ماهنامه علمى پژوهشى

**مهندسی مکانیک مد**رس



mme.modares.ac.ir

# بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی نفوذ کننده با هندسههای مختلف، درون چندلایه کامیوزیتی شیشه ایو کسی

عرفان مهربانى يگانه<sup>1</sup>، غلامحسين لياقت<sup>2\*</sup>، محمدحسين يل<sup>3</sup>

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 يستى ghlia530@modares.ac.ir ،14115-141

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، تأثیر هندسه نفوذ کننده بر فرآیند نفوذ شبه استاتیکی در کامپوزیت لایهای شیشه/ لپوکسی با الیاف بافته شده، به شکل تجربی، مورد مطالعه قرار میگیرد. آزمایش های نفوذ با نرخ بارگذاری پایین، توسط نفوذ کنندههای استوانهای با شش هندسه دماغه تخته نیمکروی، مخروطی با زاویه دماغههای 37 و 90 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 و 2/5، انجام شده و رفتار چندلایه کامپوزیتی، از جمله میزان جذب	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 15 شهریور 1393 پذیرش: 17 آبان 1393 ارائه در سایت: 09 آذر 1393
انرژی، نیروی تماسی، مکانیزمهای گسیختگی و نیروی اصطکاک، برای نفوذ کنندههای 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 میدهند که	<i>کلید واژگان:</i> نفوذ شبه استاتیک
منحنی نیرو - جابجایی نفوذ کننده، در حالت کلی، از پنج ناحیه تشکیل میشود که وابسته به شکل هندسی دماغه نفوذ کننده، در برخی از نفوذ کنندهها تعدادی از این نواحی دیده نمیشوند و یا طویل تر یا کوتاهتر میگردند. بیشترین نیروی تماسی را نفوذ کنندهای کند ارائه میکنند. نفوذ	هندسه نفوذ کننده نیروی تماسی جذب اندفت
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 میدهد. مقایسه انرژی جذب شده نشان میدهد که 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 کامل نیاز دارد که مقدار آن 2/6 برابر انرژی مورد نیاز نفوذ کننده	جنب ارری چندلایه کامپوزیتی بافته شده
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 Yeganeh<sup>1</sup>, Gholam Hosein Liaghat<sup>1\*</sup>, Mohammad Hosein Pol<sup>2</sup>

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** ABSTRACT

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

This paper, experimentally evaluates the effects of indenter geometry on guasi-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.

باعث گردیده است که همواره، محققین به دنبال یافتن راهی برای افزایش مقاومت سازهها و تجهیزات، در برابر خطرات ناشی از خرابیهای مختلف ىاشند.

geometries, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015 (In Persian)

#### 1– مقدمه

پیشرفت روز افزون علوم مختلف، باعث پیشرفتهای زیادی در زمینه طراحی سازههای 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 کامیوزیتهای چند لایه است.

بارگذاری شبه استاتیکی پلاستیکهای تقویت شده با الیاف<sup>1</sup> یک روش مناسب برای تعیین رفتار این گونه مواد، تحت یک دامنه وسیع از شرایط مختلف بارگذاری است. بارگذاریهای درون صفحه<sup>2</sup>، خمش سه نقطه<sup>3</sup>و سوراخ کردن عرضی<sup>4</sup> از جمله بارگذاریهایی هستند که میتوانند به شکل شبه استاتیکی انجام شوند. یکی از آزمایشهایی که برای تعیین خواص در جهت ضخامت مواد، مخصوصاً كامپوزیتهای چند لایه، استفاده می شود، آزمایش نفوذ شبه استاتیک<sup>5</sup> 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 تکیه گاه، 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 مىشود.

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، نیم کروی و مخروطی بودهاند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ کننده سرتخت بیشترین ضریب تشدید دینامیکی<sup>6</sup> را نسبت به دو نفوذ کننده دیگر ارائه می کند.

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. آن ها به این نتیجه رسیدند که جابجایی نسبی مابین الیاف و ماتریس با افزايش شعاع نفوذ كننده و همچنين افزايش نسبت مدول الاستيك الياف به ماتریس، افزایش پیدا می کند.

ون و همکارانش [5] به بررسی نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی ضربه زنندههای دارای دماغه تخت، نیم کروی و مخروطی بر سازهی ساندویچی پرداختند. سازه مذکور دارای رویههایی از جنس کامپوزیت شیشه/ پلیاستر و هسته فوم پی وی سی<sup>8</sup> بودند. نتایج آنها نشان داد، هنگامی که شعاع نفوذ

کننده بیشتر از ضخامت هسته است، نفوذ کننده دارای دماغه نیم کروی 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 تقريباً برابر است.

