



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



بررسی تجربی مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی تقویت شده با ذرات نانو سیلیکا و نانو رس

حمیدرضا امامیه¹، مهدی یارمحمدتوسکی^{2*}، محسن جباری³، احمدرضا خورشیدوند³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران.

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

* تهران، صندوق پستی 11365-4435، m_yarmohammad@azad.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

یکی از روش‌های تقویت استحکام کامپوزیت‌ها به عنوان جایگزینی سبک و بهینه برای مواد متداول نظیر فلزات، استفاده از تقویت کننده‌های نانویی می‌باشد. افزودن نانوذرات می‌تواند با هدف تقویت مقاومت و استحکام در بارگذاری‌های مختلف انجام گیرد. این مطالعه به منظور بررسی اثر افزودن نانوذرات سیلیکا و رس در میزان تغییرات مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی در آزمون ضربه سرعت پایین می‌باشد. رویه‌ها از الیاف شیشه و رزین اپوکسی همراه با ذرات سیلیکا و رس ساخته شده است. فرآیند ساخت به صورت لایه گذاری دستی می‌باشد. به منظور توزیع بهتر نانوذرات در ماتریس رویه صفحات ساندویچی از دستگاه اولتراسونیک استفاده شده است. آزمون‌های ضربه سرعت پایین توسط دستگاه وزنه افتان انجام شده است. آزمون ضربه سرعت پایین در 2 سطح انرژی 15 و 30 ژول انجام شد. مناطق آسیب دیده صفحات توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داده‌اند که میزان مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی بعد از استفاده از نانوذرات، تغییر کرده و بهبود یافته‌اند. بطوریکه میزان مقاومت به ضربه صفحه ساندویچی در حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس 13.65% بالاتر از حالت بدون نانو و حالت 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس 6.6% بیشتر از حالت بدون نانو می‌باشد.

دریافت: 1400/06/01

پذیرش: 1400/09/17

کلیدواژگان

همزمانی

نانوذرات

صفحات ساندویچی

ضربه سرعت پایین

An experimental investigation of impact resistance of sandwich panels reinforced by nano-silica and nano-clay

H.R. Emamieh¹, M. Yarmohammad Tooski^{1*}, M. Jabbari¹, A.R. Khorshidvand¹

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad university South Tehran Branch, Tehran, Iran.

* P.O.B. 11365-4435, Tehran, Iran, m_yarmohammad@azad.ac.ir

Keywords

Synchronization
Nanoparticles
Sandwich panel
Low-velocity impact

Abstract

Nano-reinforcers are identified as one of the ways of strengthening composites as an optimal and light alternative for common materials like metals. Adding nano-particles is done in different loadings so as to strengthen the resistance and stability. The aim of the present study was to scrutinize the simultaneous effect of nano-particles of silica and clay in the amount of resistance changes onto the impacts of sandwich panels in the low velocity impact test. The face sheets of the panels were made by glass fibers and resin epoxy with nanoparticles of silica and clay. The type of making process was manual layering. The ultrasonic device was applied to perfectly distribute nano-particles through the face sheet matrix of the sandwich panels. The low velocity impact tests were done by the drop weight equipment. The low velocity impact test was done in two levels of energy including 15J and 30J. The damaged parts of the panels were inspected by SEM. The experimental results indicated that the amount of resistance to the impact of sandwich panels were changed and improved after using nano-particles. Thus, the amount of resistance to the impact holding cases of 3% of nano-silica and 1% of nano-clay was 13.65% higher than the case without nano and the case of 1% of nano-silica and 3% of nano-clay was actually 6.6% more than the case without nano.

1- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آنچه امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد تقویت این سازه‌ها در برابر ضربه می‌باشند [1]. مواد نانو سبب کاهش وزن و بهبود عملکرد سازه‌ها در برابر بارگذاری‌هایی مانند ضربه می‌گردند. نانوذرات با توجه به مدول یانگ بالا و استحکام فوق‌العاده‌ای که دارند می‌توانند بهبود قابل توجهی در خواص مواد کامپوزیتی در مقابل ضربه ایجاد نمایند. تاکنون، تعداد کمی از

امروزه سازه‌های کامپوزیتی به سرعت در حال جایگزینی بجای آلیاژهای فلزی معمول در صنعت می‌باشند. این مواد به خاطر ویژگی‌های کاربردی خود از قبیل سبکی، ساخت راحت و قیمت ارزان بسیار مورد توجه می‌باشند. صفحات ساندویچی به عنوان بخش بزرگی از کامپوزیت‌ها همواره در صنایع مختلف

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Emamieh, H. R., Yarmohammad Tooski, M., Jabbari, M., Khorshidvand, A. R., "An experimental investigation of impact resistance of sandwich panels reinforced by nano-silica and nano-clay", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1573-1582, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.536007.1742>

گرفته است. صفحات ساندویچی ساخته شده دارای هسته PVC و رویه با الیاف شیشه تک جهته و رزین اپوکسی می‌باشند. در کل یک حالت بدون نانو و 4 حالت دیگر با درصد‌های مختلف نانوذرات سیلیکا و رس ساخته شده است. سپس، صفحات ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و داده‌های مکانیکی نیرو، جابجایی، زمان و سرعت ثبت گردیدند. با استفاده از داده‌های مکانیکی جمع‌آوری شده، نمودارهای نیرو-جابجایی، نیرو-زمان، جابجایی-زمان و سرعت-زمان با یکدیگر مقایسه گردید. در انتها نیز جهت ارزیابی بیشتر و جزئی‌تر تأثیر نانوذرات ترکیبی روی آسیب‌های بوجود آمده در صفحات ساندویچی، از تصاویر SEM استفاده شد و با نتایج مکانیکی مقایسه شد.

2- مواد و روش آزمایش

1-2- ساخت نمونه‌ها

رویه‌ی صفحات ساندویچی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی با نام تجاری EPL1012 همراه با هاردنر با نام تجاری EPH 112 متعلق به شرکت لیوراد¹ (با نسبت وزنی 100:15) و با روش لایه گذاری دستی ساخته شده‌اند. مشخصات رزین و هاردنر استفاده شده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است. هر کدام از رویه‌های زیرین و فوقانی شامل چهار لایه الیاف با زوایای صفر، نود، نود و صفر می‌باشند. هسته مورد استفاده نیز از جنس PVC با ضخامت 10 میلیمتر با تراکم اسمی $80(\text{kg}/\text{m}^3)$ و مقاومت فشاری $1.4(\text{MPa})$ تهیه شده از شرکت دیاب² می‌باشد (جدول 2).

