

## رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی چندمقیاسی اپوکسی-الیاف شیشه-نانوذرات رس تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای

حامد خسروی

دانش آموخته دوره دکتری، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

رضا اسلامی فارسائی\*

### چکیده

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانوذرات رس بر رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی (خمش سه نقطه‌ای) مورد بررسی قرار گرفت. در گام نخست، به منظور ایجاد فصل مشترک قوی بین زمینه اپوکسی و نانوذرات رس، این نانوذرات توسط عامل کوپلینگ تری گلیسیداکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (3-GPTS) اصلاح سطحی شدند. از الیاف تک‌جهته شیشه به عنوان جز تقویت‌کننده در ریب‌ها، از پارچه الیاف شیشه با بافت دوبعدی ساده به عنوان تقویت‌کننده در پوسته و همچنین از مخلوط رزین اپوکسی به همراه نانوذرات رس اصلاح سطحی شده با درصد‌های وزنی مختلف صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد به عنوان زمینه در ساخت سازه‌های مشبک کامپوزیتی با هندسه ایزوگرید استفاده شدند. روند اصلاح سطحی نانوذرات رس توسط آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه و پراش اشعه ایکس مورد تایید واقع شد. نتایج به دست آمده از آزمون نشان دادند که افزودن ۵ درصد وزنی نانوذرات رس اصلاح سطحی شده باعث بهبود قابل توجه خواص خمشی کامپوزیت‌ها شامل سفتی، نیروی حداکثر و جذب انرژی به میزان ۲۴.۳۲ و ۳۴ درصد می‌شود. همچنین مشاهده شد که در صفحات مشبک کامپوزیتی بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از شکست اولیه در نقطه بار حداکثر است که موید تلورانس تخریب بالای این سازه‌ها می‌باشد. **واژه‌های کلیدی:** صفحات مشبک کامپوزیتی، کامپوزیت‌های چندمقیاسی، نانوذرات رس، آزمون خمش سه نقطه‌ای، جذب انرژی.

## The Mechanical Properties of Nanoclay/E-glass-Epoxy Multiscale Grid Composites under 3-point Bending Test

H. Khosravi

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

R. Eslami-Farsani

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

### Abstract

In this research work, the effect of nanoclay addition on the flexural properties of E-glass/epoxy grid-stiffened composites (GSCs) was investigated. Firstly, in order to the formation of a stronger interface between the matrix and nanoclay particles, the nanoparticles were modified by a silan coupling agent (3-glycidoxypropyltrimethoxysilane/3-GPTS). Unidirectional glass fibers as rib reinforcement, plain glass fibers as skin reinforcement and a mixture of epoxy resin and 0, 1, 3 and 5 weight percent surface-modified nanoclay as matrix part were used to produce GSCs. The surface modification trend of nanoclay particles was confirmed by Fourier transform infrared (FT-IR) and X-ray diffraction (XRD). Obtained results showed that the addition of the surface modified nanoclays caused the improvement of stiffness, maximum load and energy absorption properties of GSCs, and the maximum improvements was related to the specimen with 5 wt. % nanoclay. It was also found out that a considerable portion of energy absorption was occurred after the primary fracture at peak load, manifesting the high damage tolerance of the grid composite structures.

**Keywords:** Grid-Stiffened Composite Panels, Multiscale Composites, Nanoclay Particles, 3-point Bending Test, Energy Absorption.

پیشرفته از جمله کامپوزیت‌های هیبریدی، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات و همچنین کامپوزیت‌های مشبک در طی سال‌های گذشته با سرعت بیشتری توسعه یافته است [۴-۲]. در این میان، کامپوزیت‌های مشبک به دلیل داشتن مزایا و خواص بسیار مناسب از جمله وزن کم، استحکام بالا، پایداری مناسب و جذب انرژی بسیار عالی در صنایع هوا و فضا و دیگر صنایع مانند اتومبیل‌سازی و کشتی‌سازی مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. این سازه‌ها از دو بخش اصلی ریب و پوسته تشکیل می‌شوند که ریب‌ها به عنوان جز اصلی تحمل‌کننده بار به شمار می‌روند و پوسته الزامات طراحی سازه را برآورده می‌سازد. از نقطه نظر کاربردی، براساس نوع ساختار شبکه‌بندی یا به عبارتی براساس نوع

### ۱- مقدمه

از نقطه نظر علم و مهندسی مواد، کامپوزیت‌ها به دلیل داشتن خواصی منحصر به فرد همچون نسبت استحکام به وزن بالا، سفتی به وزن مناسب و هزینه‌های کم تولید، گزینه مناسبی برای استفاده در صنایع خودروسازی، هوا و فضا، حمل و نقل و همچنین صنایع دیگر هستند. بهبود خواص استحکامی و کاهش وزن کامپوزیت‌ها توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است به طوری که باعث شده است تا در طی دهه‌های گذشته تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شود [۱]. در این راستا، کار و تحقیقات محققان بر روی مطالعه‌ی کامپوزیت‌های

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eslami@kntu.ac.ir

اتصال ريبها، سازه‌هاى مشبك به شكل‌هاى مختلفى ساخته مى‌شوند كه از مهمترين آن‌ها مى‌توان به هندسه‌هاى ايزوگرید و آنيزوگرید اشاره كرد كه بيشترين استفاده را دارا مى‌باشند [۵].

مطالعات مختلفى در زمينه‌هاى تسليم‌شدن، كمانش و قابليت جذب انرژى كامپوزيت‌هاى مشبك انجام شده است. به عنوان مثال كيم [۶] روش‌هاى توليد و آمايش‌هاى فشارى محورى را بر روى پنل‌هاى كامپوزيتى مشبك ايزوگرید براى شناسايى حالت‌هاى مختلف تسليم شدن بررسى كرد. نتايج آزمون فشار نشان داد كه بار اوليه به مقدار زيادى بر روى نگه‌دارنده‌ها تا زمانى كه دچار كمانش نشده‌اند اعمال مى‌شود و پوسته در سازه مشبك در جهت شعاعى مقاوم است. همچنين نتايج نشان داد كه كمانش پوسته، حالت دوم تسليم در اين كامپوزيت‌ها است كه بعد از خميده شدن ريبها اتفاق مى‌افتد. او نشان داد كه در پنل‌هاى ايزوگرید، مقاومت در برابر بار فشارى حتى بعد از تسليم شدن يك يا چند ريب همچنان ادامه مى‌يابد. همچنين اعمال بار بيشتر باعث تسليم شدن ريب‌هاى بيشتر شده تا در نهايت با اعمال بار بسيار زياد جدائش در فصل مشترك بين ريب و پوسته ايجاد مى‌شود.

