ISME

بررسی تجربی تأثیر آسیب های داخلی بر روی مقاومت بالستیکی مواد مرکب لایه ای

مجید آزادپور[۱]
دانشجوی کارشناسی ارشد

اعظم قاسمی[۲]
دانشیار

در این پژوهش برای اولین بار، تأثیر آسیب‌های داخلی مهم، عدم چسبندگی بین لایه‌ای، ترک داخلی وآلودگی بین لایه‌ای برروی مقاومت بالستیکی مواد مرکب لایه‌ای بررسی شد. برای ساخت مواد مرکب لایه‌ای از پارچه آرامید، رزین اپوکسی EPL 1012 و هاردنر EPH 112 استفاده شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که وجود آسیب باعث کاهش مقاومت بالستیکی ماده مرکب می‌گردد. همچنین با مقایسه نتایج برای سه آسیب داخلی نشان داد که کمترین و بیشترین افت مقاومت در برابر سرعت بالا در مواد مرکب لایه ای ساخته شده در این تحقیق به ترتیب مربوط به نمونه معیوب با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای و نمونه معیوب با ترک داخلی است. همچنین در این مطالعه، تأثیر آسیب‌های داخلی بر روی رفتار کششی نمونه های سالم و معیوب بررسی شد. بررسی رفتار کششی نمونه ها نشان داد که تقریباً رفتار کششی تمام نمونه ها در یک اندازه نزدیک به هم است. با این حال بیشترین و کمترین تأثیر بر روی رفتار کششی ماده به ترتیب مربوط به نمونه با آسیب ترک داخلی و آلودگی بین لایه‌ای است.

DOI: 10.30506/ijmep.2020.92993.1460

واژه‌های راهنما: مواد مرکب لایه‌ای، عدم چسبندگی بین لایه‌ای، ترک داخلی، آلودگی بین لایه‌ای

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مواد مرکب در صنایع مختلف به طور چشمگیری گسترش یافته است و با توجه به مزایای فراوان استفاده از مواد مرکب، انتظار می‌رود این روند در سال‌های آتی همچنان ادامه داشته باشد [۳-۱]. برای نمونه در هواپیمای تجاری ایرباس A320 تنها ۲۰ درصد بدنه آن از مواد مرکب تشکیل شده بود در حالی که در هواپیمای تجاری ایرباس A787 این سهم به بیش از ۵۰ درصد رسیده است . لذا اطمینان از عملکرد مواد مرکب در موقعیت‌های متفاوت از نیازهای پژوهشی مهم صنایع می‌باشد [۴و ۵]. ساخت پوشش‌های حفاظتی یکی از این کاربردها می‌باشد. پوشش‌های حفاظتی، پوشش‌های مدرن و سبکی هستند که برای حفاظت قسمت‌های حیاتی بدن انسان در برابر صدمات ناشی از ضربات طراحی شده‌اند.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
majidazadpour@gmail.com
[۲] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
a_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۳

کولار[۱] یکی از پرکاربردترین پوشش‌های حفاظتی است. کولار توسط دوپونت[۲] در سال (۱۹۶۵) تولید شد و چند سال بعد توارون توسط آکزو[۳] تولید شد. الیاف آرامید دارای ساختار به شکل کریستال با یک سلول تک چشمی هستند و خواص کریستالی آنها بیشتر از ۹۰٪ است، که این مسئله سختی لیف را بالا می‌برد [۶ , ۷]. ویژگی‌های این ماده سبب شده است که به طورگسترده برای برای تقویت تیرها و ادوات مکانیکی پلاستیکی، ساخت قایق‌ها، بدنه خوردردهای ضد گلوله و ... استفاده شود. [۱۱-۸].

در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی مقاومت بالستیک انجام گرفته است. در سال (۱۹۸۰)، باچراچ[۴] و هانسن[۵] رفتار دینامیکی استوانه‌های ساخته شده از مواد مرکب تحت ضربه را با روش اجزاء محدود بررسی کردند. آنها منطقه خرابی را به علت ضربه و با استفاده از معیار شکست تسای وو پیش‌بینی کردند[۱۲]. چن[۶] و فردریک[۷] [۱۳] در سال (۱۹۹۳) ضربه ناشی از یک کره صلب را روی یک ورق مربعی مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق بر مبنای تئوری برخورد هرتز اثر پارامترهای مختلف را روی رفتار ضربه مورد تحقیق قرار دادند. لی[۸] و ریزمن[۹] [۱۴] در سال (۱۹۶۹)، ریزمن[۱۰] و لوگزو[۱۱] [۱۵] در سال (۱۹۷۷) ارتعاش تئوری برخورد هرتز اثر پارامترهای مختلف را روی رفتار ضربه مورد تحقیق قرار دادند. کرستوفورو[۱۲] و یگیت[۱۳][۱۶] در سال (۱۹۹۵) با استفاده از مدل الاستوپلاستیک مبتنی بر قانون برخورد هرتز به تحلیل پاسخ گذرا یک تیر کامپوزیتی تحت ضربه الاستوپلاستیک پرداختند. ویلوت[۱۴] در سال (۱۹۹۶) رفتار کامپوزیتی الیافی و چند لایه‌ای فلز-الیاف[۱۵] را در بارگذاری‌های ایستا، ضربه کم سرعت و ضربه پرسرعت بررسی کرد. بارگزاری و ضربه ایجاد شده با استفاده از پرتابه نیم کروی انجام شد.

انرژی لازم برای اولین ترک در مواد مرکب الیافی به مراتب از انرژی مورد نیاز در مواد مرکب گلار[۱۶] کمتر بود. مواد مرکب گلار یک نوع ماده مرکب لایه ای آلومینومی با الیاف تقویت شده شیشه است. مقادیر به دست آمده از حل نظری، سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت. در مدل نظری ارائه شده اثر لایه لایه شدگی در نظر گرفته نشده بود [۱۷]. در سال (۱۹۹۷)، کیم[۱۷] و گو[۱۸] با استفاده از المان اجزاء محدود سه بعدی، رفتار دینامیکی و خرابی لایه‌های سازه‌های ساخته شده از مواد مرکب با انحناهای مختلف تحت ضربه را بررسی کردند.

---

[1] Kevlar
[2] DuPont
[3] Akzo
[4] Bachrach
[5] Hansen
[6] Chen
[7] Frederick
[8] Lee
[9] Reismann
[10] Reismann
[11] Lxu
[12] Christoforou
[13] Yigit
[14] Vlot
[15] Fiber Metal Laminated (FML)
[16] GLARE (glass-reinforced aluminum laminate)
[17] Kim
[18] Goo

آنها نشان دادند که با افزایش انحناء، نیروی ضربه افزایش پیدا می‌کند. اگرچه نوع خرابی تغییر نمی‌کند، اما باعث افزایش لایه لایه شدن منطقه خرابی می‌شود[۱۸]. عبدالله[۱] و کانت ول[۲] در سال (۲۰۰۶) پاسخ چند لایه‌ای فلز- الیاف ساخته شده از الیاف بافته شده شیشه و فاز زمینه پلی پروپیلن و ورقه‌های آلمینیوم به ضربه‌های پرسرعت را بررسی کردند. ساز و کارهای در نظر گرفته شده برای جذب انرژی عبارتند از: تغییر شکل عمده پلاستیک، کشیدگی غشایی[۳] در لایه‌های آلمینیومی، پارگی لایه‌های آلمینیومی[۴]، لایه لایه شدگی[۵]، شکست الیاف[۶] و ترک خوردگی فاز زمینه[۷]، مقاومت به سوراخ شدگی این چند لایه‌ای ها نیز با استفاده از روش تحلیلی محاسبه شد. نتایج آزمایش‌های بدست آمده صحت مدل تحلیلی را تایید کرد [۱۹]. لانگدان [۸] و همکاران در سال (۲۰۰۷) پاسخ انواع چند لایه‌های گلار[۹] را به بارهای انفجاری یکنواخت بررسی کردند. شیوه تخریب مشاهده شده شامل جدایش لایه‌ها، تغییر شکل پلاستیک، کمانش داخلی و پارگی لایه فلزی بود. مهمترین نتیجه بدست آمده ارتباط خطی میان تغییر مکان جبهه جلو و پشت صفحات بود [۲۰].

