



بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی نفوذ کننده با هندسه های مختلف، درون چند لایه کامپوزیتی شیشه اپوکسی

عرفان مهربانی یگانه¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، محمدحسین پل³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، صندوق پستی 141-14115، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 شهریور 1393
پذیرش: 17 آبان 1393
ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:

نفوذ شبه استاتیکی

هندسه نفوذ کننده

نیروی تماسی

جذب انرژی

چند لایه کامپوزیتی بافته شده

چکیده

در این تحقیق، تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرآیند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت لایه ای شیشه/ اپوکسی با الیاف بافته شده، به شکل تجربی، مورد مطالعه قرار می گیرد. آزمایش های نفوذ با نرخ بارگذاری پایین، توسط نفوذ کننده های استوانه ای با شش هندسه دماغه تخت، نیم کروی، مخروطی با زاویه دماغه های 37 و 90 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 و 2/5، انجام شده و رفتار چند لایه کامپوزیتی، از جمله میزان جذب انرژی، نیروی تماسی، مکانیزم های گسیختگی و نیروی اصطکاک، برای نفوذ کننده های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. ماده مرکب با 18 لایه الیاف شیشه بافته شده با کسر حجمی الیاف 45 درصد و به روش لایه چینی دستی تولید شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که منحنی نیرو - جابجایی نفوذ کننده، در حالت کلی، از پنج ناحیه تشکیل می شود که وابسته به شکل هندسی دماغه نفوذ کننده، در برخی از نفوذ کننده ها تعدادی از این نواحی دیده نمی شوند و یا طولی تر یا کوتاه تر می گردند. بیشترین نیروی تماسی را نفوذ کننده های کند ارائه می کنند. نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر 2/5 به نیروی کمتری برای نفوذ کامل به درون کامپوزیت نیازمند است و از این جهت بهترین عملکرد را نشان می دهد. مقایسه انرژی جذب شده نشان می دهد که در یک جابجایی (عمق نفوذ) یکسان، هدف کامپوزیتی انرژی بیشتری از نفوذ کننده های کندتر جذب می کند. نفوذ کننده مخروطی 37° بیشترین انرژی را برای نفوذ کامل نیاز دارد که مقدار آن 2/6 برابر انرژی مورد نیاز نفوذ کننده تخت است. طول دماغه بیشتر، افزایش جابجایی تا نفوذ کامل را به همراه دارد.

Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries

Erfan Mehrabani Yeganeh¹, Gholam Hosein Liaghat^{1*}, Mohammad Hosein Pol²

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

* P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 September 2014
Accepted 08 November 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:
Quasi-static perforation
indenter geometry
contact force
energy absorption
laminated woven composite

ABSTRACT

This paper, experimentally evaluates the effects of indenter geometry on quasi-static perforation process of laminated woven glass epoxy composites. Low loading rate tests were performed using six indenters with blunt, hemispherical, conical (cone angle of 37° and 90°) and ogival (caliber radius head of 1.5 and 2.5) nose shapes. Composite behaviors like energy absorption, contact force, failure mechanisms and friction force were investigated for different indenter shapes. Hand lay-up method has been used to manufacture composite targets with 18 layers of 2D woven glass fibers of 45% fiber volume fraction. The epoxy system is made of epon 828 resin with jeffamine D400 as the curing agent. The results show that the load displacement curve is divided to five areas. Some of these areas may have higher or lower magnitude, depending on indenter nose shape. The highest contact force is exhibited by unsharpened indenter. The lowest contact force, and so the best performance, is seen in ogival (CRH=2.5) indenter. Comparing absorbed energies shows that for an identical dent depth, the amount of absorbed energy is major for unsharpened indenters. The 37° conical indenter requires the highest energy for perforation, which is 2.6 times more than blunt indenter's.

1- مقدمه

باعث گردیده است که همواره، محققین به دنبال یافتن راهی برای افزایش مقاومت سازه ها و تجهیزات، در برابر خطرات ناشی از خرابی های مختلف باشند.

پیشرفت روز افزون علوم مختلف، باعث پیشرفت های زیادی در زمینه طراحی سازه های مقاوم شده است. اهمیت بالای موضوع حفاظت از افراد و تجهیزات،

Please cite this article using:

E. Mehrabani Yeganeh, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کننده بیشتر از ضخامت هسته است، نفوذ کننده دارای دماغه نیم‌کروی انرژی کمتری برای نفوذ کامل نیاز دارد، هنگامی که شعاع نفوذ کننده از ضخامت هسته کمتر است، انرژی مورد نیاز برای نفوذ کامل، در نفوذ کننده‌های مختلف تقریباً برابر است.

لی و همکارانش [6] فرآیند فشار شبه استاتیکی نفوذ کننده⁹ کروی را در مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دو نوع کامپوزیت کربن اپوکسی با الیاف تک جهته و کامپوزیت هیبریدی متشکل از لایه‌های کربن اپوکسی و پارچه‌های تک جهته کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها مبین کاهش لایه لایه شدگی کامپوزیت در صورت استفاده از لایه‌ی پارچه‌ای مابین لایه‌های کامپوزیتی بود. خرابی کامپوزیت، ناشی از فشار شبه استاتیکی، تطابق خوبی با نتایج ضربه سرعت پایین نشان داد.

باکوم و زیرکری [1] نفوذ شبه استاتیکی نفوذ کننده با دماغه نیم‌کروی را در کامپوزیت‌های با الیاف شیشه دو و سه بعدی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که خرابی به وجود آمده بر اثر نفوذ، در کامپوزیت دارای الیاف سه بعدی بسیار بیشتر از کامپوزیت با الیاف دو بعدی است. خرابی‌های به وجود آمده در کامپوزیت‌های با الیاف دو بعدی، به میزان زیادی متمرکز بودند.

چن و همکارانش [7] آزمایش نفوذ شبه استاتیکی را در کامپوزیت ترد و نرم متشکل از الیاف کربن، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که قبل از رسیدن به بیشینه نیرو، رابطه‌ی خطی مابین عمق نفوذ و نیروی تماس وجود دارد. در این مرحله مکانیزم خرابی ترک خوردگی ماتریس و لایه لایه شدگی کامپوزیت است. پس از عبور از نیروی حداکثر، ضمن افزایش عمق نفوذ، نیروی تماسی تقریباً ثابت می‌ماند. در این حالت، علاوه بر مکانیزم‌های خرابی قبلی، شکست الیاف هم مشاهده می‌شود. آن‌ها پیشنهاد دادند که مقاومت کامپوزیت در برابر نفوذ شبه استاتیکی را به خوبی می‌توان با نیروی تماسی حداکثر توصیف کرد. بیشینه نیرو برای کامپوزیت‌های ترد کمتر بوده است.