جدول 1 مشخصات رزین اپوکسی EPL 1012-Liorad Co در دمای 25°C + درجه سانتی‌گراد

Table 1 The Properties of epoxy resin EPL1012-Liorad Co at 25°C

خواص	میزان
تراکم (kg/m^3)	900-1100
استحکام فشاری (kgf/cm^2)	974
مدول فشاری (kgf/cm^2)	9371
استحکام خمشی (kgf/cm^2)	960
مدول خمشی (kgf/cm^2)	36454
استحکام کششی (kgf/cm^2)	761
مدول کششی (kgf/cm^2)	27890
مقاومت در برابر ضربه (kJ/m^2)	7.850

جدول 2 مشخصات فوم PVC H80-Diab در دمای 23°C + درجه سانتی‌گراد

Table 2 The Properties of PVC foam H80-Diab at 23°C

خواص	میزان
تراکم اسمی (kg/m^3)	80
مقاومت فشاری (MPa)	1.4
مدول فشاری (MPa)	90
استحکام کششی (MPa)	2.5
مدول کششی (MPa)	95
مقاومت برشی (MPa)	1.15
مدول برشی (MPa)	27

محققان تأثیر افزودن نانوذرات به صفحات ساندویچی کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [2-7]. به عنوان مثال، ژنگ و همکاران [8] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت با الیاف شیشه و نانو سیلیکا پرداختند که با افزایش درصد وزنی نانوسیلیکا تا 7 درصد مقاومت خمشی، مقاوت برشی و مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر تسای و همکاران [9]، اثر نانوذرات سیلیکا بر مقاومت برشی داخل صفحه‌ای را بررسی نموده و گزارش دادند که با افزایش درصد وزنی نانو سیلیکا تا 20 درصد، مقاومت برشی داخل صفحه‌ای افزایش می‌یابد. لینگراجو و همکاران [10] اثرات درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر خواص مکانیکی، مقاومت به ضربه و خواص سایشی نانوکامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه و نانوسیلیکا را بررسی کرده‌اند. افزودن نانوسیلیکا باعث بهبود خواص اپوکسی خالص نیز می‌شود [11]. به عنوان نمونه مرتضوی و همکاران [12] در مطالعه‌ای مشاهده کردند که با اضافه کردن نانوسیلیکا به اپوکسی، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل ایجاد پیوند قوی بین ماتریس و نانوذرات باشد. در مطالعه‌ای دیگر زمانیان و همکاران [13] دریافتند که با افزودن نانوسیلیکا به اپوکسی، مدول یانگ و انرژی شکست افزایش می‌یابد. یکی از دلایل محتمل این امر می‌تواند نقش نانوسیلیکا در جلوگیری از انتشار ترک باشد. وانگ و همکاران [14] پی بردند که با اضافه کردن نانوسیلیکا به اپوکسی خالص، مدول یانگ و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. لیو و همکاران [15] به این نتیجه رسیدند که با اضافه شدن نانوسیلیکا به اپوکسی چقرمگی شکست مود اول افزایش می‌یابد. که با افزایش درصد وزنی نانوسیلیکا از 0 تا 3 استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد. سیناغ و همکارانش [16] نشان دادند که کامپوزیت‌های حاوی 2 درصد وزنی نانوذرات سیلیس حداکثر مقاومت کششی، مقاومت در برابر ضربه و سفتی را نشان می‌دهند، در حالی که کامپوزیت با 3 درصد وزنی نانوذرات سیلیس بیشترین مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

آویلا و همکاران [17] اثر نانو بر روی صفحات ساندویچی کامپوزیتی تحت بارهای ضربه‌های را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن 5% وزنی از نانوذرات (رس)، منجر به جذب انرژی بیشتر و کارایی بهتری می‌شود. لیاقت و همکاران [18] اثر درصد وزنی نانوذرات رس را بر استحکام ضربه در چند لایه‌ها بررسی نمودند و درصد وزنی بهینه را برای مقابله با ضربه و نفوذ بدست آوردند. سزار گانسینگ و همکاران [19] به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد وزنی ذرات نانو اثر خوبی در استحکام کششی و مدول کششی دارد ولی کشیدگی تا شکست را کم می‌کند. بیدی و همکاران [20] نشان دادند که استفاده از نانوذرات رس در بهبود قابلیت جذب انرژی و کاهش تغییر شکل صفحه ساندویچی مؤثر می‌باشد. مفتخریان و همکارانش [21] 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. تیرتاش و همکاران [22] با بررسی حضور 5% نانو رس در زمینه کامپوزیت متوجه شده‌اند مقدار استحکام خمشی و انرژی جذب شده تا 40% افزایش یافته است. آنچه مشخص می‌باشد، در تحقیقات ذکر شده تنها اثر یک نوع نانوذره بر بهبود خواص کامپوزیت‌ها بررسی شده است و بهتر است بررسی‌های بیشتری در مورد تأثیر انواع و درصد نانوذرات اضافه شده و همچنین استفاده همزمان آنها بر رفتار مقاومت به ضربه پانل ساندویچی انجام شود. در این پژوهش اثر حضور دو نوع نانو به طور همزمان (نانوذرات سیلیکا و رس) در میزان افزایش یا کاهش مقاومت به ضربه صفحات ساندویچی تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار

² Diab. www.diabgroup.com

¹ Liorad Company

حالت دیگر با درصدهای مختلف هر دو نوع نانوذره تهیه گردید. جدول 4، خلاصه‌ای از ترکیب تمام حالت‌ها با ذکر جزئیات درصدهای حجمی اضافه شده بیان می‌کند.

جدول 4 درصدهای مختلف نانوذرات در صفحه ساندویچی

Table 4 Percentage of nanoparticles added to the composite sandwich panel in the present study

حالت‌های دارای نانو X و Y				حالت بدون نانو	
5	4	3	2	1	شماره نمونه
%3	%3	%1	%1	%0	درصد سیلیکا
%3	%1	%3	%1	%0	درصد رس

2-2- آزمایش ضربه سرعت پایین

برای بررسی رفتار کامپوزیت‌ها تحت ضربه سرعت پایین، نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین قرار می‌گیرند. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمایش ضربه سرعت پایین میزان خرابی از جمله شکست الیاف، تورق و شکست ماتریس را می‌توان بررسی کرد. در این پژوهش شرایط مرزی لبه گیردار در نظر گرفته می‌شود (چهار طرف گیردار) و نمونه‌ها با استفاده از فیکسچر، ثابت نگه داشته می‌شوند. نمونه‌ها پس از قرارگیری در فیکسچر، روی فک پایینی دستگاه قرار می‌گیرند. سطح آزاد مؤثر نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه سرعت پایین در فیکسچر 60×60 میلی‌متر مربع می‌باشد.

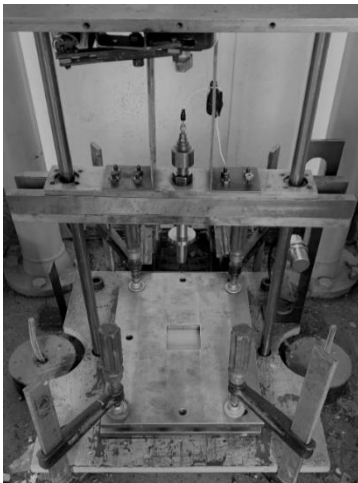


Fig. 2 View of the low velocity impact tester

شکل 2 نمایی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین

دستگاه آزمون سقوط آزاد جهت انجام آزمون ضربه سرعت پایین بر روی سازه‌های مختلف شامل تیر، ورق، لوله و ... با شرایط مرزی دلخواه و با ضخامت 2 الی 200 میلی‌متر می‌باشد. خروجی دستگاه بصورت داده‌هایی از شتاب-زمان است که با استفاده از روابط ریاضی، منحنی‌های نیرو-جابجایی، سرعت-زمان، انرژی-زمان و غیره را بدست آورد. تنظیمات دستگاه بصورت تمام خودکار بوده تا از خطاهای انسانی جلوگیری شود. دستگاه ضربه قادر به تنظیم وزنه و ارتفاع ضربه در محدوده‌ی 0.1 به 2 متر بوده است. ضربه زنده‌ی مورد استفاده در این پژوهش بصورت نیم کروی به قطر 16 میلی‌متر بوده که در فک متحرک

نمونه‌ها در ابعاد $120 \times 120 \times 10 \pm 5\% \text{ mm}^3$ ساخته شده‌اند. چگالی الیاف شیشه استفاده شده در رویه 409 گرم بر متر مربع می‌باشد. نانوذرات مورد استفاده نیز سیلیکا¹ و رس² هستند که درصد خلوص، اندازه‌ی ذرات و چگالی آنها در جدول 3 قابل مشاهده است.