در سال (۲۰۱۷) ادو[۱۰] و همکاران، رفتار ضربه ای بالستیک ماده مرکب لیف کربن / اپوکسی و سازه های فلزی فولادی با یک پرتابه توپ کروی، را ارزیابی کردند. نتایج همچنین تحقیق آنها نشان داد که ماده مرکب کربن / اپوکسی می تواند در برابر ضربه بالاتر مقاومت نشان دهد و ویژگی های جذب انرژی بسیار خوبی را در شرایط بارگذاری تاثیر با سرعت بالا نسبت به سازه های فلزی فولاد نشان می‌دهد. بنابراین ماده مرکب کربن / اپوکسی مناسب برای کاربرد در ساختارهای خودرو و هوا فضا برای کارایی مطلوب در نظر گرفته شده است [۲۱]. گودزمریسکی[۱۱] و همکاران، امکان استفاده از سازه های چند لایه برای سیستم های سبک زره پوش که ممکن است به عنوان پانل های بالستیک بالستیک از جنگنده های هلیکوپتر و سایر تجهیزات نظامی سبک استفاده شود را ارزیابی کردند. ساختارهای چند لایه آزمایش شده بر اساس پارچه های آرامید، ورق های نازک آلیاژ آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و سرامیک Al_2O_3 و SiC تهیه شد. انرژی جذب شده با یک پرتابه کروی با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک تفنگ گاری با گاز هلیوم یک مرحله ای و یک دوربین دیجیتال با سرعت بالا تعیین شد. نتایج آنها نشان داده شده است که لایه های سرامیکی به طور قابل توجهی مقاومت بالستیک را افزایش می دهد [۲۲]. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در مطالعه مکانیسم‌های نفوذ تحت برخورد بالستیک با آن مواجهیم، تشخیص سرعت بحرانی بالاتر از مقداری است که یک پرتابه ممکن است هدف را سوراخ کند. این خصوصیت خاص عموماً تحت عنوان محدوده‌ی بالستیک (V_b) نامیده می‌شود و در طراحی سیستم‌های محافظ در برابر برخورد بالستیک بسیار مهم است.

---

[1] Abdullah
[2] Cantwell
[3] Composite membranes
[4] Tearing of aluminum layers
[5] Delamination
[6] Fibers tearing
[7] Corrosion cracking of matrix
[8] Longdon
[9] Glare
[9] Longdon
[10] Duodu
[11] Godzimirski

محدوده‌ی بالستیک همچنین بر اساس یک مفهوم آماری است: سرعت محدوده‌ی بالستیک (V_{50}) که به عنوان سرعتی که پرتابه بدون انحراف و کجی به یک محافظ خاص برخورد می‌کند تعریف می‌شود، ۵۰ درصد احتمال سوراخ کردن هدف را دارد [۲۳]. برای پیش بینی رفتار ترکیبات لمینت (بافته شده و تک جهتی)، تحقیقات زیادی صورت پذیرفته است که با توجه به فرضیات و محدودیت‌هایشان، وسعت کاربرد متفاوتی دارند [۲۹-۲۴]. آسیب‌ها در مواد مرکب می‌توانند در مواد و ساختارهای ساخته شده از مواد مرکب در طول فرآیند تولید یا در حین استفاده ایجاد شوند. ترک زمینه فاز[۱]، تخلخل[۲]، عدم چسبندگی[۳]، شکست الیاف[۴]، مواد زائد خارجی[۵] از مهمترین آسیب‌ها در مواد مرکب لایه‌ای است. این آسیب‌ها می‌توانند بر روی خواص مکانیکی مواد مرکب تأثیر گذارد [۳۴-۳۰]. جدایش بین لایه‌ای یا تورق یکی از مکانیزم‌های شکست در موادمرکب تقویت شده با الیاف است. ضربه سرعت پایین (محدوده سرعت ۳ تا ۵ متربرثانیه)، ضربه ناشی از پرتابه‌ها و نقص‌های هنگام ساخت از جمله مواردی است که می‌توانند باعث آسیب جدایش بین لایه‌ای شوند. این آسیب‌ها ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای استحکام ماده مرکب را کاهش داده و منجر به شکست ساختاری فاجعه آمیز شوند. بنابراین، استحکام ماده در برابر جدایش بین لایه‌ای و چقرمگی مبنایی در مکانیک شکست بوده و در طراحی مهندسی اهمیت زیادی دارند. از آنجا که مواد مرکب با الیاف با بافت دوبعدی به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شوند، بررسی‌های گسترده‌ای بر روی رشد ترک و تورق تحت انواع بارگذاری انجام شده است. همچنین تحقیقات زیادی در سالهای اخیر، بر روی تورق در مواد مرکب با زاویه‌های قرارگیری الیاف در مرز مشترک بین لایه‌ای انجام شده است [۳۵]. آلودگی دست به مواد خارجی مانند خاک، خرده چوب و ...، وقتی که به رزین آغشته است، در حین فرآیند ساخت دستی موادمرکب ممکن است اتفاق بیافتد. این مواد خارجی مانع از ایجاد پیوستگی در لایه‌های مواد مرکب می‌شوند و می‌توانند به شدت بر روی قابلیت‌های موادمرکب تأثیر بگذارند. ترک زمینه فاز، عدم چسبندگی، شکست الیاف، نیز از جمله آسیب‌هایی است که می‌تواند ناشی از ایجاد ضربات خارجی در مواد مرکب ایجاد شوند [۳۶].

با اینکه در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی مقاومت بالستیکی اجسام مختلف به ویژه مواد مرکب انجام گرفته است، اما کمبود پژوهش های کافی بر روی تأثیر آسیب های ایجاد شده حین ساخت در مواد مرکب بر روی مقاومت بالستیکی آنها احساس می شود. لذا در این تحقیق برای اولین بار تحقیق می شود که آسیب‌ها تا چه حد می توانند بر روی عملکرد مواد مرکب لایه‌ای در برخورد یا اجسام بویژه در برخورد با نیروهای متمرکز و در سرعت های بالا تأثیر بگذارند. در این پژوهش برای اولین بار، تأثیر آسیب‌های داخلی مهم: عدم چسبندگی بین لایه‌ای[۶]، ترک[۷]، آلودگی بین لایه‌ای[۸] بر روی مقاومت بالستیکی کامپوزیت های لایه ای بررسی می‌شود. همچنین در این مطالعه تأثیر آسیب‌های داخلی بر روی رفتار کششی نمونه های سالم و معیوب بررسی می شود.

---

[1] Matrix crack
[2] Porosity
[3] Fber-matrix debonding
[4] Fibers breakdown
[5] Inclusion
[6] Debonding
[7] Crack
[8] Contamination

۲- مواد، تجهیزات و روش آزمایش

در این تحقیق برای ساخت مواد مرکب لایه‌ای از پارچه آرامید، رزین اپوکسی EPL 1012 و هاردنر EPH 112 استفاده شد. ویژگی‌های رزین اپوکسی و هاردنر در جدول (۱) آمده است. در این مطالعه، تعداد ۳ نمونه سالم و ۶ نمونه معیوب با روش لایه چینی دستی ساخته شدند. ۲ نمونه سالم بیشتر با توجه به توصیه آزمایشگاه مقاومت بالستیک برای تصحیح تنظیمات و آزمایش‌های اولیه ساخته شدند. در نمونه‌های معیوب سه آسیب داخلی متفاوت با اندازه‌های متفاوت ایجاد می‌گردد.

۲-۱- ساخت نمونه‌های سالم

برای ساخت مواد مرکب لایه ای همانطور که در شکل (۱) مشخص است، ابتدا بر روی پارچه آرامید، ابعاد نمونه‌های مورد نظر با در نظر گرفتن حاشیه، علامت‌گذاری و سپس بریده شدند. آنگاه روی سطح محل ساخت تمیز گردید تا آلودگی بر روی سطح وجود نداشته باشد. درگام بعدی یک لایه جدا شونده بر روی سطح اعمال شد. آنگاه جزء ماتریس از دو بخش رزین[1] و سخت کننده[2] تشکیل شده است با نسبت اختلاط جزء سخت کننده پایه اپوکسی[3]، طبق پیشنهاد شرکت سازنده، ۱۵:۱۰۰ مخلوط شدند، تا به حالت کاملاً یکدست رسیده شود. درگام نهایی پس از لایه چینی، ورق کامپوزیتی تحت فرآیند پخت قرار می‌گیرند. پس از اینکه فرآیند ساخت نمونه‌ها به پایان رسید آنگاه، نمونه‌ها در اندازه ۱۲/۵×۱۲/۵ سانتیمتر بریده شدند. این ابعاد برای قرارگیری در ثابت کننده نمونه در آزمایش ارزیابی مقاومت بالستیکی مناسب هستند. در این تحقیق تمامی نمونه‌ها از ۱۰ لایه تشکیل شده‌اند. ضخامت نهایی نمونه های تولید شده ۳ میلیمتر است.

