



بررسی تجربی تاثیر عوامل و پارامترهای موثر پانچ بر خواص نفوذ شبه استاتیکی برش پانچ در چند لایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی

محمد صادقی^۱، محمد حسین پل^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تفرش، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، tafreshu.ac.ir، m_h_pol@

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۸/۱

پذیرش: ۹۴/۹/۲

کلیدواژگان:

کامپوزیت چند لایه‌ای

برش پانچ

نرخ کرنش

نسبت دهانه‌ها و هندسه نفوذکننده

چکیده

در این مقاله تاثیر نسبت قطر موثر نمونه بر قطر پانچ و سرعت بارگذاری و شکل هندسه نفوذکننده در رفتار خواص شبه استاتیکی برش پانچ (QS-PS) در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای به‌طور تجربی بررسی می‌شود. مواد کامپوزیتی از ۱۲ لایه الیاف شیشه با بافت دو بعدی با چگالی سطحی 200 g/m^2 به‌روش لایه‌چینی دستی ساخته شده است. سیستم رزین نیز از یک اپوکسی، دی‌کلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به‌عنوان پایه و از سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵ به‌عنوان سفت‌کننده ساخته شده است. در این پژوهش از دو نسبت دهانه ۵ و ۱۰ و از سه نرخ کرنش 5 mm/min ، 250 و 500 و همچنین از سه نفوذکننده تخت، مخروطی و اجیوال استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی نسبت دهانه‌ها نشان می‌دهد که با کاهش نصف اندازه‌ی نسبت دهانه، تغییر شکل صفحه هدف کمتر شده و نیروی تماسی تقریباً ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. نتایج برش پانچ در نرخ کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سرعت بارگذاری، استحکام کامپوزیت در برابر نفوذکننده افزایش می‌یابد. در مقایسه نتایج نفوذکننده‌ها با دماغه‌های مختلف حاکی از آن است که بیشترین نیروی تماسی مربوط به نفوذکننده سرتخت و بیشترین انرژی جذب شده توسط نفوذکننده مخروطی می‌باشد.

Experimental investigation of the effect effective of factors and parameters on the punch on the properties of quasi-static punching shear the glass/epoxy composite

Mohammad Sadeghi¹, Mohammad Hosein Pol^{2*}

Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

*P.O.B. 14115-143, Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

Keywords

Laminate composite
Punch shear
Strain rate
Spans rate and indenter geometry

Abstract

In this paper, the effective diameter of the punch and the speed of loading and geometry penetrating properties of quasi-static punching (QS-PS) laminate composites has been studied experimentally. The composites have 12 layers of 2D woven glass fiber with area density of 200 g/m^2 , is manufactured by Hand lay-up method. Epoxy resin systems is made of a diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), Epon 828, as the epoxy prepolymer and Epikure F-205 as the curing agent. In this study, of two ratio of span 5 and 10 and three strain rate 5, 250 and 500 mm / min as well as three indenters with flat, conical and ogival used. The results of investigation ratio of span show that with decrease half size in the ratio of span, deform the target page lower and contact force 20% increases. Results punching shear at different strain rates shows that with increasing strain rate, composite strength increases. In comparing the results of indenter with different geometries indicate that the flat indenter has higher contact force and maximum of the absorbed energy is by the cone indenter.

۱- مقدمه

کارهای حفاظتی استفاده می‌شود. رفتار کامپوزیت‌ها هنگامی که تحت ضربه قرار می‌گیرند به علت سرعت بالای بارگذاری و رخ دادن پدیده‌های مختلف شکست از جمله گسیختگی الیاف‌ها، جدایش لایه‌ها، شکست الیاف‌ها و موارد

کامپوزیت‌ها امروزه جایگاه خاصی در صنعت پیدا کرده‌اند. فلزات به عنوان مواد سنتی به دلیل داشتن استحکام و سفتی پایین نسبت به وزن، کمتر در

Please cite this article using:

Sadeghi, M. and Pol, M. H., "Experimental investigation of the effect effective of factors and parameters on the punch on the properties of quasi-static punching shear the glass/epoxy composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 13-22, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

کرنش با افزایش دما کاهش می‌یابد و این نشان‌گر افزایش انعطاف‌پذیری و چکش‌خوار بودن نمونه‌ها با افزایش دماست و با افزایش چکش‌خواری حجم و شدت شکست کاهش می‌یابد. آنان یافتند که با افزایش نرخ کرنش، استحکام تنش برشی دینامیکی در همه دماها افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین در یک مطالعه دیگر [۴] برای الیاف‌های بافته شده سانتی آزمایش‌های مشابهی انجام دادند و نتایج مشابهی بدست آوردند.

مانزیلا و همکاران [۵] با استفاده از برش پنج سر تخت، تاثیر ابعاد پنج و نمونه را در کامپوزیت‌هایی که با الیاف شیشه S-2 بافته شده و رزین SC-15، با فرایند انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یافتند که کامپوزیت‌ها در یک زاویه مشخصی می‌شکنند که مستقل از ابعاد پنج و نمونه و یا جهت انجام کار است و همچنین تنش اعمال شده در رفتار شکست در یک زاویه مشخصی مشاهده شده که مستقل از ابعاد پنج و نمونه است.

بی‌ای و همکاران [۶] شکست دینامیکی کامپوزیت‌ها را در نرخ کرنش‌های بالا بررسی کردند. در این پژوهش از نانو ذرات کربنی چند دیواره‌ای اصلاح شده و نانو ذرات اصلاح نشده با درصد وزنی ۱ و بدون نانو ذرات استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که استحکام کششی، مقاومت لایه‌لایه شدن و چقرمگی شکست با افزایش نرخ کرنش در همه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. اما در بارگذاری نرخ کرنش بالا عملکرد نانوذرات اصلاح نشده نسبت به نانوذرات اصلاح شده بهتر می‌باشد. همچنین آنان به این نتیجه رسیدند در نانوکامپوزیت‌های اصلاح نشده، الیاف با استحکام بالا و مقاومت بین لایه‌ای کمتر (بدلیل CNTs) به یک شکست لغزشی بالا و استحکام کششی بیشتر، در نرخ کرنش‌های بالاتر نسبت به بارگذاری شبه استاتیکی، منجر می‌شود

هاردینگ و دونگ [۷] تاثیر نرخ بارگذاری بر استحکام برش لایه میانی را مطالعه کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با استفاده از نمونه‌های دو لایه در سه نوع 0.090 ± 0.045 تحت برش استاتیکی و ضربه انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که خواص گفته شده افزایش کمی با نرخ کرنش دارد.

جردن و همکاران [۸] با آزمایش‌های شبه استاتیکی، ضربه‌ی سرعت پایین و بارگذاری بالستیک، خواص مواد و پاسخ دینامیکی شیشه E/فنولیک را بررسی کردند. آن‌ها برای پیدا کردن چگالی، ضریب پواسن، استحکام کششی، فشاری، برشی و مدول برشی و الاستیک مواد، از استاندارد ASTM استفاده کردند. در این مطالعه با توجه به آزمایش‌های شبه استاتیکی، ضربه‌ی سرعت پایین و بالستیک به ترتیب استحکام شکست و برشی، نمودار نیرو- زمان و حد بالستیک را بدست آوردند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در تعیین پارامترهای نرم افزار ال‌اس‌دینا، طراحی سازه‌ها و اعتبار سنجی عددی استفاده گردد.

یاهایا و همکاران [۹] خواص نفوذ شبه استاتیکی و بالستیک را برای کامپوزیت‌هایی که از سه لایه با چیدمان‌های متفاوت از کنف و کولار/اپوکسی ساخته شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که کامپوزیت‌های کنف و کولار/اپوکسی انرژی نفوذ بیشتری در مقایسه کولار/اپوکسی و کنف/اپوکسی دارند و جذب انرژی ویژه کولار/اپوکسی نسبت به کنف و کولار/اپوکسی و کنف/اپوکسی بالاتر است. در این پژوهش کامپوزیت‌های هیبریدی یک تاثیر مثبت در تغییر بار ماکزیمم و انرژی، نسبت به کولار/اپوکسی تولید می‌کنند.