لی و همکارانش [6] فرآیند فشار شبه استاتیکی نفوذ کننده <sup>9</sup> کروی را در مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دو نوع کامپوزیت کربن/ ایوکسی با الیاف تک جهته و کامیوزیت 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 زیکری [1] نفوذ شبه استاتیکی نفوذ کننده با دماغه نیم کروی را در کامپوزیتهای با الیاف شیشه دو و سه بعدی بررسی کردند. نتایج آزمایش های آن ها 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 متمركز 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، رابطهای 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 می شود. آنها پیشنهاد دادند که مقاومت کامپوزیت در برابر نفوذ شبه استاتیکی را به خوبی می توان با نیروی تماسی حداکثر توصیف کرد. بیشینه نیرو برای کامپوزیتهای ترد كمتر 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.

ژیائو و همکارانش [2] خرابی و لایه لایه شدگی کامپوزیت شیشه اپوکسی را تحت بارگذاری پانچ برشی<sup>10</sup> 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 كننده سر مخروطی بر اهداف كامپوزيتی شيشه/ پلیاستر، تقويت شده با پرکنندههای شنی<sup>11</sup>، پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که استفاده از این پركنندهها باعث بهبود عملكرد كامپوزيت مىشود. ضمن اينكه جذب انرژى ورق کامپوزیتی، هنگامی که از پرکننده با ابعاد کوچکتر استفاده کردند، بیشتر شد.

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

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.29.5

<sup>1-</sup> Fiber reinforced plastics

<sup>2-</sup> In-plane loadings 3- Three-point bending

<sup>4-</sup> Transverse perforation

<sup>5-</sup> Quasi-static indentation

<sup>6-</sup> Dynamic enhancement factor

<sup>7-</sup> Polyester 8- PVĆ

<sup>9-</sup> Indenter 10- Punch-shear loading

<sup>11-</sup> Sand fillers

کنندههای دارای دماغه تخت، نیم کروی و مخروطی را در کامپوزیتهای هیبریدی متشکل از الیاف شیشه و کولار<sup>1</sup>، 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 شبیه سازی عددی نشان دادند که تنش داخلی نمونه، با تغییر این عوامل، تغییر می کند.

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 می شود.

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 می شود الیاف پارچه علاوه بر تنش کششی، تحت تنش برشی نیز قرار بگیرند.

بررسی خواص مکانیکی و ضربه ای کامپوزیتهای چند لایه شیشه *ا* اپوکسی و تأثیر افزودن تقویت کننده هایی مانند ذرات نانو بر این مواد توسط پل و همکاران به صورت تحلیلی [14] و تجربی [15]، انجام گرفت. مطالعات آن ها 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، نیم کروی، مخروطی با زاویه دماغههای 37 و 90 درجه و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 و 2/5، مورد استفاده قرار می گیرد. بررسی تغییرات جذب انرژی، نیروی تماسی، مکانیزمهای گسیختگی، نیروی اصطکاک و تقسیم بندی مراحل مختلف نفوذ برای تعداد بیشتری از نفوذ کنندهها با هندسههای مختلف با امکان در نظر گرفتن تأثیرات تغییر زوایه مخروط و شعاع کالیبر دماغه در این تحقیق انجام شده است.

# 2- روش ساخت و مواد اولیه

#### 2-1- مواد اوليه

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 2000 gr/m<sup>2</sup> و چگالی حجمی kg/m<sup>3</sup> است. رزین

1- Kevlar

پلیمری از دو بخش الف) یک دیکلیسیدیل اتر بیسفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون 828، تولید شده توسط شرکت شل، به عنوان پایه اپوکسی و ب) یک پلیاکسیپروپیلن دیامین با وزن مولکولی gr/mol و با نام تجاری جفامیندی 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 كامپوزيتى

ورق های 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 می گیرد. پخت ماده مرکب به مدت 150 دقیقه در دمای ع°80 و فشار bar 2/5 و سپس 150 دقیقه دیگر در دمای ع°120 و فشار bar 3/1 در اتوکلاو انجام می شود. در نهایت بعد از پخت، نمونه ها در اندازه 2m 21×12، برای قرار گیری در فیکسچر<sup>2</sup>, بریده می شوند. ضخامت نهایی محصول کامپوزیتی، 4/2 میلی متر است.

# 2-3- ساخت فيكسچر

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

#### 2-4- ساخت نفوذ كنندهها

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 راکولسی سختکاری شدهاند.