۲-۲- ساخت نمونه‌های معیوب

در این پژوهش آسیب‌های داخلی مهم که عبارتند از عدم چسبندگی بین لایه ای ترک فاز ماتریسی و آلودگی بین لایه‌ای بررسی می‌گردد. برای ساخت این نمونه‌های معیوب، تمامی مراحل ساخت مانند نمونه-های سالم تا لایه میانی اجرا می‌گردد، سپس بین لایه پنجم و ششم، آسیب مورد نظر ایجاد می‌گردد، در مرحله نهایی ساخت بقیه لایه‌ها طبق نمونه سالم دنبال می‌گردد.

۲-۲-۱- ساخت نمونه با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای

برای ساخت نمونه با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای، می بایست یک ناپیوستگی داخلی بین دو جزء ماده مرکب، یعنی فاز ماتریس و پارچه ایجاد شود. برای طراحی نمونه ای با با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای به تحقیقات پیشین سایر پژوهشگران رجوع شده است. آنها با قرارگیری یک لایه ماده دیگری به غیر از مواد سازنده مواده مرکب، یک آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای را ایجاد کرده اند [۳۸و ۳۹]. به این منطور از یک تکه چسب نایلون گرد شکل به قطر ۲۳ میلی متر استفاده شد. تکه چسب نایلون درست در مرکز نمونه قرار داده شد (شکل (۲ الف)). آنگاه بقیه مراحل لایه چینی و ساخت نمونه مانند نمونه سالم دنبال می‌گردد

---

[1] Resin
[2] Hardener
[3] Epoxy

(شکل (۲ ب)). سه نمونه دیگر با همین آسیب و با قطرهای، ۲۸، ۳۴ و ۳۸ میلیمتر نیز ساخته شد تا تأثیر افزایش مساحت آسیب بر مقاومت بالستیکی نیز بررسی گردد.

۲-۲-۲- ساخت نمونه با آسیب آلودگی بین لایه‌ای

برای ساخت نمونه با آسیب آلودگی بین لایه‌ای، می‌بایست یک آلودگی داخلی بین دو جزء ماده مرکب، یعنی فاز ماتریس و پارچه ایجاد شود. آلودگی دست به مواد خارجی مانند خاک، خرده چوب و... وقتی که به رزین آغشته است، در حین فرآیند ساخت دستی مواد مرکب ممکن است اتفاق بیافتد.

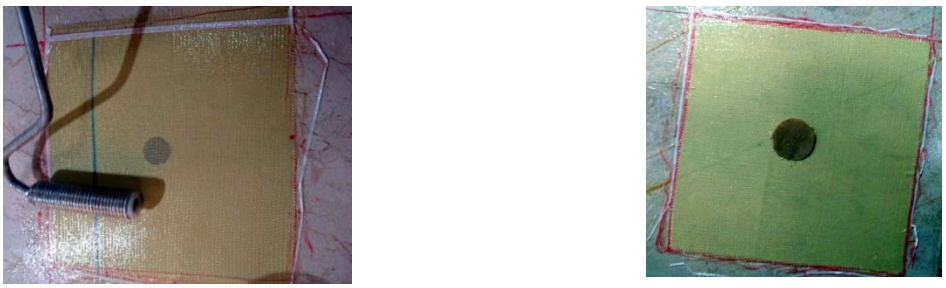
جدول ۱- خصوصیات مکانیکی رزین و هارنر (بر گرفته شده از برگه اطلاعات سازنده[1]) [۳۷]

Viscosity at 25°C(mPa.s)- EPL1012	900-1100
Viscosity at 25°C(mPa.s)- EPH112	30
Young's Modulus (GPa)	2.73
Tensile Strenght (MPa)	74.62
Shore Hardness	82
Mix Ratio	15/100
Gel Time	24 min
Full Cure	7 Days



(الف) (ب) (ج)

شکل ۱- (الف) ترسیم ابعاد نمونه ها بر روی پارچه و برش نمونه ها، (ب) اعمال لایه رزین بر روی پارچه، (ج) ساخت نمونه-ها با روش لایه چینی دستی



(الف) (ب)

شکل ۲- (الف) قرار دادن یک تکه چسب نایلون برای ایجاد آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای، (ب) ساخت نمونه با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای با روش لایه چینی دستی

[1] Factory Data Sheet

این مواد خارجی مانع از ایجاد پیوستگی در لایه‌های مواد مرکب می‌شوند و می‌توانند به شدت بر روی قابلیت‌های موادمرکب تأثیر بگذارند. ترک زمینه فاز، عدم چسبندگی، شکست الیاف، نیز از جمله آسیب‌هایی است که می‌تواند ناشی از ایجاد ضربات خارجی در مواد مرکب ایجاد شوند [۴۰]. به این منظور از مقداری خرده چوب به عنوان ناخالصی استفاده شد. خرده چوب ها درست در مرکز نمونه قرار داده شد. تلاش شد این جایگذاری به شکل یک دایره با قطر ۳۰ میلیمتر صورت پذیرد (شکل (۳ الف)). آنگاه بقیه مراحل لایه چینی و ساخت نمونه مانند نمونه سالم دنبال شد (شکل (۳ ب)). به منظور بررسی تأثیر افزایش سطح آسیب آلودگی بین لایه‌ای بر مقاومت بالستیکی سه نمونه دیگر با همین آسیب و با قطرهای، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ میلیمتر نیز ساخته شد. خرده چوب های مورد استفاده در این نمونه از تراش یک مداد بدست آمد. سپس بادقت تنها قسمت های چوبی آن در ساخت نمونه با آسیب آلودگی بین لایه‌ای استفاده شد. ضخامت ناخاصی ها حدود یک میلی متر است. اما از آنجا که تلاش شد که نمونه ها همگی از ضخامت یکسان برخوردار باشند، لذا با کم کردن میزان رزین، ضخامت نهایی نمونه در حدود ۳ میلی متر باقی ماند.

۲-۲-۳- ساخت نمونه با آسیب ترک داخلی

ساخت نمونه با آسیب ترک داخلی در عمل بسیار مشکل است. برای ساخت این نمونه باید لایه چینی کرد و یک لایه میانی را با مقدار نصف رزینی که در سایر لایه‌ها استفاده شده است، پوشش داد و پس از خشک شدن یک ترک با یک وسیله نوک تیز مناسب مانند کاردک ایجاد کرد. در گام بعدی مقداری رزین بر روی این لایه اعمال شود تا لایه چینی سایر لایه‌ها امکان پذیر گردد. اما نکته این جاست که در عمل رزین بدلیل خاصیت سیال بودنش، ترک ایجاد شده را پر می‌کند و عملاً دیگر ترکی وجود نخواهد داشت. در این تحقیق، برای ساخت نمونه با آسیب ترک داخلی، همانطور که در شکل (۴ الف) قابل مشاهده است ابتدا یک شکاف به طول پیشنهادی ۲۵ میلی‌متر در مرکز نمونه و در لایه سوم ایجاد شد. آنگاه توسط چسب نایلون بر روی لبه های ترک ایجاد شده قرار داده شدند، تا از به هم پیوستن لبه های ترک به هم جلوگیری شود(شکل (۴ ب)). سپس بقیه مراحل لایه چینی و ساخت نمونه مانند نمونه سالم دنبال شد (شکل (۴ج)). سه نمونه دیگر با آسیب ترک داخلی و با طول های ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر نیز برای بررسی‌های بیشتر ساخته شد.



(الف) (ب)

شکل ۳- (الف) قرار دادن خرده چوب‌ها برای ایجاد آسیب آلودگی بین لایه‌ای، (ب) نمونه با آسیب آلودگی بین لایه‌ای با روش لایه چینی دستی

۲-۳- آزمایش ارزیابی مقاومت بالستیک

در این تحقیق، برای ارزیابی مقاومت بالستیک از پرتابه های مدور یکسان از جنس فولاد ضد زنگ استفاده شده است (شکل (۵)). ویژگی‌ها و ابعاد پرتابه‌ها در جدول (۲) آمده است.

