

بررسی جذب انرژی کامپوزیت گرمانرم PA/GF6 تولید شده به روش پرس گرم تحت آزمون ضربه سرعت پایین

امیرمحمد منوچهری^۱، غلامحسین لیاقت^{۲*}، حامد احمدی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

چکیده

ورق‌های کامپوزیتی گرمانرم به دلیل استحکام به وزن و ظرفیت جذب انرژی بالا، توجه روزافزونی را در صنایع مختلف به خود جلب کرده‌اند. در پژوهش پیش رو، رفتار ورق کامپوزیتی با زمینه گرمانرم پلی آمید ۶ و الیاف ممتد شیشه (PA6/GF) تحت آزمون نفوذ شبه استاتیک و سقوط وزنه بررسی شده است. از آنجایی که زمینه پلی آمید نسبت به اثرات نرخ کرنش حساسیت قابل توجهی دارد، خواص مکانیکی مورد نیاز در نرخ کرنش‌های مختلف توسط آزمون هایپوکیسون استخراج شد. بر اساس این آزمایش، استحکام کامپوزیت مورد مطالعه در نرخ کرنش مشابه آزمون سقوط وزنه نسبت به نفوذ شبه استاتیک، ۴۷ درصد رشد داشته است. در اثر برخورد پرتابه، مودهای خرابی شکستگی الیاف، جدایش الیاف از زمینه، ترک عمودی و افقی نسبت به جهت الیاف مشاهده شده است؛ همچنین شبیه سازی عددی با نرم افزار LS-DYNA انجام و اثرات نرخ کرنش استخراج شده از آزمون هایپوکیسون در شبیه سازی عددی اعمال شد که دقت شبیه سازی را در محاسبه بیشینه نیرو به ۹/۶ درصد رساند. بر اساس نتایج شبیه سازی عددی، در ضخامت‌های کمتر از ۲/۵ میلی‌متر مقادیر جذب انرژی به وزن ورق کامپوزیتی ثابت است؛ همچنین بیشینه جذب انرژی در کامپوزیت ۴ لایه، مربوط به لایه چینی [۹۰/۲/۰/۲] با جذب ۱۸ ژول انرژی بوده است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت گرمانرم؛ پلی آمید ۶/شیشه؛ نفوذ شبه استاتیک؛ سقوط وزنه؛ LS-DYNA.

Investigating the energy absorption of PA/GF6 thermoplastic composite produced by the hot pressing method under low-velocity impact test

Amir Mohammad Manouchehri¹, Gholamhossein Liaghat^{2,*}, Hamed Ahmadi³

¹ MSc, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

² Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

³ Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

Abstract

Thermoplastic composite sheets have attracted increasing attention in various industries due to their high Specific strength and energy absorption capacity. In the upcoming research, the behavior of composite sheets with polyamide6 thermoplastic matrix and continuous glass fibers (PA6/GF) has been investigated under quasi-static penetration and drop weight test. Since the polyamide matrix is significantly sensitive to the effects of strain rate, the required mechanical properties at different strain rates were extracted by the Hopkinson test. Based on this test, the strength of the studied composite has grown by 47% at the same strain rate as the drop weight compared to the quasi-static penetration test. As a result of the impact, failure modes such as fiber breakage, separation of fibers from the matrix, vertical and horizontal cracks concerning to the direction of the fibers have been observed. Also, numerical simulation was performed with LS-DYNA software and the effects of strain rate extracted from Hopkinson's test were applied in numerical simulation, which brought the accuracy of the simulation to 9.6% in calculating the maximum force. Based on the results of numerical simulation, in thicknesses less than 2.5mm, the SAE of the composite sheet is constant; Also, the maximum energy absorption in 4-layer composites were related to the laminate [90₂/0₂] with 18J of energy absorption.

Keywords: Thermoplastic composite; PA6/GF; Quasi-static indentation test; Drop weight; LS-Dyna.

۱- مقدمه

خواص مکانیکی ورق‌های کامپوزیتی منجر به افزایش استفاده از آنان در زمینه‌های متعدد مهندسی مانند هوافضا، راه‌آهن، خودروسازی و دریایی شده است. در این صنایع مواد کامپوزیتی، عمدتاً جای مواد فلزی را گرفته‌اند. کامپوزیت‌های پلیمر/شیشه یا کربن در مقایسه با آلیاژهای فلزی، شکننده‌تر بوده و شکست یا تخریب این مواد به شکستگی الیاف، ترک خوردگی زمینه، جدایش لایه‌ها و جدایش الیاف از زمینه مربوط می‌شود [۱، ۲].

مواد کامپوزیت رایج بر اساس جنس زمینه به دو دسته گرماسخت و گرمانرم تقسیم می‌شوند. کامپوزیت‌های گرمانرم چقرمگی شکست بالاتر و تحمل آسیب بهتری نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت دارند که منجر به وارد آمدن آسیب کمتری در ناحیه ضربه تحت همان انرژی ضربه می‌شود [۳]. مورتون و کنتول [۴] دریافتند که کامپوزیت‌ها وقتی در معرض ضربه با سرعت کم قرار گیرند، قادر به جذب انرژی و اتلاف آن توسط فرآیندهای مختلف شکستگی و الاستیک زمانی هستند. توانایی این مواد در جذب انرژی به خواص مکانیکی زمینه و الیاف، استحکام سطحی، سرعت ضربه و کسر حجمی بستگی دارد. کامپوزیت‌ها با زمینه پلیمری به شدت در برابر آسیب‌های داخلی ناشی از بارهای عرضی حتی تحت ضربه با سرعت کم حساس هستند [۵].

یکی از خواص ویژه مواد پلیمری گرمانرم امکان بازیافت آنان است، در صورتی که در مواد گرماسخت این امکان وجود نداشته و زباله‌های آن به یک چالش جهانی تبدیل شده است [۶، ۷]. از این مواد پلیمری به عنوان زمینه در سازه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. به منظور تقویت خواص مکانیکی این مواد در بارگذاری ضربه‌ای از الیاف‌های گوناگون مثل شیشه، کربن، کولار و بازالت استفاده شده است [۸-۱۱].

مواد گرمانرم تقویت شده با الیاف شیشه بر حسب اندازه الیاف به دسته الیاف کوتاه (طول میانگین الیاف کمتر از ۱ میلی‌متر)، بلند (طول میانگین الیاف بین ۱ تا ۲۵ میلی‌متر) و الیاف پیوسته (طول میانگین الیاف به اندازه طول قطعه) تقسیم می‌شوند [۹، ۱۴-۱۲].

کامپوزیت‌هایی که در صنایع مکانیکی به کار می‌روند، ممکن است در معرض بارگذاری پیچیده قرار گیرند، بنابراین نمونه‌سازی و انجام آزمایش تجربی به منظور ارزیابی پاسخ مکانیکی می‌تواند فرآیندی گران و زمان‌بر باشد. بنابراین اغلب مهندسان از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت استفاده می‌کنند [۱، ۳].

نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در صنعت خودروسازی و همچنین در صنایع هوافضا و پزشکی است [۴].