قاجار و رصاف [۱۰] اثر شکل ضربه زننده و دما را در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی در ضربه‌ی سرعت‌های کم بررسی کردند. آنان از چهار نوع

مشابه به‌طور هم‌زمان، بسیار پیچیده می‌شود. آگاهی یافتن از مکانیزم‌های نفوذ در سرعت‌های بالا بسیار سخت بوده و بارگذاری نفوذ شبه استاتیکی^۱ دلیل سرعت کم و کنترل آسان، برای این کار مناسب است و به راحتی می‌تواند آسیب‌های ناشی از نفوذ را شناسایی کند. مطالعات و تحقیقات فراوانی در این مورد انجام شده است. نتایج حاکی از آن است که داده‌های حاصل از آزمایش نفوذ شبه استاتیکی با شرایط مرزی مختلف می‌تواند رفتار مواد را در ضربات سرعت بالا پیش بینی کند و مکانیزم‌های آسیب نفوذ شبه استاتیکی مشابه ضربه سرعت بالاست. [۲،۱]

مواد کامپوزیتی به دلیل داشتن خواص خوب و مطلوب از جمله استحکام به وزن بالا و سفتی به وزن بالا باعث شده است که کاربرد آن‌ها در صنایع روز به روز افزایش یابد. مطالعه رفتار مواد و تحلیل خرابی ناشی از نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد که شکست‌ها و آسیب‌ها به عوامل و پارامترهای متعددی بستگی دارند. شکل هندسه نفوذ کننده‌ها که میزان و نوع تماس بین هدف و نفوذ کننده را مشخص می‌کند، بسیار مهم است. همچنین پاسخ و واکنش کامپوزیت‌ها در برابر نفوذکننده‌ها تابع نرخ کرنش است. نرخ بارگذاری متفاوت، استحکام، مدل و شدت شکست و میزان خرابی در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. با توجه به اینکه گسترش خرابی و تورق در کامپوزیت‌ها اهمیت خاصی دارد باید در دهانه‌های مختلف بررسی شود. انرژی جذب شده و مقدار خیز و تغییر شکل صفحه هدف در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف که نوع شکست را مشخص می‌کند، علاوه بر شکل هندسه نفوذکننده و نرخ کرنش به نسبت دهانه هم بستگی دارد.

گاما و گلیسپیه [۱] مکانیزم خرابی و نفوذ بالستیک را با شرایط مرزی مشابهی با آزمایش شبه استاتیکی مدل کردند. آنان در این تحقیق مکانیزم‌های خرابی، نفوذ و انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های ضخیم، را با آزمایش‌های بالستیک و شبه استاتیکی به طور جداگانه بررسی کردند و مشاهده کردند که مکانیزم‌های خرابی در آزمایش برخورد بالستیک می‌تواند با مکانیزم‌های خرابی در آزمایش‌های شبه استاتیکی با اعمال یک سری شرایط مرزی (دهانه‌های متفاوت) مطابقت داشته باشد. طبق این مطالعه مدل توسعه یافته‌ی شبه استاتیکی، جهت مدل کردن فازه‌های نفوذ بالستیک و انرژی جذب شده در مکانیزم خرابی بالستیک بدست آوردند.

ژیائو و همکاران [۲] با استفاده از بارگذاری شبه استاتیکی برش پنج، انتشار خرابی و پارگی را در کامپوزیت‌ها (شیشه S-2/اپوکسی) که به وسیله‌ی فرایند انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده است، بررسی کردند. آنان آزمایش‌های خود را در دو نسبت دهانه 2^2 و 8 انجام دادند. آن‌ها یافتند که با افزایش ضخامت کامپوزیت، نیروی تماسی افزایش یافته و شکست الیاف کامپوزیت زودتر رخ می‌دهد. و اغلب مکانیزم خرابی، پارگی و شکست الیاف‌ها، بدلیل برش و کشش است.

هاسور و همکاران [۳] ویژگی‌های برش پنج دینامیکی برای مواد کامپوزیتی گرافیت/اپوکسی با بافت دو بعدی و به صورت فرایند انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده است، در دمای اتاق و دماهای بالاتر بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌ها را با استفاده از دستگاه هاپکینسون تحت نرخ کرنش‌های مختلف در محدوده $1/s-36015$ قرار دادند و مطابق آن برای هر نرخ کرنش، تنش پیک بدست آوردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را در دمای محیط، $51/7$ ، $79/4$ و $107/2$ انجام دادند. طبق این پژوهش، شیب نمودار تنش-

1. quasi-static indentation
2. Span diameter to punch diameter ratio (SPR)
3. vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process

تحقیق نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج تجربی هم‌خوانی خوبی دارد. آن‌ها در یک مطالعه دیگر [۱۹،۱۸] تأثیر نانوذرات رس را بر رفتار بالستیکی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بررسی کردند. آنان برای تهیه نانو کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی که به روش انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده بودند، از نانو ذرات رسی با درصدهای وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ استفاده کردند. طبق این مطالعه در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک بیشترین افزایش جذب انرژی مربوط به افزودن ۵ درصد وزنی نانوذرات می‌باشد. همچنین حاصل کار نشان دهنده این است که درصد بهینه نانو ذرات وابسته به سرعت برخورد و حد بالستیک هدف است.

در تحقیق حاضر، تأثیر نسبت قطر موثر نمونه بر قطر پنج و سرعت بارگذاری و شکل هندسه نفوذکننده با آزمایش شبه استاتیکی برش پنج (QS-PST) در کامپوزیت‌های بافته شده‌ی دو بعدی شیشه/اپوکسی به طور تجربی بررسی می‌گردد. در این پژوهش از دو نسبت دهانه (SPR) با اندازه‌های ۵ و ۱۰ و همچنین از سه نرخ کرنش mm/min، ۲۵۰، ۵۰۰ و علاوه بر آن از سه نفوذکننده با دماغه‌های سر تخت به قطر ۱۰mm، مخروطی ۳۷ درجه و اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ استفاده گردید. هدف اصلی این پژوهش تأثیر پارامترهای اشاره شده در شرایط شبه استاتیکی می‌باشد. علاوه بر آن به طور تجربی خواص مکانیکی کامپوزیت و رزین با آزمایش کشش بدست آمد.

۲- روش تهیه و ساخت مواد

۲-۱- تهیه مواد اولیه

در این پژوهش، ماتریس از نوع رزین اپوکسی، دیکیلسیدیل اتر بیسفنول نوع آ^۲ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ تولید شده توسط شرکت شل به عنوان پایه اپوکسی که از خواص خوب این رزین به استحکام بالای مکانیکی و سازگاری بالا با الیاف‌ها می‌توان اشاره کرد، انتخاب شده است. سفت‌کننده‌های بسیاری برای ایپون ۸۲۸ پیشنهاد شده است که بسته به کاربرد کامپوزیت مناسب‌ترین آن انتخاب می‌شود. در اینجا از سفت‌کننده و از سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵^۴ برای این رزین استفاده شده است. نسبت مخلوط رزین به سفت‌کننده طبق پیشنهاد شرکت سازنده ۲ به ۱ است. برای تهیه ماده‌ی کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان بوده، استفاده شده است. این الیاف با چگالی سطحی 200 g/m^2 و چگالی حجمی 2400 kg/m^3 می‌باشد.

پس از آماده شدن مخلوط نانورزین، با توجه به نسبت مخلوط، سفت‌کننده را به آن اضافه کرده و به آرامی بهم زده می‌شود. ماتریس (رزین+سفت‌کننده) را در نهایت به مدت ۱۵ دقیقه در دمای آزمایشگاهی در آون خلاء قرار داده تا حباب‌زدایی شود.

۲-۲- ساخت نمونه‌های بدون الیاف

برای تعیین خواص مکانیکی رزین خالص از نمونه‌های بدون الیاف استفاده می‌شود. ماتریس آماده شده را در قالب‌های سیلیکونی ریخته و در آون به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرارداده تا پخته شوند و سپس از قالب بیرون آورده می‌شود.

۲-۳- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

ابتدا اندازه‌ی نمونه‌ها و تعداد آزمایش، با ۱۲ لایه‌گذاری تعیین می‌شود. مقدار الیاف مورد نیاز بریده و با توجه به آن مقدار رزین آماده می‌شود. به منظور

شکل ضربه زنده تخت، کروی، مخروطی، سهموی و دستگاه وزنه افتان برای این کار استفاده کردند. طبق این مطالعه هرچه سر ضربه زنده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. در این پژوهش به این نتیجه دست یافتند که ناحیه آسیب ضربه زنده مخروطی از همه بیشتر است و همچنین با افزایش دما بیشینه نیروی برخورد کاهش و جابجایی افزایش می‌یابد.

