جلد 7، شماره 1، بهار 99، ص‌ص 675- 682

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری **کامپوزیـــت**

http://jstc.iust.ac.ir

بررسی تجربی تاثیر هم زمان نانوسیلیکا و نانوگرافن اصلاح شده بر کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت تحت ضربه سرعت بالا

سید امیرحسین کرسوی کاشانی[1]، رضا اسلامی فارسانی[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

2- دانشیار، مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19919-43344، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/08/08

پذیرش: 97/11/04

کلیدواژگان:

کامپوزیت چند مقیاسی

ضربه سرعت بالا

الیاف بازالت

نانوسیلیکا

نانوگرافن کامپوزیت

چکیده

مواد مرکب به عنوان جایگزینی سبک و بهینه شده برای مواد متداول‌تر نظیر فلزات، نیاز به بکارگیری روش‌های گوناگون جهت تقویت استحکام را دارند. افزودن نانو مواد، به عنوان روشی نوین جهت ارتقای استحکام مواد مرکب استفاده می‌شود. از طرفی اهمیت پدیده ضربه و کاربردهای فراوان آن در صنایع گوناگون بر کسی پوشیده نیست. از این رو در این پژوهش، کامپوزیت چند مقیاسی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت حاوی مجموعاً 1% وزنی نانومواد اصلاح سطحی شده (نانوذرات سیلیکا و نانوصفحات گرافن)، تحت آزمون ضربه سرعت بالا قرار گرفت. ابتدا 5 سری نمونه حاوی 6 لایه از الیاف بازالت به روش لایه چینی دستی ساخته شده و دو نوع پرتابه از جنس آلومینیوم با دماغه اُجیوال و سر کروی به ترتیب با جرم‌های 26.7 و 26.3 گرم با سرعت 116 m/s به نمونه‌ها برخورد داده شد. به منظور بررسی عملیات اصلاح سطحی، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) انجام پذیرفت و به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز اثر افزودن نانو مواد بر اتصال بین زمینه و الیاف در مقیاس میکروسکوپیک بررسی شد. نتایج نشان داد، نمونه حاوی 0.7 درصد وزنی نانوسیلیکا و 0.3 درصد وزنی نانوگرافن بهترین عملکرد را در جذب انرژی حاصل از ضربه سرعت بالا با افزایش جذب 7.3% برای پرتابه اُجیوال و 20.4% برای پرتابه سر کروی نسبت به نمونه بدون نانو مواد از خود نشان می‌دهد.

Experimental investigation on simultaneous effect of functionalized nano silica and nano graphene on basalt fibers-epoxy composite under high velocity impact

Seyed Amirhossein Korsavi-Kashani[1], Reza Eslami-Farsani[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P. O. Box 19919-43344, Tehran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Multiscales composite
High velocity impact
Basalt fibers
Nano silica
Nano graphene

Abstract

Various methods have been proposed to enhance the strength of composites, which are considered as lightweight materials optimized to be used as an alternative for common materials such as metals. Addition of nano materials is a new method for improving the strength of composite materials. Furthermore, the importance of impact phenomena has been well appreciated, having many applications in various industries. Therefore, in this study, a multiscale basalt fibers reinforced epoxy composite, which matrix is loaded with surface-modified nano materials (nano silica and nano graphene) with a total weight percent of 1 wt.%, is analyzed under high velocity impact test. At first, five composite samples constituting 6 layers of basalt fibers, made by hand layup method, are impacted by two types of aluminum projectile with the speed of 116 m/s; ogival and hemispherical head projectiles with the mass of 26.7 and 26.3 grams, respectively. Then, Fourier transform infrared analysis (FT-IR) are performed so as to investigate the surface modification process, and the effect of introducing nano fillers on the joint between the matrix and the fibers is studied at the microscopic scale, using the scanning electron microscope (SEM). The results showed that the sample containing 0.7 wt.% nano silica and 0.3 wt.% nano graphene has the best performance in absorbing the energy resulted from the high velocity impact, with an increase in the absorption of approx. 7.3% for the ogival projectile and of 20.4% for the hemispherical as compared to sample without nanofillers.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Korsavi Kashani, S.A.H Eslami-Farsani, R., "Experimental investigation on simultaneous effect of functionalized nano silica and nano graphene on basalt fibers-epoxy composite under high velocity impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 675-682, 2020.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، دیگر استحکام بخشیدن و تقویت مواد مرکب تنها با حضور الیاف به طور معمول صورت نمی‌گیرد. با توجه به ویژگی اصلی مواد مرکب (نسبت استحکام به وزن بالا)، با اضافه نمودن نانو مواد به مواد مرکب، می‌توان این ویژگی را بهبود بخشید [1]. در این راستا تحقیقات گوناگونی پیرامون ترکیب نانو مواد با مواد مرکب صورت پذیرفته است. در پژوهشی افزودن نانو ذرات سیلیکا به رزین اپوکسی تا 20% وزنی، سبب بهبود مدول الاستیک تا 30% شده است [2]. به طور کلی افزودن نانو مواد به مواد مرکب سبب بهبود اتصال بین زمینه و الیاف و بالا رفتن مدول الاستیک [3] و همچنین بهبود خواص سطحی (سایش و اصطکاک) می‌شود [4].

همچنین کاربرد الیاف بازالت در مقایسه با سایر الیاف پرکاربرد نظیر شیشه و کربن با خواصی مانند زیست سازگاری، قابلیت بازیافت، روش تولید آسان، فراوانی در پوسته کره زمین، استحکام بیشتر نسبت به الیاف شیشه، قیمت تولید مناسب، مقاومت به ضربه نسبت به الیاف کربن و ... سبب توجه بیشتر به آن شده است [5]. نجفی و همکارانش در پژوهشی با بررسی اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و بازالت، دریافتند که رزین تقویت شده با الیاف بازالت تا 3.5 برابر مقاومت ضربه را نسبت به رزین تقویت شده با الیاف کربن بهبود می‌بخشد [6]. در پژوهشی دیگر کولمبو و همکارانش به بررسی پدیده خستگی بر روی دو نوع رزین ترموست اپوکسی و وینیل استر تقویت شده با الیاف بازالت پرداختند که شاهد عملکرد مطلوب تر رزین اپوکسی بودند [7]. Zhang و همکارانش نیز به بررسی اثر درصد وزنی الیاف بازالت بر روی خواص سطحی (سایش و اصطکاک) کامپوزیت زمینه پلی آمیدی تقویت شده با الیاف بازالت پرداختند. در این پژوهش درصد وزنی بهینه الیاف بازالت جهت مقاومت به سایش و اصطکاک، 10% تعیین شد [1].