در نرم‌افزارهای المان محدود، دقت پیش بینی رفتار ماده تابع اعمال صحیح بارگذاری، شرایط مرزی و خواص صحیح مواد است. مدل‌های کامپوزیت چند لایه موجود در LS-DYNA توسط نایبک [۵] و هالکویبیست [۱۵] توضیح داده شده است؛ بنابراین به جای تعریف ماده جدید می‌توان از مدل‌های مواد کامپوزیتی در نرم‌افزار LS-DYNA استفاده کرد [۸]. مدل‌های مواد Mat_22 و Mat_54 بر اساس معیارهای خرابی چانگ-چانگ^۱ تعریف شده‌اند. مدل MAT_54 که نسخه بهبود یافته و دقیق‌تر Mat_22 بوده و متغیرهای حد نهایی تنش و کرنش را به مدل خود اضافه کرده است [۵]. مدل‌های مواد Mat_58 و Mat_161/162 بر اساس معیارهای توسعه‌یافته از روش خرابی هشین^۲ استفاده کرده‌اند. در مقایسه با مدل‌های دیگر، مدل Mat_161/162 امکان شبیه‌سازی جدایش لایه‌ها را میسر می‌کند [۶].

در برخوردهای سرعت پایین، هنینگ و همکاران [۱۲] مدل‌سازی کامپوزیت کربن/اپوکسی را در نرم‌افزار LS-DYNA اجرا کرده‌اند. در این مدل‌سازی، ضربه زننده به عنوان ماده صلب و ورق کامپوزیت از جنس المان پوسته انتخاب شده است. در حین برخورد نیروی تماسی بین ضربه زننده و پوسته ثبت و با داده تجربی مقایسه شده است.

مطالعاتی بر روی افزایش سفتی و استحکام مواد در اثر بارگذاری با نرخ کرنش بالا انجام شده است که برخی از آن‌ها علاوه بر ارائه نتایج تجربی حاصل از آزمایش سقوط وزنه و هایپکینسون، روابط تجربی کلی برای رفتار این مواد تحت نرخ کرنش‌های مختلف ارائه داده‌اند [۱۳]. این مدل‌ها مشخصاً برای مواد پلیمری آمورف و نیمه کریستال توسعه داده شده‌اند [۱۶].

¹ Chang-Chang

² Hashin

تمرکز در سازه‌های کامپوزیت بر روی مواد با زمینه‌های گرماسخت است. مواد کامپوزیت با زمینه گرمانرم دارای فناوری تولید پیچیده و جدیدی هستند و به تازگی در صنایع مختلف به کار می‌روند. کامپوزیت‌های گرمانرم به دلیل نداشتن فرایند پخت، سرعت تولید بسیار بالاتری نسبت به کامپوزیت‌های گرماسخت دارند. این مواد برعکس مواد گرماسخت، قابل بازیافت بوده و بعد از اتمام فرایند ساخت، قابلیت اصلاح دارند. همه این موارد در کنار جذب انرژی بهتر این مواد و نرم بودن رفتار مکانیکی آن‌ها باعث شده تحقیقات بر روی کامپوزیت‌های ترموپلاستیک برای پژوهشگران جذاب شود. این پژوهش سعی دارد، رفتار مکانیکی کامپوزیت گرمانرم پلی آمید ۶/شیشه را تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین و نفوذ شبه استاتیک بررسی کند. در کنار آزمایش تجربی یک مدل عددی برای پیش بینی خواص مکانیکی این ماده توسعه داده می‌شود؛ همچنین اثر نرخ کرنش بر روی خواص و رفتار این کامپوزیت بررسی خواهد شد.

۲- معرفی مواد و ساخت نمونه

به منظور ساخت نمونه کامپوزیتی از پیش آغشته پلی آمید ۶/شیشه استفاده شده است. برای تولید پیش آغشته گرمانرم، نخ‌های شیشه در کنار هم قرار گرفته و همانند شکل ۱ وارد یک محفظه، حاوی پلیمر گرمانرم مذاب می‌شوند. در این مرحله الیاف با زمینه آغشته می‌شوند. سپس از محفظه خارج شده و به آرامی سرد می‌شوند تا زمینه، شکل نهایی را در حالت جامد به خود بگیرد. در نهایت قسمت‌های زائد در لبه‌های پیش آغشته بریده و نمونه نهایی به صورت ورق یا رول تولید می‌شود. این فرایند قادر است، پیش آغشته‌های گرمانرم را با ۷۰ درصد حجمی الیاف ممتد شیشه در ضخامت‌های متغیر تولید کند.

فرم کلاسیک آزمون هایپکینسون به صورت موفق آمیز در محاسبه خواص دینامیکی مواد الاستوپلاستیک فلزی و غیر فلزی مثل کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده می‌شود. این آزمون تحت عنوان میله اسپلیت-هایپکینسون^۱ یا میله کلسکی^۲ شناخته شده که رایج‌ترین روش برای محاسبه خواص کامپوزیت‌های پلیمری در نرخ کرنش بالا است. روش میله اسپلیت-هایپکینسون علاوه بر ساده و سریع بودن، دقت بالایی دارد. اخیراً این روش حتی برای تعیین خواص بتن نیز به کار رفته است [۱۴، ۱۷، ۱۸].

یکی از راهکارهای رایج تولید کامپوزیت‌های گرمانرم استفاده از روش پرس گرم است. به طور کلی نوع لایه چینی الیاف در تعیین رفتار ماده در نرخ کرنش‌های بالا مؤثر است. به عنوان مثال با افزایش نرخ کرنش، مدول الاستیسیته پوخته کامپوزیتی تک جهت کاهش می‌یابد ولی در کامپوزیت با آرایش لایه متقارن، مدول الاستیسیته افزایش یافته است. این تأثیر در استحکام ماده به اندازه مدول الاستیسیته چشمگیر نیست. همچنین افزایش دما باعث کاهش قابل توجه استحکام مواد شده است. اثرات دمایی نسبت به افزایش نرخ کرنش به طور کلی تأثیر بیشتری بر خواص ماده می‌گذارد [۱۹]. در بین کامپوزیت‌های گرمانرم، کامپوزیت پلی آمید ۶/شیشه مورد توجه بیشتر قرار گرفته است [۲۰]. نتایج آزمون خستگی بر روی این کامپوزیت نشان می‌دهد مقاومت زمانی این ماده نسبت به کامپوزیت‌هایی با زمینه پلی اتیلن و پلی استر بیشتر است [۲۱].

هان و همکاران [۲۲] به بررسی انواع خرابی‌های رایج در کامپوزیت زمینه پلیمری پرداخته‌اند. آن‌ها با ایجاد عیب بین لایه‌ای و شبیه سازی آن به وسیله رایانه، رفتار کامپوزیت را مورد مطالعه قرار دادند. بیشترین خرابی رخ داده در این مواد مربوط به شکست زمینه و رشد ترک بین لایه‌ای می‌شود. همچنین لیو و همکاران [۲۳] به مطالعه آسیب‌های ایجاد شده بر روی کامپوزیت با زمینه پلیمری ترموپلاستیک در اثر ضربه سرعت پایین پرداخته‌اند. بررسی نوع شکست و خرابی به وسیله میکروسکوپ الکترونی و مدل سه بعدی خرابی انجام شده است.

