



# Investigation on the Reinforcing Effects of Using Nanoparticle on Quasi-Static Loading of the Glass-Epoxy Composites

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Hosseinlghab S.<sup>1</sup>

Farahani M.\*<sup>1</sup>

Safarabadi M.<sup>1</sup>

### How to cite this article

Hosseinlghab S, Farahani M, Safarabadi M. Investigation on the Reinforcing Effects of Using Nanoparticle on Quasi-Static Loading of the Glass-Epoxy Composites. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):541-549.

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, College of engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
P.Box: 11155-4563

Phone:

Fax: -

mrfarahani@ut.ac.ir

### Article History

Received: April 25, 2020

Accepted: April 21, 2021

ePublished: July 18, 2021

## ABSTRACT

Application of composites according to their properties such as high strength to weight ratio, high corrosion resistance, and their ability to build complex shapes in different industries are increased. But due to composite's vulnerability against unwanted impact loads, their usage has been limited. Relatively higher costs of carrying out low-velocity impact (LVI) test, data sampling limit due to short experiment time, and adaptation of quasi-static impact (QSI) test results with LVI, convinced researchers to use QSI instead of LVI. This research investigated the effect of different percentages of nanoclay (1%, 3%, 5%, and 7%) on impact properties of glass-epoxy composite and for this purpose, the QSI test was used. To disperse and distribute nanoclay homogeneously inside the resin, mechanical and ultrasonic mixers have been used; EDAX photograph taken from nano-resin section confirmed the success of this process. QSI test results showed that adding 3% nanoclay to glass-epoxy composite, increases absorbed energy and stiffness up to 16% and 12% respectively. It was also determined by perusing SEM photographs that the mechanical properties of specimens containing 7% nanoclay had decreased due to the agglomeration of nanoparticles.

**Keywords** Quasi-Static Test, Glass-Epoxy Composite, Nanoclay, Scanning Electron Microscope (SEM)

## CITATION LINKS

[1] An overview of the impact behaviour of fibre-reinforced composites. [2] The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance... [3] Experimental and numerical investigation on the residual distortion and stress fields... [4] Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates. [5] Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/polyester laminates. [6] Peridynamic theory for progressive damage prediction... [7] Composite damage model based on continuum damage mechanics... [8] Impact behavior of cross-ply laminated composite plates... [9] Barely visible impact damage assessment in laminated composites... [10] Failure analysis of low velocity impact... [11] Investigation of mechanical behavior of alfa and gamma nano-alumina/epoxy composite... [12] Composite adhesive-bonded joint reinforcement... [13] Damage evaluation and strain monitoring of composite plates using metal-coated FBG sensors... [14] Trapezoidal traction-separation laws in mode II fracture... [15] A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events... [16] Characterisation of indentation damage in 0/90 lay-up T300/914 CFRP. [17] Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites... [18] Impact damage resistance of CFRP... [19] Effects of alumina nanoparticles on dynamic impact responses of carbon fiber... [20] Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. [21] Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites... [22] Low-velocity impact performance of nanofiber-interlayered aramid/epoxy nanocomposites. [23] Addition of nanomer clays to GFRPs for enhanced impact strength and fracture toughness. [24] Recent advances in nanoclay/natural fibers hybrid composites. [25] Effect of nanoclay and different impactor shapes on glass/epoxy composites... [26] Development and analysis of epoxy/nano SiO<sub>2</sub> polymer matrix composite... [27] ASTM International. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite... [28] Effect of milled glass fibers on quasi-static indentation and tensile behavior... [29] Micromechanisms of crack propagation in hybrid-particulate composites.

## بررسی اثر تقویتی استفاده از نانوذرات در بارگذاری شبه استاتیک کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی

صادق حسین لقب

مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

محمدرضا فراهانی\*

مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

مجید صفرآبادی

مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

### چکیده

کاربرد کامپوزیت‌ها به واسطه خواصی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت بالا نسبت به خوردگی و پوسیدگی و همچنین امکان ساخت اشکال پیچیده در صنایع مختلف با رشد چشمگیری مواجه شده، اما به دلیل آسیب‌پذیری این مواد در برابر بارهای ضربه‌ای ناخواسته، کاربرد آن‌ها با محدودیت‌هایی مواجه شده است. هزینه‌های نسبتاً بالای انجام آزمون ضربه سرعت پایین (LVI) و محدودیت داده برداری به دلیل مدت زمان کوتاه انجام آن از یک طرف و تطبیق نتایج آزمون نفوذ شبه استاتیک (QSI) با آزمون LVI از طرف دیگر، پژوهشگران را برای استفاده از آزمون QSI به جای آزمون LVI متقاعد کرده است. این پژوهش، تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف نانورس (۱، ۳، ۵ و ۷ درصد) بر خواص ضربه‌ای کامپوزیت شیشه-اپوکسی را مورد بررسی قرار داده و برای این منظور از آزمون QSI برای پیش‌بینی رفتار این نانوکامپوزیت بهره برده است. برای توزیع همگن نانورس در بستر رزین از همزن مکانیک و التراسونیک استفاده شده که طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) انجام شده از مقطع نانورزین، موفق بودن این فرایند را تأیید کرده است. نتایج آزمون QSI نشان داد که اضافه کردن ۳ درصد نانورس به کامپوزیت شیشه-اپوکسی، انرژی جذب شده را تا ۱۶ درصد و سفتی را تا ۱۲ درصد بهبود می‌دهد. همچنین با بررسی عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقاطع نانورزین‌ها مشخص شد که نمونه‌های حاوی ۷ درصد نانورس به دلیل به هم چسبیدن نانوذرات با افت خواص مکانیکی روبرو شدند.

