

Lifetime Prediction of EPDM Rubber Seals Using Time-Temperature Superposition Principle and the Effect of Nanoparticles Loading on It

Shabnam Edraki¹, Shadi Hassanajili^{1*}, Milad Parsafard²

1 School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, 71348-51154 Shiraz, Iran

2 Faraphishtaz Hoonam Rubber Industry (FARARUB), Shiraz-Sepidan Road, Shiraz, Iran

Abstract

Research Subject: Because of the widespread use of rubbers in different industries, estimating the rubber material properties and its lifetime are very important in design procedure to assure the quality and safety of the rubber components. In this study, the properties and useful lifetime prediction of EPDM rubber parts used in the production of sealing gaskets and sealants for GRP pipes were investigated and the effect of adding silica nanoparticles as well as Si69 coupling agent on these characteristics was studied.

Research Approach: In this work, the samples were tested under accelerated aging conditions and aged in the temperature range of 25-90 °C until 60 days. Then time-temperature superposition was carried out on tensile test and compression set results using Williams Landel Ferry (WLF) model to estimate useful lifetime of the samples. Tensile test was conducted under ISO 12244 standard and compression set test was performed according to ISO 815 standard on rubber samples. Aging effect on samples with and without silica was analyzed with FTIR. In addition, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) were performed to observe the dispersion condition of silica nanoparticles in EPDM samples.

Main Results: According to obtained results, TEM images showed no sign of nanoparticles agglomeration within the samples due to presence of Si69 and SEM graphs depicted a uniform distribution of particles in the matrix. Using time-temperature superposition principle, the lifetime was estimated about 63 and 35 years at room temperature for the rubber samples with and without silica and Si69 coupling agent, respectively. It was observed that the presence of modified silica nanoparticles improves the mechanical and thermal properties of EPDM and also increases the useful lifetime of this elastomer.

key words

EPDM rubber

Time-temperature superposition principles

Useful lifetime

Silica

Coupling agent

*To whom correspondence should be addressed:
ajili@shirazu.ac.ir

تخمین طول عمر واشر آب بند EPDM طبق اصل انطباق زمان و دما و اثر بارگذاری نانوذرات بر آن

شبنم ادراکی^۱، شادی حسن آجیلی^{۱*}، میلاد پارسا فرد^۲

۱ شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، بخش مهندسی شیمی، کد پستی ۷۱۹۳۶۱۶۵۱۱

۲ شیراز، جاده شیراز-سپیدان، صنایع لاستیک فرایشتاز هونام (فراراب)

چکیده

موضوع تحقیق: به دلیل توسعه کاربرد لاستیک‌ها در صنایع مختلف، خصوصیات و طول عمر مفید مواد لاستیکی دارای اهمیت ویژه‌ای در مراحل طراحی بوده و منجر به اطمینان از کارایی و ضمانت اجزای لاستیکی خواهد بود. در این مطالعه، ویژگی‌ها و طول عمر مفید قطعات لاستیکی EPDM مورد استفاده به عنوان آب‌بند یا درزگیر در لوله‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه (GRP) مورد بررسی قرار گرفت و اثر افزودن نانوذره سیلیکا و جفت‌کننده سیلانی Si۶۹ بر روی این ویژگی‌ها مطالعه شد.

روش تحقیق: در این کار، آزمون‌ها تحت شرایط پیرشدگی تسریع‌شده انجام گرفت؛ به طوری که نمونه‌ها در محدوده دمایی ۲۵-۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ روز تحت شرایط پیرشدگی قرار گرفتند. سپس تخمین طول عمر نمونه‌ها با استفاده از اصل انطباق زمان-دما و همچنین با استفاده از مدل ویلیامز لندل فری (WLF)، بر روی داده‌های آزمون‌های کشش و مانایی فشار صورت گرفت. آزمون کشش تحت استاندارد ISO ۱۲۲۴۴ و آزمون مانایی فشار بر اساس استاندارد ISO ۸۱۵ بر روی نمونه‌های لاستیکی انجام شد. اثر پیرشدگی بر روی نمونه‌های با و بدون نانوذره سیلیکا توسط FTIR بررسی شد. همچنین از آزمون‌های میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای مشاهده نحوه پخش ذرات نانوسیلیکا در نمونه‌های لاستیک EPDM استفاده شد.

نتایج اصلی: بر اساس نتایج به دست آمده، طول عمر مفید به ترتیب برای نمونه‌های لاستیکی با و بدون نانوذره سیلیکا و عامل جفت‌کننده Si۶۹ در دمای محیط حدود ۶۳ و ۳۵ سال برآورد شد. مشاهده شد که وجود نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده خواص مکانیکی و حرارتی EPDM را بهبود می‌بخشد و همچنین باعث افزایش طول عمر مفید این الاستومر می‌شود.