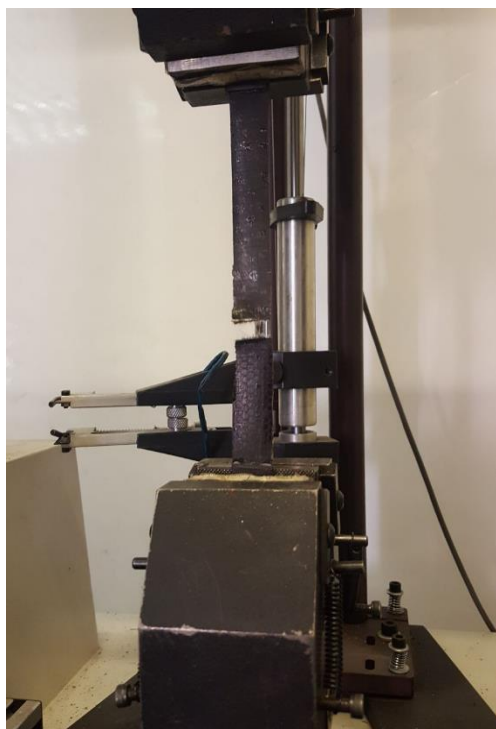
بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه جذب انرژی و مدل‌سازی عددی مواد کامپوزیت حاکی از آن بوده که عمده

² Kolsky bar

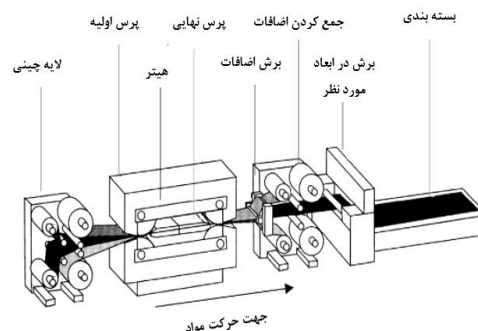
¹ Split Hopkinson bar

۳- خواص مکانیکی ماده

خواص مکانیکی ماده برای انجام مدل سازی توسط دستگاه کشش یونیورسال ۱۵ تن مطابق شکل ۳ به دست آمده است. نمونه آزمون کشش به طول ۲۵۰، عرض ۲۵ و ضخامت ۲/۵ میلی متر ساخته شده است. به منظور جلوگیری از لغزش فک دستگاه و تمرکز تنش در حین انجام آزمایش از تبهای کامپوزیتی به طول ۵۶ میلی متر استفاده شده است. مطابق با استاندارد ASTM D3039 سرعت جابجایی فکهای دستگاه ۲ میلی متر بر دقیقه است. نمونه های آزمایش در زاویه الیاف ۰ و ۴۵ درجه مورد آزمایش قرار گرفته اند و خواص مکانیکی مطابق جدول ۱ تهیه شده است. خواص برشی داخل صفحه کامپوزیت مطابق استاندارد ASTM D7078 استخراج شده است. از آنجایی که لایه چینی کامپوزیت به صورت ۰ و ۹۰ درجه بوده، پس خواص مکانیکی در جهت ۱ و ۲ مشابه همدیگر است. به همین دلیل ذکر خواص در ۱ جهت برای مدل سازی کفایت می کند.



شکل ۳ - آزمون کشش کامپوزیت پلی آمید ۶/شیشه



شکل ۱- فرایند تولید پیش آغشته کامپوزیتی گرمانرم [۲۴]

پوسته کامپوزیتی از الیاف شیشه و زمینه پلی آمید ۶ با آرایش لایه [۹۰/۰] تشکیل شده است. این پوسته از پرس گرم کردن دو پیش آغشته گرمانرم با ۶۰ درصد حجمی الیاف ساخته می شود. نیروی فشاری لازم برای ساخت این نمونه ۱ تن بوده و تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد گرم می شود. در این زمان، زمینه به حالت مایع در آمده و دو پیش آغشته به طور کامل به همدیگر می چسبند. پوسته ساخته شده موجود در شکل ۲ دارای ابعاد ۴۰ در ۴۰ سانتی متر است و برای انجام آزمایش در ابعاد ۱۲ در ۱۲ سانتی متر بریده می شود. در این تحقیق برای ارزیابی میزان جذب انرژی پوسته کامپوزیتی از یک نفوذ کننده با سر نیمه کروی به قطر ۲۰ میلی متر استفاده شده است. نفوذ کننده از جنس فولاد آلیاژی MO40 بوده که عملیات حرارتی تا سختی ۶۵ راکول سی روی آن صورت گرفته است.



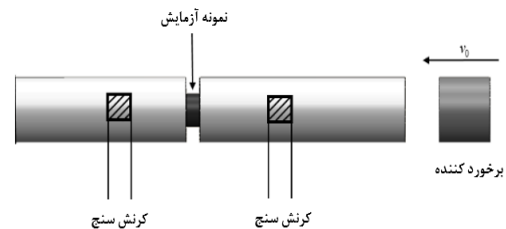
شکل ۲- کامپوزیت تولید شده با روش پرس گرم در دمای ۲۵۰ درجه

جدول ۱- خواص مکانیکی پوسته شیشه / پلی آمید ۶

E_1, E_2 (GPa)	V_{12}	G_{12} (GPa)	X_{IT} (GPa)	Y_{IT} (GPa)	S_{12} (GPa)
۱۲	۰/۱۸	۳/۹	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۰۹

در جدول ۱ مقادیر $E_1, E_2, V_{12}, G_{12}, X_{IT}, Y_{IT}, S_{12}$ به ترتیب مدول الاستیسیته در جهت الیاف و عمود بر آن، ضریب پواسون، مدول برشی، استحکام کششی در جهت الیاف، استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف و استحکام برشی است.

یک مطالعه دقیق بر روی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های گرمانرم باید شامل بررسی خواص مکانیکی آن مواد در نرخ بارگذاری متفاوت باشد و از آنجایی که این مواد عمدتاً حساسیت قابل ملاحظه‌ای نسبت به نرخ کرنش در بارگذاری دارند؛ این مسئله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. برای محاسبه خواص دینامیکی ماده از آزمون هاپکینسون فشاری استفاده شده است [۸]. نمونه مورد بررسی بین دو میله الاستیک بلند قرار می‌گیرد. نحوه بارگذاری مطابق شکل ۴ توسط یک پرتابه انجام می‌شود که به سطح آزاد یکی از میله‌ها برخورد می‌کند. به منظور جلوگیری از وجود کمانش در میله‌ها که ممکن است در اثر برخورد ایجاد شود، تکیه‌گاه گیردار سمت چپ در شکل ۴ به‌گونه‌ای طراحی شده که در اثر وجود بار اضافه و قبل از وقوع کمانش، میله را آزاد کند.

