حداکثر مقاومت شکست نرمال	N	۰/۶
حد کشسان هیوگنیوت ^۱	σ_{max}^f	۰/۲
مؤلفه فشار در حد کشسان هیوگنیوت	HEL (GPa)	۱۹
کسر تبدیل انرژی (ضریب بالک)	P_{HEL} (GPa)	۱/۴۶
مدول الاستیک حجمی	β	۱
ضریب ترم درجه دو معادله فشار	$K = K_1$ (GPa)	۱۳۰/۹۵۰
ضریب ترم درجه سه معادله فشار	K_2	۰
پارامتر کرنش پلاستیک در شکست	K_3	۰
ضریب کرنش پلاستیک در شکست	D_1	۰/۰۰۵
توان کرنش پلاستیک در شکست	D_2	۱

¹ Hugoniot

• کامپوزیت

رفتار ورق کامپوزیتی به صورت ایزوتروپ عرضی تعریف شد. ارتباط بین تنش و کرنش در کامپوزیت به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1\sigma_2), \varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2\sigma_1), \varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \quad ۲۳-۴$$

در معادله بالا ε_1 و ε_2 به ترتیب کرنش نرمال موازی و عمود بر جهت فیبر، ε_{12} کرنش برشی درون صفحه‌ای، σ_1 ، σ_2 و τ_{12} تنش‌های متناظر با ε_1 ، ε_2 و ε_{12} می‌باشند. E_1 ، E_2 و G_{12} مدول‌های یانگ و برشی، ν_1 و ν_2 ضرایب پواسون در جهت‌های مختلف می‌باشد. α نیز مؤلفه غیر خطی تنش برشی می‌باشد.

به دلیل ناهمسانگرد بودن برخی از الیاف بالستیک مانند الیاف شیشه و کولار، خواص ترموالاستیک آنها در جهت‌های مختلف متفاوت است. این الیاف همسانگرد عرضی در نظر گرفته می‌شوند و برای تعریف خواص آنها، پنج مؤلفه مستقل مورد نیاز است که عبارتند از، E_{1f} ، E_{2f} ، G_{12f} ، ν_{12f} و G_{22f} . روابط زیر که توسط چامیس [۸۳] ارائه شده‌اند خواص الاستیک یک لمینیت تک جهته متشکل از الیاف ناهمسانگرد و ماتریس همسانگرد را نشان می‌دهد.

$$E_1 = E_{f1}V_f + E_mV_m, \quad E_2 = E_3 = \frac{E_m}{1 - V_f(1 - E_m/E_{f2})} \quad ۲۴-۴$$

$$G_{12} = G_{13} = \frac{G_m}{1 - V_f(1 - G_m/G_{f2})}, \quad G_{23} = \frac{G_m}{1 - V_f(1 - G_m/G_{f23})} \quad ۲۵-۴$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{f12}V_f + \nu_mV_m, \quad \nu_{23} = \frac{\frac{\nu_{f23}}{E_{f2}} + \frac{\nu_m}{E_m}}{\frac{\nu_f}{E_f} + \frac{\nu_m}{E_m}} \quad ۲۶-۴$$

در معادلات بالا اندیس f بیانگر الیاف و m بیانگر ماتریس می‌باشد.

برای شبیه‌سازی رفتار ورق کامپوزیتی از مدل ماده آسیب کامپوزیت^۱ استفاده شده‌است که بر اساس معیار چنگ-چنگ^۲ می‌باشد و شامل سه معیار شکست می‌باشد. شکست کامپوزیت زمانی رخ می‌دهد که تنش‌های ترکیبی به مقدار بحرانی برسد. این ممکن است از شکست فیبر، ترک خوردن ماتریس و یا شکست فشاری مطابق با قوانین زیر حاصل شود [۳۲]:

۱- شکست فیبر

$$F_{\text{fiber}} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \bar{\tau} \geq 1 \quad ۲۷-۴$$

هنگام شکستن فیبرها، ثوابت مکانیکی کامپوزیت یعنی E_1 ، E_2 ، G_{12} ، ν_1 و ν_2 برابر صفر می‌باشند.

۲- ترک خوردن ماتریس

$$F_{\text{matrix}} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \bar{\tau} \geq 1 \quad ۲۸-۴$$

زمانی که ماتریس شکسته می‌شود، مقادیر، E_1 ، E_2 ، G_{12} ، ν_1 و ν_2 برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند.

۳- شکست فشاری

$$F_{\text{comp}} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_2}{C_2} + \bar{\tau} \geq 1 \quad ۲۹-۴$$

هنگامی که شکست فشاری رخ می‌دهد، E_2 ، ν_1 و ν_2 برابر صفر قرار داده می‌شوند.

در معادلات بالا $\bar{\tau}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\tau} = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad ۳۰-۴$$

S_1 ، S_2 ، S_{12} و C_2 به ترتیب استحکام کششی طولی، استحکام کششی عرضی، استحکام کششی درون صفحه‌ای و مقاومت فشاری عرضی می‌باشد. خواص مکانیکی استفاده‌شده برای کامپوزیت در

¹ Composite Damage

² Chang-Chang

جدول ۴-۵ آمده است.

جدول ۴-۵ خواص مکانیکی کامپوزیت الیاف شیشه با رزین اپوکسی

مؤلفه	نماد	مقدار
چگالی	ρ (kg/m ³) [۶۲]	۱۲۳۰
مدول برشی	G_{12} (GPa) [۶۲]	۱/۶۴
	G_{13} (GPa) [۶۲]	۱/۶۴
	G_{23} (GPa) [۶۲]	۳/۰۳
مدول یانگ	E_1 (GPa)	۱۲/۰۳
	E_2 (GPa)	۱۲/۰۳
	E_3 (GPa) [۶۲]	۸/۹
نسبت پواسون	ν_{12} [۶۲]	۰/۳۱
	ν_{13} [۶۲]	۰/۳۱
	ν_{23} [۶۲]	۰/۴۹
مدول حجمی	KFAIL (GPa) [۶۲]	۲۰/۴
استحکام برشی	SC (GPa) [۶۲]	۰/۳۹
استحکام کششی طولی	XT (GPa)	۰/۲۹۳
استحکام کششی عرضی	YT (GPa) [۶۲]	۰/۱۳
استحکام فشاری عرضی	YC (GPa) [۶۲]	۰/۶۵
مؤلفه غیر خطی تنش برشی	α [۶۲]	۰

- مدل فرسایش^۱ مواد

در شبیه‌سازی‌های المان محدود، محاسبات مربوط به مدل ماده برای المان‌های شکسته شده در مواد متوقف نمی‌شود و در تغییر شکل‌های زیاد همین امر موجب افزایش چشمگیر در زمان حل و حتی در برخی موارد به دلیل عدم دستیابی به یک راه حل پایدار موجب توقف آن می‌شود. این مشکل به وسیله استفاده از مدل شکست Mat_add_erosion برطرف می‌شود. این مدل با حذف المان‌هایی که تنش یا کرنش در آنها به حداکثر مقدار

¹ Erosion

تعیین شده در مدل ماده رسیده است، از ادامه اجرای محاسبات جلوگیری می‌کند. در جدول ۴-۶ ضریب فرسایش اختصاص داده شده برای پرتابه فولادی و کامپوزیت آورده شده است.

جدول ۴-۶ ضریب فرسایش مواد

کمیت	نماد	پرتابه فولادی	کامپوزیت
حداکثر کرنش مؤثر در شکست	EFFEPS	۲/۱	۰/۱

۴-۳-۲ تعریف خواص تماسی

برای تعریف شرایط تماس بین قسمت‌های مختلف، از الگوریتم سطح به سطح^۱ استفاده شد. در کنار این نوع تماس، تماس سطح به سطح فرسایشی^۲ نیز وجود دارد. مشکلی که CASS برای المان‌های حجمی دارد این است که پرتابه، یک سوراخ سرتاسری در هدف ایجاد نمی‌کند ولی پرتابه از هدف عبور می‌کند. در واقع در تماس CASS در حین نفوذ پرتابه به درون هدف، المان‌ها حذف نمی‌شوند. اما با استفاده از CESS این مشکل حل می‌شود.

در نرم‌افزار ال‌اس داینای برای برخورد پرتابه به هدف سرامیک/کامپوزیت سه نوع تماس می‌توان تعریف کرد. تماس بین پرتابه و سرامیک که از نوع CESS تعریف شده است که در این تماس پرتابه به‌عنوان سطح اصلی^۳ و سرامیک به‌عنوان سطح فرعی^۴ تعریف می‌شود. تماس دوم بین سرامیک و کامپوزیت می‌باشد که این نوع تماس به صورت تماس از نوع سطح به سطح مقید^۵ تعریف شده است (در این نوع تماس دو سطح بهم چسبیده در نظر گرفته می‌شوند) که در این تماس، سرامیک به‌عنوان سطح اصلی و کامپوزیت به‌عنوان سطح فرعی تعریف می‌شود. تماس سوم را نیز می‌توان تماس بین گلوله و ماده پستی تعریف کرد، برای زمانی که پرتابه

¹ Contact_Automatic_Surface_to_Surface (CASS)

² Contact_Eroding_Surface_to_Surface (CESS)

³ Slave

⁴ Master

⁵ Contact_Tied_Surface_to_Surface (CTSS)

درون هدف نفوذ می‌کند، که این تماس نیز از نوع CESS تعریف شده است که پرتابه به‌عنوان سطح اصلی و ماده پشتی به‌عنوان سطح فرعی می‌باشد.

۴-۳-۳ شرایط مرزی و شرط اولیه

شرایط مرزی با توجه به تکیه‌گاه‌ها در نظر گرفته شده است. نمونه در فیکسچر طوری قرار می‌گیرد که هر چهار طرف آن در تمامی جهات مقید می‌گردد؛ بنابراین در این شبیه‌سازی، درجات آزادی هدف در لبه، کامل گرفته شده است و المان‌ها در تمامی جهات مقید شده‌اند.

سرعت اولیه پرتابه به‌عنوان شرایط اولیه اعمال می‌گردد. بدین منظور تمامی گره‌های پرتابه انتخاب شده و به آنها سرعت اولیه داده می‌شود. سرعت در راستای عمود بر هدف تعریف شده است. شتاب در تمامی جهات صفر و از شتاب گرانش زمین صرف نظر شده است. این سرعت با توجه به آزمایش‌های بالستیک مقاردهی شده است.

۴-۳-۴ زمان حل

برای بررسی نفوذ کامل، می‌بایست زمان حل بیشتر از زمان عبور پرتابه در نظر گرفته شود. برای شبیه‌سازی‌های مختلف وابسته به شکل هندسی پرتابه و سرعت اولیه آن، زمان نفوذ کامل متفاوت است. برای نفوذ کامل، این زمان معمولاً بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکروثانیه تنظیم می‌شود.

۴-۳-۵ سایر تنظیمات

الف) اصلاح ضریب مقیاس گام زمانی^۱

با توجه به سرعت نسبتاً بالای فرایند، ضریب مقیاس گام‌های زمانی از مقدار پیش‌فرض ۰/۹، به مقدار ۰/۶ برای هدف‌هایی با دو لایه، کاهش می‌یابد.

ب) در نظرگیری جرم المان حذف شده

^۱ Time step

در حالت پیش‌فرض، پس از رسیدن شرایط المان به حد در نظر گرفته شده برای حذف، المان حذف شده و پس از آن، سهم آن از ماتریس‌های جرم و سفتی حذف می‌گردد. در مسئله مورد بحث، با توجه به تعبیر فیزیکی، المان‌هایی که از نظر عددی حذف گردیده‌اند، باربری نداشته، اما توانایی حرکت خواهند داشت. بدین ترتیب، برای برخورداری از نتایج دقیق‌تر، بهتر است اثر المان‌های حذف شده از ماتریس سفتی سازه حذف شده، اما این اثر در ماتریس جرم حفظ گردد. این تنظیم با استفاده از سویچ ENMAS در سطر اول تنظیم‌های کنترل تماس انجام می‌گیرد. این کار با تغییر مقدار سویچ از صفر (مقدار پیش‌فرض) به یک انجام خواهد شد.

۴-۴- طراحی آزمون

همان‌طور که در جدول ۴-۷ مشاهده می‌شود، تعداد ۲۲ آزمون شبیه‌سازی عددی برای پرتابه‌های مختلف با ضخامت‌های متفاوت هدف طراحی شد. کد نمونه‌ها از سه بخش تشکیل شده است که حرف اول مربوط به پرتابه‌های مختلف بوده، حرف دوم به همراه عدد نشان‌دهنده ضخامت سرامیک و حرف سوم به همراه عدد نشان‌دهنده ضخامت صفحه پشتی می‌باشد. کد پرتابه‌های مختلف بدین صورت است: C پرتابه مخروطی، K پرتابه AK-47 (کلشینکف) و B پرتابه برتا.

جدول ۴-۷ جدول طراحی آزمون

شماره	کد	نوع پرتابه	ضخامت سرامیک (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)
۱	CC3B2	مخروطی	۳	۲
۲	CC3B4	مخروطی	۳	۴
۳	CC5B2	مخروطی	۵	۲
۴	CC5B4	مخروطی	۵	۴
۵	KC3B2	AK-47	۳	۲
۶	KC3B3	AK-47	۳	۳
۷	KC3B4	AK-47	۳	۴
۸	KC4B2	AK-47	۴	۲
۹	KC4B3	AK-47	۴	۳
۱۰	KC4B4	AK-47	۴	۴
۱۱	KC5B2	AK-47	۵	۲
۱۲	KC5B3	AK-47	۵	۳
۱۳	KC5B4	AK-47	۵	۴
۱۴	BC3B2	برتا	۳	۲
۱۵	BC3B3	برتا	۳	۳
۱۶	BC3B4	برتا	۳	۴
۱۷	BC4B2	برتا	۴	۲
۱۸	BC4B3	برتا	۴	۳
۱۹	BC4B4	برتا	۴	۴
۲۰	BC5B2	برتا	۵	۲
۲۱	BC5B3	برتا	۵	۳
۲۲	BC5B4	برتا	۵	۴

فصل ۵ نتایج و بحث

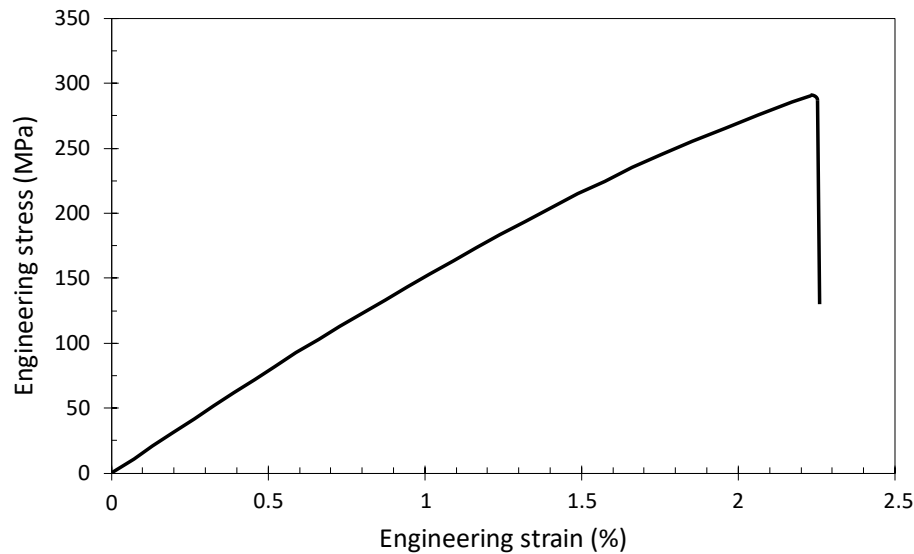
در این فصل نتایج حاصل از این تحقیق ارائه شده و به بحث و بررسی پیرامون این نتایج پرداخته می‌شود. پس از ارائه نتایج تجربی، اعتبارسنجی نتایج مدل عددی با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی ارائه می‌شود. سپس محاسبه سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک مخصوص برای چند پرتابه با کالیبر کوچک و متوسط بیان می‌شود. در مراحل بعدی منحنی سرعت خروجی بر حسب سرعت برخورد برای اهداف مختلف به‌دست خواهد آمد. همچنین سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت لایه سرامیک و کامپوزیت محاسبه خواهد شد.

۵-۱- نتایج تجربی

در این بخش، نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی به‌ترتیب برای آزمون کشش و سپس برای آزمون بالستیک نمونه‌های مختلف ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۱-۱ آزمون کشش

بعد از انجام آزمون کشش، نمودار تنش-کرنش ورق کامپوزیتی با رزین اپوکسی، با میانگین‌گیری از نتایج آزمون‌های تکراری به صورت شکل ۵-۱ بدست آمد.



شکل ۵-۱ نمودار تنش-کرنش صفحه کامپوزیتی

نتایج به دست آمده از آزمون کشش کامپوزیت در جهت طولی، در جدول ۵-۱ ارائه شده است. این آزمون ۳ بار تکرار شده است که نتایج تکرار آزمون در سطرهای مختلف جدول و مقادیر متوسط در سطر آخر بیان شده است. نتایج جدول تکرارپذیری و دقت لازم آزمون‌ها را تأیید می‌کند. در شبیه‌سازی عددی از میانگین این نتایج برای مدول یانگ در جهت طولی و عرضی و همچنین استحکام کششی طولی کامپوزیت استفاده شده است.

