



مطالعه تاثیر نانو خاک رس بر عمر خستگی فنر هوایی

محمد باقری^۱، سیامک اسماعیلزاده خادم^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، khadem@modares.ac.ir

چکیده- در این تحقیق، اثر نانو خاک رس بر عمر خستگی فنر هوایی برای بهبود عمر آنها بررسی می‌شود. آمیزه‌های لاستیکی بر پایه NR/BR بدون نانو خاک رس و نیز با ۳، ۵ و ۷ درصد نانو خاک رس به روش اختلاط خمیری ساخته شدند. سپس بر روی نمونه‌های حاوی نانو خاک رس به منظور تعیین ساختار نانوکامپوزیت آزمون تفرق اشعه ایکس انجام شد. در ادامه با انجام آزمون رئومتری بر روی آمیزه‌های خام، زمان پخت هر آمیزه تعیین شد و آمیزه‌های نهایی به روش پخت گوگردی به دست آمدند. پس از آن نمونه‌های استاندارد برای انجام آزمون‌های خواص کششی، گرمایی، مقاومت پارگی و مقاومت خستگی تهیه گردیدند. نتایج حاصل نشان دادند که افزایش درصد وزنی نانو خاک رس، باعث افزایش ضریب ارتجاعی، استحکام پارگی و گرمایی و نیز کاهش استحکام کششی و کشش در نقطه پارگی می‌شود. همچنین، عمر خستگی آمیزه حاوی ۳ درصد نانو خاک رس به میزان ۳۳ درصد و آمیزه حاوی ۵ درصد نانو خاک رس به میزان ۵۷ درصد نسبت به آمیزه فاقد نانو خاک رس افزایش یافته، در حالی که عمر خستگی آمیزه حاوی ۷ درصد نانو خاک رس به میزان ۱۴ درصد کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: فنر هوایی، نانو کامپوزیت، نانو خاک رس، عمر خستگی

Experimental study of the effect of nanoclay on fatigue life of air spring

M. Bagheri¹, S. Smaeilzadeh Khadem^{2*}

1- MSc. Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

2- Prof. Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

*P.O.B. 14115-143 Tehran, khadem@modaress.ac.ir

Abstract- The objective of this work was to investigate the effect of nanoclay on fatigue life of air spring. The studies on the air spring fatigue life have shown that the inner layer of the rubber composite bellows of the air spring plays the most important role on its fatigue life. So, as a new idea to improve the life of the air spring, in this research, NR/BR and 0, 3, 5, 7 % of nanoclay were separately melt-blended. X-ray diffraction was employed to characterize the nanocomposite morphology. Then, the curing time of the unvulcanized compound was defined by rheometer test and the final nanocomposites compounds were provided according to their curing characteristics. After that, tensile, heat built-up, tear and fatigue tests were performed on the standard test specimens. It was shown that by increasing the nanoclay percentage, the elasticity modulus, tear strength and heat built-up were increased whereas tensile strength and elongation at break point were decreased. The results also showed that by the addition of 3 % and 5 % of nanoclay to NR/BR, its fatigue life was increased about 33 % and 57 %, respectively, whereas the fatigue life of the compound containing 7 % nanoclay was decreased about 14 %.

Keywords: Air Spring, Nanocomposite, Nanoclay, Fatigue Life

۱- مقدمه

استفاده از تقویت‌کننده‌های نانومتری خاک رس روش نوینی است که بدون تحمل هزینه‌های گزاف باعث بهبود در خواص و کارایی ماتریس‌های پلیمری می‌شود. اخیراً، افزایش دوام محصولات بر پایه لاستیک در برابر شرایط محیطی و نیز شرایط کاری مورد توجه بسیار قرار گرفته است.

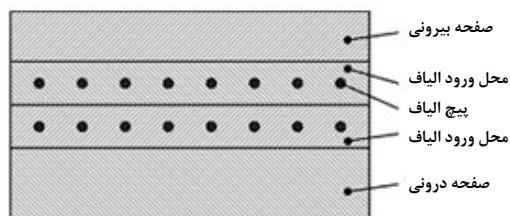
نانوکامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس موادی پلیمری بوده که با استفاده از ذرات نانو خاک رس، که حداقل یکی از ابعاد آنها کمتر از ۱۰۰ نانومتر است، تقویت شده‌اند. نانو خاک رس صفحاتی با ضخامت ۱ نانومتر و عرضی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر می‌باشد. کارایی صفحات نانو خاک رس به نحوه توزیع آنها در زمینه پلیمری بستگی دارد و اگر نانوکامپوزیت به ساختار کاملاً پخش شده نزدیک‌تر شود، خواص عملکردی آن بهبود بیشتری خواهد یافت.