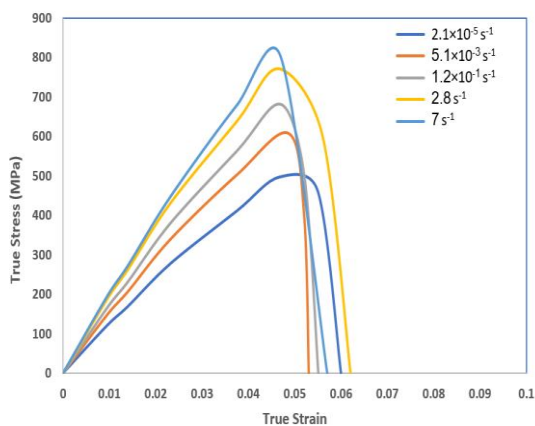


شکل ۴- آزمون هاپکینسون فشاری به همراه نمونه و کرنش سنج

آزمون هاپکینسون بر روی نمونه سیلندری کامپوزیتی با قطر و طول ۸ میلی‌متر تا نرخ کرنش واقعی $7 s^{-1}$ انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از آزمون هاپکینسون و شبه استاتیکی فشاری، خواص دینامیکی کامپوزیت در بازه نرخ کرنش $2/1 \times 10^{-5}$ الی $7 s^{-1}$ انجام و نمودار تنش بر حسب

کرنش واقعی در بازه‌های نرخ کرنش مورد نظر استخراج شده است. بر اساس داده‌های به دست آمده از آزمایش که در شکل ۵ گزارش شده، استحکام و کرنش شکست نسبت به نرخ کرنش تغییر کرده است. این تغییر در استحکام افزایشی و در کرنش شکست، کاهش یافته است. به طوری که کرنش شکست ماده در نرخ کرنش $2/1 \times 10^{-5} s^{-1}$ نسبت به نرخ کرنش $1/2 \times 10^{-1} s^{-1}$ مقدار ۱۷ درصد کاهش پیدا کرده است. از نوع نمودار در شکل ۵ می‌توان دریافت که رفتار کلی ماده در تمامی نرخ کرنش‌ها به صورت ترد بوده و با افزایش نرخ کرنش این ویژگی شدت بیشتری می‌گیرد. از آنجایی که پژوهش پیش رو به بررسی در ضربه سرعت پایین می‌پردازد، نرخ‌های کرنش کمتر از $7 s^{-1}$ مورد استفاده بیشتری قرار می‌گیرد.

بررسی حساسیت استحکام کامپوزیت پلی آمید/ شیشه نسبت به نرخ کرنش در شکل ۶ رسم شده است. محور افقی این نمودار به صورت لگاریتمی رسم شده است تا با توجه به زیاد بودن فاصله نرخ کرنش‌ها از همدیگر بتوان مقایسه‌ای بین آن‌ها انجام داد. افزایش استحکام ماده در نرخ کرنش $7 s^{-1}$ نسبت به نرخ کرنش $2/1 \times 10^{-1} s^{-1}$ مقدار ۴۷ درصد بوده است. از بررسی رفتار نمودار شکل ۶ می‌توان فهمید که خواص استحکامی کامپوزیت در نرخ کرنش کمتر از $7 s^{-1}$ در مقیاس لگاریتمی به صورت خطی است. این ویژگی در شبیه‌سازی عددی که مقدار نرخ کرنش دقیقاً با مقدار نرخ کرنش آزمون هاپکینسون برابر نیست می‌تواند کمک کننده باشد.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش بین $2/1 \times 10^{-5}$ و 7 بر ثانیه

$$\sigma_{aa} < 0 \text{ then } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ failed} \\ < 0 \text{ elastic} \end{cases} \quad (2)$$

X_c استحکام فشاری ماده در جهت الیاف است. خرابی زمینه در بارگذاری کششی و فشار به ترتیب از رابطه ۳ و ۴ حاصل می‌شود.

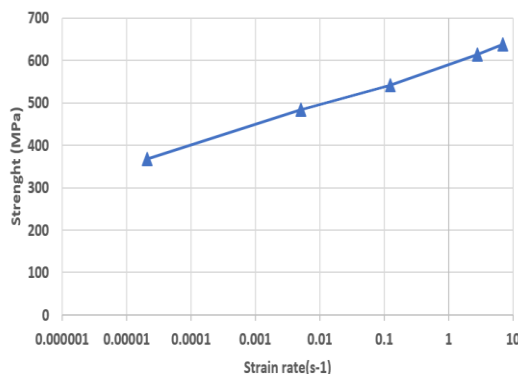
$$\sigma_{bb} > 0 \text{ then } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ failed} \\ < 0 \text{ elastic} \end{cases} \quad (3)$$

σ_{bb} و Y_t به ترتیب تنش وارد شده و استحکام کششی ماده در جهت عمود بر الیاف است.

$$\sigma_{bb} < 0 \text{ then } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ failed} \\ < 0 \text{ elastic} \end{cases} \quad (4)$$

Y_c استحکام فشاری ماده در جهت عمود بر الیاف است. مدل ماده MAT_54 برای مدل‌سازی مواد کامپوزیت استفاده می‌شود. این مدل رفتار کامپوزیت‌های ارتوتروپیک تا زمان رسیدن به مود شکست الیاف و کاهش مقاومت فشاری کامپوزیت هنگام تخریب زمینه را پیش بینی می‌کند. پیش بینی رفتار ماده در هنگام تخریب نیازمند اضافه کردن پارامترهای خاصی در نرم افزار LS-DYNA است [۲۶]. مدل MAT_54 محاسبه خرابی را با دو معیار چانگ-چانگ و سای-وو^۳ انجام می‌دهد. معیار سای-وو در مکانیزم شکست الیاف مشابه معیار چانگ-چانگ است، اما در معیار شکست زمینه از رابطه ۵ پیروی می‌کند.

$$e_{md}^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}^2}{Y_t Y_c} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_c} \right)^2 + \frac{(Y_c - Y_t) \sigma_{bb}}{Y_t Y_c} - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ failed} \\ < 0 \text{ elastic} \end{cases} \quad (5)$$



شکل ۶- استحکام نهایی پلی آمید ۶/شیشه بر حسب نرخ کرنش

۴- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی ورق و شرایط مرزی در شبیه‌سازی کاملاً مشابه شرایط آزمایش تجربی است. مدل‌سازی دینامیکی این شبیه‌سازی در نرم‌افزار LS-DYNA انجام شده و ترکیبی از دو المان پوسته^۱ و جامد^۲ است که به ترتیب برای پوسته و نفوذکننده به کار گرفته شده است. مدل‌سازی نفوذ بر اساس روش خرابی چانگ-چانگ تعریف شده است [۲۵]. این مود خرابی ترکیبی از ۴ مکانیزم خرابی درون صفحه‌ای است که شامل مکانیزم خرابی تحت کشش یا فشاری برای زمینه و الیاف است. روابط مکانیزم‌های خرابی گفته شده از معادلات زیر پیروی می‌کند.

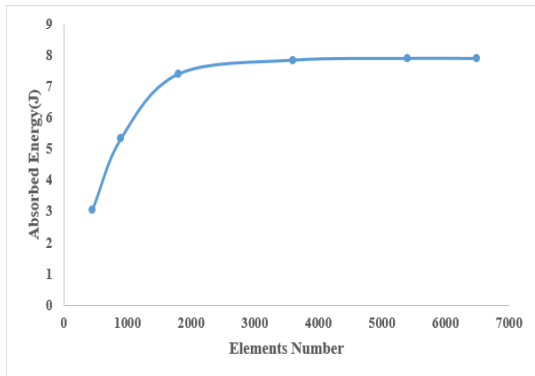
خرابی الیاف در بارگذاری کششی و فشاری به ترتیب از رابطه ۱ و ۲ حاصل می‌شود.

$$\sigma_{aa} > 0 \text{ then } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t} \right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{ab}}{S_c} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 \text{ failed} \\ < 0 \text{ elastic} \end{cases} \quad (1)$$

در این معادله σ_{aa} و τ_{ab} به ترتیب تنش کششی (فشاری) و تنش برشی وارد شده در جهت الیاف به ماده است؛ همچنین مقادیر X_t و S_c به ترتیب استحکام کششی و برشی ماده در جهت الیاف است. به ازای $\beta = 1$ معیار خرابی هشین در شکست الیاف تحت کشش و به ازای $\beta = 0$ معیار خرابی ماکسیم تنش به دست می‌آید.

