



## بررسی تجربی تاثیر افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح شده سطحی بر رفتار مکانیکی پنل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی - الیاف شیشه تحت بارگذاری عرضی

حامد خسروی<sup>۱</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۱۹۹۹۱، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۹۴/۷/۲۲	سازه‌های مشبک کامپوزیتی به علت دارا بودن خواص منحصر به فرد همانند استحکام و مدول ویژه بالا، ظرفیت تحمل بار بسیار بالا و همچنین میزان جذب انرژی فوق العاده، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع صنایع هوا و فضا و همچنین خودروسازی پیدا کرده‌اند. این سازه‌ها در حین سرویس شرایط مختلف بارگذاری را تجربه می‌کنند. در تحقیق حاضر، پنل‌های مشبک کامپوزیتی با هندسه ایزوگرید و تقویت شده با نانوذرات سیلیکا تحت بارگذاری عرضی مطالعه شده‌اند. در گام اول، سطح نانوذرات سیلیکا به وسیله عامل کوپلینگ تری گلیسیید اکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (3-GPTS) اصلاح شد و در ادامه تاثیر افزودن درصد‌های مختلف نانوسیلیکا در زمینه (صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی) بر رفتار خمش سه نقطه‌ای پنل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی - الیاف شیشه نوع E مورد بررسی قرار گرفت. اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا و برهمکنش آن‌ها با عامل کوپلینگ 3-GPTS توسط طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) مورد تأیید قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح شده رفتار خمش سه نقطه‌ای پنل‌های مشبک کامپوزیتی الیافی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بیشترین میزان بهبود در مقادیر بار حداکثر خمشی و جذب انرژی ویژه پنل مشبک کامپوزیتی با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیکای اصلاح سطحی شده به ترتیب با ۱۴ درصد و ۲۵ درصد افزایش مشاهده شد. همچنین در این کامپوزیت‌ها کسر قابل توجهی از جذب انرژی سازه بعد از نقطه حداکثر بار حاصل شد. علاوه بر این، سفتی سازه با افزودن نانوذرات سیلیکا افزایش یافت. در مجموع، تحقیق حاضر موید آن است که افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده به عنوان جزء سوم در سازه‌های مشبک کامپوزیتی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری عرضی کمک شایانی کند.
پذیرش: ۹۴/۹/۱۲	
<b>کلیدواژگان:</b>	
کامپوزیت مشبک ایزوگرید	
نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده	
بارگذاری عرضی	
جذب انرژی	

## 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

Hamed Khosravi, Reza Eslami-Farsani\*

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

### Keywords

Isogrid composite  
Surface modified silica nanoparticles  
Transverse loading  
Energy absorption

### Abstract

Grid-stiffened composite (GSC) structures have been maturely developed in aerospace, aircraft and automobile industries due to their attractive properties such as high specific strength and stiffness, superior load bearing capacity, and excellent energy absorption capability. These structures undergo various loading conditions in service. In the present study, iso-GSC structures reinforced with silica nanoparticles (SiO<sub>2</sub>) have been investigated in terms of their capability to improve the mechanical properties during transverse loading. At first, a silane coupling agent (3-glycidoxypropyltrimethoxysilane/3-GPTS) was introduced onto the silica nanoparticle surface and the effects of silica content (0, 1, 3, and 5 wt.% with respect to the matrix material) on the three-point flexural response of isogrid E-glass/epoxy composites were assessed. Based on the Fourier transform infrared (FT-IR) spectra, it was inferred that the 3-GPTS coupling agent was successfully grafted onto the surface of silica nanoparticles after modification. The results showed that nano-SiO<sub>2</sub> particles incorporation affected the flexural properties of the isogrid fibrous composites. Maximum improvements in the flexural load and energy absorption were obtained after adding 3 wt.% nano-SiO<sub>2</sub> particles. In this condition, up to 14% and 25% increase in the maximum flexural load and energy absorption, respectively were observed, compared to the sample without silica addition. In these structures, a considerable amount of energy absorption occurred beyond primary failure at the peak load point. Furthermore, the flexural stiffness was increased by increasing the silica loading. In conclusion, this study suggests that the addition of modified silica nanoparticles is a promising method to improve the flexural properties of the grid-stiffened fibrous composite structures.

Please cite this article using:

Khosravi, H. and 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", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

امروزه در صنایع مختلف به ویژه صنایع هوا و فضا نیاز به سازه‌هایی با استحکام و سفتی بالا به همراه وزن پایین وجود دارد [۱]. در طی دهه‌های گذشته تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که حاصل آن ظهور ساختارهای جدیدی تحت عنوان سازه‌های مشبک<sup>۱</sup> بوده است [۲، ۳]. از سوی دیگر مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری به علت دارا بودن استحکام و مدول ویژه بالا به همراه دیگر مزایایی از جمله روش تولید ساده و عدم نیاز به فشار و دمای بالا جهت فراوری جایگاه ویژه‌ای را در صنایع مختلف و از جمله سازه‌های مشبک پیدا کرده‌اند. در نتیجه از تلفیق این دو جنبه از علم، سازه‌های مشبک کامپوزیتی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این ارتباط انجام شده و یا در حال انجام است [۴، ۵].

سازه‌های مشبک کامپوزیتی سازه‌هایی شامل سیستمی متشکل از ریب‌ها هستند که به لحاظ ظاهری شبیه سازه‌های شبکه‌بندی شده با تیرها یا قاب‌ها هستند. این سازه‌ها می‌توانند بدون پوسته خارجی، از یک طرف دارای پوسته خارجی و یا از دو طرف دارای پوسته باشند [۵]. در این میان سازه‌های مشبک ایزوگرید<sup>۲</sup> (شامل سه گروه ریب با حضور مثلث‌های متساوی الاضلاع بین آن‌ها) به علت خواص منحصر به فرد در حین بارگذاری مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند [۶، ۷]. شکل‌گیری این سازه‌ها با استفاده از نحوه قرارگیری الیاف رووینگ به همراه زمینه مشخص در راستای ریب‌ها صورت گرفته تا در حین بارگذاری به عنوان تحمل‌کننده اصلی بار نقش ایفا کنند. سازه‌های ایزوگرید به علت مسیره‌های بارگذاری متفاوت دارای مقاومت به تخریب سازه‌ای بالایی می‌باشند [۸].

پارامترهای هندسی از جمله عوامل اصلی تأثیرگذار بر خواص مکانیکی سازه‌های مشبک کامپوزیتی بوده که شامل ضخامت، ارتفاع، زاویه قرارگیری ریب‌ها، ضخامت پوسته و غیره هستند. تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با بهینه‌سازی این پارامترهای هندسی روی خواص مکانیکی از جمله خواص کماتشی، خمشی، ضربه و غیره صورت گرفته است [۹-۱۲].

گان و همکاران [۹] قابلیت جذب انرژی در سازه‌های مشبک کامپوزیتی ایزوگرید شامل سیستم ریب-پوسته را تحت بارگذاری عرضی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که گرچه بار حداکثر در زمان بارگذاری از سمت پوسته نسبت به حالتی که بارگذاری از سمت ریب انجام می‌شود بیشتر است اما میزان جذب انرژی و همچنین محدوده جابجایی که در طول آن انرژی جذب می‌شود برای بارگذاری از سمت ریب بیشتر است.

جاده‌ها و همکاران [۱۰] مشخصه‌های جذب انرژی پنل‌های کامپوزیتی مشبک پروپیلن-الیاف شیشه E را تحت بارگذاری ضربه‌ای عرضی با سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. جنس پوسته از چهار لایه پارچه شیشه - پروپیلن و میزان سرعت آزمون ۹ m/s بوده است. در این تحقیق نتایج آزمایشگاهی با استفاده از آنالیز المان محدود مورد تأیید قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان جذب انرژی ویژه کل تحت بارگذاری ضربه‌ای دینامیکی بیشتر از بارگذاری شبه‌استاتیک است. میزان سفتی (شیب ناحیه اولیه منحنی) تحت بارگذاری ضربه‌ای حدود ۲۰ برابر بیشتر از حالت بارگذاری شبه-استاتیک بود. همچنین مقدار بار حداکثر تقریباً سه برابر بیشتر از حالت بارگذاری شبه‌استاتیک بود.