در چند دهه اخیر، نانوکامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس به دلیل دارا بودن خواص بهبودیافته به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نانوکامپوزیت‌ها دارای خواص منحصر به فردی در مقایسه با پلیمرهای معمولی می‌باشند [۱]. به عنوان مثال، افزودن کسر کوچکی از نانو خاک رس، در حدود ۳ تا ۵ درصد وزنی، بسیاری از خواص همچون مدول الاستیسیته، پایداری حرارتی، مقاومت سایشی و غیره را به میزان قابل توجهی افزایش داده و نیز موجب کاهش ضریب انبساط حرارتی و عبورپذیری گازها می‌شود، در حالی که چگالی، شکنندگی و شفافیت تغییر چندانی نمی‌یابد [۲]. مطالعه اثر نانو خاک رس بر قابلیت عایق‌سازی ارتعاشی نشان‌دهنده سودمند بودن این مواد برای ساخت نسل جدیدی از عایق‌سازهای ارتعاشی می‌باشد [۳]. اکثر قطعات لاستیکی، به عنوان مثال تایرها، کفش‌ها و غیره، تحت تغییر شکل‌ها و بارهای تناوبی قرار می‌گیرند. ترک‌هایی در نقاط تمرکز تنش در این قطعات بوجود می‌آید که می‌توانند منجر به شکست آنها شوند. مطالعه اثر نانو خاک رس در عمر خستگی خمشی نانوکامپوزیت‌ها در برخی پژوهش‌ها نشان‌دهنده افزایش قابل توجه عمر خستگی خمشی آن‌ها می‌باشد [۴].

فنرهای هوایی دسته‌ای از عایق‌سازهای ارتعاشی می‌باشند که به دلیل کاربرد فراوان در صنایع مختلف مورد توجه بسیار واقع شده‌اند. این دسته از عایق‌سازهای ارتعاشی دارای بالشتکی از جنس لاستیک می‌باشند. بالشتک فنر هوایی حساس‌ترین

قسمت فنر هوایی محسوب می‌شود، چرا که عمر خستگی فنر هوایی اغلب وابسته به عمر خستگی بالشتک آن است. بالشتک فنر هوایی در واقع یک ماده کامپوزیتی می‌باشد که از یک لایه درونی لاستیکی به منظور آب‌بندی محفظه هوا، دو یا چند لایه الیاف تقویت‌کننده که با توجه به کاربرد فنر هوایی جنس‌های متفاوتی از قبیل رشته‌های فولادی و الیاف نایلونی دارند و یک لایه خارجی لاستیکی به منظور محافظت سطح بالشتک در برابر شرایط محیطی مختلف، تشکیل شده است (شکل ۱).

الیاف تقویت‌کننده دارای مدول الاستیسیته به مراتب بیشتر از صفحات لاستیکی می‌باشند که سبب جلوگیری از تغییر شکل‌های بزرگ لاستیک تحت فشار هوای درونی می‌شوند و فرض می‌شود که عمده بار اعمالی به فنر هوایی توسط الیاف تقویت‌کننده تحمل می‌شود [۵، ۶]. از نتایج تست‌های خستگی بر روی فنر هوایی، مشاهده شده است که شکست‌های ناشی از خستگی اغلب از لایه لاستیکی درونی بالشتک (که مانع از خروج هوا و افت فشار شده) شروع می‌شوند [۵]. در این تحقیق اثر مونت موریلونیت اصلاح شده^۱ بر روی فرآیند پخت و خواص فیزیکی-مکانیکی و نیز عمر خستگی کششی آمیزه لاستیکی لایه درونی بالشتک فنر هوایی، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱ شماتیکی از لایه‌های تشکیل‌دهنده بالشتک کامپوزیتی فنر هوایی [۵]

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- مواد

در این تحقیق، از لاستیک طبیعی استاندارد مالزی، لاستیک بوتادین کره جنوبی، خاک رس مونت موریلونیت اصلاح‌شده توسط دی‌متیل دی‌هیدروژنیتد تالو^۲ استفاده شد. نرم‌کننده‌های

1. Org-MMT (Cloisite 15A), Southern Clay Product

2. Dimethyl dehydrogenated tallow

در ادامه، آمیزه بدون نانو خاک رس را با کد F_1 و آمیزه‌های شامل ۳ درصد، ۵ درصد و ۷ درصد نانو خاک رس را به ترتیب با کدهای F_2 ، F_3 ، F_4 نشان خواهیم داد.

۲-۳- آزمون تفرق اشعه ایکس^۲

بررسی تشکیل نانوکامپوزیت و شکل‌شناسی حاصل با استفاده از دستگاه تفرق اشعه ایکس^۳ با طول موج $1/54$ آنگستروم و الکترونی از جنس مس در زوایای ۱ تا ۱۱ درجه انجام شده است.

