رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی چندمقیاسی اپوکسی- الیاف شیشه- نانوذرات رس تحت آزمون خمش سەنقطەای

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 رضا اسلامی فارسانی* دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیدہ

در این تحقیق، تاثیر افزودن نانوذرات رس بر رفتار مکانیکی صفحات مشبک کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی (خمش سەنقطەای) 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 (GGPTS-3) 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 شده با درصدهای وزنی مختلف صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد به عنوان 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 قابل توجه خواص خمشی 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 با عنود قابل توجه خواص خمشی کامپوزیتی ها شامل سفتی، نیروی حداکثر و جذب انرژی به میزان ۲۳، ۲۴ 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 سازمها میباشد. **واژههای کلیدی:** صفرات مشبک کامپوزیتی، کامپوزیتهای چنده ای دولقطه بار حداکثر است که موید تلورانس تخریب بالای این سازمها میباشد.

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، کامپوزیت-های 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 تحمل کننده 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 منحصربه 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 طوریکه باعث شده است تا در طی دههی گذشته تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شود [1]. در این راستا، کار و تحقیقات محققان بر روی مطالعهی کامپوزیتهای

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: eslami@kntu.ac.ir تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۴

اتصال ریبها، سازههای مشبک به شکلهای مختلفی ساخته میشوند که از مهمترین آنها میتوان به هندسههای ایزوگرید و آنیزوگرید اشاره کرد که بیشترین استفاده را دارا میباشند [۵].

مطالعات مختلفی در زمینههای تسلیمشدن، کمانش و قابلیت جذب انرژی کامپوزیتهای مشبک انجام شده است. به عنوان مثال کیم [8] روشهای تولید و آزمایشهای فشاری محوری را بر روی پنلهای کامپوزیتی مشبک ایزوگرید برای شناسایی حالتهای مختلف تسلیم شدن بررسی کرد. نتایج آزمون فشار نشان داد که بار اولیه به مقدار زیادی بر روی نگهدارندهها تا زمانی که دچار کمانش نشدهاند اعمال میشود و پوسته در سازه مشبک در جهت شعاعی مقاوم است. کامپوزیتها است که بعد از خمیده شدن ریبها اتفاق میافتد. او نشان داد که در پنلهای ایزوگرید، مقاومت در برابر بار فشاری حتی بعد از تسلیم شدن یک یا چند ریب همچنان ادامه مییابد. همچنین اعمال بار بیشتر باعث تسلیم شدن ریبهای بیشتر شده تا در نهایت با اعمال بار بیشتر زیاد جدایش در فصل مشترک بین ریب و پوسته ایجاد می-شود.

توتارو [۷] شکست ناشی از کمانش را بر روی کامپوزیتهای مشبک ایزوگرید و آنیزوگرید تحت تاثیر بارهای فشاری مدلسازی و مورد بررسی قرار داد. کامپوزیت شبیهسازی شده توسط توتارو استوانه-ای شکل، بدون پوسته و دارای ساختار ششضلعی بود. مدل پیشنهادشده توسط توتارو، دقت بسیار زیادی را در مورد آنالیز کمانش المان محدود در طراحی اولیهی پوستههای مشبک فراهم میکند [۷]. هدایتیان و همکاران [۸]، پاسخ به ضربه کامپوزیت مشبک استوانهای را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سازههای مشبک وجود ریبهای مجزا، مانع از گسترش شکست از یک سلول به سلول مشابه می شود و پوسته در برخورد با اجسام ریز که در آن انرژی برخورد از حدی فراتر رود باعث ایجاد سوراخ می شود. همچنین نشان داده شد که اثر ریبها در سازههای مشبکی که تحت برخورد قرار می-گیرند را می توان در سه مورد افزایش سفتی موضعی سازه در نزدیکی ريبها، محدود كردن سطح شكست به يك سلول و كاهش تغيير شكل کلی سازه در نظر گرفت. نادری و همکاران [۹] تحقیقی در زمینه محاسبه بار کمانشی سازههای مشبک تحت اثر بار محوری انجام دادند. این محققان، با استفاده از رابطهی اویلری برای کمانش بحرانی یک تیر و هندسهی سازه، بار کمانشی اجزای نزدیک به انتهای بزرگ سازه پوستههای مشبک مخروطی را به دست آوردند. با استفاده از این بار کمانشی و با فرض کمانش متقارن، بارکمانش بحرانی یک سازه مشبک مخروطي تحت بار محوري، محاسبه شد. گيبسون [١٠] قابليت جذب انرژی در پنلهای مشبک ایزوگرید را در دو حالت بارگذاری از سمت ریب و پوسته تحت آزمون خمش سهنقطهای مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که جذب انرژی برای حالتی که بارگذاری از سمت ریب باشد در مقایسه با بارگذاری از سمت پوسته بیشتر است. این در حالی است که ظرفیت تحمل بار سازه در حالت بارگذاری از سمت پوسته بالاتر است.