توتارو [۷] شكست ناشى از كمانش را بر روى كامپوزيت‌هاى مشبك ايزوگرید و آنيزوگرید تحت تاثير بارهاى فشارى مدل‌سازى و مورد بررسى قرار داد. كامپوزيت شبيه‌سازى شده توسط توتارو استوانه-اى شكل، بدون پوسته و داراى ساختار شش‌ضلعى بود. مدل پيشنهاده شده توسط توتارو، دقت بسيار زيادى را در مورد آناليز كمانش المان محدود در طراحي اوليه‌ى پوسته‌هاى مشبك فراهم مى‌كند [۷]. هدايتيان و همكاران [۸]، پاسخ به ضربه كامپوزيت مشبك استوانه‌اى را مورد مطالعه قرار دادند. نتايج اين تحقيق نشان داد كه در سازه‌هاى مشبك وجود ريب‌هاى مجزا، مانع از گسترش شكست از يك سلول به سلول مشابه مى‌شود و پوسته در برخورد با اجسام ريز كه در آن انرژى برخورد از حدى فراتر رود باعث ايجاد سوراخ مى‌شود. همچنين نشان داده شد كه اثر ريبها در سازه‌هاى مشبكي كه تحت برخورد قرار مى‌گيرند را مى‌توان در سه مورد افزايش سفتى موضعى سازه در نزديكى ريبها، محدود كردن سطح شكست به يك سلول و کاهش تغيير شكل كلى سازه در نظر گرفت. نادرى و همكاران [۹] تحقيقى در زمينه محاسبه بار كمانشى سازه‌هاى مشبك تحت اثر بار محورى انجام دادند. اين محققان، با استفاده از رابطه‌ى اوپلرى براى كمانش بحراني يك تير و هندسه‌ى سازه، بار كمانشى اجزاي نزديك به انتهاي بزرگ سازه پوسته‌هاى مشبك مخروطى را به دست آوردند. با استفاده از اين بار كمانشى و با فرض كمانش متقارن، بار كمانش بحراني يك سازه مشبك مخروطى تحت بار محورى، محاسبه شد. گيبسون [۱۰] قابليت جذب انرژى در پنل‌هاى مشبك ايزوگرید را در دو حالت بارگذاري از سمت ريب و پوسته تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌اى مورد مطالعه قرار داد و نشان داد كه جذب انرژى براى حالتى كه بارگذاري از سمت ريب باشد در مقايسه با بارگذاري از سمت پوسته بيشتر است. اين در حالى است كه ظرفيت تحمل بار سازه در حالت بارگذاري از سمت پوسته بالاتر است.

يكى از جديدترين روش‌هاى بهبود خواص مختلف در كامپوزيت‌هاى زمينه پليميرى استفاده از نانومواد است كه باعث بهبود خواص سفتى، استحكام و جذب انرژى و غيره مى‌شود. ايده استفاده از نانوذرات به

خصوص نانولوله‌هاى كربنى و نانوذرات رس براساس اين حقيقت است كه تشكيل يك فازمىانى با ضخامت قابل توجه به عنوان يك عامل توزيع انرژى در ساختارهاى كامپوزيتى عمل مى‌كند. عامل ديگرى كه باعث توزيع انرژى در ساختارهاى كامپوزيتى مى‌شود، وجود اصطكاك و لغزش ناحيه رهاشده يا لايه لايه شده بين صفحات نانوذرات و زمينه پليميرى است. به طور كلى مى‌توان در نظر گرفت كه افزودن ذرات نانو به خصوص نانورس‌ها در زمينه پليميرى توانايى جذب انرژى را تحت بارگذاري‌هاى ديناميكى و استاتيكي بهبود مى‌بخشد [۱۱].

هلمى و هوا [۱۱]، رفتار خستگى ككشى كامپوزيت‌هاى زمينه اپوكسى تقويت شده با الياف شيشه حاوى ذرات نانورس را مورد بررسى قرار دادند. نتايج به دست آمده نشان داد كه استحكام ككشى استاتيكي و مدول كامپوزيت الياف شيشه- اپوكسى با افزودن نانوذرات رس اندكى افزايش يافته است. حضور ذرات نانورس در زمينه استحكام نهايى را افزايش داده است، در حالى كه كرنش شكست را کاهش داده است. همچنين نشان داده شد كه عمر خستگى ككشى به طور خاصى با افزودن نانورس به كامپوزيت الياف شيشه- اپوكسى افزايش يافته است به طورى كه بيشترين اثربخشى حدود ۵۴ درصد مى‌باشد. افزودن نانورس مانع رشد خسارت ناشى از خستگى به لحاظ شاخص خسارت و سرعت رشد ترك در تمام طول عمر خستگى به جزء در مرحله اوليه بارگذاري مى‌شود.

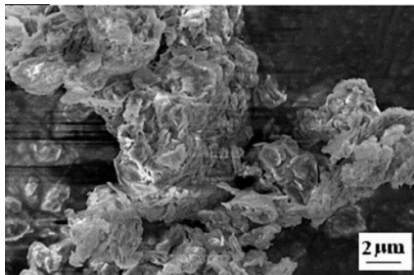
سيواساراوان و همكاران [۱۲] بر روى خواص ضربه كامپوزيت زمينه اپوكسى تقويت شده با الياف شيشه حاوى نانوذرات رس مطالعه و تحقيق كردند. نتايج به دست آمده از آزمون ضربه نشان داد كه افزودن نانورس به زمينه كامپوزيت باعث بهبود خواص مى‌شود. بهترين اثربخشى در كامپوزيت حاوى ۵ درصد نانورس ديده شد كه باعث افزايش ۱۰/۷۵ ژول بر متر انرژى ضربه در مقايسه با كامپوزيت‌هاى حاوى مقادير ديگر نانورس شده است. همچنين نشان داده شد كه افزودن بيشتر از ۵ درصد ذرات نانورس در زمينه، باعث تردى كامپوزيت و مشكل‌تر شدن ساخت نمونه‌ى كامپوزيتى مى‌شود.

سينك و همكاران [۱۳]، خواص مكانيكى كامپوزيت اپوكسى- الياف تك‌جهته شيشه حاوى ذرات نانورس را مورد بررسى قرار دادند. براساس نتايج اين محققان بهترين توزيع نانورس در كامپوزيت‌هاى حاوى ۱ و ۳ درصد نانورس مشاهده شد. براساس گزارش اين محققان، استحكام‌هاى ككشى و خمشى كامپوزيت‌هاى حاوى ۳ و ۵ در مقايسه با نمونه بدون نانوذرات رس بهبود قابل ملاحظه‌اى يافت. نتايج اين تحقيق آگلمره شدن نانوذرات را در كامپوزيت حاوى ۵ درصد نانورس نشان داد. ديگر نتايج به دست آمده نشان داد كه افزودن نانورس خواص مقاومت به آب كامپوزيت‌ها را نيز افزايش مى‌دهد.

محققان ديگرى نيز در ارتباط با افزودن ذرات نانورس به كامپوزيت زمينه پليميرى تقويت شده با الياف شيشه مطالعه‌اى را صورت دادند و نتايج كار آن‌ها نشان داد كه افزودن نانوذرات رس باعث بهبود خواص استحكامى، خزش، طول عمر خستگى و ديگر خواص كامپوزيت‌ها مى‌شود [۱۴، ۱۵].

بر اساس بررسى‌هاى انجام شده، در سال‌هاى اخير، مطالعات اندكى بر روى تاثير افزودن نانوذرات سراميكى بر خواص مكانيكى كامپوزيت‌هاى مشبك ثبت و گزارش شده است.