جدول 3 مشخصات نانوذرات استفاده شده در این تحقیق

Table 3 The nanoparticles used in the present study

نام نانوذره	درصد خلوص	اندازه ذرات (نانومتر)
سیلیکا	98	20-30
رس	98	1-2

برای توزیع بهتر نانوذرات در زمینه، از دستگاه التراسونیک ساخت کارخانه SONOPULS HD مدل BANDELIN کشور آلمان استفاده شده است که در شکل 1 نشان داده شده است. این دستگاه از نوع پروبی³ می‌باشد که با ارسال امواج اولتراسونیک توسط پروب دستگاه، ترکیب خوشه‌ای نانو ساختارها به اجزای ریزتری شکسته شده و در نتیجه نسبت سطح به حجم در ساختارهای نانو افزایش پیدا می‌کند. توان ماکزیمم دستگاه 200 وات است که در فرکانس 20 کیلوهرتز امواج مورد نظر را تولید می‌کند. در این تحقیق توان دستگاه نیز روی 75% مقدار کل یعنی 150 وات قرار داده شد.



Fig. 1 View of the ultrasonic device

شکل 1 نمایی از دستگاه اولتراسونیک

در ابتدا رزین تا دمای 40 الی 50 درجه گرم شد تا ویسکوزیته کاهش و انحلال افزایش یابد. پس از اندازه‌گیری میزان نانو با ترازوی دیجیتال، محلول رزین و نانوذره‌ی اول را بوسیله همزن مکانیکی به مدت 10 دقیقه هم زده و سپس به مدت 15 دقیقه از دستگاه التراسونیک برای شکست ذرات نانو و ایجاد مخلوط استفاده شده است. این 15 دقیقه به 3 بازه 5 دقیقه‌ای تقسیم شد (برای جلوگیری از داغ شدن پروب) و هر فاز 5 دقیقه‌ای نیز به بازه 20 ثانیه‌ای (20 ثانیه اولتراسونیک و 20 ثانیه استراحت) تقسیم گردید. برای اضافه کردن نانوذره دوم نیز ابتدا 15 دقیقه مخلوط اولتراسونیک شده و در نهایت 15 دقیقه دیگر جهت دستیابی به محلول کاملا همگن عملیات اولتراسونیک انجام شد. یعنی نانوذره اول در کل 45 دقیقه و نانوذره دوم 30 دقیقه اولتراسونیک شده است. برای بررسی تأثیر حضور نانوذرات لازم است حالتی به عنوان حالت شاهد، یعنی فاقد ذرات نانو نیز ساخته شود. بدین ترتیب علاوه بر حالت شاهد، 4

¹ Nano silica, US Research Nanomaterials, Inc. www.us-nano.com

² Nano clay, Sigma-Aldrich. www.sigma-aldrich.com

³ Prob

نیوتن بوده و به ترتیب در زمان‌های 0.0042 و 0.0032 ثانیه اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار نیروی تماسی مربوط به حالتی است که نمونه تحت ضربه با انرژی 30 ژول قرار داشته است.

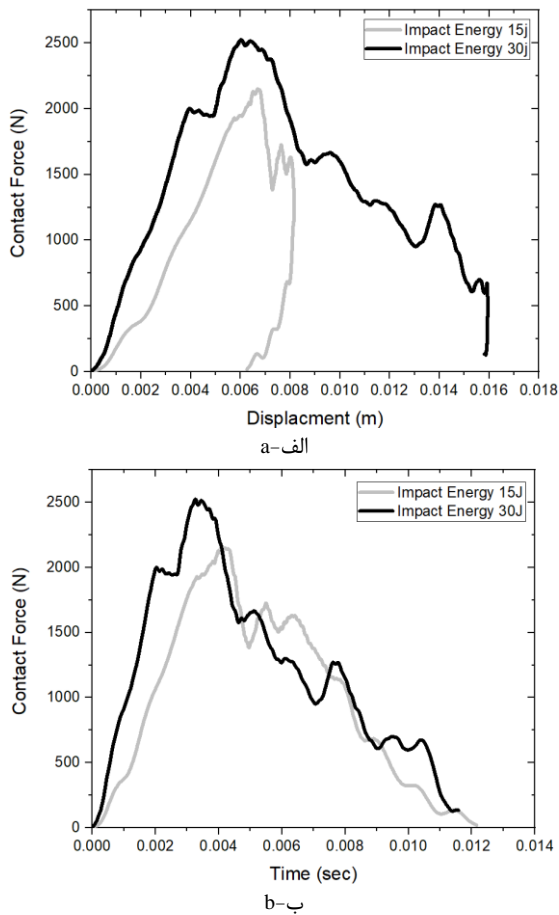


Fig. 3 The case of without nano (a) The curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 3 حالت بدون نانو (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

1-3- اثر افزودن (همزمان) نانوذرات سیلیکا و رس بر مقاومت به ضربه سرعت پایین

1-1-3- بررسی نمودارهای نیروی تماسی-زمان و نیروی تماسی-جابجایی

در ساخت حالت 2 تا 5 اثر همزمان نانوذره رس و نانوذره سیلیکا مورد بررسی قرار گرفته است. درصدهای به کار رفته از نانوذرات در جدول 2 ارائه شده است. در ادامه به بررسی ماکزیمم انرژی تماسی در نمونه‌ها پرداخته می‌شود. شکل 4a منحنی‌های نیرو تماسی-جابجایی را برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس در سطح انرژی‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود روند 2 منحنی تا قبل از 3 میلی‌متر شبیه به هم بوده و پس از آن به علت برخورد ضربه زنده با رویه فوقانی دارای برآمدگی اولیه می‌گردد، که این برآمدگی اولیه مربوط به آسیب رویه فوقانی است. در نهایت این مقدار (2534 نیوتن) در سطح انرژی 30 ژول به بیشترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن به علت برخورد با هسته PVC منحنی شیب نزولی به خود گرفته است. بر طبق منحنی‌های شکل 4b که نیرو تماسی-زمان صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین

دستگاه قرار داده می‌شود و وزن دقیق آن و متعلقات ثابت دستگاه 2.62 کیلوگرم می‌باشد. در شکل 2 نمایی از دستگاه فوق، متعلق به دانشگاه امیرکبیر نشان داده شده است.

صفحات تحت تأثیر سرعت کم در سطوح انرژی 15J و 30J قرار گرفتند که مطابق با انرژی‌های مختلف، جرم ضربه تنظیم شده است. انرژی ضربه (E_{imp}) و ارتفاع جرم در حال سقوط (H_{imp}) همراه با مشخصات ضربه در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5 مشخصات آزمون ضربه سرعت پایین

Table 5 The features of low-velocity impact tests				
انرژی ضربه (ژول)	وزن ضربه زنده (کیلوگرم)	ارتفاع ضربه زنده (متر)	شکل ضربه (میلیمتر)	قطر سر (میلیمتر)
15	3.058	0.5	نیم‌کره	16
30	6.16	0.496		

در این حالت تمام نمونه‌ها آسیب می‌بینند و در همه سطوح انرژی بازگشت ضربه زنده وجود ندارد. با برخورد ضربه زن به صفحات، داده‌های شتاب برحسب زمان توسط حس‌گر نصب شده بروی ضربه زنده ثبت و از طریق کنترل‌کننده به رایانه متصل به دستگاه منتقل می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌ها، سیگنال‌های مزاحمی در خروجی مشاهده شد، که با استفاده از روش متوسط‌گیری، اثر سیگنال‌های مزاحم از پاسخ‌های خروجی حذف گردید. پس از انجام این کار داده‌های شتاب برحسب زمان به داده‌های نیروی تماسی و انرژی برحسب زمان و نیروی تماسی برحسب جابجایی تبدیل شده‌اند. در ادامه با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های شتاب، سرعت ضربه زنده برحسب زمان و با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های سرعت، جابجایی ضربه زنده برحسب زمان بدست آمده است.