³ Tsi-Wu

¹ Shell
² Solid



شکل ۸- نمودار استقلال از اندازه مش

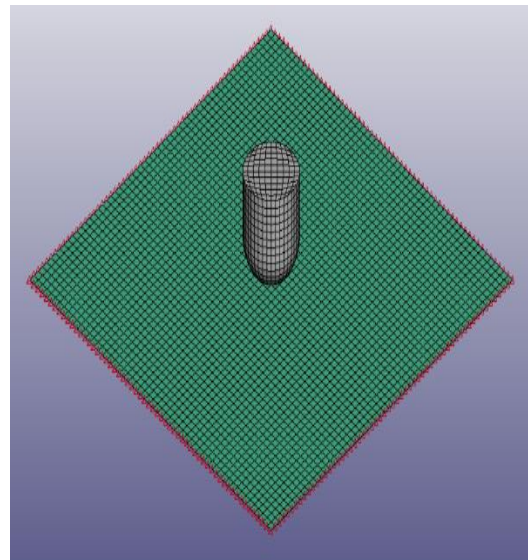
۵- آزمایش تجربی

آزمایش سقوط وزنه و نفوذ شبه استاتیک در آزمایشگاه ضربه واقع در دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. در آزمایش نفوذ شبه استاتیک، نفوذ کننده با سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه به داخل پوسته نفوذ کرده و آن را به طور کامل سوراخ می کند. ورق کامپوزیتی توسط یک قید و بند فولادی همانند شکل ۹ به طور کامل مقید شده است. این قید و بند، نمونه آزمایش را به سطح پایین فشار داده و شرایط تکیه گاه گیردار را به وجود می آورد. سطح آزادی که در معرض نفوذ کننده قرار دارد یک مربع به ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتی متر مربع بوده که نفوذ کننده به مرکز مربع نفوذ می کند.



شکل ۹- نفوذ کننده نیمه کروی به قطر ۲۰ میلی متر و قید و بند نگه دارنده کامپوزیت

نفوذ کننده در این پژوهش به صورت یک میله با انتهای نیم کروی به قطر ۲۰ میلی متر شبیه سازی شده است. چگالی ماده به صورتی تعیین شده که وزن نفوذ کننده معادل وزن واقعی پرتابه در آزمایش تجربی شود. مدل سازی نفوذ کننده با مدل ماده MAT_20 انجام شده که مخصوص مواد صلب است. ابعاد مش بندی پوسته ۲ و نفوذ کننده ۱/۵ میلی متر است که مطابق شکل ۷ بصورت یکنواخت شبکه بندی شده اند. به منظور اطمینان از صحت مدل سازی، آزمون استقلال از مش از مش، ابعاد المان ها ریزتر می شود تا نتیجه جذب انرژی به عدد خاصی همگرا شود. پس از حصول همگرایی در نتایج، تعداد المان مناسب برای مدل سازی تعیین می شود. این تعداد نباید آنقدر زیاد باشد که بار محاسباتی اضافی به سیستم وارد کند و نه آنقدر کم باشد که خطای آن بر دقت نتایج تاثیر بگذارد. بر این اساس و با استفاده از شکل ۸، تعداد ۳۴۵۰ المان برای پوسته انتخاب شد. گره هایی که با رنگ قرمز در شکل ۷ مشخص شده اند، شرایط مرزی گیردار بوده و در تمامی جهات مقید هستند. نفوذ کننده فقط در جهت حرکت به سمت پوسته آزاد است و باقی درجات آزادی آن مقید شده است.



شکل ۷- نمونه مدل سازی شده به همراه گره های مقید به تکیه گاه گیردار



شکل ۱۱- انجام آزمون سقوط وزنه بر روی ورق کامپوزیتی

آزمایش نفوذ شبه استاتیک به مدت ۲ دقیقه طول می کشد و در نهایت مطابق شکل ۱۰، نفوذ کننده به طور کامل از قطعه رد می شود. شرایط انجام آزمایش باید به صورتی باشد که در حین انجام آن، ورق از زیر گیره های قید و بند حرکت نکند.



شکل ۱۰- انجام آزمون نفوذ شبه استاتیک و نفوذ به ورق کامپوزیتی

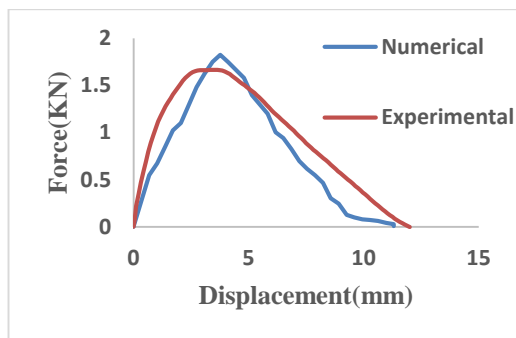
۶- نتایج آزمایش

دقت نتایج شبیه سازی عددی از مقایسه نتایج آزمایش های تجربی با شبیه سازی عددی مشخص می شود. این مقایسه در دو آزمایش نفوذ شبه استاتیک و سقوط وزنه انجام شده است. در ادامه پارامترهای دیگر مؤثر بر جذب انرژی کامپوزیت بررسی شدند. نمودار نیرو-جابجایی استخراج شده از شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی نفوذ شبه استاتیک در شکل ۱۲ با همدیگر مقایسه شدند. بیشینه نیروی وارد شده به پوسته کامپوزیتی در شبیه سازی عددی و تجربی به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۳۵ کیلونیوتون است که نسبت به یکدیگر حدود ۴ درصد اختلاف دارند. مقدار جذب انرژی شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی به ترتیب ۷/۹ و ۹/۵ ژول بوده، در نتیجه شبیه سازی عددی ۱۶/۸ درصد در مقایسه با آزمایش تجربی خطا دارد. نفوذ کننده پس از جابجایی ۶/۲ میلی متری به حداکثر نیروی قابل تحمل پوسته کامپوزیتی می رسد و در جابجایی ۱۰ میلی متر به طور کامل از ورق رد می شود.

آزمون سقوط وزنه از ارتفاع ۸۰ سانتی متری با وزنه ۷ کیلوگرمی و نفوذ کننده سر کروی با قطر ۲۰ میلی متر بر روی نمونه مطابق شکل ۱۱ انجام شده است. شتاب وزنه در هنگام برخورد توسط حسگر پیزوالکتریک ثبت شده و اطلاعات به کامپیوتر منتقل می شود. اطلاعات خام ثبت شده پس از نویز گیری و اعمال فیلتر، قابل مقایسه با داده های شبیه سازی عددی می شود.

بیشینه نیروی ثبت شده در شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی به ترتیب ۱/۸۲ و ۱/۶۶ کیلونیوتون و مقدار خطای نتایج عددی نسبت به تجربی ۹/۶ درصد است. با محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی در شکل ۱۴ مقدار جذب انرژی نمونه تحت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی به ترتیب ۱۱/۴ و ۹/۶ ژول به دست می‌آید.