۲-۴- آزمون رئومتر

برای شبکه‌ای کردن آمیزه لاستیکی لازم است که ابتدا دمای پخت تعیین شود و از روی منحنی پخت، زمان لازم برای شبکه‌ای کردن آمیزه‌ها به دست می‌آید. این کار با استفاده از دستگاه رئومتر، که متصل به رایانه است، صورت می‌گیرد. با توجه به سامانه پخت به کار رفته دمای 140°C برای پخت یا شبکه‌ای کردن آمیزه در نظر گرفته شد. با رسیدن دستگاه به این دما، نمونه را داخل دستگاه قرار داده، منحنی گشتاور بر حسب زمان توسط دستگاه به کمک نرم‌افزار رسم می‌شود. زمان پخت در واقع زمان رسیدن گشتاور به ۹۰ درصد مقدار نهایی خواهد بود.

۲-۵- آزمون خواص کششی

قدرت کششی عبارت است از نیرویی که در لحظه پارگی بر واحد سطح مقطع اولیه نمونه وارد می‌شود. ضریب ارتجاعی یا تنش کششی عبارت است از نیرویی که برای کشش نمونه تا یک درصد کشش مشخص بر واحد سطح مقطع اولیه نمونه وارد می‌شود. ازدیاد طول نهایی یا ازدیاد طول در نقطه پارگی عبارت است از افزایش طول اندازه مشخصی از نمونه بوسیله نیرویی که در لحظه پارگی اعمال می‌شود. دستگاه کششی مورد استفاده در این تحقیق مدل اینسترون^۴ بوده است (شکل ۳). آزمون مطابق با استاندارد ASTM D412 در سرعت کشش ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. با استفاده از قالب و پانچ سه نمونه دمبلی در جهت محور طولی نمونه بریده شده و نتایج آزمون کشش برای هر آمیزه به صورت میانگین مشاهدات حاصل از این سه نمونه گزارش گردیده است.

مورد استفاده شامل روغن اسپیندل و رزین کومارون بوده و برای شبکه‌ای کردن آمیزه‌ها از سامانه پخت گوگردی و شتاب‌دهنده TBBS استفاده شده است.

۲-۲- روش تهیه نمونه‌ها

برای مخلوط کردن NR و BR با نانو خاک رس از دستگاه مخلوط‌کننده داخلی^۱ استفاده شده است (شکل ۲). دستگاه متصل به رایانه بوده، با استفاده از نرم‌افزار، منحنی گشتاور بر حسب زمان روی صفحه رایانه رسم می‌شود. افزودن تقویت‌کننده نانو پس از ۸ دقیقه که گشتاور به تعادل رسید، انجام گرفت. در این مرحله آمیزه‌سازی با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه انجام گردید. به منظور افزایش کارایی اختلاط باید دمای فرآیند اختلاط پلیمر با خاک رس بالاتر از دمای ذوب پلیمر و پایین‌تر از دمای تخریب آن باشد، که با توجه به کار سایر محققان این دما برای لاستیک طبیعی برابر با 130°C در نظر گرفته شد [۷].

در ادامه افزودنی‌های لاستیک در دو مرحله جداگانه به محصول مرحله قبلی، توسط مخلوط‌کن دوغلتکی، افزوده شدند. به این ترتیب که در ابتدا پایدارکننده‌ها، روغن‌ها و پرکننده‌ها در دمای 50°C به ماتریس نانوکامپوزیتی افزوده و پس از خنک شدن کامل آمیزه و رسیدن آن به دمای محیط و حذف حافظه ناشی از فرآیند، مخلوط سامانه پخت و شتاب‌دهنده‌ها در دمای محیط به آمیزه افزوده شدند. شبکه‌ای کردن آمیزه‌ها با استفاده از دستگاه پرس گرم در دمای 140°C به روش قالبگیری فشاری انجام شده است. هر نمونه با توجه به زمان به دست آمده از منحنی پخت دستگاه رئومتر تحت فشار ۹۰ bar، شبکه‌ای شده است.



شکل ۲ نمایشی از دستگاه مخلوط‌کننده داخلی [۶]

1. Brabender weht

2. XRD

3. X'pert-Philips WAXS, Philips

4. Instron

سپس افزایش دمای نمونه در طول مدت آزمایش ثبت می‌شود. دمای انتهای آزمایش (پس از ۳۰ دقیقه) به عنوان معیاری از گرمایابی نمونه می‌باشد. با استفاده از قالب مخصوص برای هر آمیزه سه نمونه تهیه شده و نتایج آزمون برای هر آمیزه به صورت میانگین مشاهدات حاصل از این سه نمونه گزارش گردیده است.

۲-۷- آزمون مقاومت پارگی

هدف از انجام این آزمون تعیین مقاومت پارگی لاستیک‌های ولکانیزه شده می‌باشد. اغلب لاستیک‌ها در حین سرویس‌دهی به دلیل تولید و رشد نمونه خاصی از شکست، که به آن پارگی می‌گویند، از بین می‌روند. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت پارگی دستگاه کشش می‌باشد که سرعت جدایش دو فک از یکدیگر بایستی ۵۰۰ میلی‌متر در دقیقه باشد. با استفاده از دای و پانچ سه نمونه دمبلی مطابق با استاندارد ASTM D624 تهیه گردیده و نتایج آزمون برای هر آمیزه به صورت میانگین مشاهدات حاصل از این سه نمونه گزارش شده است.