پژوهش‌های مختلفی نیز در زمینه ضربه سرعت بالا انجام پذیرفته است. به دلیل نبود استاندارد مشخص، پارامترهای دخیل در این آزمون نظیر سرعت ورودی، جرم و هندسه پرتابه، تعداد تکرار آزمایش، هندسه هدف و شرایط محیطی در منابع گوناگون متفاوت است. وودوارد و همکارانش به بررسی اثر ضخامت بر میزان نفوذ ضربه سرعت بالا پرداختند و دو الگوی شکست متفاوت برای نمونه‌های ضخیم و نازک ارائه نمودند [8]. همچنین نیاک و همکارانش [9] به بررسی تحلیلی ضربه سرعت بالا و ایجاد روابط تحلیلی برای آن پرداختند. لیاقت و همکارانش نیز [10] به بررسی اثر ضربه سرعت بالا در نزدیکی حد بالستیک و بالای آن در کامپوزیت شیشه اپوکسی با ساختار مشبک استوانه‌ای پرداختند. در این پژوهش مشاهده شد که افزایش سرعت پرتابه (سرعت ورودی) با کاهش مساحت سطح شکست همراه خواهد بود.

مورد مهمی که در صنعت امروز بسیار حائز اهمیت بوده و سبب توسعه مواد مرکب نیز شده است، همان نسبت استحکام به وزن بوده که در ضربه نیز حائز اهمیت است. در این رابطه زارعی و همکارانش [11] به بررسی اثر ضربه سرعت بالا بر نمونه اپوکسی-الیاف شیشه و FML آلومینیوم- اپوکسی- الیاف شیشه پرداختند. در این پژوهش با وجود جذب انرژی بیشتر نمونه‌های FML، ولی نمونه‌های تمام کامپوزیتی دارای جذب انرژی ویژه (انرژی جذب شده نسبت به وزن) بهتری بوده‌اند.

افزودن نانو مواد و تاثیر آن بر ضربه سرعت بالا نیز در پژوهش‌های گوناگونی بررسی گردیده است. لیاقت و همکارانش [12] با افزودن نانو رس، تا 4% بهبود جذب انرژی را در شیشه اپوکسی مشاهده کردند. در پژوهش دیگری اثر هندسه دماغه پرتابه بر میزان جذب انرژی ضربه سرعت بالا بررسی شده است [13]. این پژوهش نشان داد که اولاً با افزایش سرعت ورودی، اختلاف در سرعت خروجی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هرچقدر سرعت پرتابه افزایش یابد، اثر هندسه دماغه کاهش می‌یابد. همچنین هر چقدر حد بالستیک افزایش یابد، سطح تخریب نیز افزایش می‌یابد. سطح تخریب نیز در پرتابه با دماغه مخروطی شکل کمترین و برای پرتابه سر کروی بیشترین میزان را داشت. به عبارت دیگر سطح تخریب با تمرکز تنش ناشی از نوع هندسه دماغه ارتباط مستقیم دارد. اثر نانو لوله‌های کربنی نیز در چند پژوهش بررسی شده است. در یک پژوهش اثر نانو لوله‌های کربنی بر زمینه پلی پروپیلن در نمونه حاوی 1% بهترین عملکرد را با 100% بهبود در جذب انرژی نسبت به نمونه خالص را دارا بوده است [14]. همچنین اثر نانو لوله‌های کربنی اصلاح سطحی شده بر کامپوزیت اپوکسی-الیاف شیشه بررسی شد. در این پژوهش نمونه حاوی 0.3% نانو لوله کربنی حد بالستیک را نسبت به نمونه خالص 6% افزایش داده است [15]. Pandya و همکارانش نیز با افزودن 0.5% وزنی رزین نانو لوله‌های کربنی چند جداره به اپوکسی-الیاف شیشه، تا 13% جذب انرژی ضربه‌ای را بهبود بخشیدند [16]. در مواردی هم افزودن نانو مواد تاثیرات مثبتی در جذب انرژی ضربه سرعت بالا نداشته است. مفتخریان و همکارانش [17] با افزودن 1.5% و 3% نانو رس به کامپوزیت پلی استر-الیاف شیشه آزمون سرعت بالا را انجام دادند که نمونه بدون نانو بهترین عملکرد را دارا بود. در پژوهشی دیگر Balaganesan و همکارانش [18] اثر افزودن 1-5% نانو رس به اپوکسی-الیاف شیشه در آزمون ضربه سرعت بالا را بررسی نمودند. در این پژوهش مکانیزم تغییر شکل ناشی از خمش بیش از تورق، ترک ماتریس و کشش الیاف، جذب انرژی حاصل از ضربه سرعت بالا را عهده دار بوده است.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، در این پژوهش به بررسی اثر افزودن دو نوع نانو مواد با ساختار هندسی متفاوت (نانوسیلیکا و نانوگرافن)، بر جذب انرژی حاصل از ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت پرداخته شده است. در این پژوهش انتظار می‌رود با افزودن درصد وزنی مشخص از نانو مواد به اپوکسی بتوان چقرمگی شکست کامپوزیت را بهبود داد.

2- بررسی تجربی

2-1- مواد

برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی EPIKOTE 828 شرکت هکسون و الیاف بازالت مدل BAS 350.1500.A با بافت اطلس شرکت باسالتکس استفاده شده است. همچنین نانو ذرات سیلیکا با قطر 60-70 nm و نانو صفحات گرافن با ضخامت 2-18 nm از شرکت نانوریسرچ‌متریال مورد استفاده قرار گرفت. به منظور عملیات اصلاح سطحی نیز 3-Aminopropyl trimethoxysilane شرکت مرک به عنوان عامل سیلانی بکار گرفته شد. مشخصات رزین، الیاف بازالت و عامل سیلانی به ترتیب در جدول‌های 1 تا 3 بیان شده است.