یکی از جدیدترین روشهای بهبود خواص مختلف در کامپوزیتهای زمینه پلیمری استفاده از نانومواد است که باعث بهبود خواص سفتی، استحکام و جذب انرژی و غیره میشود. ایده استفاده از نانوذرات به

خصوص نانولولههای کربنی و نانوذرات رس براساس این حقیقت است که تشکیل یک فازمیانی با ضخامت قابل توجه به عنوان یک عامل توزیع انرژی در ساختارهای کامپوزیتی عمل میکند. عامل دیگری که باعث توزیع انرژی در ساختارهای کامپوزیتی میشود، وجود اصطکاک و لغزش ناحیه رهاشده یا لایه لایه شده بین صفحات نانوذرات و زمینه پلیمری است. به طور کلی میتوان در نظر گرفت که افزودن ذرات نانو به خصوص نانورسها در زمینه پلیمری توانایی جذب انرژی را تحت بارگذاریهای دینامیکی و استاتیکی بهبود میبخشد [11].

هلمی و هوا [۱۱]، رفتار خستگی کششی کامپوزیتهای زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه حاوی ذرات نانورس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که استحکام کششی استاتیکی و مدول کامپوزیت الیاف شیشه- اپوکسی با افزودن نانوذرات رس اندکی افزایش یافته است. حضور ذرات نانورس در زمینه استحکام نهایی را افزایش داده است، در حالیکه کرنش شکست را کاهش داده است. همچنین نشان داده شد که عمر خستگی کششی به طور خاصی با افزودن نانورس به کامپوزیت الیاف شیشه- اپوکسی افزایش یافته است به طوری که بیشترین اثربخشی حدود ۹۴ درصد میباشد. افزودن نانورس مانع رشد خسارت ناشی از خستگی به لحاظ شاخص خسارت و سرعت رشد ترک در تمام طول عمر خستگی به جزء در مرحله اولیه بارگذاری میشود.

سیواساراوان و همکاران [۱۲] بر روی خواص ضربه کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه حاوی نانوذرات رس مطالعه و تحقیق کردند. نتایج به دست آمده از آزمون ضربه نشان داد که افزودن نانورس به زمینه کامپوزیت باعث بهبود خواص میشود. بهترین اثربخشی در کامپوزیت حاوی ۵ درصد نانورس دیده شد که باعث افزایش ۱۰/۷۵ ژول بر متر انرژی ضربه در مقایسه با کامپوزیتهای حاوی مقادیر دیگر نانورس شده است. همچنین نشان داده شد که افزودن بیشتر از ۵ درصد ذرات نانورس در زمینه، باعث تردی کامپوزیت و مشکلتر شدن ساخت نمونهی کامپوزیتی میشود.

سینک و همکاران [۱۳]، خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی- الیاف تکجهته شیشه حاوی ذرات نانورس را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این محققان بهترین توزیع نانورس در کامپوزیتهای حاوی ۱ و ۳ درصد نانورس مشاهده شد. براساس گزارش این محققان، استحکامهای کششی و خمشی کامپوزیتهای حاوی ۳ و ۵ در مقایسه با نمونه بدون نانوذرات رس بهبود قابل ملاحظهای یافت. نتایج این تحقیق آگلومره شدن نانوذرات را در کامپوزیت حاوی ۵ درصد نانورس نشان داد. دیگر نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن نانورس خواص مقاومت به آب کامپوزیتها را نیز افزایش میدهد.