۲-۸- آزمون مقاومت خستگی

هنگامی که لاستیک برای مدت طولانی در معرض تغییرات تنش‌های مکانیکی، برای مثال خم‌شدن‌ها یا کشش‌های متوالی، قرار می‌گیرد، ترک‌هایی به آهستگی در سطح آن گسترش پیدا می‌کنند و تا هنگامی که منجر به شکست (پارگی) کامل محصول شوند، رشد خواهند کرد. این ترک‌ها عمود بر جهت تنش‌های وارد شده رشد می‌کنند. با استفاده از دای و پانچ سه نمونه دمبلی مطابق با استاندارد ASTM D4482 تهیه شده و نتایج آزمون برای هر آمیزه به صورت میانگین مشاهدات حاصل از سه نمونه گزارش گردیده است (شکل ۵).



شکل ۵ نمای از دستگاه تست خستگی [۶]



شکل ۳ نمای از دستگاه کشش [۶]

۲-۶- آزمون گرمایابی

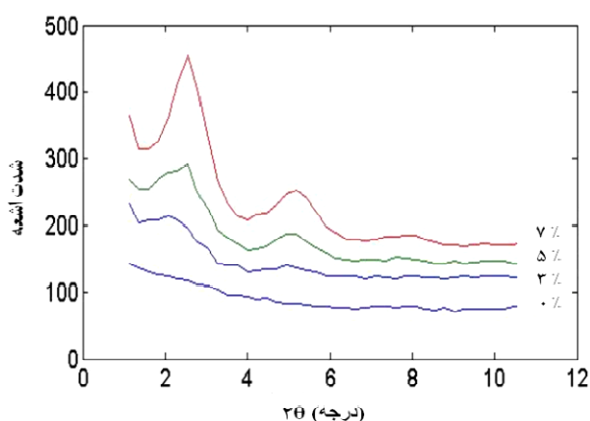
دستگاه گودریچ فلکسومتر^۱ مطابق با استاندارد ASTM D623 برای اندازه‌گیری مقدار گرمایی که در اثر نوسانات فشاری در لاستیک به وجود می‌آید، به کار رفته است (شکل ۴). نمونه مورد نظر در این آزمایش به صورت استوانه‌ای توپر به ارتفاع ۱ اینچ و قطر ۰/۷ اینچ بوده و در قالب‌های مخصوص پخت شده است.

نمونه‌های گرمایابی بین فک پایین دستگاه (که به یک اهرم با اینرسی بالا متصل است) و فک بالایی گذاشته می‌شود. با حرکت دستگاه، فک بالایی حرکت رفت و برگشتی با سرعت ۱۸۰۰ بار در دقیقه را آغاز می‌کند که در نتیجه اعمال فشار به روی نمونه مورد آزمایش به طور متناوب انجام می‌شود. قابل ذکر است که هر نمونه به مدت ۳۰ دقیقه قبل از آزمایش شدن برای رسیدن به دمای محفظه، در داخل محفظه قرار گرفته و مدت ۳۰ دقیقه نیز تحت نوسانات مداوم می‌باشد.

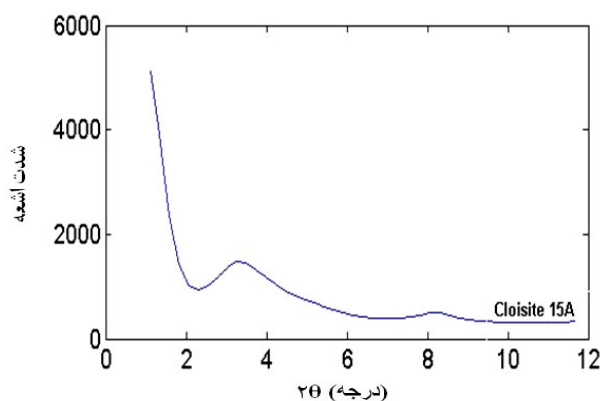


شکل ۴ نمای از دستگاه تست گرمایابی [۶]

1. Goodrich flexometer



شکل ۶ نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس برای آمیزه‌های F_1 , F_2 , F_3



شکل ۷ نتیجه آزمون تفرق اشعه ایکس برای نانو خاک رس استفاده شده

۳-۲- نتایج آزمون رئومتر

زمان پخت بهینه به دست آمده از آزمون رئومتری در جدول ۲ نشان داده شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود صفحات سیلیکاتی مانعی صلب در برابر تشکیل پیوندهای عرضی محسوب می‌شود. با توجه به این موضوع، با افزایش خاک رس، میزان اتصالات عرضی کاهش می‌یابد، در نتیجه زمان پخت نیز کاهش خواهد یافت. از طرفی کاهش زمان برشتگی آمیزه با افزایش میزان خاک رس نمی‌تواند به دلیل ممانعت صفحات خاک رس از تشکیل پیوند عرضی باشد، زیرا در این مرحله پیوندی تشکیل نمی‌شود. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش زمان پخت به طور همزمان از دو اسلوب شتاب‌دهندگی اصلاح‌کننده و کاهش میزان پیوندهای عرضی با افزایش خاک رس تبعیت می‌کند [۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس

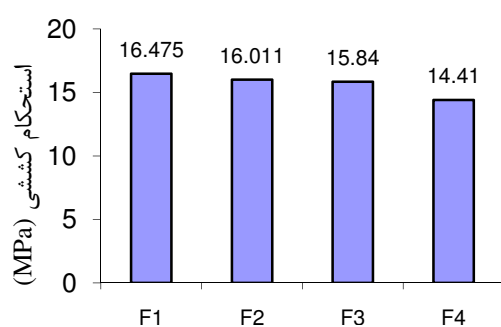
آزمون تفرق اشعه ایکس یک روش مؤثر برای اندازه‌گیری فاصله اولیه لایه‌های مونت موریولونیت اصلاح شده و همچنین تشخیص مورفولوژی بین لایه‌ای در نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. در نانوکامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس، که به روش مذاب تهیه می‌گردند، بخشی از ذرات خاک رس به صورت بین لایه‌ای در نانوکامپوزیت توزیع می‌گردند که در این حالت، زنجیرهای پلیمری در فضای بین لایه‌های خاک رس نفوذ کرده و باعث افزایش فاصله بین لایه‌های مونت موریولونیت اصلاح شده می‌گردند. این ساختار یک ساختار منظم است که از قرارگیری متناوب زنجیرهای پلیمری و صفحات سیلیکاتی با یک فاصله تناوب در حد چند نانومتر تشکیل می‌شود. اما قسمتی از ذرات خاک رس، ساختار ورقه‌ای را در نانو کامپوزیت پلیمری ایجاد می‌کنند. در این حالت صفحات مونت موریولونیت اصلاح شده به صورت یکنواخت در ماتریس پلیمری توزیع می‌گردند. هر چه سهم ذرات ورقه‌ای شده در نانوکامپوزیت پلیمری بیشتر باشد، در بسیاری از موارد خواص فیزیکی-مکانیکی نانوکامپوزیت افزایش چشمگیری خواهد یافت. در واقع بهبود خواصی که ساختار ورقه‌ای در نانو کامپوزیت ایجاد می‌کند به مراتب بیشتر از ساختار بین لایه‌ای است که این خود از بر هم کنش بهتر شبکه ماتریسی پلیمر و خاک رس در ساختار ورقه‌ای ناشی می‌شود. در نمودار تفرق اشعه ایکس ظهور قله‌هایی با زوایای کوچک‌تر (فاصله بین لایه‌ای بیشتر از فاصله اولیه لایه‌های خاک رس)، نشان‌دهنده ساختار بین لایه‌ای است [۸]. شایان ذکر است، شدت پراکنش پرتوی ایکس اطلاعات دقیقی از رفتار نمونه به دست نمی‌دهد، زیرا شدیداً به مقدار نمونه مورد آزمون بستگی دارد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده می‌باشند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر مربوط به زوایا و فواصل بین لایه‌ای

مشخصات نمونه	زاویه مشاهده اولین فاصله بین لایه‌ای	شکل‌شناسی
قله از چپ (درجه)	مربوط (آنگستروم)	
خاک رس اصلاح شده	۳/۳۵۸	۳۰/۵۲۱
F_1	۲/۰۷۴	۴۹/۴۱۱
F_2	۲/۴۸۰	۴۱/۳۲۶
F_3	۲/۵۸۵	۳۹/۶۶۰

۳-۳-۳- نتایج استحکام کششی

مشاهده می‌شود که با افزایش درصد خاک رس استحکام کششی کاهش می‌یابد (شکل ۱۰). به این مفهوم که در منحنی تنش-کرنش، که با توجه به سرعت انجام آزمون از مرحله خطی خارج نمی‌شود، همان‌گونه که با افزودن خاک رس، شکست در درصد ازدیاد طول کمتری رخ می‌دهد، این نقطه متناظر با تنش کمتری هم خواهد بود، مگر آن که افزایش مدول ناشی از افزودن خاک رس بر کاهش درصد ازدیاد طول غلبه داشته باشد که در این صورت، استحکام نمونه‌های نانوکامپوزیتی بیش از نمونه فاقد خاک رس خواهد بود. در نمونه‌های این آزمون میزان کاهش درصد ازدیاد طول بیش از میزان افزایش مدول بوده است. بنابراین استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی کمتر از نمونه فاقد خاک رس است.

شکل ۱۰ استحکام کششی آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4

۳-۴- نتایج آزمون گرمایی

اهمیت گرمایی در لاستیک بدان جهت است که تولید گرما در لایه‌های لاستیک و تجمع گرما در این لایه‌ها عاملی برای ساییده شدن آمیزه‌های لاستیکی محسوب می‌شود. پدیده گرمایی در لاستیک شامل دو مرحله می‌باشد: الف) تولید گرما در لایه‌های لاستیک که وابسته به خواص ویسکوالاستیک آمیزه لاستیکی می‌باشد. ب) تجمع گرما در لایه‌ها که با ضریب هدایت حرارتی آمیزه‌ها ارتباط مستقیم دارد.