**کلیدواژه‌ها:** آزمون نفوذ شبه استاتیک، کامپوزیت شیشه-اپوکسی، نانورس، میکروسکوپ الکترونی روبشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹

\*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

### ۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها به واسطه خواصی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی و پوسیدگی و ساخت اشکال پیچیده، به صورت گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، الکترونیک، دریایی، هوافضا و نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما محدودیت‌هایی نیز برای ساخت برخی قطعات کامپوزیتی که در قسمت‌های بدنه (بیرونی) به کار می‌روند وجود دارد؛ چراکه این قطعات ممکن است در معرض ضربه‌های ناخواسته قرار گیرند که می‌تواند منجر به آسیب به آن‌ها شود. مواردی مانند برخورد دانه‌های درشت تگرگ، سقوط ابزار در حین فرایند تعمیر، برخورد

پرندگان و برخورد اجسام در هنگام طوفان و سیل، نمونه‌هایی از این ضربه‌ها هستند [1-3].

بارهای ضربه‌ای وارده به قطعات کامپوزیتی با توجه به شدتشان می‌توانند منجر به بروز هر یک از آسیب‌های ترک ماتریس، تورق و شکست الیاف شده و در نهایت، خواص مکانیکی آن‌ها را کاهش دهند. از آنجایی سطح آسیب‌ها متناسب با شدت ضربه می‌تواند متفاوت باشد، غیرقابل رؤیت بودن برخی از آن‌ها در حین بارگذاری قطعات کامپوزیتی، خطرآفرین خواهد بود [4-6].

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه ارزیابی میزان خسارت وارده در اثر اعمال ضربه سرعت پایین (Low Velocity Impact (LVI)) به قطعات کامپوزیتی انجام شده است [7-10]. هزینه‌های زیاد انجام آزمون LVI و همچنین داده برداری محدود که ناشی از مدت زمان کوتاه انجام آزمون است، تعداد زیادی از پژوهشگران را به سمت استفاده از روش نفوذ شبه استاتیک (Quasi Static Indentation (QSI)) سوق داده است. این پژوهشگران معتقدند روش QSI از نظر نوع بار فشاری و تغییر شکل به روش LVI شباهت زیادی دارد [2، 11-15]. هرچند تعدادی از محققین به دلیل تفاوت نرخ کرنش در این دو روش، گزارش کرده‌اند که حداکثر نیروی اعمالی و مساحت ناحیه آسیب در آن‌ها کمی باهم متفاوت هستند اما درعین حال اذعان دارند که این اختلاف، در انرژی‌هایی که منجر به تخریب‌های بحرانی نشوند، ناچیز است [10، 16]. لذا می‌توان از روش QSI برای تحلیل مکانیزم های آسیب ناشی از ضربه استفاده کرد.

در سال‌های اخیر، برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه افزودن نانوذرات به آن‌ها انجام شده است. بهبود ۳۰ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شیشه-اپوکسی در اثر افزودن ۰/۲۵ درصد نانوگرافن، موضوعی است که کامار و همکاران [17] در تحقیقات خود به آن رسیده‌اند. اقبال و همکاران [18] به مطالعه اثر افزودن درصد‌های وزنی نانورس به کامپوزیت کربن-اپوکسی پرداختند و گزارش کردند که افزودن ۳ درصد نانورس، منجر به بهبود مقاومت ضربه‌ای شده است. کبیال و همکاران [19] در پژوهشی با افزودن درصد‌های مختلف از نانوذرات آلومینا (از ۱ تا ۵ درصد وزنی) به کامپوزیت کربن-اپوکسی، مقاومت به ضربه آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند و نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی آلومینا را به عنوان بهترین نتیجه گزارش کرده‌اند. ریس و همکاران [20] نیز در پژوهشی اشاره کرده‌اند که با افزودن نانورس به کامپوزیت کولار-اپوکسی، خواص ضربه‌ای آن بهبود یافته است. ترقی و همکاران [21] در بررسی‌های خود نشان دادند که در آزمون ضربه نانوکامپوزیت‌های کولار-اپوکسی، نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد نانولوله کربنی چنددیواره (Multi Wall Carbon Nano Tube (MWCNT))، تا ۳۵ درصد انرژی بیشتری جذب کرده‌اند. گودرز و همکاران [22] در تحقیقاتشان بر روی کامپوزیت‌های آرامید-اپوکسی گزارش کرده‌اند افزودن نانوالیاف نایلون (PA66) به کامپوزیت‌ها ضمن کاهش خواص استحکام

جدول ۲) خواص رزین اپوکسی ML-506

رنگ	زرد روشن
چگالی	۱/۶۶ g/cm <sup>3</sup>
مدت زمان ژل	۶۰ دقیقه
مقاومت فشاری	۹۷۴ kgf/cm <sup>2</sup>
استحکام کششی	۷۶۱ kgf/cm <sup>2</sup>
مقاومت به ضربه	۷/۸۵ kJ/m <sup>2</sup>

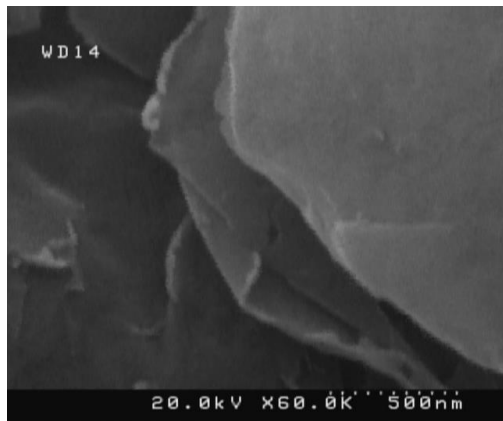
Instruments & استفاده شده است. جدول ۳ مشخصات این نانوذره را نشان می‌دهد. با پوشش دهی طلا و گرفتن عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات نانورس، ساختار لایه‌ای آن را می‌توان به وضوح مشاهده نمود (شکل ۱).