3- نتایج و بحث

برای انجام آزمون ضربه سرعت پایین ابتدا لازم است حالت فاقد نانوذرات، مورد آزمایش قرار گیرد تا بتوان تأثیر اضافه شدن ذرات نانو را مورد بررسی قرار داد. از آنجایی که صفحه ساندویچ دارای 2 رویه فوقانی و زیرین می‌باشد و هسته با جنس PVC در مرکز قرار گرفته، این انتظار می‌رود که منحنی‌ها دارای روند صعودی و نزولی باشند که بخاطر برخورد ضربه زنده با رویه‌های سخت و هسته نرم‌تر است. از روی منحنی نیرو تماس-زمان می‌توان به بررسی شروع آسیب، گسترش آسیب و کم شدن سفتی و استحکام ماده پرداخت. افت شدید نیرو بعد از ماکزیمم نیرو در واقع نقطه شروع آسیب و رشد ترک را نشان می‌دهد. هر قله نشان دهنده آسیب به یک رویه است. پیک نیرو نشان می‌دهد که نمونه‌ها می‌توانند چه میزان نیروی بیشتری را تا قبل از خرابی جدی تحمل کنند. در تمام نمونه‌ها، رویه فوقانی در تمام سطوح انرژی آسیب دیده است. مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی برای حالت‌های بدون نانوذره و تحت ضربه با انرژی‌های مختلف در شکل 3a ارائه شده است. مشاهده می‌شود منحنی‌های نیرو-جابجایی مربوط به ضربه با انرژی‌های 15 و 30 ژول از نظر تعداد برآمدگی و فرورفتگی با یکدیگر مشابهت دارند.

شکل 3b، منحنی‌های نیروی تماسی-زمان با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را نشان می‌دهد. همانطور که قابل مشاهده است ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول به ترتیب دارای مقادیر 2149 و 2524

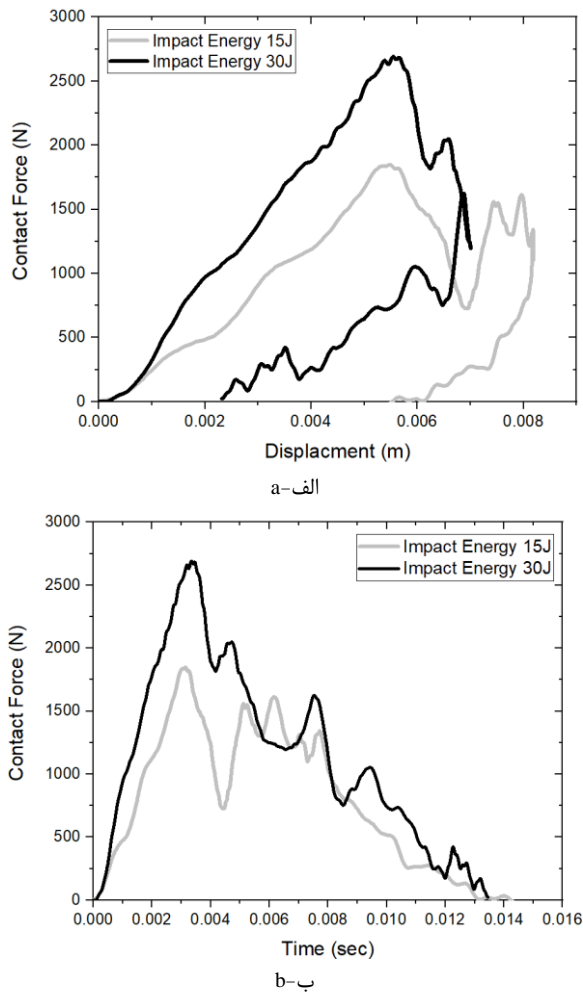


Fig. 5 The case of 1% nano silica and 3% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time
شکل 5 حالت دارای 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

همچنین بیشترین مقدار نیروی تماسی در 30 ژول اتفاق افتاده است. تمامی منحنی‌های ایجاد شده کوه مانند می‌باشند. ماکزیمم نیروی تماسی برای صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس در سطح انرژی‌های 15 و 30 به ترتیب در جابجایی 6.6 و 5.3 میلی‌متر اتفاق افتاده است (شکل 6a). بیشترین جابجایی نهایی در سطح انرژی 15 ژول بوده که برابر با 5.9 میلی‌متر می‌باشد. شکل 6b، منحنی‌های نیرو-زمان صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را نشان می‌دهد. ماکزیمم نیرو در انرژی ضربه 15 و 30 ژول به ترتیب برابر است با 2335 و 2868 نیوتن که در زمان‌های 0.0041 و 0.0032 ثانیه رخ داده است. برای صفحه ساندویچی با 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس روند اولیه منحنی‌های سطح انرژی 15 و 30 ژول شبیه به یکدیگر می‌باشد (شکل 7). مشاهده می‌شود رویه فوقانی در سطح انرژی 30 ژول مقاومت زیادی در برابر ضربه نشان نداده است به طوری که بیشترین نیروی تماسی در رویه اول در سطح انرژی 30 ژول برابر 2628 نیوتن است و جابجایی مربوط به آن برابر با 5.2 میلی‌متر است.

مقدار نیروی تماسی مربوط به حالتی است که صفحه نوع دوم تحت ضربه با انرژی 30 ژول قرار داشته است. ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول دارای مقادیر 2275 و 2534 نیوتن می‌باشند که به ترتیب در زمان‌های 0.005 و 0.0034 ثانیه اتفاق افتاده است.