کلمات کلیدی

لاستیک EPDM

اصل انطباق دما-زمان

طول عمر مفید

سیلیکا

جفت‌کننده سیلانی

*مسئول مکاتبات:

ajili@shirazu.ac.ir

۱. مقدمه

همان‌طور که می‌دانید کائوچو، ماده اولیه مورد نیاز برای تولید الاستومر است. اولین کائوچوی کشف شده پلی‌ایزوپرن بود که از بازیافت شیره درخت هوآی در برزیل به دست آمد و به‌عنوان کائوچوی طبیعی (NR) شناخته شد. بیشترین مصرف کائوچوی مصنوعی و طبیعی در صنعت لاستیک‌سازی است و مابقی برای تولید قطعات صنعتی مصرف می‌شود که شامل شلنگ‌ها، تسمه نقاله، نوارهای لاستیکی و غیره است. مهم‌ترین خاصیت الاستومرها، رفتار کشسان بعد از تغییر شکل در اثر کشش یا فشار است. الاستومرها برای مصارفی چون چسبندگی به فلزات نیز استفاده می‌شوند و برای افزایش قدرت کشش ترکیباتی مانند الیاف بدان اضافه می‌شوند که همین امر باعث گسترش محدوده کاربرد الاستومرها شده است [۱]. صنعت لاستیک به‌دلیل ویژگی‌های خاص الاستومرها پیشرفت قابل توجهی از قرن ۲۰ تاکنون داشته است. قابلیت تغییر شکل‌پذیری الاستومرها در محدوده کرنش‌های بزرگ، بدون تغییر شکل دائمی یا شکست، این مواد را در بسیاری از کاربردها ایده‌آل ساخته است. وابستگی خواص مکانیکی این مواد به زمان یا گرانش کشسانی سبب می‌شود تا بخشی از انرژی مکانیکی وارده بر قطعه در هر چرخه به گرما تبدیل شود و در نتیجه بر طول عمر قطعه اثرگذار باشد. با توسعه علم و فناوری جدید، فناوری لاستیک در خصوص طراحی و ساخت درزگیرها و آببندها در سراسر جهان توجه زیادی را به خود جلب

این درزگیرها ایجاد نقصان در آن‌ها به‌دلیل پیرشدگی است. نوع دوم، آببندهای پویا هستند که مانع نشت از اجزای متحرک می‌شوند. بنابراین افزایش مقاومت سایشی به اصطکاک ایجادشده در این نوع درزگیرها از اهمیت خاصی برخوردار است. [۲]

دیگر شاخص‌های مهم درباره لاستیک‌های آب‌بند ساختار شیمیایی و فرمول‌بندی نهایی بوده که به‌طور عمده بر خواص نهایی آن‌ها شامل مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر حرارت، مقاومت در برابر سرما، مقاومت شیمیایی (به جز حلال غیرقطبی)، خواص الکتریکی و غیره اثرگذار است. به‌طور کلی این شاخص‌ها مطابق با تجربه مهندسی موجود یا نتایج تحقیقات تخصصی که در راستای الزامات مهندسی هستند، طراحی و انتخاب می‌شوند [۲]. از آنجا که مواد الاستومری و به‌ویژه لاستیک‌های آب‌بند برای استفاده درازمدت (سال‌ها یا دهه‌ها) در دمای محیط یا در شرایطی با درجه حرارت نسبتاً بالا استفاده می‌شوند، پیش‌بینی طول عمر این مواد از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]. هنگامی که لاستیک برای مدت زمان طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، پیر و معمولاً سخت می‌شود و قابلیت سایش خود را از دست می‌دهد. این فرایند پیری نه تنها بر خواص مواد، بلکه بر عمر مفید لاستیک تأثیر می‌گذارد [۴]. با استفاده از آزمون‌های طراحی‌شده مناسب و معادلات انطباق دما-زمان مانند آرنیوس و ویلیامز-لندل-فری می‌توان عمر مفید برای مواد لاستیکی را پیش‌بینی کرد [۵،۶]



(a)



(b)

شکل ۱ لاستیک آب‌بند لوله و اتصالات (a) GRP و (b) UPVC
Figure 1. Rubber seal for GRP (a) and PVC (b) pipes and couplings