کیم [۱۱] رفتار پنل کامپوزیتی مشبک ایزوگرید اپوکسی-الیاف کربن را تحت بارگذاری فشاری محوری مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق، پنبلی به

ابعاد  $54 \times 35 \text{ cm}^2$  با ضخامت ریب  $1/356 \text{ mm}$  و ارتفاع  $15/768 \text{ mm}$  و ضخامت پوسته  $1/778 \text{ mm}$  تحت آزمون قرار گرفت. با توجه به نتایج این تحقیق، حداکثر جابجایی پنبلی قبل از شکست  $0/432 \text{ cm}$  حاصل شد.

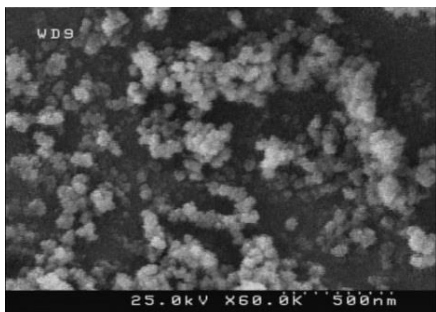
در تحقیقی که آکل و همکاران [۱۲] انجام دادند مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی صفحات ایزوگرید از دیدگاه زوایای جهت‌گیری ریب‌ها بهینه‌سازی شدند. مشخصه‌های استاتیکی از جنبه حداکثر میزان بار کماتشی و مشخصه-های دینامیکی نیز از جنبه حداکثر میزان فرکانس‌های طبیعی صفحه ایزوگرید بهینه شدند. یک مدل المان محدود به منظور بهینه‌سازی مجزا و همچنین همزمان بارهای کماتش بحرانی و فرکانس‌های طبیعی سازه بر واحد حجم ارائه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زاویه ریب‌های  $50^\circ$  درجه میزان بهینه برای بهینه‌سازی همزمان بار کماتشی و فرکانس‌های طبیعی است.

در ارتباط با بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیافی از طریق اصلاح ترکیب ساختاری آن‌ها با استفاده از نانوفیلرها تحقیقات مطلوبی صورت گرفته است. این دسته از کامپوزیت‌ها که متشکل از فازهای تقویت‌کننده الیافی در مقیاس میکرون و فاز تقویت‌کننده ذره‌ای در مقیاس نانو هستند تحت عنوان کامپوزیت‌های چندمقیاسی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند [۱۳]. واردکردن نانوفیلرها در کنار تقویت‌کننده‌های الیافی میکرونی از طریق پخش آن‌ها در زمینه یا رشد آن‌ها بر روی سطح الیاف تقویت‌کننده امکان‌پذیر است. برای مثال، ژاکوب و همکاران [۱۴] تأثیر تقویت‌کنندگی نانوذرات سیلیکا را در کامپوزیت‌های الیافی نایلون-پلی پروپیلن مورد مطالعه قرار دادند و گزارش دادند که نمونه حاوی ۱ درصد وزنی سیلیکا و ۳۰ درصد وزنی الیاف نایلون دارای مدول کششی و خمشی و همچنین استحکام کششی و خمشی بالاتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر بود.

میرزاپور و همکاران [۱۵] بهبود ۱۳ درصدی استحکام خمشی کامپوزیت فنولیک-الیاف کربن با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا در زمینه را گزارش دادند. سابرامانیان و همکاران [۱۶] زمینه اپوکسی یک کامپوزیت الیافی شیشه را با استفاده از نانوکلی اصلاح کردند و بهبود قابل توجهی را در استحکام فشاری طولی کامپوزیت حاصله مشاهده کردند. گوجنی و همکاران [۱۷] گزارش دادند که استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه از طریق افزودن  $0/3$  درصد وزنی نانوتیوب چندجداره اصلاح شده به میزان ۱۹ درصد افزایش یافته است. آدن و همکاران [۱۸] از روش قالبگیری انتقالی رزین تحت خلا برای ساخت کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه تک‌جهته/نانوسیلیکا استفاده کردند و نشان دادند که اختلاط نانوذرات سیلیکا در زمینه باعث بهبود استحکام کششی و فشاری کامپوزیت‌های اپوکسی/الیاف شیشه می‌شود.

در اغلب تحقیقات مهندسی صورت گرفته در زمینه سازه‌های مشبک کامپوزیتی به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی این سازه‌ها پرداخته شده است. اما علاوه بر الزامات طراحی در این نوع سازه‌ها نیاز است تا به منظور بهبود عملکرد سازه‌های مشبک کامپوزیتی، اصلاح ریزساختاری آن‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد. طبق مطالعات انجام شده، تاکنون تحقیقات محدودی درخصوص بررسی ریزساختاری سازه‌های مشبک کامپوزیتی به منظور بهبود خواص مکانیکی آن‌ها صورت گرفته است [۱۹، ۲۰]. بنابراین در تحقیق حاضر، هدف آن است تا با رویکردی مبتنی بر اصلاح ریزساختاری و از طریق وارد کردن نانوذرات سرامیکی سیلیکا در کنار تقویت‌کننده الیاف شیشه به بهبود خواص مکانیکی آن‌ها کمک شود. بدین منظور، در این تحقیق، ابتدا

ساختن عوامل کوپلینگ اضافی شستشو داده شدند و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت درون آون خشک شدند [۲۲-۲۴].



شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوذرات سیلیکای مورد استفاده

### ۲-۳- ساخت قالب سیلیکونی

برای ساخت نمونه‌های مشبک کامپوزیتی از قالب سیلیکونی استفاده شد. علت انتخاب سیلیکون برای ساخت قالب، حالت لاستیکی آن و همچنین تحمل کرنش‌های الاستیک بالا بود که به این دلایل جدا کردن نمونه نهایی از قالب را بسیار ساده می‌سازد. سیلیکون‌های قالب‌گیری سیلیکون‌هایی هستند دو جزئی که با افزودن جزء دوم در مجاورت رطوبت هوا فعال شده و تشکیل پلیمری انعطاف‌پذیر می‌دهند. قالب مورد استفاده در این تحقیق دارای هندسه ایزوگرید متشکل از واحدهای مثلثی و دارای ریب‌های هلیکال و افقی است. برای ساخت قالب، در مرحله اول، طرح مورد نظر با استفاده از دستگاه CNC بر روی یک صفحه تخت از جنس پلیمر پلی‌وینیل کلرید ایجاد شد و محصول حاصله تحت عنوان شابلون قالب‌گیری (شکل ۲-الف) در ادامه مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ساخت قالب، ابتدا شابلون قالب‌گیری توسط واکس سیلیکونی با دقت آغشته شد که این کار امکان خروج خیلی راحت قالب نهایی را از شابلون باعث می‌شود. در ادامه سیلیکون مایع با هاردنر به صورت دستی با یک همزن فولادی به مدت دو دقیقه همزده شد تا مخلوطی همگن حاصل شود و در ادامه ترکیب حاصله بر روی شابلون که توسط یک قاب چوبی احاطه شده بود، ریخته شد. خروج قالب پس از گذشت مدت زمان ۶ ساعت صورت گرفت (شکل ۲-ب).