برای بیان ارتباط بین خواص ویسکوالاستیک آمیزه‌های لاستیکی و گرمایی، باید گفت که اتلاف انرژی مکانیکی در زنجیرهای لاستیکی در طول زمان اعمال بار دینامیکی، در اثر اصطکاک ملکولی، باعث تولید گرما و افزایش حرارت‌زایی می‌گردد؛ بنابراین بین افزایش ترم اتلاف مکانیکی و افزایش

جدول ۲ نتایج آزمون رئومتری

کد آمیزه	F_1	F_2	F_3	F_4
زمان پخت بهینه (min)	۱۰/۷	۷/۶	۷/۴	۷/۳

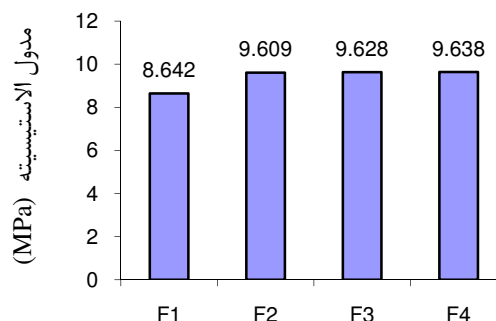
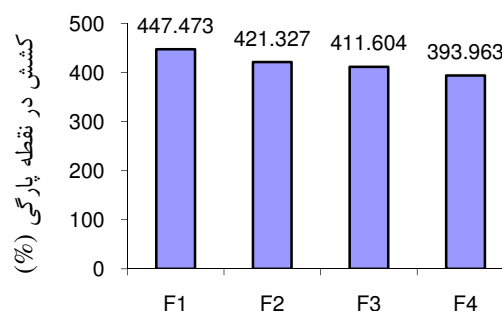
۳-۳-۳- نتایج آزمون خواص کششی

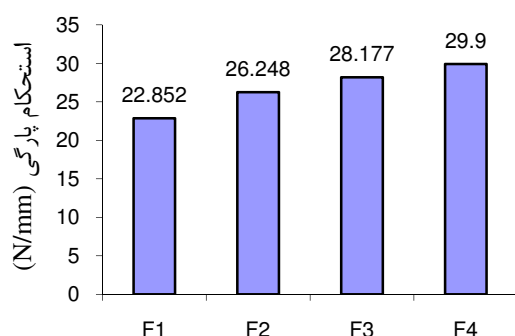
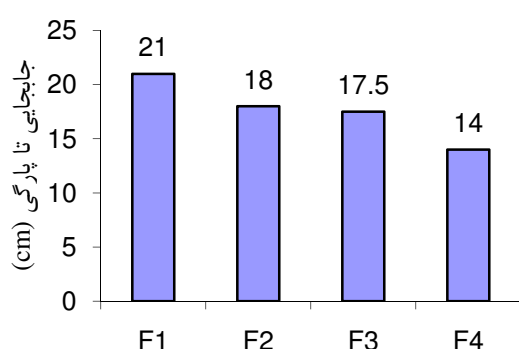
۳-۳-۱- نتایج ضریب ارتجاعی

مشاهده می‌شود، با افزایش میزان خاک رس در ماتریس الاستومری، مدول الاستیک افزایش می‌یابد، یعنی حضور لایه‌های سیلیکاتی در ماتریس پلیمری، نیروی لازم برای تغییر شکل و افزایش طول زنجیره‌های پلیمری را افزایش می‌دهد (شکل ۸).

۳-۳-۲- نتایج کشش در نقطه پارگی

ازدیاد طول در نقطه پارگی با افزایش میزان خاک رس در ماتریس پلیمری کاهش یافته است که می‌تواند به این دلیل باشد که ذرات خاک رس، مانند تمام فازهای تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، در هنگام اعمال تنش از تحرک زنجیره جلوگیری کرده، موجب تسریع پارگی خواهد شد (شکل ۹).

شکل ۸ مدول الاستیسیته آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4 شکل ۹ کشش در نقطه پارگی آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4

شکل ۱۲ استحکام پارگی آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4 شکل ۱۳ میزان جابه‌جایی تا پارگی در آزمون پارگی آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4

۳-۶- نتایج آزمون خستگی

هنگامی که اجزای یک آمیزه لاستیکی پر شده تحت اعمال بار دینامیکی قرار می‌گیرند، ماتریس لاستیکی در اطراف پرکننده بیشتر از نقاط دیگر ماتریس کشیده می‌شود. در صورت بکارگیری نیروی تکرارپذیر، سطح مشترک بین پرکننده و ماتریس لاستیکی بیشتر تخریب می‌گردد. بنابراین بر هم کنش بین پرکننده و ماتریس لاستیکی و نحوه توزیع پرکننده در شکل‌گیری ترک‌ها مؤثر می‌باشد. عواملی که باعث افزایش مقاومت خستگی آمیزه‌های لاستیکی می‌گردند عبارت‌اند از:

الف) افزایش انرژی پارگی آمیزه‌های لاستیکی باعث کاهش سرعت رشد ترک در این آمیزه شده و با افزایش مقاومت در برابر رشد ترک، مقاومت خستگی آمیزه‌های لاستیکی افزایش می‌یابد.