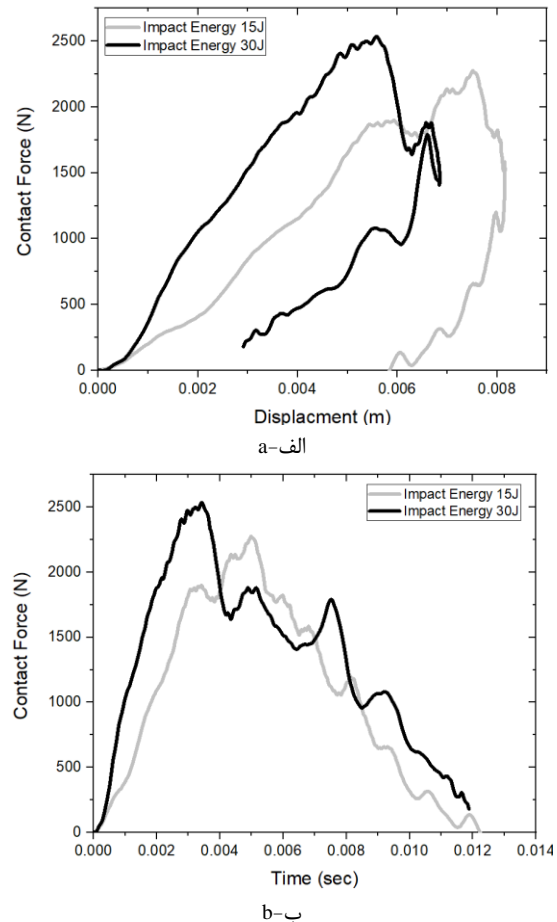
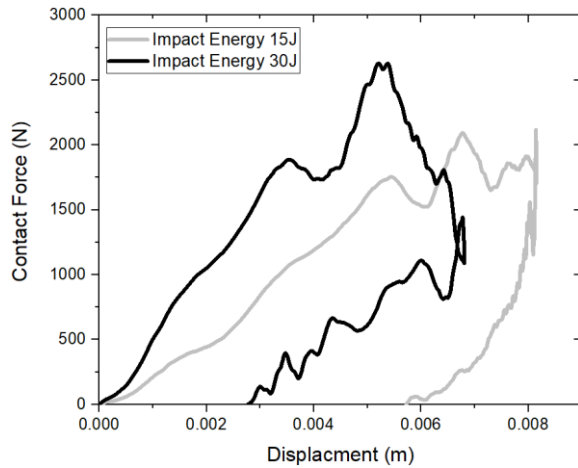
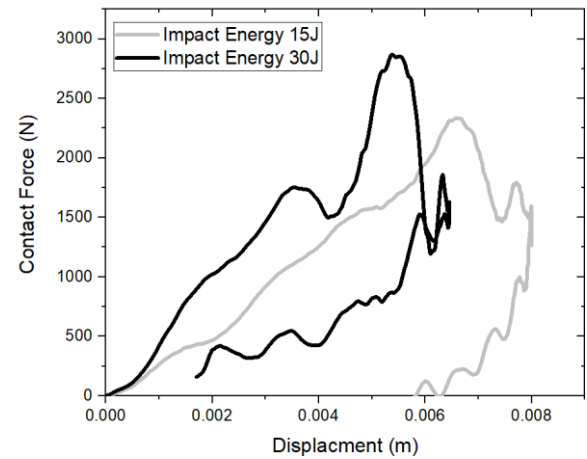


Fig. 4 The case of 1% nano silica and 1% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time
شکل 4 حالت دارای 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

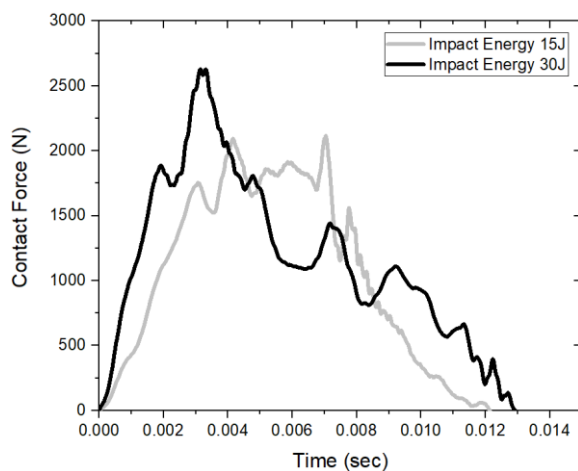
طبق مشاهدات حاصله از شکل 5a، که مقایسه منحنی‌های نیرو تماسی - جابجایی صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول را ارائه می‌دهد، روند منحنی همانند حالت صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس می‌باشد. با این تفاوت که جابجایی نهایی و جابجایی برای حداکثر نیروی تماسی برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس به ترتیب در 2.3 و 5.3 میلی‌متر اتفاق افتاده که برای صفحه ساندویچی با 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس این مقدار به ترتیب در 2.4 و 5.5 میلی‌متر می‌باشد. مقایسه منحنی‌های نیرو تماسی-زمان صفحه ساندویچی با 1% نانو سیلیکا و 3% نانو رس تحت ضربه با انرژی‌های مختلف 15 و 30 ژول (شکل 5b) نشان می‌دهد که ماکزیمم نیروهای تماسی مربوط به سطوح انرژی 15 و 30 ژول به ترتیب دارای مقادیر 1848 و 2690 نیوتن بوده و به ترتیب در زمان‌های 0.0031 و 0.0033 ثانیه اتفاق افتاده است.



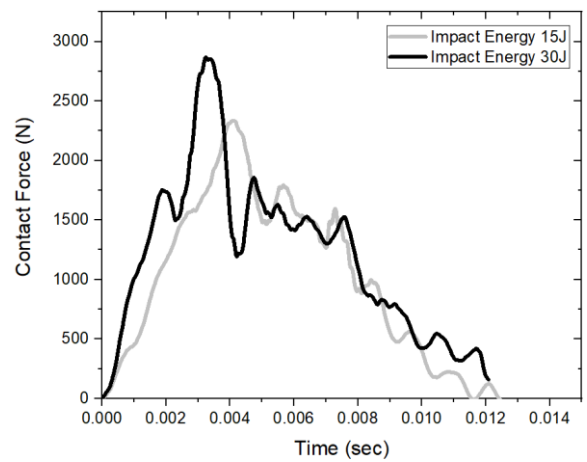
الف-ا



الف-ا



ب-ب



ب-ب

Fig. 7 The case of with 3% of nano silica and 3% of nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time

شکل 7 حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

Fig. 6 The case of 3% nano silica and 1% nano clay (a) curve of contact force-displacement and (b) the curve of contact force-time
شکل 6 حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (الف) منحنی نیروی تماسی - جابجایی و (ب) منحنی نیروی تماسی - زمان

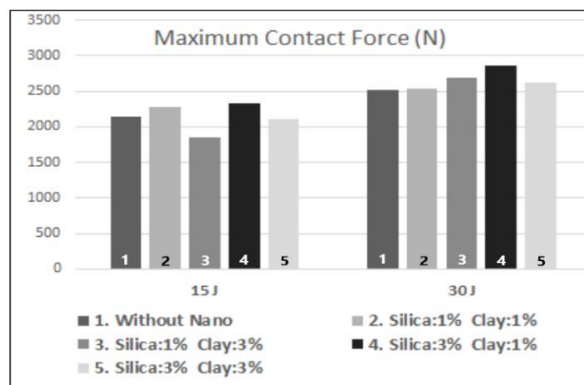


Fig. 8 Comparison of the maximum contact force between the total cases at the energy levels 15 and 30J

شکل 8 مقایسه ماکزیمم نیروی تماسی بین حالت‌های مختلف صفحات ساندویچی در سطوح انرژی 15 و 30 ژول

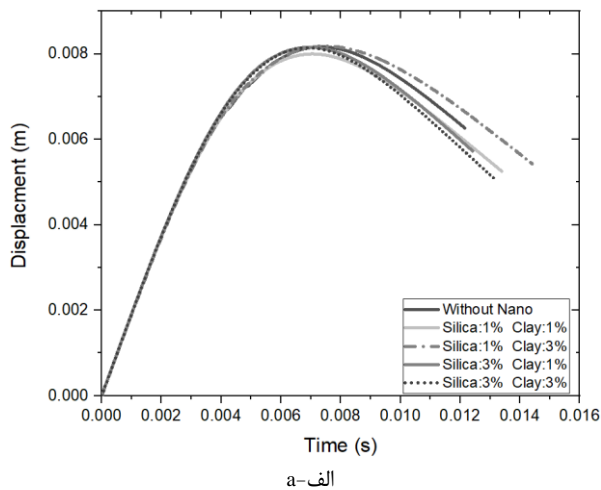
همانطور که در شکل 7a مشخص می‌باشد با افزایش مقدار درصد نانوذره سیلیکا مقدار ماکزیمم انرژی تماسی افزایش پیدا کرده در حالیکه با افزایش مقدار نانوذره رس مقدار ماکزیمم انرژی تماسی کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت نمونه در برابر ضربه کاهش پیدا می‌کند. بر طبق نتایج ارائه شده در شکل 7b بیشترین نیروی تماسی در صفحه ساندویچی دارای نانو سیلیکا 3% و نانو رس 3% در 15 و 30 ژول برابر است با 2116 و 2628 نیوتن که در زمان 0.007 و 0.0031 ثانیه می‌باشد.