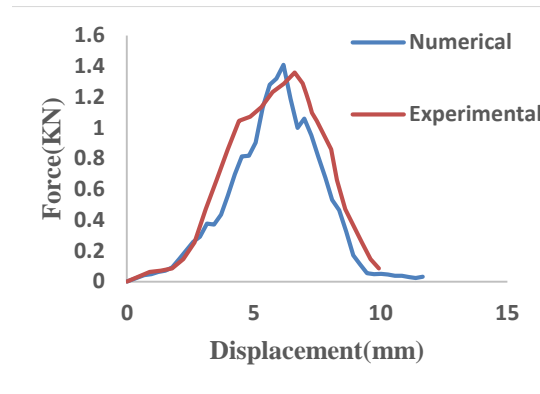
مقایسه رفتار نمودار آزمایش سقوط وزنه (شکل ۱۴) و نفوذ شبه استاتیک (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که در آزمایش سقوط وزنه، در همان ابتدا شیب رشد نیرو نسبت به جابجایی، حداکثر بوده، ولی در آزمایش نفوذ شبه استاتیک، شیب گفته شده در ابتدای آزمایش در حالت حداقلی است؛ بنابراین به دلیل افزایش نرخ بارگذاری، پوسته از همان ابتدا رفتار سفت‌تری از خود نشان داده است.



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش سقوط وزنه با روش شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی

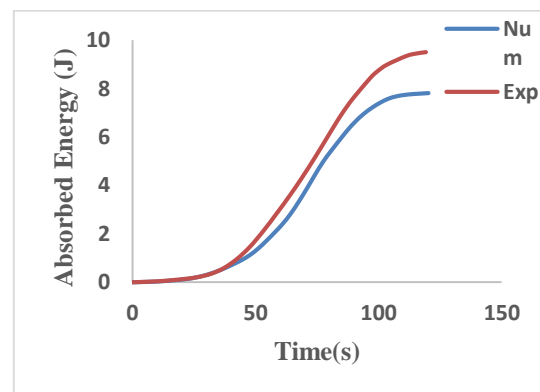
آزمایش سقوط وزنه در مدت ۱۰ میلی ثانیه به طول انجامیده است. مقایسه انرژی جذب شده در واحد زمان با دو روش عددی و تجربی در شکل ۱۵ گزارش شده است. نتایج عددی و تجربی تا ۶ میلی ثانیه اول از قرابت خوبی برخوردار است، اما از این زمان تا انتهای زمان آزمایش، این دو نمودار از همدیگر جدا شده‌اند. دلیل این جدا شدگی می‌تواند به نحوه تعریف خرابی در نرم افزار مربوط باشد؛ زیرا در ۶ ثانیه اول تقریباً ۸۰ درصد انرژی جذب شده است و ۲۰ درصد انتهایی بیشتر مربوط به رفتار خرابی و رشد آسیب است.

برخلاف نمودار انرژی جذب شده در واحد زمان آزمون نفوذ شبه استاتیک که انرژی زیادی در ۴۰ درصد ابتدایی آزمایش جذب نشده بود، در نمودار مشابه در آزمون سقوط وزنه از ابتدا



شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش نفوذ شبه استاتیک با روش شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی

میزان انرژی جذب شده در طول زمان آزمون نفوذ شبه استاتیک در شکل ۱۳ گزارش شده است. انرژی جذب شده در این آزمایش از دو روش تجربی و عددی محاسبه شده و نتایج هر دو روش، رفتار مشابهی را گزارش کرده است. آزمایش به مدت ۱۲۰ ثانیه طول کشیده است و در ۵۰ ثانیه ابتدایی آزمایش، میزان جذب انرژی کمتر از ۱ ژول بوده است. در نتیجه عمده جذب انرژی در بازه زمانی بین ۵۰ تا ۱۰۰ ثانیه جذب شده است.

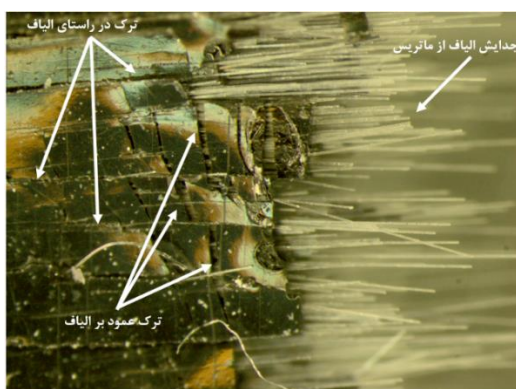


شکل ۱۳- میزان انرژی جذب شده توسط پوسته توسط آزمون نفوذ شبه استاتیک در طول زمان

شتاب ثبت شده توسط حسگر در اثر سقوط وزنه ۷ کیلوگرمی از ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر پس از تبدیل به نیرو در شکل ۱۴ با داده‌های عددی مقایسه شده است. سرعت برخورد پرتابه با نمونه آزمایش ۳/۹۵ متر بر ثانیه بوده و در این نتایج اثر نرخ کرنش نسبت به آزمون شبه استاتیک مشهود است.

مودهای خرابی که در اثر نفوذ پرتابه در آزمون سقوط وزنه بر رویه کامپوزیتی رخ داده عبارت است از: ۱- جدایش الیاف از زمینه ۲- ترک در راستای الیاف ۳- ترک عمود بر الیاف. مودهای خرابی اشاره شده در شکل ۱۷ قابل مشاهده است. جدایش الیاف از زمینه ناشی از شکست برشی در محل اتصال آن دو بوده که ناشی از چسبندگی غیر ایده آل بین زمینه و الیاف است.

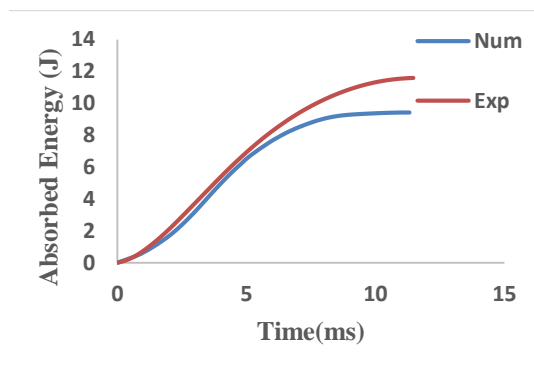
ترک در راستای الیاف ناشی از شکست برشی زمینه بوده زیرا در هر لایه، الیاف فقط در یک جهت تعبیه شده‌اند. قبل از رخ دادن ترک‌های عمود بر الیاف، ابتدا باید جدایش الیاف از زمینه در اثر کشش رخ دهد؛ سپس بر اثر شوک ناشی از بارگذاری، ترک‌های در راستای عمود بر الیاف، بر روی زمینه پدیدار می‌شوند.



شکل ۱۷- مودهای خرابی ایجاد شده در پوسته کامپوزیتی در اثر نفوذ پرتابه در آزمون سقوط وزنه

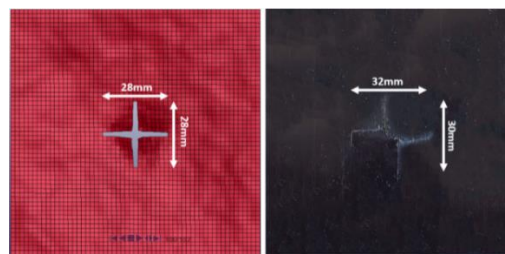
نمودارهای شکل ۱۸ و ۱۹ اثر ضخامت پوسته کامپوزیتی در میزان جذب انرژی و بیشینه نیروی وارد شده به آن را نمایش می‌دهد. در این دو نمودار، ضخامت‌های ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴ و ۳ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. میزان جذب انرژی و نیروی بیشینه تا ضخامت ۲/۴ میلی‌متر به صورت خطی رشد کرده است و پس از آن شیب نمودار تغییر کرده است. بر اساس شکل ۱۹ که جذب انرژی بر واحد وزن است، در ضخامت زیر ۲/۴ میلی‌متر، میزان انرژی جذب شده در واحد وزن با ضخامت پوسته تغییر نمی‌کند؛ اما در ضخامت‌های بیشتر به دلیل افزایش اثر تنش برشی در جذب انرژی نمونه،

جذب انرژی بالایی انجام شده به طوری که در زمان مشابه ۴۰ درصد ابتدایی آزمایش، حدود ۵۰ درصد انرژی سازه جذب شده است.