جدول ۵-۱ نتایج آزمون کشش کامپوزیت

شماره آزمایش	کد نمونه	مدول یانگ (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول
۱	CN0-01	۱۳۲۲۶	۲۹۰/۶	۲/۲۳
۲	CN0-02	۱۲۵۱۷	۲۹۶/۸	۲/۲۹
۳	CN0-03	۱۱۳۶۸	۲۹۱/۴	۲/۵۸
میانگین		۱۲۰۳۷	۲۹۲/۹	۲/۳۶

۵-۱-۲ آزمون بالستیک

در آزمون‌های تجربی، پرتابه مورد استفاده مخروطی و دارای قطر ۸/۷ mm، طول ۹ mm و جرم ۲/۶ gr می‌باشد. در مجموع شش آزمایش بالستیک بر روی اهداف با ضخامت‌های متفاوت انجام شد. پرتابه‌ها با دو سرعت ۲۴۴/۸ m/s و ۳۶۸/۹ m/s به‌ازای حداکثر فشار دستگاه تفنگ گازی با گازهای ازت و هلیوم به هدف برخورد کرده است. جزئیات نتایج هر آزمایش از جمله نحوه شکست سرامیک، تغییر شکل صفحه پشتی و تغییر شکل

و وزن پرتابه‌ها پس از برخورد بررسی شده است. در جدول ۲-۵ مشخصات پرتابه و هدف در هر آزمایش و همچنین سرعت برخورد آورده شده است.

جدول ۲-۵ سرعت برخورد و خروج پرتابه مخروطی در آزمون‌های مختلف ضربه

شماره آزمایش	کد نمونه	وزن نمونه (gr)	وزن پرتابه (gr)	ضخامت سرامیک (mm)	ضخامت کامپوزیت (mm)	سرعت برخورد (m/s)	سرعت خروج پرتابه (m/s)
۱	CC3B2	۷۶	۲/۶۴	۳	۲	۲۴۴/۸	۰
۲	CC3B2	۷۶	۲/۶۲	۳	۲	۲۴۴/۸	۰
۳	CC3B2	۷۶	۲/۶۶	۳	۲	۳۶۸/۹	۲۰۵/۸
۴	CC3B4	۹۰	۲/۶۴	۳	۴	۳۶۸/۹	۰
۵	CC5B2	۱۰۰	۲/۵۲	۵	۲	۳۶۸/۹	۰
۶	CC5B4	۱۱۸	۲/۶۱	۵	۴	۳۶۸/۹	۰

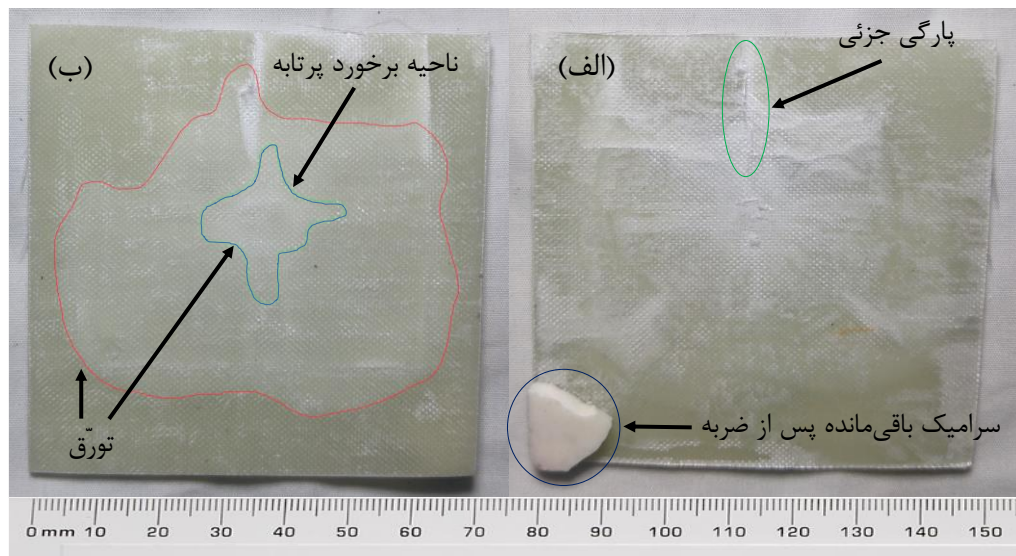
• آزمایش شماره ۱ و ۲

در این آزمایش، سرعت برخورد پرتابه به هدف برابر با $244/8$ m/s، ضخامت سرامیک برابر 3 mm و کامپوزیت برابر 2 mm می‌باشد. در این سرعت هدف سرامیکی تخریب شده ولی پرتابه از صفحه کامپوزیتی عبور نمی‌کند. در شکل ۲-۵ تکه‌های خرد شده به جا مانده از آزمایش‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵ خردشدگی سرامیک در آزمون ۱ (CC3B2) با سرعت برخورد $244/8$ m/s

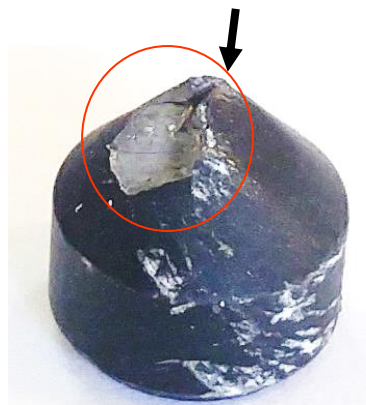
شکل ۳-۵ تغییر شکل صفحه کامپوزیتی و لایه‌لایه شدن آن پس از ضربه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سرامیک بار ضربه‌ای متمرکز را بر روی سطح کامپوزیت توزیع و مانع از پارگی آن شده است.



شکل ۳-۵ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۱ (CC3B2) با سرعت برخورد $244/8 \text{ m/s}$ ،
الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

تورق یا لایه‌لایه‌شدگی (گسیختگی پتالینگ) یکی از اصلی‌ترین شکل‌های گسیختگی در این کامپوزیت‌ها است. بعد از انجام آزمایش‌های بالستیک، ناحیه لایه‌لایه‌شده به صورت تغییر رنگ یافته نسبت به سایر نقاط هدف کامپوزیتی مشخص شده است. مرزهای انتهایی تورق با رنگ قرمز در شکل ۳-۵-ب علامت‌گذاری شده است. همچنین لایه‌لایه‌شدگی شدیدتر ورق در جهات طولی و عرضی که در محل برخورد پرتابه ایجاد شده است در شکل ۳-۵-ب با رنگ آبی مشخص شده. در شکل ۴-۵ فرسایش ایجاد شده در پرتابه نمایش داده شده است.

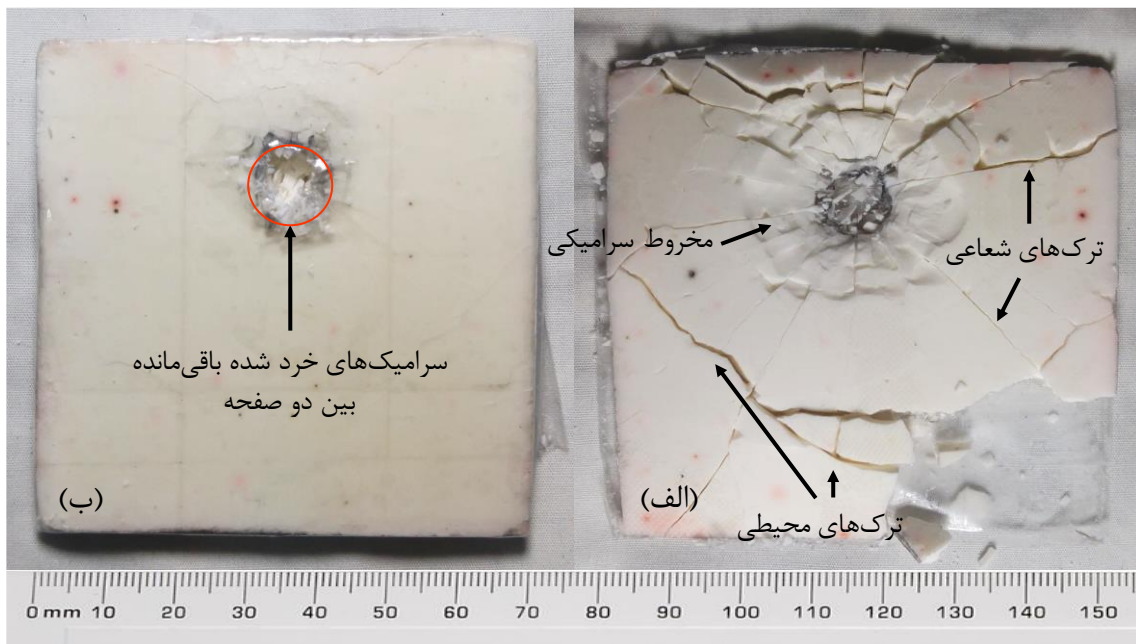
قسمت فرسایش یافته پرتابه



شکل ۴-۵ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۱ پس از برخورد با سرعت $244/8 \text{ m/s}$ به هدف CC3B2

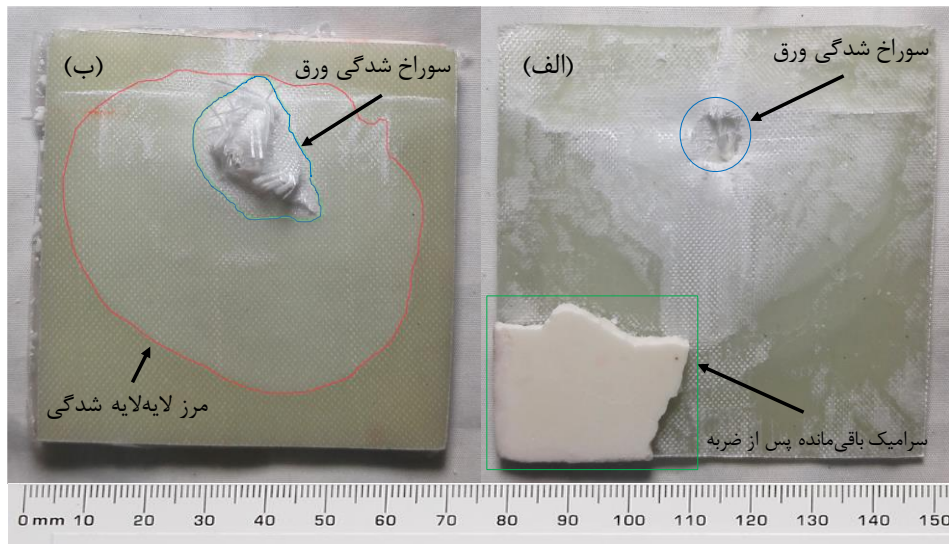
• آزمایش شماره ۳

در این آزمون و آزمون‌های بعدی از گاز هلیوم برای شلیک پرتابه به هدف استفاده شد تا بتوانیم به سرعت‌های بالاتری دست پیدا کنیم. سرعت برخورد پرتابه به هدف در این شرایط برابر $368/9 \text{ m/s}$ اندازه‌گیری شد و ضخامت هدف نیز با آزمون قبلی برابر بود. هدف سرامیکی از دو جهت در شکل ۵-۵ نمایش داده شده است. در این آزمون سرامیک به تکه‌های کوچک‌تر خرد شد و صفحه پشتیبان کامپوزیتی نیز در این سرعت برخورد گسیخته و پرتابه با سرعت $205/8 \text{ m/s}$ از هدف خارج شد.



شکل ۵-۵ شکست سرامیک نمونه CC3B2 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون شماره ۳،
الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

همان‌طور که در شکل ۵-۵ دیده می‌شود در اثر برخورد پرتابه به هدف، سطح برخورد به صورت مخروطی بوده و در محل برخورد میزان خرد شدن سرامیک بیشتر است و با فاصله گرفتن از محل برخورد، تکه‌های خرد شده سرامیک، بزرگ‌تر می‌شود. رشد ترک‌های شعاعی و محیطی نیز به وضوح دیده می‌شود. مکانیزم‌های شکست در اهداف ترد که شکست شعاعی و خرد شدن می‌باشد با چینش قطعات سرامیک در کنار یکدیگر پس از برخورد به خوبی دیده می‌شود. سوراخ شدن و لایه‌لایه شدگی (گسیختگی پتالینگ) صفحه پشتیبان کامپوزیتی نیز در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۶ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۳ (CC3B2) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ، الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

همان طور که در شکل ۵-۶ دیده می شود پرتابه پس از برخورد به هدف و عبور از سرامیک، ورق کامپوزیتی را گسیخته و از ناحیه آبی رنگ مشخص شده در شکل ۵-۶-ب خارج شده است. لایه لایه شدگی ورق کامپوزیتی نیز که با تغییر رنگ آن همراه است با خط قرمز مشخص شده است. تغییر رنگی که به صورت یک خط سفید در شکل ۵-۶-ب دیده می شود به دلیل نزدیک بودن محل برخورد پرتابه به فیکسچر نگه دارنده هدف می باشد. همان طور که در شکل ۵-۷ مشاهده می شود، پرتابه نیز در این آزمایش دچار فرسایش شده و وزن آن پس از برخورد از $2/66 \text{ gr}$ به $2/64 \text{ gr}$ رسیده است.

قسمت فرسایش یافته پرتابه



شکل ۵-۷ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۳ پس از برخورد با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC3B2

با دقت در شکل ۵-۷ می‌توان متوجه خراشیدگی‌های ناشی از ذرات سرامیک خرد شده و لهیدگی یک سمت پرتابه شد. این اتفاق به دلیل عدم برخورد کاملاً مستقیم پرتابه مخروطی به هدف رخ می‌دهد. دلیل این امر نیز می‌تواند به خاطر عدم قرارگیری مناسب پرتابه در لوله تفنگ و چرخش ناخواسته پرتابه پس از شلیک و یا ناهمگنی در وزن یا هندسه پرتابه باشد.

با مقایسه آزمایش‌های ۱ و ۲ با آزمایش ۳ مشاهده می‌شود که در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک میزان آسیب و خرابی وارده به هدف بیشتر از سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک می‌باشد زیرا با افزایش سرعت انرژی جذب‌شده توسط هدف کاهش پیدا می‌کند. افزایش سرعت اولیه پرتابه باعث کاهش مدت زمان نفوذ کامل و به تبع آن گسترش کمتر خیز و خرابی و متمرکزتر شدن آنها می‌شود. در نتیجه انرژی جذب‌شده کمتر می‌شود و پرتابه با سرعت نزدیک‌تری نسبت به سرعت اولیه از هدف خارج می‌شود.

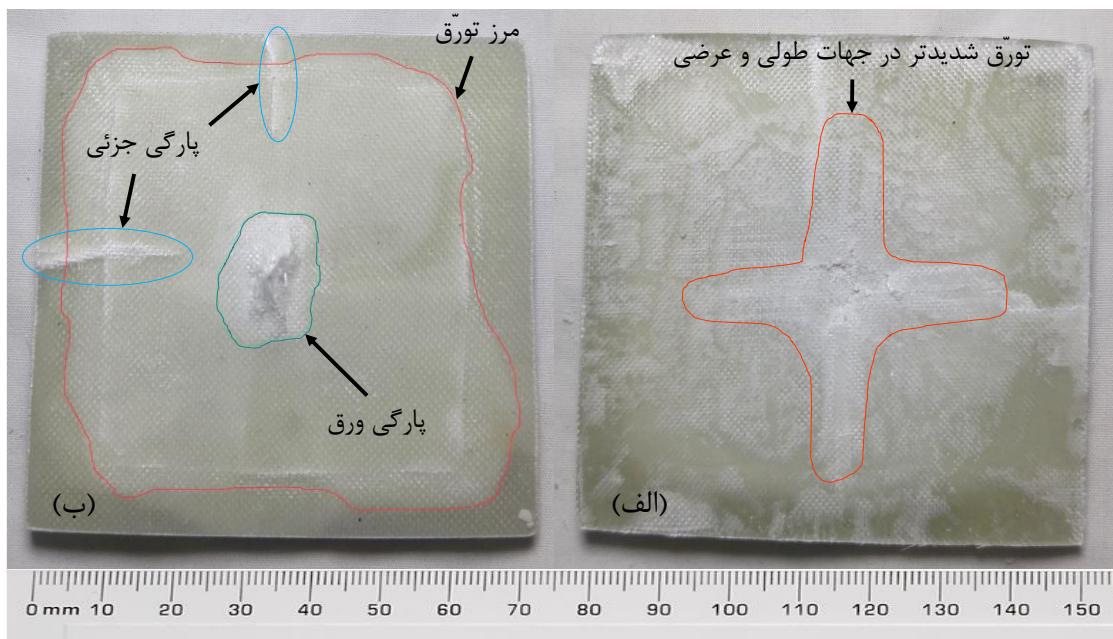
• آزمایش شماره ۴

در این آزمایش سرعت برخورد پرتابه به هدف $368/9 \text{ m/s}$ و هدف متشکل از سرامیک به ضخامت 3 mm و کامپوزیت به ضخامت 4 mm می‌باشد. در این آزمایش، مطابق شکل ۵-۸ برای مشاهده مکانیزم تخریب، تکه‌های خرد شده نمونه‌ی سرامیکی در کنار یکدیگر چیده شد. مشاهده می‌شود که سرامیک به تکه‌های کوچکتر خرد شده و ورق کامپوزیتی پشتیبان نیز دچار گسیختگی شده ولی پرتابه از هدف عبور نکرده است.



شکل ۵-۸ شکست سرامیک نمونه CC3B4 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ در آزمون شماره ۴

همان طور که در شکل ۵-۸ مشاهده می‌شود میزان ترک‌های شعاعی و محیطی و همچنین مساحت ناحیه مخروطی ایجاد شده در سرامیک زیاد می‌باشد که دلیل این امر جذب تمام انرژی پرتابه است. در شکل ۵-۹ تخریب ایجاد شده در لایه پشتیبان کامپوزیتی مشاهده می‌شود. گشیدگی الیاف در جهت طولی و عرضی در محل برخورد پرتابه که با یک تغییر رنگ جزئی همراه بود در شکل ۵-۹-الف نشان داده شده است. در شکل ۵-۹-ب نیز گسیختگی الیاف در جهات طولی و عرضی و همچنین محل برخورد پرتابه مشخص شده.