### ۲-۴- ساخت نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی

مرحله اول در ساخت نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی آماده ساختن مخلوط زمینه (اپوکسی + نانوسیلیکا) است. بدین منظور تلفیقی از روش‌های همزدن مکانیکی و اعمال امواج آلتراسونیک به کار گرفته شد. ابتدا رزین اپوکسی با افزودن استون به عنوان عامل رقیق‌کننده با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ رقیق شد که این کار به پراکنده شدن بهتر نانوسیلیکا در حین فرایند کمک شایانی می‌کند [۲۵]. در ادامه، مقادیر مشخصی از نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده (۱، ۳، ۵ درصد وزنی) به رزین اپوکسی افزوده شد و به منظور توزیع اولیه آن‌ها در زمینه، همزدن مکانیکی با سرعت ۲۰۰۰ rpm و به مدت ۲۰ min با استفاده از دستگاه بالاسری دیجیتال ساخت شرکت فاین تک کره جنوبی به کار گرفته شد. پس از این مرحله و برای از بین بردن کلوخه‌های موجود و پخش هرچه بهتر نانوذرات سیلیکا در زمینه، مخلوط رزین و نانوسیلیکا تحت امواج فراصوت با فرکانس ۲۴ Hz و توان ۱۲۰ W به مدت ۹۰ min با استفاده از دستگاه آلتراسونیک پروبی ساخت شرکت فاین تک ایران قرار گرفت.

اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا با استفاده از عامل کوپلینگ 3-GPTS انجام پذیرفت و سپس نتایج آن با استفاده از طیف‌سنجی FT-IR بررسی شد. در ادامه تأثیر افزودن درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده (صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد) بر رفتار خمشی پنل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه مورد مطالعه قرار گرفت. برای مطالعه سطح شکست نمونه‌ها و همچنین مشخص کردن مکانیزم شکست از آنالیز میکروسکوپ الکترونی استفاده شد.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

در تحقیق حاضر، رزین اپوکسی ML-506 (رزین بر پایه بیسفنول F) و هاردنر پلی‌آمینی HA-11 (محصولات شرکت مواد مهندسی مکر)، مورد استفاده قرار گرفتند. علت اصلی انتخاب این نوع رزین، پایین بودن میزان ویسکوزیته (۱۴۵۰ centipoise) و بالابودن زمان ژل شدن آن (۶۰ min) در دمای ۲۵ °C بود. الیاف شیشه E (رووینگ، Tex2400) با دانسیته حجمی ۲/۵۸ g/cm<sup>3</sup> و قطر متوسط فیلامنت ۱۲ μm و همچنین پارچه الیاف شیشه با بافت دو بعدی و دانسیته سطحی ۴۰۰ g/m<sup>2</sup> محصول شرکت لاین تکس چین به عنوان تقویت‌کننده‌های الیافی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین نانوذرات سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) با قطر میانگین ۶۵ nm و مساحت سطحی ۳۸۰ m<sup>2</sup>/g محصول شرکت تحقیقات نانومواد آمریکا به عنوان فاز تقویت‌کننده ذره‌ای در زمینه به کار گرفته شد.

نانوذرات سیلیکا دارای مزایایی همچون قیمت پایین، سازگاری مناسب با رزین‌های مختلف، ساخت آسان و طبیعت سازگاری با محیط هستند که این ویژگی‌ها آن‌ها را برای استفاده به عنوان فاز تقویت‌کننده در پلیمرها مناسب ساخته است. در شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی میدانی (FESEM<sup>۱</sup>) نانوذرات سیلیکا نشان داده است. به منظور توزیع مناسب نانوذرات سیلیکا و همچنین بهبود برهمکنش آن‌ها با زمینه از عامل کوپلینگ تری-گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (3-GTMS<sup>۲</sup>) محصول شرکت مرک آلمان استفاده شد. در مرحله ساخت قالب نیز از سیلیکون قالب‌گیری RTV3325 و هاردنر H6 با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۴ و درصد افزایش طول ۴۵۰ استفاده شد.

### ۲-۲- اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا

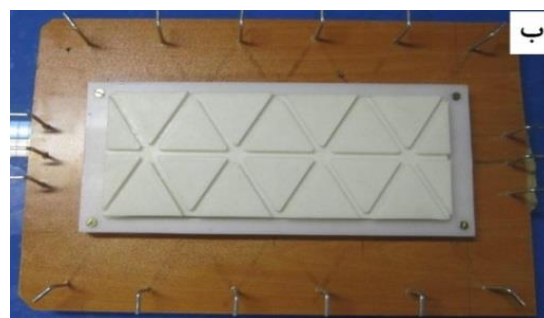
به منظور اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا، ۲ نانوسیلیکا در محلولی شامل ۹۵ mL اتانول و ۵ mL آب مقطر با استفاده از امواج فراصوت به مدت ۱۰ min تحت توان ۸۰ W توزیع شدند. در ادامه، ۲ g عامل 3-GPTS به داخل مخلوط فوق اضافه شد و ترکیب حاصل تحت عملیات رفلاکس به مدت ۱۲ h تحت دمای ۷۰ °C و سرعت هم زدن ۱۰۰ rpm قرار گرفت. pH ترکیب در حین فرایند با استفاده از اسید کلریدریک (HCl, 37%) در حدود ۴-۵ تنظیم شد. دلایل انتخاب محیط اسیدی در این شرایط شامل افزایش میزان عامل سیلانول (SiOH) و همچنین کاهش واکنش‌های خودترکمی<sup>۳</sup> گروه‌های SiOH هیدرولیز شده به علت دارابودن تمایل شدید به این نوع واکنش بود [۲۱]. پس از اتمام فرایند رفلاکس و به منظور جداسازی نانوذرات سیلیکا، مخلوط حاصله به مدت ۳۰ min تحت عملیات با سانتریفوژ با دور ۴۰۰۰ rpm قرار گرفت. پودرهای حاصله سه مرتبه با اتانول و به منظور خارج

1. Field-emission scanning electron microscopy  
2. 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane  
3. Self-condensing

را امکان پذیر می‌سازد. این آزمون با استفاده از دستگاه یونیورسال مدل هانسفیلد H25K با ظرفیت ۲/۵ تن انجام گرفت.



الف

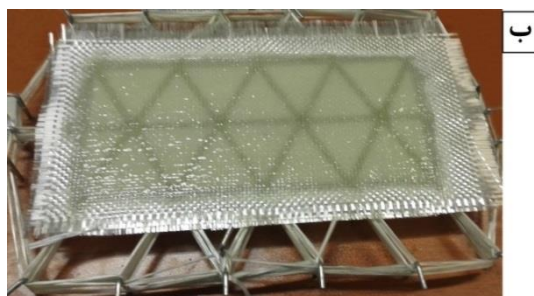


ب

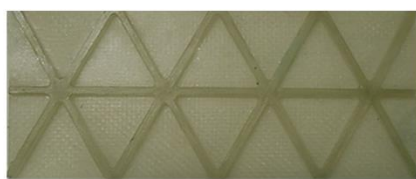
شکل ۲ مراحل ساخت قالب، الف) شابلون مورد استفاده در ساخت قالب با هندسه ایزوگريد و ب) قالب سیلیکونی ساخته شده



الف



ب



ج



د

شکل ۳ مراحل اصلی ساخت نمونه‌های مشبک کامپوزیتی، الف) لایه‌گذاری ریب‌ها، ب) لایه‌گذاری پوسته، ج) پنبه مشبک کامپوزیتی بدون افزودن نانوسیلیکا و د) پنبه مشبک کامپوزیتی با افزودن نانوسیلیکا

نمونه‌ها با ابعاد  $300 \times 125 \times 1/8 \text{ mm}^3$  طوری روی دو تکیه‌گاه فیکسچر مطابق شکل ۴ قرار داده شدند که حدود ۲۰ درصد طول آن‌ها به منظور جلوگیری از سرخوردنشان در حین آزمون بیرون از تکیه‌گاه‌ها باشد.