۲-۳-۱- آزمایش بالستیک

برای آزمایش ارزیابی مقاومت بالستیک، نمونه‌ها توسط دستگاه تفنگ گازی موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تحت ضربه سرعت بالای پرتابه قرار گرفتند. تصویر و شماتیک این دستگاه در شکل (۶) نشان داده شده است. در این دستگاه از گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد استفاده می شود. حداکثر سرعت ایجاد شده توسط این دستگاه تفنگ گازی ۲۳۵ متر بر ثانیه است. سرعت شلیک پرتابه در این آزمایش ۲۲۲ متر بر ثانیه است.

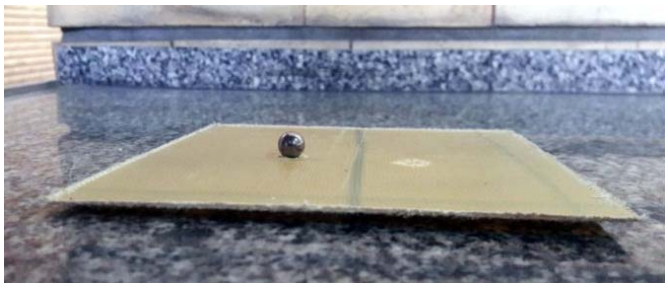


(الف) (ب) (ج)

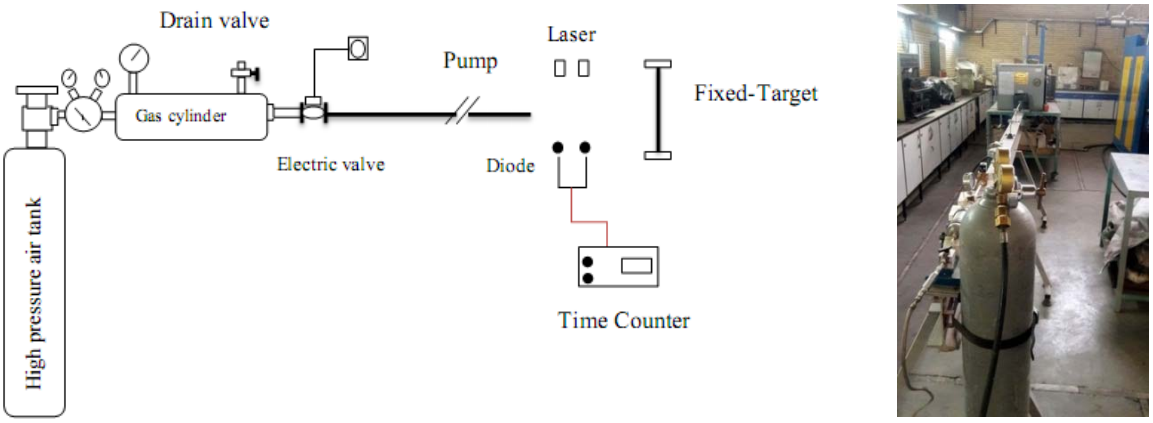
شکل ۴- (الف) ایجاد ترک در نمونه، (ب) تفکیک لبه های ترک با چسب نایلون ، (ج) ساخت نمونه با آسیب ترک داخلی با روش لایه چینی دستی

جدول۲- ویژگی ها و ابعاد پرتابه ها

جنس	فولاد ضد زنگ ۳۰۴
چگالی	۷۸۰۰
وزن	۲/۷۱ گرم
قطر	۸/۷ میلی متر



شکل ۵- نمونه پرتابه مورد استفاده در این تحقیق

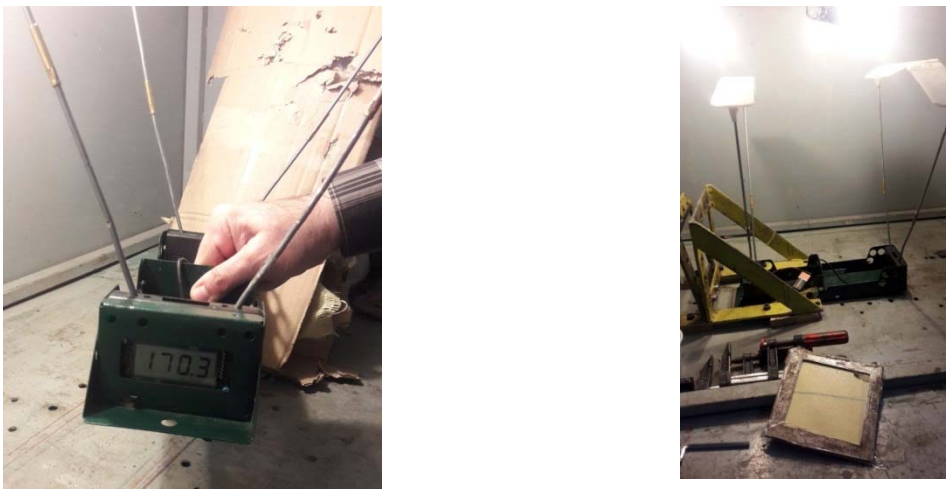


(ب) (الف)

شکل ۶– (الف) دستگاه تفنگ گازی موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، (ب) شماتیک دستگاه تفنگ گازی از منبع شلیک پرتابه تا اندازه‌گیری سرعت پرتابه خروجی

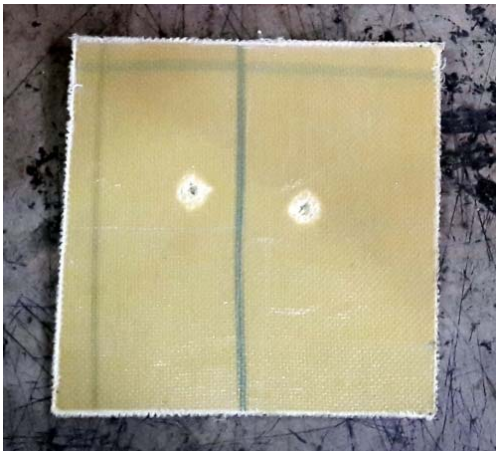
۲-۳-۲- بررسی تنظیمات آزمایش بالستیک

قبل از شروع آزمایش ارزیابی مقاومت بالستیکی می بایست چند شلیک اولیه صورت پذیرد تا از محل برخورد پرتابه به هدف، ضبط سرعت خروجی و مطابقت با نمودار کالبریسون سرعت پرتابه در این دستگاه برای گاز نیتروژن اطمینان حاصل گردد تا امکان شروع آزمایش فراهم شد. به این منظور ابتدا یکی از نمونه های سالم در ثابت کننده قرار می‌گیرد. آنگاه ثابت کننده در محل قرارگیری در دستگاه تفنگ گازی محکم می شود. گلوله پس از شلیک، به هدف که در دستگاه ثابت شده است، برخورد می‌کند (شکل (۷ الف)). سرعت گلوله بعد از عبور از نمونه، اندازه گیری شد (شکل (۷ب)). نمونه سالمی که برای تنظیمات اولیه دستگاه استفاده شده است در شکل (۸) نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۷– (الف) جایگذاری نمونه ها در ثابت کننده و محل جایگذاری ثابت کننده در دستگاه، (ب) اندازه گیری سرعت گلوله بعد از عبور از نمونه



شکل ۸- آزمایش های ابتدایی بر روی یکی از نمونه های سالم برای اطمینان از صحت تنظیمات دستگاه

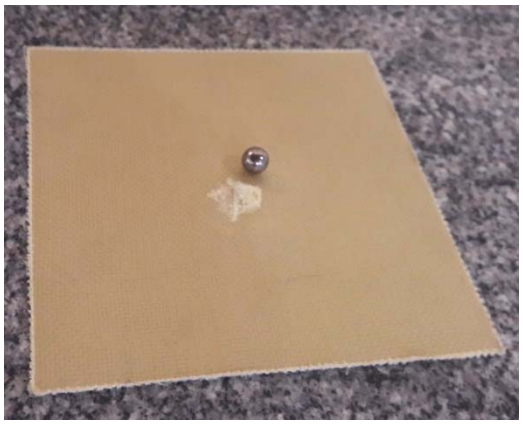
۲-۳-۳- آزمایش بالستیک نمونه های سالم و معیوب

در این مرحله ابتدا نمونه سالم و سپس نمونه‌های معیوب تحت ضربه سرعت بالای پرتابه قرار گرفتند. وضعیت نمونه ها بعد از برخورد در شکل (۹) قابل رویت است. همانطور که شکل (۹) قابل مشاهده است، در طی فرآیند نفوذ، قبل از اینکه لایه‌ای شکسته شود، خرابی ایجاد شده، ترکیبی از ترک خوردگی ماتریس و لایه لایه‌ای شدن ماده مرکب است. شروع و رشد لایه لایه‌ای شدن در راستای تارو و پود بیش از راستاهای دیگر است. به همین دلیل، ناحیه لایه لایه‌ای شدن، به جای دایره‌ای بودن، معمولاً به شکل گلبرگ است.