جدول 1 مشخصات رزین

Table 1 Epoxy resin specifications

مشخصه	مقدار
گرانروی (poise)	120-140
چگالی (kg/m^3)	1160
زمان ژله‌ای شدن در دمای محیط (min)	45

جدول 2 مشخصات الیاف بازالت

Table 2 Basalt fibers specifications

مشخصه	مقدار
نقطه ذوب (°C)	1350
ضخامت (mm)	0.19
وزن مخصوص سطحی (kg/m^2)	0.35
محدوده دمای کاری (°C)	-250 until +550
نوع آهار	silane

جدول 3 مشخصات عامل سیلانی

Table 3 Silane operator specifications

مشخصه	مقدار
فرمول شیمیایی	$H_2N(CH_2)_3Si(OC_2H_5)_3$
چگالی (kg/m^3)	946
درصد خلوص (%)	98.5

2-2- اصلاح سطحی نانو مواد

به منظور کاهش احتمال کلوخه شدن نانو مواد در بستر رزین، عملیات اصلاح سطحی بر روی نانو مواد انجام گرفت. ابتدا نانو مواد به نسبت وزنی 1:1 با عامل سیلانی در محیطی اسیدی با PH محلول حدود 4، حاوی 95% حجمی اتانول و 5% حجمی آب مقطر ترکیب شدند. سپس نانو ماده اصلاح شده به منظور جدا سازی از محیط فرآیند در دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفته و در نهایت به مدت 24 ساعت در 45 °C قرار داده شده تا به طور کامل خشک شود [19].

2-3- ساخت

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا رزین با نانو مواد به نسبت وزنی مشخص (جدول 4) به روش مکانیکی به مدت 30 دقیقه در 1800 rpm ترکیب می‌شود. سپس به منظور حذف و به حداقل رساندن کلوخه‌های احتمالی نانو مواد در بستر رزین، به مدت 1 ساعت در دستگاه اُلتراسونیک قرار می‌گیرد. سپس هاردنر بدون در نظر گرفتن نانو مواد افزوده شده، به نسبت وزنی 1:10 به رزین اضافه می‌گردد. نمونه‌های آزمایش در حضور 6 لایه از الیاف بازالت به روش لایه چینی دستی با رزین ترکیب و در ابعاد 15cm × 15cm آماده شد [19].

2-4- آزمون ضربه سرعت بالا

آزمایش ضربه سرعت بالا به وسیله دستگاه ساخته شده توسط مرکز عالی تحقیقات مواد و سازه‌های پیشرفته و هوشمند دانشکده مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام پذیرفته است. دو نمونه پرتابه اُجیوال (شکل 1) و سر کروی (شکل 2) به ترتیب با جرم‌های 26.7 و 26.3 گرم از جنس آلومینیوم استفاده شد. به منظور به حداقل رساندن اختلاف جرم دو پرتابه، اندکی در ابعاد پرتابه‌ها عدم تشابه ایجاد شده است.

جدول 4 درصد وزنی نانو مواد بکار رفته در نمونه‌ها

Table 4 Weight percent of nano materials used in samples

کد نمونه*	نانوسیلیکا (درصد وزنی)	نانوگرافن (درصد وزنی)
BE-S0G0	0	0
BE-S10G0	1	0
BE-S09G01	0.9	0.1
BE-S07G03	0.7	0.3
BE-S05G05	0.5	0.5

* حروف و علائم اختصاری در کد گذاری نمونه ها: B: الیاف بازالت، E: رزین اپوکسی، S: نانوسیلیکا، G: نانوگرافن، اعداد بعد از S: درصد وزنی نانوسیلیکا برحسب دهم درصد، اعداد بعد از G: درصد وزنی نانوگرافن برحسب دهم درصد

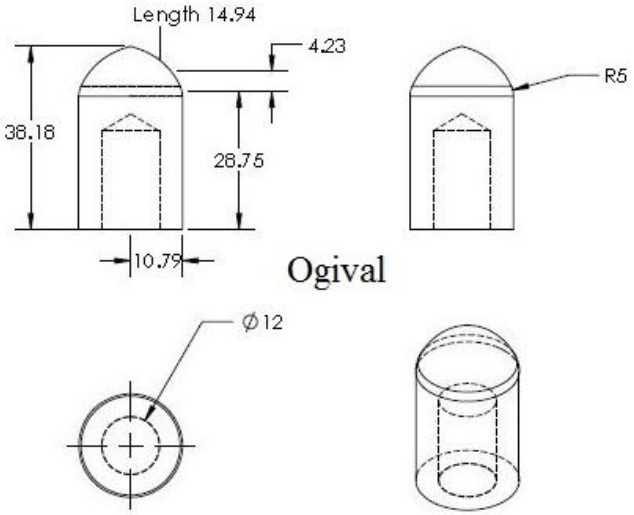

Fig. 1 Geometrical specifications of ogival projectile

شکل 1 مشخصات هندسی پرتابه اُجیوال

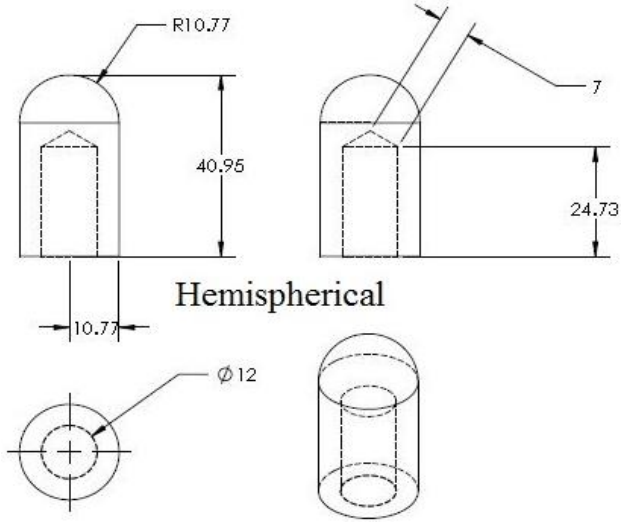

Fig. 2 Geometrical specifications of hemispherical projectile

شکل 2 مشخصات هندسی پرتابه سر کروی

برای تعیین سرعت ورودی آزمایش باید به چند نکته توجه شود. نکته اول این که، چون آزمایش در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک صورت می‌گیرد، لذا سرعت ورودی باید به حدی باشد که اطمینان از عبور کامل پرتابه در تمام نمونه‌ها حاصل شود. بدین منظور، نمونه‌ای آزمایشی تحت ضربه‌های با سرعت متفاوت قرار می‌گیرد تا حدود تقریبی حد بالستیک تعیین گردد. بر این اساس، تعدادی از نمونه ها بطور آزمایشی توسط دستگاه، آزمایش شدند و سرعت حدود 80 m/s به عنوان حد بالستیک تقریبی بدست آمد. نکته بعدی این که با افزایش سرعت اولیه، اثر نانو مواد بر جذب انرژی حاصل از ضربه کاهش می‌یابد، لذا سرعت مناسب جهت انجام آزمایش برای مشاهده اثر نانو مواد سرعتی نزدیک به حد بالستیک خواهد بود. همچنین سرعت ورودی باید به حدی باشد که دستگاه آزمون ضربه، توانایی اندازه گیری نسبتاً دقیق آن و همچنین متعلقات دستگاه توانایی تحمل آن را داشته باشد تا خطا به حداقل برسد.