شکل ۵-۹ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۴ (CC3B4) با سرعت برخورد $368/9$ m/s، الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

با مقایسه شکل ۵-۶-ب و شکل ۵-۹-ب متوجه افزایش مساحت لایه‌لایه شدگی ورق کامپوزیتی در اثر برخورد پرتابه به هدف می‌شویم. به دلیل افزایش ضخامت کامپوزیت، تمامی انرژی جنبشی پرتابه توسط هدف جذب شد و پرتابه نتوانست از هدف عبور کند؛ در نتیجه میزان خرد شدگی سرامیک و همچنین مساحت لایه‌لایه-شدگی کامپوزیت افزایش پیدا کرد. با توجه به نحوه کسب شدگی هدف و همچنین محدودیت‌های دستگاه آزمون در فشارهای بیش از 50 bar، با یک تقریب خوب می‌توانیم سرعت برخورد $368/9$ m/s را سرعت حد بالستیک تجربی برای این هدف در نظر بگیریم. در شکل ۵-۱۰ پرتابه فرسایش یافته پس از برخورد نشان داده شده است. وزن این پرتابه پس از برخورد به هدف از $2/64$ gr به $2/72$ gr رسیده است.

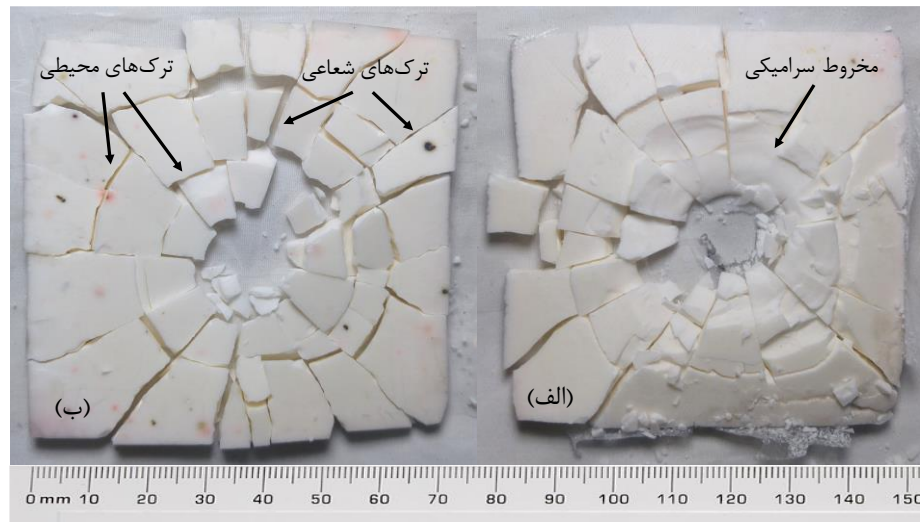


شکل ۵-۱۰ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۴ پس از برخورد با سرعت $368/9$ m/s به هدف CC3B4

همان‌طور که در شکل ۵-۱۰ مشاهده می‌شود، نوک پرتابه در اثر برخورد مستقیم به هدف دچار لهیدگی شده و تکه‌هایی از سرامیک نیز به پرتابه چسبیده‌اند. افزایش وزن پرتابه پس از ضربه نیز به همین علت می‌باشد. باید توجه داشت که تخت شدن نوک پرتابه پس از برخورد به سرامیک قدرت نفوذ آن را در برخورد به لایه کامپوزیتی پشتی کاهش خواهد داد. پرتابه‌ها با دماغه نوک‌تیز، در صورتی که شرایط ضربه (جهت برخورد، شرایط هدف و...) ایده‌آل باشد، بهترین عملکرد بالستیکی را ارائه می‌کنند. درحالی‌که اگر شرایط از حالت ایده‌آل فاصله بگیرد، این نوع پرتابه‌ها به دلیل امکان انحراف در هدف و یا کمزش از سطح هدف، ضعیف‌ترین عملکرد را در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک از خود نشان می‌دهند.

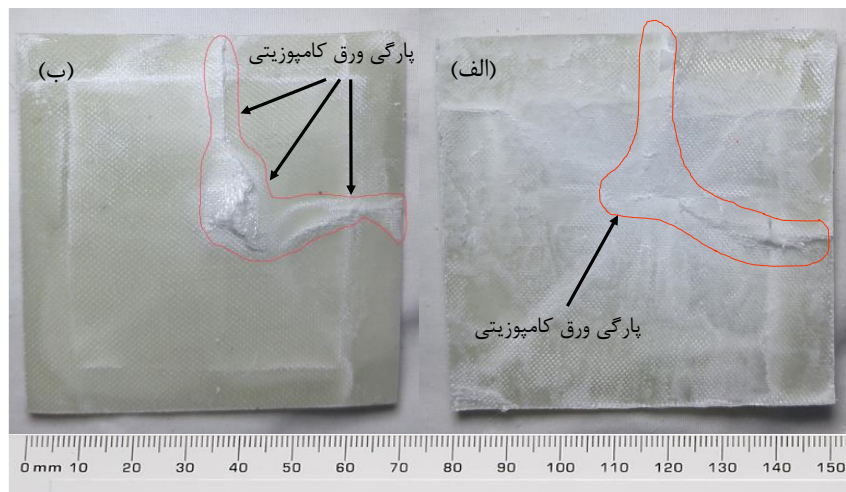
• آزمایش شماره ۵

در این آزمایش سرعت برخورد پرتابه به هدف $368/9$ m/s و هدف متشکل از سرامیک به ضخامت 5 mm و کامپوزیت به ضخامت 2 mm می‌باشد. پس از برخورد پرتابه به هدف، سرامیک شکسته شده و ورق کامپوزیتی پشتیبان نیز دچار گسیختگی شده ولی پرتابه از هدف عبور نکرده است. پرتابه نیز پس از برخورد به هدف فرسایش پیدا کرده و شکسته شد. در شکل ۵-۱۱ هدف سرامیکی پس از برخورد پرتابه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۱ شکست سرامیک نمونه CC5B2 با سرعت برخورد $368/9$ m/s در آزمون شماره ۵،
الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

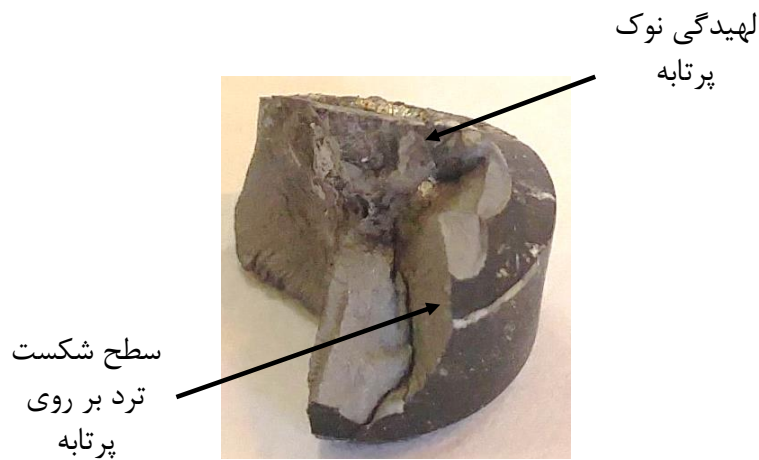
همان‌طور که در شکل ۵-۱۱ مشاهده می‌شود، مخروط سرامیکی، ترک‌های شعاعی و ترک‌های محیطی ناشی از برخورد پرتابه به هدف به وضوح قابل رویت می‌باشد. مطابق شکل ۵-۱۲ پرتابه پس از خرد کردن سرامیک و عبور از آن به ورق کامپوزیتی برخورد کرده و باعث گسیختگی آن شده است.



شکل ۵-۱۲ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۵ (CC5B2) با سرعت برخورد $368/9$ m/s،
الف) سطح تماس، ب) سطح آزاد

همانند آزمایش شماره ۴، به دلیل محدودیت‌های تفنگ گازی و همچنین نحوه گسیختگی هدف، سرعت m/s $368/9$ ، سرعت حد بالستیک تجربی تخمین زده شده است. مطابق شکل ۵-۱۳ بخشی از پرتابه با شکست

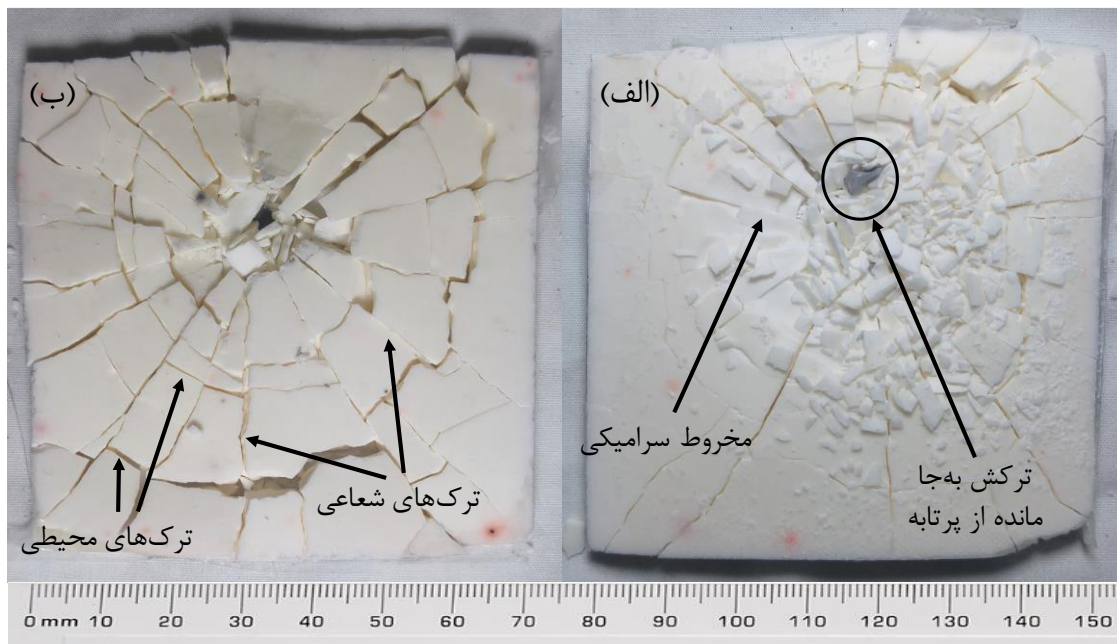
کاملاً ترد از آن جدا شده و وزن آن از $2/52 \text{ gr}$ به $1/36 \text{ gr}$ رسیده است. شکست کامل پرتابه در این وضعیت را می‌توان به افزایش ضخامت لایه سرامیکی و در نتیجه مقاومت به ضربه آن مرتبط دانست.



شکل ۵-۱۳ پرتابه فرسایش یافته آزمون ۵ پس از برخورد با سرعت $368/9 \text{ m/s}$ به هدف CC5B2

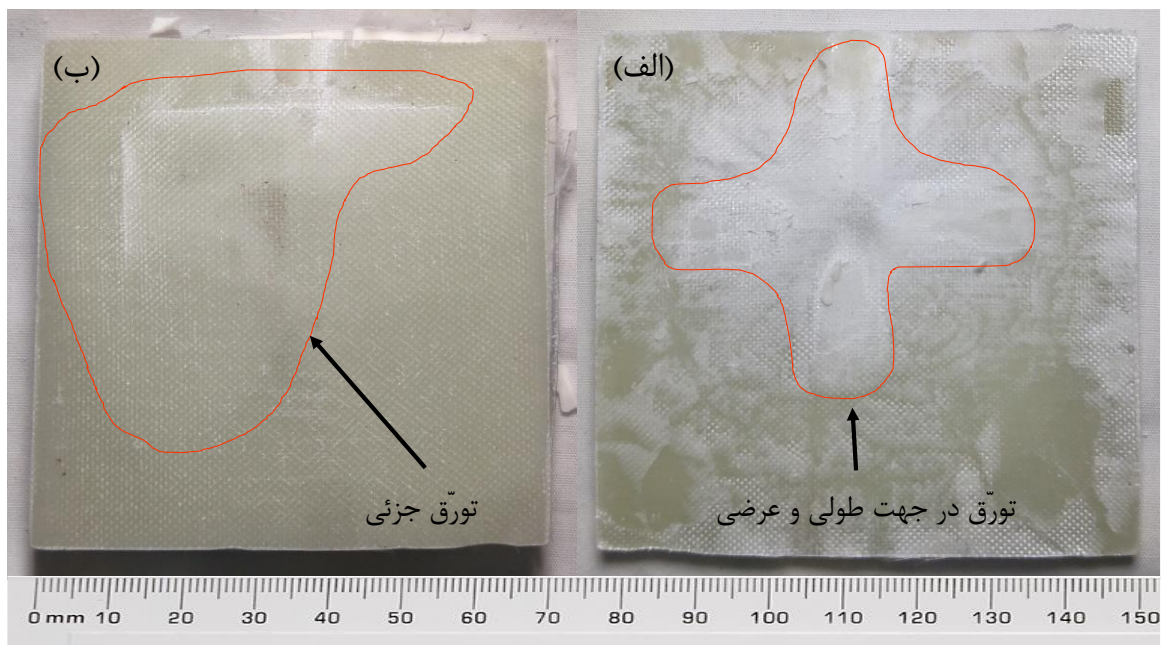
• آزمایش شماره ۶

در این آزمایش، سرعت برخورد پرتابه به هدف $368/9 \text{ m/s}$ ، ضخامت سرامیک برابر 5 mm و کامپوزیت برابر 4 mm می‌باشد. در این سرعت هدف سرامیکی تخریب شده ولی پرتابه از صفحه کامپوزیتی عبور نکرده است. در شکل ۵-۱۴ هدف سرامیکی پس از برخورد پرتابه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۴ شکست سرامیک نمونه CC5B4 با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ، (الف) سطح تماس، (ب) سطح آزاد

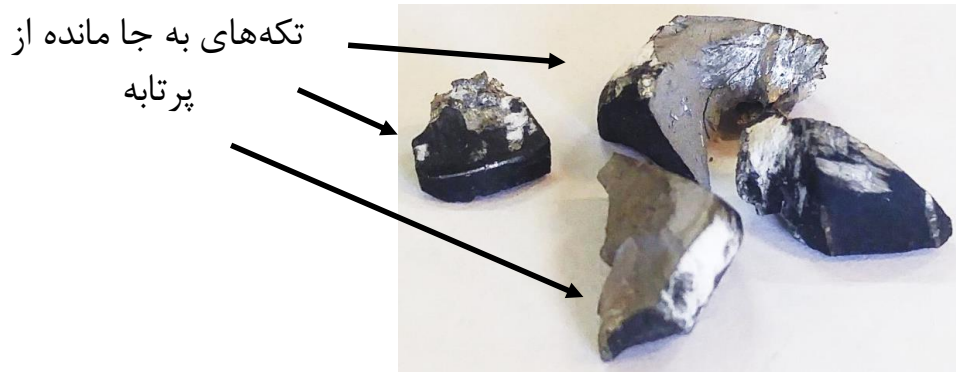
همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می‌شود لایه سرامیکی با استحکام فشاری بالا، فشار متمرکز ضربه را به‌درستی بر روی سطح کامپوزیت توزیع و مانع از نفوذ سریع پرتابه می‌شود. همچنین مشاهده شد که ذرات سرامیکی خرد شده مانع اصلی برای ادامه نفوذ پرتابه پس از شکست سرامیک می‌باشند. این ذرات سرامیکی خرد شده موجب فرسایش پرتابه و به‌جا ماندن ترکش‌هایی در آن شده است. با توجه به شکل ۵-۱۴ با افزایش ضخامت سرامیک، مخروط سرامیکی ایجاد شده بزرگ‌تر شده است. با بزرگ‌تر شدن قاعده این مخروط سرامیکی، سطحی از کامپوزیت پشتی که تحت تأثیر قرار گرفته و حالت مخروط به‌خود می‌گیرد بزرگ‌تر خواهد شد و بنابراین پرتابه انرژی بیشتری جهت برآمده کردن و نهایتاً گسیختگی ماده پشتی نیاز دارد که این حالت، افزایش حد بالستیک را نتیجه می‌دهد. تخریب ایجاد شده در لایه کامپوزیتی نیز در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. به‌دلیل ضخامت بالای سرامیک و کامپوزیت در این هدف، میزان تورق ایجاد شده در صفحه‌ی کامپوزیتی نسبت به اهداف دیگر کمتر می‌باشد.