برای تمامی آزمون‌ها فاصله بین دو تکیه‌گاه، ثابت و معادل ۲۵۰ mm نظر گرفته شد تا نسبت ۳۲ به ۱ برای نسبت فاصله دو تکیه‌گاه به ضخامت نمونه مطابق استاندارد رعایت شده باشد. سپس تمامی نمونه‌ها از قسمت میانی تحت بارگذاری با نرخ کرنش  $5 \text{ mm/min}$  قرار گرفتند. در حین بارگذاری، نیروی خمشی برحسب جابجایی محوری در قالب نمودار توسط دستگاه رسم شد و از آن به منظور تحلیل خواص خمشی نمونه‌های مختلف استفاده شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج، آزمون برای هر نمونه سه مرتبه انجام شد و در صورتی که نتایج آن‌ها اختلاف زیادی از هم داشتند (بیش از ۵ درصد)، یک بار دیگر آزمون تکرار شد.

برای جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای مخلوط و نگاه داشتن دمای آن در حدود  $45^\circ \text{C}$  از یک حمام آب و یخ در مجاورت محفظه استفاده شد. به منظور خروج استون باقیمانده و همچنین حباب‌های هوای گیرافتاده در مراحل همزدن، مخلوط حاصله تحت عملیات خلاء قرار گرفت. پس از این مرحله، هاردنر با نسبت وزنی مشخص نسبت به وزن رزین اپوکسی (نسبت رزین به هاردنر: ۱۰۰ به ۱۵) به مخلوط افزوده و به مدت ۵ min به صورت دستی همزده شد.

در ساخت نمونه‌های مشبک کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی به کمک فیکسچری طراحی شده مطابق شکل ۳-الف استفاده شد. در ساخت ریب‌ها ۱۵ لایه الیاف شیشه تک‌جهته مورد استفاده قرار گرفت. بلافاصله پس از اتمام ساخت ریب‌ها، مرحله ساخت پوسته با استفاده از لایه‌گذاری دستی ۴ لایه پارچه الیاف شیشه آغشته به مخلوط رزین زمینه مطابق شکل ۳-ب صورت پذیرفت. این بدان معناست که عملیات پخت رزین در ریب‌ها و پوسته به صورت یکپارچه صورت گرفته است. خروج نمونه‌ها از قالب پس از مدت زمان ۳ ساعت از اتمام فرآیند صورت گرفت و در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۷ روز (مطابق دستورالعمل شرکت سازنده) در محیط اتاق قرار داده شدند تا پخت کامل نمونه‌ها صورت گیرد. همچنین جهت مقایسه نتایج، نمونه‌ای مشبک بدون افزودن نانوذرات سیلیکا در زمینه با استفاده از روش اشاره شده ساخته شد. در جدول ۱، مشخصات کامل نمونه‌های ساخته شده (شکل‌های ۳-ج و ۳-د)، آورده شده است.

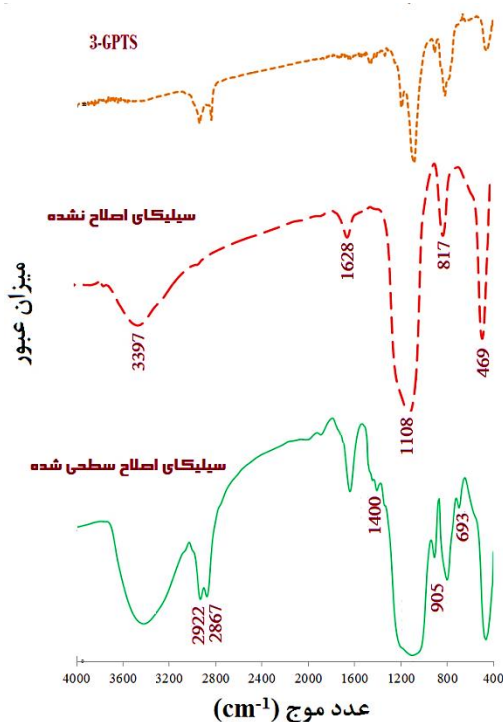
#### ۲-۵- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

برای بررسی رفتار خمشی پنبه‌های مشبک کامپوزیتی از استاندارد ASTM D7264-07 که مربوط به خواص خمشی مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری است، استفاده شد [۲۶]. در تحقیق حاضر رفتار خمشی پنبه‌های مشبک تحت الگوی خمش سه‌نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا فیکسچری طراحی و ساخته شد که قابلیت جابجایی خمشی تا حدود ۱۱ cm

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج طیفسنجی FT-IR

نتایج طیفسنجی FT-IR مربوط به نانوسیلیکای اصلاح نشده، عامل کولینگ سیلانی 3-GPTS و نانوسیلیکای اصلاح سطحی شده در شکل ۵ آورده شده است. در طیف FT-IR مربوط به نانوسیلیکای اصلاح نشده، پیک‌های جذبی مشخصه در نواحی ۳۳۹۷، ۱۶۲۸، ۱۱۰۸، ۸۱۷ و  $469\text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده هستند. پیک جذبی مشاهده شده در  $3397\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل (-OH) سطحی نانوسیلیکا است که با پیک OH مربوط به آب جذب فیزیکی شده روی سطح آن همپوشانی دارد [۲۷]. پیک‌های جذبی ۱۱۰۸، ۸۱۷ و  $469\text{ cm}^{-1}$  مبین ارتعاشات کششی متقارن و غیرمتقارن Si-O-Si هستند [۲۲]. پیک‌های جذبی مذکور در ارتباط با نانوسیلیکای اصلاح سطحی شده نیز قابل مشاهده هستند. این بدان معناست که ساختار اولیه نانوذرات پس از اصلاح سطحی حفظ شده است. پیک‌های مشاهده شده در طیف مربوط به نانوسیلیکای اصلاح شده در اعداد موج ۲۹۲۲، ۱۴۰۰ و  $905\text{ cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاش گروه‌های اپوکسید روی سطح آن [۲۴، ۲۳] و دو پیک دیگر در اعداد موج ۲۸۶۷ و  $2922\text{ cm}^{-1}$  متعلق به گروه‌های C-H هستند [۲۸]. هیچ یک از این پیک‌ها در نانوسیلیکای اصلاح نشده مشاهده نمی‌شوند. این موضوع بیانگر آن است که اصلاح سطحی نانوذرات سیلیکا تحت شرایط آزمایش با موفقیت صورت پذیرفته است.



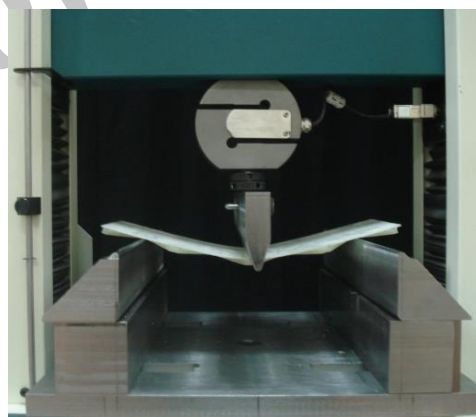
شکل ۵ نتایج طیفسنجی FT-IR مربوط به سیلیکای اصلاح نشده، عامل کولینگ سیلانی و سیلیکای اصلاح سطحی شده

مراحل کلی واکنش بین نانوذرات سیلیکا و ترکیب سیلانی 3-GPTS در شکل ۶ آورده شده است. به طور کلی واکنش مذکور شامل مرحله‌ای متشکل از هیدرولیز عامل سیلانی و در ادامه واکنش کندانس، ایجاد پیوند هیدروژنی میان گروه‌های هیدروکسیل روی سطح نانوذرات و عامل سیلانی و در نهایت ایجاد پیوند کوالانت بین آن‌هاست. در نتیجه این واکنش پیوند بین اتم‌های

با توجه به سطح مقطع غیرهمگن نمونه‌های مشبک و براساس تحقیقات قبلی انجام شده [۹]، پس از انجام آزمون خمش و به دست آوردن نمودارهای مربوطه، از شیب ناحیه خطی اولیه در منحنی‌ها به عنوان معیاری برای ارزیابی سفتی خمشی نمونه‌ها، از حداکثر بار مشاهده شده در منحنی‌ها به عنوان معیاری برای ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها (مقاومت خمشی) و همچنین از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی به عنوان معیاری برای جذب انرژی در این نوع سازه‌ها استفاده شد. با توجه به این که در بحث کاربرد سازه‌های مشبک، وزن سازه پارامتری مهم و کلیدی به شمار می‌رود، بنابراین مقادیر حاصله برای جذب انرژی بر جرم کلی سازه تقسیم شد تا مقادیر جذب انرژی ویژه<sup>۱</sup> حاصل شود.