### ۲-۲- ساخت نمونه

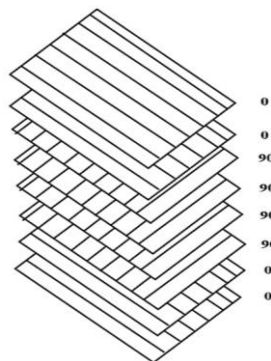
کامپوزیت مورد بررسی در این تحقیق، یک کامپوزیت ۸ لایه متقارن با لایه چینی [0/0/90/90]s است که به روش لایه چینی دستی ساخته شده است که نحوه چینش الیاف آن در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۳) مشخصات نانورس CLOISITE 15A

رطوبت	<۳ %
اندازه ذرات	<۱۰ μm (d50)
رنگ	سفید
چگالی	۱/۶۶ g/cm <sup>3</sup>
نتایج X Ray	d001=۳/۶۳ nm



شکل ۱) ساختار لایه‌ای نانورس CLOISITE 15A



شکل ۲) نمای مربوط به نحوه چینش الیاف برای ساخت کامپوزیت

کششی، میزان انرژی جذب شده طی ضربه را افزایش می‌دهد. شلی و همکاران<sup>[23]</sup> بر روی اثر اصلاح سطحی نانوذرات رس بر مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی مطالعاتی را انجام داده‌اند. این پژوهشگران با تأیید اثر مثبت حضور ذرات نانورس بر بهبود مقاومت به ضربه، در نهایت نانوذرات اصلاح سطحی نشده را مؤثرتر از ذرات اصلاح سطحی شده ارزیابی کرده‌اند.

هرچند تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه اثر افزودن نانوذرات بر خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌ها انجام شده اما تعداد پژوهش‌ها در مورد اثر افزودن ذرات نانورس به کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی با الیاف تک‌جهته بسیار محدود بوده است؛ حال آنکه ذرات نانورس به دلیل قیمت ارزان<sup>[24]</sup> و الیاف شیشه به دلیل سهولت دسترسی، می‌توانند به صورت گسترده در صنایع کامپوزیت مورد استفاده قرار گیرند. لذا این پژوهش به دنبال مطالعه اثر استفاده از درصد‌های مختلف ذرات نانورس بر خواص ضربه‌ای کامپوزیت شیشه-اپوکسی است و برای این منظور از آزمون QSI برای پیش‌بینی رفتار این نانوکامپوزیت‌ها بهره برده است. برای بررسی توزیع همگن نانورس در بستر رزین نیز از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscop (SEM)) استفاده شده است.

امکان‌سنجی بهبود خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی با افزودن ذرات نانورس، به دلیل وزن سبک، مقاومت به خوردگی، قیمت مناسب و در دسترس بودن این کامپوزیت‌ها<sup>[25]</sup> می‌تواند افق جدیدی را به روی کاربردهای صنعتی نانوکامپوزیت‌ها بگشاید؛ موضوعی که هدف اصلی این پژوهش را معرفی می‌نماید.

### ۲-۲- نمونه‌سازی و انجام آزمایش‌ها

#### ۱-۲- انتخاب مواد

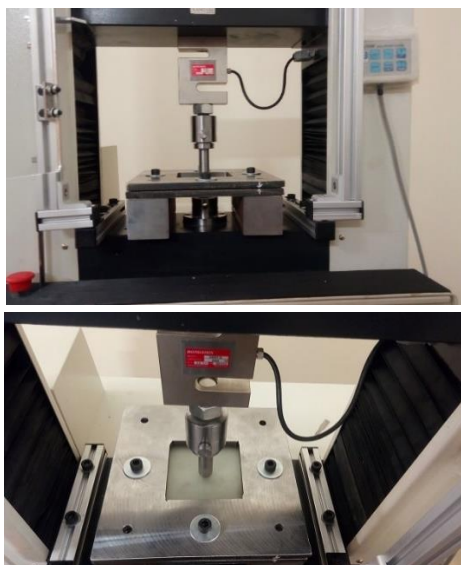
الیاف استفاده‌شده در این پژوهش از جنس الیاف شیشه تک‌جهته ساخت شرکت AMP COMPOSITES است که خواص آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

رزین به‌کاررفته در ساخت کامپوزیت نیز از جنس اپوکسی ML-506 متعلق به شرکت مواد مهندسی مکرر و سخت‌کننده آن نیز از نوع HL-11 متعلق به همین شرکت است که به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ باهم ترکیب شده‌اند. در جدول ۲ به برخی خواص فیزیکی و مکانیکی این رزین اشاره شده است.

همچنین در این تحقیق برای تولید نانوکامپوزیت و تقویت خواص مکانیکی از نانورس CLOISITE 15A ساخت شرکت BYK Additives

جدول ۱) خواص الیاف شیشه بکار رفته در ساخت کامپوزیت

نوع	الیاف تک‌جهته
چگالی	۲۰۰ g/m <sup>2</sup>
عرض	۵۰۰ mm
درصد رطوبت	۰/۰۵ %
استحکام کششی	۱۲۸۰N/5cm



شکل ۳) تصویر مربوط به انجام آزمون نفوذ شبه استاتیک

### ۳- ارائه نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی توزیع نانوذرات

به منظور بررسی توزیع همگن ذرات نانورس در بستر رزین از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شده است. عنصر سیلیسیوم (Si)، یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده نانوذرات رس است، لذا با مقایسه نمودار طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس مربوط به مقطع نمونه نانورزین حاوی ۳ درصد نانورس و مقطع نمونه رزین خالص می‌توان مبتنی بر حضور این عنصر و نحوه توزیع آن، در مورد حضور نانوذرات رس در نمونه‌ها اعلام نظر کرد. همان طور که در شکل ۴ مشخص است، با مقایسه دو نمودار طیف‌سنجی، حضور عناصر سیلیسیوم در مقطع نانورزین‌های حاوی ذرات نانورس به وضوح بیشتر بوده و این موضوع می‌تواند نشانه‌ی اولیه‌ی خوبی برای توزیع مناسب ذرات نانورس در بستر رزین باشد.