شکل ۱۵- مقدار انرژی جذب شده پوسته کامپوزیتی تحت بارگذاری سقوط وزنه در طول زمان

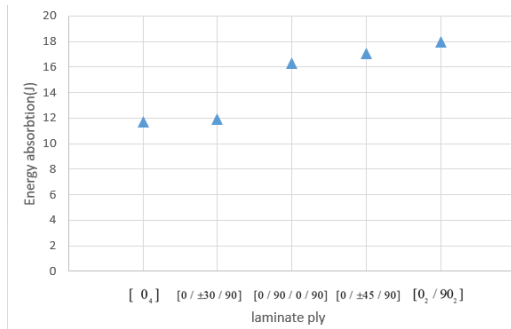
مدل نفوذ بر روی پوسته کامپوزیتی در آزمون سقوط وزنه و نفوذ شبه استاتیک از نوع پتالینگ^۱ صلیبی است. مقایسه نحوه و شکل خرابی پوسته برای نتایج تجربی و عددی در شکل ۱۶ گزارش شده است. به دلیل تقارن لایه چینی و نبود عیوب ساختاری در ماده، طول ترک در شبیه‌سازی عددی در دو جهت افقی و عمودی با هم برابر و ۲۸ میلی‌متر شده است؛ اما در نتایج تجربی مقدار شکافته شدن در طول و عرض با هم متفاوت و به ترتیب برابر ۳۲ و ۳۰ میلی‌متر بوده است. با توجه به نمودار نیرو-جابجایی آزمون سقوط وزنه، مقدار جذب انرژی در نتایج تجربی از عددی بیشتر است. یکی از دلایل این افزایش می‌تواند بزرگتر بودن ابعاد آسیب در نتایج تجربی نسبت به عددی باشد.



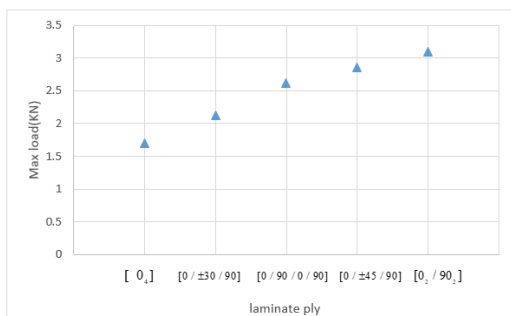
شکل ۱۶- مقایسه ابعاد و شکل خرابی ورق کامپوزیتی در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

^۱ Petaling

به لایه چینی [۰/۴] نیروی بیشتری برای نفوذ نیاز دارند، اما جذب انرژی این دولایه چینی نسبت به یکدیگر تفاوت زیادی ندارد.



شکل ۲۰- مقدار انرژی جذب شده ورق کامپوزیت با لایه چینی متفاوت

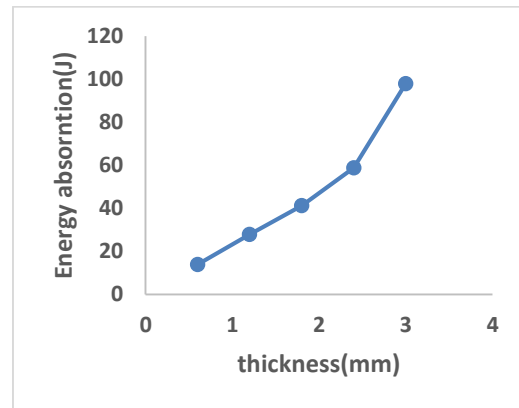


شکل ۲۱- مقدار نیروی بیشینه قابل تحمل ورق کامپوزیت با لایه چینی متفاوت

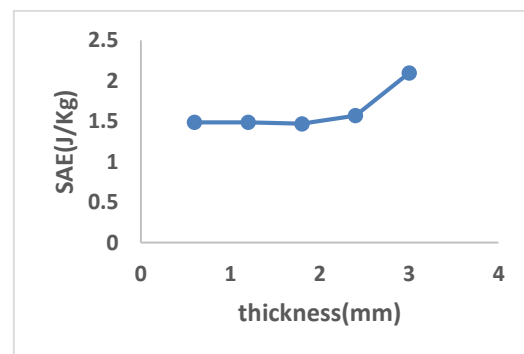
۷- نتیجه گیری

مقاله پیش رو مقدار جذب انرژی ورق کامپوزیت گرمانرم (PA6/GF) تحت آزمون نفوذ شبه استاتیک و سقوط وزنه را به روش تجربی و عددی بررسی کرده است. شبیه سازی عددی با نرم افزار LS-DYNA انجام شده است. خواص مکانیکی زمینه پلی آمید به نرخ کرنش حساس بوده، به طوری که افزایش استحکام ماده در نرخ کرنش $s^{-1} \times 10^{-5}$ نسبت به نرخ کرنش $s^{-1} \times 10^{-1}$ مقدار ۴۷ درصد رشد داشته است. از طرفی جذب انرژی ورق کامپوزیت در دو آزمایش سقوط وزنه ۲۰ درصد بیشتر از آزمون نفوذ شبه استاتیک بوده که اثرات نرخ کرنش بر روی جذب انرژی را نشان می دهد. در اثر بارگذاری ضربه ای بر روی ورق کامپوزیت، علاوه بر شکست

این نسبت به هم خورده و شیب نمودار جذب انرژی تغییر کرده است.



شکل ۱۸- مقدار جذب انرژی ورق کامپوزیتی بر حسب ضخامت



شکل ۱۹- نمودار جذب انرژی مخصوص بر حسب ضخامت در ورق کامپوزیتی PA6/GF

پس از صحت سنجی مدل سازی عددی، بررسی تأثیر لایه گذاری در کامپوزیت های ۴ لایه مطابق شکل ۲۰ و ۲۱ انجام شد. در ۴ مورد از لایه چینی، لایه اول و آخر به ترتیب ۰ و ۹۰ درجه هستند و لایه میانی آن ها تغییر می کند. در یک مورد نیز مدل سازی کامپوزیت تک جهته انجام شده تا تأثیر آن نسبت به بقیه لایه چینی ها بررسی شود.