مایز و همکاران [۱۱] برش پنج شبه استاتیکی، ضربه بالستیکی و رفتار نفوذ را برای کامپوزیت‌های شیشه/ پلی استر با ضخامت‌های مختلف و با استفاده از پنج مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که همیشه انرژی نفوذ شبه استاتیکی از انرژی نفوذ بالستیکی کمتر است.

ارکندریکی و هاکیو [۱۲] رفتار مقاومت نفوذ شبه استاتیکی را بر روی کامپوزیت‌های شیشه SC-15 /S-2، شیشه HDPE/E و شیشه HDPE /S-2 با ضخامت‌های متفاوت بررسی کردند. در این مطالعه رفتار مقاومت نفوذ، با یک سری نمودارهای نیرو-جابجایی با دهانه‌های مختلف ارائه شد. همچنین نمونه‌های کامپوزیتی بعد از آزمایش جهت مطالعه‌ی مکانیزم‌های خرابی در جوهر الکل قرار گرفتند. آنان نتیجه گرفتند که رفتار نیرو-جابجایی و شروع خرابی در نمونه‌های شیشه HDPE/E و شیشه HDPE /S-2 با کامپوزیت‌های شیشه SC-15 /S-2 فرق می‌کند. همچنین آن‌ها یافتند که کامپوزیت‌های شیشه HDPE/E و شیشه HDPE /S-2 سفتی^۱ کمتر، نیروی اوج کمتر، تغییر شکل بیشتر، ناحیه خرابی کمتر و پراکندگی انرژی کمتری نسبت به نمونه‌های شیشه SC-15 /S-2 دارند. آنان در یک مطالعه دیگر [۱۳] به کامپوزیت‌های کولار/پلی اتیلن با ضخامت‌های گوناگون پرداختند و نتیجه گرفتند که کامپوزیت‌های کولار/ پلی اتیلن می‌تواند بدلیل تحمل خرابی و پخش‌کننده انرژی بیشتر در کارهای ضربه استفاده گردد.

مهربانی یگانه و همکاران [۱۴] تأثیر هندسه نفوذکننده بر فرایند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت‌های لایه‌های شیشه/اپوکسی با دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال^۲ مورد مطالعه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که نفوذکننده اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ به نیروی کمتری برای نفوذ کامل نیازمند است و در مقایسه انرژی جذب شده، نفوذکننده مخروطی ۳۷ درجه بیشترین انرژی را برای نفوذ کامل نیاز دارد. همچنین طول دماغه بیشتر، افزایش جابجایی تا نفوذ کامل را به همراه دارد.

نیمیس و همکاران [۱۵] تأثیر ضخامت کل لایه‌های کامپوزیت، ضخامت زیر لایه‌ها و زاویه نفوذ در انواع کامپوزیت‌های ایزوتروپیک تعیین کردند. آن‌ها عدم تأثیر پارامترهای کامپوزیت در پاسخ و اندازه‌گیری نمودار بار-جابجایی و تأثیر مثبت ضخامت و نرخ کرنش در بار اوج را مطالعه کردند طوری که با افزایش ضخامت و نرخ کرنش، بار اوج افزایش می‌یابد.

پوتی و سان [۱۶] برش پنج با شبیه‌سازی، منحنی بار-تغییر شکل برای تشکیل پلاگ در کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی شبه ایزوتروپیک مشخص کردند آن‌ها یافتند که نمودار بار-تغییر شکل نشان می‌دهد یک افت بار در شروع پارگی اتفاق می‌افتد.

پل و همکاران [۱۷] فرایند نفوذ را با پرتابه‌های سرتخت، در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آنان یک مدل تحلیلی بر اساس تقسیم مدت زمان نفوذ به فواصل زمانی نفوذ کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی در هر یک از این فواصل زمانی برای نفوذ پرتابه‌ها ارائه دادند. طبق این

3. A diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)
4. Epikure F-205

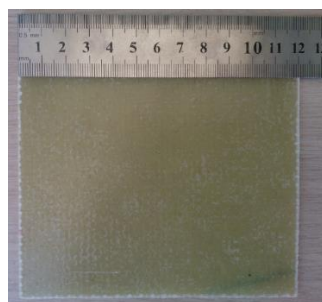
1. stiffness
2. Ogival

آزمایش کشش رزین بدون الیاف مطابق استاندارد ASTM D638 M-9 و برای کامپوزیت‌ها طبق استاندارد ASTM D3039 با سرعت بارگذاری ۲mm/min انجام گردید. با توجه به اینکه در محل اتصال فک‌های دستگاه با نمونه ایجاد تمرکز شده و باعث شکست در این محل و عدم دقت در آزمایش می‌شود. برای جلوگیری از این کار و حصول اطمینان شکست در میان نمونه، استفاده از تب^۱ با شیب کم (حدود ۸ درجه) بهترین نتیجه را می‌دهد. آزمایش‌ها در دانشگاه تربیت مدرس و توسط دستگاه کشش ۳۰ تنی ساخت شرکت تایمز چین و لودسل ۵۰۰ کیلوگرمی انجام گردید. به منظور اندازه‌گیری دقیق‌تر کرنش علاوه بر جابجایی خود دستگاه از یک اکتسنومتر برای اندازه‌گیری کرنش استفاده شد.

کسب ضخامت یکسان و خواص برابر، نمونه‌ها، یکجا ساخته می‌شوند. برای این منظور یک قالب صلب به اندازه مناسب آماده کرده و جهت جلوگیری از چسبیدن رزین به قالب از یک ورق نازک سیلیکونی استفاده می‌شود. سپس به وسیله لایه چینی دستی ساخت کامپوزیت‌ها انجام می‌گیرد بعد تحت فشار قرار گرفته تا صافی سطح مناسب و توزیع یکنواخت ماتریس و ضخامت یکسان در تمام سطح کامپوزیت، ایجاد شود. برای پخت تکمیلی کامپوزیت‌های ساخته شده در آون به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. نهایتاً بعد از پخت، نمونه‌های برش در اندازه‌های ۱۲×۱۲cm و نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 در اندازه ۱۲×۲/۵cm با اره نواری بریده می‌شوند (شکل ۱ و ۲). برای هر آزمایش ۵ نمونه تهیه شده است.



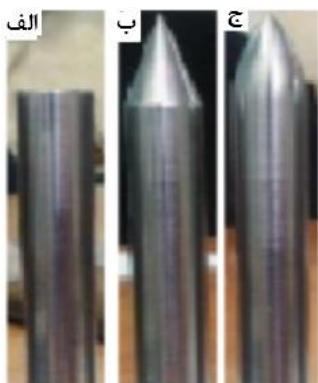
شکل ۳ فیکسچر آزمایش برش پنج نمونه‌های کامپوزیت (الف) I=۵ (ب) I=۲/۵



شکل ۱ نمونه کامپوزیت آزمایش برش پنج



شکل ۲ نمونه کامپوزیت آزمایش کشش



شکل ۴ (الف) نفوذکننده تخت (ب) نفوذکننده مخروطی (ج) نفوذکننده اجیوال

۲-۲- آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

علاوه بر آزمایش کشش، آزمایش نفوذ شبه استاتیکی با پنج برشی نیز انجام گردید. انجام آزمایش با کنترل جابجایی فک بالایی دستگاه، میزان جابجایی و محل اعمال نیرو صورت می‌گیرد (شکل ۵). آزمایش‌ها باید تا نفوذ کامل نفوذکننده در داخل نمونه ادامه یابد تا اینکه نمودار تنش-کرنش به صورت افقی و ثابت بماند. در این پژوهش از دو نسبت دهانه که نسبت قطر موثر نمونه (قطری که در داخل فیکسچر قرار می‌گیرد) بر قطر پنج (SPR) با اندازه‌های ۵ و ۱۰ و همچنین برای بررسی سرعت بارگذاری در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای از سه نرخ کرنش ۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ mm/min و علاوه بر آن برای مطالعه و بررسی تاثیر دماغه نفوذکننده از سه نفوذکننده با دماغه‌های سر تخت، مخروطی و اجیوال استفاده گردید. بارگذاری‌های مختلف در نسبت دهانه ۱۰=SPR و نفوذکننده‌های گوناگون با همان نسبت دهانه با سرعت

۲-۴- فیکسچر

فیکسچر آزمایش شبه استاتیکی با توجه به مطالعه‌های انجام شده و تجربه کاری شامل دو صفحه مربعی شکل در اندازه ۲۰×۲۰ cm از جنس فولاد به ضخامت ۱۵mm با یک سوراخ در مرکز آن، به شعاع ۵mm می‌باشد. صفحه زیری روی چهار پایه محکم شده است. صفحه کامپوزیتی می‌تواند در بین دو صفحه فولادی قرار گرفته با هشت پیچ که در اطرافش قرار دارد سفت شود. فیکسچر دومی شبیه بالایی بوده با این تفاوت که اندازه سوراخ داخلی به شعاع ۲/۵mm می‌باشد (شکل ۳). همچنین در این مقاله از سه نفوذکننده با ساقه استوانه‌ای شکل و بلند با دماغه‌های سر تخت به قطر ۱۰mm، مخروطی ۳۷ درجه و اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ انتخاب شده است. نفوذ کننده‌ها با قطر ۱۰mm از فولاد ابزار سرد کار با شماره استاندارد ۲۲۱۰ معروف به فولاد نقره ساخته شده‌اند. شکل ۴ نفوذکننده‌های استفاده شده را نشان می‌دهد.