آزمایش به این صورت است که ابتدا پرتابه در فشارهای مختلف 1-6 bar بدون حضور نمونه هدف پرتاب شد تا فشار مورد نیاز مخزن دستگاه آزمایش برای تامین سرعت برخورد مشخص شود. سرعت ایجاد شده در فشار 6 bar برابر 116 m/s بود که علاوه بر بالاتر بودن نسبت به حد بالستیک حدودی نمونه‌ها، قابلیت پرتاب و اندازه گیری دقیق آن با دستگاه آزمایش نیز وجود دارد. از این رو این سرعت برای آزمایش تعیین شد. سپس نمونه‌ها به ترتیب درگیره دستگاه قرار گرفته و پرتاب انجام پذیرفت. همچنین به منظور بالا بردن دقت سنسورهای اندازه گیری سرعت و کاهش احتمال وقوع خطا، آزمایش در محیط تاریک صورت گرفت. برای هر گلوله به منظور دستیابی به سرعت مورد نیاز، تهیه منحنی سرعت ورودی پرتابه بر حسب فشار مخزن دستگاه الزامی است (شکل 3). واضح است که با توجه به تفاوت وزن پرتابه‌ها و سطح مقطع پرتابه، این شکل برای هر گلوله متفاوت است. از طرفی به دلیل نزدیکی هندسه پرتابه‌ها، تفاوت رابطه فشار مخزن و سرعت ورودی برای دو پرتابه اندک است.

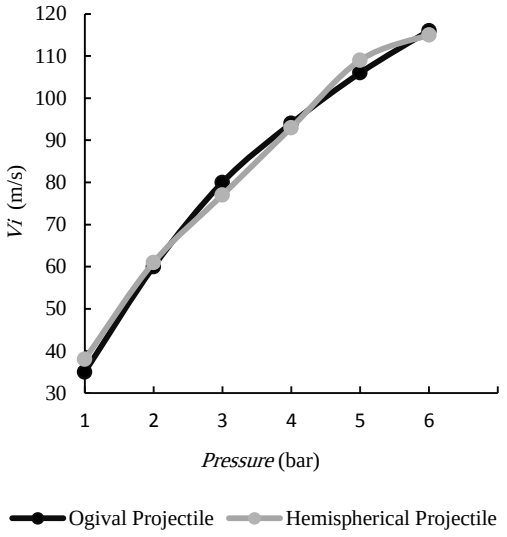

Fig. 3 Experimental relation of vessel pressure of test application to internal velocity

شکل 3 رابطه تجربی فشار مخزن دستگاه آزمایش با سرعت ورودی

در هر بار آزمایش ضربه سرعت بالا، سرعت ورودی (Vi) و سرعت خروجی پرتابه از هدف (Vo) برحسب m/s اندازه گیری می‌شود. انرژی برخورد (Ei) که در واقع به طور کامل جنبشی می‌باشد، برابر است با:

$$E_i = 0.5 m_p V_i^2 \quad (1)$$

که در آن، Ei، برحسب J و mp، جرم پرتابه برحسب kg می‌باشد. حد بالستیک (Vb) نیز مطابق رابطه (2) برحسب m/s تعیین می‌گردد:

$$V_b = \sqrt{(V_i^2 - V_o^2)} \quad (2)$$

از طرفی با توجه به این مسئله که خروج پرتابه از نمونه بیانگر عدم جذب کامل انرژی توسط نمونه هدف می‌باشد، لذا اختلاف سرعت ورودی و خروجی بیانگر تمام انرژی جذب شده توسط نمونه خواهد بود. در غیر این صورت مشخصه‌های مختلفی برای تعیین انرژی جذب شده باید لحاظ گردد. این انرژی جذب شده (Ea) بر حسب J از رابطه (3) محاسبه می‌گردد [20]:

$$Ea = 0.5 m_p Vb2 \quad (3)$$

2-5- آزمون FT-IR

به منظور اطمینان از پیوند عامل سیلانی با نانو مواد، آزمون FT-IR[1] به وسیله دستگاه JESCO مدل 460-PLUS در محدوده $400\text{-}4000\ cm^{-1}$ با دقت اندازه‌گیری $4\ cm^{-1}$ انجام گرفت. در این روش ابتدا امواج مادون قرمز از ماده عبور داده می‌شود و پس از برخورد، مقداری از امواج، جذب و مقداری از ماده عبور می‌کند. طیف خروجی، مشابه اثر انگشت جهت شناسایی ساختار مولکولی ماده می‌باشد.

2-5- مطالعه میکروسکوپی

به منظور بررسی تاثیر نانو مواد بر اتصال بین زمینه و الیاف در سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی، مطالعه میکروسکوپی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[2]) مدل VEGA\\TESCAN-LMU شرکت TESCAN انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

شکل‌های 4 و 5 به ترتیب نتایج FT-IR مربوط به نانوسیلیکای اصلاح نشده و اصلاح شده را نشان می‌دهند. پیک‌های S-OH، C-O و N-H به ترتیب در محدوده $700\text{-}900\ cm^{-1}$، $1150\ cm^{-1}$ و $1500\text{-}1650\ cm^{-1}$ بیانگر اتصال پیوند عامل سیلانی با نانو مواد است و مشاهده آن‌ها بیانگر تایید این اتصال است [20,19]. وجود پیک‌های جذبی از جمله در حدود $500\ cm^{-1}$، $900\ cm^{-1}$، 1100 cm^{-1} و $1650\ cm^{-1}$ در هر دو شکل 4 و 5 بیانگر ثابت ماندن ساختار اولیه نانوسیلیکا پس از اصلاح می‌باشد. از طرفی در شکل 5 پیک رخ داده ناشی از اتصال عامل سیلانی به نانو مواد در حدود $780\ cm^{-1}$ مربوط به S-OH، 1150 cm^{-1} مربوط به C-O و پیک $1550\ cm^{-1}$ بیانگر NH ترکیب شده با سیلیکا است که نشان از صحت اصلاح سطحی انجام شده دارد.