GPTS) محصول شرکت مرک آلمان برای اصلاح سطحی نانوذرات رس استفاده شد. این ترکیب دارای گروه‌های اپوکسید است و یکی از پرکاربردترین موادی است که برای اصلاح ساختار در مواد مختلف استفاده می‌شود. ساختار مولکولی آن  $C_9H_{20}O_5Si$  و وزن مولکولی آن  $226/4 \text{ g/mol}$  است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی از نانوذرات رس

## ۲-۲- اصلاح سطحی ذرات نانورس

به منظور افزایش میزان برهمکنش نانوذرات رس با زمینه اپوکسی، اصلاح سطحی نانوذرات امری ضروری است. در گام نخست، ۵ گرم از ذرات  $Na^+-Mt$  به  $100 \text{ mL}$  محلول شامل ۹۵ درصد اتانول و ۵ درصد آب مقطر اضافه شد. در گام بعدی، عامل کوپلینگ با نسبت یک به یک با نانوذرات رس به مخلوط فوق اضافه شد. مخلوط به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت و سپس به مدت ۸ ساعت در دمای  $80^\circ\text{C}$  عملیات رفلاکس انجام شد. PH محلول با استفاده از اسید کلریدریک ۳۷ درصد در محدوده ۴-۵ تنظیم شد. پس از انجام فرآیند رفلاکس، به منظور جداسازی نانوذرات رس، مخلوط ساخته‌شده به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ تحت سرعت  $4000 \text{ rpm}$  قرار گرفت. در گام نهایی، پودر حاصله به منظور خارج شدن عامل کوپلینگ اضافی سه مرتبه توسط اتانول شستشو داده شده و در ادامه به مدت ۱۲ ساعت در دمای  $80^\circ\text{C}$  در داخل آون قرار داده شد.

## ۲-۲- ساخت قالب سیلیکونی

شایان ذکر است که سیلیکون به دلیل داشتن حالت لاستیکی و تحمل کرنش‌های الاستیک بالا، باعث می‌شود تا جدا کردن نمونه‌های قالب‌گیری شده توسط قالب‌های سیلیکونی بسیار آسان باشد. به همین علت گزینه‌ای مناسب برای ساخت قالب کامپوزیت‌های مشبک می‌باشد. سیلیکون‌های قالب‌گیری از دو جزء تشکیل شده‌اند که با افزودن جزء دوم ترکیب حاصله در مجاورت هوا فعال گشته و باعث شکل‌گیری پلیمری انعطاف‌پذیر می‌شود. قالب طراحی‌شده در تحقیق حاضر دارای هندسه ایزوگرید متشکل از سلول‌های مثلثی دارای ریب‌های هلیکال و افقی بود. برای ساخت قالب در گام نخست، طرح اولیه با استفاده از دستگاه CNC بر روی صفحه‌ای ساخت شده از پلیمر پلی‌وینیل کلرید ایجاد شد که از آن به عنوان شابلون برای ساخت قالب (شکل ۲-الف) استفاده شد. در گام بعدی، به منظور خروج آسان قالب سیلیکونی از سطح شابلون ساخته شده، واکس سیلیکونی به روی سطح شابلون زده شد. در ادامه، سیلیکون مایع با افزودن جزء دوم (هاردنر) به مدت ۲ دقیقه توسط همزن فولادی همزده شد و در نهایت بر روی شابلون

زمانی و همکاران [۱۶] تحقیقی در مورد تاثیر افزودن نانورس بر رفتار کمانشی پوسته‌های کامپوزیتی مشبک استوانه‌ای انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با توجه به نوع طراحی هندسی نمونه‌های مشبک، مد کمانش پوسته‌های مشبک به صورت کمانش عمومی است. همچنین در این تحقیق گزارش شد که افزودن ذرات نانورس در زمینه پلیمری، تاثیری بر مد کمانش نداشته است. بار کمانشی و همچنین جابجایی تا کمانش مربوط به پوسته‌های مشبک نانو کامپوزیتی با افزایش ذرات نانورس در زمینه، به صورت پیوسته افزایش یافته و بیشترین مقاومت کمانشی در این نوع کامپوزیت‌ها مربوط به کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی نانورس می‌باشد. بیشینه افزایش پارامترهای بار کمانشی و جابجایی تا کمانش گزارش شده به ترتیب  $10/5$  و  $13/32$  درصد نسبت به پوسته‌های مشبک کامپوزیتی بوده است. خسروی و همکارش [۱۷] تاثیر افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده سطحی بر رفتار مکانیکی پنل‌های مشبک کامپوزیتی اپوکسی-الیاف شیشه تحت بارگذاری عرضی را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که بیشترین میزان بهبود در مقادیر بار حداکثر خمشی و جذب انرژی ویژه پنل مشبک کامپوزیتی با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیکای اصلاح سطحی‌شده به ترتیب با ۱۴ درصد و ۲۵ درصد افزایش قابل مشاهده است.

براساس دانش علمی و تجربی نویسندگان این مقاله تاکنون پژوهشی در ارتباط با اثر افزودن نانوذرات رس بر رفتار خمشی پنل‌های مشبک کامپوزیتی گزارش و ثبت نشده است. لذا هدف اصلی این مقاله پژوهشی، بررسی تاثیر افزودن ذرات نانورس اصلاح سطحی‌شده در درصد‌های وزنی مختلف (صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی نسبت به زمینه) بر خواص مکانیکی پنل‌های مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

رزین مورد استفاده در این پژوهش، رزین اپوکسی ML506 محصول شرکت مواد مهندسی مکرر بود که با توجه به کاتالوگ این شرکت از اختلاط ۸۵ درصد وزنی رزین اپوکسی بیسفنول F و ۱۵ درصد هاردنر پلی‌آمین HA-11 به دست می‌آید. از عوامل انتخاب این نوع رزین، داشتن خواص لزجت پایین ( $1450$  سانتی‌پویز) و زمان طولانی ژل شدن در این رزین (حدود ۶۰ دقیقه در دمای محیط) می‌باشد که امکان ساخت صفحات مشبک را به آسانی فراهم می‌سازد. الیاف تک-جهته شیشه با چگالی  $2/58 \text{ g/cm}^3$  و قطر متوسط فیلامنت  $12 \mu\text{m}$  و پارچه الیاف شیشه با بافت دوبعدی و چگالی  $400 \text{ g/m}^2$  محصول شرکت لاین تکس کشور چین به ترتیب به عنوان تقویت کننده در ریب-ها و پوسته مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین در این پژوهش، از نانوذرات رس مونت‌موریلونیت<sup>۱</sup> ( $Na^+-Mt$ ) محصول شرکت آمریکایی سیگما آلد ریچ استفاده شد که در شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روشی آن قابل مشاهده است. از عامل کوپلینگ سیلانی (3-

<sup>۱</sup> Sodium Montmorillonite

<sup>۲</sup> Glycidoxypropyltrimethoxysilane

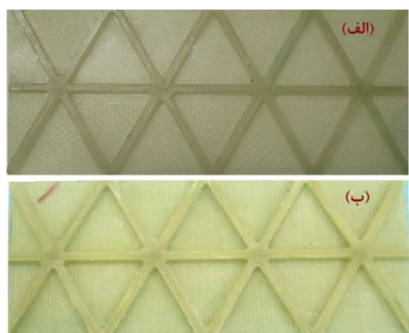
وقفه انجام شود، به عبارتی دیگر مرحله پخت ریبها و پوسته باید به صورت همزمان باشد. زمان اولیه پخت برای نمونه‌ها جهت خروج از قالب ۳ ساعت بود. بنا به توصیه شرکت سازنده رزین اپوکسی، به منظور پخت کامل و دستیابی به خواص بالاتر انجام آزمون بر روی نمونه‌ها پس از گذشت ۷ روز قرارگیری در دمای محیط انجام شد. در شکل ۴ نمونه‌های ساخته‌شده با و بدون افزودن نانوذرات رس نشان داده شده است.