۳- آزمایش‌های خواص مکانیکی

۳-۱- آزمایش کشش

رایج‌ترین و متداول‌ترین نوع آزمون برای تعیین مشخصات اولیه خواص مکانیکی به کار می‌رود. این آزمون به طور گسترده برای مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش بر روی رزین و کامپوزیت انجام می‌گیرد. با استفاده از آزمایش کشش می‌توان داده‌هایی همچون مدول یانگ، استحکام نهایی و ... بدست آورد. این کار توسط دستگاه کشش انجام می‌گیرد.

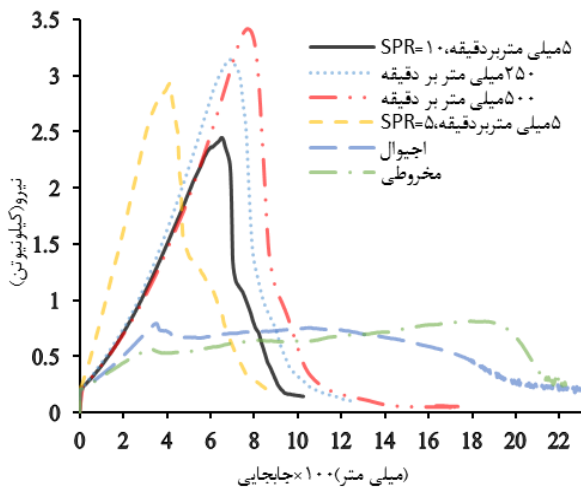
1. Tab

جدول ۱ خواص مکانیکی رزین و کامپوزیت

ردیف	ماده	استحکام نهایی Mpa	کرنش شکست (%)	مدول Gpa	چقرمگی MJ/m ³
۱	رزین	۱۸/۷۲±۰/۳۸	۳/۲۶±۰/۱۷	۰/۵۷۵۱	۰/۳۰
۲	کامپوزیت	۱۷۵/۹۸±۵/۷۷	۰/۷۱±۰/۰۳	۲۴/۷۸	۰/۶۳

۴-۲- برش پانچ

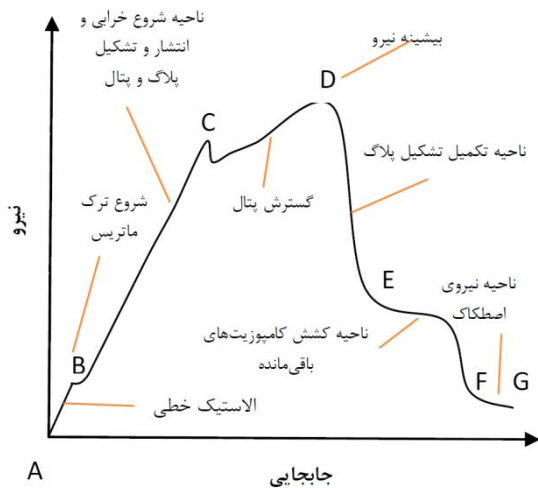
بعد از آزمایش برش پانچ، نتایج آن که از میانگین‌گیری تکرار ۵ آزمایش حاصل می‌شود، برای هر یک از کامپوزیت‌ها به صورت منحنی نیرو-جابجایی بدست آمده است. (شکل ۸)



شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی

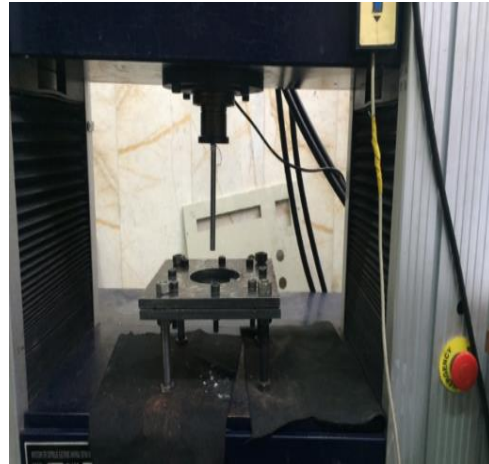
۴-۲-۱- مکانیزم شکست

به منظور درک و فهم درست و بررسی رفتار دینامیکی در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای از نمودار نیرو-جابجایی استفاده می‌شود. با استفاده از این نمودار مدل‌های شکست و مکانیزم‌های خرابی شناسایی و ارزیابی می‌شوند تا تدابیر خوبی جهت جلوگیری از شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها انجام گیرد. به طور کلی نمودار نیرو-جابجایی از ۶ بخش تشکیل شده است که در شکل ۹ به صورت شماتیک ارائه شده است



شکل ۹ مراحل مختلف مکانیزم شکست در منحنی نیرو-جابجایی

بارگذاری ۲mm/min آزمایش شده است. همچنین در بررسی نسبت دهانه، سرعت بارگذاری ۲mm/min می‌باشد.

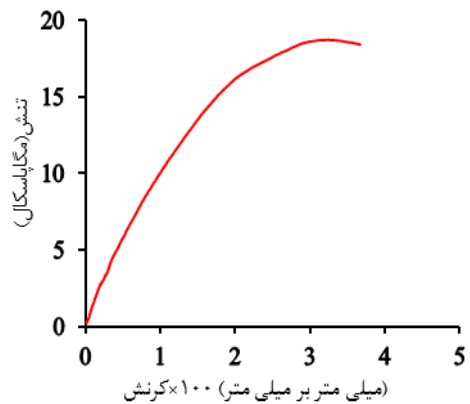


شکل ۵ نمایی از دستگاه فشار همراه با فیکسچر و نفوذکننده آماده برای برش پانچ

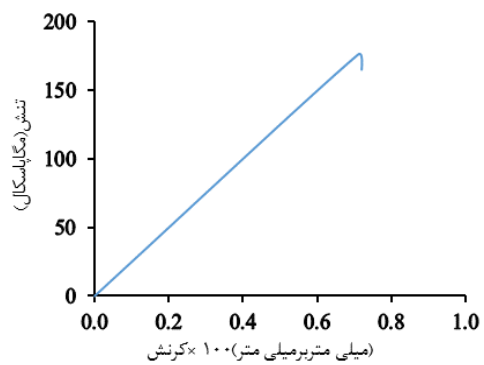
۴- بحث و نتایج

۴-۱- کشش رزین و کامپوزیت

بعد از انجام آزمون کشش، نمودار تنش-کرنش که از میانگین‌گیری تکرار آزمایش‌های رزین و کامپوزیت بدست می‌آید در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود. همچنین خواص مکانیکی رزین و کامپوزیت در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش رزین



شکل ۷ نمودار تنش-کرنش کامپوزیت

بررسی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر نیروی تماسی وابستگی شدید به شکل هندسی نفوذ کننده دارد. نتایج بار اوج در سه نفوذکننده‌ی تحت، مخروطی و اجیوال در شکل ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نفوذکننده‌ی سر تخت به دلیل کند بودن به نیروی بیشتری جهت نفوذ به هدف کامپوزیتی را دارد. اما تیزی بیشتر دماغه به این معنی نیست که به نیروی تماسی کمتری نیازمند است. در نفوذکننده‌ی سر مخروطی به علت پله‌ای بودن محل اتصال دماغه به ساقه باعث شده است که نیروی تماسی بیشتری نسبت به نفوذکننده‌ی اجیوال که دماغه به ساقه مماس است نیاز داشته باشد [۱۴]. بنابراین نفوذکننده‌ی سر تخت و سر مخروطی به ترتیب بیشترین و کمترین نیروی اوج در بین نفوذ کننده‌ها دارند.