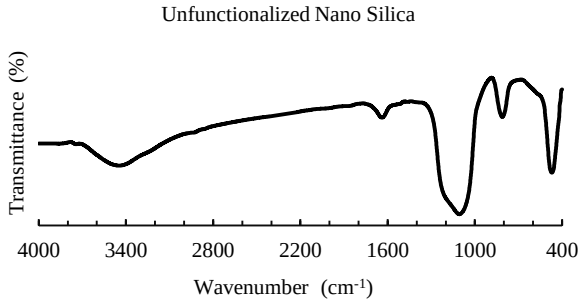

Fig. 4 FT-IR result for unfunctionalized nano silica

شکل 4 نتایج FT-IR برای نانوسیلیکای اصلاح نشده

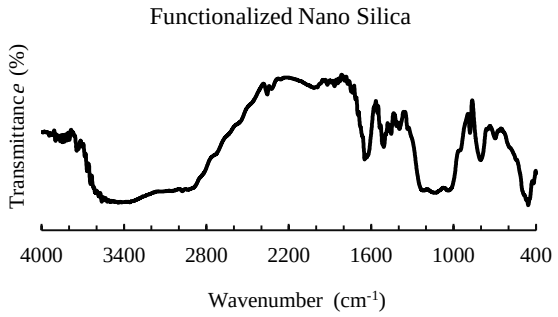

Fig. 5 FT-IR result for functionalized nano silica

شکل 5 نتایج FT-IR برای نانوسیلیکای اصلاح شده

[1] Fourier Transform Infrared Analysis
[2] Scanning Electron Microscope

به همین ترتیب شکل‌های 6 و 7 نتایج FT-IR را برای نانوگرافن اصلاح نشده و اصلاح شده، نشان می‌دهند. در هر دو شکل 6 و 7 پیک‌های یکسان $700\ cm^{-1}$، $1100\ cm^{-1}$ و $2350\ cm^{-1}$ بیانگر ثابت ماندن ساختار اولیه نانوگرافن پس از اصلاح می‌باشد. از طرفی نیز مجدداً تکرار پیک عامل‌های سیلانی $780\ cm^{-1}$ مربوط به S-OH، $1150\ cm^{-1}$ مربوط به C-O و پیک $1550\ cm^{-1}$ بیانگر NH، نشان از تایید عملیات اصلاح سطحی دارد.

با مشاهده نتایج حاصل از شکل‌های 4 تا 7، صحت عملیات اصلاح سطحی تایید شد. تحقیقات قبلی بیانگر آن است که انجام عملیات اصلاح سطحی سبب افزایش فاصله مولکولی نانو مواد نسبت به هم و در نتیجه کاهش برهمکنش بین ذره‌ای ناشی از پیوند واندروالس می‌شود [22].

شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نتایج حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (3)، افزایش حد بالستیک متناسب با افزایش جذب انرژی می‌باشد. این مورد به ترتیب از شکل‌های 8 و 9 به وضوح قابل مشاهده است.

در شکل 8، حد بالستیک از نمونه BE-S0G0، به میزان 83.21 و 97.49 متر بر ثانیه به ترتیب برای پرتابه اُجیوال و سر کروی، تا نمونه BE-S07G03 با مقادیر 86.18 و 107 متر بر ثانیه به ترتیب برای پرتابه اُجیوال و سرکروی، روند افزایشی داشته است. برای نمونه BE-S05G05 کاهش حد بالستیک رخ داده است، به نحوی که برای پرتابه اُجیوال و سر کروی این مقادیر به ترتیب با 12.6% و 3% کاهش نسبت به نمونه BE-S07G03، به 93.47 و 83.51 متر بر ثانیه رسید.