نفوذ کنندههای مورد استفاده در این تحقیق دارای دماغههای تخت، نیم کروی، مخروطی با زاویه دماغه °37، مخروطی با زاویه دماغه °90، اجیوال<sup>3</sup> با شعاع کالیبر<sup>4</sup> 2/5 و اجیوال با شعاع کالیبر 1/5 می،باشد. مطابق



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

شکل 2، شعاع کالیبر دماغه با رابطه CRH=S/D تعریف می شود که S شعاع دماغه و D قطر نفوذ کننده است. این نسبت برای دماغه تخت، صفر و برای دماغه نیم کروی، 0/5 می باشد.

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- آزمایشهای تعیین خواص کامپوزیت

#### 3 -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.

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



شكل 2 پارامترهاى نفوذ كننده اجيوال براى تعيين شعاع كاليبر دماغه



**شکل3** نفوذ کنندههای ساخته شده و نقشه آنها، الف) دماغه تخت، ب) دماغه نیم کروی، 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)

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 می گردد. تعداد 5 نمونه با ابعاد 2/2×25 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 تب <sup>1</sup> کامپوزیتی با الیاف دارای جهت گیری <sup>°</sup>44، به ابعاد 2/2×5 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 از ودسل<sup>2</sup> و کرنش قطعه توسط اکستانوری <sup>°</sup>10 میلیمتر بر لودسل<sup>2</sup> و کرنش قطعه توسط اکستنسومتر<sup>°</sup> اندازه گیری شدند.

# 3-1-3- آزمایش برش

آزمایش برش طبق استاندارد ASTM-D3518 انجام می شود. در این حالت 5 عدد نمونه استاندارد با جهت گیری الیاف <sup>°</sup>45 ساخته و تحت کشش با نرخ بارگذاری 2 میلی متر بر دقیقه قرار گرفتند. ابعاد و هندسه نمونه ها همانند آزمایش کشش در جهت الیاف است.

# 3-2- آزمایش نفوذ شبه استاتیکی

ورق های 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 می کنند. نیروی وارد شده به هدف، توسط لودسل موجود در بالای محل اتصال نفوذ کننده، اندازه گیری می شود. آزمایش مذکور تا نفوذ کامل نفوذ کننده درون کامپوزیت و ثابت شدن نمودار نیرو - جابجایی، ادامه می یابد.

ن و محصول کامپوزیتی	<b>دول 1</b> چگالی الیاف، رزیر
چگالی (kg/m³)	مادہ
1701	الياف شيشه
1136	رزين



**شکل4** آزمایش نفوذ شبه استاتیک

1- Tab 2- Load cell

3- Extensometer

# 4- نتايج و بحث

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



دچار خیز کلی<sup>1</sup> الاستیک میشود و گسیختگی یا خرابی در هدف ایجاد نمی گردد. 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 سرنیم کروی 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 برحسب 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 شکل گیری پلاگ برشی در لایههای جلویی کامپوزیت است.

189

DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.29.5

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 طویلتر 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 میابد 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

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 می کند. این نیرو صرف باز کردن پتالها می گردد. 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 یک 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

توسط نفوذ کنندههای تیز است. عملکرد نفوذکنندههای 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 نفوذکننده 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.

همان گونه که نتایج شکل ۷ و جدول ۳ نشان می دهد، نفوذ کنندههای کند مانند نفوذ کننده سرتخت و سرنیم کروی، نیروی تماسی بیشتری ایجاد می کنند. این نوع نفوذ کنندهها، به علت کندی دماغه، باعث به وجود آمدن خیز بیشتر ورق قبل از نفوذ (ایجاد گسیختگی در الیاف) می شوند. از این رو نیروی بیشتری به ورق کامپوزیتی وارد می شود. تیزی بیشتر دماغه، الزاماً به معنی نیروی تماسی کمتر نیست. نفوذ کننده با دماغه مخروطی °۳۷ اگرچه دارای تیزترین دماغه است ولیکن نیرو تماسی آن بیشتر از نفوذ کنندههای اجیوال است.

نفوذ کننده اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ 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 <sup>°</sup>۹۰ بر ورق کامپوزیتی



شکل ۱۱ تأثیر نفوذ کننده سرنیم کروی بر ورق کامپوزیتی

<b>جدول ۲</b> حداکثر نیروی تماسی برای نفود کنندههای محتلف			جد
R <sub>cf</sub> (*)	نیروی تماسی حداکثر (N)	نوع نفوذ كننده	رديف
١/٨	۳۰۳۰	تخت	١
1/0	101.	نيمكروى	٢
1/4	220.	مخروطی <sup>°۹۰</sup>	٣
1/5	2.4.	مخروطی <sup>°</sup> ۳۷	۴
1/1	19	اجيوال CRH=1/۵	۵
١	14	اجيوال CRH=۲/۵	۶

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

را ارائه می کند. همان طور که منحنی نیرو- جابجایی نشان می دهد. شکل خاص دماغه نفوذ کننده اجیوال، یعنی مماس بودن دماغه بر بدنه نفوذ کننده، باعث می شود 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 کننده های سرمخروطی، باعث انتقال نیروی بیشینه به انتهای فرآیند نفوذ می گردد.