به منظور حصول اطمینان از توزیع مناسب نانوذرات رس، از تصاویر تکمیلی طیف‌سنجی برای نمایش پراکندگی عنصر سیلیسیوم در سطح استفاده شده است. همان طور که در شکل ۵ مشخص است، عناصر سیلیسیوم (که نشان‌دهنده ذرات نانورس هستند) به خوبی در سطح مقطع نمونه‌های نانورزین توزیع شده‌اند.

#### ۳-۲- بررسی اثر حضور نانوذرات بر نتایج آزمون نفوذ شبه استاتیک

پس از اطمینان از توزیع همگن نانوذرات حال نوبت به بررسی اثر حضور درصدهای مختلف نانورس بر نتایج آزمون نفوذ شبه استاتیک است. با توجه نمودار شکل ۶، در نمودارهای نیرو-جابجایی مربوط به آزمون نفوذ شبه استاتیک می‌توان چهار ناحیه را مشاهده کرد. در ناحیه اول که مربوط به تغییر شکل کشسان می‌باشد، نیرو با شیب نسبتاً ثابتی رشد می‌کند تا به نقطه تسلیم اولیه برسد. بعد از اولین افت در نیرو، ناحیه دوم آغاز می‌گردد که

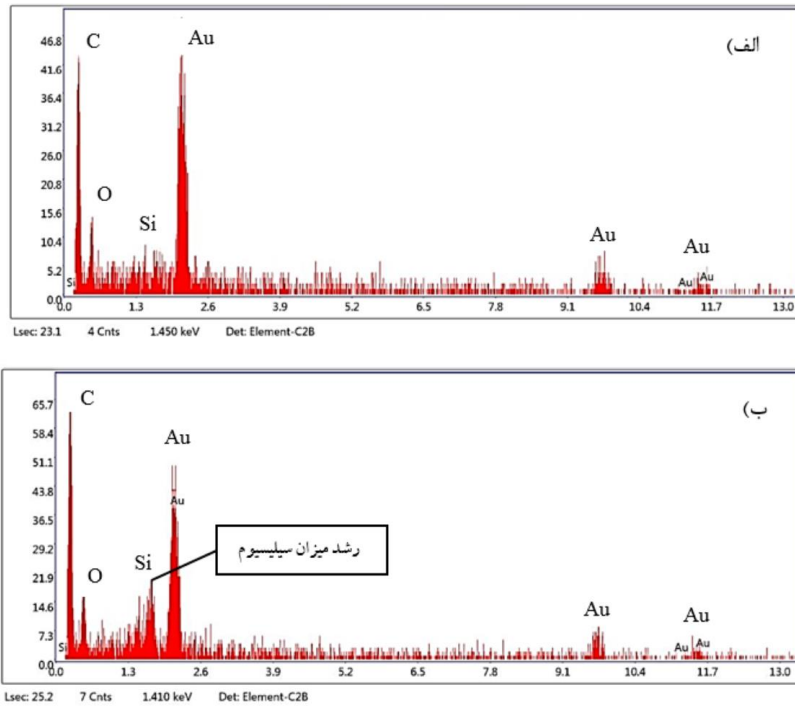
برای توزیع همگن ذرات نانورس در رزین، ابتدا این ترکیب به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به صورت مکانیکی هم زده شد تا توزیع مناسبی (با چشم غیرمسلح) از ذرات نانورس بدست آید. پس از ۲۴ ساعت استراحت و ایجاد اطمینان از توزیع مناسب اولیه و ته‌نشین نشدن ذرات نانورس در ظرف حاوی رزین، مجدداً ترکیب به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به صورت مکانیکی هم زده شد<sup>[21]</sup>. سپس برای شکستن کلوخه‌های نانورس در ابعاد میکرومتری و رسیدن به توزیع همگن‌تر نانوذرات، مواد با استفاده از همزن التراسونیک SONOPLUS HD 3200 ساخت شرکت BANDELIN آلمان به مدت ۳۰ دقیقه<sup>[26]</sup> با توان ۱۵۰ وات مرتعش شدند. به منظور ممانعت از افزایش دمای فرایند ارتعاش، ظرف رزین در داخل ظرف دیگری که حاوی آب سرد بود قرار داده شد و پس از هر ۵ دقیقه ارتعاش، ۵ دقیقه نیز استراحت داده می‌شد تا دمای رزین کاهش یابد. پس از اتمام فرایند ارتعاش، رزین حاوی نانوذرات به منظور گاز زدایی برای ۳ مرتبه و در هر بار به مدت ۱۰ دقیقه در محفظه خلأ قرار داده شد. سپس سخت‌کننده به نسبت مشخص به محلول اضافه و طبق توصیه شرکت سازنده رزین، به مدت ۳ دقیقه به صورت مکانیکی با رزین ترکیب شد.

برای سهولت در لایه چینی، ورق‌های کامپوزیتی ابتدا در ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ میلی‌متر ساخته شدند. به منظور رسیدن به ضخامت‌های یکسان در سرتاسر این ورق‌ها و خروج رزین‌های اضافی، ضمن استفاده از غلتک در خلال لایه چینی، تعدادی وزنه (مجموعاً معادل ۵ کیلوگرم) نیز بر روی نمونه‌ها قرار داده شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت و خشک شدن نمونه‌ها در دمای اتاق، با توجه به توصیه شرکت سازنده رزین، صفحات کامپوزیتی برای پخت کامل (Post Cure) به مدت ۲ ساعت در کوره با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند.

ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است.