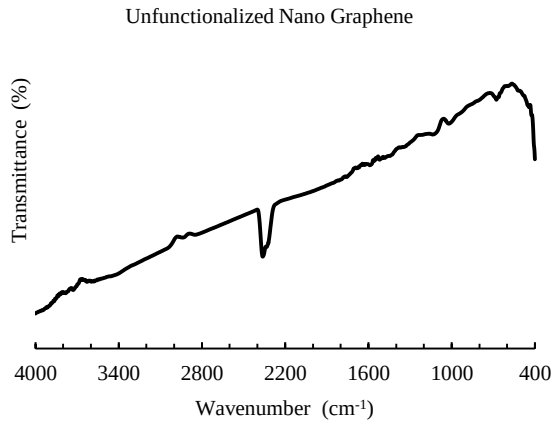

Fig. 6 FT-IR result for unfunctionalized nano graphene

شکل 6 نتایج FT-IR برای نانوگرافن اصلاح نشده

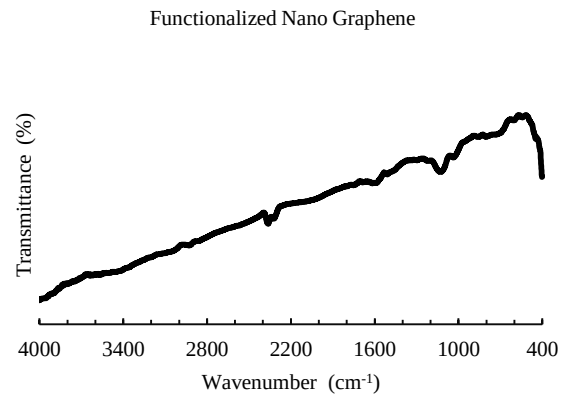

Fig. 7 FT-IR result for functionalized nano graphene

شکل 7 نتایج FT-IR برای نانوگرافن اصلاح شده

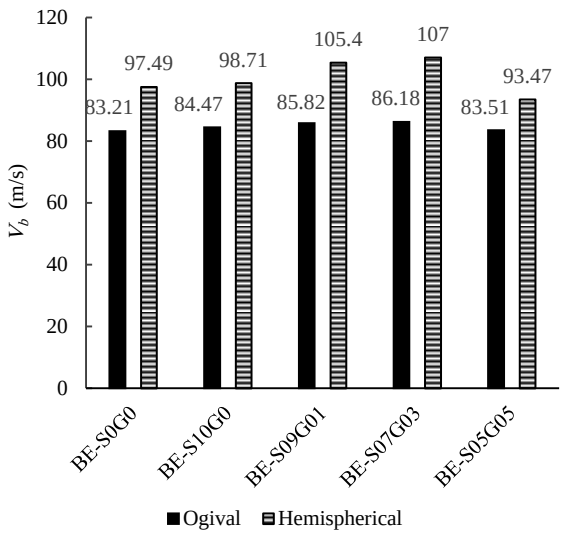

Fig. 8 Ballistic limit result of high velocity impact test

شکل 8 نتایج حد بالستیک آزمون ضربه سرعت بالا

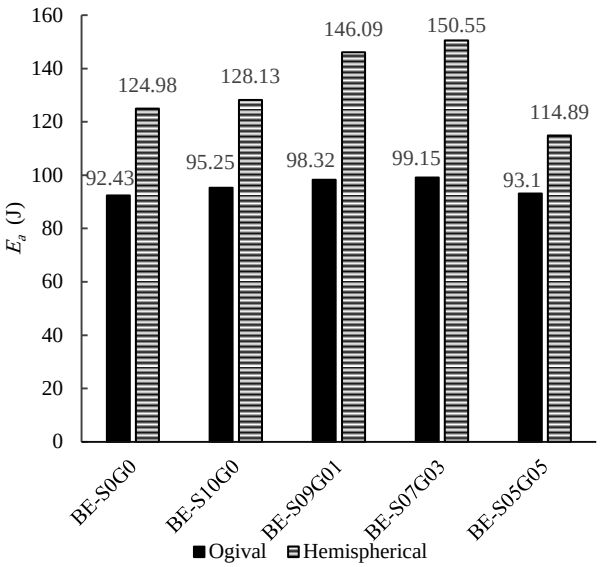

Fig. 9 Energy absorbed in high velocity impact test

شکل 9 انرژی جذب شده در آزمون ضربه سرعت بالا

در شکل 9 برای پرتابه اُجیوال روند افزایش جذب انرژی به میزان 7.3% از نمونه بدون نانو مواد (BE-S0G0) با مقدار 92.43 J تا 99.15 J برای نمونه BE-S07G03 مشاهده می‌شود. علت این افزایش را می توان در ایجاد میکرو مکانیزم‌های چقرمه سازی نانو کامپوزیت دانست [23]. در این راستا دو میکرو مکانیزم قفل شدن نوک ترک (شکل 10) و انحراف ترک (شکل 11) ،سبب افزایش مقاومت به ضربه شده است. به این صورت که در میکرو مکانیزم قفل شدن نوک ترک، ترک ایجاد شده در مواجهه با نانو مواد تبدیل به دو ریز ترک می‌شود. به همین جهت با افزودن نانو مواد افزایش استحکام و جذب ضربه مشاهده می‌شود. همچنین در میکرو مکانیزم انحراف ترک، ترک درون صفحه‌ای در مواجهه با نانو مواد به خارج از صفحه منحرف شده و ترک غیرصفحه‌ای را ایجاد می‌کند. ترک ایجاد شده علاوه بر کج شدن، دچار چرخش نیز می‌شود. ایجاد چنین مد ترکیبی از شکست (انحراف و چرخش) سبب افزایش انرژی لازم برای رشد ترک و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه می‌شود.

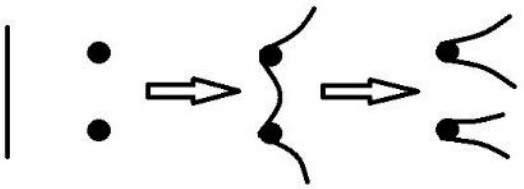

Fig. 10 Crack pinning mechanism [23]

شکل 10 مکانیزم قفل شوندگی ترک [23]

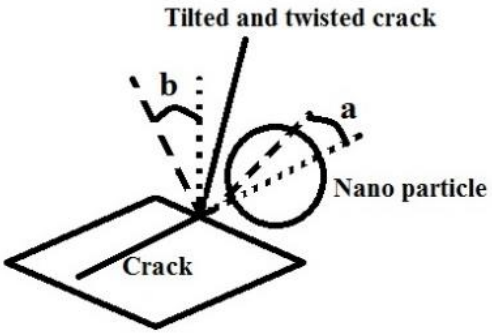

Fig. 11 Crack deflection mechanism [23]

شکل 11 مکانیزم انحراف ترک [23]

از سوی دیگر با افزایش درصد نانوگرافن از نمونه BE-S10GO تا نمونه BE-S07G03 نیز افزایش 2% مقاومت به ضربه رخ داده است. علت این امر را می توان بهبود اتصال بین زمینه و الیاف دانست.

برای پرتابه سر کروی نیز روند افزایشی از نمونه بدون نانو BE-S0G0 با مقدار جذب انرژی 124.98 J تا نمونه BE-S07G03 با جذب 150.55 J انرژی حاصل از ضربه و افزایش 20.4% جذب انرژی رخ داده است. علت افزایش جذب انرژی در آزمایش با پرتابه سر کروی نسبت به آجیوال، بالا رفتن سطح تماس دماغه پرتابه با نمونه و در پی آن افزایش سطح تخریب به دلیل افزایش میزان تنش انتقالی، ناشی از این بالا رفتن سطح تماس به نمونه هدف است که این موضوع نیز رابطه مستقیم با جذب انرژی دارد [13]؛ به گونه‌ای که در نمونه BE-S07G03، 13.1% بهبود عملکرد در آزمون با پرتابه سر کروی نسبت به پرتابه آجیوال مشاهده می‌شود. از طرفی با توجه به بالاتر بودن اندک جرم پرتابه آجیوال نسبت به پرتابه سر کروی (0.4 گرم)، ولی باز هم اثر شکل دماغه پرتابه نسبت به وزن به مراتب بیشتر بوده است.

شکل‌های 13-الف و ب، به ترتیب نمایی از سطح جلویی شکست را برای دو نمونه BE-S0G0 و BE-S07G03 نشان می‌دهد. تشکیل پلاک برشی در شکل 13-الف نشان از وقوع شکستی ترد دارد. برای نمونه BE-S07G03 (شکل 13-ب)، عدم تشکیل پلاک برشی و شکست الیاف اولیه نشان از تغییر مکانیزم شکست و افزایش جذب انرژی حاصل از ضربه دارد [12].