محققان دیگری نیز در ارتباط با افزودن ذرات نانورس به کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه مطالعهای را صورت دادند و نتایج کار آنها نشان داد که افزودن نانوذرات رس باعث بهبود خواص استحکامی، خزش، طول عمر خستگی و دیگر خواص کامپوزیتها می شود [۱۵،۱۴].

بر اساس بررسیهای انجام شده، در سالهای اخیر، مطالعات اندکی بر روی تاثیر افزودن نانوذرات سرامیکی بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای مشبک ثبت و گزارش شده است.

زمانی و همکاران[۱۶] تحقیقی در مورد تاثیر افزودن نانورس بر رفتار كمانشى پوستەھاى كامپوزيتى مشبك استوانەاى انجام دادند. نتايج اين تحقيق نشان داد كه با توجه به نوع طراحي هندسي نمونه-های 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 در پارامترهای بار کمانشی و جابجایی تا کمانش گزارش شده به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۳/۳۲ درصد نسبت به پوستههای مشبک کامپوزیتی بوده است. خسروی و همکارش [۱۷] تأثیر افزودن نانوذرات سیلیکای اصلاحشده سطحی بر رفتار مکانیکی پنلهای مشبک کامپوزیتی اپوکسی- الیاف شیشه تحت بار گذاری 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 سطحی شده 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 کاتولوگ این شرکت از اختلاط ۸۵ درصد وزنی رزین اپوکسی بیسفنول F و ۱۵ درصد هاردنر پلیآمینی HA-11 به دست میآید. از عوامل انتخاب این نوع رزین، داشتن خواص لزجت پایین (۱۴۵۰ 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-چهته شیشه با چگالی ۲/۵۸ g/cm³ و قطر متوسط فیلامنت سام ۱۲ و پارچه الیاف شیشه با بافت دوبعدی و چگالی ⁵mm کا د شرکت لاینتکس کشور چین به ترتیب به عنوان تقویت کننده در ریب-پارچه الیاف شیشه با بافت دوبعدی و محیالی تویت کننده در ریب-یارودران رس مونتموریلونیت (ML-⁺M) محصول شرکت آمریکایی نانوذرات رس مونتموریلونیت (Na-⁺M) محصول شرکت آمریکایی سیگما آلدریچ استفاده شد که در شکل ۱ تصویر ^۲میکروسکوپی الکترونی روبشی آن قابل مشاهده است. از عامل کوپلینگ سیلانی (-3

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 می شود. ساختار مولکولی آن C9H20O5SI و وزن مولکولی آن ۲۳۶/۴ g/mol



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^+ -MI به Na به $N \cdot n$ 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 $2^\circ \cdot A$ عملیات رفلاکس انجام شد. HP محلول با استفاده از اسید کلریدریک ۳۷ درصد در محدوده A^- 7 تنظیم شد. پس استفاده از اسید کلریدریک ۳۷ درصد در محدوده A^- 7 تنظیم شد. پس ماخته شده به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ تحت سرعت m مدن انجام فرآیند رفلاکس، به منظور جداسازی نانوذرات رس، مخلوط ماخته شده به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ تحت سرعت m مامل کوپلینگ اضافی سه مرتبه توسط اتانول شستشو داده شده و در ادامه به مدت ۲۲ ساعت در دمای $2^\circ \cdot A$ 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 می شود تا جدا کردن نمونههای قالب گیری شده توسط قالبهای سیلیکونی بسیار آسان باشد. به همین علت گزینهای مناسب برای ساخت قالب کامپوزیتهای مشبک می-باشد. سلیکونهای قالب گیری از دو جزء تشکیل شدهاند که با افزودن جزء دوم ترکیب حاصله در مجاورت هوا فعال گشته و باعث شکل گیری پلیمری انعطاف پذیر می شود. قالب طراحی شده در تحقیق حاضر دارای هندسه ایزو گرید متشکل از سلولهای مثلثی دارای ریبهای هلیکال و افتی بود. برای ساخت قالب در گام نخست، طرح اولیه با استفاده از 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