#### ۳-۲- آزمون نفوذ شبه استاتیک

این آزمون، به منظور مطالعه رفتار مواد مختلف تحت بار فشاری شبه استاتیک به کار می‌رود. آزمون نفوذ شبه استاتیک انجام‌گرفته در این پژوهش، توسط دستگاه STM-50 ساخت شرکت SANTAM و با توجه به استاندارد ASTM 6264M-17<sup>[27]</sup> انجام شده است. برای انجام آزمون، صفحات کامپوزیتی در ابعاد ۱۲۰ در ۱۲۰ میلی‌متر بریده شدند. قالب مورد استفاده برای انجام آزمون، دارای دهانه مربعی شکل با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر بود. بار شبه استاتیک وارده با استفاده از نفوذکننده استوانه‌ای شکل با نوک نیم کروی به قطر ۲۰ میلی‌متر، با سرعت پیشروی ۴ میلی‌متر بر دقیقه به نمونه‌ها اعمال شده است (شکل ۳). برای اطمینان از تکرارپذیری، برای هر شرایط آزمون ۳ نمونه ساخته‌شده و مورد آزمون قرار گرفته است.



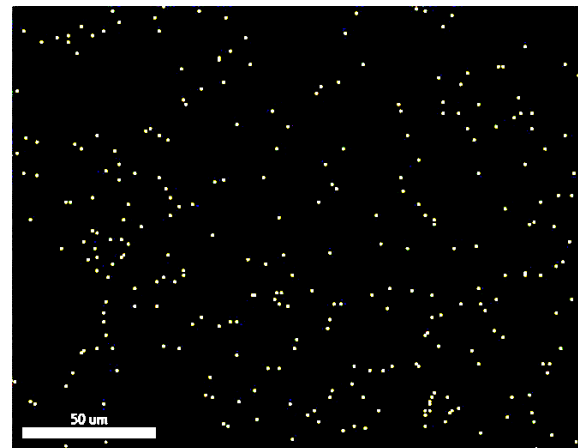
شکل ۴ الف) نمودار طیفسنجی جهت تفکیک عناصر سطح برای رزین خالص، ب) نمودار طیفسنجی جهت تفکیک عناصر سطح برای رزین حاوی ۳ درصد نانورس

در ناحیه سوم با افزایش میزان گسیختگی، نیرو به مرور افت می‌کند تا اینکه ورق کامپوزیتی به صورت کامل پاره شود و سنبه از داخل آن عبور کند. با کامل شدن گسیختگی، نمودار وارد مرحله چهارم می‌شود که در آن نیرو به دلیل اصطکاک موجود بین بدنه سنبه و نمونه، به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. در تحلیل‌ها معمولاً از این ناحیه صرف‌نظر می‌شود.

نتایج آزمون شبه استاتیک نانوکامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی با درصد‌های مختلف نانورس در شکل ۷ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از این است که نمونه‌های حاوی ۳ درصد نانورس، مقاومت بیشتر در برابر نفوذ از خود نشان داده‌اند و بیشینه نیرو برای این نمونه‌ها نیز از سایر نمونه‌ها بیشتر است. نمونه حاوی ۱ درصد نانورس در رتبه بعدی از نظر بیشینه نیرو قرار دارد و نمونه‌های حاوی ۵ و ۷ درصد نانورس تقریباً نیروی بیشینه مشابه با نمونه بدون نانوذره را نشان می‌دهند.

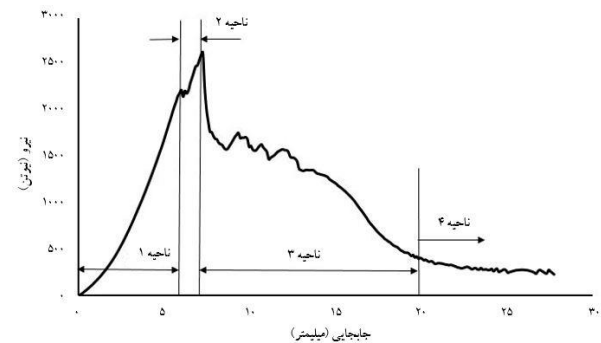
با محاسبه مساحت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی میزان انرژی جذب شده طی فرایند نفوذ شبه استاتیک بدست می‌آید. تحلیل این پارامتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی تأثیر درصد‌های مختلف نانورس بر میزان مقاومت به ضربه کامپوزیت‌ها دارد. به بیان دیگر، افزایش میزان انرژی جذب شده، به نوعی بیانگر مقاومت بالاتر نانوکامپوزیت‌ها در برابر بارهای شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای خواهد بود.

با مقایسه این مقادیر برای نمونه‌های مختلف در شکل ۸، به ترتیب نمونه‌های حاوی ۳ و ۱ درصد نانورس نتایج بهتری از خود نشان داده‌اند و میزان انرژی بیشتری به خود جذب کرده‌اند؛ به



شکل ۵ تصویر مربوط به طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس از مقطع رزین حاوی ۳ درصد نانورس

مربوط به تغییر شکل پلاستیک است. در این ناحیه نیز نیرو افزایش می‌یابد تا مقدار بیشینه خود برسد که آن نقطه مقارن با شروع گسیختگی و ورود به ناحیه سوم خواهد بود.