### 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 می گردد. 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 سرتخت جذب می شود.

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 می گردد. 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.

$R_{E}^{(*)}$	انرژی جذب شده (J)	نوع نفوذ كننده	رديف
2/6	46/8	مخروطی <sup>°</sup> 37	1
2/0	34/7	اجيوال CRH= <b>2/5</b>	2
1/9	34/4	اجيوال CRH= <b>1/5</b>	3
1/9	33/6	نيمكروى	4
1/7	30/4	مخروطی <sup>°</sup> 90	5
1	17/7	تخت	6

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

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



شكل 12 منحنى انرژى جذب شده برحسب جابجايي براى نفوذ كنندههاى مختلف

مرحله گسترش خرابی				
(*) R <sub>d</sub> (درصد)	انرژی گسترش خرابی (l)	انرژی افزایش خیز (I)	نوع نفوذ كننده	رديف
78	36/6	3/4	مخروطی <sup>°</sup> 37	1
66	23/1	3/9	اجيوال CRH= <b>2/5</b>	2
67	23/2	3/7	اجيوال CRH= <b>1/5</b>	3
68	23/0	4/4	نيمكروى	4
72	21/9	3/5	مخروطی °90	5
23	4/1	7/2	تخت	6
				(+)

(\*): R 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 گسیختگی 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 می کند 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 می یابد، نمودار نیرو - جابجایی کاملاً افقی می شود. نیروی اصطکاک معادل با مقدار نیرویی است که این بخش افقی نشان می دهد. 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 می شود، نیروی عمودی وارده توسط پتالها بر سطح بدنه نفوذ کننده است. در نفوذ کننده سرتخت، به دلیل ضخامت کم پتالها نسبت به بقیه حالات، کمترین نیروی اصطکاک مشاهده می شود.

جدول 6 نیروی اصطکاک در انتهای فرآیند نفوذ

$R_{fric}$ (*)	نیروی اصطکاک (N)	نوع نفوذ كننده	رديف
3/6	980	مخروطی <sup>°</sup> 37	1
2/9	770	اجيوال CRH= <b>2/5</b>	2
2/5	680	اجيوال CRH= <b>1/5</b>	3
2/2	590	نيمكروى	4
1/4	370	مخروطی °90	5
1	270	تخت	6

(\*): Rfric عبارت است از نسبت نیروی اصطکاک وارد شده بر هر نفوذ کننده، تقسیم بر نیروی اصطکاک نفوذ کننده ی که کمترین مقدار را ارائه میکند.

191

#### 4-5 جابجايي نفوذ كننده

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.

همان طور که مشخص است، نفوذ کنندههایی که دارای طول دماغه بزرگ تری 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 نیم کروی، در جدول 7، می توان 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- نتيجه گيرى

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، نیم کروی، 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 طویل تر یا کوتاهتر می گردند.

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 پلاک برشی در لایههای جلویی کامپوزیت ایجاد می گردد و لایههای پشتی دچار گسیختگی پتالینگ می شوند. در نفوذ کنندههای دارای دماغه تیز، مکانیزم گسیختگی از نوع

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

جابجایی در لحظه نیروی حداکثر (mm)	جابجایی تا نفوذ کامل (mm)	نوع نفوذ كننده	رديف
23/1	30/9	مخروطی <sup>°</sup> 37	1
14/8	26/7	اجيوال CRH= <b>2/5</b>	2
14/8	24/5	اجيوال CRH= <b>1/5</b>	3
13/5	20/4	مخروطی °90	4
9/2	18/8	نيمكروى	5
5/9	11/8	تخت	6

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، نیم کروی 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 <sup>°</sup>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 طویل تر به شکلی است که باعث می شود نیروی اصطکاک این نفوذ کنندهها در انتهای فرآیند نفوذ، بیشتر باشد. در نفوذ کننده سر تخت، به دلیل ضخامت کم پتال ها نسبت به بقیه حالات، کمترین نیروی اصطکاک مشاهده می شود.

#### 6- مراجع

- 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 quasistatic 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 Quasistatic 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 sharptipped 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. Hajiarazi, 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 exprimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, Modares Mechanical Engineering, 2013. (In Persian)