ب) ترکیبات لاستیکی دارای خواص ویسکوالاستیک هستند، بنابراین در حین چرخه کشش و بازگشت به حالت اولیه مقداری انرژی تلف می‌گردد که به این انرژی هدررفته

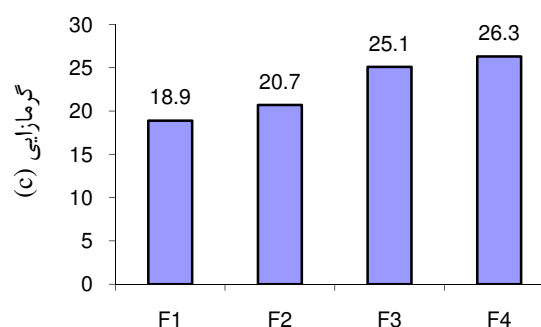
گرمزایی لاستیک ارتباط مستقیم وجود دارد. از طرفی ترم اتلاف مکانیکی با الاستیسیته زنجیرهای لاستیکی نسبت عکس دارد. هر قدر حالت کشسانی آمیزه لاستیکی بیشتر باشد، مقدار کمتری از انرژی وارد آمده برای تغییر شکل آن به صورت حرارت تلف می‌شود و در نتیجه گرمزایی کمتری خواهیم داشت [۴]. در آمیزه‌های F_1 تا F_4 با افزایش مقدار مونت موریونولیت اصلاح شده، گرمزایی افزایش می‌یابد که با توجه به دلایل زیر قابل توجیه است (شکل ۱۱).

الف) با افزایش مقدار مونت موریونولیت اصلاح شده، الاستیسیته زنجیرهای لاستیکی کاهش می‌یابد که در نتیجه ترم اتلاف مکانیکی و گرمزایی افزایش پیدا می‌کند.

ب) مونت موریونولیت اصلاح شده یک پرکننده معدنی است که شامل سیلیکات‌های آب‌دار متشکل از SiO_2 ، Al_2O_3 است که این ترکیبات ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. همچنین صفحات مونت موریونولیت اصلاح شده در مقایسه با ذرات کروی دوده کربن سطح ویژه به مراتب بزرگ‌تری دارند در نتیجه این صفحات، با ایجاد سدهای حرارتی در مقابل انتقال گرما، باعث افزایش مقاومت حرارتی شده که نتیجه آن کاهش هدایت حرارتی و تجمع گرما در آمیزه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مونت موریونولیت اصلاح شده گرمزایی افزایش می‌یابد که با توجه به دلایل گفته شده قابل توجیه است.

۳-۵- نتایج آزمون پارگی

نتایج آزمون پارگی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان نانو خاک رس استحکام پارگی افزایش می‌یابد و جابه‌جایی تا پارگی کاهش می‌یابد.

شکل ۱۱ گرمزایی آمیزه‌های F_1 ، F_2 ، F_3 و F_4

خاک رس آزمون‌های تفرق اشعه ایکس، خواص کششی، گرمایی، مقاومت پارگی و مقاومت خستگی کششی انجام شدند. نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس بیان‌کننده تشکیل نانوکامپوزیت‌هایی با شکل‌شناسی بین لایه بودند. نتایج آزمون رئومتر نشان دادند که با افزایش درصد نانو خاک رس، به علت کاهش میزان اتصالات عرضی ناشی از حضور صفحات سیلیکاتی در شبکه پلیمر، زمان پخت بهینه کاهش می‌یابد. نتایج آزمون خواص کششی نشان دادند که با افزایش درصد نانو خاک رس، مدول الاستیسیته افزایش، کشش در نقطه پارگی و استحکام کششی کاهش می‌یابند. نتایج آزمون گرمایی، که به عنوان آزمون‌های کمکی برای توجیه نتایج آزمون خستگی انجام شده بودند، نشان دادند که با افزایش درصد نانو خاک رس، گرمایی و استحکام پارگی افزایش و جابه‌جایی تا پارگی کاهش می‌یابد. نتایج آزمون خستگی کششی نشان دادند که عمر خستگی آمیزه حاوی ۳ درصد نانو خاک رس به میزان ۳۳ درصد و آمیزه حاوی ۵ درصد نانو خاک رس به میزان ۵۷ درصد نسبت به آمیزه فاقد نانو خاک رس افزایش یافته، در حالی که عمر خستگی آمیزه حاوی ۷ درصد نانو خاک رس به میزان ۱۴ درصد کاهش یافته است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه نانو خاک رس به میزان ۵ درصد در آمیزه لاستیکی انتظار ما را در نیل به هدف این پژوهش برآورده کرده است، چرا که با افزایش عمر خستگی آمیزه لاستیکی درونی بالشتک فنر هوایی، عمر خستگی بالشتک و در نتیجه عمر خستگی فنر هوایی بدون متحمل‌شدن هزینه‌ای غیر قابل توجه از لحاظ صنعتی افزایش خواهد یافت.