#### ۲-۵- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار خمشی پنل‌های مشبک کامپوزیتی، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای براساس استاندارد ASTM D7264-07 استفاده شد [۱۹]. در این راستا، ابتدا فیکسچری که قابلیت جابجایی خمشی تا حدود ۱۱ cm را بر روی دستگاه یونیورسال هانسفیلد با ظرفیت ۲۵ kN فراهم می‌سازد طراحی و ساخته شد.



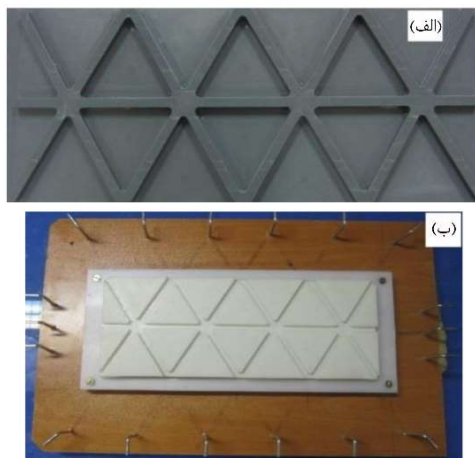
شکل ۳- مراحل اصلی برای ساخت نمونه‌های مشبک کامپوزیتی، (الف) لایه‌گذاری و ساخت ریب‌ها، (ب) لایه‌گذاری و ساخت پوسته



شکل ۴- نمونه‌های مشبک کامپوزیتی ایزوگرید: (الف) بدون افزودن نانوذرات رس، (ب) با افزودن نانوذرات رس اصلاح سطحی شده

برای تمامی آزمون‌ها فاصله بین دو تکیه‌گاه ثابت و معادل mm ۲۵۰ در نظر گرفته شد به طوری که نسبت ۳۲ به ۱ فاصله دو تکیه‌گاه به ضخامت برای کلیه نمونه‌ها رعایت شده باشد. در ادامه، تمامی نمونه‌ها از قسمت میانی مطابق شکل ۵ تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و با سرعت بارگذاری mm/min ۵ قرار داده شدند. در حین بارگذاری، نمودار نیروی خمشی بر حسب جابه‌جایی به وسیله دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی نمونه‌های مشبک کامپوزیتی

ریخته شد. زمان لازم برای پخت سیلیکون مایع حدود ۶ ساعت بود که بعد از طی شدن این زمان قالب سیلیکونی ساخته شد (شکل ۲-ب).



شکل ۲- (الف) شابلون استفاده شده برای ساخت قالب ایزوگرید، (ب) قالب سیلیکونی ساخته شده

#### ۲-۴- ساخت نمونه‌های مشبک نانوکامپوزیتی

ابتدا نانوذرات رس اصلاح سطحی‌شده با درصد‌های وزنی صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد به رزین اپوکسی اضافه شد. برای سهولت در پراکندگی نانوذرات رس در رزین، از استون به عنوان عامل رقیق‌کننده با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ استفاده شد [۱۸]. برای توزیع و پخش مناسب نانوذرات رس در رزین استفاده از همزن مکانیکی و امواج آلتراسونیک رایج است. به همین دلیل در ابتدا رزین توسط همزن مکانیکی اورهد ساخت شرکت فاین تک کره جنوبی با سرعت ۲۰۰۰ rpm و به مدت ۲۰ دقیقه همزده شد. در ادامه برای از بین بردن کلوخه‌های موجود و پخش هرچه بهتر نانوذرات رس در زمینه اپوکسی از دستگاه آلتراسونیک پروبی ساخت شرکت فاین ایران به مدت ۹۰ دقیقه با فرکانس ۲۴ Hz و توان ۱۲۰W استفاده شد. به منظور جلوگیری از افزایش دمای بیش از حد مخلوط و نگاه داشتن دمای آن در حدود C ۴۵ از یک حمام آب و یخ در مجاورت محفظه استفاده شد. در مرحله بعد، به منظور خروج استون اضافی و همچنین حباب‌های ایجاد شده توسط دستگاه‌های همزن، مخلوط به دست آمده تحت خلاء قرار گرفت. در گام بعدی، هاردنر به مخلوط رزین و نانوذرات رس اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همزده شد.

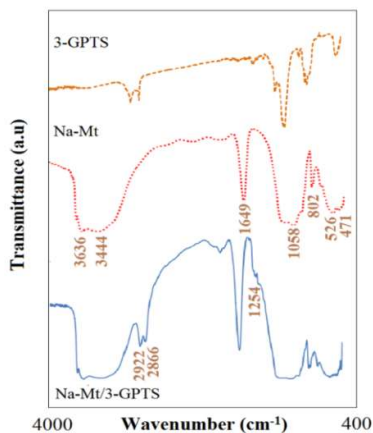
برای ساخت پنل‌های مشبک کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد. بدین منظور، در ابتدا فیکسچری طراحی شده مطابق شکل ۳-الف برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. در ادامه ۱۵ لایه الیاف شیشه آغشته به مخلوط رزین اپوکسی و نانوذرات در داخل ریب‌ها قرار داده شد. طول ریب‌ها mm ۶۵، زاویه قرارگیری ریب‌ها ۶۰° و درصد حجمی الیاف در ریب‌ها ۴۴ درصد بود. بلافاصله بعد از ساخت ریب‌ها ۴ لایه پارچه الیاف شیشه آغشته به همان مخلوط رزین زمینه با درصد حجمی ۴۸ درصد به منظور تشکیل پوسته با ضخامت mm ۱/۸ بر روی ریب‌ها قرار داده شد (شکل ۳-ب). ساخت ریب و پوسته پنل مشبک باید به منظور دستیابی به بهترین خواص به صورت همزمان و بدون

برای بررسی سطح شکست و همچنین مکانیزم‌های تاثیرگذار بر خواص خمشی پنل‌های مشبک کامپوزیتی از میکروسکوپ الکترونی میدانی FESEM مدل هیتاچی S-4160 تحت ولتاژ شتابی 25 kV استفاده شد. لازم به ذکر است که برای بهبود رسانایی نمونه‌ها، بر روی آن‌ها پوششی از جنس طلا در محفظه‌ای تحت خلاء اعمال شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مشخصه‌یابی ذرات نانورس اصلاح سطحی شده