در نمونه BE-S05G05 به ترتیب با جذب 93.1 J و 114.89 J برای پرتابه آجیوال و سر کروی نسبت به دیگر نمونه‌های دارای نانو مواد، کاهش جذب انرژی مشاهده شد. بطوری که حتی برای پرتابه سر کروی جذب انرژی حاصل از ضربه برای این نمونه نسبت به نمونه BE-S0G0، 8.1% کاهش داشته است. علت این کاهش را به دو مورد می‌توان نسبت داد. یکی کلوخه شدن احتمالی نانو مواد در بستر رزین به سبب سطح بالای انرژی نانو صفحات گرافن و ایجاد تمرکز تنش که در نهایت منجر به کاهش استحکام ضربه‌ای می‌گردد [19]. علت دیگر، افزودن نانو مواد به زمینه است که سبب اتصال بهتر زمینه و الیاف و در نهایت افزایش مدول الاستیک می‌شود. افزایش مدول الاستیک سبب افزایش سرعت انتشار موج حاصل از ضربه و عدم توزیع مناسب تنش در سطح نمونه هدف می‌شود و در نهایت استحکام ضربه‌ای نمونه کاهش می‌یابد [18].

شکل 14 نتایج بررسی میکروسکوپی SEM را به ترتیب برای نمونه‌های BE-S0G0 (شکل 14- الف)، BES07G03 (شکل 14- ب) و BES05G05 (شکل 14- ج) نشان می‌دهد. روند بهبود اتصال بین زمینه و الیاف تقویت کننده به وضوح با افزودن 1% نانو ماده در نمونه‌های BES07G03 و BES05G05، قابل مشاهده است. همچنین در شکل 14- ج با افزایش نسبی درصد وزنی نانوگرافن نسبت به نمونه BES07G03 از 0.3% به 0.5%، اتصال بین زمینه و الیاف به بالاترین سطح خود رسیده است؛ بگونه‌ای که سطح شکست با وجود اتصال نسبتاً یکپارچه، شکستی ترد را نشان می‌دهد. علت این نوع شکست (که در نتایج شکل 9 نیز مشاهده شد)، بالا رفتن مدول الاستیک ناشی از اتصال یکپارچه زمینه و الیاف است. بنابراین افزودن نانو صفحات گرافن نسبت به نانو ذرات سیلیکا تاثیر بیشتری در بهبود اتصال زمینه و الیاف دارد. علت این امر را می‌توان بالاتر بودن سطح انرژی ناشی از ابعاد کوچکتر نانوگرافن و تمایل به پیوند بیشتر با زمینه دانست.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، نمونه‌های کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت حاوی مجموعاً یک درصد وزنی نانوسیلیکا و نانوگرافن اصلاح شده، به روش لایه چینی دستی ساخته شدند و این نمونه‌ها توسط دو نوع پرتابه آجیوال و سر کروی تحت آزمون ضربه سرعت بالا قرار گرفتند. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- برای هر دو نوع پرتابه آجیوال و سر کروی، نمونه دارای 0.7% نانو ذرات سیلیکا و 0.3% نانو صفحات گرافن بهترین عملکرد را به ترتیب با جذب 99.15 J و 150.55 J انرژی حاصل از ضربه و بهبود 7.4% و 20.4% جذب انرژی نسبت به نمونه بدون نانو مواد داشته است. علت این افزایش ایجاد میکرو مکانیزم‌های چقرمه سازی توسط نانو مواد می باشد.

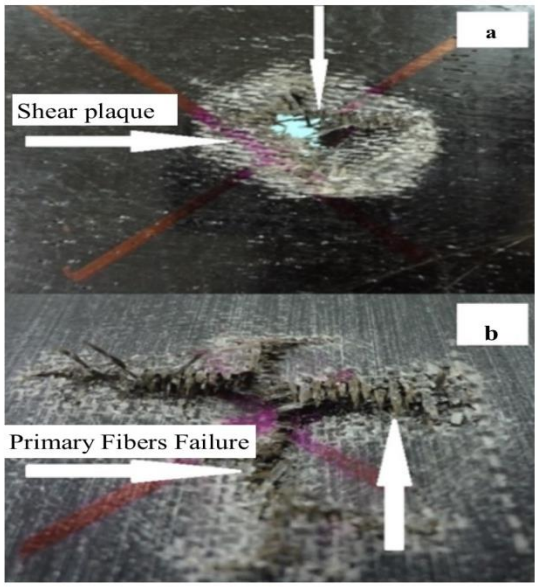

Fig. 13 Front view of fracture surfaces after high velocity impact test for a) BE-S0G0, b) BE-S07G03

شکل 13 نمایی جلویی سطح شکست پس از آزمون ضربه سرعت بالا برای نمونه، الف) BE-S0G0، ب) BE-S07G03

• نمونه حاوی 0.5% نانوسیلیکا و 0.5% نانوگرافن ضعیف ترین عملکرد را در جذب انرژی حاصل از ضربه نسبت به سایر نمونه‌های دارای نانو مواد داشته است. به گونه‌ای که حتی برای پرتابه سر کروی مقدار جذب انرژی آن از نمونه بدون نانو مواد نیز کمتر شده است. علت این کاهش بالا رفتن شدید مدول الاستیک و کلوخه شدن نانو مواد در بستر رزین به علت سطح بالای انرژی نانو صفحه‌های گرافن است.

• جذب انرژی حاصل از ضربه برای پرتابه سر کروی با وجود کمبود جرم نسبت به پرتابه آجیوال (0.4 گرم)، به مراتب بیشتر بوده است. علت این افزایش، هندسه دماغه (سر) پرتابه و تمرکز تنش کمتر، و افزایش سطح تماس پرتابه و سطح انتقال نیرو در محل برخورد با نمونه هدف در پرتابه سر کروی می‌باشد.