حالت سوم با 1% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس کمترین مقاومت به ضربه را در انرژی 15 و حالت پنجم با 3% سیلیکا و 3% نانو رس کمترین مقاومت به ضربه در سطح انرژی 30 ژول و حالت چهارم با 3% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس بیشترین مقاومت به ضربه را در انرژی‌های 15 و 30 ژول داشته است. بهترین حالت در برابر ضربه، حالت دارای 3% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس می‌باشد. مقایسه ماکزیمم نیروهای تماسی در شکل 8 نشان داده شده است.

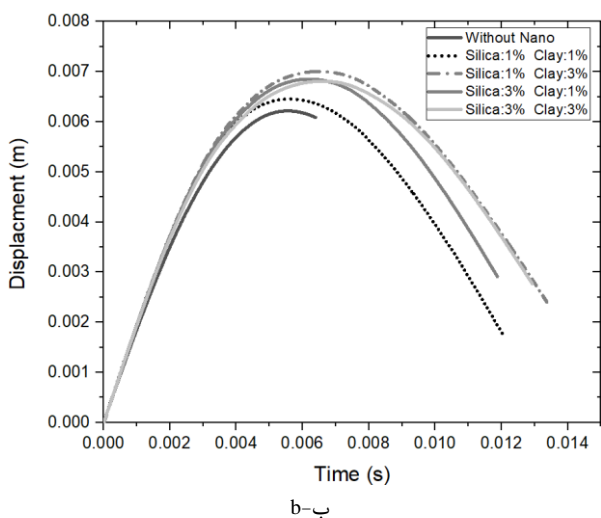
1-2-3- بررسی نمودارهای جابجایی-زمان و سرعت-زمان

شکست الیاف و جدایش بین الیاف و ماتریس رخ داده است ولی میزان منطقه آسیب به خاطر حضور درصد بیشتر نانو سیلیکا بسیار کاهش یافته است.

در ادامه بررسی اثر افزودن نانوذرات به رویه صفحات ساندویچی به بررسی منحنی‌های جابجایی-زمان و سرعت-زمان پرداخته شده است. در شکل 9 منحنی‌های جابجایی-زمان برای سطوح انرژی 15 و 30 ژول آورده شده است. روند منحنی جابجایی-زمان در بین همه حالت‌ها در سطوح مختلف انرژی یکسان می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد حالت دارای 3% سیلیکا و 1% نانو رس دارای بیشترین مقدار جابجایی می‌باشند و هر چه سطح انرژی بالاتر می‌رود اختلاف آن با حالت بدون نانو افزایش می‌یابد. آنچه مشخص است، افزایش حضور نانو سیلیکا در کنار نانو رس باعث افزایش مقدار جابجایی و در نتیجه مقدار جذب انرژی می‌باشد. در سطح انرژی 30 ژول کاملاً مشهود است که در حالت‌های دارای نانو حد اکثر جابجایی در زمان بیشتری نسبت به نمونه بدون نانو رخ داده است.



a-الف



b-ب

Fig. 9 displacement - time curve at the energy level (a) 15J and (b) 30J

شکل 9 منحنی جابجایی-زمان در سطح انرژی (الف) 15 ژول و (ب) 30 ژول

در شکل 10 منحنی سرعت ضربه زنده-زمان در سطح انرژی 30 ژول آورده شده است. آنچه مشخص است که سرعت ضربه زنده از مقدار مثبت 1.99 متر بر ثانیه شروع شده و پس از برخورد با نمونه سرعت آن در زمان‌های 0.0085، 0.0082، 0.0072، 0.0085 و 0.0085 ثانیه به صفر رسیده و در نهایت سرعت برگشت ضربه زنده به مقدار -1.3، -1.13، -1.3، -1.14، -1.28 و -1.15 به ترتیب برای حالت‌های بدون نانو، 1% سیلیکا و 1% رس، 1% سیلیکا و 3% رس، 1% سیلیکا و 3% رس، 3% سیلیکا و 1% رس و 3% سیلیکا و 3% رس می‌باشند. ضربه زنده در نمونه دارای 3% سیلیکا و 1% رس در زمان 0.0072 به مقدار صفر رسیده و پس از آن ضربه زنده مسیر برگشت را در پیش گرفته است. آنچه مشخص است سرعت در این حالت نسبت به حالت‌های دیگر، در زمان کمتری به صفر رسیده و سپس منفی شده است. در کل حضور نانوذرات باعث افزایش میزان مقاومت به ضربه نسبت به نمونه بدون نانو می‌باشد که از این حیث بسیار دارای اهمیت می‌باشد.

2-2-3 اثر حضور نانوذرات بر مکانیزم‌های خرابی

برای بررسی پاسخ ضربه و نوع و میزان آسیب لازم است عوامل مختلفی از جمله شکل و وزن ضربه زنده، ارتفاع و سرعت ضربه، نوع و میزان اختلاط ذرات نانو، تجمع آنها در ماتریس و خواص مواد در ساخت صفحات ساندویچی را در نظر گرفت. در شکل 11 خسارت رخ داده بر روی رویه صفحات تحت تأثیر ضربه برای توصیف میزان و ماهیت مکانیزم‌های خرابی عمده تحلیل و ارزیابی شد. شکل 11a تصویر سطوح شکست صفحه ساندویچی در سطح انرژی 15 و 30 ژول در حالت 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس را نشان می‌دهد. آنچه مشاهده می‌گردد در سطح انرژی 15 و 30 ژول همانطور که در منحنی نیرو-تماسی-زمان مشخص شد فقط رویه فوقانی دچار خسارت می‌شود، با بررسی رویه نمونه در سطح انرژی 30 ژول، لایه لایه شدن و جدایش و شکست الیاف کاملاً مشخص می‌باشد، که نشان از ضعف اتصال بین ماتریس و الیاف دارد. شکل 11b تصاویر مربوط آسیب صفحه ساندویچی با درصد 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس می‌باشد. با بررسی وسعت منطقه آسیب می‌توان مشاهده کرد که این حالت دارای کمترین وسعت منطقه آسیب در میان حالت‌ها، مخصوصاً در سطح انرژی 30 ژول می‌باشد. در این سطح انرژی صفحه رویی کاملاً تخریب شده و هم جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف به خوبی مشخص می‌باشد، ولی با این حال مقدار بسیار زیادی از انرژی ضربه را جذب کرده است. با اینکه

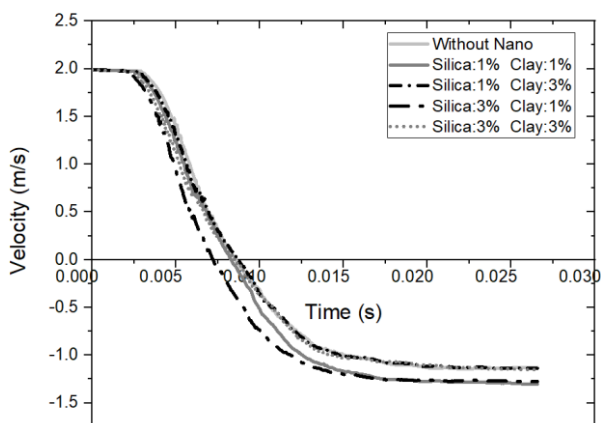


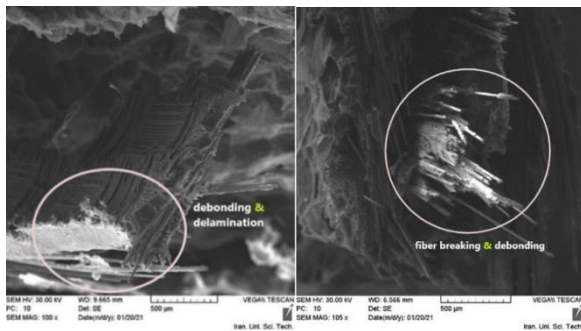
Fig. 10 the curve of velocity- time of different cases of sandwich panels