شکل ۶ نتایج آنالیز FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحی نشده، عامل کولپینگ سیلانی و نانوذرات رس اصلاح سطحی شده را نشان می‌دهد. منحنی FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحی- نشده دارای نقطه اوجی در عدد موج  $3444 \text{ cm}^{-1}$  می‌باشد که به علت ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل است، در حالی که نقطه اوج مشاهده شده در  $1649 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات خمشی پیوند H-O-H است. نقطه اوج نمایان شده در  $3636 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاشات کششی پیوند گروه‌های OH با اتم‌های Al نسبت داده می‌شود [۲۱]. نقطه اوج قابل مشاهده در عدد موج  $1058 \text{ cm}^{-1}$  به علت ارتعاشات کششی گروه‌های Si-O-Si و Si-O است [۲۲]. همچنین، نقطه اوج‌های جذبی در اعداد موج  $526$  و  $471 \text{ cm}^{-1}$  به ارتعاشات خمشی در گروه‌های Si-O-Si و Si-O-Al نسبت داده می‌شود [۲۳]. باند ظاهر شده در  $802 \text{ cm}^{-1}$  به علت کشش متقارن Si-O-Si است. با توجه به شکل ۶ می‌توان دریافت که منحنی FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحی شده علاوه بر نشان دادن نقطه اوج‌های مرتبط با نانوذرات رس اصلاح سطحی نشده، همچنین نقطه اوج‌های مرتبط با عامل کولپینگ سیلانی 3-GTPS را نشان می‌دهد. این نقطه اوج‌ها در باندهای  $2927$  و  $2866 \text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده هستند که به ترتیب مربوط به کشش متقارن  $\text{CH}_3$  و کشش  $\text{CH}_2$  هستند. علاوه بر این دو نقطه اوج، نقطه اوج ضعیف دیگری در عدد موج  $1254 \text{ cm}^{-1}$  قابل مشاهده است که ناشی از ارتعاش حلقه اپوکسید است. ظاهر شدن این نقطه اوج‌ها، اصلاح سطحی نانوذرات رس را تایید می‌کند.



شکل ۶- منحنی FT-IR ذرات نانورس اصلاح نشده، عامل کولپینگ و ذرات نانورس اصلاح سطح شده

استفاده شد. به منظور دقت بیشتر در داده‌ها، آزمون برای هر نمونه سه مرتبه تکرار و میانگین داده‌ها گزارش شد. در صورتی که برای نمونه‌ای نتایج آزمون با بیش از ۵ درصد اختلاف توسط دستگاه ثبت شده بود، آزمون بار دیگر برای آن نمونه تکرار شد.



شکل ۵- نحوه قرارگیری نمونه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی از سمت پوسته

با توجه به سطح مقطع غیرهمگن نمونه‌های مشبک و براساس مطالعات انجام شده [۲۰]، پس از انجام آزمون خمش و به دست آوردن نمونه‌های مرتبط با آن، از شیب خطی نمودارها به عنوان معیاری برای ارزیابی سفتی کامپوزیت‌های مشبک، حداکثر بار مشاهده شده به عنوان معیاری برای ارزیابی ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها (مقاومت خمشی) و همچنین از مساحت زیر منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی به عنوان معیاری برای مقایسه جذب انرژی در کامپوزیت‌های مشبک استفاده شد. با توجه به این که در بحث سازه‌های مشبک، وزن سازه پارامتری موثر و کلیدی می‌باشد، لذا مقادیر به دست آمده برای جذب انرژی بر جرم کلی سازه تقسیم شد تا مقادیر جذب انرژی ویژه<sup>۳</sup> حاصل شود.

#### ۲-۶- آزمون FT-IR<sup>۴</sup>

به منظور تایید اصلاح سطحی انجام شده بر روی نانوذرات رس یا به عبارت دیگر به منظور بررسی تشکیل گروه‌های عاملی بر روی سطح نانوذرات و همچنین بررسی واکنش‌های احتمالی انجام شده، از دستگاه طیف‌سنج FT-IR مدل جکسو 460-plus در محدوده  $4000$  تا  $400 \text{ cm}^{-1}$  با حساسیت  $4 \text{ cm}^{-1}$  استفاده شد.

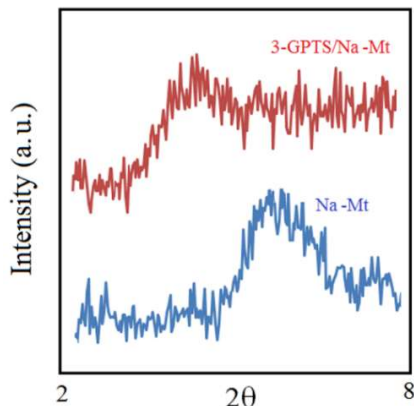
#### ۲-۷- آزمون پراش اشعه ایکس

به منظور بررسی ساختار ذرات نانورس اصلاح سطحی شده و همچنین تشکیل نانوکامپوزیت‌ها در پلیت‌های مشبک از دستگاه پراش اشعه ایکس با منبع  $\text{CuK}\alpha$  و ولتاژ 30 kV تحت جریان 20 mA استفاده شد. مدل دستگاه مورد استفاده EQumiox 3000 ساخت شرکت Inel کشور فرانسه بود.

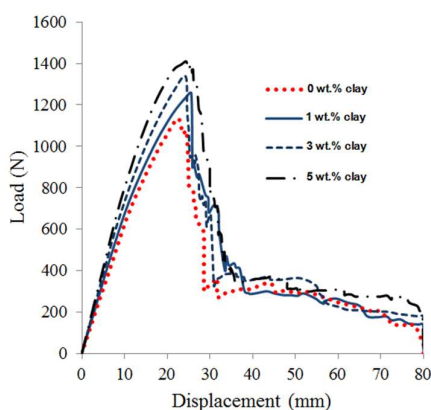
#### ۲-۸- بررسی میکروسکوپی

<sup>۳</sup> Specific energy absorption (SEA)

<sup>۴</sup> Fourier transform infrared analysis



شکل ۸- منحنی‌های پراش اشعه ایکس نانوذرات رس قبل و بعد از عملیات اصلاح سطحی

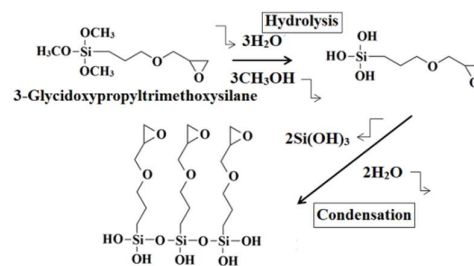


شکل ۹- منحنی‌های نیرو-جابجایی برای کامپوزیت‌های مشبک با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات رس، تحت آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر افزودن نانوذرات رس بر خواص خمشی صفحات مشبک کامپوزیتی، داده‌های مربوط به بار بیشینه، سفتی (شیب منحنی در ناحیه خطی) و همچنین جذب انرژی ویژه (مساحت زیر منحنی تقسیم بر جرم سازه بین دو تکیه‌گاه) از نمودارهای شکل ۹ استخراج و نتایج آن در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آورده شده است.