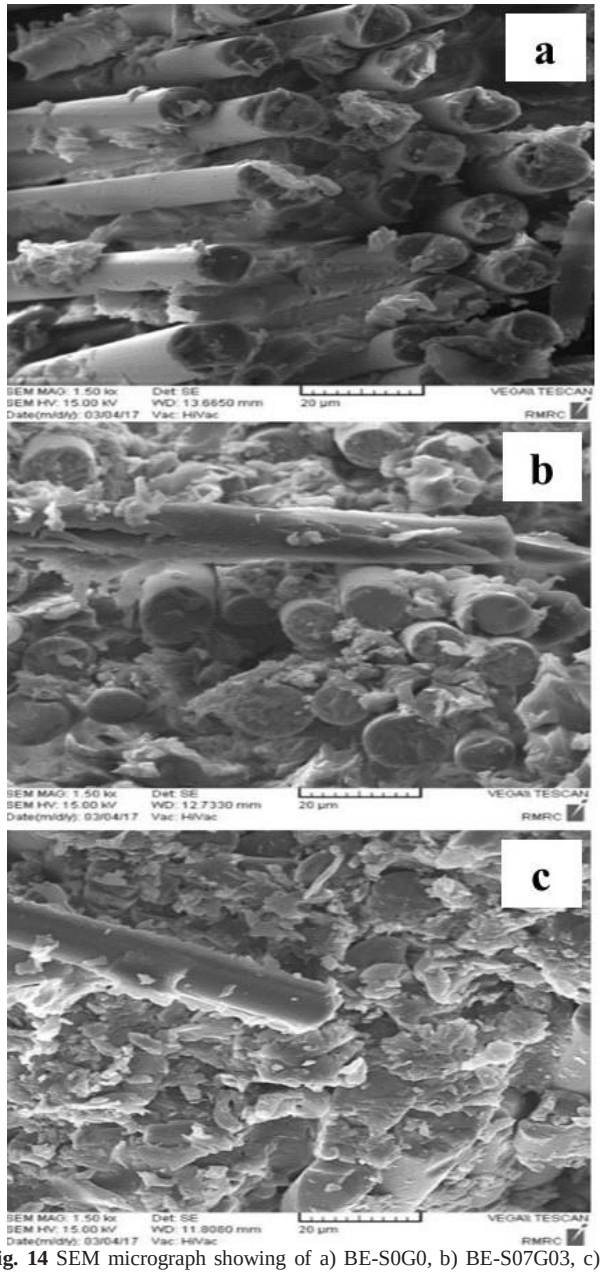

Fig. 14 SEM micrograph showing of a) BE-S0G0, b) BE-S07G03, c) BE-S05G05

شکل 14 تصویر SEM برای نمونه، الف) BE-S0G0، ب) BE-S07G03، ج) BE-S05G05

6- مراجع

[1] Zhang, X., P, Z., Wamg, Q., "Friction and wear properties of Polyimide Matrix Composites Reinforced with Short Basalt Fibers", Applied Polymer, Vol. 111, No. 6, pp. 2280-2285, 2009.

[2] Kinloch, A.J., Taylor, A.C., "Mechanical and fracture properties of epoxy/inorganic micro- and nano-composites", Materials science, Vol. 22, pp. 1439-1441, 2003.

[3] Subagia, I.D.G.A., Tijing, L.D., Kim, Y., Kim, C.S., Vista, F.P., Kyong, H.S., "Mechanical performance of multiscalebasalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles", Composite, Vol. 58, part. B, pp. 611-617, 2014.

[4] Wang, Q., Zhang, X., Pei, X., "Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO2", Materials and Design, Vol. 31, pp. 1403-1409, 2010.

[5] Haghighifar, M., "Comparison investigation of basalt fibers properties with other fibers", First international congress and fourth national congress urban development, sanandaj, Islamic azad university, sanandaj branch, 2014. (in Persian)

[6] Najafi, M., Noorabadi, M., Karimi, M.H., Zeinali, B., "Basalt fiber application in treatment of impact properties of polymer resin reinforced by carbon fibers in marine composite", 13 th national congress of iran marine industries, kish, 2011. (in Persian)

[7] Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., "Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites", Composite Structures, Vol. 94, pp. 1165-1174, 2012.

[8] Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L., "A study of the effect of target thickness on the ballisticperforation of glass-fibre-reinforced plastic composites", Impact Engineering, Vol. 24, pp. 445- 456, 2000.

[9] Naik, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K., "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation", Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1521–1552. 2006.

[10] Hedayatian, M., Liaghat, G.M., Rahimi, G.M., Pol, M.H., Khoshsoroor, M., "Experimental study on Dynamic Response of grid cylindrical composite structures under high velocity Impact", Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 2, pp 41-46, 2014. (in Persian)

[11] Zarei, H.M., Delara, A.L., Davoodinik, A.L., "Experimental Penetration Investigation of Projectile in Fiber Metal Laminates", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 45-61, 2015. (in Persian)

[12] Pol, M., Liaghat, G.M., Haji, A.F., "Experimental Investigation of Effect of nanoclay on Ballistic Properties and Mechanical Properties of 2D Woven Glass/Epoxy Composites", Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (in Persian)

[13] Yeganeh, M.E., Liaghat, G.H., Pol, M.H., "Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite", Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 14, pp. 309-318, 2015. (in Persian)

[14] Mohammadzamani, M., Fereidoon, A., Sabet, A., Dolati, S., "Experimental investigation of damage failure area in high velocity impact on polypropylene/ carbon nano tube nano composite",20 th Annual International Iranian Mechanical Engineering Conference-ISME201,Shiraz, University of Shiraz, 2012. (in Persian)

[15] Rahman, M., Hosur, M., Zainuddin, S., Vaidya, U., Tauhid, A., Kumar, A., Trovillion, J., Jeelani, S., "Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile", Impact Engineering, Vol. 57, pp. 108-118. 2013.

[16] Pandya, K.S, Akella, K., Joshi, M., Naik, N.K., "Ballistic impact behavior of carbon nanotube and nanosilica dispersed resin and composites", Applied Physics, Vol. 112, No. 11, pp. 1-8, 2012.

[17] Moftakharian, J.E., Esfandeh, M., Sabet, A., "High -Velocity Impact Behavior of Glass Fiber-Reinforced Polyester Filled with Nanoclay", Wiley Online Library, pp. 583-591, 2012.

[18] Balaganesan, G., Velmurugan, R., Srinivasan, M., Gupta, N.K., Kanny, K., "Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading", Impact Engineering, Vol. 74, pp. 1-10, 2014.

[19] Khosravi, H., Eslami-Farsani, R., "An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels

under transverse loading", Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 3, No.1, pp. 11-20, 2016. (in Persian)

[20] Ahmadi, M., Khalili, M., Eslami-Farsani, R., "An investigation on effects of projectile shape and impact angle in high velocity impact on four layers composites of carbon and glass fibers", Journal of Energetic Material, Vol.6, No.2, pp. 69-81, 2011. (in Persian)

[21] Rostamzadeh, P., Mirabedini, S.M., Esfandeh, M., "APS-silane modification of silica nanoparticles: effect of treatment's variables on the grafting conten and colloidal stability of the nanoparticles", Journal of Coatings Technology and Research, Vol. 11, No. 4, pp. 651-660.

[22] Payganeh, G., Ghasemi, I., Rahmani, M., Kazemnejad, A., "An investigation on the impact properties of nanocomposite based on polypropylene/graphenenanosheets/ nano clay using response surface methodology", Journal of Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 9, pp. 271-279, 2015. (in Persian)

[23] Shokrieh, M.M., Ghoreishi, S.M., Esmkhani, M., "Toughening Mechanisms in Composite Materials", Woodhead Publishing, pp. 295-320, 2015.