جذب انرژی لایه [۰/۲/۹۰/۴] نسبت به باقی لایه چینی ها بیشتر است، اما این اختلاف نسبت به دولایه چینی [۰/۹۰/۰/۹۰] و [۰/±۴۵/۹۰] کمتر از ۵ درصد است؛ از طرفی بیشترین نیروی لازم برای نفوذ به پوسته کامپوزیت در لایه چینی [۰/۲/۹۰/۴] رخ می دهد. لایه چینی [۰/±۳۰/۹۰] نسبت

- experimentation." Proc Inst Mech Eng H 235, no. 12: 1439-1452.
- [7] T. Bárány, A. Izer, and J. Karger-Kocsis (2009) "Impact resistance of all-polypropylene composites composed of alpha and beta modifications," Polym Test, vol. 28, no. 2, pp. 176-182.
- [8] A. Massa, A. Rusinek, M. Klosak, S. Bahi, and A. Arias (2019) "Strain rate effect on the mechanical behavior of polyamide composites under compression loading," Compos Struct, vol. 214, pp. 114-122.
- [9] Shanazari, H., G. H. Liaghat, H. Hadavinia, and A. Aboutorabi. (2017) "Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels." J Thermoplast Compos Mater, no. 4 : 545-563.
- [10] A. K. Bandaru, H. Chouhan, and N. Bhatnagar, (2020) "High strain rate compression testing of intra-ply and inter-ply hybrid thermoplastic composites reinforced with Kevlar/basalt fibers," Polym Test, vol. 84, p. 106407.
- [11] S. Wang, L. Wen, J. Xiao, M. Lei, and J. Liang, (2020) "Influence of strain rate and temperature on mechanical properties of carbon woven-ply PPS thermoplastic laminates under dynamic compression," Polym Test, vol. 89, p. 106725.
- [12] F. Henning, H. Ernst, and R. Brüssel (2005) "LFTs for automotive applications," Reinf. Plast, vol. 49, no. 2, pp. 24-33.
- [13] H. Ning, S. Pillay, K. B. Thattai parthasarathy, and U. K. Vaidya (2017) "Design and manufacturing of long fiber thermoplastic composite helmet insert," Compos. Struct, vol. 168, pp. 792-797.
- [14] K. B. Thattai parthasarathy, S. Pillay, H. Ning, and U. Vaidya (2008) "Process simulation, design and manufacturing of a long fiber thermoplastic composite for mass transit application," Compos. Part A Appl, vol. 39, no. 9, pp. 1512-1521.
- [15] J. O. Hallquist (2006) "LS-DYNA theory manual," LSTC, vol. 3, pp. 25-3.
- [16] S. Magistrali and M. Perillo (2006) "Calibration and experimental validation of ls-dyna composite material models by multi objective optimization techniques," in Proceedings of the 9th International LS-DYNA Conference, Dearborn (MI), USA .
- [17] B. Yang, Z. Wang, L. Zhou, J. Zhang, and W. Liang (2015) "Experimental and numerical investigation of interply hybrid composites based on woven fabrics and PCBT resin subjected to low-velocity impact," Compos. Struct, vol. 132, pp. 464-476.
- الیاف، جدایش الیاف از زمینه، ترک در راستا و عمود بر راستای الیاف مشاهده شد. از آنجایی که جدایش الیاف از زمینه به چسبندگی الیاف و زمینه مربوط است، می‌توان با بهبود چسبندگی الیاف و زمینه، خواص جذب انرژی این نوع کامپوزیت را افزایش داد. با اضافه کردن اثرات نرخ کرنش در شبیه سازی عددی خطای نیروی لازم برای نفوذ در آزمایش نفوذ شبه استاتیک و سقوط وزنه به ترتیب ۴ و ۹/۶ درصد بوده است. شبیه سازی عددی برای ورق‌هایی با ضخامت کمتر ۲/۴ میلی‌متر دقت قابل قبولی دارد، ولی در ضخامت‌های بیشتر به دلیل چشمگیر بودن اثرات تنش برشی، دقت شبیه سازی افت می‌کند. بیشترین جذب انرژی و بیشینه نیروی لازم برای نفوذ در لایه چینی [۰.۲/۹۰.۲] رخ داده است. با ارائه شبیه سازی عددی پیشنهاد شده در این مقاله پیش بینی رفتار ورق‌های کامپوزیتی (PA/GF) بسیار ساده‌تر شده که باعث افزایش بازده تولید و طراحی قطعات صنعتی می‌شود.

مراجع

- [1] A. K. Sambale, M. Schöneich, and M. Stommel, (2017) "Influence of the processing parameters on the fiber-matrix-interphase in short glass fiber-reinforced thermoplastics," Polym, vol. 9, no. 6, p. 221.
- [2] M. Karamooz, H. Rahmani, and H. Khosravi (2020) "An experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of polymer matrix Kevlar-Basalt hybrid composites," Iranian Journal of Manufacturing Engineering, vol. 7, no. 6, pp. 44-55.
- [3] X. Xu, Z. Zhou, Y. Hei, B. Zhang, J. Bao, and X. Chen (2014) "Improving compression-after-impact performance of carbon-fiber composites by CNTs/thermoplastic hybrid film interlayer," Compos Sci Tech, vol. 95, pp. 75-81.
- [4] W. J. Cantwell and J. Morton (1991) "The impact resistance of composite materials—a review," Compos, vol. 22, no. 5, pp. 347-362.
- [5] N. Naik and S. Meduri (2001) "Polymer-matrix composites subjected to low-velocity impact: effect of laminate configuration," Compos Sci Tech, vol. 61, no. 10, pp. 1429-1436.
- [6] Kabiri, Ali, Gholamhossein Liaghat, Fatemeh Alavi, Mehdi Ansari, and Seyyed Kaveh Hedayati (2021) "A comparative study of 3D printing and heat-compressing methods for manufacturing the thermoplastic composite bone fixation plate: Design, characterization, and in vitro biomechanical

- defects under impact and compression after impact." *Polym. Compos*, no. 1: 413-431.
- [23] Liu, Ankang, Yunlong Chen, Jiqiang Hu, Bing Wang, and Li Ma. (2022) "Low- velocity impact damage and compression after impact behavior of CF/PEEK thermoplastic composite laminates." *Polym. Compos*, no. 11: 8136-8151.
- [24] J. Wong, "Processing of high performance thermoplastic composites (2017) " ETH Zürich, Laboratory of Composite Materials and Adaptronic Structures,.
- [25] F.-K. Chang and K.-Y. Chang (1987)" Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure," *J. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 9, pp. 809-833.
- [26] P. Feraboli, B. Wade, F. Deleo, M. Rassaian, M. Higgins, and A. Byar, (2011) "LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen," *Compos. Part A Appl*, vol. 42, no. 11, pp. 1809-1825.
- [18] V. Tita, J. De Carvalho, and D. Vandepitte (2008) "Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches," *Compos. Struct*, vol. 83, no. 4, pp. 413-428.
- [19] H. Hsiao, I. Daniel, and R. Cordes (1999) "Strain rate effects on the transverse compressive and shear behavior of unidirectional composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 33, no. 17, pp. 1620-1642.
- [20] Y. Duan, A. Saigal, R. Greif, and M. Zimmerman, (2001) "A uniform phenomenological constitutive model for glassy and semicrystalline polymers," *Polym Eng Sci*, vol. 41, no. 8, pp. 1322-1328.
- [21] Z. Pan, R. Ma, D. Wang, and A. Chen (2018) "A review of lattice type model in fracture mechanics: theory, applications, and perspectives," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 190, pp. 382-409.
- [22] Han, Xuecheng, Hongneng Cai, Jie Sun, Zhiyuan Wei, Yaping Huang, Lingqi Meng, and Ang Wang. (2023) "Numerical investigation on behaviors of composite laminates with initial delamination