شکل ۵-۱۵ خرابی صفحه کامپوزیتی در آزمون ۶ (CC5B4) با سرعت برخورد $368/9 \text{ m/s}$ ،

(الف) سطح تماس، (ب) سطح آزاد

پرتابه در این آزمایش پس از برخورد به هدف کاملاً خرد شد و وزن ترکش‌های به‌جا مانده از آن پس از برخورد به $1/80 \text{ gr}$ رسید. در شکل ۵-۱۶ پرتابه پس از برخورد نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶ پرتابه فرسایش یافته با سرعت برخورد $368/9$ m/s به هدف CC5B4

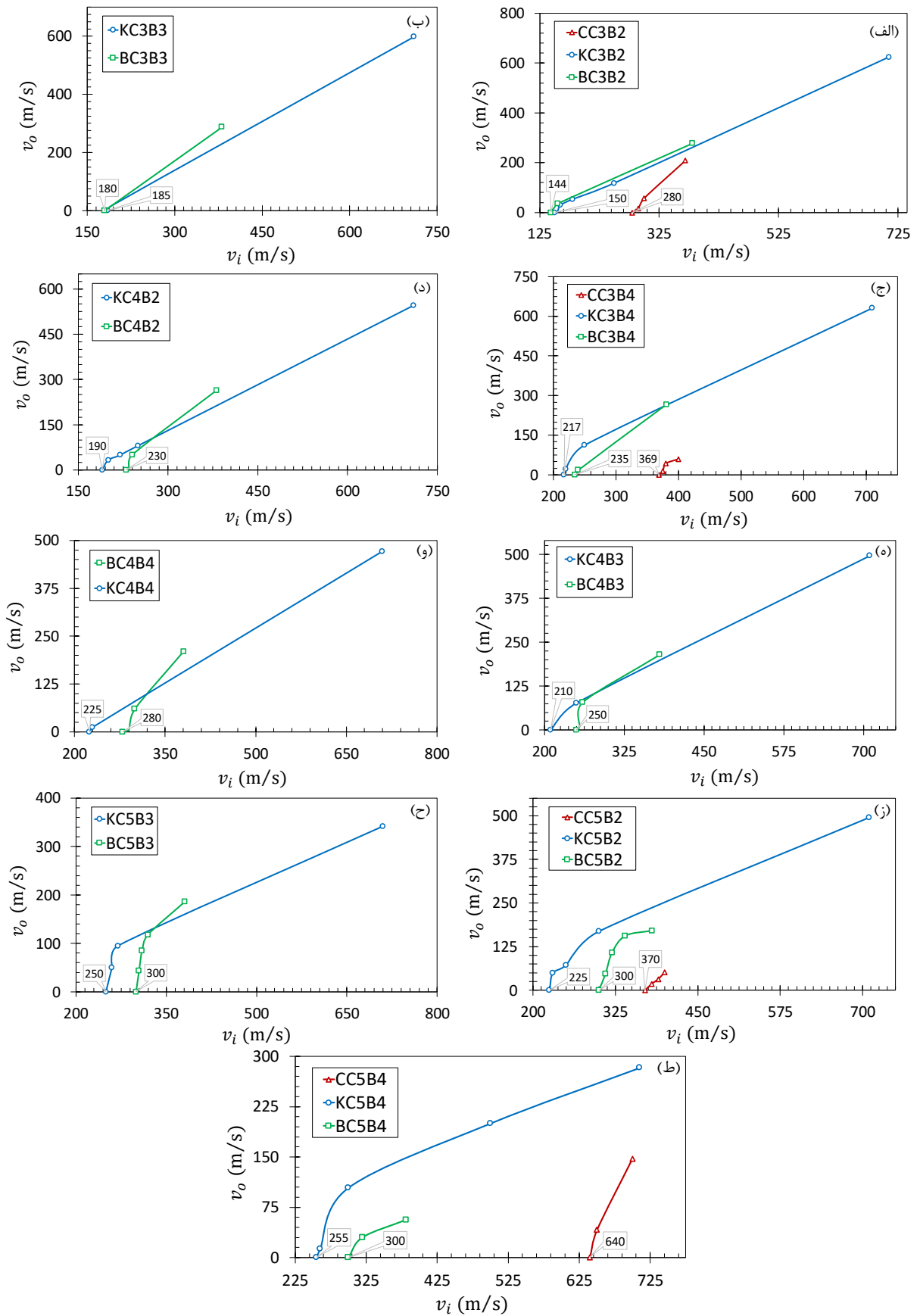
با مقایسه شکل پرتابه‌ها در آزمایش‌های بالستیک انجام شده می‌توان مشاهده کرد که افزایش ضخامت هدف موجب افزایش میزان فرسایش پرتابه می‌شود.

۵-۲- نتایج عددی

در بخش عددی این تحقیق، فرایند نفوذ گلوله در هدف سرامیک/کامپوزیت با نرم‌افزار ال‌اس داینا شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی، ابتدا یک مدل معتبر به وسیله داده‌های استخراج شده از آزمون‌های تجربی ایجاد شد. سپس سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک مخصوص برای پرتابه‌های مخروطی، AK-47 و برتا و همچنین نمودارهای سرعت خروجی بر حسب سرعت ورودی برای این پرتابه‌ها به دست آمد.

۵-۲-۱ تغییر سرعت پرتابه

در این بخش نمودارهای سرعت خروجی پرتابه بر حسب سرعت برخورد به هدف آورده شده‌اند. این نمودارها معیار خوبی برای مقایسه مقاومت اهداف با ضخامت‌های متفاوت با یکدیگر می‌باشد. برای سهولت بیشتر در مقایسه، این نمودارها در دو قسمت ارائه می‌شوند. در قسمت اول مطابق شکل ۵-۱۷ میزان تغییرات سرعت خروجی نسبت به سرعت برخورد برای پرتابه‌های متفاوت در ضخامت ثابت هدف نشان داده شده است تا بتوان میزان توانایی هر یک از پرتابه‌ها در نفوذ به هدف را مشاهده کرد. بازه سرعت پرتابه‌ها در نمودارهای زیر از حداکثر سرعت پرتابه هنگام خارج شدن از سلاح تا سرعت حد بالستیک می‌باشد که به ترتیب برای پرتابه مخروطی، AK-47 و برتا برابر 370 m/s، 710 m/s و 380 m/s اندازه‌گیری شده است.



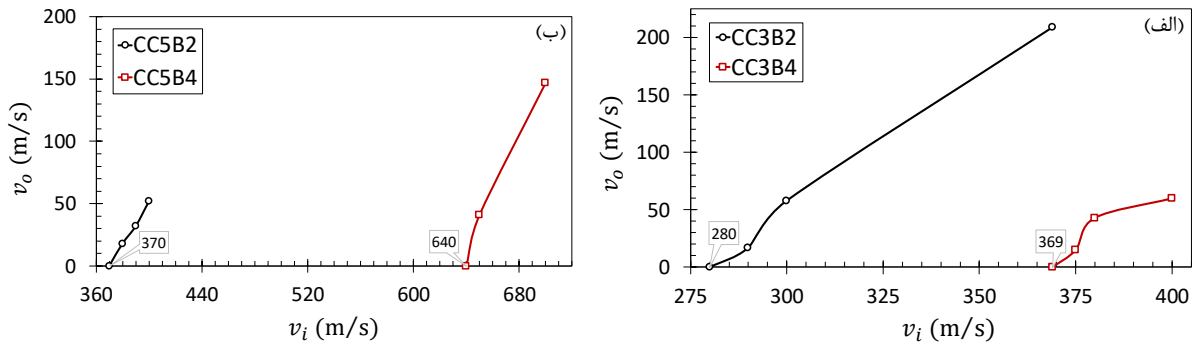
شکل ۵-۱۷ نمودارهای سرعت باقی مانده نسبت به سرعت اولیه برای پرتابه‌های مختلف

در بخش عددی این تحقیق، به دلیل محدودیت‌های موجود در آزمون تجربی، سرعت حد بالستیک، حداقل سرعت اولیه‌ای فرض می‌شود که در آن، سرعت باقی‌مانده پرتابه صفر شود و پرتابه علی‌رغم نفوذ در هدف، توانایی عبور از آن را نداشته باشد. با توجه به شکل ۵-۱۷ و مقایسه نمودارها با یکدیگر مشاهده می‌شود که بیشترین سرعت اولیه و کمترین سرعت حد بالستیک مربوط به پرتابه AK-47 و کمترین سرعت اولیه و بیشترین سرعت حد بالستیک مربوط به پرتابه مخروطی می‌باشد. به دلیل تأثیر زیاد سرعت اولیه پرتابه در سرعت حد بالستیک این انتظار می‌رفت که پرتابه AK-47 دارای سرعت حد بالستیک کمتری نسبت به سایر پرتابه‌ها باشد. رفتار پرتابه مخروطی نیز نشان‌دهنده توانایی بالستیکی پایین این پرتابه در مقایسه با دو پرتابه دیگر می‌باشد. همچنین با دقت در نمودارهای بالا می‌توان متوجه افت محسوس سرعت خروج پرتابه در سرعت‌ها نزدیک حد بالستیک به خصوص در ضخامت‌های بالاتر هدف شد. هرچه سرعت اولیه پرتابه زیاد می‌شود و پرتابه از سرعت حد بالستیک فاصله می‌گیرد سرعت خروج پرتابه از هدف نیز افزایش پیدا می‌کند و به سرعت اولیه نزدیک می‌شود. این رفتار در شبیه‌سازی کاملاً منطبق بر آزمون‌های تجربی صورت گرفته و همچنین رفتار اهداف سرامیک/کامپوزیت می‌باشد و دقت بالای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در شکل ۵-۱۷ الف و شکل ۵-۱۷ ب مشاهده می‌شود که بر خلاف سایر نمودارها، سرعت حد بالستیک پرتابه برتا کمتر از AK-47 می‌باشد که دلیل این رفتار در قسمت‌های بعدی توضیح داده می‌شود.

نمودارها در قسمت دوم، به منظور مشاهده میزان تأثیر ضخامت هر یک از لایه‌ها تشکیل دهنده هدف، به دو بخش تقسیم شدند. در بخش اول با تغییر ضخامت لایه پشتیبان کامپوزیتی و ثابت نگه داشتن صفحه سرامیکی برای هر پرتابه، میزان تأثیر این لایه در مقاومت بالستیکی هدف ارائه شده است (شکل ۵-۱۸، شکل ۵-۱۹ و شکل ۵-۲۰). در بخش دوم به بررسی اثر تغییر ضخامت سرامیک در میزان مقاومت بالستیکی هدف برای هر پرتابه پرداخته شده است (شکل ۵-۲۱، شکل ۵-۲۲ و شکل ۵-۲۳).

- بخش اول: تغییر ضخامت لایه پشتیبان کامپوزیتی

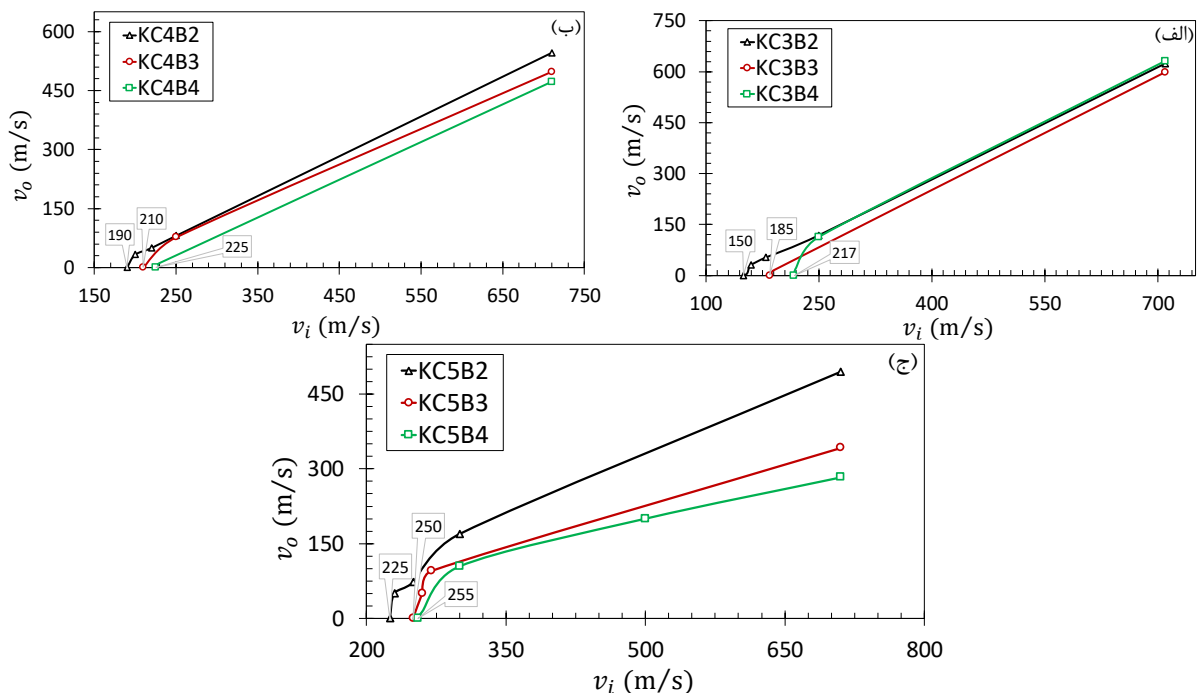
در شکل ۵-۱۸ نمودارهای سرعت باقی مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه مخروطی نشان داده شده است. در شکل ۵-۱۸-الف ضخامت سرامیک ثابت و برابر ۳ mm می باشد و ضخامت صفحه کامپوزیتی افزایش پیدا کرده است. در شکل ۵-۱۸-ب نیز افزایش ضخامت کامپوزیت به ازای سرامیک ۵ mm انجام شده است.



شکل ۵-۱۸ تغییرات سرعت پرتابه مخروطی برای سرامیک با ضخامت ثابت، الف) $t_c = 3$ mm

ب) $t_c = 5$ mm

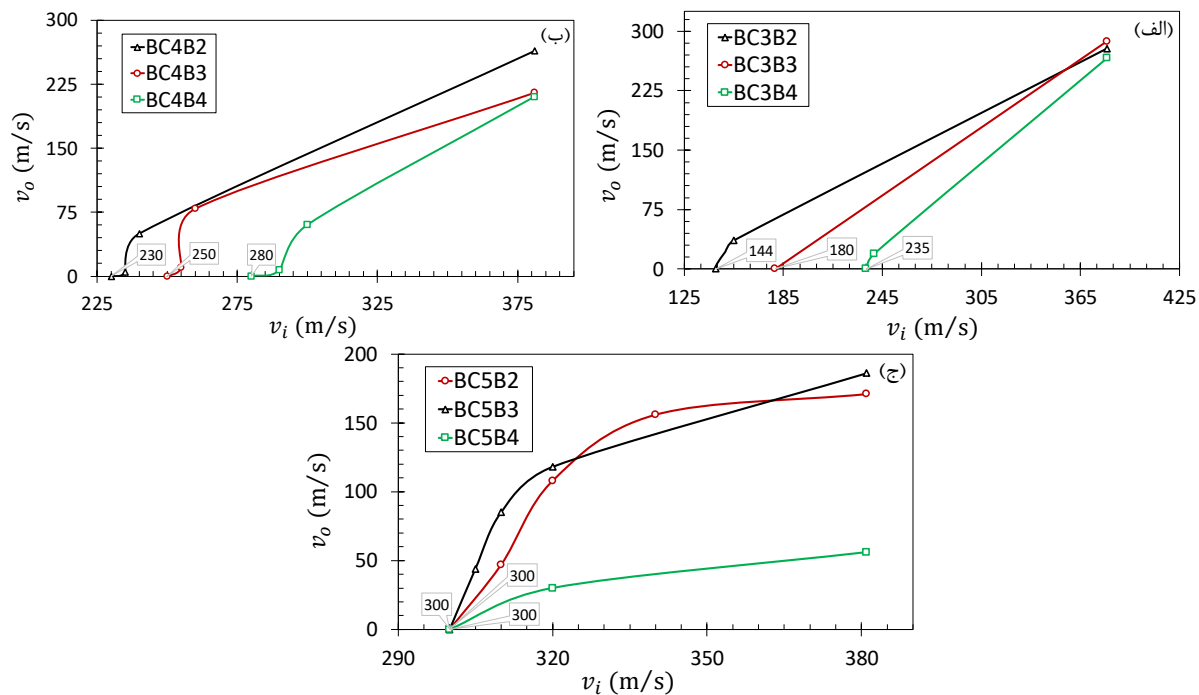
همان طور که در شکل ۵-۱۸ مشاهده می شود تغییر ضخامت کامپوزیت تأثیر زیادی روی تغییرات سرعت پرتابه مخروطی دارد و این تغییرات در هدف با سرامیک ۵ mm به مراتب بیشتر از هدف با سرامیک ۳ mm می باشد. در شکل ۵-۱۹ نمودار تغییرات سرعت پرتابه AK-47 نشان داده شده است. هر یک از نمودارها بر حسب افزایش ضخامت کامپوزیت در یک ضخامت ثابت سرامیک ارائه شده اند.



شکل ۵-۱۹ تغییرات سرعت پرتابه AK-47 برای سرامیک با ضخامت ثابت، الف) $t_c = 3$ mm

ب) $t_c = 4$ mm ج) $t_c = 5$ mm

با توجه به شکل ۵-۱۹ مشاهده می‌شود که در ضخامت‌های پایین سرامیک، افزایش ضخامت کامپوزیت در سرعت‌های بالا، تأثیر بسیار کمی روی تغییرات سرعت پرتابه AK-47 دارد ولی با کاهش سرعت پرتابه و نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این تغییرات بیشتر می‌شود. این روند با افزایش ضخامت سرامیک تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵-۱۹-ج مشاهده می‌شود، برای سرامیک با ضخامت ۵ mm، افزایش ضخامت کامپوزیت در سرعت‌های بالا تأثیر زیادی روی سرعت خروج پرتابه می‌گذارد ولی با نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این تأثیرات کمتر شده و باعث نزدیک شدن سرعت حد بالستیک اهداف به هم می‌شود. در شکل ۵-۲۰ نمودار تغییرات سرعت ورودی نسبت به خروجی پرتابه برتا برای اهداف با ضخامت‌های مختلف ارائه شده است. این نمودارها برحسب افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی در ضخامت ثابت صفحه سرامیکی تنظیم شده اند.