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های مشبک کامپوزیتی

مقدار	مشخصه
۶۵ mm	طول ریب
$\pm 60^\circ$	زاویه قرارگیری ریب‌ها
$6 \times 6\text{ mm}^2$	سطح مقطع ریب‌ها
۱/۸ mm	ضخامت پوسته
۴۴	درصد حجمی الیاف در ریب‌ها
۴۸	درصد حجمی الیاف در پوسته
۵، ۳، ۱، ۰	درصد وزنی نانوسیلیکا در زمینه



شکل ۴ پل مشبک کامپوزیتی تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای

۲-۶- آزمون FT-IR

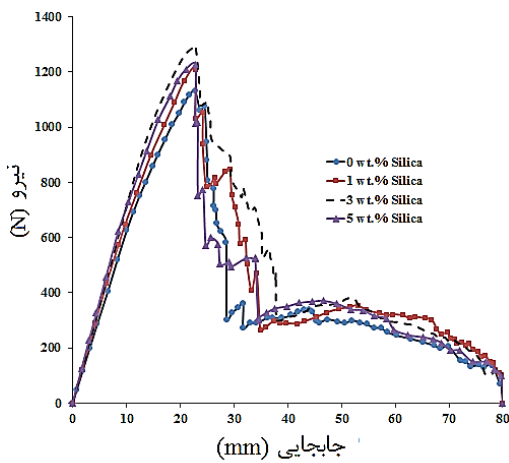
به منظور بررسی گروه‌های عاملی موجود بر روی سطح نانوذرات سیلیکا و همچنین واکنش‌های احتمالی بین نانوذرات و عامل سیلانی از دستگاه طیف-سنج FT-IR مدل جسکو 460-plus در محدوده  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  با حساسیت  $4\text{ cm}^{-1}$  استفاده شد.

۲-۷- مطالعات میکروسکوپی

به منظور مطالعه سطح شکست نمونه‌ها و همچنین مکانیزم‌های موجود از میکروسکوپ الکترونی میدانی FESEM مدل هیتاچی، S-4160 تحت ولتاژ شتابی ۲۵ kV استفاده شد.

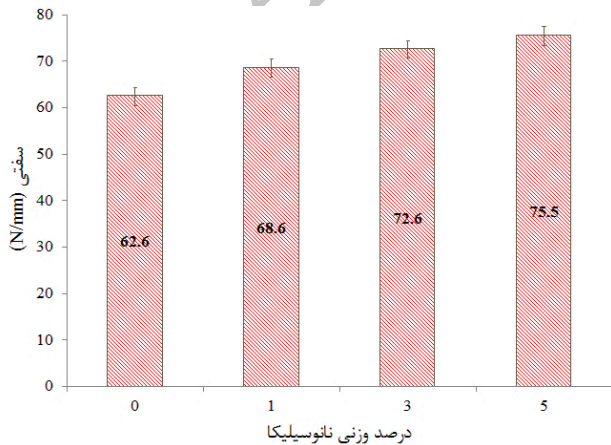
1. Specific energy absorption (SEA)  
2. Fourier transform infrared analysis

سیلیکای اصلاح سطحی شده در زمینه، تحت بارگذاری عرضی در شکل ۸ آورده شده است. باید خاطر نشان کرد که این نمودارها مربوط به یک نمونه آزمایش است و همچنین بارگذاری برای تمامی نمونه‌ها از سمت پوسته و تا جابجایی معادل ۸۰ mm صورت گرفته است. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود تحت بارگذاری عرضی روند مشابهی برای کلیه نمونه‌ها وجود دارد ولی با افزودن نانوذرات سیلیکا مشخصه‌های مکانیکی پل‌های مشبک شامل نیروی حداکثر، سفتی و جذب انرژی تغییر پیدا کرده است. مطابق نمودار زمانی که یک پل مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی از سمت پوسته قرار می‌گیرد با عبور از ناحیه خطی و در ادامه رسیدن به نقطه حداکثر بار خمشی، افت نیرو در منحنی مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در ارتباط با رفتار پل‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی آن است که بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از نقطه حداکثر بار قابل مشاهده است.



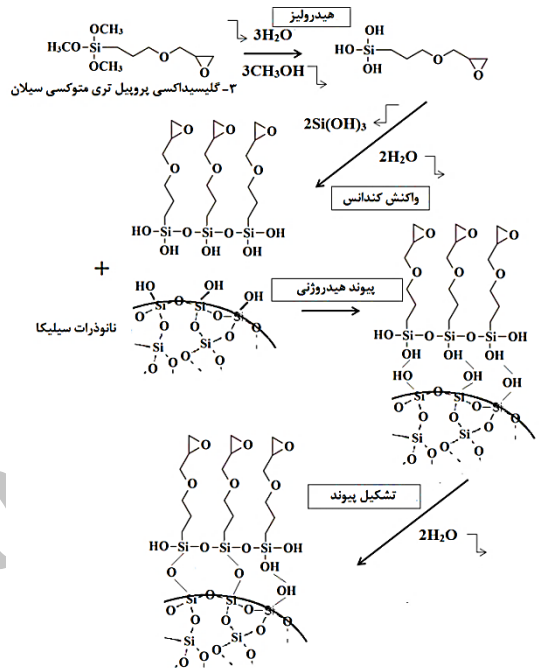
شکل ۸ منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی برای پل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه E تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده در زمینه، تحت بارگذاری عرضی

به منظور بررسی تأثیر افزودن نانوذرات سیلیکا بر رفتار خمشی پل‌های مشبک، داده‌های مربوط به سفتی (شیب منحنی در ناحیه خطی اولیه)، ظرفیت تحمل بار (بار حداکثر مشاهده شده در منحنی) و جذب انرژی (مساحت زیر منحنی) از نمودارهای شکل ۸ استخراج شد که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده‌اند.

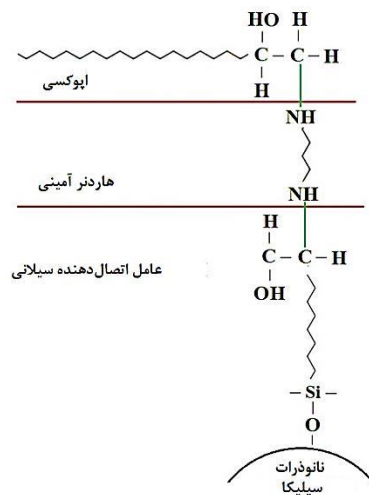


شکل ۹ تغییرات سفتی خمشی نمونه‌های مشبک کامپوزیتی با تغییر در درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در زمینه

Si و گروه‌های OH در ترکیب سیلانی با پیوندی بین اتم‌های Si و نانوسیلیکا جایگزین شده و پیوند کووالانت قوی بین آن‌ها برقرار می‌شود. زمانی که نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده به عنوان فاز تقویت کننده ذره‌ای در زمینه پلیمری سازه مشبک قرار می‌گیرد، واکنش میان گروه‌های عاملی اپوکسید موجود بر روی سطح نانوذرات و همچنین زمینه اپوکسی در حضور هاردنر آمینی صورت می‌گیرد. در شکل ۷ نحوه انجام این نوع واکنش نشان داده است. حضور عامل کوپلینگ سیلانی 3-GPTS بر روی سطح نانوذرات سیلیکا، برهم کنش فصل مشترکی آن‌ها را با زمینه اپوکسی بهبود می‌بخشد.