۴-۲-۳- جابجایی نفوذکننده

مقدار جابجایی پنج از لحظه تماس با کامپوزیت تا خروج از کامپوزیت در راستای ضخامت، توسط نمودار نیرو-جابجایی قابل مشاهده است. در شکل ۱۱ مقدار جابجایی در حداکثر نیرو تماسی و همچنین در نفوذ کامل در لحظه خروج از کامپوزیت، ارائه شده است.

همان طوری که اشاره شده با تغییر دادن $SPR=5$ به $SPR=10$ باعث می‌شود که کامپوزیت‌های چند لایه‌ای مورد آزمایش فرصت بیشتری جهت خمش پیدا می‌کنند و قبل از اینکه تحت نیروی برشی قرار بگیرند خم می‌شوند. بنابراین $SPR=10$ نسبت به $SPR=5$ انعطاف‌پذیرتر است. در نتیجه میزان جابجایی بیشتر و خروج پنج دیرتر اتفاق می‌افتد (شکل ۱۱ الف).

همچنین با تغییر دادن نرخ بارگذاری جابجایی، بار اوج و جابجایی کل تغییر می‌کند. در شکل ۱۱ ب دیده می‌شود که با افزایش نرخ بارگذاری هم جابجایی در بار اوج و هم جابجایی کل افزایش می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری دمای نمونه مورد آزمایش افزایش می‌یابد [۴،۳]. در نتیجه باعث افزایش داکتیلیته^۱ نمونه شده، که آن هم موجب می‌شود شروع و گسترش خرابی در نمونه به تاخیر بیافتد و نمونه قبل از شکست بیشتر جابجا شود.

تأثیر دماغه نفوذ کننده در جابجایی و تغییر شکل صفحه هدف در شکل ۸ به طور واضح نشان داده شده است. کند بودن دماغه نفوذکننده باعث می‌شود که در ابتدا نفوذکننده دیرتر بر صفحه هدف نفوذ کند و صفحه هدف قبل از نفوذ نفوذکننده بیشتر تغییر شکل بدهد ولی در ادامه برش پلاگ، در جابجایی کمتر اتفاق افتاده و پنج زودتر خارج می‌شود اما نفوذکننده‌های نوک تیز با دماغه بزرگ‌تر برای نفوذ کامل بیشتر جابجا می‌شوند. میزان جابجایی در حداکثر نیروی تماسی و در لحظه خروج از کامپوزیت در شکل ۱۱ ج آمده است. بیشترین جابجایی نفوذ کامل مربوط به دماغه مخروطی می‌باشد

۴-۲-۴- انرژی جذب شده

مقدار کاری که یک نفوذکننده برای یک نفوذ کامل در یک کامپوزیت در راستای خود صرف می‌کند یا بطور دقیق مقدار انرژی هدف کامپوزیتی برای شکستن می‌گیرد، انرژی جذب شده در آن هدف گفته می‌شود. این انرژی از طریق سطح زیر نمودار بار-جابجایی بدست می‌آید. چنانکه قبلاً اشاره شد متفاوت بودن مکانیزم‌های شکست (نسبت نواحی مختلف نمودار بار-جابجایی به یکدیگر) در کامپوزیت در راستای ضخامت از یک طرف و غیر خطی بودن نمودار بار-جابجایی از طرف دیگر، نشانگر این است که میزان جذب انرژی در مراحل مختلف، گوناگون می‌باشد.

مسیر AB: در این مرحله سطح جلویی پنج با کامپوزیت تماس پیدا کرده و نیرو یا تنش اعمال می‌شود و در کامپوزیت یک خیز کلی الاستیک ایجاد می‌شود که هیچ گونه خرابی و پارگی در این مرحله دیده نمی‌شود به طوری که اگر نیرو برداشته شود دوباره به حالت اولیه برمی‌گردد.

مسیر BC: در نقطه B خرابی کامپوزیت با ترک برداشتن ماتریس شروع می‌شود. خرابی در این مرحله شامل آسیب دیدن ماتریس و لایه لایه شدن در داخل کامپوزیت است. در نفوذکننده‌ی سر تخت با ادامه نیرو و افزایش تنش برشی در اطراف پنج در صفحه بالایی کامپوزیت، باعث شروع برش فایبرها می‌شود. همچنین در این مسیر تشکیل پلاگ مخروطی شروع می‌شود. در نفوذ کننده‌های نوک تیز محل شروع و ایجاد پتال می‌باشد.

مسیر CD: این بخش مختص نفوذکننده‌های با دماغه نوک تیز است. در این ناحیه پتال‌های ایجاد شده گسترش می‌یابند. شیب این ناحیه به زاویه و اندازه‌ی پتال‌ها بستگی دارد [۱۴]. افزایش نیرو ادامه دارد تا اینکه در یک نقطه به حداکثر خود می‌رسد و ناگهان افت می‌کند. (نقطه D).

مسیر DE: در نفوذکننده‌ی سر تخت پلاگ مخروطی تشکیل شده، کامل می‌شود. در نقطه D با یک افت ناگهانی نیرو تا تکامل پلاگ (نقطه E) ادامه دارد. و در نفوذکننده‌های نوک تیز در نقطه D هدف کامپوزیتی به ساقه نفوذ کننده رسیده و ناگهان نیرو افت می‌کند.

مسیر EF: این بخش برای نفوذ کننده‌ی سر تخت با سرعت پایین اتفاق می‌افتد. با حرکت پنج به سمت پایین به کامپوزیت‌های باقی مانده در راستای ضخامت و در زیر پلاگ، فشار آورده در نتیجه کامپوزیت‌های باقی مانده به حالت کشش درآمده و مقاومت می‌کنند. که این با تغییر شیب نمودار بار-جابجایی قابل مشاهده است. با افزایش جابجایی کامپوزیت‌های کشیده شده استحکام خود را از دست داده، تحت نیروی کشش-برش شکسته می‌شوند.

مسیر FG: در نقطه F پلاگ بریده شده به همراه پنج به بیرون رانده می‌شوند. و بعد آن تنها نیروی مقاوم در برابر حرکت پنج نیروی اصطکاک می‌باشد.