Sodium Montmorillonite

² Glycidoxypropyltrimethoxysilane

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 سطحی شده 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 رقیق کننده 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 فاینتک کره جنوبی با سرعت ۲۰۰۰ rpm و به مدت ۲۰ دقیقه همزده شد. در ادامه برای از بینبردن کلوخههای موجود و پخش هرچه بهتر نانوذرات رس در زمینه اپوکسی از دستگاه آلتراسونیک پروبی ساخت شرکت فاپن 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 لایه گذاری 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 ۳۴ 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 ۸/۱ 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

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 سەنقطەاى

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 دا بر روی دستگاه یونیورسال هانسفیلد با ظرفیت ۸2 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

mm 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 نمونه-ها از قسمت میانی مطابق شکل ۵ تحت بارگذاری شبه استاتیک و با سرعت بارگذاری mm/min ۵ قرار داده شدند. در حین بارگذاری، نمودار نیروی خمشی بر حسب جابه جایی به وسیله دستگاه رسم شد که از آن برای تحلیل خواص خمشی نمونه های مشبک کامپوزیتی

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 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 باری جذب انرژی بر جرم کلی سازه تقسیم شد تا مقادیر جذب انرژی ویژه ⁷ حاصل شود.

۲-8- آزمون FT-IR¹

به منظور تایید اصلاح سطحی انجامشده بر روی نانوذرات رس یا به عبارت دیگر به منظور بررسی تشکیل گروههای عاملی بر روی سطح نانوذرات و همچنین بررسی واکنشهای احتمالی انجامشده، از دستگاه طیفسنج FT-IR مدل جکسو 460-plus در محدوده ^۱-۴۰۰ -۴۰۰ با حساسیت ۴-۳۰ 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 CuKa و ولتاژ ۷۲ KV تحت جریان FO MA استفاده شد. مدل دستگاه مورد استفاده EQuniox 3000 ساخت شرکت Inel کشور فرانسه بود.

۲-۸- بررسی میکروسکوپی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصهیابی ذرات نانورس اصلاح سطحی شده

شكل ۶ نتايج آناليز FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحي نشده، عامل کوپلینگ سیلانی و نانوذرات رس اصلاح سطحیشده را نشان میدهد. منحنی FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحی-نشده دارای نقطه اوجی در عدد موج ۳۴۴۴ cm⁻¹ میباشد که به علت ارتعاشات کششی گروههای هیدروکسیل است، در حالیکه نقطه اوج مشاهدهشده در ۱۶۴۹ cm⁻¹ مربوط به ارتعاشات خمشی پیوند H-O-H است. نقطه اوج نمایان شده در ۳۶۳۶ cm⁻¹ به ارتعاشات کششی پیوند گروههای OH با اتمهای Al نسبت داده می شود [۲۱]. نقطه اوج قابل مشاهده در عدد موج ۱۰۵۸ cm⁻¹ به علت ارتعاشات کششی گروههای Si-O-Si و Si-O است [۲۲]. همچنین، نقطه اوجهای جذبی در اعداد موج ۵۲۶ و ^{۱۰} ۴۷۱ cm به ارتعاشات خمشی در گروههای Si-O-Si و Si-O-Al نسبت داده می شود [۲۳]. باند ظاهر شده در Si-O-Al به علت کشش متقارن Si-O-Si است. با توجه به شکل ۶ می توان دریافت که منحنی FT-IR مربوط به نانوذرات رس اصلاح سطحیشده علاوه بر نشان دادن نقطه اوجهای مرتبط با نانوذرات رس اصلاح سطحی نشده، همچنین نقطه اوجهای مرتبط با عامل کوپلینگ سیلانی GTPS- را نشان می دهد. این نقطه اوجها در باندهای ۲۹۲۶ و ۲۸۶۹ cm⁻¹ قابل مشاهده هستند که به ترتیب مربوط به کشش متقارن CH3 و کشش CH2 هستند. علاوه بر این دو نقطه اوج، نقطه اوج ضعیف دیگری در عدد موج ۲۵۴ cm⁻¹ قابل مشاهده است که ناشی از ارتعاش حلقه اپوكسيد است. ظاهر شدن اين نقطه اوجها، اصلاح سطحى نانوذرات رس را تایید میکند.