لین و هوفت [8] به بررسی تحلیلی مسأله نفوذ شبه استاتیک نفوذ کننده با دماغه نیم‌کروی در ورق‌های کامپوزیتی و سازه‌های ساندویچی پرداختند. آن‌ها، برای این منظور، از مدل جرم و فنر استفاده و نیرو نفوذ را با دقت 10 درصد پیش‌بینی کردند.

ژائو و همکارانش [2] خرابی و لایه لایه شدگی کامپوزیت شیشه اپوکسی را تحت بارگذاری پانچ برشی¹⁰ شبه استاتیک، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند با افزایش ضخامت کامپوزیت، ضمن افزایش نیروی تماسی، شکست الیاف کامپوزیت زودتر (در عمق نفوذ کمتر) رخ می‌دهد. آن‌ها همچنین، هنگامی که نسبت قطر تکیه‌گاه به قطر نفوذ کننده کمتر بود، نیروی تماسی بیشتری مشاهده کردند.

ثابت و همکارانش [9] به بررسی نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی نفوذ کننده سر مخروطی بر اهداف کامپوزیتی شیشه/ پلی‌استر، تقویت شده با پرکننده‌های شنی¹¹، پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از این پرکننده‌ها باعث بهبود عملکرد کامپوزیت می‌شود. ضمن اینکه جذب انرژی ورق کامپوزیتی، هنگامی که از پرکننده با ابعاد کوچک‌تر استفاده کردند، بیشتر شد.

موهی و همکارانش [10] نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی نفوذ

امروزه کامپوزیت‌ها دارای کاربردهای فراوانی در صنایع پیشرفته مهندسی هستند. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر استحکام و سفتی ویژه بالا، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و همچنین خواص ضربه‌ای ویژه بالا، آن‌ها را برای استفاده در بسیاری از اجزای سازه‌های خودروها، هواپیماها و کشتی‌ها مورد توجه فراوان قرار داده است. سازه‌های کامپوزیتی چند لایه، در مقایسه با سازه‌های فلزی، نسبت به بارگذاری‌های خارجی بسیار حساس هستند. یک از نقاط ضعف این سازه‌ها، استحکام بین لایه‌ای ضعیف آن‌ها در مقابل بارگذاری‌های خارج از صفحه است. جدا شدن لایه‌ها یا لایه لایه شدگی یکی از اصلی‌ترین شکل‌های گسیختگی در کامپوزیت‌های چند لایه است.

بارگذاری شبه استاتیکی پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف¹ یک روش مناسب برای تعیین رفتار این‌گونه مواد، تحت یک دامنه وسیع از شرایط مختلف بارگذاری است. بارگذاری‌های درون صفحه²، خمش سه نقطه³ و سوراخ کردن عرضی⁴ از جمله بارگذاری‌هایی هستند که می‌توانند به شکل شبه استاتیکی انجام شوند. یکی از آزمایش‌هایی که برای تعیین خواص در جهت ضخامت مواد، مخصوصاً کامپوزیت‌های چند لایه، استفاده می‌شود، آزمایش نفوذ شبه استاتیک⁵ است. داده‌های آزمایش نفوذ استاتیکی می‌تواند برای مدل کردن و پیش‌بینی رفتار ماده تحت ضربه دینامیکی هم مورد استفاده قرار بگیرد [1]. از طرف دیگر این موضوع مطرح شده است که مکانیزم خرابی هدف کامپوزیتی چند لایه در نفوذ سرعت بالا، مشابه نفوذ شبه استاتیکی است [2].

میزان جذب انرژی مواد کامپوزیتی در نفوذ، مرتبط با شکل گسیختگی این اهداف است که وابسته به شکل هندسی نفوذ کننده، نوع و شکل تکیه‌گاه، شکل مخروط تشکیل شده در سطح پشتی هدف، اصطکاک مابین سطح خارجی نفوذ کننده و هدف کامپوزیتی حین فرآیند نفوذ و ... است. با تغییر یک حالت گسیختگی به حالت دیگر تفاوت در نیروی نفوذ مشاهده می‌شود.

ماینز و همکارانش [3] تأثیر نفوذ شبه استاتیکی و ضربه سرعت بالای سه نفوذ کننده با دماغه‌های مختلف را بر کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه بررسی و انرژی مورد نیاز برای نفوذ این نفوذ کننده‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. نفوذ کننده‌ها با شکل دماغه‌های تخت، نیم‌کروی و مخروطی بوده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که نفوذ کننده سر تخت بیشترین ضربه تشدید دینامیکی⁶ را نسبت به دو نفوذ کننده دیگر ارائه می‌کند.

تریمولا و همکارانش [4] نقش عوامل مؤثر بر نفوذ شبه استاتیکی در اهداف کامپوزیتی را به روش تحلیلی و روش اجزای محدود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جابجایی نسبی مابین الیاف و ماتریس با افزایش شعاع نفوذ کننده و همچنین افزایش نسبت مدول الاستیک الیاف به ماتریس، افزایش پیدا می‌کند.

ون و همکارانش [5] به بررسی نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی ضربه زننده‌های دارای دماغه تخت، نیم‌کروی و مخروطی بر سازه‌ی ساندویچی پرداختند. سازه مذکور دارای رویه‌هایی از جنس کامپوزیت شیشه/ پلی‌استر⁷ و هسته فوم پی وی سی⁸ بودند. نتایج آن‌ها نشان داد، هنگامی که شعاع نفوذ

- 1- Fiber reinforced plastics
- 2- In-plane loadings
- 3- Three-point bending
- 4- Transverse perforation
- 5- Quasi-static indentation
- 6- Dynamic enhancement factor
- 7- Polyester
- 8- PVC

9- Indenter
10- Punch-shear loading
11- Sand fillers

پلیمری از دو بخش الف) یک دیکلیسیدیل‌اتر بیسفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری اپون 828، تولید شده توسط شرکت شل، به عنوان پایه اپوکسی و ب) یک پلی‌اکسیپروپیلن دی‌امین با وزن مولکولی 400 gr/mol و با نام تجاری جف‌امین دی 400، ساخته شده توسط شرکت هانسمن، به عنوان سخت کننده، تشکیل شده است.

برای ساخت نفوذ کننده‌ها از فولاد ابزار سردکار با شماره استاندارد 2210 معروف به فولاد نقره‌ای، با قطر 10 میلی‌متر استفاده شده است.

2-2- ساخت هدف کامپوزیتی

ورق‌های کامپوزیتی با 18 لایه الیاف شیشه بافته شده با درصد حجمی الیاف 45 درصد و به روش لایه چینی دستی تولید می‌شوند. جزء ماتریس از دو بخش رزین و سخت کننده تشکیل شده که نسبت وزنی اختلاط بخش سخت کننده به کل رزین، طبق پیشنهاد شرکت سازنده، 55:100 است. پس از لایه چینی، ورق کامپوزیتی تحت فرآیند پخت قرار می‌گیرد. پخت ماده مرکب به مدت 150 دقیقه در دمای 80°C و فشار 2/5 bar و سپس 150 دقیقه دیگر در دمای 120°C و فشار 1/5 bar، در اتوکلاو انجام می‌شود. در نهایت بعد از پخت، نمونه‌ها در اندازه 12×12 cm²، برای قرارگیری در فیکسچر²، بریده می‌شوند. ضخامت نهایی محصول کامپوزیتی، 4/2 میلی‌متر است.