۴-۲-۴- حداکثر نیروی تماسی

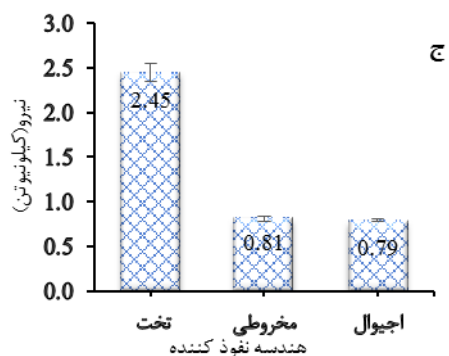
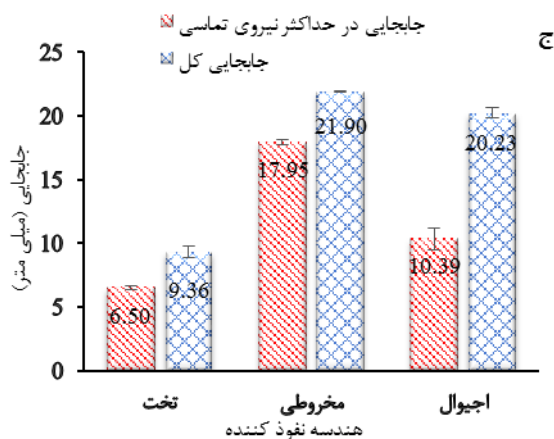
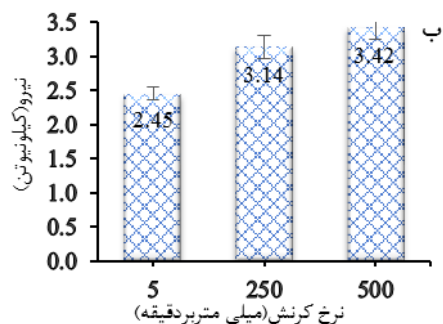
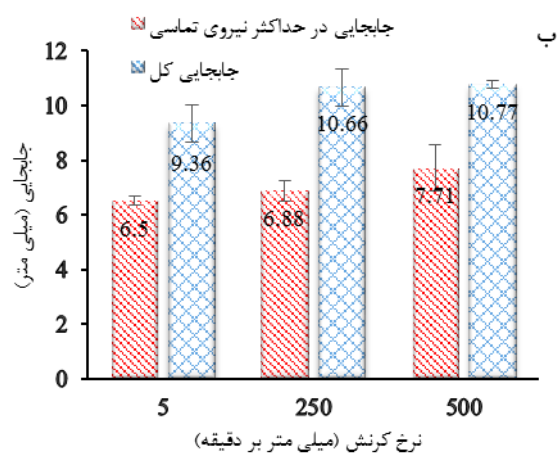
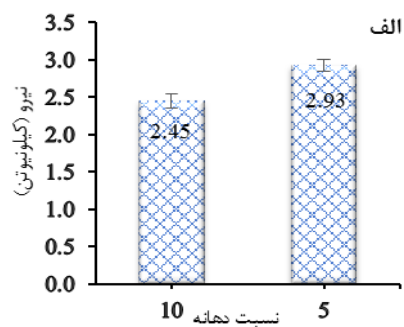
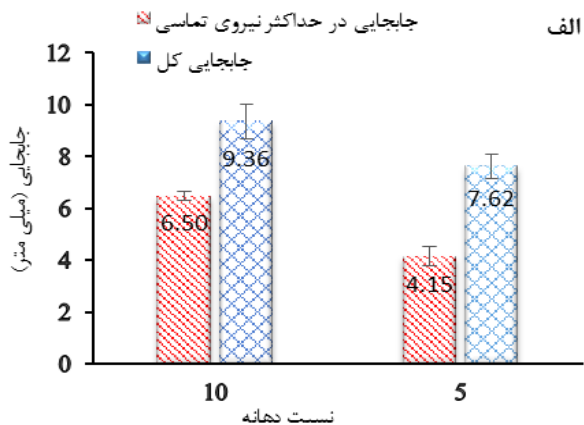
نیروی تماسی مقدار نیرویی است که کامپوزیت در طول بارگذاری می‌تواند تحمل کند. بیشترین مقدار این نیرو را بار پیک یا بار اوج^۱ می‌گویند. مقدار حداکثر نیروی تماسی برای کامپوزیت‌ها در پارامترهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

چنانکه مشاهده می‌شود با تغییر دادن دهانه پنج حداکثر نیروی تماسی تغییر می‌کند. در $SPR=5$ نسبت به $SPR=10$ تغییر شکل ناشی از خمش کامپوزیت‌های چند لایه‌ای کاهش یافته و تنش برش عرضی موضعی افزایش می‌یابد [۲]. در نتیجه مقاومت نمونه‌ی کامپوزیتی برای خم شدن بیشتر شده و نیروی بیشتری جهت نفوذ لازم می‌باشد (شکل ۱۰ الف).

مطالعات بر روی کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که نیروی تماسی به سرعت بارگذاری هم وابسته است در شکل ۱۰ ب نیروی تماسی در $SPR=10$ در سه نرخ بارگذاری متفاوت آورده شده است نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نرخ بارگذاری نیروی تماسی افزایش می‌یابد و استحکام برشی دینامیکی ماده‌ی کامپوزیتی در برابر نفوذکننده بیشتر می‌شود. افزایش بار اوج با افزایش در نرخ کرنش به زمان تغییر شکل نمونه و ویسکوزیته ماتریس نسبت داده شده است [۴،۳].

2. ductily

1. Peak load



شکل ۱۰ تغییرات نیروی تماسی حداکثر

به منظور درک و فهم درست از مراحل گوناگون جذب انرژی در مکانیزم‌های خرابی مختلف سطح زیر نمودار بار-جابجایی به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شده است. (شکل ۱۲)

ناحیه ۱: از δ_0 تا δ_1 که سطح زیر قسمت الاستیک خطی است، انرژی جذب شده در این ناحیه (E^e) بدلیل خمش کلی نمونه می‌باشد. به علت کم بودن مقدار کشسانی کامپوزیت‌ها، مقدار این انرژی ناچیز است. در این قسمت نفوذ کننده سر تخت به علت بیشتر بودن تغییر شکل صفحه هدف نسبت به نفوذ کننده‌های نوک تیز بیشتر انرژی جذب می‌کند.

ناحیه ۲: از δ_1 تا δ_4 کامپوزیت چند لایه تحت فشار قرار می‌گیرد. با افزایش جابجایی در این ناحیه، انرژی جذب شده جهت صرف خرابی ماتریس در δ_1 و در نفوذ کننده‌ی سرتخت پیشروی خرابی ماتریس و لایه لایه شدن لایه میانی، پارگی و انتشار فایبر در اطراف پانچ و تشکیل پلاگ می‌شود. این ناحیه خودش به سه قسمت تقسیم می‌شود؛ ناحیه δ_1 تا δ_2 با مقدار انرژی E^{cs1} ، ناحیه δ_2 تا δ_3 ناشی از وجود دماغه‌ی در نفوذ کننده‌های نوک تیز است که انرژی جذب شده ناشی از ایجاد پتال و در ادامه برای گسترش و باز کردن پتال‌ها صرف می‌شود. مقدار انرژی E^p می‌باشد

شکل ۱۱ مقدار جابجایی در لحظه حداکثر نیروی تماسی و خروج از کامپوزیت

با حرکت نفوذ کننده به سمت پایین چهار پتال متقارن شروع به رشد می‌کنند. ناحیه ۳: δ_3 تا δ_4 با مقدار انرژی E^{cs2} می‌باشد. اگرچه مکانیزم‌های خرابی و جذب انرژی در این نواحی متفاوت است اما در حالت کلی در این نواحی جذب انرژی ناشی از فشار-برش می‌باشد. این نواحی حداکثر جذب انرژی در کامپوزیت‌ها را به خود اختصاص داده است.

ناحیه ۴: مکانیزم جذب انرژی از δ_4 به δ_5 با دماغه نفوذ کننده تغییر می‌کند به طوری که این ناحیه (مسیر) از منحنی مربوط به نفوذ کننده سر تخت می‌باشد و در نفوذ کننده‌های نوک تیز ایجاد نمی‌کند. در نفوذ کننده سر

و در نتیجه در بارگذاری‌های بالاتر حجم و شدت شکست کاهش می‌یابد [۴،۳]. همان طوری که در شکل ۸ و ۹ برای نرخ بارگذاری‌های بالاتر مشاهده می‌شود مدل شکست در مسیر EF تغییر کرده (نسبت به نرخ کرنش پایین) و ادامه مسیر DE می‌باشد. بنابراین مکانیزم شکست و جذب انرژی در مسیر (D تا F) برای نرخ کرنش‌های بالا مشابه هم هستند و به صورت برش-فشار موضعی می‌باشد. در جدول ۲ مقدار انرژی جذب شده در نواحی مختلف و در شکل ۱۳ انرژی جذب شده کل برای نرخ کرنش‌های گوناگون ارائه شده است.

همان طوری که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با تغییر دماغه مکانیزم شکست تغییر کرده و در نتیجه انرژی جذب شده توسط هدف کامپوزیتی تغییر می‌کند به طوری که هر چه طول دماغه نفوذکننده بیشتر باشد خروج نفوذکننده به تاخیر افتاده و انرژی بیشتری جذب می‌کند بیشترین مقدار کل انرژی جذب شده مربوط به دماغه مخروطی و کمترین مقدار کل انرژی جذب شده مربوط به سر تخت می‌باشد.

گسترش خرابی زمانی که گسیختگی پتالینگ رخ می‌دهد نسبت به زمانی که پلاگ تشکیل می‌شود انرژی بیشتری از نفوذکننده جذب می‌کند و در نفوذکننده‌هایی با دماغه نوک تیز قسمت اعظم انرژی توسط گسترش خرابی‌ها به وجود آمده جذب می‌شود [۱۴].