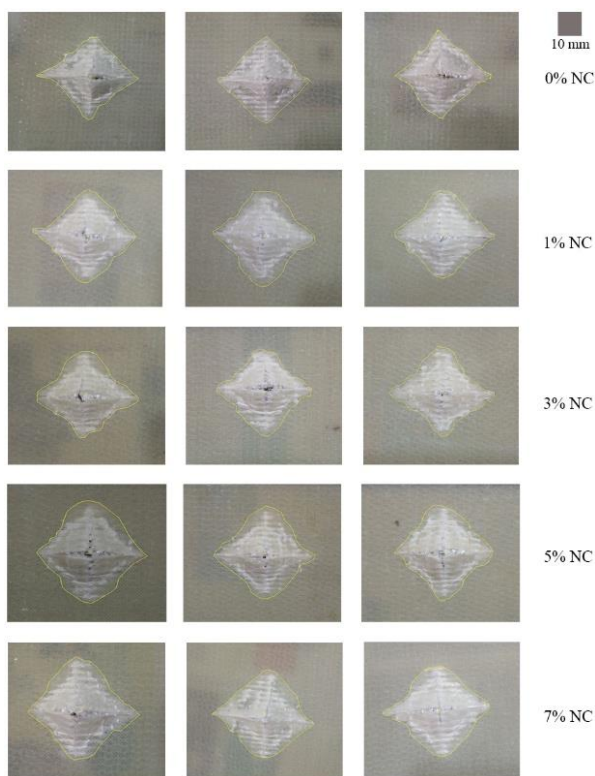


شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به فرایند نفوذ شبه استاتیک



گویای میزان مقاومت یک ماده به تغییر شکل در برابر نیروهای وارده به آن است، لذا تحلیل این پارامتر می‌تواند در تحلیل مقاومت به نفوذ شبه استاتیک مفید باشد. با محاسبه مقادیر میانگین، میزان سفتی برای نمونه‌های حاوی ۳ و ۱ درصد نانورس، نسبتاً مشابه هم بوده و نسبت به ماده بدون نانوذره تا حدود ۱۲ درصد بهبود را نشان می‌دهد. شاخص سفتی برای نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانورس با رفتاری مشابه کامپوزیت پایه روبرو بوده اما برای نمونه حاوی ۷ درصد نانورس، سفتی با کاهش مواجه شده و تا حدود ۱۴ درصد افت کرده است.

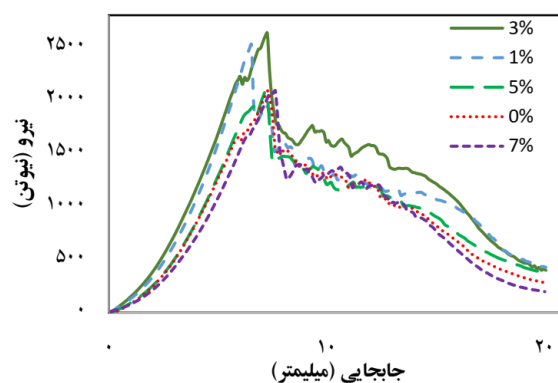
از جمله معیارهای دیگری که می‌توان آن را مورد بررسی قرارداد، مساحت ناحیه آسیب‌دیده طی فرایند نفوذ شبه استاتیک است. شکل ۱۰ تصاویر ناحیه آسیب‌دیده مربوط به نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مساحت ناحیه آسیب در این تصاویر به کمک نرم‌افزار Digimizer اندازه‌گیری شده‌اند. با مقایسه مساحت‌ها که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند مشخص است که مقدار میانگین مساحت ناحیه آسیب‌دیده در کامپوزیت حاوی ۳ درصد نانورس نسبت به مقدار میانگین کامپوزیت بدون نانوذره کمتر است. این مقدار برای کامپوزیت‌های حاوی ۱ و ۵ درصد نانورس مقداری نزدیک به ماده بدون نانو را نشان می‌دهد، اما برای کامپوزیت حاوی ۷ درصد نانورس، میانگین مساحت ناحیه آسیب با افزایش مواجه شده است.



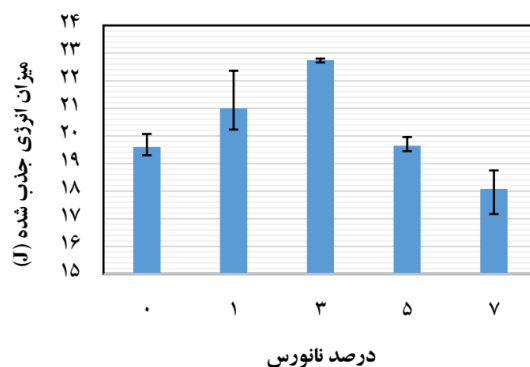
شکل ۱۰ مساحت ناحیه آسیب‌دیده در نانوکامپوزیت های شیشه-اپوکسی با درصدهای مختلف نانورس

گونه‌ای که نمونه ۳ درصد نانورس تا ۱۶ درصد بهبود نسبت به نمونه بدون نانوذره را نشان می‌دهد. نمونه با ۵ درصد نانورس تقریباً رفتاری معادل نمونه خالص از خود نشان داده است. این در حالی است که نمونه حاوی ۷ درصد نانورس با افت مقاومت مواجه شده و انرژی جذب‌شده پایین‌تری را نسبت به نمونه بدون نانوذره نشان می‌دهد. همچنین در این نمودار مقادیر حداقل و حداکثر انرژی برای نمونه‌های با درصدهای نانورس یکسان نمایش داده شده است.

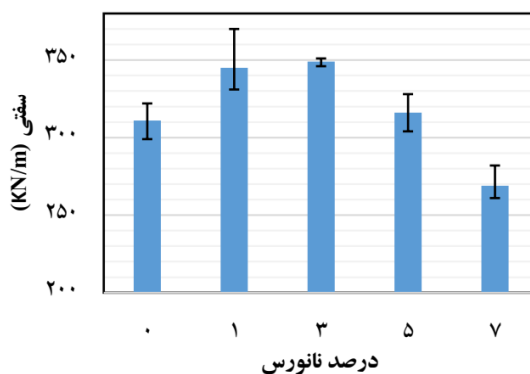
همچنین با تحلیل شیب نمودار نیرو-جابجایی می‌توان مقدار سفتی را برای نمونه‌های مختلف بدست آورد (شکل ۹). سفتی



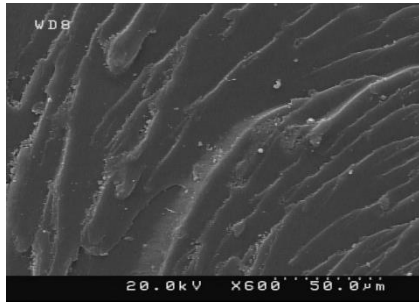
شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به آزمون نفوذ شبه استاتیک برای نانوکامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی با درصدی مختلف نانورس