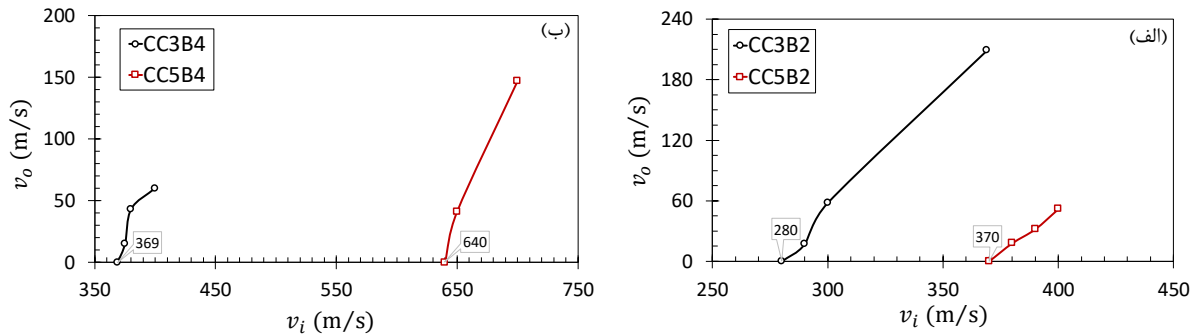
شکل ۵-۲۰ تغییرات سرعت پرتابه برتا برای سرامیک با ضخامت ثابت، الف) $t_c = 3 \text{ mm}$

ب) $t_c = 4 \text{ mm}$ ج) $t_c = 5 \text{ mm}$

همان‌طور که در شکل ۵-۲۰-الف مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت کامپوزیت در اهداف با ضخامت سرامیک پایین تأثیر چندانی روی تغییرات سرعت ورودی و خروجی پرتابه برتا ندارد ولی با کاهش سرعت و نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این اختلاف بیشتر شده و افزایش ضخامت کامپوزیت تأثیر مثبت خود را نشان می‌دهد. این درحالی‌است که مطابق شکل ۵-۲۰-ج در ضخامت‌های بالای سرامیک برای پرتابه برتا، افزایش ضخامت کامپوزیت تأثیری روی سرعت حد بالستیک ندارد.

• بخش دوم: تغییر ضخامت سرامیک

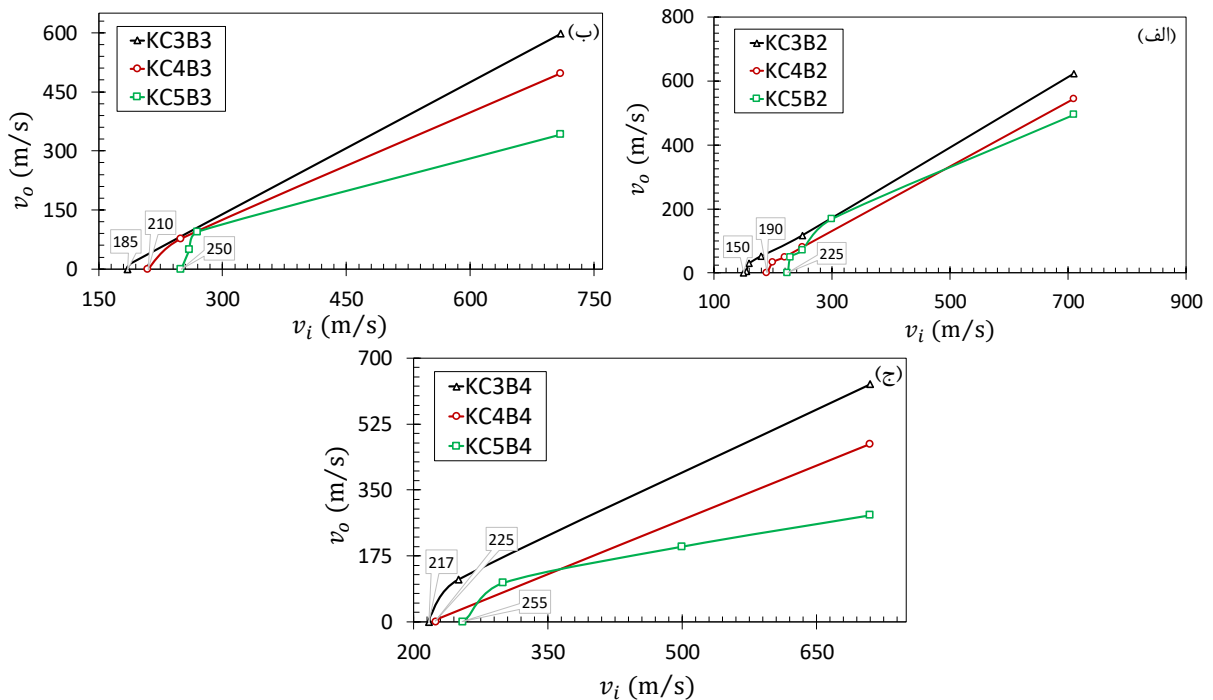
شکل ۵-۲۱ تغییرات سرعت پرتابه مخروطی را با تغییر ضخامت سرامیک و ثابت نگه‌داشتن لایه پشتیبان نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱ تغییرات سرعت پرتابه مخروطی برای کامپوزیت با ضخامت ثابت، الف) $t_b = 2$ mm

ب) $t_b = 4$ mm

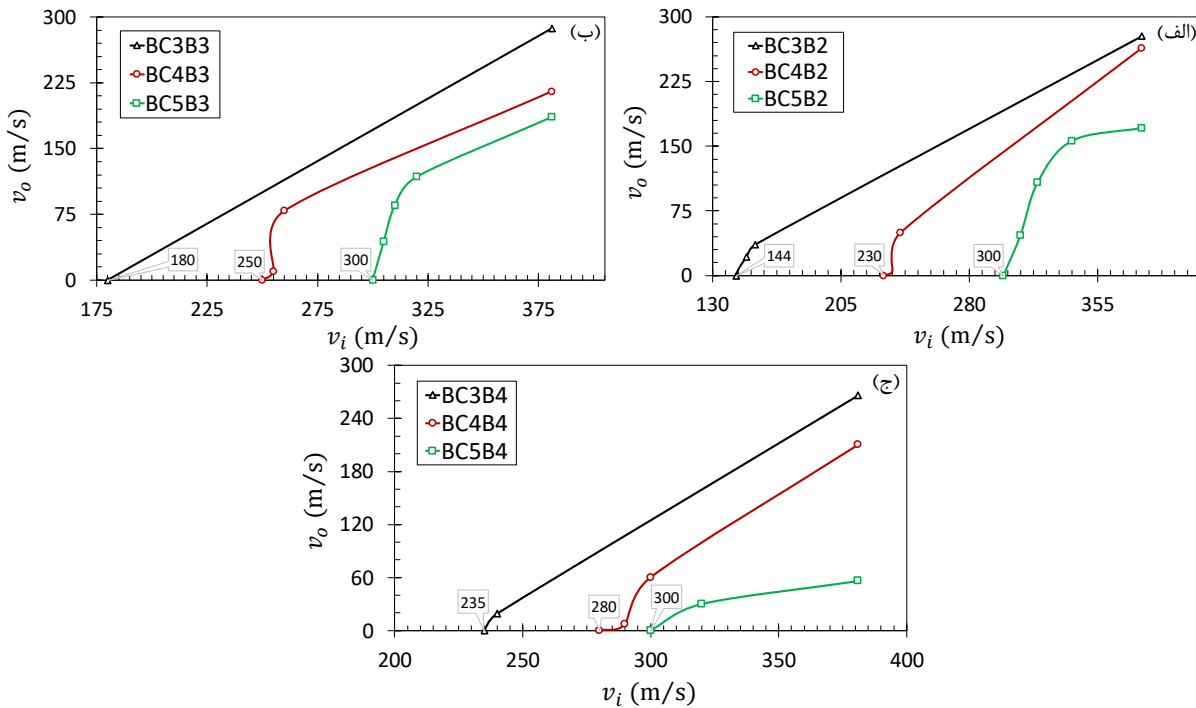
همان‌طور که در شکل ۵-۲۱ مشاهده می‌شود تغییر ضخامت سرامیک تأثیر زیادی روی تغییرات سرعت پرتابه مخروطی دارد و این تغییرات در هدف دارای کامپوزیت ضخیم‌تر، بیشتر است. در شکل ۵-۲۲ نمودارهای سرعت ورودی نسبت به سرعت خروجی پرتابه AK-47 ارائه شده است. در هریک از این نمودارها ضخامت صفحه کامپوزیتی ثابت می‌باشد و ضخامت ورق سرامیکی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵-۲۲ تغییرات سرعت پرتابه AK-47 برای کامپوزیت با ضخامت ثابت، الف) $t_b = 2$ mm

ب) $t_b = 3$ mm ج) $t_b = 4$ mm

همان‌طور که در شکل ۵-۲۲ مشاهده می‌شود تغییرات سرعت پرتابه AK-47 برای همه‌ی ضخامت‌ها، در سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک به‌صورت خطی می‌باشد ولی با نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک، سرعت خروج پرتابه از اهداف افت شدیدی پیدا می‌کند. علت این نوع رفتار اهداف، مقاومت بالستیکی پایین آنها در برابر پرتابه AK-47، به‌دلیل سرعت بالای این پرتابه می‌باشد. شکل ۵-۲۳ نشان‌دهنده تغییرات سرعت پرتابه برتا نسبت به افزایش ضخامت صفحه سرامیکی در اهداف با ضخامت کامپوزیت ثابت می‌باشد.



شکل ۵-۲۳ تغییرات سرعت پرتابه برتا برای کامپوزیت با ضخامت ثابت، الف) $t_b = 2$ mm

ب) $t_b = 3$ mm ج) $t_b = 4$ mm

با دقت در نمودارهای شکل ۵-۲۳ می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش ضخامت سرامیک تأثیر بیشتری روی تغییر سرعت پرتابه برتا دارد. تقریباً در همه‌ی نمودارها سرعت خروج پرتابه از هدف با نزدیک شدن به سرعت بالستیک افت شدیدی پیدا می‌کند و این افت در اهداف با سرامیک ۵ mm به مراتب بیشتر از سایر اهداف می‌باشد.

۵-۲-۲ سرعت حد بالستیک

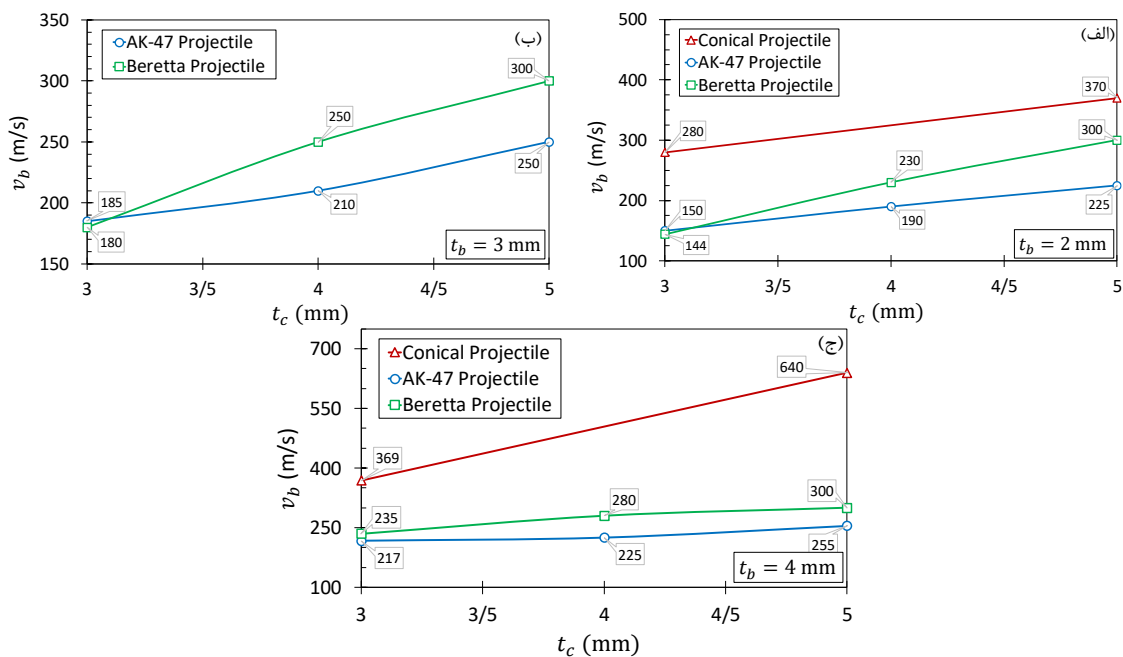
مدل عددی ساخته شده، پس از انجام همگرایی شبکه، برای پرتابه‌های مختلف حل شد. هر یک از پرتابه‌ها با سرعت‌های اولیه مختلف به اهداف سرامیک/کامپوزیت برخورد کردند تا امکان اندازه‌گیری سرعت حد بالستیک

هدف به وجود آید. جدول ۳-۵ سرعت حد بالستیک پرتابه‌های مختلف را پس از برخورد به اهداف با ضخامت‌های متفاوت نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵ نتایج تحلیل عددی برای سرعت حد بالستیک

سرعت حد بالستیک (m/s)			ضخامت کامپوزیت (mm)	ضخامت سرامیک (mm)
پرتابه برتا	پرتابه AK-47	پرتابه مخروطی		
۱۴۴	۱۵۰	۲۸۰	۲	۳
۱۸۰	۱۸۵	-	۳	۳
۲۳۵	۲۱۷	۳۷۰	۴	۳
۲۳۰	۱۹۰	-	۲	۴
۲۵۰	۲۱۰	-	۳	۴
۲۸۰	۲۲۵	-	۴	۴
۳۰۰	۲۲۵	۳۷۰	۲	۵
۳۰۰	۲۵۰	-	۳	۵
۳۰۰	۲۵۵	۶۴۰	۴	۵

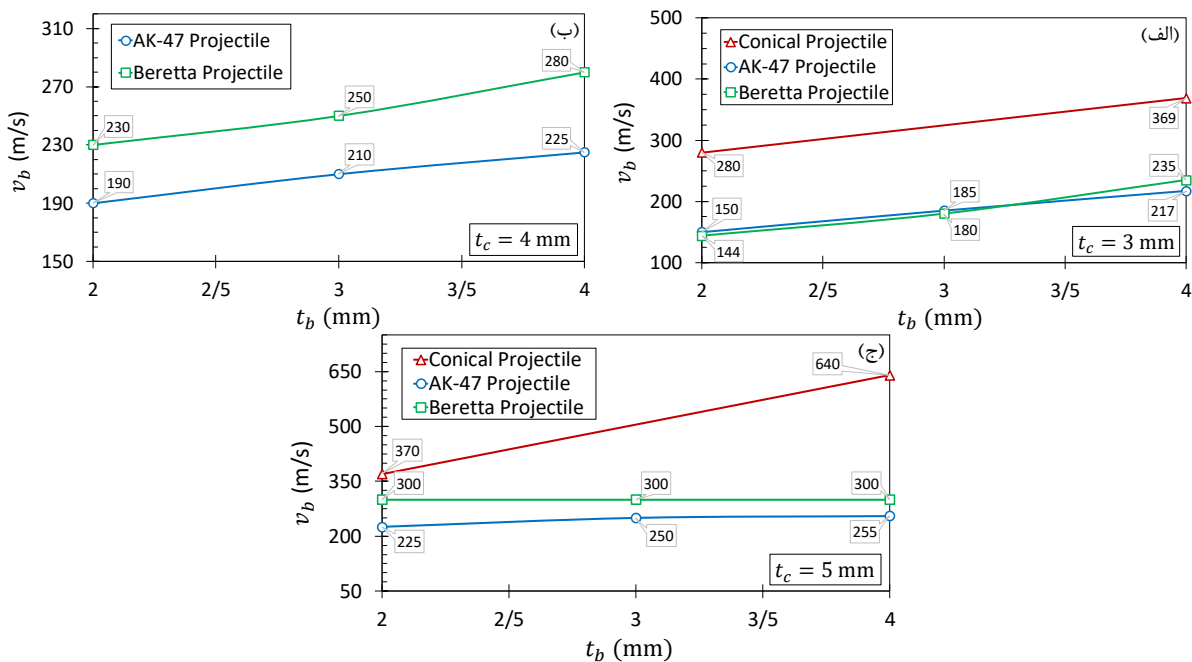
در شکل ۲۴-۵ تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت لایه سرامیکی برای پرتابه‌های متفاوت در ضخامت ثابت لایه پشتیبان کامپوزیتی نشان داده شده است.



شکل ۲۴-۵ تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به ضخامت صفحه سرامیکی برای پرتابه‌های مختلف،

(الف) $t_b = 2$ mm (ب) $t_b = 3$ mm (ج) $t_b = 4$ mm

همان‌طور که در شکل ۵-۲۴ دیده می‌شود، با افزایش ضخامت سرامیک سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. در پرتابه AK-47 و برتا نرخ افزایش سرعت حد بالستیک نسبت به افزایش ضخامت سرامیک، در اهداف دارای کامپوزیت با ضخامت ۲ mm بیشتر می‌باشد و با افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر، میزان تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به افزایش ضخامت سرامیک، با افزایش ضخامت لایه پشتیبان کاهش می‌یابد. همچنین میزان افزایش سرعت حد بالستیک پرتابه مخروطی با افزایش ضخامت سرامیک در برخورد به اهداف دارای کامپوزیت ۴ mm بسیار بیشتر از سایر پرتابه‌ها می‌باشد. دلیل این امر وزن کم، هندسه نامناسب و توانایی بالستیکی پایین این پرتابه می‌باشد. پرتابه AK-47 موفق‌ترین پرتابه در نفوذ به اهداف می‌باشد. در شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب ضخامت لایه کامپوزیتی برای پرتابه‌های متفاوت در ضخامت ثابت لایه سرامیکی نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۵ تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به ضخامت صفحه کامپوزیتی برای پرتابه‌های مختلف، (الف) $t_c = 5$ mm (ج) $t_c = 4$ mm (ب) $t_c = 3$ mm

همان‌طور که انتظار می‌رفت و در شکل ۵-۲۵ دیده می‌شود با افزایش ضخامت لایه پشتیبان کامپوزیتی سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های شکل ۵-۲۴ و شکل ۵-۲۵ مشاهده می‌شود که سرعت حد بالستیک برای پرتابه‌های AK-47 و برتا تقریباً نزدیک بهم بوده ولی برای پرتابه مخروطی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد. دلیل این اختلاف، تفاوت وزنی و سرعت اولیه این پرتابه‌ها می‌باشد. پرتابه AK-47 دارای جرمی

برابر $5/1 \text{ gr}$ و سرعت 710 m/s و پرتابه برتا دارای جرمی برابر $7/52 \text{ gr}$ و سرعت 380 m/s می‌باشد در حالی که پرتابه مخروطی دارای جرم $2/6 \text{ gr}$ و سرعت $369/8 \text{ m/s}$ می‌باشد که این اختلاف محسوس در جرم و سرعت منجر به اختلاف در سرعت حد بالستیک این پرتابه‌ها شده است. پرتابه مخروطی برای جبران وزن کم، نیاز به سرعت بیشتری دارد تا بتواند در هدف نفوذ کند. همچنین مقایسه شکل‌های بالا نشان می‌دهد که افزایش ضخامت سرامیک تأثیر بیشتری نسبت به افزایش ضخامت کامپوزیت، در سرعت حد بالستیک دارد و دلیل این امر نقش زیاد سرامیک در جذب انرژی جنبشی پرتابه است. البته لازم به ذکر است که افزایش ضخامت سرامیک باعث افزایش وزن هدف نیز می‌شود که این افزایش وزن نسبت به افزایش وزنی که تغییر ضخامت کامپوزیت در هدف ایجاد می‌کند به مراتب بیشتر است. همچنین همانند شکل قبل در پرتابه AK-47 و برتا نرخ افزایش سرعت حد بالستیک نسبت به افزایش ضخامت سرامیک، در اهداف دارای سرامیک با ضخامت 3 mm بیشتر می‌باشد و با افزایش ضخامت لایه سرامیکی کاهش می‌یابد.