شکل ۱۰ نمودار بیشینه نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی نانوذرات رس در زمینه نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان مشاهده کرد که افزودن نانوذرات رس به زمینه باعث بهبود قابل توجهی در مقدار حداکثر نیرو می‌شود.

برای درک بهتر واکنش‌های شیمیایی انجام‌شده بین عامل کوپلینگ 3-GPTS و نانوذرات رس، در شکل ۷ واکنش‌های عامل سیلانی در محلول اتانول- آب شامل واکنش‌های هیدرولیز و چگالش نشان داده شده است. بر اساس این شکل می‌توان مشاهده نمود که گروه‌های هیدروکسیل (OH) موجود در عامل سیلانی با گروه‌های OH بر روی سطح نانوذرات واکنش می‌دهند. بنابراین زمانی که این نانوذرات اصلاح سطحی شده به عنوان فاز فیلر در زمینه اپوکسی سازه مشبک قرار می‌گیرد، واکنش میان گروه‌های عاملی اپوکسید موجود بر روی سطح نانوذرات و زمینه اپوکسی در حضور هاردنر آمینی انجام می‌شود. انجام این واکنش‌ها باعث ایجاد یک پیوند کووالانسی قوی بین نانوذرات رس و اپوکسی می‌شود که این پیوند کووالانسی باعث قوی‌تر شدن فصل-مشترک بین زمینه و نانوذرات می‌شود [۲۴].



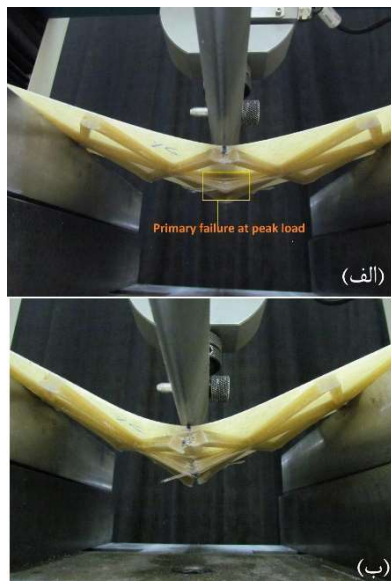
شکل ۷- مراحل کلی واکنش بین نانوذرات رس و عامل کوپلینگ سیلانی

شکل ۸ الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات رس قبل و بعد از عملیات اصلاح سطحی را نشان می‌دهد. الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات اصلاح سطحی نشده بیشینه زاویه پراش را در  $2\theta = 5/83$  نشان می‌دهد که در این حالت اندازه فاصله بین صفحات (۰۰۱) برابر  $15/2 \text{ \AA}$  (محاسبه شده براساس قانون براگ) است [۲۵]. از طرف دیگر، زاویه پراش برای نانوذرات رس اصلاح سطحی شده  $2\theta = 3/81$  را نشان می‌دهد که در این حالت فاصله بین صفحات (۰۰۱)  $23/2 \text{ \AA}$  محاسبه شد. بنابراین عامل کوپلینگ سیلانی باعث آن شده است که نقطه اوج پراش مورد نظر به سمت زاویه‌های پایین‌تر انتقال یابد که در حقیقت باعث افزایش فاصله بین صفحات شده است [۲۴، ۲۶].

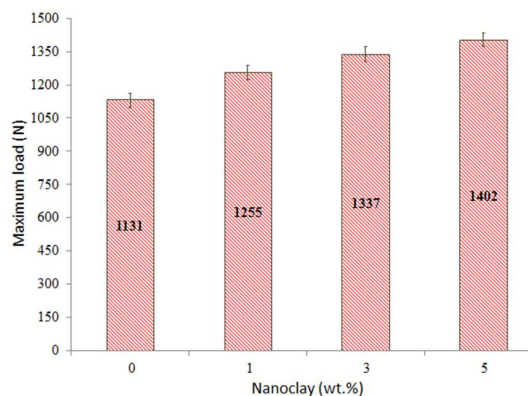
### ۳-۲- آزمون خمش سه نقطه‌ای

نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر روی صفحات مشبک کامپوزیتی با درصد‌های وزنی مختلف نانوذرات رس اصلاح سطحی شده در شکل ۹ به صورت منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی آورده شده است. برای کلیه نمونه‌ها بارگذاری از سمت پوسته و تا میزان جابجایی ۸۰ mm صورت گرفته است. با توجه به شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود که روند کلی همه نمودارها مشابه یکدیگر بوده و افزودن نانوذرات رس تنها باعث تغییر در نیروی حداکثر، سفتی و جذب انرژی سازه شده است. همچنین با توجه به این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که جذب انرژی حتی بعد از نیروی حداکثر (شکست اولیه نمونه) ادامه دارد، به طوری که بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از نیروی حداکثر قابل مشاهده است.

برای اشاعه ترک نیاز به پیچش یا چرخش از میان نانوذرات را داشته و این باعث تغییر مسیر رشد ترک می‌شود [۲۵].



شکل ۱۱- حالت‌های مختلف شکست سازه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی از سمت پوسته: الف) شکست اولیه در ریب افقی و ب) شکست کامل ریب‌ها در زیر دماغه بارگذاری

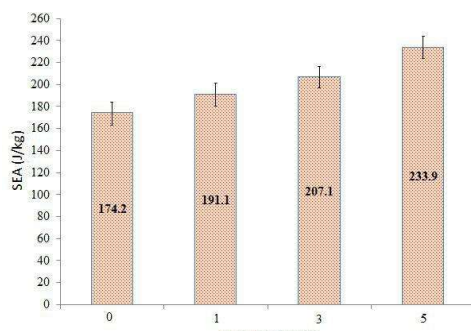


شکل ۱۰- تغییرات بار بیشینه خمشی بر حسب درصد وزنی نانوذرات رس در سازه‌های مشبک کامپوزیتی

حالت‌های مختلف شکست یک سازه مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی از سمت پوسته در شکل ۱۱ آورده شده است. در کامپوزیت‌های مشبک، ریب‌ها به عنوان جزء اصلی تحمل بار به شمار می‌روند. در هنگام اعمال بار در حین آزمون خمش از سمت پوسته، ابتدا ریب افقی تسلیم و شکسته می‌شود که به صورت حداکثر نیرو در نمودار نیرو بر حسب جابجایی مشخص می‌شود (شکل ۱۱ الف). در ادامه بارگذاری، شکست کامل ریب افقی و همچنین جدایش ریب‌های کناری را شاهد هستیم (شکل ۱۱ ب). پس از قطع ارتباط بین ریب‌ها و پوسته در زیر دماغه بارگذاری، بار توسط پوسته تحمل خواهد شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در کامپوزیت‌های الیافی تحت بار خمشی، پارگی الیاف در اثر بارهای کششی و میکروکمانش آن‌ها در اثر بارهای فشاری مکانیزم‌های اصلی شکست هستند [۱۶].