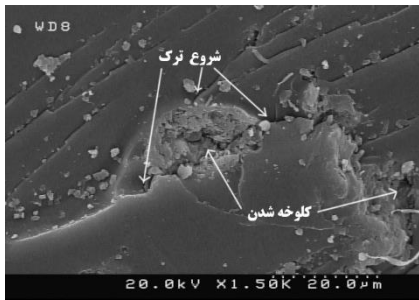
شکل ۸ نمودار میزان انرژی جذب‌شده طی آزمون نفوذ شبه استاتیک برای نانوکامپوزیت های شیشه-اپوکسی با درصدهای مختلف نانورس



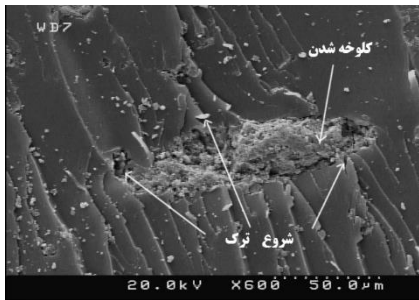
شکل ۹ میزان سفتی مربوط به نانوکامپوزیت های شیشه-اپوکسی با درصدهای مختلف نانورس



(الف)



(ب)

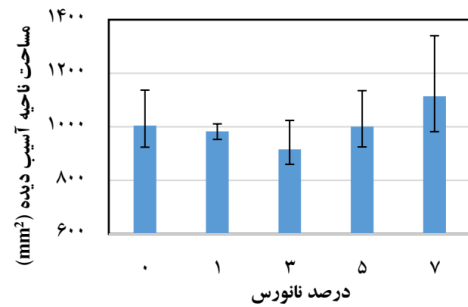


(ج)

**شکل ۱۲** تصاویر SEM مربوط به (الف) نانورزین حاوی ۳ درصد نانورس، ب و ج) کلوخه شدن نانورس در نانورزین های حاوی ۷ درصد نانورس

میزان مقاومت به نفوذ نانوکامپوزیت های شیشه-اپوکسی در برابر بارهای شبه استاتیک مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت، مشاهده شد از بین درصدهای ۱ و ۳ و ۵ و ۷ درصد نانورس، نانوکامپوزیت های حاوی ۳ درصد نانورس تا ۱۶ درصد انرژی بیشتری جذب می کنند و مساحت ناحیه آسیب دیده در آنها نسبت به کامپوزیت های بدون نانوذره کمتر است. به ترتیب نانوکامپوزیت های حاوی ۱ و ۵ درصد در رتبه های بعدی قرار گرفتند و نانوکامپوزیت های حاوی ۷ درصد نانورس به دلیل تجمع نانورس ها و تشکیل کلوخه، با افت خواص مکانیکی مواجه شدند و حتی در نسبت کامپوزیت بدون نانو، نتایج ضعیف تری از خود نشان دادند. لذا نانوکامپوزیت های حاوی ۳ درصد نانورس، از مقاومت بالاتری در برابر ضربه های سرعت پایین برخوردار هستند.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران و مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون های غیرمخرب (TWN) تشکر می کنند.



**شکل ۱۱** مساحت ناحیه آسیب دیده طی آزمون نفوذ شبه استاتیک برای نانوکامپوزیت های شیشه-اپوکسی با درصدهای مختلف نانورس

کنار هم گذاشتن نتایج میزان انرژی جذب شده، سفتی و مساحت ناحیه آسیب، و همچنین گزارش های پژوهش های مشابه پیشین [28] نشان می دهد که افزودن به ترتیب ۱ و ۳ درصد نانورس به کامپوزیت شیشه-اپوکسی با ایجاد مانع سخت بر سر راه رشد ترک ها، موجب بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر نفوذ شده است؛ پدیده ای که از سوی کینلاچ و همکاران [29]، فرایند کمان کردن ترک (Crack Bowing Mechanism) نامیده شده است. اما با افزایش میزان درصد نانورس به ۷ درصد، افزودن نانورس منجر به افت خواص مکانیکی شده است و مساحت ناحیه آسیب دیده نیز بیشتر شده است.

برای پی بردن به دلیل افت استحکام نمونه های حاوی ۷ درصد نانورس از میکروسکوپ الکترونی روبشی کمک گرفته شده است. با مشاهده عکس های مربوط به مقاطع نانورزین های حاوی درصدهای مختلف نانورس (شکل ۱۲) مشاهده شد که در نانورزین حاوی ۷ درصد نانورس، ذرات نانو با چسبیدن به هم و تشکیل کلوخه، نه تنها مانع رشد ترک ها نشدند، که خود به عاملی برای ایجاد نقطه شروع ترک ها تبدیل شدند. با این اتفاق، در هنگام اعمال بار بر نمونه، این نواحی در معرض تمرکز تنش قرار گرفته و ترک ها رشد می کنند. لذا این پدیده منجر به افت خواص مکانیکی در نمونه های حاوی درصدهای بالای نانورس شده است. برعکس آنچه در مورد نانورزین های حاوی ۷ درصد نانورس مشاهده شد، در بخش الف از شکل ۱۲ ذرات نانورس به خوبی در بستر نانورزین حاوی ۳ درصد نانو توزیع شده اند و پدیده کلوخه شدن در مورد این مواد مشاهده نمی شود. این موضوع در کنار نتایج حاصل از نمودارهای طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس گویای این است که توزیع نانوذرات در نانورزین های حاوی ۳ درصد نانورس موفق بوده و نانوذرات در این مواد، با ایجاد موانعی بر سر راه گسترش ترک ها توانسته اند مقاومت در برابر رشد ترک ها و فرایند نفوذ شبه استاتیک را بهبود دهند.