۵-۲-۳ انرژی بالستیک مخصوص

با به دست آوردن سرعت حد بالستیک و داشتن وزن گلوله، می‌توان حداقل انرژی مورد نیاز برای نفوذ کامل در یک قطعه را به دست آورد؛ اما به دلیل یکی نبودن ضخامت قطعات از عامل دیگری برای مقایسه استفاده می‌شود که به آن انرژی بالستیک مخصوص یا انرژی نفوذ مخصوص^۱ می‌گویند. این عامل از تقسیم انرژی نفوذ کامل به چگالی سطحی قطعات به دست می‌آید. از این طریق می‌توان مقایسه‌ای بین قطعات داشت که کدامیک نسبت به وزن خود، انرژی بیشتری را در ضربه جذب می‌کند. در جدول‌های زیر مقادیر انرژی بالستیک مخصوص برای ضخامت‌های مختلف هدف گزارش شده است. جدول ۴-۵ مربوط به مقادیر انرژی بالستیک مخصوص پرتابه مخروطی می‌باشد.

¹ Specific perforation energy

جدول ۴-۵ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه مخروطی

کد نمونه	نسبت ضخامت سرامیک به کامپوزیت	سرعت حد بالستیک (m/s)	چگالی سطحی (kg/m ²)	انرژی بالستیک (J)	انرژی بالستیک مخصوص (J/kgm ⁻²)
CC3B2	۱/۵	۲۸۰	۱۳/۸۶	۱۰۴	۷/۴۹
CC3B4	۰/۷۵	۳۷۰	۱۶/۷۷	۱۸۰	۱۰/۷۳
CC5B2	۲/۵	۳۷۰	۲۱/۱۷	۱۸۰	۸/۵۰
CC5B4	۱/۲۵	۶۴۰	۲۴/۰۸	۵۴۱	۲۲/۴۶

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، برای پرتابه مخروطی، افزایش ضخامت لایه سرامیکی تأثیر زیادی در افزایش سرعت بالستیک ندارد اما در مقابل به دلیل افزایش وزن قطعه، عامل انرژی مخصوص نزول می‌کند؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که برای این پرتابه، افزایش ضخامت سرامیک همیشه باعث افزایش مقاومت هدف نمی‌شود. در جدول ۵-۵ مقادیر انرژی بالستیک مخصوص پرتابه AK-47 آورده شده است.

جدول ۵-۵ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه AK-47

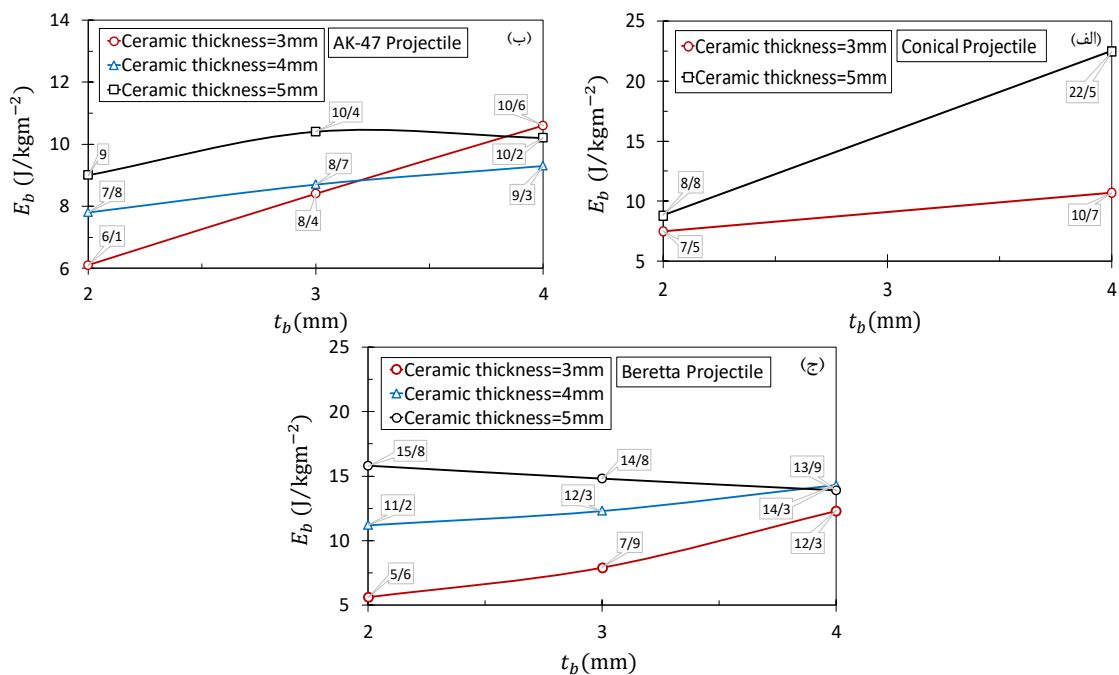
کد نمونه	نسبت ضخامت سرامیک به کامپوزیت	سرعت حد بالستیک (m/s)	چگالی سطحی (kg/m ²)	انرژی بالستیک (J)	انرژی بالستیک مخصوص (J/kgm ⁻²)
KC3B2	۱/۵	۱۵۰	۱۳/۸۶	۸۵	۶/۱۲
KC3B3	۱	۱۸۵	۱۵/۳۲	۱۲۹	۸/۴۱
KC3B4	۰/۷۵	۲۱۷	۱۶/۷۷	۱۷۷	۱۰/۵۵
KC4B2	۲	۱۹۰	۱۷/۵۲	۱۳۶	۷/۷۶
KC4B3	۱/۳۳	۲۱۰	۱۸/۹۷	۱۶۶	۸/۷۴
KC4B4	۱	۲۲۵	۲۰/۴۲	۱۹۱	۹/۳۴
KC5B2	۲/۵	۲۲۵	۲۱/۱۷	۱۹۱	۹/۰۲
KC5B3	۱/۶۷	۲۵۰	۲۲/۶۲	۲۳۵	۱۰/۳۸
KC5B4	۱/۲۵	۲۵۵	۲۴/۰۸	۲۴۵	۱۰/۱۷

نتایج نشان می‌دهد که در ضخامت‌های بالای کامپوزیت افزایش ضخامت لایه سرامیک بر انرژی بالستیک مخصوص کم تأثیر است. در جدول ۶-۵ نیز انرژی بالستیک مخصوص پرتابه برتا گزارش شده است.

جدول ۵-۶ انرژی بالستیک مخصوص پرتابه برتا

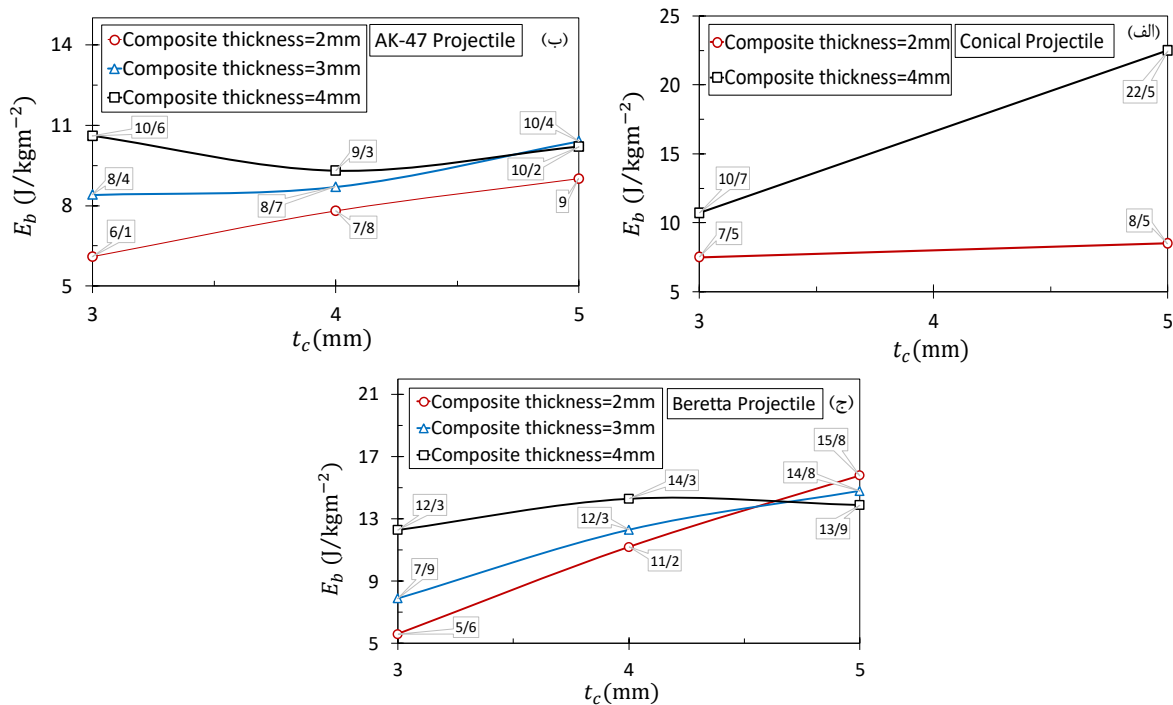
کد نمونه	نسبت ضخامت سرامیک به کامپوزیت	سرعت حد بالستیک (m/s)	چگالی سطحی (kg/m ²)	انرژی بالستیک (J)	انرژی بالستیک مخصوص (J/kgm ⁻²)
BC3B2	۱/۵	۱۴۴	۱۳/۸۶	۷۷	۵/۵۵
BC3B3	۱	۱۸۰	۱۵/۳۲	۱۲۱	۷/۸۹
BC3B4	۰/۷۵	۲۳۵	۱۶/۷۷	۲۰۶	۱۲/۲۸
BC4B2	۲	۲۳۰	۱۷/۵۲	۱۹۷	۱۱/۲۴
BC4B3	۱/۳۳	۲۵۰	۱۸/۹۷	۲۳۳	۱۲/۲۷
BC4B4	۱	۲۸۰	۲۰/۴۲	۲۹۲	۱۴/۲۹
BC5B2	۲/۵	۳۰۰	۲۱/۱۷	۳۳۵	۱۵/۸۲
BC5B3	۱/۶۷	۳۰۰	۲۲/۶۲	۳۳۵	۱۴/۸۰
BC5B4	۱/۲۵	۳۰۰	۲۴/۰۸	۳۳۵	۱۳/۹۱

هدف از به دست آوردن انرژی بالستیک مخصوص، بررسی تأثیر تغییر ضخامت هدف بر حداقل انرژی مخصوص نفوذ می‌باشد. در شکل‌های زیر که بر اساس نتایج عددی به دست آمده است، نمودار تغییرات انرژی بالستیک مخصوص بر حسب ضخامت آمده است. شکل ۵-۲۶ نشان‌دهنده تغییرات انرژی بالستیک مخصوص هر پرتابه نسبت به تغییر ضخامت لایه پشتیبان می‌باشد.



شکل ۵-۲۶ تغییرات انرژی بالستیک مخصوص نسبت به ضخامت کامپوزیت، پرتابه مخروطی، (ب) پرتابه AK-47، (ج) پرتابه برتا

همان‌طور که در شکل ۵-۲۶-الف مشاهده می‌شود افزایش ضخامت لایه پشتیبان موجب افزایش انرژی بالستیک مخصوص برای پرتابه مخروطی شده و این افزایش برای سرامیک با ضخامت ۵ mm بیشتر است. در شکل ۵-۲۶-ب و شکل ۵-۲۶-ج که مربوط به پرتابه‌های AK-47 و برتا می‌باشد، در سرامیک‌ها با ضخامت کم، افزایش ضخامت کامپوزیت موجب افزایش انرژی بالستیک مخصوص می‌شود ولی با افزایش ضخامت سرامیک، روند افزایش انرژی مخصوص کاهش پیدا کرده و در ضخامت سرامیک ۵ mm برای پرتابه برتا مقدار انرژی مخصوص کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۵-۲۷ تغییرات انرژی بالستیک مخصوص هر پرتابه را نسبت به تغییر ضخامت کامپوزیت نشان می‌دهد.



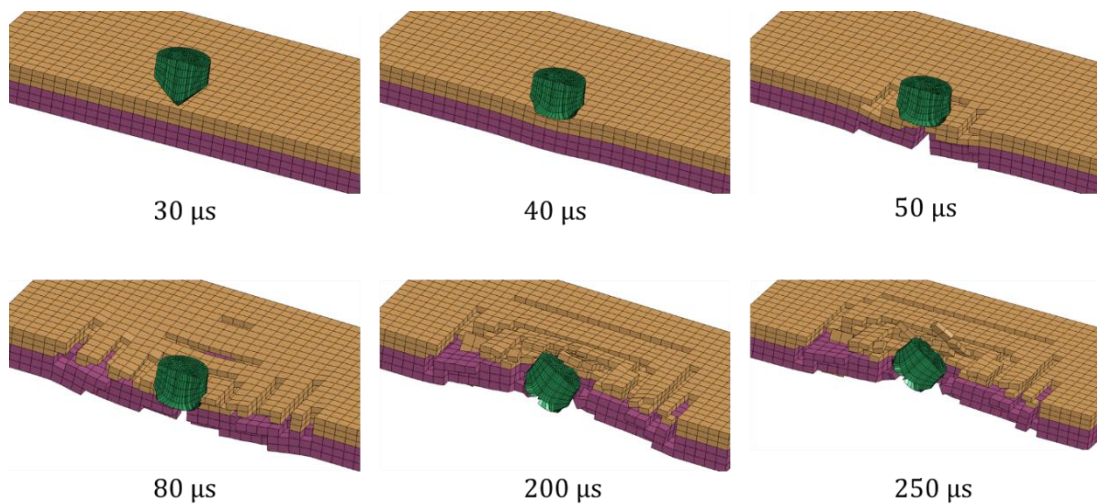
شکل ۵-۲۷ تغییرات انرژی بالستیک مخصوص نسبت به ضخامت سرامیک، پرتابه مخروطی، (ب) پرتابه AK-47، (ج) پرتابه برتا

با توجه به شکل ۵-۲۷-الف، افزایش ضخامت سرامیک همانند کامپوزیت در قسمت قبل برای پرتابه مخروطی منجر به افزایش انرژی مخصوص می‌شود ولی مقدار این افزایش، کمتر می‌باشد. این نشان می‌دهد که تأثیر افزایش ضخامت سرامیک روی انرژی مخصوص کمتر از کامپوزیت می‌باشد. در شکل ۵-۲۷-ب که مربوط به پرتابه AK-47 می‌باشد افزایش ضخامت سرامیک در اهداف با ضخامت کامپوزیت کم موجب افزایش انرژی مخصوص می‌شود اما در اهداف با ضخامت کامپوزیت بالا، انرژی مخصوص سیر نزولی دارد و برای پرتابه برتا

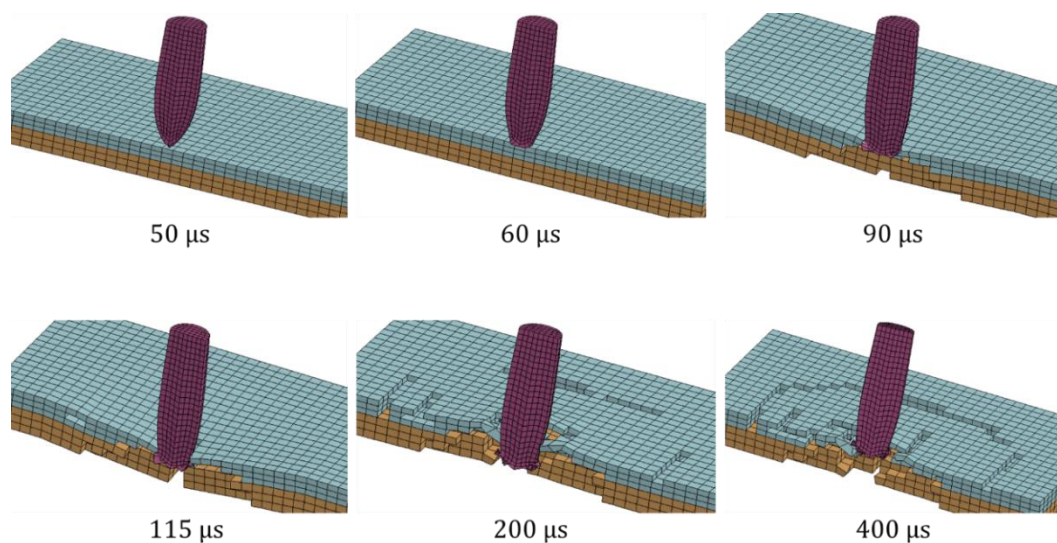
نیز که در شکل ۵-۲۷-ج آمده است به همین صورت می‌باشد. دلیل این امر افزایش وزن هدف در ضخامت‌های بالا می‌باشد، که این افزایش وزن یک اثر منفی روی انرژی بالستیک مخصوص دارد و مقدار آن را کاهش می‌دهد.