جدول ۲ انرژی جذب شده در مراحل گوناگون

ردیف	دماغه/دهانه/نرخ کرنش	E^{cs1} (j)	E^{cs2} (j)	E^{ts} (j)	E^p (j)
۱	تخت، 10mm/min.SPR=10	۸/۱۴	۱/۳۷	۱/۴۸	-
۲	تخت، 5mm/min.SPR=5	۶/۹۴	۱/۶۳	۲/۵۳	-
۳	تخت، 10mm/min.SPR=10	۱۰/۲۴	۴/۵۹	-	-
۴	تخت، 10mm/min.SPR=10	۱۱/۹۴	۴/۲۴	-	-
۵	مخروطی، 10mm/min.SPR=10	۱/۲۷	۲/۲۴	-	۹/۷۹
۶	اجیوال، 10mm/min.SPR=10	۱/۶۵	۵/۵۳	-	۵/۰۴

۴-۲-۵- نیروی اصطکاک

بعد از اینکه سر (دماغه) نفوذکننده از نمونه کامپوزیتی خارج شد نیروی اصطکاک تنها نیروی مقابل حرکت نفوذکننده می‌باشد. نیروی اصطکاک یکی از عوامل جذب انرژی است که بعد از ناحیه کشش- برش که تقریباً بصورت افقی در انتهای نمودار بار-جابجایی نمایان می‌شود. این نیرو علاوه بر نیروی عمودی سطح (که توسط پتال‌ها وارد می‌شود) و مساحت سطح تماس نفوذ کننده و کامپوزیت، به جنس این دو سطح بستگی دارد.

با تغییر SPR نیروی اصطکاک تحت تاثیر قرار می‌گیرد به طوری که با توجه به شکل ۱۴ الف نیروی اصطکاک در SPR=5 بیشتر از SPR=10 می‌باشد.

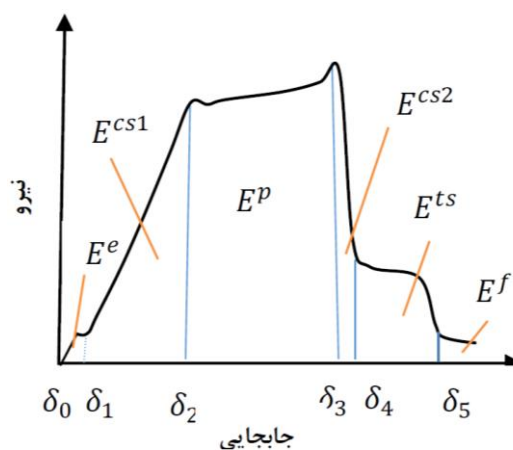
همچنین با افزایش نرخ کرنش مقدار نیروی اصطکاک افزایش می‌یابد. (شکل ۱۴ ب)

با تغییر دماغه نفوذ کننده سطح تماس نفوذ کننده با کامپوزیت و همچنین نیروی وارد از طرف سطح کامپوزیت به نفوذکننده (نیروی سطح تماس) تغییر کرده و باعث می‌شود که نیروی اصطکاک تغییر کند. در شکل ۱۴ ج نیروی اصطکاک برای نفوذکننده‌ها با شکل هندسی متفاوت ارائه شده است.

تخت با سرعت بارگذاری کم، وقتی تشکیل برش پلاگ کامل شد با افزایش جابجایی مقدار لایه‌های کامپوزیتی باقی مانده در زیر پلاگ، در صفحه پشتی کامپوزیت به صورت غشای کششی درآمده که این قسمت علاوه بر بارگذاری برشی تحت کشش قرار می‌گیرد. بنابراین انرژی جذب شده در این ناحیه ناشی از کشش-برش می‌باشد. مقدار آن E^{tc} است.

ناحیه ۵: از δ_5 به بعد سطح زیر نمودار مربوط به انرژی جذب شده توسط نیروی اصطکاک می‌باشد که با E^f نشان داده شده است. به طور خلاصه کل انرژی جذب شده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

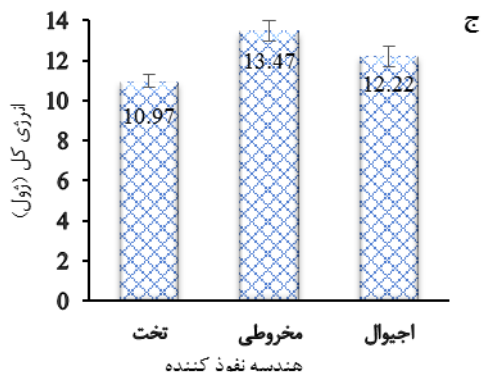
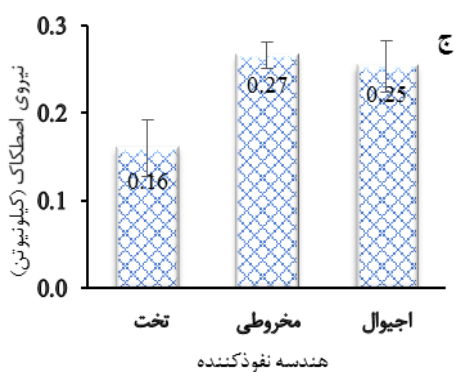
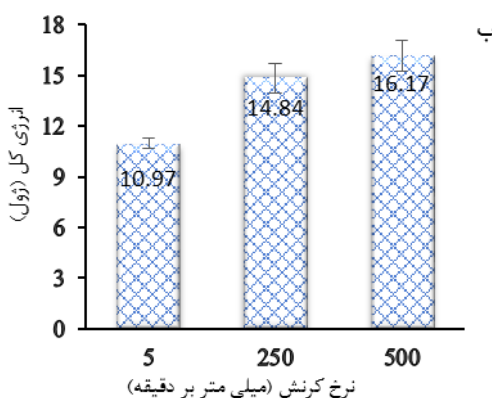
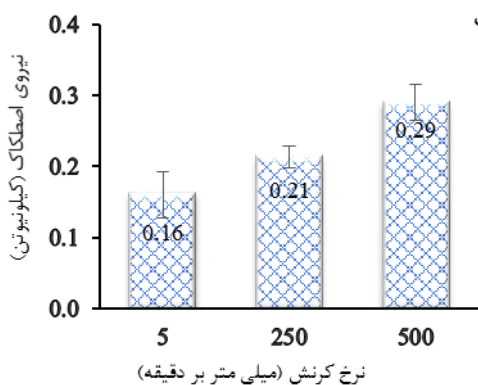
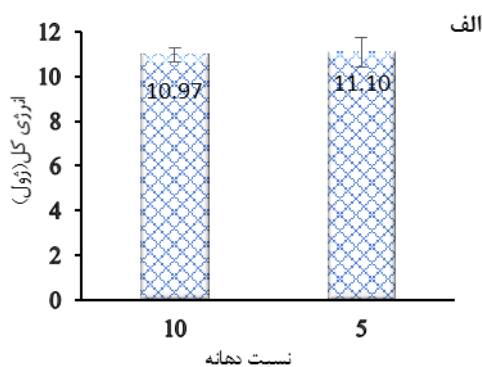
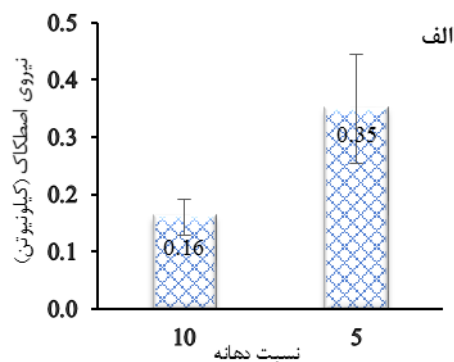
$$E_T = \int_0^{\delta} p(\delta) d\delta = E^e + E^{cs1} + E^p + E^{cs2} + E^{ts} + E^f \quad (1)$$



شکل ۱۲ نواحی مختلف جذب انرژی در منحنی نیرو-جابجایی

نمودار بار- جابجایی کامپوزیت‌ها با توجه به تعداد لایه و دهانه (SPR) به دو دسته تقسیم می‌شوند دسته اول؛ کامپوزیت‌هایی که نمودار بار-جابجایی آن‌ها به صورت خطی است. دسته دوم؛ کامپوزیت‌هایی که نمودار بار-جابجایی آن‌ها به صورت دو خطی است. چون رفتار کامپوزیت‌های مورد آزمایش شده در دو SPR این پژوهش به صورت دو خطی می‌باشد، پس نمودار بار- جابجایی آن‌ها مشابه هم هستند. اما مکانیزم شکست در SPR=5 و SPR=10 با هم فرق می‌کند و در نتیجه انرژی جذب شده در هر یک از نواحی متفاوت می‌باشد [۲]. در جدول ۲ انرژی جذب شده در نواحی مختلف را نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود با عوض کردن نسبت دهانه از SPR=5 به SPR=10 انرژی جذب شده در نتیجه به دلیل کاهش انعطاف پذیری کم شده است اما انرژی جذب شده در ناحیه E^{ts} بیشتر نشان می‌دهد و انرژی جذب شده کل به صورت ناچیز تغییر می‌کند. (شکل ۱۳ الف)