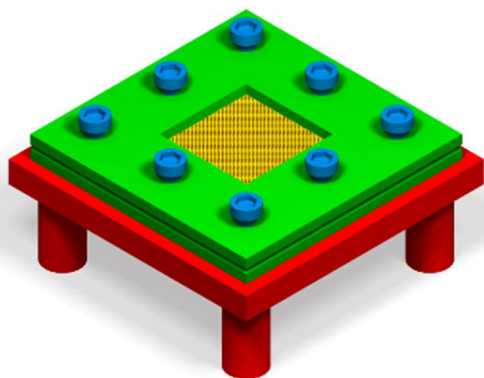
2-3- ساخت فیکسچر

همان‌طور که در شکل 1 مشخص است، فیکسچر به شکل مربعی و دارای ابعاد داخلی 10×10 cm² ساخته می‌شود. فیکسچر با هشت پیچ در طرفین، کاملاً سفت می‌شود تا شرایط مرزی گیردار در مرزهای ورق ایجاد گردد.

2-4- ساخت نفوذ کننده‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر هندسه دماغه نفوذ کننده بر فرآیند نفوذ، مجموعاً شش عدد نفوذ کننده استوانه‌ای با شکل دماغه‌های مختلف و با قطر 10 میلی‌متر ساخته شد.

نفوذ کننده‌های ساخته شده، همگی دارای جنس یکسان بوده و به منظور اطمینان از عدم تغییر شکل و یا شکست آن‌ها حین فرآیند نفوذ، توسط عملیات حرارتی تا حدود 52 تا 53 راکول سی سخت‌کاری شده‌اند. نفوذ کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی با زاویه دماغه 37°، مخروطی با زاویه دماغه 90°، اجیوال³ با شعاع کالیبر 2/5⁴ و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 می‌باشد. مطابق



شکل 1 فیکسچر مورد استفاده

کننده‌های دارای دماغه تخت، نیم‌کروی و مخروطی را در کامپوزیت‌های هیبریدی متشکل از الیاف شیشه و کولار¹ مطالعه نمودند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها بیانگر افزایش مقاومت به نفوذ کامپوزیت، با اضافه کردن لایه‌های کولار بوده است. انرژی جذب شده حین فرآیند نفوذ بالستیکی بیشتر از حالت نفوذ شبه استاتیکی بوده است، در حالی که مکانیزم‌های گسیختگی در هر دو حالت مشابه یکدیگر هستند.

مانزلا و همکارانش [11] تأثیر ابعاد پانچ و نمونه را در فرآیند نفوذ استاتیکی پانچ برشی، در کامپوزیت شیشه/اپوکسی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که شکست الیاف در راستای ضخامت با یک زاویه خاص رخ می‌دهد که این زاویه مستقل از ابعاد پانچ و نمونه است. در حالیکه آن‌ها با شبیه‌سازی عددی نشان دادند که تنش داخلی نمونه، با تغییر این عوامل، تغییر می‌کند.

جردن و همکارانش [12] به بررسی نفوذ شبه استاتیکی پانچ برشی در اهداف کامپوزیتی شیشه/فنولیک پرداختند. آزمایش‌های آن‌ها در نسبت‌های مختلف قطر تکیه‌گاه به قطر نفوذ کننده انجام شد. آن‌ها نشان دادند که هنگامی که نسبت قطر تکیه‌گاه به قطر نفوذ کننده کوچک‌تر باشد، نیروی تماسی کمتری برای نفوذ کامل حاصل می‌شود.

خدادادی و همکارانش [13] عوامل موثر بر عملکرد بالستیکی پارچه‌های کولار، شامل خواص هدف و هندسه پرتابه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های بالستیک را توسط دو پرتابه سرتخت و سرکروی انجام داده و نشان دادند که لبه‌های تیز پرتابه سرتخت باعث می‌شود الیاف پارچه علاوه بر تنش کششی، تحت تنش برشی نیز قرار بگیرند.

بررسی خواص مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های چند لایه شیشه/اپوکسی و تأثیر افزودن تقویت کننده‌هایی مانند ذرات نانو بر این مواد توسط پل و همکاران به صورت تحلیلی [14] و تجربی [15]، انجام گرفت. مطالعات آن‌ها نشان دهنده قابلیت جذب انرژی بالای این مواد، به خصوص با افزودن تقویت کننده بوده است.

در این تحقیق، تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرآیند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده، به شکل تجربی، مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور کامپوزیت تحت نفوذ با بارگذاری شبه استاتیکی عرضی متمرکز (پانچ با نرخ بارگذاری پایین) قرار گرفت. نفوذ کننده‌های استوانه‌ای با شش هندسه دماغه تخت، نیم‌کروی، مخروطی با زاویه دماغه‌های 37° و 90 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 و 2/5، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی تغییرات جذب انرژی، نیروی تماسی، مکانیزم‌های گسیختگی، نیروی اصطکاک و تقسیم‌بندی مراحل مختلف نفوذ برای تعداد بیشتری از نفوذ کننده‌ها با هندسه‌های مختلف با امکان در نظر گرفتن تأثیرات تغییر زاویه مخروط و شعاع کالیبر دماغه در این تحقیق انجام شده است.

2- روش ساخت و مواد اولیه

2-1- مواد اولیه

نمونه استفاده شده در این تحقیق، یک ماده مرکب پایه پلیمری چند لایه است. برای ساخت ماده مرکب مذکور از الیاف شیشه نوع E دارای بافت دوبعدی و خواص طولی و عرضی مساوی، استفاده شده است. این الیاف دارای چگالی سطحی 200 gr/m² و چگالی حجمی 2400 kg/m³ است. رزین

2- Fixture
3- Ogival
4- Caliber radius head (CRH)

1- Kevlar

آمده برای چگالی الیاف، رزین و کامپوزیت، طبق جدول 1 ارائه می‌شود. با داشتن جرم و چگالی الیاف، رزین و کامپوزیت ساخته شده، درصد حجمی الیاف به میزان 44/8 درصد محاسبه می‌شود.