شکل 10 منحنی سرعت - زمان حالت‌های مختلف صفحه ساندویچی

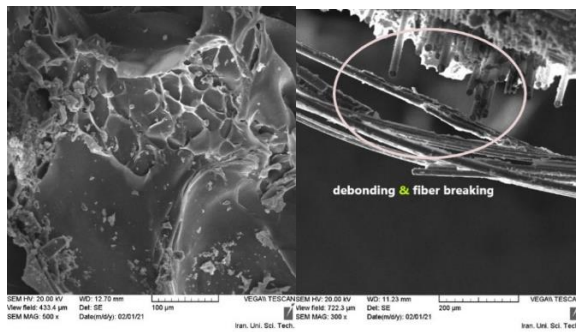
لایه‌ها از هسته، پارگی الیاف و گسیختگی بین الیاف و ماتریس. حضور 3% نانو رس در این حالت باعث کلوخه و تجمع این ذرات در ماتریس و کاهش اتصال بین الیاف و ماتریس گشته است.

3-3- بررسی شکل ناحیه آسیب با استفاده از SEM

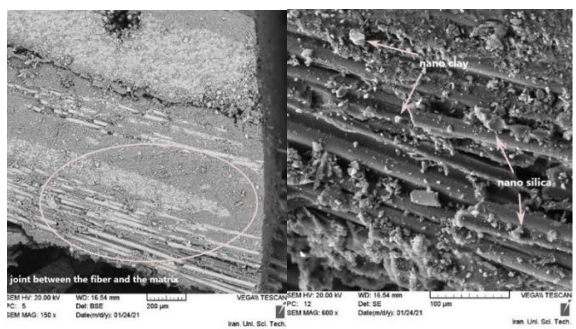
برای مشاهده بهتر خرابی‌ها از SEM¹ بهره گرفته شده است. شکل 12 نتایج بررسی SEM را به ترتیب با بزرگنمایی تدریجی برای حالت‌های مختلف نمایش می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، حالت‌های خرابی در ساندویچ صفحات کامپوزیت شامل شکست الیاف، کمناش الیاف، ترک ماتریس، خورد شدن هسته و لایه شدن می‌باشد، که با تصاویر SEM سازگار است.



الف-ا



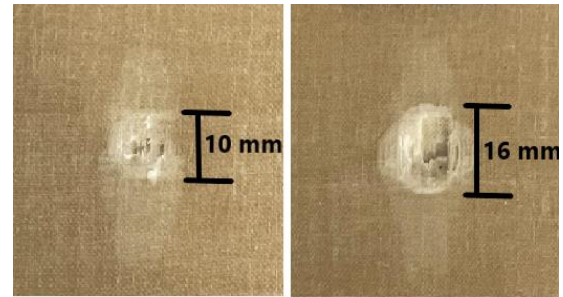
ب-ب



ج-ج

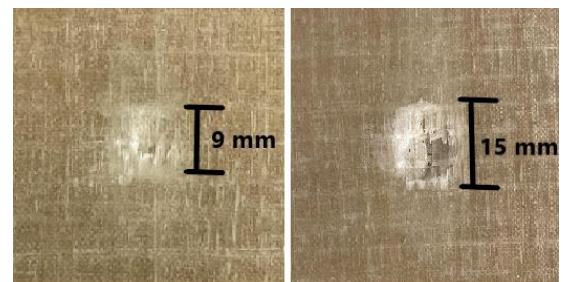
Fig. 12 The SEM images for case with (a) 1% of nano silica and 1% of nano clay, (b) 3% of nano silica and 1% of nano clay and (c) 3% of nano silica and 3% of nano clay

شکل 12. تصاویر SEM برای حالت دارای (الف) 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (ب) 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس (ج) 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس



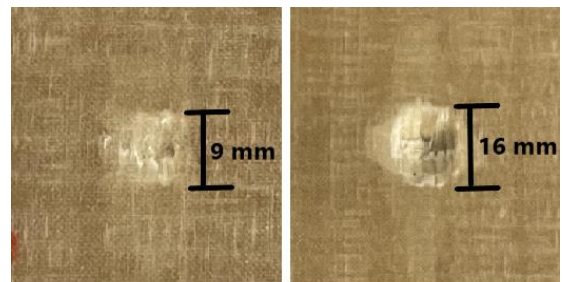
On the sample (15J) On the sample (30J)

الف-ا



On the sample (15J) On the sample (30J)

ب-ب



On the sample (15J) On the sample (30J)

ج-ج

Fig. 11 The amount and state of damage in sandwich panel with (a) 1% of nano silica and 1% of nano clay, (b) 3% of nano silica and 1% of nano clay and (c) 3% of nano silica and 3% of nano clay

شکل 11. میزان و نحوه آسیب در صفحه ساندویچی دارای (الف) 1% نانو سیلیکا و 1% نانو رس، (ب) 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس و (ج) 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس

در شکل 11c نوع و میزان آسیب حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 3% نانو رس نشان داده شده است. این حالت در سطوح مختلف انرژی بیشترین مقدار آسیب را دارا می‌باشد. در سطح انرژی 30 ژول شکستن الیاف، له‌شدگی هسته و بیرون‌زدگی الیاف از رزین کاملاً مشخص می‌باشد. همانطور که از شکل پیداست وسعت منطقه خسارت دیده در رویه فوقانی بیشتر از بقیه حالت‌ها می‌باشد که ترکیبی از حالت‌های خرابی و انواع آسیب‌های ضربه‌ای در چند لایه‌ها وجود دارد، از جمله: ترک ماتریس بین لایه، خورد شدن هسته، جداسازی

¹ Scanning Electron Microscope

شکل 12a نوع آسیب را در حالت دارای 1% نانوذره سیلیکا و 1% نانوذره رس در سطح انرژی 30 ژول نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 12a مشاهده می‌گردد گسیختگی، لایه لایه شدگی و همچنین شکست الیاف کاملاً مشخص می‌باشد. در محل اتصال رویه به فوم جدایش اتفاق افتاده و جدایش بین لایه‌ها به وضوح دیده می‌شود. شکل 12b میزان توزیع نانوذرات در حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس را نشان می‌دهد. شکست الیاف شیشه و جدایش بین لایه‌ها آشکار است. از آنجا که این حالت از صفحه ساندویچی دارای بالاترین نیروی تماسی و در نتیجه بالاترین مقاومت به ضربه در بین همه حالت‌ها می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که وجود نانوذرات سیلیکا باعث افزایش قدرت اتصال بین الیاف شیشه و ماتریس افزایش می‌گردد و با کاهش نانوذرات رس و در نتیجه کاهش مقدار ذرات کلوخه شده و افزایش اتصال الیاف ماتریس کاملاً مشهود می‌باشد. تصویر SEM حالت محتوی 3% نانوذره سیلیکا و 3% نانوذره رس را در سطح انرژی 30 ژول (شکل 12c) گویای پخش شدگی یکنواخت نانوذرات سیلیکا و کلوخه شدن نانوذرات رس است. حضور نانو سیلیکا باعث شده تا حدودی مقاومت به ضربه بهبود یابد ولی با افزایش درصد نانو رس این مقاومت کاهش یافته است. به نظر می‌آید انحلال خوب نانو سیلیکا در ماتریس باعث اتصال محکم‌تر می‌باشد و در نتیجه اتصال یکپارچه بین الیاف و ماتریس برقرار می‌گردد که باعث بالا رفتن مقاومت به ضربه می‌گردد و کلوخه شدن و تجمع ذرات نانو رس باعث کاهش قدرت اتصال بین الیاف و ماتریس و تمرکز تنش و ترک خوردن ماتریس و در پی آن شکست الیاف شده است.