در تمامی پرتاب‌ها سرعت ورودی ۲۲۲ متر بر ثانیه بود. سرعت خروجی پرتابه از هدف برای تمام نمونه ها بدست آمد. در این مرحله مقدار انرژی جذب شده برای نمونه ها از فرمول (۱) بدست می آید [۲۲].

$$E_{abc} = \frac{1}{2} m(V_o^2 - V_i^2) \quad (۱)$$

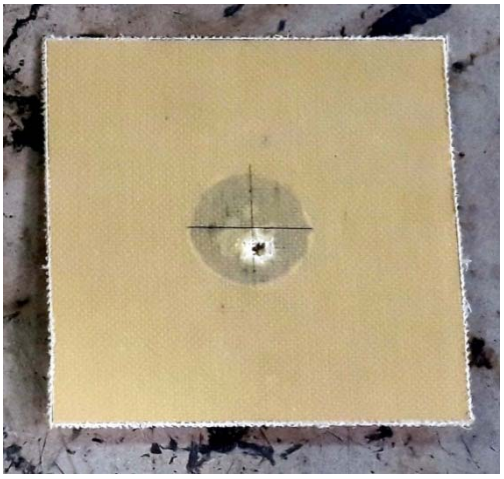
که در آن E_{abc} انرژی جذب شده، m جرم گلوله و V_i و V_o به ترتیب سرعت ورودی پرتابه و خروجی پرتابه از هدف می‌باشد. سرعت خروجی پرتابه از نمونه‌ها و مرحله مقدار انرژی جذب شده برای نمونه‌ها در جدول (۳) آمده است. سرعت خروجی پرتابه بعد ار برخورد به نمونه ها در شکل (۱۰) و انرژی جذب شده (E_{abc}) توسط نمونه ها در شکل (۱۱) آمده است.



(الف) وضعیت نمونه سالم بعد از برخورد



(ب) وضعیت نمونه با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای بعد از برخورد



(ج) وضعیت نمونه با آسیب آلودگی بین لایه ای بعد از برخورد



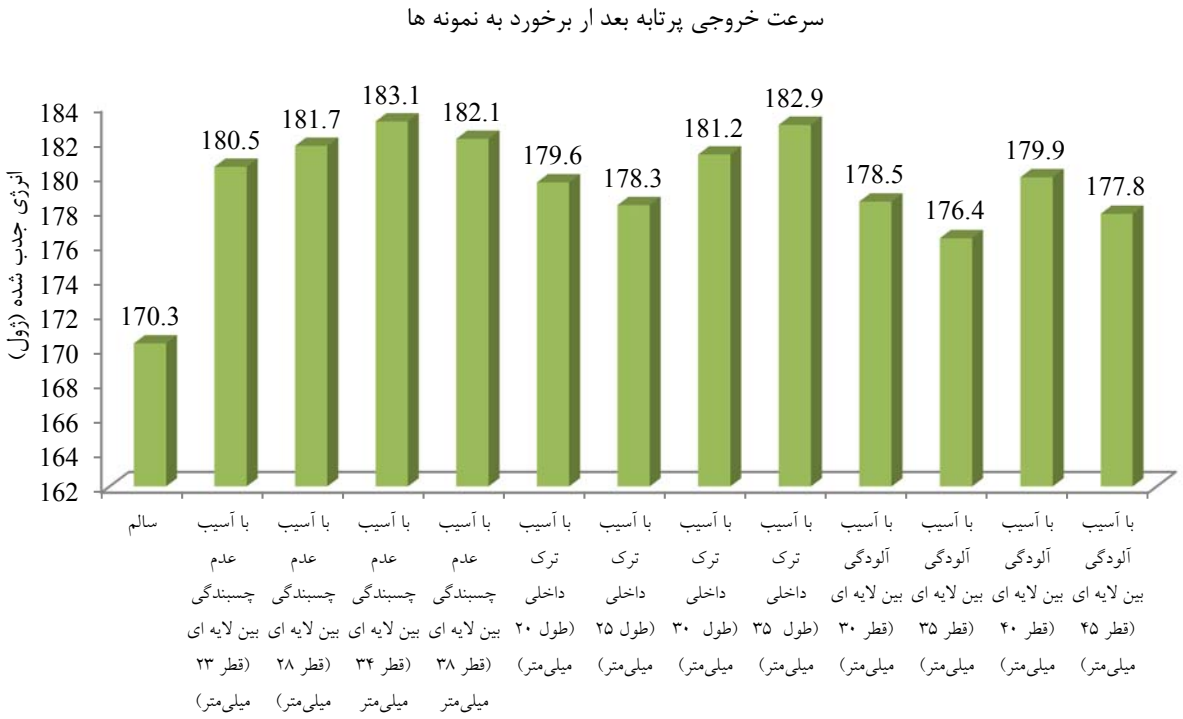
(د) وضعیت نمونه با آسیب ترک داخلی بعد از برخورد

شکل ۹- وضعیت نمونه های سالم و معیوب بعد از برخورد

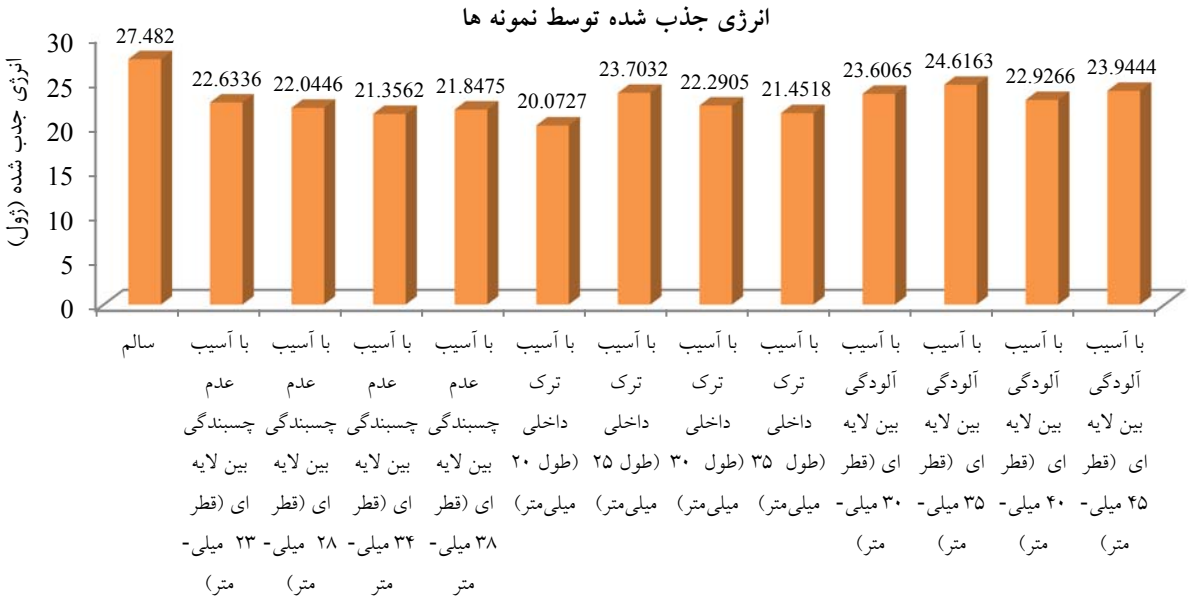
جدول ۳- سرعت خروجی پرتابه از نمونه ها و مرحله مقدار انرژی جذب شده برای نمونه ها

نوع نمونه	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	سرعت خروجی (متر بر ثانیه)	انرژی جذب شده (ژول)	درصد کاهش انرژی جذب شده نسبت به نمونه سالم
سالم	۲۲۲	۱۷۰/۳	۲۷/۴۸۲۰	۰
با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای (قطر ۲۳ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۸۰/۵	۲۲/۶۳۳۶	۱۷/۶۴۲۱
با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای (قطر ۲۸ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۸۱/۷	۲۲/۰۴۴۶	۱۹/۷۸۵۳
با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای (قطر ۳۴ میلی‌متر	۲۲۲	۱۸۳/۱	۲۱/۳۵۲۶	۲۲/۳۰۳۳
با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای (قطر ۳۸ میلی‌متر	۲۲۲	۱۸۲/۱	۲۱/۸۴۷۵	۲۰/۵۰۲۵
با آسیب ترک داخلی (طول ۲۰	۲۲۲	۱۷۹/۶	۳۰/۰۷۲۷	۹/۴۲۶۹