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

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 KV لا استفاده شد. لازم به ذکر است که برای بهبود رسانایی نمونهها، بر روی آنها پوششی از جنس طلا در محفظهای تحت خلاء اعمال شد.

^r Specific energy absorption (SEA)

^{*} Fourier transform infrared analysis

برای درک بهتر واکنشهای شیمیایی انجامشده بین عامل کوپلینگ GPTS-3 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 سیلان 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 می گیرد، واکنش میان گروههای عاملی اپوکسید موجود بر روی اسطح نانوذرات و زمینه اپوکسی در حضور هاردنر آمینی انجام می شود. انجام این واکنشها باعث ایجاد یک پیوند کووالانسی قوی بین نانوذرات رس و اپوکسی می شود که این پیوند کوالانسی باعث قویترشدن فصل-مشترک بین زمینه و نانوذرات می شود [۲۴].



شکل ۸ الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات رس قبل و بعد از عملیات اصلاح سطحی را نشان میدهد. الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات اصلاح سطحینشده بیشینه زاویه پراش را در ۵/۸۳ = θ ۲ نشان میدهد که در این حالت اندازه فاصله بین صفحات (۰۰۱) برابر A ' ۱۵/۲ (محاسبه شده براساس قانون براگ) است [۲۵]. از طرف دیگر، زاویه پراش برای نانوذرات رس اصلاح سطحیشده ۲۸/۱ = θ ۲ را نشان میدهد که در این حالت فاصله بین صفحات (۰۰۱) A ' ۲۳/۳ محاسبه شد. بنابراین عامل کوپلینگ سیلانی باعث آن شده است که نقطه اوج پراش مورد نظر به سمت زاویههای پایین تر انتقال یابد که در حقیقت باعث افزایش فاصله بین صفحات شده است [۲۶].

۲-۳- 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 دارد، به طوری که بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از نیروی حداکثر قابل که بخش قابل توجهی از جذب انرژی پس از نیروی حداکثر قابل مشاهده است.



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 دقیق تر 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.



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 ۱۱الف). در ادامه بارگذاری، شکست کامل ریب افقی و همچنین جدایش ریبهای کناری را شاهد هستیم (شکل ۱۱ب). 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 تقویت کنندگی نانوذرات رس در زمینه کامپوزیت است. در کامپوزیتهای مشبک الیافی بخش عمده بار اعمالی بر روی الیاف تقویت کننده 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 نانوذرات بخش بیشتری از بار اعمالی توسط زمینه تحمل میشود. عامل میشوند، لغزش اصطکاکی^۵ بین فاز زمینه و الیاف محدود شده و در نتیجه انتقال بار اعمالی به الیاف توسط زمینه به صورت موثرتری صورت می گیرد [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،

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 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 مشاهدهشده 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 سطحیشده با زنجیرههای پلیمری و ممانعت از لغزش آنها دانست [11].

^a Frictional slippage



۳-۳- بررسی میکروسکوپی

شکل ۱۴ تصاویر FESEM از مورفولوژی سطح شکست ریب افقی پنل-های کامپوزتی 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 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. همان طور 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 درشکل 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.



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 ار تباط با نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۵ درصد نانوذرات

۲) بررسی انجامشده 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. حامد خسروى و رضا اسلامى فارسان

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, Exprimental Mechanics, Vol. 44, No. 2, pp. 185-194, 2004.

[20] Gates H. P., Infrared spectroscopy and the chemistry of dioctahedral smectites, T. Kloprogge (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, Appllied 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 تقویت کننده 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] Ebrahimnezhad-Khaljiri H., Eslami-Farsani R., Khorsand 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 Mechanial 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