شکل ۶ مراحل کلی واکنش میان نانوذرات سیلیکا و ترکیب سیلانی 3-GPTS



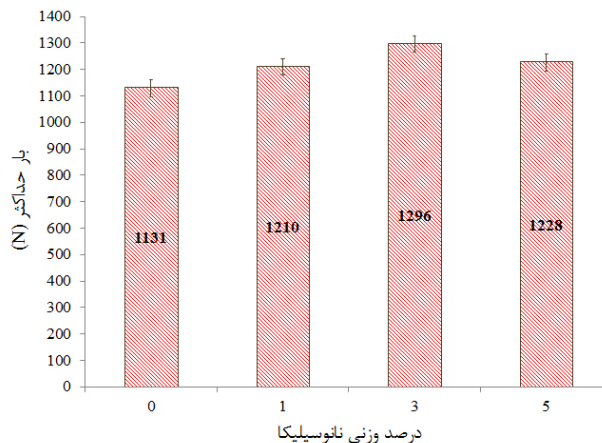
شکل ۷ برهم کنش میان نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده و زمینه اپوکسی

۲-۳- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای

منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی برای پل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی/الیاف شیشه E تقویت شده با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات

است که بخشی از بار اعمالی به کامپوزیت از طریق فصل مشترک زمینه/نانوسیلیکا به نانوذرات منتقل و توسط آن‌ها تحمل می‌شود. دلیل دوم به مشخصه‌های فصل مشترکی الیاف و زمینه برمی‌گردد که نقش بسزایی را در کارایی نهایی محصول کامپوزیتی بازی می‌کنند. زمانی که زمینه نانوکامپوزیتی در سازه مشبک کامپوزیتی الیافی مورد استفاده قرار می‌گیرد لغزش اصطکاکی<sup>۱</sup> فصل مشترک زمینه و الیاف محدود می‌شود [۳۰، ۱۵]. این بدان معناست که با تقویت زمینه توسط نانوذرات سیلیکا، انتقال بار اعمالی از زمینه به الیاف به طور موثرتری صورت می‌گیرد. بنابراین ظرفیت تحمل بار در ارتباط با سازه‌های مشبک نانوکامپوزیتی الیافی بیشتر از سازه‌های مشابه کامپوزیتی است. کمتر بودن میزان ظرفیت تحمل بار در ارتباط با نمونه مشبک تقویت شده با ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا در مقایسه با نمونه حاوی ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا را می‌توان به کاهش میزان چسبندگی الیاف/زمینه به علت تشکیل یک شبکه غیرپیوسته در زمینه و همچنین تشکیل عیوب و کلوخه‌های نانوذرات در درصدهای وزنی بالای نانوسیلیکا دانست [۳۰].

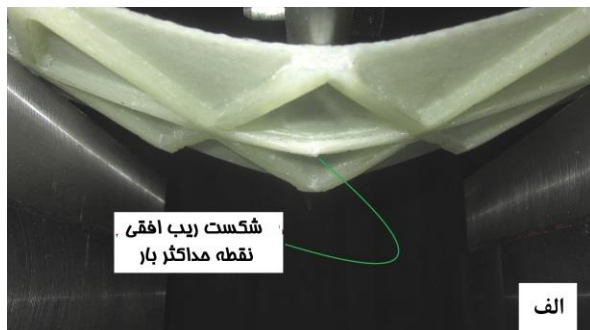
مطابق شکل ۱۲، قابلیت جذب انرژی سازه مشبک کامپوزیتی الیافی با افزودن نانوذرات سیلیکا در زمینه آن افزایش پیدا کرده است و بیشترین میزان افزایش مربوط به نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۳ درصد وزنی نانوذرات و به میزان ۲۶ درصد است. بهبود قابلیت جذب انرژی در سازه مشبک نانوکامپوزیتی به علت مکانیزم انحراف ترک است. زمانی که ترک در حال رشد است با رسیدن نوک ترک به نانوذرات سیلیکا چرخش و پیچش آن اتفاق افتاده و از این طریق مسیر رشد ترک افزایش می‌یابد [۳۱]. بنابراین بهبود میزان جذب انرژی سازه نانوکامپوزیتی را می‌توان به تغییر ساختار زمینه با نانوذرات سیلیکا نسبت داد.



شکل ۱۰ تغییرات بار خمشی حداکثر نمونه‌های مشبک کامپوزیتی با تغییر درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در زمینه

مطابق شکل ۹ سفتی خمشی نمونه‌های مشبک کامپوزیتی با افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده به صورت پیوسته افزایش پیدا کرده است، به طوری که با افزودن ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا سفتی خمشی نمونه مشبک کامپوزیتی عاری از نانوذرات به میزان ۲۰ درصد افزایش یافته است. علت این افزایش را می‌توان به طبیعت سفت‌تر نانوذرات سیلیکا در مقایسه با زمینه اپوکسی و همچنین برهم‌کنش نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده با زنجیره‌های پلیمری و ممانعت از لغزش آن‌ها دانست [۲۸].

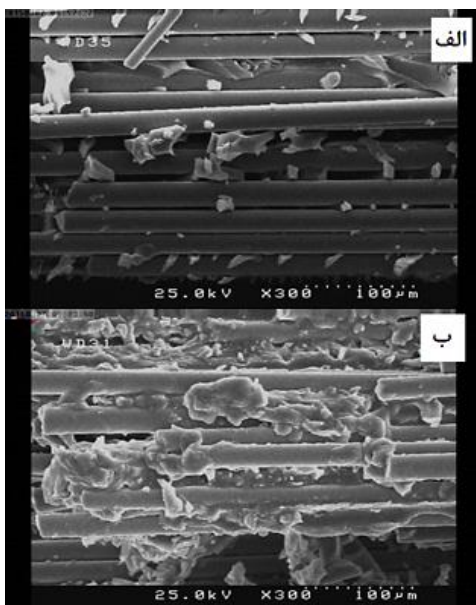
بار حداکثر مشاهده شده در منحنی‌های نیرو-جابجایی خمشی را می‌توان به عنوان معیار مناسبی برای ارزیابی ظرفیت تحمل بار نمونه‌های مشبک کامپوزیتی در نظر گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی دارای ظرفیت تحمل بار بالاتری در مقایسه با نمونه مشابه کامپوزیتی هستند. همچنین با افزودن نانوسیلیکای اصلاح سطحی شده، بار حداکثر تحملی توسط نمونه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. زمانی که یک پنل مشبک کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری خمشی قرار می‌گیرد ریب‌ها به عنوان جز اصلی تحمل‌کننده بار به شمار می‌روند. تحت این شرایط ریب افقی موجود در شبکه مشبک سازه ایزوگرید بیشترین میزان بار اعمالی را تحمل می‌کند. در حقیقت نقطه حداکثر بار در منحنی مبین مکانی است که شکست اولیه سازه در محل ریب افقی درست زیر دماغه بارگذاری اتفاق می‌افتد (شکل ۱۱- الف). پارگی الیاف در اثر بارهای کششی و میکروکمانش آن‌ها در اثر بارهای فشاری به عنوان دو مکانیزم مشاهده شده بر روی نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری عرضی هستند [۹]. در ادامه بارگذاری بعد از نقطه حداکثر نیرو، شکست کامل ریب افقی در اثر بارهای کششی و همزمان شکست دو ریب مورب در لبه‌های سازه و جدایش آن‌ها از پوسته در زیر دماغه بارگذاری مشاهده شد (شکل ۱۱- ب). افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات سیلیکای اصلاح شده در زمینه باعث بهبود ۱۴ درصدی نیروی حداکثر خمشی برای کامپوزیت مشبک الیافی شده است که این افزایش می‌تواند ناشی از دو دلیل باشد. دلیل اول به مکانیزم تقویت‌کنندگی نانوذرات در زمینه کامپوزیت برمی‌گردد. در کامپوزیت‌های الیافی، الیاف (به ویژه پوسته آن) به عنوان محل‌های تمرکز تنش به شمار می‌روند [۲۹]. اختلاط نانوذرات سیلیکا در زمینه می‌تواند باعث کاهش میزان سطح تنش بر روی الیاف در حین بارگذاری شده و از این طریق باعث افزایش میزان تنش لازم برای شکست الیاف و میکروکمانش آن شود. این بدان علت