3-1-2- آزمایش کشش در جهت الیاف

ابعاد نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش کشش توسط استاندارد ASTM-D3039 تعیین می‌گردد. تعداد 5 نمونه با ابعاد $25 \times 2/5$ میلی‌متر به منظور تکرار و اطمینان از نتیجه آزمایش ساخته و مورد آزمایش قرار داده شد. به منظور کاهش اثر تمرکز تنش در دو انتهای قطعه و حصول شکست استاندارد، از تب¹ کامپوزیتی با الیاف دارای جهت‌گیری 45° ، به ابعاد $5 \times 2/5$ میلی‌متر و زاویه انتهایی حدود 8 درجه استفاده شد. نهایتاً بعد از اتصال تب‌ها، با استفاده از چسب مناسب، نمونه‌های نهایی تحت بارگذاری با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند تا شکست کامل رخ دهد. نیروی وارد بر نمونه توسط لودسل² و کرنش قطعه توسط اکستنسومتر³ اندازه‌گیری شدند.

3-1-3- آزمایش برش

آزمایش برش طبق استاندارد ASTM-D3518 انجام می‌شود. در این حالت 5 عدد نمونه استاندارد با جهت‌گیری الیاف 45° ساخته و تحت کشش با نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. ابعاد و هندسه نمونه‌ها همانند آزمایش کشش در جهت الیاف است.

3-2- آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

ورق‌های چندلایه کامپوزیتی تولید شده در این تحقیق، توسط دستگاه آزمایش فشار موجود در دانشگاه تربیت مدرس، تحت نفوذ شبه استاتیکی (شکل 4) قرار گرفتند.

نفوذ کننده‌های مختلف با نرخ جابجایی یکسان 5 میلی‌متر بر ثانیه، درون کامپوزیت نفوذ می‌کنند. نیروی وارد شده به هدف، توسط لودسل موجود در بالای محل اتصال نفوذ کننده، اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش مذکور تا نفوذ کامل نفوذ کننده درون کامپوزیت و ثابت شدن نمودار نیرو-جابجایی، ادامه می‌یابد.

جدول 1 چگالی الیاف، رزین و محصول کامپوزیتی

ماده	چگالی (kg/m^3)
الیاف شیشه	1701
رزین	1136
کامپوزیت شیشه/اپوکسی	2403



شکل 4 آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

شکل 2، شعاع کالیبر دماغه با رابطه $CRH=S/D$ تعریف می‌شود که S شعاع دماغه و D قطر نفوذ کننده است. این نسبت برای دماغه تخت، صفر و برای دماغه نیم‌کروی، 0/5 می‌باشد.

نفوذ کننده‌های ساخته شده و همچنین نقشه نفوذ کننده‌ها با دماغه‌های مختلف که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در شکل 3 مشخص است.

3- انجام آزمایش‌ها

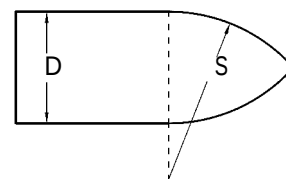
3-1-1- آزمایش‌های تعیین خواص کامپوزیت

3-1-1-1- درصد حجمی الیاف

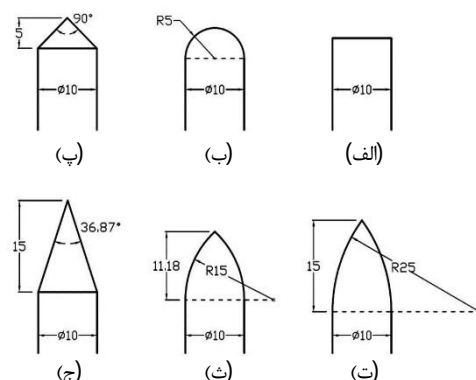
برای تعیین درصد حجمی الیاف در محصول کامپوزیتی، جرم الیاف و ماتریس در محصول نهایی و همچنین چگالی الیاف و ماتریس استفاده شده باید مشخص باشد.

به منظور تعیین جرم الیاف و ماتریس، تعداد چهار نمونه از محصول نهایی جدا و بر مبنای استاندارد ASTM-D2734، به مدت 5 ساعت توسط شعله مستقیم سوزانده می‌شوند تا رزین موجود در کامپوزیت کاملاً خارج گردد. بعد از سوختن کامل نمونه‌ها و خارج شدن کل رزین، وزن الیاف باقی‌مانده تعیین می‌شود.

چگالی الیاف، رزین و محصول کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D3800 تعیین می‌شود. بدین منظور با اندازه‌گیری جرم قطعه در هوا و همچنین هنگام غوطه‌وری درون سیال، چگالی نمونه محاسبه می‌گردد. مقادیر بدست



شکل 2 پارامترهای نفوذ کننده اجیوال برای تعیین شعاع کالیبر دماغه



شکل 3 نفوذ کننده‌های ساخته شده و نقشه آن‌ها، الف) دماغه تخت، ب) دماغه نیم‌کروی، پ) دماغه مخروطی 90° ، ت) دماغه اجیوال $CRH=2/5$ ، ث) دماغه اجیوال $CRH=1/5$ و ج) دماغه مخروطی 37° (ابعاد به میلی‌متر است)

1- Tab
2- Load cell
3- Extensometer

4- نتایج و بحث

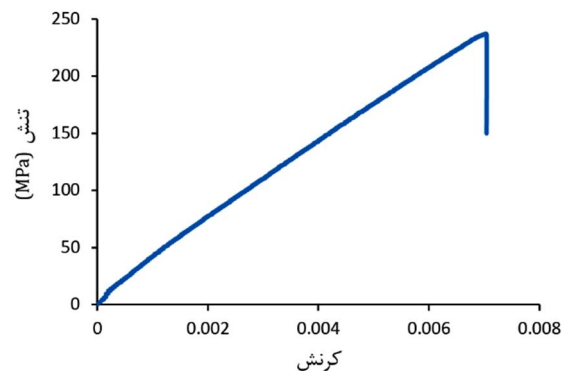
بعد از انجام آزمایش‌های کشش، نمودار تنش-کرنش ماده مرکب به صورت شکل 5 حاصل می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، ماده کامپوزیتی دارای رفتار الاستیک خطی است. همچنین نمودار تنش-کرنش برشی ماده مرکب، حاصل از آزمایش برش، به صورت شکل 6 ارائه می‌شود. خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی ساخته شده که از نتایج آزمایش‌های کشش و برش بدست می‌آید را می‌توان در جدول 2 مشاهده نمود.

برای هریک از نفوذ کننده‌های ذکر شده، تکرار آزمایش به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج انجام گردید. نتیجه عملکرد هریک از نفوذ کننده‌ها از میانگین‌گیری آزمایش‌های تکراری حاصل می‌شود. نمودار نیروی وارده بر حسب جابجایی نفوذ کننده، برای نفوذ کننده‌های مختلف، در شکل 7 ارائه شده است.