۵- مراجع

- [1] Ray S. S., Okamoto M., "Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: a Review from preparation to Processing", *Prog. Polym. Sci.*, Vol. 28, 2003, pp. 1539-1641.
- [2] Luo J., Daniel I. M., "Characterization and Modeling of Mechanical Behavior of Polymer/Clay Nanocomposites", *Composite Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 1607-1616.
- [3] Khanlari S., Ashkezari G. H. D., Kokabi M., Razzaghi M., "Fiber-Reinforced Nanocomposite Seismic Isolators: Design and Manufacturing", *Polymer Composites*, Vol. 31, 2010, pp. 299-306.
- [4] Wu, Y. P., Zhao W., Zhang L. Q., "Improvement of Flex-Fatigue Life of Carbon Black-Filled

اتلاف پسماند گفته می‌شود. اتلاف انرژی سبب می‌شود کسری از انرژی، که برای رشد ترک‌ها مورد نیاز است، هدر رود. بدین ترتیب ترک‌های بوجود آمده در آمیزه لاستیکی انرژی کمتری دریافت کرده و در نتیجه سرعت رشد ترک‌ها کاهش می‌یابد. از این رو افزایش انرژی پسماند موجب افزایش مقاومت خستگی می‌گردد. از مفهوم اتلاف پسماند می‌توان به خوبی دریافت که بین اتلاف پسماند در آمیزه‌های لاستیکی و ترم اتلاف مکانیکی و گرمایی ارتباط مستقیم وجود دارد. به عبارت دیگر، با کاهش قابلیت ارتجاعی زنجیرهای لاستیکی، ترم اتلاف مکانیکی و گرمایی افزایش می‌یابد که به افزایش اتلاف پسماند منتهی می‌شود [۴].

نتایج آزمون مقاومت خستگی آمیزه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. تعداد سیکل‌های کامل پارگی در آمیزه‌ها با افزایش مقدار نانو خاک رس اصلاح شده تا میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد که با توجه به افزایش استحکام پارگی آمیزه‌ها قابل توجه است و سپس به ازای میزان ۷ درصد نانو خاک رس، به رغم بالاتر بودن، استحکام پارگی کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند میزان بارگذاری کششی آزمون خستگی و توزیع نامناسب نانو خاک رس در ماتریس باشد. نتایج به‌دست آمده از آزمون گرمایی نشان می‌دهد که در این آمیزه‌ها با افزایش مقدار مونت مورویلونیت اصلاح شده ترم اتلاف مکانیکی و گرمایی افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش اتلاف پسماند در این آمیزه‌هاست. با افزایش اتلاف پسماند، مقاومت خستگی آمیزه‌های F_2 و F_3 افزایش می‌یابد، ولی همان‌طور که بیان شد مقاومت خستگی آمیزه F_4 کاهش می‌یابد.

جدول ۳ نتایج آزمون مقاومت خستگی

کد نمونه	تعداد سیکل پارگی
F_1	۸۵۱۰۰
F_2	۱۱۳۵۰۰
F_3	۱۳۳۹۰۰
F_4	۷۲۹۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آمیزه‌هایی لاستیکی بر پایه NR/BR بدون نانو خاک رس و نیز با ۳، ۵ و ۷ درصد نانو خاک رس به روش اختلاط خمیری ساخته شده و بر روی نمونه‌های حاوی نانو

- [7] Khanlari S., Kokabi M., "Thermal Stability, Aging Properties, and Flame Resistance of NR-Based Nanocomposite", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 119, 2011, pp. 855-862.
- [8] Wu, Y. P., Ma, Y., Wang, Y. Q., Zhang, L. Q., "Effects of Characteristics of Rubber Mixing and Vulcanization on the Structure and Properties of Rubber/Clay Nanocomposites by Melting Blending", *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 289, 2004, pp. 890-894.
- Styrene-Butadiene Rubber by Addition of Nanodispersed Clay", *Macromolecular Material and Engineering*, Vol. 291, 2006, pp. 944-949.
- [5] Oman, S., Nagode, M., Fajdiga, M., "Estimation of Air-Spring Life Based on Accelerated Experiments", *Journal of Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 3859-3868.
- [6] باقری محمد، تحلیل ارتعاشات، پایداری و میرایی ویسکو الاستیک فنر هوایی تقویت شده با نانو ذرات و ساخت نمونه، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.