در بررسی تاثیر نرخ بارگذاری بر انرژی جذب شده با افزایش نرخ بارگذاری بدلیل ازدیاد تغییر شکل صفحه هدف جابجایی و افزایش بار اوج مساحت سطح زیر نمودار بار-جابجایی افزایش یافته و در نتیجه انرژی جذب شده بیشتر می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که در فرآیندهای سرعت بالا مکانیزم شکست به صورت موضعی است [۴، ۳] و از طرفی توجه به شکل ۸ و حذف شدن ناحیه کشش-برش در نرخ بارگذاری‌های بالا موید این مطلب می‌باشد. با بیشتر شدن انرژی جذب شده با افزایش نرخ بارگذاری در کامپوزیت‌های چند لایه‌ای چکش خواری (انعطاف پذیری) نمونه افزایش یافته



شکل ۱۴ مقادیر نیروی اصطکاک

شکل ۱۳ میزان کل انرژی جذب شده

سیستم رزین نیز از یک اپوکسی، دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به عنوان پایه و از سیکلوالیفاتیک آمین اصلاح شده با نام تجاری اف ۲۰۵ به عنوان سفت کننده ساخته شده است.

در این پژوهش از دو نسبت دهانه ۵ و ۱۰ و از سه نرخ کرنش mm/min ۵، ۲۵۰ و ۵۰۰ و همچنین از سه نفوذکننده با دماغه‌های سر تخت به قطر ۱۰ mm، مخروطی ۳۷ درجه و اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ استفاده گردید. نتایج حاصل از مطالعه پارامترها بدین شرح است:

- ۱- بررسی نسبت دهانه‌ها نشان می‌دهد که با کاهش نسبت دهانه، تغییر شکل صفحه هدف کمتر شده و نیروی تماسی افزایش می‌یابد.
- ۲- نتایج برش پانچ در نرخ کرنش‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سرعت بارگذاری، استحکام کامپوزیت در برابر نفوذکننده

چنانچه مشخص است با بزرگ شدن دماغه نفوذکننده، نیروی اصطکاک بیشتر می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر نسبت قطر موثر نمونه بر قطر پانچ و سرعت بارگذاری و شکل هندسه نفوذکننده در رفتار خواص شبه استاتیکی برش پانچ (QS-PS) در کامپوزیت‌های چندلایه‌ای به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت. مواد کامپوزیتی از ۱۲ لایه‌ی الیاف شیشه، دارای بافت دو بعدی با چگالی سطحی 200 g/m^2 به روش لایه چینی دستی ساخته شده است.

[19] Pol, M., Liaght, G., Hajiarazi, F., "Experimental Investigation of Effect of Nanoclay on Ballistic Properties of Composites," In Persian, Modares mechanical Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012.

افزایش می‌یابد. همچنین شکست کامپوزیت به صورت برش موضعی می‌باشد.

۳- در مقایسه نتایج نفوذکننده‌ها با دماغه‌های مختلف حاکی از آن است که بیشترین نیروی تماسی مربوط به نفوذکننده سر تخت و بیشترین انرژی جذب شده توسط نفوذکننده مخروطی می‌باشد.

۴- با تغییر هندسه نفوذکننده مکانیزم شکست تغییر می‌یابد به طوری که گسیختگی نفوذکننده سر تخت به صورت پلاگینگ و گسیختگی نفوذکننده‌های نوک تیز به صورت پتالینگ می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] Gama, B.A., Gillespie Jr, J.W., "Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-Section Composites," Composite Structures, Vol. 86, No. 4, pp. 356-369, 2008.
- [2] Xiao, J.R., Gama, B.A., Gillespie Jr, J.W., "Progressive Damage and Delamination in Plain Weave S-2glass/SC-15 Composites Under Quasi-Static Punch-Shear Loading," Composite Structures, Vol. 78, No. 2, pp. 182-196, 2007.
- [3] Hosura, M.V., Waliul Islam, S.M., Vaidya, U.K., Kumar, A., Dutta, P.K., Jeelani, S., "Dynamic Punch Shear Characterization of Plain Weave Graphite/Epoxy composites at Room and Elevated Temperatures," Composite Structures, Vol. 70, No. 3, pp. 295-307, 2005.
- [4] Hosura, M.V., Waliul Islam, S.M., Vaidya, U.K., Dutta, P.K., Jelani, S., "Experimental Studies on the Punch Shear Characterization of Satin Weave Graphite/Epoxy Composites at Room and Elevated Temperatures," Materials Science and Engineering A, Vol. 368, No. 1-2, pp. 269-279, 2004.
- [5] Manzella, A.F., Gama, B.A., Gillespie Jr, J.W., "Effect of Punch and Specimen Dimensions on the Confined Compression Behavior of S-2 Glass/Epoxy Composites," Composite Structures, Vol. 93, No. 7, pp. 1726-1737, 2011.
- [6] Bye, B.X., Han, J.H., Lu, L., Zhou, X.M., Qi, M.L., Zhang, Z., Luo, S.N., "Dynamic Fracture of Carbon Nanotube /Epoxy Composites under High Strain-Rate Loading," Composites: Part A, Vol. 68, No. 4, pp. 282-288, 2015.
- [7] Harding, J., Dong, L., "Effect of Strain Rate on the Interlaminar Shear Strength of Carbon-Fiber-Reinforced Laminates," Composite Science Technology, Vol. 53, No. 3, pp. 347-358, 1994.
- [8] Jordan, J.B., Naito, C.J., (Gama) Haque, B.Z., "Quasi-Static, Low-Velocity Impact and Ballistic Impact Behavior of Plain Weave E-Glass/Phenolic Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 48, No. 20, pp. 2505-2516, 2014.
- [9] Yahaya, R., Sapuan, S.M., Jawaid, M., Leman, Z., Zainudin, E.S., "Quasi-Static Penetration and Ballistic Properties of Kenaf Aramid Hybrid Composites," Materials and Design, Vol. 63, No. 2, pp. 775-782, 2014.
- [10] Ghajar, R., Rassaf, A., "Effect of Impactor Shape and Temperature on the Behavior of Eglass/EpoxyC laminates," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2014
- [11] Mines, R.A.W., Roach, A.M., Jones, N., "High Velocity Perforation Behavior of Polymer Composite Laminates," Int J Impact Eng, Vol. 22, No. 5, pp. 61-88, 1999.
- [12] Erkendirici, Ö.F., (Gama) Haque, B.Z., "Quasi-Static Penetration Resistance Behavior of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites," Composites: Part B, Vol. 43, No. 8, pp. 3391-3405, 2012.
- [13] Erkendirici, Ö.F., (Gama) Haque, B.Z., "Investigation of Penetration Mechanics of PW Kevlar Fiber Reinforced HDPE Composites," International Journal of Damage Mechanics, Vol. 22, No. 3, pp. 304-322, 2012.
- [14] MehrabaniYeganeh, E., Liaghat, G.H., Pol M.H., "Experimental Investigation of Quasi-Static Perforation on Laminated Glass Epoxy Composites by Indenters with Different Geometries," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015.
- [15] Nemes, J. A., Eskandari, H., Rakitch, L., "Effect of Laminate Parameters on the Penetration of Graphite/Epoxy Composites," International Journal of Impact Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 97-112, 1998.
- [16] Potti, S.V., Sun, C.T., "Prediction of Impact Induced Penetration and Delamination in Thick Composite Laminates," International Journal of Impact Engineering, Vol. 19, No.1, pp. 31-48, 1997.
- [17] Pol, M.H., Liaghat, G.H., Sedighi, M., "Analytical Modeling of Perforation of Projectiles into Glass Epoxy Composites," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 2, pp.11-19, 2012.
- [18] Pol, M.H., Liaghat, G., Hajiarazi, F., "Experimental Investigation Effect of Nanoclay on Ballistic Behavior of Woven Fabric Composites," In Persian, Journal of Composite Materials, Vol. 47, No. 13, pp. 1563-1573, 2013.