4- بررسی و بحث در نتایج

با بررسی نتایج بدست آمده از آزمون ضربه سرعت پایین و منحنی‌های بدست آمده از این آزمون، مقایسه ماکزیمم نیروی تماسی (شکل 8) و مقایسه مناطق آسیب در شکل 11 و تصاویر SEM در شکل 12 خلاصه‌ای از عملکرد ذرات نانو موجود در ماتریس صفحات ساندویچی ارائه می‌گردد. با بررسی 5 حالت از صفحات با درصد‌های مختلف نانوذرات سیلیکا و رس می‌توان مشاهده کرد که بیشترین نیروی تماسی در سطح انرژی 30 ژول از حالت دارای 3% نانو سیلیکا و 1% نانو رس بدست آمده است. با بررسی نواحی آسیب و مقایسه وسعت آن می‌توان به صحت این موضوع اشاره کرد. در این بررسی مشخص می‌باشد که حضور نانو سیلیکا و افزایش درصد آن از 1% تا 3% باعث افزایش ماکزیمم نیروی تماسی و در نتیجه افزایش مقاومت به ضربه می‌باشد. در حالیکه حضور نانو رس در ماتریس صفحات ساندویچی و افزایش درصد آن از 1% به 3%، باعث کاهش ماکزیمم نیروی تماسی و در نتیجه کاهش مقاومت به ضربه می‌گردد. افزودن نانوذره سیلیکا تأثیر بسزایی در سطح تخریب رویه صفحات ساندویچی داشته است. به ازای افزودن نانو سیلیکا میزان سطح شکست در مقایسه با حالت بدون نانو بطور قابل توجهی کاهش یافته است. این اتفاق به دلیل افزایش سفتی رویه صفحات ساندویچی می‌باشد. در نتیجه مقدار انرژی مورد نیاز بیشتری برای ایجاد آسیب لازم است. مقاومت به ضربه با افزایش درصد وزنی نانو رس در کامپوزیت به دلیل کلوخه شدن و ایجاد فضاهای خالی در رویه صفحه ساندویچ و کاهش اتصال ماتریس و الیاف، کاهش می‌یابد.

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر همزمان حضور نانوذرات سیلیکا و رس در ماتریس صفحات ساندویچی تحت آزمون ضربه کم سرعت در دو سطح انرژی

6- منابع

- [1] Zarei, H.T. "Analyzing the rate of enhancing the resistance against force in multi-layered sandwich compound materials", In Persian M.Sc thesis, faculty of engineering, Tarbiat Modarres University, Iran, 2010.
- [2] Amirashjaee-Asalemi, K., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F. "Numerical and Experimental Study of Carbon / Epoxy Composite Laminate Response to Low Velocity Impact", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, Issue 1. 2021.
- [3] Moumen, AEL., Tarfaoui, M., Hassoon, O., et al. "Experimental study and numerical modelling of low velocity impact on laminated composite reinforced with thin film made of carbon nanotubes". Appl Compos Mater; Vol. 25, pp. 309-320, 2018.
- [4] Khoshgofar, M. and Liaghat, G., "Experimental and Numerical Investigation of Perforation Behavior of Composite Laminates Reinforced with Carbon Nanotubes," in Persian, Tarbiat Modares University, Mechanical Engineering Department, Iran, 2010.
- [5] Hafezi, M. and Yarmohammad Tooski, M. "An investigation of impact resistance of sandwich panel with basalt skin and basalt/Kevlar hybrid skin with nano silica", In Persian, Journal of Science and Technology of composite, Vol. 7, No. 4, pp. 1145-1152, 2021.

- [6] Ahmadi, M., Ansari R and Hassanzadeh-Aghdam MK. "Low velocity impact analysis of beams made of short carbon fiber/carbon nanotube-polymer composite: a hierarchical finite element approach", *Mech Adv Mater Struct*; Vol. 26, pp. 1104–1114, 2018.
- [7] Ali, M., Joshi, S. C., and Sultan, M. T. H., "Palliatives for Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2017.
- [8] Zheng, Y., Ning, R., Zheng, Y. "Study of SiO₂ nanoparticles on the improved performance of epoxy and fiber composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24, No. 3, pp. 223-33, 2005.
- [9] Tsai, J-L., Hsiao, H., Cheng, Y-L., "Investigating mechanical behaviors of silica nanoparticle reinforced composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 4, pp. 505-24, 2010.
- [10] Lingaraju, D., Ramji, K., Devi, MP., Lakshmi, UR. "Mechanical and tribological studies of polymer hybrid nanocomposites with nano reinforcements", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 34, No. 4, pp. 705-12, 2011.
- [11] Rahimi Sharbaf, H., Rahimi, G.H. and Liaghat G.H., "Experimental study of behavior of filament winding composite pipes with liner using glass fibers and silica nanoparticles under impact loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 311-320, 2017.
- [12] Mortazavi, B., Bardon, J., Bomfim, JAS. and Ahzi, S. "A statistical approach for the evaluation of mechanical properties of silica/epoxy nanocomposite: Verification by experiments", *Computational Materials Science*, Vol. 59, pp. 108-13, 2012.
- [13] Zamanian, M., Mortezaei, M., Salehnia, B. and Jam, J. "Fracture toughness of epoxy polymer modified with nanosilica particles: Particle size effect", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 97, pp. 193-206, 2013.
- [14] Wang, J., Waas, AM. and Wang, H. "Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels", *Composite Structures*, Vol. 96, pp. 298-311, 2013.
- [15] Liu, H-Y., Wang, G-T., Mai, Y-W. and Zeng, Y. "On fracture toughness of nano-particle modified epoxy", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 8, pp. 2170-5. 2011.
- [16] Sing, T., Gangil, B., Ranakoti, L., Joshi, A., "Effect of silica nanoparticles on physical, mechanical, and wear properties of natural fiber reinforced polymer composites", *Polymer Composites*, Vol. 42, pp. 2396–2407, 2021.
- [17] Avila, F., Carvalho, MG AR., Dias, C., da Cruz, D ETL., "Nano-Structured Sandwich Composites Response to Low-Velocity Impact", *Compos Struct*, Vol. 92, No. 3, pp.51-745, 2010.
- [18] Pole, M. H., and Liaghat, Gh., "Experimental and Analytical Penetration Analysis in Nano Composites", In Persian, PhD Thesis Mechanical Engineering, TMU. Tehran, Iran 2012.
- [19] GunaSingh, C., Soundarajanand, S. and Palanivelu, K., "Studies on Mechanical, Thermal properties and Characterization of Nanocomposites of Nylon-6 –Thermoplastics Poly Urethane Rubber [TPUR] blend," *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 4, pp. 65-75, 2013.
- [20] Bidi, A., Liaghat, Gh., and Rahimi, Gh., "Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-Polyurea Bi-layer", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 2, pp. 157-164, 2016.
- [21] 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.
- [22] Tirtash, B., Montazeri, A., Eslami-Farsani, A et al. "An investigation on the flexural performance of basalt fibers-epoxy hybrid composites reinforced with nanoclay particles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, Issue 4, 2020