براساس بررسی‌های انجام شده دو عامل در افزایش میزان حداکثر نیروی خمشی تاثیرگذار است. عامل اول ناشی از تاثیر تقویت‌کنندگی نانوذرات رس در زمینه کامپوزیت است. در کامپوزیت‌های مشبک الیافی بخش عمده بار اعمالی بر روی الیاف تقویت‌کننده متمرکز است [۲۷]. افزودن نانوذرات رس در زمینه پلیمری باعث کاهش میزان تمرکز تنش روی سطح الیاف و در نتیجه افزایش میزان تنش لازم برای شکست الیاف می‌شود. این بدان علت است که به علت تقویت زمینه با نانوذرات بخش بیشتری از بار اعمالی توسط زمینه تحمل می‌شود. عامل دوم به مشخصه‌های فصل‌مشرکی الیاف- زمینه مرتبط است که نقش بسیار مهمی دارد. هنگامی که نانوذرات رس به زمینه کامپوزیت افزوده می‌شوند، لغزش اصطکاکی<sup>۵</sup> بین فاز زمینه و الیاف محدود شده و در نتیجه انتقال بار اعمالی به الیاف توسط زمینه به صورت موثرتری صورت می‌گیرد [۱۱].

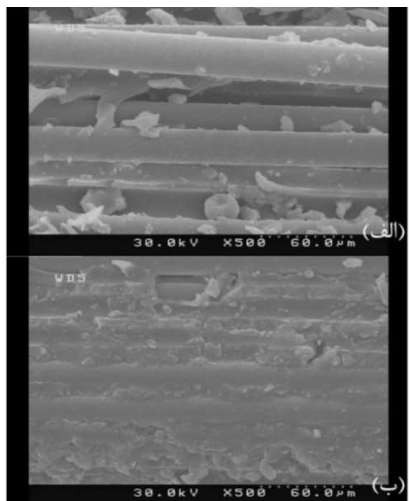
براساس شکل ۱۲، با افزایش درصد نانوذرات رس در زمینه میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های مشبک افزایش یافته و بیشترین میزان افزایش مربوط به کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات و به میزان ۳۴ درصد نسبت به کامپوزیت مشبک بدون نانوذرات است. در این حالت انحراف ترک در زمینه به وسیله نانوذرات رس باعث بهبود جذب انرژی در کامپوزیت می‌شود، زیرا هنگامی که ترک به نانوذرات می‌رسد،



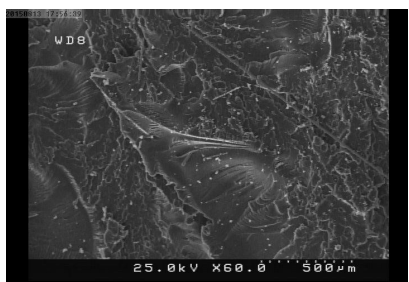
شکل ۱۲- تغییرات جذب انرژی ویژه بر حسب درصد نانوذرات رس در سازه‌های مشبک کامپوزیتی

در شکل ۱۳ ارتباط سفتی خمشی کامپوزیت‌های مشبک بر حسب درصد نانوذرات رس نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان مشاهده نمود که بیشترین اثربخشی مربوط به کامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات و به میزان ۳۲ درصد در مقایسه با کامپوزیت مشبک بدون افزودن نانوذرات رس است. دلیل این بهبود مشاهده شده را می‌توان در درجه اول به طبیعت بسیار سفت‌تر نانوذرات رس در مقایسه با زمینه اپوکسی و در درجه دوم ناشی از برهمکنش مطلوب نانوذرات رس اصلاح سطحی شده با زنجیره‌های پلیمری و ممانعت از لغزش آن‌ها دانست [۱۱].

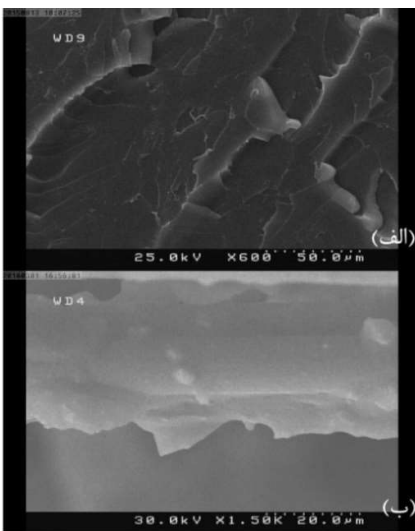
<sup>۵</sup> Frictional slippage



شکل ۱۴- سطح شکست ریب افقی سازه مشبک الف) بدون افزودن نانوذرات رس و ب) با افزودن ۵ درصد وزنی نانوذرات رس در زمینه

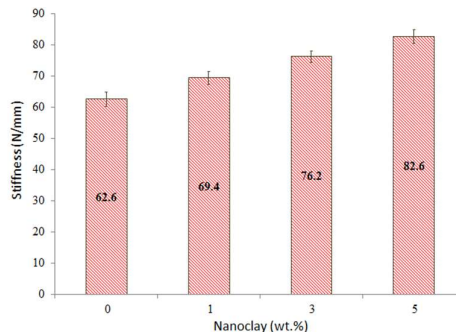


شکل ۱۵- سطح مقطع شکست زمینه کامپوزیت مشبک حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات رس



شکل ۱۶- الف) شکست ترد زمینه نمونه بدون نانوذرات رس و ب) مکانیزم شکست زمینه در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۵ درصد نانوذرات

۲) بررسی انجام شده به وسیله پراش اشعه ایکس نشان داد در اثر اصلاح سطحی نانوذرات رس با عامل سیلانی فاصله بین صفحات (۰۰۱) افزایش و نقطه اوج پراش به سمت زوایای کمتر انتقال یافته است.



شکل ۱۳- تغییرات سفتی خمشی بر حسب درصد وزنی نانوذرات رس در سازه‌های مشبک کامپوزیتی

### ۳-۳- بررسی میکروسکوپی

شکل ۱۴ تصاویر FESEM از مورفولوژی سطح شکست ریب افقی پنل-های کامپوزیتی بدون افزودن نانوذرات رس (شکل ۱۴الف) و حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات رس در زمینه (شکل ۱۴ب) را نشان می‌دهد. با مقایسه این تصاویر می‌توان مشاهده کرد که چسبندگی الیاف به زمینه در نمونه نانوکامپوزیتی بسیار بهتر است. همچنین می‌توان دید که هنوز مقداری از زمینه حاوی نانوذرات رس پس از شکست روی سطح الیاف چسبیده و آن را پوشانده است. ولی در زمینه بدون نانوذرات رس، سطح شکست الیاف صاف و بدون تغییر است. براساس مطالعات انجام شده نوع شکست غالب در ارتباط با نمونه نانوکامپوزیتی، شکست زمینه است. اما در ارتباط با نمونه بدون نانوذرات رس، مکانیزم غالب شکست ناشی از جدایش بین الیاف و زمینه است [۲۸].