میلی‌متر)				
با آسیب ترک داخلی (طول ۲۵ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۷۸/۳	۲۳/۷۰۳۲	۱۳/۷۵۰۱
با آسیب ترک داخلی (طول ۳۰ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۸۱/۲	۲۲/۲۹۰۵	۱۸/۸۹۰۶
با آسیب ترک داخلی (طول ۳۵ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۸۲/۹	۲۱/۴۵۱۸	۲۱/۹۴۲۳
با آسیب آلودگی بین لایه ای (قطر ۳۰ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۷۸/۵	۲۳/۶۰۶۵	۱۴/۱۰۲۰
با آسیب آلودگی بین لایه ای (قطر ۳۵ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۷۶/۴	۲۴/۶۱۶۳	۱۰/۴۲۷۶
با آسیب آلودگی بین لایه ای (قطر ۴۰ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۷۹/۹	۲۲/۹۲۶۶	۱۶/۵۷۵۹
با آسیب آلودگی بین لایه ای (قطر ۴۵ میلی‌متر)	۲۲۲	۱۷۷/۸	۲۳/۹۴۴۴	۱۲/۸۷۲۴



شکل ۱۰- سرعت خروجی پرتابه بعد ار برخورد به نمونه ها



شکل ۱۱– انرژی جذب شده (E_{abc}) توسط نمونه ها

۳- نتایج و بحث

همانطور که از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) قابل مشاهده است، وجود آسیب باعث کاهش مقاومت بالستیکی ماده مرکب می‌گردد. که این نتیجه با دانسته‌های تئوری هماهنگی دارد. به طور کلی، وجود ناخالصی در ماده مرکب سبب می گردد تا استحکام خمشی که یک عامل تعیین کننده در مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالاست، کاهش پیداکند. کاهش این عامل، کاهش مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا را به همراه دارد. همچنین با مقایسه نتایج ارزیابی مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا برای سه آسیب مهم داخلی (عدم چسبندگی بین لایه‌ای، ترک فاز داخلی، آلودگی بین لایه‌ای) نشان می‌دهد که نمونه معیوب با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای بیشترین افت مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا را نشان می‌دهد. میزان درصد کاهش انرژی جذب شده نمونه معیوب با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای نسبت به نمونه سالم در حدود ۲۱ درصد است. این امر را می‌توان به دلیل ماهیت این نوع آسیب ها در ساختار مواد مرکب توضیح داد. این نوع آسیب باعث می‌گردد یک ناپیوستگی که بین دو لایه ایجاد نماید و در محل آسیب، دو لایه هیچ چسبندگی به هم ندارند، لذا خاصیت کشسانی این نمونه‌های معیوب به شدت کاهش می‌یابد. افزایش مساحت این آسیب در نمونه دیگر، باعث تغییر محسوس نشده است. این اتفاق را می-توان به ماهیت ضربات مترکز در سرعت‌های بالا ربط داد. ضربات متمرکز در سرعت‌های بالا در ناحیه کوچکی ضربه وارد می‌کنند و با سرعت بالا هدف را ترک می کنند، زمان این اتفاق فرصت واکنش (مقاومت) بیشتر به هدف را نمی‌دهد.

نتایج برای نمونه معیوب با آسیب ترک داخلی نشان می‌دهد که این آسیب نیز انرزی جذب شده توسط ماده در برابر ضربات در سرعت‌های بالا را کاهش می‌دهد. میزان درصد کاهش انرژی جذب برای نمونه معیوب با آسیب ترک داخلی بین لایه‌ای نسبت به نمونه سالم در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد است. هرچه طول ترک بیشتر شده است، میزان درصد کاهش انرژی جذب نیز بیشتر است. این افزایش طول ترک نیز باعث کاهش این مقاومت، البته به مقدار کم شده است.

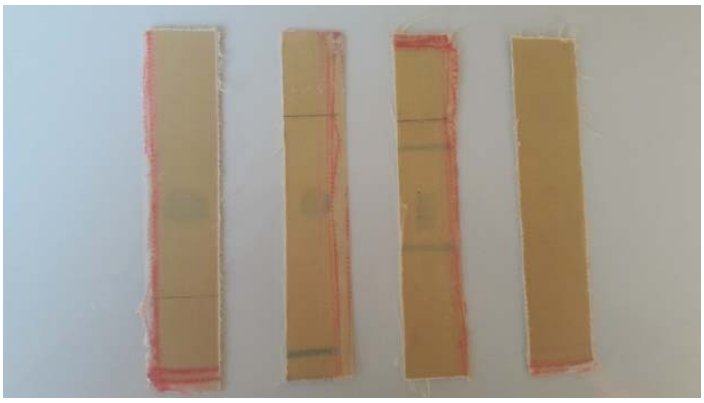
نتایج برای نمونه معیوب با آسیب آلودگی بین لایه ای نشان می‌دهد که این آسیب نیز مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا را کاهش می‌دهد. افزایش مساحت این آسیب نیز باعث کاهش این مقاومت، البته به مقدار کم شده است. میزان درصد کاهش انرژی جذب نمونه معیوب با آسیب آلودگی بین لایه ای نسبت به نمونه سالم در حدود ۱۴ درصد است. آسیب آلودگی بین لایه ای کمترین تأثیر بر مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا را نشان داده است. این اتفاق را می‌توان به ماهیت این نوع آسیب مربوط دانست. با اینکه آلودگی بین لایه‌ای خود نوعی ناهمگونی در ساختار ماده مرکب به حساب می‌آید که همین امر سبب کاهش مقاومت در برابر ضربات در سرعت های بالا می‌شود، اما ناخالصی های جامد خود باعث افزایش ضخامت قطعه می شود و پرتابه انرژی بیشتری را صرف می‌کند تا از قطعه عبور کند. لذا سرعت خروجی پرتابه به نسبت دو آسیب دیگر کمتر و انرزی جذب شده توسط قطعه بیشتر است.

۴- آزمون کشش

یکی از آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی مواد، آزمون کشش است. در این آزمون یک نمونه تحت اثر کشش تک محوری تا حد شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمون به‌طور معمول برای انتخاب یک ماده به منظور کنترل کیفیت و پیش‌بینی اینکه چگونه یک ماده تحت انواع دیگری از نیروها واکنش نشان می دهد به کار می‌رود. در این تحقیق، برای یررسی رفتار کششی نمونه‌ها از دستگاه آزمون کشش ساخت شرکت ZwickRoell و استاندارد ASTM D3039 استفاده شد. برای بررسی تأثیر آسیب‌های داخلی بر رفتار کششی ماده، ی تعداد ۴ نمونه شامل یک نمونه سالم و سه نمونه معیوب (یک نمونه از هر عیب) با روش لایه چینی دستی ساخته شدند. برای ساخت این نمونه‌ها مانند ساخت مواد مرکب لایه‌ای که برای ارزیابی مقاومت بالستیکی استفاده شده از پارچه از جنس آرامید، رزین اپوکسی EPL 1012 و هاردنر EPH 112 استفاده شد. نمونه‌ها از ۱۰ لایه تشکیل شده‌اند. در نمونه‌های معیوب سه آسیب داخلی عدم چسبندگی بین لایه‌ای، ترک داخلی ٔ آلودگی بین لایه‌ای در لایه میانی و مرکز آنها ایجاد می‌گردد. در نمونه با آسیب عدم چسبندگی بین لایه‌ای، از یک تکه چسب نایلون گرد شکل به قطر ۱۸ میلی‌متر استفاده شد. تکه چسب نایلون درست در مرکز نمونه قرار داده شد. برای ساخت نمونه با آسیب آلودگی بین لایه‌ای، از مقداری خرده چوب به عنوان ناخالصی استفاده شد. خرده چوب ها درست در مرکز نمونه قرار داده شد. سطح مقطع این آسیب دایره ای شکل و به قطر ۱۳ میلی‌متر است. به منطور ساخت نمونه با آسیب ترک داخلی، ابتدا یک شکاف به طول پیشنهادی ۲۵ میلی‌متر در مرکز نمونه و در لایه میانی ایجاد شد. آنگاه توسط چسب نایلون بر روی لبه های ترک ایجاد شده قرار داده شدند، تا از به هم پیوستن لبه های ترک به هم جلوگیری شود. سپس بقیه مراحل لایه چینی و ساخت نمونه دنبال شد.