۵-۲-۴ شکل تخریب هدف سرامیک/کامپوزیت و پرتابه

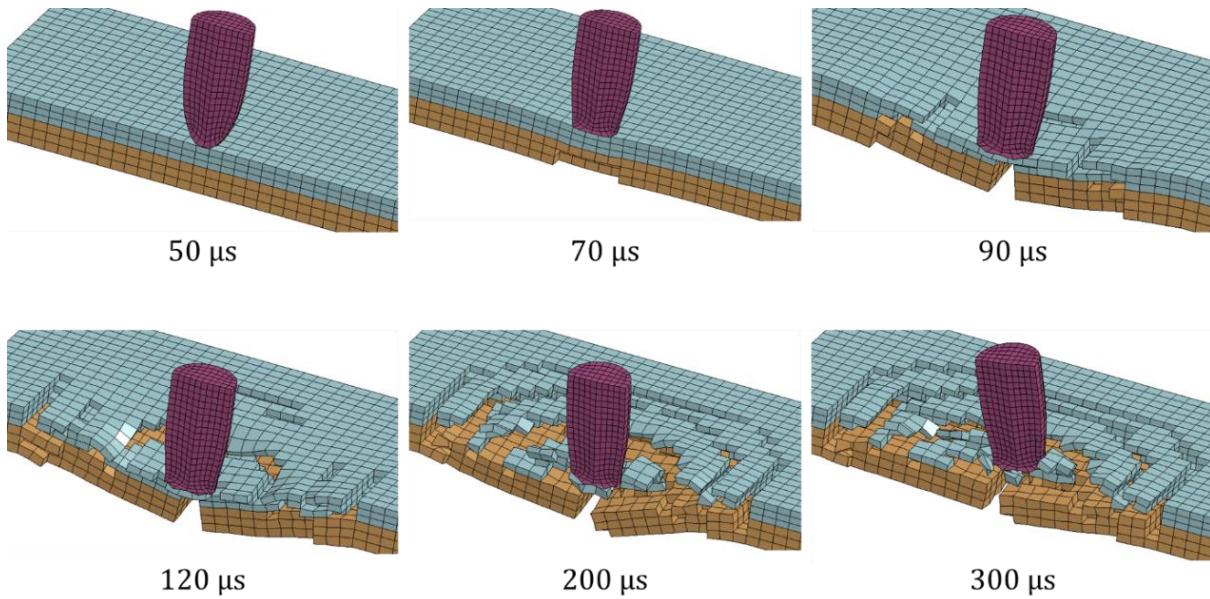
یکی از مزیت‌های شبیه‌سازی عددی پدیده نفوذ، امکان بررسی لحظه به لحظه رفتار هدف است. تغییر شکل تخریب با تغییر زمان پرتابه‌های مخروطی، AK-47 و برتا، برای سرعت‌های اولیه نزدیک سرعت حد بالستیک، به ترتیب در شکل ۵-۲۸ تا شکل ۵-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۸ تخریب هدف CC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه مخروطی

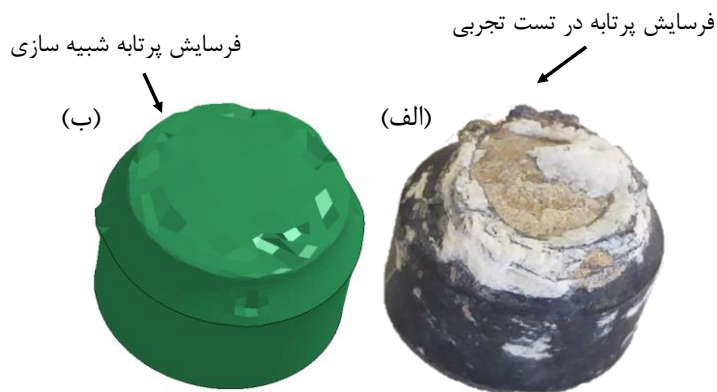


شکل ۵-۲۹ تخریب هدف KC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه AK-47



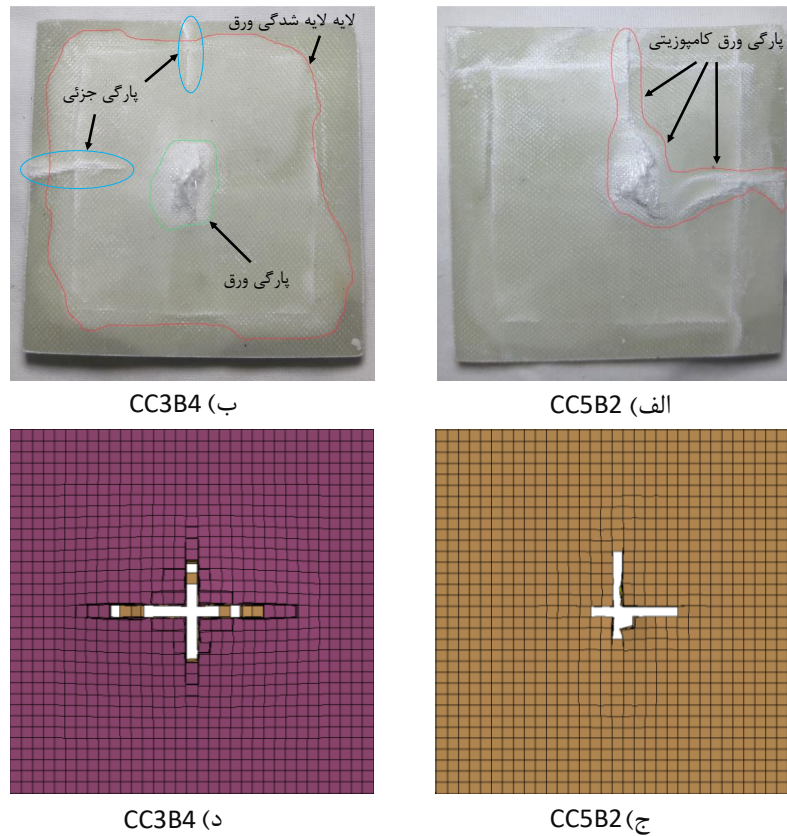
شکل ۵-۳۰ تخریب هدف BC3B4 بر حسب زمان در برخورد با پرتابه برتا

در شکل ۵-۳۱ پرتابه مخروطی فرسایش یافته حاصل از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی روی نمونه با ضخامت سرامیک ۳ mm و کامپوزیت ۴ mm نشان داده شده است.



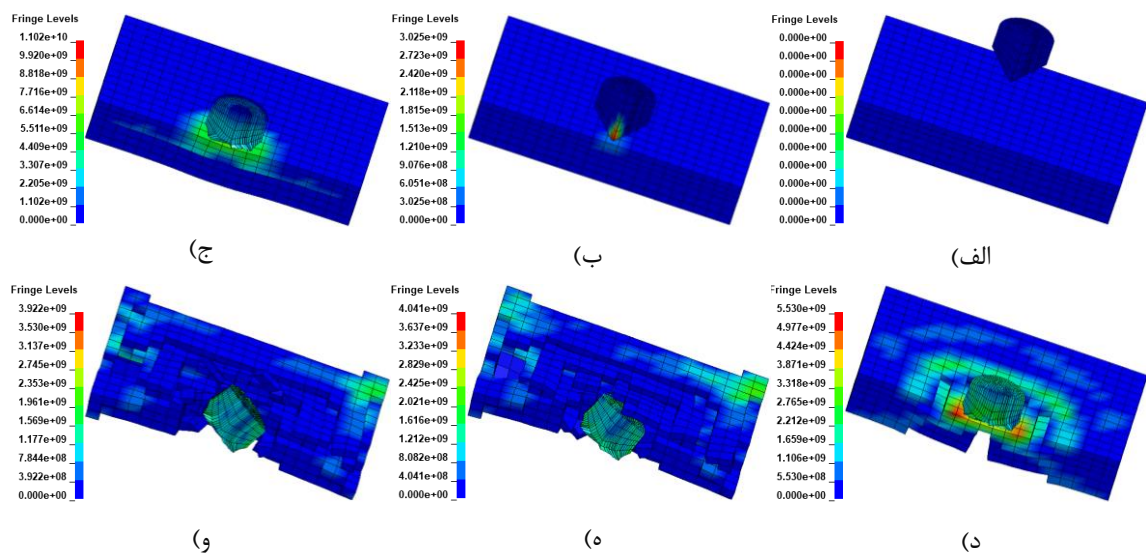
شکل ۵-۳۱ فرسایش پرتابه مخروطی در آزمایش شماره چهار (CC3B4)، (الف) آزمایش تجربی، (ب) شبیه‌سازی

همان‌طور که در شکل ۵-۳۱ مشاهده می‌شود لهیدگی نوک پرتابه در اثر برخورد مستقیم به هدف به خوبی در شبیه‌سازی نشان داده شده است. در شکل ۵-۳۲ تخریب لایه پشتیبان کامپوزیتی در دو ضخامت متفاوت از هدف در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۳۲-ج و شکل ۵-۳۲-د مشاهده می‌شود، نرم‌افزار، شبیه‌سازی خوبی از جهت پاره شدن الیاف ارائه داده است.



شکل ۵-۳۲ تخریب صفحه کامپوزیتی، الف و ب) آزمایش تجربی، ب و ج) شبیه‌سازی

شکل ۵-۳۳ توزیع تنش فون مایزر^۱ وارده به پرتابه مخروطی و هدف را نشان می‌دهد. در هدف نشان داده شده، ضخامت سرامیک برابر ۳ mm و کامپوزیت برابر ۴ mm می‌باشد.



شکل ۵-۳۳ توزیع تنش فون مایزر در آزمایش CC3B4 بر حسب پاسکال

^۱ Von mises

فصل ۶ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۶-۱- مقدمه

سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های الیافی هر یک اگر به تنهایی استفاده شوند دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که دامنه استفاده از آنها را کاهش می‌دهد؛ اما با ترکیب این دو ماده در کنار هم، سازه‌ای با ویژگی‌های برتر و مقاومت مستحکم‌تر حاصل می‌شود. در این پژوهش، بارگذاری ضربه‌ای سرعت بالا بر روی هدف سرامیکی/کامپوزیتی به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بررسی از سرامیک آلومینا و الیاف شیشه نوع E در یک ماتریس پلیمری با ضخامت‌های مختلف استفاده شده است تا اثر تغییر ضخامت بر روی سرعت حد بالستیک بررسی شود. برای شبیه‌سازی سازه آزمایش شده نیز از نرم‌افزار ال‌اس داینا استفاده شد و پس از دستیابی به یک مدل معتبر، سرعت خروجی پرتابه، سرعت حد بالستیک، انرژی جذب‌شده توسط هدف و انرژی حد بالستیک برای پرتابه‌های AK-47 و برتا بدست آمد. در ادامه این بخش مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق بیان شده است.

۶-۲- نتیجه‌گیری

• نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی

✓ سرعت حد بالستیک تجربی برای هدف با ضخامت سرامیک ۳ mm و کامپوزیت ۴ mm و همچنین هدف با ضخامت سرامیک ۵ mm و کامپوزیت ۲ mm برابر 370 m/s بدست آمد.

✓ در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک میزان آسیب و خرابی وارده به هدف بیشتر از سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک می‌باشد زیرا با افزایش سرعت انرژی جذب‌شده توسط هدف کاهش پیدا می‌کند. افزایش سرعت اولیه پرتابه باعث کاهش مدت زمان نفوذ کامل و به‌تبع آن گسترش کمتر خیز و خرابی و متمرکزتر شدن آنها می‌شود. در نتیجه انرژی جذب‌شده کمتر می‌شود و پرتابه با سرعت نزدیکتری نسبت به سرعت اولیه از هدف خارج می‌شود.

✓ انواع مکانیزم‌های شکست سرامیک مانند شکست شعاعی و خردشدگی و در پی آن ایجاد مخروط سرامیکی در اثر برخورد سرعت بالای پرتابه به هدف سرامیک/کامپوزیت در آزمایش‌های تجربی ضربه بالستیک مشاهده شد.

✓ لایه‌لایه شدگی و گسیختگی پتالینگ برای ورق‌های کامپوزیتی در آزمایش‌های ضربه سرعت بالا مشاهده شد.

✓ نتایج آزمایش‌ها نشان داد لایه سرامیکی با استحکام فشاری بالا، فشار متمرکز ضربه را به‌درستی بر روی سطح کامپوزیت توزیع و مانع از نفوذ سریع آن می‌شود. مشاهده شد که ذرات سرامیکی خرد شده مانع اصلی برای ادامه نفوذ پرتابه پس از شکست سرامیک می‌باشند.

✓ با افزایش ضخامت سرامیک (با ثابت ماندن دیگر پارامترها) میزان تورق ایجاد شده در صفحه کامپوزیتی کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده میزان جذب انرژی بیشتر توسط هدف می‌باشد.

✓ با افزایش ضخامت سرامیک، سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش ضخامت سرامیک، مخروط سرامیکی ایجاد شده بزرگتر خواهد شد. با بزرگتر شدن قاعده این مخروط سرامیکی، سطحی از کامپوزیت پشتی که تحت تأثیر قرار گرفته و حالت مخروط به‌خود می‌گیرد بزرگتر خواهد شد و بنابراین پرتابه

انرژی بیشتری جهت برآمده کردن و نهایتاً گسیختگی ماده پستی نیاز دارد که این حالت، افزایش حد بالستیک را نتیجه می‌دهد. لازم به ذکر است که افزایش ضخامت سرامیک نسبت به افزایش ضخامت کامپوزیت پستی (در شرایط یکسان) تأثیر بیشتری بر روی سرعت حد بالستیک دارد.

✓ با افزایش ضخامت کامپوزیت، در نزدیکی سرعت حد بالستیک میزان آسیب وارده به سرامیک و خرد شدگی آن افزایش می‌یابد.

✓ در برخورد پرتابه‌ها به اهداف سرامیکی معمولاً یک حجم مخروطی از سرامیک خرد شده بین سرامیک و ماده پستی محبوس می‌شود. استحکام فشاری بالای سرامیک باعث له شدن نوک پرتابه می‌شود. بعد از چند لحظه زمانی، ذرات سرامیک خرد شده باعث ایجاد برش و خراش روی سطح پرتابه می‌شوند و در ضخامت‌های سرامیک بالا پرتابه پس از برخورد شکسته می‌شود.

• نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

✓ مقایسه سرعت‌های حد بالستیک برای پرتابه‌های مختلف نشان می‌دهد که کمترین سرعت حد بالستیک مربوط به پرتابه AK-47 می‌باشد و این پرتابه توانایی بالایی در نفوذ به هدف از خود نشان می‌دهد. بعد از آن پرتابه برتا می‌باشد که حتی در برخی موارد، در ضخامت‌های پایین هدف عملکرد بهتری از پرتابه AK-47 از خود نشان داد و در آخر پرتابه مخروطی می‌باشد که دارای بیشترین سرعت حد بالستیک بوده و از توانایی بالستیکی پایینی برخوردار بود.

✓ نرخ کاهش سرعت خروجی در مقایسه با سرعت برخورد در نزدیکی سرعت حد بالستیک بالاتر است. در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک با افزایش سرعت برخورد نرخ تغییرات سرعت کمتر می‌شود.

✓ تغییر ضخامت سرامیک و کامپوزیت تأثیر زیادی روی تغییرات سرعت پرتابه مخروطی دارد و این تغییرات در هدف با سرامیک ۵ mm به مراتب بیشتر از هدف با سرامیک ۳ mm می‌باشد.

✓ در ضخامت‌های پایین سرامیک، افزایش ضخامت کامپوزیت در سرعت‌های بالا، تأثیر بسیار کمی روی تغییرات سرعت پرتابه AK-47 دارد ولی با کاهش سرعت پرتابه و نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این تغییرات بیشتر می‌شود.

✓ افزایش ضخامت کامپوزیت در اهداف با ضخامت سرامیک پایین تأثیر چندانی روی تغییرات سرعت ورودی و خروجی پرتابه برتا ندارد ولی با کاهش سرعت و نزدیک شدن به سرعت حد بالستیک این اختلاف بیشتر شده و افزایش ضخامت کامپوزیت تأثیر مثبت خود را نشان می‌دهد. این درحالی‌است که در ضخامت‌های بالای سرامیک برای پرتابه برتا، افزایش ضخامت کامپوزیت تأثیری روی سرعت حد بالستیک ندارد.

✓ در اهداف دارای کامپوزیت با ضخامت ۲ mm نرخ افزایش سرعت حد بالستیک نسبت به افزایش ضخامت سرامیک برای پرتابه‌های AK-47 و برتا، بیشتر می‌باشد و با افزایش ضخامت لایه کامپوزیتی کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر، میزان تغییرات سرعت حد بالستیک نسبت به افزایش ضخامت سرامیک، با افزایش ضخامت لایه پشتیبان کاهش می‌یابد. همچنین میزان افزایش سرعت حد بالستیک پرتابه مخروطی با افزایش ضخامت سرامیک در برخورد به اهداف دارای کامپوزیت ۴ mm بسیار بیشتر از سایر پرتابه‌ها می‌باشد.

✓ برای پرتابه مخروطی، افزایش ضخامت لایه سرامیکی تأثیر زیادی در افزایش سرعت بالستیک ندارد اما در مقابل به دلیل افزایش وزن قطعه، انرژی بالستیک مخصوص کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که برای این پرتابه، افزایش ضخامت سرامیک همیشه باعث افزایش مقاومت هدف نمی‌شود.