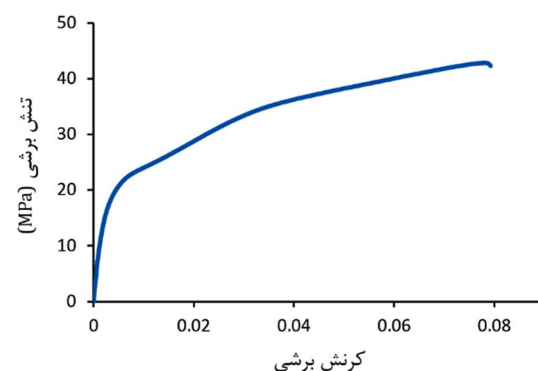
4-1- حالات گسیختگی

به طور کلی، منحنی نیرو-جابجایی نفوذ کننده از 5 بخش تشکیل می‌شود که در شکل 8 مشخص هستند.

ابتدای نمودار، بخش خطی AB قرار دارد. در این ناحیه، هدف کامپوزیتی،



شکل 5 نمودار تنش-کرنش ماده مرکب

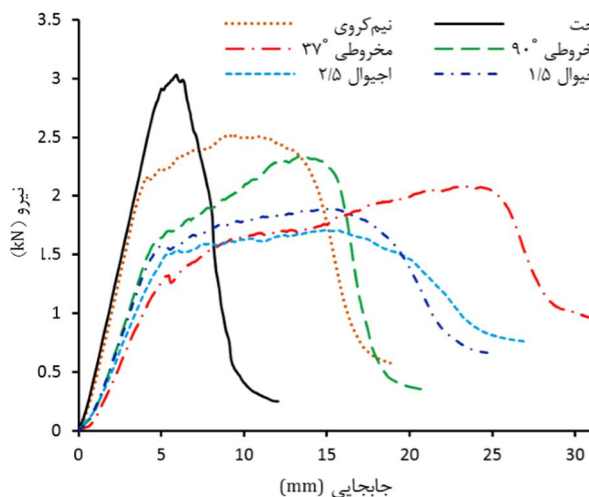


شکل 6 نمودار تنش-کرنش برشی ماده مرکب

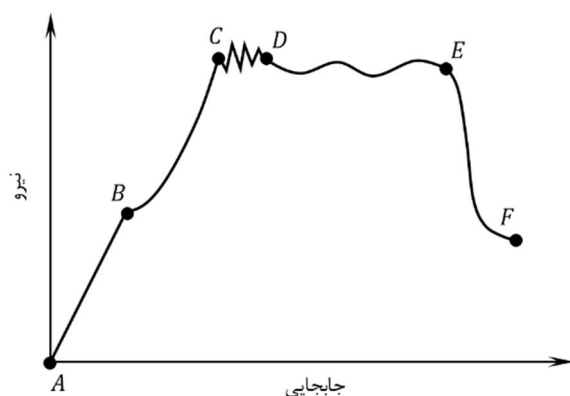
جدول 2 خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

مقدار	خاصیت مکانیکی
38/6 GPa	مدول الاستیک در جهت الیاف
237/0 MPa	استحکام کششی
0/007	کرنش شکست
5/1 GPa	مدول برشی در صفحه
42/9 MPa	استحکام برشی

دچار خیز کلی¹ الاستیک می‌شود و گسیختگی یا خرابی در هدف ایجاد نمی‌گردد. نقطه B محل شروع خرابی در هدف است. این خرابی می‌تواند ایجاد ترک در ماتریس، لایه لایه شدگی یا شروع سوراخ در کامپوزیت باشد. در ناحیه BC، خیز ورق به صورت غیرخطی ادامه پیدا کرده و خرابی‌های مذکور به صورت آهسته گسترش پیدا می‌کنند. ناحیه الاستیک در نفوذ کننده‌های سرتخت و سرنیم‌کروی مشاهده می‌شود. نفوذ کننده‌های دارای دماغه تیز، از ابتدای نفوذ، در هدف ایجاد خرابی و سوراخ کرده و در نتیجه فرآیند نفوذ آن‌ها از نقطه B آغاز می‌شود.



شکل 7 منحنی نیرو تماسی بر حسب جابجایی برای نفوذ کننده‌های مختلف



شکل 8 مراحل مختلف گسیختگی در نمودار نیرو جابجایی

در کامپوزیت‌های نازک، معمولاً یکی از نواحی AB و BC دیده می‌شوند. با افزایش ضخامت کامپوزیت می‌توان نواحی AB و BC را به طور همزمان در نمودار مشاهده نمود [2].

با افزایش خیز، در یک نیروی خاص (نقطه C) هدف دچار یک گسیختگی ناگهانی شده و مقداری افت نیرو در نمودار نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود که مقدار این افت، وابسته به شکل دماغه، برای نفوذ کننده‌های مختلف متفاوت است. در نفوذ کننده سرتخت این نقطه محل شروع پلاگینگ برشی و در نفوذ کننده‌های دیگر محل شروع پتالینگ است. ناحیه CD معمولاً در نفوذ کننده‌های تخت مشاهده می‌شود و مربوط به شکل‌گیری پلاگ برشی در لایه‌های جلویی کامپوزیت است.

توسط نفوذ کننده‌های تیز است. عملکرد نفوذ کننده‌های مختلف از دو دیدگاه قابل بررسی است. حداقل نیرویی که نفوذ کننده برای نفوذ کامل نیاز دارد (نیروی حداکثر در نمودار نیرو- جابجایی) و یا حداقل انرژی نفوذ کننده که برای نفوذ کامل نیاز است (معادل با سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی).

۴-۲- نیروی تماسی حداکثر

با توجه به منحنی‌های نیرو- جابجایی (شکل ۷)، حداکثر نیروی تماسی برای نفوذ کننده‌های مختلف، به ترتیب بیشترین نیروی حداکثر، به صورت جدول ۳ ارائه می‌شود.

همان‌گونه که نتایج شکل ۷ و جدول ۳ نشان می‌دهد، نفوذ کننده‌های کند مانند نفوذ کننده سرتخت و سرنیم‌کروی، نیروی تماسی بیشتری ایجاد می‌کنند. این نوع نفوذ کننده‌ها، به علت کندی دماغه، باعث به وجود آمدن خیز بیشتر ورق قبل از نفوذ (ایجاد گسیختگی در الیاف) می‌شوند. از این رو نیروی بیشتری به ورق کامپوزیتی وارد می‌شود. تیزی بیشتر دماغه، الزاماً به معنی نیروی تماسی کمتر نیست. نفوذ کننده با دماغه مخروطی 37° اگرچه دارای تیزترین دماغه است ولیکن نیروی تماسی آن بیشتر از نفوذ کننده‌های اجیوال است.

نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر $2/5$ به نیروی کمتری برای نفوذ کامل به درون کامپوزیت نیازمند است. از این جهت این نفوذ کننده بهترین عملکرد



شکل ۱۰ تأثیر نفوذ کننده سرمخروطی 90° بر ورق کامپوزیتی



شکل ۱۱ تأثیر نفوذ کننده سرنیم‌کروی بر ورق کامپوزیتی

جدول ۳ حداکثر نیروی تماسی برای نفوذ کننده‌های مختلف

ردیف	نوع نفوذ کننده	نیروی تماسی حداکثر (N)	R_{cf}^*
۱	تخت	۳۰۳۰	۱/۸
۲	نیم‌کروی	۲۵۲۰	۱/۵
۳	مخروطی 90°	۲۳۵۰	۱/۴
۴	مخروطی 37°	۲۰۹۰	۱/۲
۵	اجیوال $CRH=1/5$	۱۹۰۰	۱/۱
۶	اجیوال $CRH=2/5$	۱۷۰۰	۱

(*) عبارت است از نسبت نیروی تماسی حداکثر هر نفوذ کننده، تقسیم بر نیروی تماسی نفوذ کننده‌ای که کمترین مقدار را ارائه می‌کند.

در ناحیه DE پتال‌های ایجاد شده با نیرویی تقریباً ثابت گسترش پیدا می‌کنند. شیب این ناحیه وابسته به اندازه و زاویه پتال‌ها است. نفوذ کننده‌های با طول دماغه بیشتر باعث می‌شوند پتال‌ها کندتر گسترش پیدا کرده و ناحیه DE طول‌تر شود.

هنگامی که ساقه نفوذ کننده به هدف کامپوزیتی می‌رسد، گسترش پتال متوقف شده و یک افت ناگهانی در نیروی تماسی مشاهده می‌شود (ناحیه EF). در انتهای فرآیند نفوذ منحنی نیرو- جابجایی، حالت تقریباً افقی به خود گرفته و تنها نیروی مقاوم در برابر نفوذ، نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ کننده و هدف کامپوزیتی است (نقطه F).

به طور خلاصه، اگر منحنی نیرو- تغییر مکان از نظر شیب به سه قسمت تقسیم شود. در قسمت پرشیب اول منحنی، خیز ورق کامپوزیتی افزایش می‌یابد و در صورت ایجاد خرابی مانند لایه لایه شدگی یا سوراخ شدن، گسترش آن آرام است. در قسمت کم‌شیب میانی منحنی، پتال‌های ایجاد شده با نیرویی تقریباً ثابت گسترش پیدا می‌کنند. شیب این ناحیه وابسته به اندازه و زاویه پتال‌ها است. قسمت پرشیب انتهای منحنی مربوط به زمانی است که ساقه نفوذ کننده به کامپوزیت می‌رسد و تنها نیروی مقاوم در برابر حرکت نفوذ کننده، نیروی اصطکاک است.

در نفوذ کننده سرتخت، بعد از ناحیه خطی، گسیختگی پلاگ برشی در لایه‌های جلویی کامپوزیت ایجاد می‌گردد. با افزایش نیرو، لایه‌های پشتی دچار گسیختگی پتالینگ می‌شوند و سپس نیرو بشدت کاهش پیدا می‌کند تا نفوذ کامل ایجاد شود. مکانیزم‌های جذب انرژی در این مرحله، ایجاد پلاگ برشی، ایجاد و باز شدگی پتال و اصطکاک مابین نفوذ کننده و ورق کامپوزیتی هستند. گسیختگی ایجاد شده در کامپوزیت توسط نفوذ کننده سرتخت در شکل ۹ مشخص است. ضخامت پلاگ جدا شده از لایه‌های رویی $2/3$ میلی‌متر، معادل 55% کل ضخامت کامپوزیت است.

در نفوذ کننده‌های دارای دماغه تیز، ناحیه شیب‌دار ابتدای منحنی نیرو- جابجایی کمتر بوده و در نتیجه خیز ورق کمتر است. بعد از این ناحیه، ضمن افزایش عمق نفوذ، نیروی تماسی با شیب خیلی کمتری افزایش پیدا می‌کند. این نیرو صرف باز کردن پتال‌ها می‌گردد. در این نفوذ کننده‌ها، مکانیزم گسیختگی از نوع تشکیل چهار پتال متقارن است. اندازه پتال‌های به وجود آمده توسط نفوذ کننده‌های با دماغه مختلف، با یکدیگر متفاوت هستند. شکل ۱۰ نمونه از گسیختگی‌های نفوذ کننده‌های تیز را نشان می‌دهد.

نفوذ کننده با دماغه نیم‌کروی، مشابه نفوذ کننده‌های تیز، چهار پتال متقارن در سطح پشتی هدف ایجاد می‌کند (شکل ۱۱). با این تفاوت که در این حالت خیز کلی هدف قبل از سوراخ شدن، بیشتر از خیز ایجاد شده



شکل ۹ تأثیر نفوذ کننده سرتخت بر ورق کامپوزیتی

جدول 5 انرژی جذب شده از نفوذ کننده‌های مختلف طی مرحله افزایش خیز و

ردیف	نوع نفوذ کننده	انرژی افزایش خیز (i)	انرژی گسترش خرابی (i)	R _d (*) (درصد)	مرحله گسترش خرابی	
					انرژی گسترش خرابی (i)	R _d (*) (درصد)
1	مخروطی 37°	3/4	36/6	78		
2	اجیوال CRH=2/5	3/9	23/1	66		
3	اجیوال CRH=1/5	3/7	23/2	67		
4	نیم‌کروی	4/4	23/0	68		
5	مخروطی 90°	3/5	21/9	72		
6	تخت	7/2	4/1	23		

(*) R_d: عبارت است از درصد انرژی جذب شده در مرحله گسترش خرابی، نسبت به کل انرژی جذب شده برای هر نفوذ کننده.

همان‌طور که نتایج جدول 5 نشان می‌دهند، گسترش خرابی زمانی که سیسختگی پتالینگ رخ می‌دهد، نسبت به زمانی که پلاگ تشکیل می‌شود، انرژی بیشتری از نفوذ کننده جذب می‌کند. در نفوذ کننده‌های با دماغه تیزتر قسمت اعظم انرژی توسط گسترش خرابی‌های به وجود آمده جذب می‌گردد.

4-4- نیروی اصطکاک

نیروی اصطکاک مابین نفوذ کننده و هدف نیز یکی از عوامل جذب انرژی است. مقدار این نیرو وابسته به جنس دو سطح در تماس و نیروی عمودی بین دو سطح است. بعد از عبور کامل دماغه نفوذ کننده از درون کامپوزیت، تنها عاملی که با حرکت نفوذ کننده مخالفت می‌کند نیروی اصطکاک بین بدنه نفوذ کننده و سطح سوراخ شده کامپوزیت است. این نیرو به صورت قسمت تقریباً افقی، در انتهای منحنی‌های نیرو تغییر مکان، در شکل 7 مشخص است. با ادامه اعمال نیرو، زمانی که کل سطح پتال‌ها با ساقه نفوذکننده تماس می‌یابد، نمودار نیرو-جابجایی کاملاً افقی می‌شود. نیروی اصطکاک معادل با مقدار نیرویی است که این بخش افقی نشان می‌دهد. مقادیر نیروی اصطکاک در انتهای نفوذ، به ترتیب نیروی بیشتر به کمتر، در جدول 6 ارائه شده است.