. دیدگاه ویلیامز-لندل-فری وقتی که پیری پلیمری توسط فرایند گرانش‌کشسان کنترل می‌شود، برای پیش‌بینی‌های طول عمر مناسب است. هنگامی که سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی غالب هستند، دیدگاه آرنیوس به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی نتایج آزمون تسریع‌شده که شامل اثر دما است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در این پژوهش با انجام آزمون‌های لازم و با استفاده از مدل‌های سامان‌مند به پیش‌بینی رفتار مکانیکی مدت‌دار در نمونه‌های لاستیکی آب‌بند (برای لوله‌های کامپوزیت GRP) پرداخته می‌شود و از نتایج به‌دست‌آمده در تخمین طول عمر مفید این قطعه

کرده و بیشتر از سه جنبه اصلی به‌طور عمده شامل مواد تشکیل‌دهنده، ساختار و روش‌های به‌کارگیری، اهمیت دارند. مطالعات متعددی که در زمینه ارزیابی مواد لاستیکی انجام شده است، نشان می‌دهد که درزگیرهای لاستیکی بیشتر به دو صورت ایستا و پویا استفاده می‌شوند. در نوع اول، آب‌بند لاستیکی مانع نشت سیال از اجزای ثابت می‌شود (شکل ۱). خواص ساختاری لاستیک به‌گونه‌ای است که کارایی آن تحت شرایطی چون دمای کاربری، اکسیژن هوا و ترکیبات بیولوژیک، کاهش یافته که به آن پیرشدگی می‌گویند. می‌توان گفت بزرگ‌ترین محدودیت در به‌کارگیری

به طوری که اولاً، عامل جفت کننده باید روی سطح نانوذرات از طریق واکنش تراکم بین گروه هیدروکسید و اتوکسیل جفت شود. مرحله دوم این است که پیوند چندگوردی شکسته شده و اتصال جدیدی با زنجیر لاستیکی برقرار نماید [۱۵]. برای اینکه شتاب دهنده‌ها بیشترین کارایی خود را نشان دهند، باید از فعال کننده‌های آلی و غیرآلی استفاده کرد. اکسید روی مهم ترین فعال کننده غیرآلی است. اکسیدهای فلزی مانند اکسید منیزیم و اکسید سرب نیز رایج هستند. از مهم ترین فعال کننده‌های آلی می توان به اسیدهای چرب، آمین های ضعیف و آمینوالکل ها اشاره کرد [۹]. امروزه از ترکیبات اکسید روی و اسید استارثیک به عنوان سامانه فعال کننده استفاده می شود. سامانه اکسید روی نقش فعال کننده واکنش ولکانش را دارد و باعث شتاب دهنده گی و پخت مناسب لاستیک می شود. اسید چرب به عنوان نرم کننده استفاده می شود و علاوه بر این که روی موجود در محیط را در خود حل می کند باعث می شود که گرانیروی آمیزه کاهش یابد [۹]. با توجه به اثرات برشمرده افزودنی های لاستیک در بهبود خواص هدف نهایی این کار بررسی اثر افزودن نانوذره سیلیکا و عامل جفت کننده سیلانی Si۶۹ بر میزان کارایی و طول عمر محصول واشر آب بند است که در این راستا از نتایج آزمون پیری تسریع شده و اصل انطباق دما-زمان بر روی نتایج آزمون کشش و مانایی فشار استفاده شده است.

۲. بخش تجربی

۱.۲. مواد

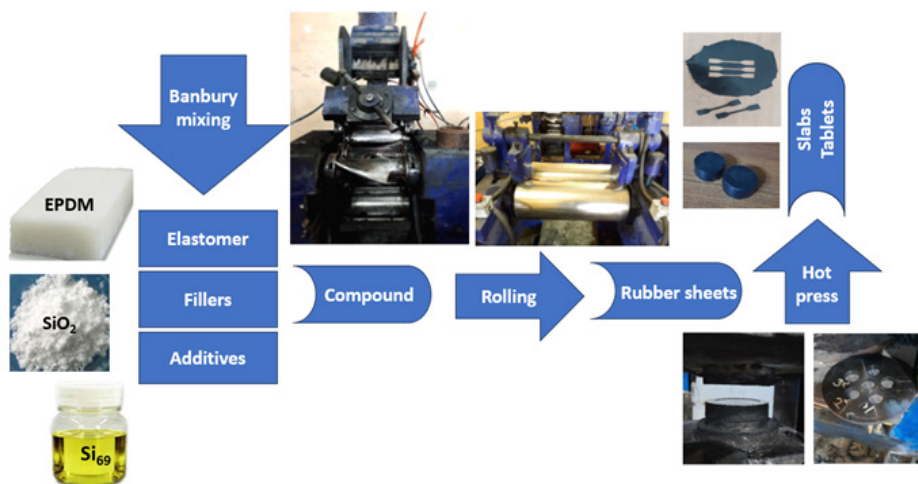
در این پژوهش لاستیک EPDM با مشخصات ذکر شده در جدول ۱ به عنوان خوراک از شرکت فراپیشتاژ هونام (فراراب) و نانوسیلیکا و عامل جفت کننده Si۶۹ به عنوان عوامل بهبود خواص آمیزه تهیه شدند.