✓ برای پرتابه AK-47، افزایش ضخامت سرامیک در اهداف با ضخامت کامپوزیت کم موجب افزایش انرژی مخصوص می‌شود اما در اهداف با ضخامت کامپوزیت بالا، انرژی مخصوص سیر نزولی دارد و برای پرتابه برتا نیز به همین صورت می‌باشد.

۳-۶- ارائه پیشنهادها

✓ بررسی تحلیلی نفوذ پرتابه‌های مختلف در اهداف سرامیک/کامپوزیت و مقایسه با نتایج تجربی و عددی به دست آمده.

✓ بررسی تأثیر شرایط مرزی: پیشنهاد می‌گردد مقایسه‌ای مابین تأثیر نوع تکیه‌گاه و مساحت سطح هدف در آزمایش نفوذ بالستیک انجام گردد. همچنین می‌توان میزان وابستگی هر پرتابه را نسبت به شرایط مرزی بررسی کرد.

- ✓ تغییر آرایش قرارگیری الیاف: با توجه به اینکه عموماً در کامپوزیت‌های بافته شده ترک‌ها و پتال‌ها در جهت الیاف اولیه رشد پیدا می‌کنند، پیشنهاد می‌شود تا با تغییر آرایش قرارگیری الیاف، چیدمان بهینه برای کاهش رشد ترک‌ها پیدا شود. برای مثال می‌توان لایه‌های الیاف بافته شده را به صورت یک در میان با زاویه صفر و ۴۵ درجه قرار داد و یا هر لایه نسبت به لایه قبلی θ درجه چرخانده شود.
- ✓ استفاده از قرص‌های سرامیکی به جای صفحه سرامیکی و بررسی مقاومت هدف در ضربات بعدی
- ✓ شبیه‌سازی الیاف شیشه به صورت لایه لایه به همراه ماتریس
- ✓ استفاده از دستگاه تفنگ گازی با سرعت بالاتر جهت دستیابی به نتایج تجربی دقیق‌تر
- ✓ بررسی تأثیر خواص ماتریس بر عملکرد پرتابه‌ها: می‌توان با تغییر شرایط ساخت مانند تغییر درصد جزء سفت کننده، تغییر شرایط پخت و بازپخت، تغییر درصد حجمی ماتریس در کامپوزیت و غیره، تأثیر خواص ماتریس بر عملکرد پرتابه‌های مختلف را بررسی نمود.
- ✓ بررسی تأثیر زاویه‌های برخورد مختلف بر سرعت حد بالستیک هدف

منبع‌ها

- [1] ه. شانظری، "تحلیل تئوری و تجربی فرایند نفوذ در اهداف سرامیک/کامپوزیت،" رساله دکتری تخصصی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۵.
- [2] A. L. Florance and T. J. Ahrens, "Interaction of projectiles and composite armor," STANFORD RESEARCH INST MENLO PARK CA, 1967.
- [3] M. Wilkins, C. Honodel, and D. Sawle, "An approach to the study of light armor," California Univ., Livermore. Lawrence Radiation Lab., 1967.
- [4] M. L. Wilkins, "Second Progress Report of Light Armor Program," California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab., 1967.
- [5] M. L. Wilkins, C. F. Cline, and C. A. Honodel, "Fourth progress report of light armor program," California Univ., Livermore. Lawrence Radiation Lab., 1969.
- [6] C. A. Wilkins, M.L., Landingham, R.L., & Honodel, *Light-armor program. Fifth progress report.* Lawrence Livermore National Lab., 1971.
- [7] M. L. Wilkins, "Mechanics of penetration and perforation," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 11, pp. 793–807, Jan. 1978.
- [8] M. Mayselless, W. Goldsmith, S. P. Virostek, and S. A. Finnegan, "Impact on ceramic targets," *J. Appl. Mech.*, vol. 54, no. 2, pp. 373–378, 1987.
- [9] S. J. Bless, Z. Rosenberg, and B. Yoon, "Hypervelocity penetration of ceramics," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 5, no. 1–4, pp. 165–171, Jan. 1987.
- [10] A. Tate, "A theory for the deceleration of long rods after impact," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 15, no. 6, pp. 387–399, 1967.
- [11] Z. Roseberg and J. Tsaliah, "Applying Tate's model for the interaction of long rod projectiles with ceramic targets," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 247–251, Jan. 1990.
- [12] R. L. Woodward, "A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 455–474, 1990.
- [13] P. C. Den Reijer, "Impact on ceramic faced armour." TU Delft, Delft University of Technology, p. 210, 1991.
- [14] N. A. Fellows and P. C. Barton, "Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 22, no. 8, pp. 793–811, 1999.
- [15] P. Lundberg, R. Renström, and B. Lundberg, "Impact of metallic projectiles on ceramic targets: Transition between interface defeat and penetration," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 259–275, Mar. 2000.
- [16] M. Lee and Y. H. Yoo, "Analysis of ceramic/metal armour systems," *Int. J. Impact Eng.*, vol.

25, no. 9, pp. 819–829, Oct. 2001.

[17] ه. شانظری، “تحلیل نفوذ گلوله در کامپوزیت‌های سرامیکی و بهینه‌سازی مدل تحلیلی،” پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۱.

[18] A. Arias, R. Zaera, J. López-Puente, and C. Navarro, “Numerical modeling of the impact behavior of new particulate-loaded composite materials,” *Compos. Struct.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 151–159, Jul. 2003.

[19] D. P. Gonçalves, F. C. L. De Melo, A. N. Klein, and H. A. Al-Qureshi, “Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 2–3, pp. 307–316, 2004.

[20] J. López-Puente, A. Arias, R. Zaera, and C. Navarro, “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. 1–4, pp. 321–336, 2006.

[21] A. Tasdemirci, G. Tunusoglu, and M. Güden, “The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armors: Experimental and numerical study,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 44, pp. 1–9, Jun. 2012.

[22] A. Prakash, J. Rajasankar, N. Anandavalli, M. Verma, and N. R. Iyer, “Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 41, pp. 186–197, Mar. 2013.

[23] S. Feli, M. E. Aalami Aaleagha, and Z. Ahmadi, “A new analytical model of normal penetration of projectiles into the light-weight ceramic-metal targets,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 5, pp. 561–567, 2010.

[24] R. Chi, A. Serjouei, I. Sridhar, and G. E. B. Tan, “Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: A semi-analytical approach,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 52, pp. 37–46, 2013.

[25] B. G. Compton, E. A. Gamble, and F. W. Zok, “Failure initiation during impact of metal spheres onto ceramic targets,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 55, pp. 11–23, May 2013.

[26] م. طهماسبی آبدرد، “بررسی تئوری و تجربی نفوذ گلوله در اهداف سرامیکی و ارائه مدل اصلاحی،” پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۱.

[27] O. A. Kudryavtsev and S. B. Sapozhnikov, “Numerical simulations of ceramic target subjected to ballistic impact using combined DEM/FEM approach,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 114, pp. 60–70, 2016.

[28] J. Pach, D. Pyka, K. Jamroziak, and P. Mayer, “The experimental and numerical analysis of the ballistic resistance of polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 113, pp. 24–30, 2017.

[29] J. D. Hogan *et al.*, “Fragmentation of an advanced ceramic under ballistic impact: Mechanisms and microstructure,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 102, pp. 47–54, 2017.

- [30] R. T. Tang and H. M. Wen, "Predicting the perforation of ceramic-faced light armors subjected to projectile impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 102, pp. 55–61, 2017.
- [31] M. J. Pawar *et al.*, "Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 98, pp. 42–51, 2016.
- [32] F. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," *J Compos Mater*, vol. 21, no. September, pp. 834–855, 1987.
- [33] P. Wagner, "The Dynamics of Impact on Composite Structures," *Key Eng. Mater.*, vol. 141–143, no. 1089, pp. 671–694, Sep. 1998.
- [34] S. Abrate, *Impact Engineering of Composite Structures*, vol. 526. Vienna: Springer Vienna, 2011.
- [35] W. J. Cantwell, "The influence of target geometry on the high velocity impact response of CFRP," *Compos. Struct.*, vol. 10, no. 3, pp. 247–265, Jan. 1988.
- [36] W. J. Cantwell and J. Morton, "The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP," *Compos. Struct.*, vol. 13, no. 2, pp. 101–114, Jan. 1989.
- [37] M. A. Akbari, G. Liaghat, and H. Sabouri, "A Simple Analytical Model to Simulate Oblique Ballistic Impact onto Fabric," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 110–116, no. 7, pp. 3453–3458, 2011.
- [38] S. R. Reid and H. M. Wen, "Perforation of FRP laminates and sandwich panels subjected to missile impact," in *Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures*, Elsevier, 2000, pp. 239–279.
- [39] S. Chan, Z. Fawaz, K. Behdinan, and R. Amid, "Ballistic limit prediction using a numerical model with progressive damage capability," *Compos. Struct.*, vol. 77, no. 4, pp. 466–474, Feb. 2007.
- [40] B. A. Gama and J. W. Gillespie, "Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites," *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 4, pp. 356–369, Dec. 2008.
- [41] W. L. Cheng, S. Langlie, and S. Itoh, "High velocity impact of thick composites," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 29, no. 1–10, pp. 167–184, Dec. 2003.
- [42] N. K. Naik and A. V. Doshi, "Ballistic Impact Behavior of Thick Composites: Analytical Formulation," *AIAA J.*, vol. 43, no. 7, pp. 1525–1536, 2005.
- [43] N. K. Naik and A. V. Doshi, "Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies," *Compos. Struct.*, vol. 82, no. 3, pp. 447–464, Feb. 2008.
- [44] N. K. Naik and P. Shirao, "Composite structures under ballistic impact," *Composite Structures*, vol. 66, no. 1–4, pp. 579–590, 2004.
- [45] N. K. Naik, P. Shirao, and B. C. K. Reddy, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric studies," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 412, no. 1–2, pp. 104–116, 2005.
- [46] N. K. Naik, P. Shirao, and B. C. K. Reddy, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 9, pp. 1521–1552, 2006.
- [47] A. F. Manzella, B. A. Gama, and J. W. Gillespie, "Effect of punch and specimen dimensions on

- the confined compression behavior of S-2 glass/epoxy composites,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 7, pp. 1726–1737, Jun. 2011.
- [48] B. M. Icten, B. G. Kiral, and M. E. Deniz, “Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 50, pp. 325–332, Jul. 2013.
- [49] M. H. Pol, G. H. Liaghat, and F. Hajjarazi, “Effect of nanoclay on ballistic behavior of woven fabric composites: Experimental investigation,” *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 13, pp. 1563–1573, 2013.
- [50] S. K. García-Castillo, S. Sánchez-Sáez, and E. Barbero, “Nondimensional analysis of ballistic impact on thin woven laminate plates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 8–15, Jan. 2012.
- [51] D. Long, “Simulation of Ballistic Impact on Polymer Matrix Composite Panels,” *J. Theor. Appl. Mech.*, no. 2003, p. 263, 2015.
- [52] A. M. Soydan, B. Tunaboylu, A. G. Elsabagh, A. K. Sari, and R. Akdeniz, “Simulation and Experimental Tests of Ballistic Impact on Composite Laminate Armor,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, 2018.
- [53] N. Nayak, A. Banerjee, and T. R. Panda, “Numerical Study on the Ballistic Impact Response of Aramid Fabric- epoxy Laminated Composites by Armor Piercing Projectile,” *Procedia Eng.*, vol. 173, pp. 230–237, 2017.
- [54] V. Bodepati, K. Mogulanna, G. S. Rao, and M. Vemuri, “Numerical Simulation and Experimental Validation of E-Glass/epoxy Composite Material under Ballistic Impact of 9 mm Soft Projectile,” *Procedia Eng.*, vol. 173, pp. 740–746, 2017.
- [55] I. S. Chocron Benloulo and V. Sánchez-Gálvez, “A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 21, no. 6, pp. 461–471, 1998.
- [56] M. M. Shokrieh and G. H. Javadpour, “Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor,” *Compos. Struct.*, vol. 82, no. 2, pp. 269–276, 2008.
- [57] م. مشتاقیان و خ. واحدی، “بررسی و تحلیل نفوذ پرتابه در یک هدف سرامیک/کامپوزیت،” *مجله مکانیک هوافضا*، جلد ۶، شماره ۴، صص ۹۴–۸۱، ۱۳۸۹.
- [58] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, “Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, no. 8, pp. 583–593, 2010.
- [59] S. Feli and M. R. Asgari, “Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 771–780, 2011.
- [60] S. Signetti and N. M. Pugno, “Evidence of optimal interfaces in bio-inspired ceramic-composite panels for superior ballistic protection,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 11, pp. 2823–2831, Sep. 2014.
- [61] W. Liu, Z. Chen, X. Cheng, Y. Wang, A. R. Amankwa, and J. Xu, “Design and ballistic

- penetration of the ceramic composite armor,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 84, pp. 33–40, Jan. 2016.
- [62] D. E. Tria, B. Ali, H. Karim, and E. M. Polytechnique, “Modelling Assessment of Ceramic/Composite Armour Under Ballistic Impact,” no. June, pp. 1031–1032, 2017.
- [63] NASA, “Wikipedia,” 2002.
- [64] ع. مهربانی یگانه، “بررسی تجربی و عددی مقاومت به نفوذ هدف های چندلایه و ترکیب لایه معادل،” پایان‌نامه دوره کارشناسی، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۹۰.
- [65] Esquilo, “Wikipedia,” 2011.
- [66] M. E. Backman and W. Goldsmith, “The mechanics of penetration of projectiles into targets,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–99, Jan. 1978.
- [67] G. G. Corbett, S. R. Reid, and W. Johnson, “Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 141–230, Mar. 1996.
- [68] Y. Milman and S. . Chugunova, “Mechanical properties, indentation and dynamic yield stress of ceramic targets,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 629–638, Dec. 1999.
- [69] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press, 2007.
- [70] “Aliexpress,” Available: www.aliexpress.com
- [71] “Composites and Architecture,” 2006, Available: ww.compositesandarchitecture.com
- [72] “Haugler Composites,” Available: www.haufler.com
- [73] M. M. Shokrieh and M. javad Omid, “A review of the impact resistance of fiber reinforced polymer composites,” *J. Polym. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 255–277, 2011.
- [74] W. J. Cantwell and J. Morton, “The impact resistance of composite materials - a review,” *Composites*, vol. 22, no. 5, pp. 347–362, Sep. 1991.
- [75] م. علیزاده، “نقش اثر مخروط سرامیکی و بهینه سازی مدل فلورانس،” پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام حسین، ۱۳۹۰.
- [76] AZoM, “AZo Materials,” 2001. [Online]. Available: www.azom.com.
- [77] Sika, “Biresin® CR122.” p. 9, 2017.
- [78] A. International and indexed, “Designation: D 3039/D 3039M – 00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1.” 2002.
- [79] G. R. Johnson and W. H. Cook, “Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, no. 1, pp. 31–48, 1985.
- [80] G. R. Johnson, “Materials characterization for computations involving severe dynamic loading,” *Proc. Army Symp. Solid Mech.*, pp. 62–67, 1980.
- [81] A. Rashed, M. Yazdani, A. A. Babaluo, and P. Hajizadeh Parvin, “Investigation on high-velocity

- impact performance of multi-layered alumina ceramic armors with polymeric interlayers,” *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 25. pp. 3561–3576, 2016.
- [82] T. J. Holmquist and G. R. Johnson, “Response of silicon carbide to high velocity impact,” *J Appl Phys*, vol. 91, no. 9. pp. 5858–5866, 2002.
- [83] C. C. Chamis, “Simplified composite micromechanics equations for hygral, thermal and mechanical properties,” 1983.
- [84] B. Gu and J. Xu, “Finite element calculation of 4-step 3-dimensional braided composite under ballistic perforation,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, no. 4. pp. 291–297, 2004.

Abstract

In this thesis, a combined numerical and experimental analysis of high velocity impact and penetration into the ceramic/composite targets has been performed. The target is composed by an alumina plate and a fiberglass/epoxy composite made by hand lay-up process in four different thicknesses. In experiments, high velocity impact tests were performed by the gas gun and conical steel projectiles and the residual velocity, erosion and weight of the projectiles after impact, penetration mechanism, ceramic failure, the deformation and rapturing of composite layer and the ballistic limit velocity were studied and analyzed. In the numerical part of this thesis, based on the experimental results for velocities, the penetration process was modeled by the Ls-dyna finite element software and the quantities of residual velocity of the projectile, ballistic limit velocity and specific ballistic energy were calculated. Then the residual velocity in terms of impact velocity was presented for different thicknesses, as well the ballistic limit velocity curve was determined versus the ceramic and composite layer thicknesses. After verifying the numerical model with the experimental results and achieving a valid model in simulation, the penetration process was modeled for two common projectiles namely AK-47 (7.62 mm Caliber) and Beretta (9 mm Caliber). The results showed that near the ballistic limit, the reduction rate of exit velocity in comparison with impact velocity is higher and in higher velocities than the ballistic limit, by increasing the impact velocity the variation rate reduced. Also, in lower thicknesses of ceramic layers for Beretta projectile, increasing the thickness of composite has no effect on the ballistic limit velocity. Moreover, in lower ceramic thicknesses, increasing the composite thickness in higher velocities has very little effect on the variation of projectile velocity but with decreasing the projectile velocity in the vicinity of the ballistic limit, these changes will increase.

Keywords: Ceramic, Composite, Penetration, High velocity impact tests, Finite Element analysis



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

MSc Thesis in Manufactory and Production Engineering

**Experimental and numerical investigation of ballistic impact on
ceramic/composite targets**

By: Hosein Jabbari

Supervisor:

Dr. Mahdi Gerdooei

January 2019