با توجه به ثابت بودن جنس نفوذ کننده و کامپوزیت در تمامی آزمایش‌ها، تنها عاملی که باعث تغییر نیروی اصطکاک در انتهای فرآیند نفوذ می‌شود، نیروی عمودی وارده توسط پتال‌ها بر سطح بدنه نفوذ کننده است. در نفوذ کننده سر تخت، به دلیل ضخامت کم پتال‌ها نسبت به بقیه حالات، کمترین نیروی اصطکاک مشاهده می‌شود.

جدول 6 نیروی اصطکاک در انتهای فرآیند نفوذ

ردیف	نوع نفوذ کننده	نیروی اصطکاک (N)	R _{fric} (*)
1	مخروطی 37°	980	3/6
2	اجیوال CRH=2/5	770	2/9
3	اجیوال CRH=1/5	680	2/5
4	نیم‌کروی	590	2/2
5	مخروطی 90°	370	1/4
6	تخت	270	1

(*) R_{fric}: عبارت است از نسبت نیروی اصطکاک وارد شده بر هر نفوذ کننده، تقسیم بر نیروی اصطکاک نفوذ کننده‌ای که کمترین مقدار را ارائه می‌کند.

را ارائه می‌کند. همان‌طور که منحنی نیرو-جابجایی نشان می‌دهد، شکل خاص دماغه نفوذ کننده اجیوال، یعنی مماس بودن دماغه بر بدنه نفوذ کننده، باعث می‌شود که بعد از عبور از ناحیه خطی، ادامه نفوذ با نیروی تقریباً ثابتی انجام بپذیرد. در حالی که حالت پله‌ای موجود در محل اتصال دماغه به بدنه در نفوذ کننده‌های سرمخروطی، باعث انتقال نیروی بیشینه به انتهای فرآیند نفوذ می‌گردد.

4-3- انرژی جذب شده

مقداری از انرژی نفوذ کننده که توسط ورق کامپوزیتی جذب شده، یا به عبارت دیگر مقدار کاری که نفوذ کننده برای نفوذ کامل انجام داده است، از محاسبه سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی هریک از نفوذ کننده‌ها محاسبه می‌شود. جدول 4 انرژی جذب شده از نفوذ کننده‌های مختلف، به ترتیب بیشترین انرژی جذب شده، را نشان می‌دهد.

هنگامی که طول دماغه نفوذ کننده بزرگتر باشد، نفوذ کامل به تعویق خواهد افتاد که باعث افزایش انرژی جذب شده می‌گردد. از این رو، زمانی که کل فرآیند نفوذ در نظر گرفته شود، بیشترین انرژی از نفوذ کننده سرمخروطی 37° و کمترین انرژی از نفوذ کننده سر تخت جذب می‌شود.

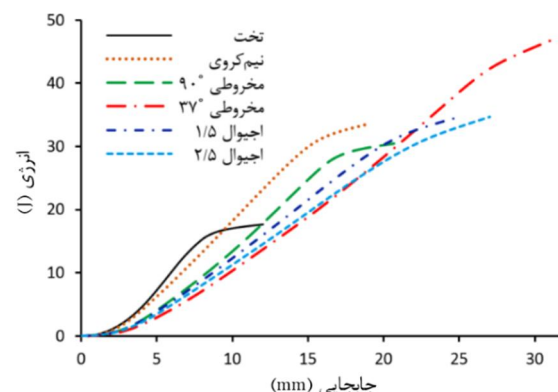
شکل 12 نمودار انرژی جذب شده برحسب جابجایی نفوذ کننده‌های مختلف را نشان می‌دهد. زمانی که فرآیند نفوذ نفوذ کننده‌های مختلف در جریان است، مقایسه انرژی جذب شده از آن‌ها در یک جابجایی (عمق نفوذ) یکسان، نشان می‌دهد که هدف کامپوزیتی انرژی بیشتری از نفوذ کننده‌های کندتر جذب می‌کند.

در اکثر نفوذ کننده‌ها، بیشترین انرژی طی مرحله گسترش خرابی (ناحیه C تا E) از نفوذ کننده جذب می‌گردد. انرژی جذب شده در این مرحله و درصد سهم آن از کل انرژی و همچنین مقدار انرژی جذب شده در ناحیه افزایش خیز (مرحله A تا C)، در جدول 5 ارائه شده است.

جدول 4 انرژی جذب شده از نفوذ کننده‌های مختلف تا نفوذ کامل

ردیف	نوع نفوذ کننده	انرژی جذب شده (i)	R _E (*)
1	مخروطی 37°	46/8	2/6
2	اجیوال CRH=2/5	34/7	2/0
3	اجیوال CRH=1/5	34/4	1/9
4	نیم‌کروی	33/6	1/9
5	مخروطی 90°	30/4	1/7
6	تخت	17/7	1

(*) R_E: عبارت است از نسبت انرژی هر نفوذ کننده، تقسیم بر انرژی نفوذ کننده‌ای که کمترین مقدار را ارائه می‌کند.



شکل 12 منحنی انرژی جذب شده برحسب جابجایی برای نفوذ کننده‌های مختلف

4-5 جابجایی نفوذ کننده

مقدار جابجایی نفوذ کننده‌های مختلف تا ایجاد نفوذ کامل، وابسته به طول دماغه نفوذ کننده با یکدیگر متفاوت هستند. جدول 7، مقدار جابجایی تا نفوذ کامل و همچنین مقدار جابجایی در لحظه نیروی حداکثر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نفوذ کننده‌هایی که دارای طول دماغه بزرگ‌تری هستند، به جابجایی بیشتری تا نفوذ کامل نیاز دارند. در حالتی که نفوذ کننده‌ها دارای طول دماغه مساوی هستند، نفوذ کننده‌هایی که دماغه و بدنه آنها بر هم مماس است، جابجایی کمتری برای نفوذ کامل نیاز دارند. این حالت را با مقایسه نفوذ کننده مخروطی 37° با اجیوال $2/5$ و نفوذ کننده مخروطی 90° با نیم‌کروی، در جدول 7، می‌توان مقایسه نمود. جابجایی نفوذ کننده در لحظه نیروی حداکثر نیز وابسته به طول دماغه بوده و برای نفوذ کننده‌هایی که دارای طول دماغه بزرگ‌تری هستند، نیروی تماسی حداکثر با تأخیر رخ می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرآیند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی با الیاف بافته شده، به شکل تجربی، مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های نفوذ با نرخ بارگذاری پایین، توسط نفوذ کننده‌های استوانه‌ای با شش هندسه دماغه تخت، نیم‌کروی، مخروطی با زاویه دماغه‌های 37° و 90° درجه و اجیوال با شعاع کالیبر $1/5$ و $2/5$ انجام شده و رفتار هدف کامپوزیتی، از جمله میزان جذب انرژی، نیروی تماسی، مکانیزم‌های گسیختگی و غیره، برای نفوذ کننده‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی نتایج نشان دادند که منحنی نیرو-جابجایی نفوذ کننده، در حالت کلی، از 5 ناحیه تشکیل می‌شود که وابسته به شکل هندسی دماغه نفوذ کننده، در برخی از نفوذ کننده‌ها تعدادی از این نواحی دیده نمی‌شوند و یا طولی‌تر یا کوتاه‌تر می‌گردند.