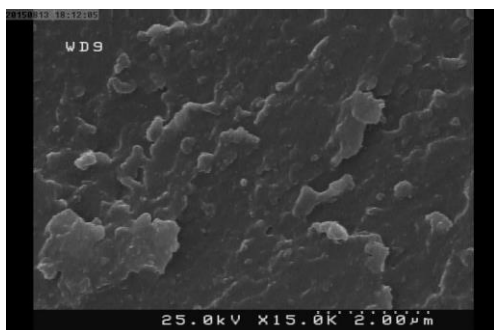
شکل ۱۱ شکست سازه مشبک کامپوزیتی، الف) شکست اولیه سازه تحت بارگذاری عرضی و ب) شکست کامل ریب افقی و جدایش دو ریب مایل از یکدیگر

1. Frictional slippage

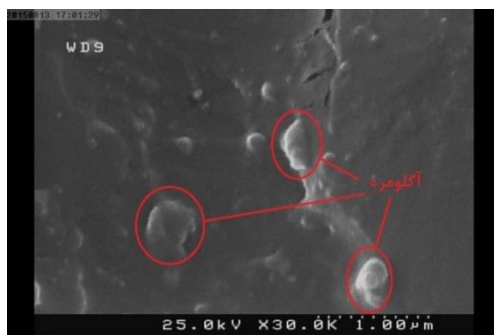
در سازه‌های نانوکامپوزیتی به شمار می‌رود. در شکل ۱۵ وجود برخی از کلوخه‌های متشکل از نانوذرات سیلیکا در درصد وزنی ۵ نشان داده شده است که به عنوان محل‌های جواهرزنی و شروع ترک عمل کرده و باعث افت خواص مکانیکی نمونه می‌شوند.



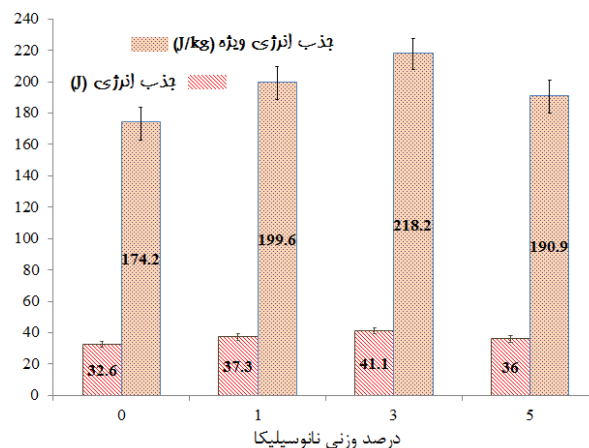
شکل ۱۳ سطوح شکست ریب افقی در سازه مشبک کامپوزیتی با زمینه، الف) اپوکسی و ب) اپوکسی با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا



شکل ۱۴ سطح شکست مربوط به زمینه نانوکامپوزیتی سازه مشبک با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا



شکل ۱۵ وجود آگلومره‌های متشکل از نانوذرات سیلیکا در نمونه مشبک نانوکامپوزیتی با ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا



شکل ۱۲ تغییرات میزان جذب انرژی در نمونه‌های مشبک کامپوزیتی با تغییر در درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در زمینه

میزان جذب انرژی مربوط به نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا حدود ۱۲ درصد کمتر از نمونه حاوی ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا است که این میزان کاهش را می‌توان به وجود کلوخه‌های نانوسیلیکا در زمینه کامپوزیت در درصد‌های وزنی بالاتر نانوذرات نسبت داد که به عنوان محل‌های جواهرزنی ترک عمل می‌کنند. دلایل ذکر شده در این قسمت با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی در بخش بعد (بخش ۳-۳) مورد تأیید قرار گرفته‌اند. از آن‌جا که وزن سازه یکی از پارامترهای کلیدی در کاربردهای مختلف صنعتی به شمار می‌رود مقادیر جذب انرژی سازه‌های مختلف کامپوزیتی بر جرم آن‌ها تقسیم شد تا مقادیر جذب انرژی ویژه به دست آیند که در نمودار شکل ۱۲ مقادیر آن‌ها گزارش شده است. بهبود ۲۵ درصدی در مقدار جذب انرژی ویژه سازه مشبک کامپوزیتی با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا در زمینه مشاهده شد.

### ۳-۳- مطالعات میکروسکوپی الکترونی

مورفولوژی سطح شکست نمونه‌های مشبک کامپوزیتی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی FESEM مورد مطالعه قرار گرفت که تصاویر آن در شکل ۱۳ نشان داده است. این تصاویر مبین سطح شکست مربوط به سازه مشبک کامپوزیتی الیافی با زمینه اپوکسی (شکل ۱۳- الف) و زمینه نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانوسیلیکا (شکل ۱۳- ب) هستند. از مقایسه این تصاویر به خوبی مشهود است که چسبندگی الیاف به زمینه در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی بسیار بهتر است. در این حالت، پس از شکست نمونه هنوز هم مقداری از فاز زمینه نانوکامپوزیتی به الیاف چسبیده و آن را احاطه کرده است (شکل ۱۳- ب) که مبین آن است که شکست زمینه مکانیزم غالب برای شکست نمونه است [۳۲]. اما در مقابل برای نمونه دارای زمینه اپوکسی (شکل ۱۳- الف)، سطوح شکست الیاف صاف و بدون تغییر هستند که این بدان معناست که در این حالت جدایش بین الیاف و زمینه<sup>۱</sup> به عنوان مکانیزم اصلی شکست مطرح است [۳۲].

شکل ۱۴ نشان‌دهنده تصویر FESEM سطح شکست زمینه نانوکامپوزیتی سازه مشبک با ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا است. همان‌طور که در این تصویر به وضوح دیده می‌شود سطح شکست ناهموار و به صورت لایه‌لایه است و انحراف مسیر ترک قابل مشاهده است که دلیل اصلی برای افزایش میزان جذب انرژی

1. Matrix cracking  
2. Matrix-fiber debonding



## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی پنل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه نوع E تقویت شده با نانوذرات سیلیکا تحت بارگذاری عرضی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا سطح نانوذرات سیلیکا توسط عامل کولینگ تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (3-GTMS) اصلاح شد و در ادامه مقادیر مختلف آن (صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی در فاز زمینه) به عنوان فاز تقویت کننده ثانویه در ساختار پنل مشبک کامپوزیتی الیافی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- نتایج طیف‌سنجی FT-IR نشان داد که اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات سیلیکا به وسیله ترکیب 3-GTMS تحت شرایط مورد استفاده در تحقیق به خوبی صورت پذیرفته است.
- برای پنل‌های مشبک کامپوزیتی تحت شرایط بارگذاری عرضی، بخش قابل توجهی از میزان جذب انرژی پس از شکست اولیه سازه در نقطه حداکثر نیرو قابل مشاهده است.
- ظرفیت تحمل بار و میزان جذب انرژی سازه مشبک کامپوزیت الیافی با افزودن نانوذرات سیلیکا بهبود می‌یابد به طوری که بیشترین میزان افزایش خواص مذکور در این تحقیق مربوط به افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیکا در زمینه بود. در این حالت به ترتیب ۱۴ و ۲۶ درصد بهبود در میزان ظرفیت تحمل بار و میزان جذب انرژی سازه مشبک کامپوزیتی الیافی نسبت به نمونه بدون افزودن فاز نانو مشاهده شد.
- سفتی خمشی پنل‌های مشبک کامپوزیتی الیافی با افزودن نانوذرات سیلیکا به طور پیوسته افزایش پیدا می‌کند، به طوری که افزودن ۵ درصد وزنی نانوسیلیکا سفتی خمشی را به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌دهد.
- مطالعات میکروسکوپی FESEM سطوح شکست، بهبود چسبندگی زمینه و الیاف تقویت کننده را در ارتباط با پنل مشبک نانو کامپوزیتی نشان داد که می‌تواند نقش بسزایی را در بهبود خواص مکانیکی داشته باشد.
- در مجموع، نتایج حاصله در تحقیق حاضر موید آن است که افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح سطحی شده در ساختار پنل‌های مشبک کامپوزیتی الیافی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری عرضی کمک شایانی کند.