شکل ۱۵ مورفولوژی سطح شکست زمینه نانوکامپوزیت مشبک دارای ۵ درصد وزنی نانوذرات رس را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، سطح شکست به صورت لایه لایه و ناهموار است و انحراف مسیر ترک به خوبی قابل مشاهده است. در ارتباط با نمونه بدون افزودن نانوذرات رس سطح شکست صاف بوده که مبین شکست ترد می‌باشد که شکل ۱۶الف نشان‌دهنده آن است. بهبود چسبندگی زمینه نانوکامپوزیتی با الیاف تقویت‌کننده و مکانیزم شکست زمینه در شکل ۱۶ب نشان داده شده است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانوذرات رس اصلاح سطحی شده با عامل کوپلینگ 3-GPTS با درصد‌های وزنی مختلف صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد نسبت به زمینه بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های مشبک بررسی شد. نتایج حاصله از این کار پژوهشی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱) نتایج آنالیز FT-IR نشان داد که اصلاح سطحی نانوذرات رس با عامل سیلانی با موفقیت صورت گرفته است.



loading conditions, *Procedia Materials Science* Vol. 5, pp. 1114-1119, 2014.

[13] Silva H., Ferreira J. A. M., Costa J. D. M., Capela C. A., Study of mixed mode interlaminar fracture on nanoclay enhanced epoxy/glass fiber composites, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 25, No. 2, pp. 92-97, 2013.

[14] Withers G. J., Yu Y., Khabashesku V. N., Cercone L., Hadjiev V. G., Souza J. M., Davis D. C., Improved mechanical properties of an epoxy glass-fiber composite reinforced with surface organomodified nanoclays, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 72, pp. 175-182, 2015.

[15] Zamani R., Rahimi Gh., Pol M. H., Hedayatian M., Reinforcing effect of nanoclay on buckling behavior of nanocomposite grid shells: experimental investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 411-418, 2015 (In Persian).

[16] Khosravi H., Eslami-Farsani R., An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016 (In Persian).

[17] Sharma S. C., Sheshadri T. S., Krishna M., Murthy H. N. N., 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, 2008.

[18] ASTM D7264/D7264M-07: Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials, 2007.

[19] Gan C., Gibson R. F., Newaz G. M., Analytical experimental investigation of energy absorption in grid-stiffened composite structures under transverse loading, *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004.

[20] Gates H. P., Infrared spectroscopy and the chemistry of dioctahedral smectites, T. Klopogge (Eds.), *Vibrational spectroscopy of layer silicates and hydroxides CMS workshop lectures*, The Clay Minerals Society, Aurora, Co., Colorado, 2005.

[21] Romanzini D., Piroli V., Frache A., Zattera A. J., Amico S. C., Sodium montmorillonite modified with methacryloxy and vinylsilanes: Influence of silylation on the morphology of clay/unsaturated polyester nanocomposites, *Applied Clay Science*, Vol. 114, pp. 550-557, 2015.

[22] Mishra A. K., Allauddin S., Narayan R., Aminabhavi T. M., Raju K. V. S. N., Characterization of surface-modified montmorillonite nanocomposites, *Ceramic International*, Vol. 38, No. 2, pp. 929-934, 2012.

[23] Dorigato A., Morandi S., Pegoretti A., Effect of nanoclay addition on the fiber/matrix adhesion in epoxy/glass composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 12, pp. 1439-1451, 2011.

[24] Zunjarrao S. C., Sriraman R., Singh R. P., Effect of processing parameters and clay volume fraction on the mechanical properties of epoxy-clay nanocomposites, *Journal of Materials Science*, Vol. 41, No. 8, pp. 2219-2228, 2006.

[25] Aboubakr S. H., Kandil U. F., Reda Taha M. Creep of epoxy-clay nanocomposite adhesive at the FRP interface: A multi-scale investigation, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 54, pp. 1-12, 2014.

[26] Houshyar S., Modelling of polypropylene fibre-matrix composites using finite element analysis, *eXPRESS Polymer Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 2-12, 2008.

[27] Eslami-Farsani R., Khalili S. M. R., Hedayatnasab Z., 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.

۳) نتایج آزمون خمش نشان داد که افزودن نانوذرات رس باعث بهبود خواص سفتی خمشی، ظرفیت تحمل بار و همچنین میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های مشبک شده است. بیشترین میزان اثربخشی برای نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات رس مشاهده شد که برای این نمونه در مقایسه با نمونه فاقد نانوذرات رس به ترتیب به میزان ۳۲، ۲۴ و ۳۴ درصد بهبود در سفتی خمشی، ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی مشاهده شد.

۴) نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که افزودن نانوذرات رس باعث چسبندگی بهتر بین زمینه و تقویت‌کننده الیافی در کامپوزیت‌های مشبک می‌شود که تاثیر بسزایی را در بهبود رفتار خمشی کامپوزیت مشبک دارد.

۵) در مجموع، نتایج به‌دست آمده در این تحقیق نشان داد که افزودن نانوذرات رس به زمینه صفحات مشبک کامپوزیتی می‌تواند تاثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری خمشی داشته باشد.

## ۵- مراجع

[1] Sorrentino L., Marchetti M., Bellini C., Delfini A., Albano M., Design and manufacturing of an isogrid structure in composite material: Numerical and experimental results, *Composite Structures*, Vol. 143, pp. 189-201, 2016.

[2] Ebrahimzhad-Khaljiri H., Eslami-Farsani R., Khosand H., Abbas-Banaie K., Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015 (In Persian).

[3] Hedayatian M., Liaghat Gh., Rahimi Gh., Pol M. H., Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014 (In Persian).

[4] Talezadehlari A., Rahimi Gh. H., Buckling analysis of stiffened composite cylindrical shell based on the modified smear method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 319-329, 2015 (In Persian).

[5] Wang D., Abdalla M. M., Global and local buckling analysis of grid-stiffened composite panels, *Composite Structures*, Vol. 119, pp. 767-776, 2015.

[6] Kim T. D., Fabrication and testing of thin composite isogrid stiffened panel, *Composite Structures*, Vol. 49, No. 1, pp. 21-25, 2000.

[6] Totaro G., Local buckling modelling of isogrid and anisogrid lattice cylindrical shells with hexagonal cells, *Composite Structures*, Vol. 95, pp. 403-410, 2013.

[7] Hedayatian M., Liaghat Gh., Rahimi Gh., Pol M. H., Khoshsorour M., Experimental study on dynamic response of grid cylindrical composite structures under high velocity impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 41-46, 2014 (In Persian).

[8] Naderi A. A., Rahimi Gh., Simple method for buckling load of composite conical Lattice structures under axial load, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 290-298, 2015 (In Persian).

[9] Gibson R. F., Energy absorption in composite grid structures, *Advanced Composite Materials*, Vol. 14, No. 2, pp. 113-119, 2005.

[10] Helmy S., Hoa S. V., Tensile fatigue behavior of tapered glass fiber reinforced epoxy composites containing nanoclay, *Composites Science and Technology*, Vol. 102, pp. 10-19, 2014.

[11] Sivasaravanan S., Raja V. K. B., Impact characterization of epoxy LY556/E-glass fibre/nano clay hybrid nano composite materials, *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 968-974, 2014.

[12] Singh S. K., Singh S., Sharma S., Sharma V., Strength degradation of mechanical properties of unidirectional E-glass fiber epoxy resin nanoclay composites under hygrothermal