در قسمت پرشیب اول منحنی نیرو-تغییر مکان، خیز ورق کامپوزیتی افزایش می‌یابد. در قسمت کم‌شیب میانی منحنی، پتال‌های ایجاد شده با نیرویی تقریباً ثابت گسترش پیدا می‌کنند. قسمت پرشیب انتهای منحنی مربوط به زمانی است که ساقه نفوذ کننده به کامپوزیت می‌رسد و تنها نیروی مقاوم نیروی اصطکاک است.

در نفوذ کننده سرتخت، گسیختگی پلاگ برشی در لایه‌های جلویی کامپوزیت ایجاد می‌گردد و لایه‌های پشتی دچار گسیختگی پتالینگ می‌شوند. در نفوذ کننده‌های دارای دماغه تیز، مکانیزم گسیختگی از نوع

جدول 7 مقادیر جابجایی تا نفوذ کامل و جابجایی در لحظه نیروی حداکثر

ردیف	نوع نفوذ کننده	جابجایی تا نفوذ کامل (mm)	جابجایی در لحظه نیروی حداکثر (mm)
1	مخروطی 37°	30/9	23/1
2	اجیوال $CRH=2/5$	26/7	14/8
3	اجیوال $CRH=1/5$	24/5	14/8
4	مخروطی 90°	20/4	13/5
5	نیم‌کروی	18/8	9/2
6	تخت	11/8	5/9

تشکیل چهار پتال متقارن است. اندازه پتال‌های به وجود آمده توسط نفوذ کننده‌های مختلف، وابسته به شکل هندسی دماغه آن‌ها، با یکدیگر متفاوت هستند.

بیشترین نیروی تماسی را به ترتیب نفوذ کننده‌های تخت، نیم‌کروی و مخروطی 90° ارائه می‌کنند. نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر $2/5$ به نیروی کمتری برای نفوذ کامل به درون کامپوزیت نیازمند است. از این جهت این نفوذ کننده بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

کار مورد نیاز برای نفوذ کامل نفوذ کننده درون هدف، هنگامی که طول دماغه نفوذ کننده بزرگتر باشد، بیشتر است. ولیکن در یک جابجایی (عمق نفوذ) یکسان، هدف کامپوزیتی انرژی بیشتری از نفوذ کننده‌های کندتر جذب می‌کند.

نفوذ کننده مخروطی 37° بیشترین انرژی را برای نفوذ نیاز دارد و مقدار آن $2/6$ برابر انرژی مورد نیاز نفوذ کننده تخت است که کمترین مقدار را دارا می‌باشد. اگرچه نفوذ کننده‌های کند کمترین انرژی را برای نفوذ کامل لازم دارند، اما نیروی مورد نیاز آن‌ها برای نفوذ کامل، از سایر نفوذ کننده‌ها بیشتر است.

نوع خرابی ایجاد شده توسط نفوذ کننده‌های با دماغه طولی‌تر به شکلی است که باعث می‌شود نیروی اصطکاک این نفوذ کننده‌ها در انتهای فرآیند نفوذ، بیشتر باشد. در نفوذ کننده سرتخت، به دلیل ضخامت کم پتال‌ها نسبت به بقیه حالات، کمترین نیروی اصطکاک مشاهده می‌شود.

6- مراجع

- [1] J. N. Baucom, M. A. Zikry, Evolution of Failure Mechanisms in 2D and 3D Woven Composite Systems Under Quasi-Static Perforation, *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, pp. 1651-1674, 2003.
- [2] J. R. Xiao, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading, *Composite Structures*, Vol. 78, pp. 182-196, 2007.
- [3] R. A. W. Mines, A. M. Roach, N. Jones, High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 561-588, 1999.
- [4] S. Trimula, H. Madanaraj, A. K. Kaw, G. H. Besterfield, J. Ye, Effect of extrinsic and intrinsic factors on an indentation test, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 33, No. 24, pp. 3497-3516, 1996.
- [5] H. M. Wen, T. Y. Reddy, S. R. Reid, P. D. Soden, Indentation, Penetration and Perforation of Composite Laminate and Sandwich Panels under Quasi-Static and Projectile Loading, *Key Engineering Materials*, Vol. 141-143, pp. 501-552, 1997.
- [6] S.-H. Lee, Y. Aono, H. Noguchi, S.-K. Cheong, Damage Mechanism of Hybrid Composites with Nonwoven Carbon Tissue Subjected to Quasi-static Indentation Loads, *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, pp. 333-349, 2003.
- [7] P. Chen, Z. Shen, J. Xiong, S. Yang, S. Fu, L. Ye, Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation, *Composite Structures*, Vol. 75, pp. 489-495, 2006.
- [8] C. Lin, M. S. H. Fatt, Perforation of Composite Plates and Sandwich Panels under Quasi-static and Projectile Loading, *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, pp. 1801-1840, 2006.
- [9] A. R. Sabet, M. H. Beheshty, H. Rahimi, Experimental study of sharp-tipped projectile perforation of GFRP plates containing sand filler under high velocity impact and quasi-static loadings, *Polymer Composites*, Vol. 30, pp. 1497-1509, 2009.
- [10] R. J. Muhi, F. Najim, M. F. S. F. de Moura, The effect of hybridization on the GFRP behavior under high velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, pp. 798-803, 2009.
- [11] A. F. Manzella, B. A. Gama, J. W. Gillespie Jr, Effect of punch and specimen dimensions on the confined compression behavior of S-2 glass/epoxy composites, *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1726-1737, 2011.
- [12] J. B. Jordan, C. J. Naito, B. Z. Haque, Quasi-static, low-velocity impact and ballistic impact behavior of plain weave E-glass/phenolic composites,

- [14] M. H. Pol, G. Liaghat, E. Zamani, A. Ordys, Investigation of the ballistic impact behavior of 2D woven glass/epoxy/nanoclay nanocomposites, *Journal of Composite Materials*, 2014.
- [15] M. H. Pol, G. H. Liaght, F. Hajjarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares Mechanical Engineering*, 2012. (In Persian)
- Journal of Composite Materials*, 2013.
- [13] A. Khodadadi, G. H. Liaghat, M. Akbari, M. Tahmasebi, Numerical and experimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, *Modares Mechanical Engineering*, 2013. (In Persian)