نمونه ها در ابعاد ۲×۲۵×۱۷۰ میلی متر بر اساس استاندارد ASTM D3039 آماده سازی شد [۴۳-۴۱]. نمونه‌های موادمرکب ساخته شده برای آزمون کشش در شکل (۱۲) قابل رویت است. در گام بعد هر نمونه در فک دستگاه آزمون کشش قرار داده شد و تحت بارگذاری ۵ (mm/min) قرار گرفتند (شکل(۱۳)). درگام نهایی نیروی تحمل هر نمونه یاداشت و نمودار تنش- کرنش برای هریک از نمونه‌ها بدست آمد. نتایج در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، تقریباً رفتار کششی تمام نمونه ها در یک اندازه نزدیک به هم است. از آنجایی که آسیب ها به مقدار کم در نمونه ها و بین دو فک دستگاه آزمون کشش قرار دارد لذا طبعتاً تأثیری مشهودی بر روی رفتار کششی ماده نخواهد داشت. با این حال بیشترین تأثیر بر روی رفتار کششی ماده مربوط به نمونه با آسیب ترک داخلی است. با توجه به اینکه ترک ها در واقع یک نوع ناپیوستگی در ساختار ماده می‌باشند، به این لحاظ این نتیجه قابل پیش بینی بود.

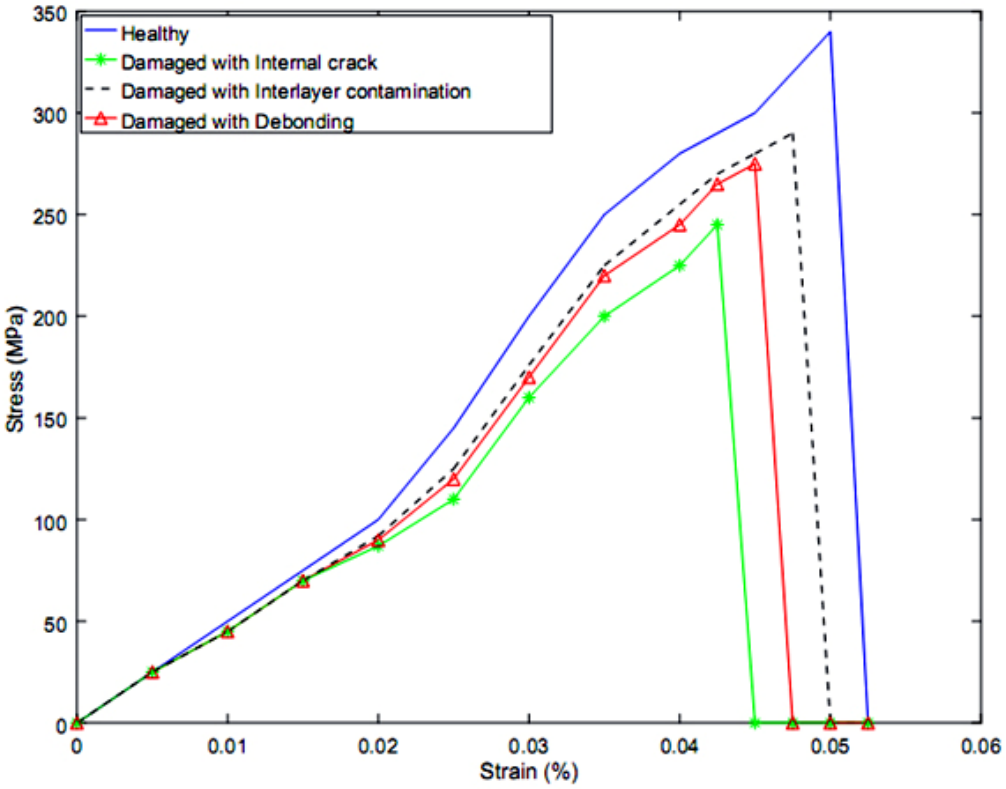
بررسی رفتار کششی نمونه ها نشان داد که تقریباً رفتار کششی تمام نمونه ها در یک اندازه نزدیک به هم است. از آنجایی که آسیب ها به مقدار کم در نمونه ها و بین دو فک دستگاه آزمون کشش قرار دارد لذا طبعتاً تأثیری مشهودی بر روی رفتار کششی ماده نخواهد داشت. با این حال بیشترین تأثیر بر روی رفتار کششی ماده مربوط به نمونه با آسیب ترک داخلی است. با توجه به اینکه ترک ها یک نوع ناپیوستگی در ساختار ایجاد می‌کنند به این لحاظ این نتیجه قابل پیش بینی بود.



شکل ۱۲– نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش



شکل ۱۳– قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه آزمون کشش



شکل ۱۴– نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ها

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار، تأثیر آسیب‌های داخلی مهم، عدم چسبندگی بین لایه‌ای، ترک داخلی و آلودگی بین لایه‌ای برروی مقاومت بالستیکی مواد مرکب لایه‌ای بررسی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که وجود آسیب باعث کاهش مقاومت بالستیکی ماده مرکب می‌گردد. همچنین با مقایسه نتایج برای سه آسیب داخلی نشان داد که کمترین و بشترین افت مقاومت در برابر سرعت بالا در مواد مرکب لایه ای ساخته شده در این تحقیق به ترتیب مربوط به نمونه معیوب با آسیب عدم چسبندگی بین لایه ای و نمونه معیوب با ترک داخلی است. بررسی رفتار کششی نمونه ها نشان داد که تقریباً رفتار کششی تمام نمونه ها در یک اندازه نزدیک به هم است. با این حال بیشترین و کمترین تأثیر بر روی رفتار کششی ماده به ترتیب مربوط به نمونه با آسیب ترک داخلی و آلودگی بین لایه‌ای است.

تقدیر و سپاسگزاری

نویسندگان لازم می دانند تا از استاد فرزانه آقای دکتر محمود مهرداد شکریه و کارکنان آزمایشگاه تحقیقاتی مواد مرکب دانشگاه علم و صنعت تشکر و تقدیر نماییم. همچنین از جناب دکتر احمدی استاد فرزانه دانشکده مکانیک دانشگاه تربیت مدرس و از آقای دکتر ثابت معاونت محترم پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تشکر می نماییم. بدون کمک این عزیزان اجرای این تحقیق میسر نبود.

مراجع

[1] Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Laxmana, Naik, L., Gopalakrishna, K., and Yogesha B., "Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview", Natural Resources, Vol. 7, pp. 108-114, (2016).

[2] Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., and Leong, K.M., "Biomedical Applications of Polymer-composite Materials: A Review", Composites Science and Technology, Vol. 61, No. 9, pp. 1189-1224, (2001).

[3] Nayak, N.V., "Composite Materials in Aerospace Applications", International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 4, No. 9, (2014).

[4] Kamali, G., Ashokkumar, N., Sugash, K., and Magesh, V., "Advanced Composite Materials of the Future in Aerospace Engineering", International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol. 5, No. II, pp. 610-614, (2017).

[5] Pora, J., "Composite Materials in the Airbus A380 – from History to Future", 13th International Conference on Composite Materials, Beijing, China, June 25-29, (2001).

[6] Chocron, S., "Impacts Research at SwRI. from Fibers to Composites", Conference at Airbus Military, Southwest Research Institute (SwRI), Accessed at (12/31/18): https://www.swri.org/work-us/internal-rd/2018/chemistry-materials/18-r8619, (2009).

[7] Tanner, D., Dhingra, A. K., and Pigliacampi, J. J., "Aramid Fiber Composites for General Engineering", the Journal of the Minerals (JOM), Vol. 38, No. 3, pp. 21–25, (1986).

[8] Singh, T.J., "Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review", Materials Today: Proceedings, Vol. 2, Nos. 4–5, pp. 1381-1387, (2015).

[9] Hagmann, C., Benford, D.J., and Richards, P.L., "Paramagnetic Salt Pill Design for Magnetic Refrigerators used in Space Applications", Cryogenics, Vol. 34, No. 3, pp. 213-219, (1994).

[10] Naveen Kumar, N., "Bulletproof Vest and Its Improvement – A Review", International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR), Vol. 1, No. 1, pp. 34-39, (2016).