#### ۴- جمع بندی

امروزه به صورت گسترده ای از نتایج آزمون نفوذ شبه استاتیک برای پیش بینی مقاومت کامپوزیت ها در برابر ضربه های سرعت پایین استفاده می شود. در این پژوهش، اثر درصدهای مختلف نانورس بر

gamma nano-alumina/epoxy composite made by vartm. *Int J Adv Biotechnol Res*. 2016;7:731-6.

12- Ghabezi P, Farahani M. Composite adhesive-bonded joint reinforcement by incorporation of nano-alumina particles. *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2016;47(2):231-9.

13- Kim SW, Cha MC, Lee I, Kim EH, Kwon IB, Hwang TK. Damage evaluation and strain monitoring of composite plates using metal-coated FBG sensors under quasi-static indentation. *Composites Part B: Engineering*. 2014;66:36-45.

14- Ghabezi P, Farahani M. Trapezoidal traction-separation laws in mode II fracture in nano-composite and nano-adhesive joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2018;37(11):780-94.

15- Wagih A, Maimí P, Blanco N, Costa J. A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events in low velocity impacts on composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;82:180-9.

16- Symons DD. Characterisation of indentation damage in 0/90 lay-up T300/914 CFRP. *Composites science and technology*. 2000;60(3):391-401.

17- Kamar NT, Hossain MM, Khomenko A, Haq M, Drzal LT, Loos A. Interlaminar reinforcement of glass fiber/epoxy composites with graphene nanoplatelets. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015;70:82-92.

18- Iqbal K, Khan SU, Munir A, Kim JK. Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix. *Composites Science and Technology*. 2009;69(11-12):1949-57.

19- Kaybal HB, Ulus H, Demir O, Şahin ÖS, Avcı A. Effects of alumina nanoparticles on dynamic impact responses of carbon fiber reinforced epoxy matrix nanocomposites. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018;21(3):399-407.

20- Reis PN, Ferreira JA, Zhang ZY, Benameur T, Richardson MO. Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. *Composites Part B: Engineering*. 2013;46:7-14.

21- Taraghi I, Fereidoon A, Taheri-Behrooz F. Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures. *Materials & Design*. 2014;53:152-8.

22- Goodarz M, Bahrami SH, Sadighi M, Saber-Samandari S. Low-velocity impact performance of nanofiber-interlayered aramid/epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2019;173:106975.

23- Shelly D, Singh K, Nanda T, Mehta R. Addition of nanomer clays to GFRPs for enhanced impact strength and fracture toughness. *Materials Research Express*. 2018;5(10):105013.

24- Saba N, Jawaid M, Asim M. Recent advances in nanoclay/natural fibers hybrid composites. *Nanoclay reinforced polymer composites*. 2016:1-28.

25- Naresh K, Rajalakshmi K, Vasudevan A, Senthil Kumaran S, Velmurugan R, Shankar K. Effect of nanoclay and different impactor shapes on glass/epoxy composites subjected to quasi-static

تأییدی اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است و محتویات علمی مقاله حاصل کار پژوهشی نویسندگان آن بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌هاست.

**تعارض منافع:** هیچ‌گونه تعارض منافی در تهیه و نگارش این مقاله وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** صادق حسین لقب (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقاله (۳۵٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/روش شناس (۳۵٪)؛ مجید صفرآبادی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۰٪).

**منابع مالی:** کلیه هزینه‌ها از سوی نویسندگان مقاله تأمین شده است.

### منابع

- 1- Hancox NL. An overview of the impact behaviour of fibre-reinforced composites. Woodhead Publishing, Cambridge, UK; 2000.
- 2- Sutherland LS, Soares CG. The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance of marine GRP laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43(3):1459-67.
- 3- Khoshrooz P, Farahani M, Farahani MS, Khazaei R. Experimental and numerical investigation on the residual distortion and stress fields in un-symmetric hybrid composite laminates induced by the manufacturing process. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020:1-7.
- 4- Mobarakian M, Safarabadi M, Farahani M. Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates. *Composite Structures*. 2020;236:111875.
- 5- Davies GA, Hitchings D, Zhou G. Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/polyester laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996;27(12):1147-56.
- 6- Kilic B, Agwai A, Madenci E. Peridynamic theory for progressive damage prediction in center-cracked composite laminates. *Composite Structures*. 2009;90(2):141-51.
- 7- Kim EH, Rim MS, Lee I, Hwang TK. Composite damage model based on continuum damage mechanics and low velocity impact analysis of composite plates. *Composite Structures*. 2013;95:123-34.
- 8- Mili F, Necib B. Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities. *Composite structures*. 2001;51(3):237-44.
- 9- Saedifar M, Najafabadi MA, Zarouchas D, Toudeshky HH, Jalalvand M. Barely visible impact damage assessment in laminated composites using acoustic emission. *Composites Part B: Engineering*. 2018;152:180-92.
- 10- Tita V, De Carvalho J, Vandepitte D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches. *Composite Structures*. 2008;83(4):413-28.
- 11- Ghabezi P, Farahani M, Hosseini Fakhr M. Investigation of mechanical behavior of alfa and



punch shear loading. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2018;4(3):345-57.

26- Christy A, Purohit R, Rana RS, Singh SK, Rana S. Development and analysis of epoxy/nano SiO<sub>2</sub> polymer matrix composite fabricated by ultrasonic vibration assisted processing. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(2):2748-54.

27- ASTM International. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. ASTM International; 2007.

28- Saravanakumar K, Arumugam V. Effect of milled glass fibers on quasi-static indentation and tensile behavior of tapered laminates under acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;201:36-46.

29- Kinloch AJ, Maxwell D, Young RJ. Micromechanisms of crack propagation in hybrid-particulate composites. *Journal of materials science letters*. 1985;4(10):1276-9.