## ۵- مراجع

- [9] Gan, C. Gibson, R. and Newaz, G., "Analytical/Experimental Investigation of Energy Absorption in Grid-Stiffened Composite Structures under Transverse Loading", *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004.
- [10] Jadhav, P. and Mantena, P. R., "Parametric Optimization of Grid-Stiffened Composite Panels for Maximizing Their Performance under Transverse Loading", *Composite Structures*, Vol. 77, pp. 353-363, 2007.
- [11] Kim, T. D., "Fabrication and Testing of Thin Composite Isogrid Stiffened Panel", *Composite Structures*, Vol. 49, pp. 21-25, 2000.
- [12] Akl, W. El-Sabbagh, A. and Baz, A., "Optimization of the Static and Dynamic Characteristics of Plates with Isogrid Stiffeners", *Finite Element in Analysis and Design*, Vol. 44, pp. 513-523, 2008.
- [13] Shokrieh, M. M. Saeedi, A. and Chitsazzadeh, M., "Evaluating the Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Chopped Strand Mat/Polyester Composites", *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 274-279, 2014.
- [14] Jacob, S. Suma, K. K. Mendez, J. M. and George, K. E., "Reinforcing Effect of Nanosilica on Polypropylene-Nylon Fiber Composite", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 168, pp. 245-249, 2010.
- [15] Mirzapour, A. Asadollahi, M. H. Baghshaei, S. and Akbari, M., "Effect of Nanosilica on the Microstructure, Thermal Properties and Bending Strength of Nanosilica Modified Carbon Fiber/Phenolic Nanocomposite", *Composites Part A*, Vol. 63, pp. 159-167, 2014.
- [16] Subramanian, A. K. and Sun, C. T., "Enhancing Compressive Strength of Unidirectional Polymeric Composites Using Nanoclay", *Composites Part A*, Vol. 37, pp. 2257-2268, 2006.
- [17] Gojny, F. H. Wichmann, M. H. G. Fiedler, B. Bauhofer, W. and Schulte, K., "Influence of Nano-Modification on the Mechanical and Electrical Properties of Conventional Fiber-Reinforced Composites", *Composites Part A*, Vol. 36, pp. 1525-1535, 2005.
- [18] Uddin, M. F. and Sun, C. T., "Strength of Unidirectional Glass/Epoxy Composite with Silica Nanoparticle-Enhanced Matrix", *Composite Science and Technology*, Vol. 68, pp. 1637-1643, 2008.
- [19] Zamani, R. Rahimi, G. H. Pol, M. H. and Hedayatian, M., "Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Nanocomposite Grid Shells: Experimental Investigation", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 411-418, 2015.
- [20] Zamani, R. Rahimi, G. H. Pol, M. H. and Hedayatian, M., "Reinforcing Effect of Nanoclay on Buckling Behavior of Glass Fiber/Epoxy-Clay Cylindrical Grid Structures-Experimental Study", *The Bi-Annual International Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics (X-Mech-2014)*; 2014, Tehran, Iran.
- [21] Salon, M. C. B. and Belgacem, M. N., "Hydrolysis-Condensation Kinetics of Different Silane Coupling Agents", *Phosphorus, Sulfur, and Silicon*, Vol. 186, pp. 240-254, 2011.
- [22] YE, Y. Zeng, X. Qiangli, H. Chen, P. and Ye, C., "Synthesis and characterization of nanosilica/polyacrylate composite emulsions by sol-Gel Method and In-situ Emulsion Polymerization", *Journal of Macromolecular Science Part A*, Vol. 48, pp. 42-46, 2011.
- [23] Shukla, D. K. Kasisomayajula, S. V. and Parameswaran, V., "Epoxy Composites Using Functionalized Alumina Platelets as Reinforcements", *Composite Science and Technology*, Vol. 68, pp. 3055-3063, 2008.
- [24] Ma, J. Z. and Hu, J., "Polyacrylate/Silica Nanocomposite Materials Prepared by Sol-gel Process", *European Polymer Journal*, Vol. 43, pp. 4169-4177, 2007.
- [25] Sharma, S. C. Sheshadri, T. S. Krishna, M. Murthy, H. N. N. and Jose, J., "Influence of Solvents on the MWCNT/Adhesive Grade Epoxy Nanocomposites Preparation", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 22, pp. 2805-2812, 2009.
- [26] ASTM D7264/D7264M-07: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [27] Kang, S. Hong, S. I. Choe, C. R. Park, M. Rim, S. and Kim, J., "Preparation and Characterization of Epoxy Composites Filled with Functionalized Nanosilica Particles Obtained Via Sol-Gel Process", *Polymer*, Vol. 42, pp. 879-887, 2001.
- [28] Wang, H. Bai, Y. Liu, S. Wu, J. and Wong, C. P., "Combined Effects of Silica Filler and Its Interface in Epoxy Resin", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 4369-4377, 2002.
- [29] Houshyar, S. Shanks, A. and Hodzic, A., "Modelling of Polypropylene Fiber-Matrix Composites Using Finite Element Analysis", *eXPRESS Polymer Letters*, Vol. 3, pp. 2-12, 2009.
- [30] Srikanth, I. Daniel, A. Kumar, S. Padmavathi, N. Singh, V. Ghosal, Kumara P. A. and Devia, G. R., "Nanosilica Modified Carbon-Phenolic Composites for Enhanced Ablation Resistance", *Scripta Materialia*, Vol. 63, pp. 200-203, 2010.
- [31] Shariati, M. Farzi, G. and Dadrasi, A., "Mechanical Properties and Energy Absorption Capability of Thin-Walled Square Columns of Silica/Epoxy Nanocomposite", *Construction and Building Materials*, Vol. 78, pp. 362-368, 2015.
- [32] Eslami-Farsani, R. Khalili, S. M. R. Hedayatnasab, Z. and Soleimani, N., "Influence of Thermal Conditions on the Tensile Properties of Basalt Fiber Reinforced Polypropylene-Clay Nanocomposites", *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 540-549, 2014.
- [1] ASM Handbook, *Composites*, Metals Park, OH 44073: ASM Int. Vol. 21, 1997.
- [2] Vasiliev, V. V. and Razin, A. F., "Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications", *Composite Structures*, Vol. 76, pp. 182-189, 2006.
- [3] Vasiliev, V. V. Barynin, V. A. Rasin, A. F. Petrokovskii, S. A. and Khalimanovich, V. I., "Anisogrid Composite Lattice Structures-Development and Space Applications", *Composite structures*, Vol. 3, pp. 38-50, 2009.
- [4] Fan, H. Fang, D. and Jin, F., "Mechanical Properties of Lattice Grid Composites", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 24, pp. 409-418, 2008.
- [5] Hedayatian, M. Liaghat, G. H. Rahimi, G. H. and Pol, M. H., "Numerical and Experimental Analyses Projectile Penetration in Grid Cylindrical Composite Structures under High Velocity Impact", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014.
- [6] Wodesenbe, E. Kidane, S. and Pang, S. S., "Optimization for buckling loads of grid stiffened composite panels", *Composite Structures*, Vol. 60, pp. 159-169, 2003.
- [7] Totaro, G., "Local Buckling Modelling of Isogrid and Anisogrid Lattice Cylindrical Shells with Triangular Cells", *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 446-452, 2012.
- [8] Gibson, F. R., "Energy Absorption in Composite Grid Structures", *Advanced Composite Materials*, Vol. 14, pp. 113-119, 2005.