[11] Darapu, S.S., and Darapu, S.S.K., "Kevlar Composite Materials in Automobile Engine Parts Manufacturing", Conference: 28th Indian Engineering Congress, Tamil Nadu, INDIA, December 20-22, (2013).

[12] Bachrach, W. E., and Hansen R. S., "Mixed Finite Element Method for Composite Cylinder Subjected to Impact", AIAA Journal, Vol. 27, No. 5, pp. 632-638, (1989).

[13] Chen, C.F., and Frederick, D., "Contact of Isotropic Square Plates with Rigid Spherical Indenters", International Journal of Solids and Structures, Vol. 30, No. 5, pp. 637-650, (1993).

[14] Lee, Y.C., and Reismann, H., "Dynamics of Rectangular Plates", International Journal of Engineering Science, Vol. 7, No. 1, pp. 93-113, (1969).

[15] Reismann, H., and Lxu, H.H., "Forced Motion of an Initially Stressed Rectangular Plate-an Elasticity Solution", Journal of Sound and Vibration, Vol. 55, No. 3, pp. 405-418, (1977).

[16] Christoforou, A.P., and Yigit, A.S., "Transien Response of a Composite Beam Subject to Elasto-plastic Impact", Composites Engineering, Vol. 5, No. 5, pp. 459-470, (1995).

[17] Kim, S. J., Goo, N. S., and Kim, T. W., "The Effect of Curvature on the Dynamic Response and Impact-induced Damage in Composite Laminates", Composites Science and Technology, Vol. 57, pp. 733-763, (1997).

[18] Her, S., and Liang, Y., "The Finite Element Analysis of Composite Laminates and Shell Structures Subjected to Low Velocity Impact", Composite Structure, Vol. 66, pp. 277-285, (2004).

[19] Abdullah M.R., Cantwell W.J., "The Impact Resistance of Polypropylene Based Fiber-Metal Laminates", Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 1682-1693, (2006).

[20] Langdon, G.S., Nurick, G.N., Lemanski, S.L., Simmons, M.C., Cantwell, W.J., and Schleyer, G.K., "Failure Characterisation of Blast-loaded Fibre-metal Laminate Panels Based on Aluminium and Glass-fibre Reinforced Polypropylene", Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 1385-1405, (2007).

[21] Duodu, E.A., Gu, J., Ding, W., Shang Z., and Tang S., "Comparison of Ballistic Impact Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Composite and Steel Metal Structures", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical, Vol. 42, No. 9, pp. 1–10, (2017).

[22] Godzimirski, J., Janiszewski, J., Rośkowicz, M., and Surma, Z., "Ballistic Resistance Tests of Multi-layer Protective Panels", Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, Vol. 17, No. 3, pp. 416–421, (2015).

[۲۳] محمدی‌پور، ر. حریربافان، ا.، "تحلیل تئوری و آزمایشی تیرآزاد (بدون تکیه‌گاه) در معرض بار ضربه‌ای پله‌ای متمرکز"، پانزدهمین کنفرانس سالانه انجمن مهندسان مکانیک، تهران، ایران، ۲۵-۲۷ اردیبهشت (۱۳۸۶).

[24] Hausrath R.L., and Longobardo A.V., "*High-strength Glass Fibers and Markets. In: Wallenberger F., Bingham P. (eds) Fiberglass and Glass Technology*", Springer, Boston, MA Online ISBN: 978-1-4419-0736-3, (2010).

[25] Marissen R., "Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers", Materials Sciences and Applications, Vol. 2, No. 5, pp. 319-330, (2011).

[26] Liu, T., Li, X., Xu, C., and Zhang, H., "Fiber Paper Based Electrodes with High Electrocatalytic Activity for Vanadium Flow Batteries with Improved Power Density", ACS Appl Mater Interfaces, Vol. 9, No. 5, pp. 4626-4633, (2017).

[27] Liu, X., and Yu, W., "Degradation of PBO Fiber by Heat and Light", Research Journal of Textile and Apparel (RJTA), Vol. 10, No. 1, pp. 26-32, (2006).

[28] Guan, Y., Mao, Y.H., Kong, Q.M., Zeng, X.F., and Zhu, P.X., "Pretreating Poly(p-phenylene Benzobisoxazole) Fibre with Polyphosphoric Acid and Dyeing with Disperse Dyes", Coloration Technology, Vol. 129, No. 5, pp. 367–376, (2013).

[29] Jeong, Y.G., Baik, D.H., Jang, J.W., Min B. G., and Yoon, K.H., "Preparation, Structure and Properties of Poly (p-phenylene Benzobisoxazole) Composite Fibers Reinforced with Grapheme", Macromolecular Research, Vol. 22, No. 3, pp. 279-286, (2014).

[30] Gholizadeh, S., "A Review of Non-destructive Testing Methods of Composite Materials", Procedia Structural Integrity, Vol. 1, pp. 50-57, (2016).

[31] Benyahia, F., Albedah, A., Bouiadjra, B. B., and Belhouari, M., "A Comparison Study of Bonded Composite Repairs of Through-wall Cracks in Pipes Subjected to Traction, Bending Moment and Internal Pressure", Advanced Materials Research, Vol. 1105, pp. 41-45, (2015).

[32] Song, K.S., Young Na, S., and Yeol Kim, J., "Internal Defect Inspection of Composite Material using Non-contact UT", Advanced Materials Research, Vols. 123-125, pp. 827-830, (2010).

[33] Yang, C.H., Huh, H., and Hahn, H.T., "Investigation of Effective Material Properties in Composites with Internal Defect or Reinforcement Particles", International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, No. 24–25, pp. 6141-6165, (2005).

[34] Hou, W., and Zhang, W., "Advanced Composite Materials Defects/Damages and Health Monitoring", 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing), Beijing, China, May 23–25, (2012).

[35] Fereidoon, A., Sabet, A.R., Dolati, S.H., and Esmaeeli, M.R., "The Effect of Stacking Sequence on Mode I Fracture Toughness of Glass Fiber/epoxy Laminates", The Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 2, pp. 183-187, (2014).

[36] Ghobadi, A., "Common Type of Damages in Composites and their Inspections", World Journal of Mechanics, Vol. 7, pp. 24-33, (2017).

[37] Marjanović, M., Meschke, G., and Vuksanović, D., "A Finite Element Model for Propagating Delamination in Laminated Composite Plates Based on the Virtual Crack Closure Method", Composite Structures, Vol. 150, pp. 8-19, (2016).

[38] Qiao, P., Shan, L., Chen, F., and Wang, J., "Local Delamination Buckling of Laminated Composite Beams using Novel Joint Deformation Models", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 136, No. 5, pp. 541-550, (2010).

[39] Ghabezi, P., and Farahani, M., "Composite Adhesive-bonded Joint Reinforcement by Incorporation of Nano-alumina Particles", Journal of Computational Applied Mechanics, Vol. 47, No. 2, pp. 231-239, (2016).

[40] "Standard Test Methods for Flexural Properties of Un-reinforced and Reinforced Plastics and Electrical", Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D 790–00, (2000).

[41] "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D3039/D3039M-00, (2002).

[42] Khosravi, H., Eslami-Farsani, R., and Ebrahimnezhad-Khaljiri, H., "An Experimental Study on Mechanical Properties of Epoxy/basalt/carbon Nanotube Composites under Tensile and Flexural Loadings", Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 187-194, (In Persian) (2016).

[43] Sari, A., Eslami Farsani, R., and Zamani, M. R., "An Experimental Investigation on the Tensile Behavior of Epoxy/carbon Fibers Composites Containing Anhydride Self-healing Material", Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 336-342, (In Persian) (2017).

فهرست نمادهای انگلیسی

E_{abc} : انرژی جذب شده

m: جرم گلوله

V_i : سرعت ورودی پرتابه به هدف

V_o : سرعت خروجی پرتابه از هدف

Abstract

In this research for the first time, the effect of important internal damages; debonding, internal cracks, interlayer contamination on the ballistic strength of composite layers are investigated. In order to manufacturing the composite samples of aramid clay, epoxy resin EPL 1012 and EPH 112 hardener were used. The results of this assessment showed that the damage caused the ballistic strength of the composite material to decrease. Also, by comparing the results for three internal damages, it showed that the highest and the lowest loss of ballistic resistance is related to debonding damage and interlayer contamination damage, respectively. Also, tensile analysis of the samples showed that the tensile behavior of all samples was close enough to each other. However, the maximum and minimum effects on tensile behavior of the samples are related to the sample with crack internal and interlayer contamination, respectively.