در این مرحله با توجه به فرمول بندی مورد نظر (جدول ۱، b,c) مقدار لازم از هر ماده (الاستومر، شتاب دهنده، روغن، مواد پخت، پرکننده) با استفاده از ترازو آزمایشگاهی وزن شده و در دهانه دستگاه بنبوری ریخته می شود. به مواد اولیه ۵ تا ۷ دقیقه زمان داده می شود تا در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد به خوبی با هم مخلوط شوند. سپس آمیزه از قسمت زیرین دستگاه خارج شده و به روی غلتک انتقال داده می شود. آمیزه در غلتک به میزان کافی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد غلتک کاری شده تا مواد به خوبی با هم یکدست و اختلاط به خوبی صورت گیرد. برای این منظور بهتر است که ابتدا آمیزه به صورت مستر تولید شود و بعد از ۴۸ ساعت استراحت مواد پخت به آن وارد شود و آمیزه نهایی شود. در این روش هم آمیزه فرصت استراحت پیدا می کند و هم غلتک شدن

لاستیکی استفاده می شود [۸]. همچنین اثر افزودن نانوذرات و عوامل سازگار کننده را بر میزان کارایی و طول عمر محصول نهایی بررسی خواهیم نمود.

در صنعت لاستیک از موادی به عنوان شتاب دهنده استفاده می شود که روند پخت را سرعت می بخشد و همچنین باعث می شود که این روند در دمای کمتری انجام شود. شتاب دهنده‌ها بسیار متنوع هستند که با توجه به خواص و میزان سرعت بخشیدن به آمیزه مورد استفاده قرار می گیرند [۹].

برای ایجاد کاربرد عملی، تقویت لاستیک بسیار ضروری و لازم است و در میان انواع روش ها، افزودن پرکننده‌ها مؤثرتر است [۱۰]. در نتیجه انواع مختلفی از پرکننده‌ها برای بهبود خواص مکانیکی ایستا و پویای ترکیبات، به مواد پلیمری افزوده می شوند. می توان گفت کربن سیاه و سیلیس از پرکاربردترین ها در صنایع لاستیک برای رسیدن به سختی کافی، مدول، مقاومت پارگی، ساییش و مقاومت خستگی هستند [۱۱]. پرکننده‌ها با توجه به ساختار ترکیب شیمیایی و روش تولید بیشتر سفید رنگ هستند. محصولات طبیعی همچون کربنات کلسیم، کربنات منیزیم، سولفات باریم، خاک رس نرم و سخت و محصولات رسوب داده شده مانند سیلیس آبدار، سیلیکات آلومینیوم آبدار، کربنات روی و هیدروکسید آلومینیوم آبدار نمونه‌هایی از این پرکننده‌ها هستند. در این راستا می توان از محصولات اصلاح شده سطحی مانند خاک رس سیلان دار شده نام برد [۹]. جفت کننده‌ها ترکیبات چند عاملی هستند که برای افزایش کارایی پرکننده‌ها و ایجاد برهم کنش بین پرکننده و الاستومر استفاده می شوند. عوامل جفت کننده باعث افزایش اتصالات عرضی می شوند که این باعث بهبود خواص مکانیکی آمیزه و همچنین صرفه جویی اقتصادی می شود. هرچه مقدار پرکننده‌های تقویت کننده که شامل نانوذرات نیز بوده در آمیزه‌های الاستومری افزایش پیدا کند، پراکنش آن‌ها در الاستومر مشکل تر می شود. بنابراین، از عوامل جفت کننده استفاده می شود تا باعث شوند که مواد جذب شده به سطح پرکننده برهم کنشی نسبتاً قوی با الاستومر ایجاد کرده و سبب بهبود توزیع ذرات در ماتریس پلیمری شوند. در نتیجه این اثر گرانیروی کاهش و فرایندپذیری بهبود می یابد [۱۲، ۱۳]. به تازگی، انواع مختلفی از عوامل جفت کننده سیلانی ایجاد شده است و نقش آن‌ها در بهبود تقویت کنندگی در بسیاری از انواع لاستیک‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۴]. عامل جفت کننده سیلانی Si۶۹، نوعی از عامل اتصال دوطرفه است که به طور گسترده‌ای برای اصلاح نانوپرکننده‌های معدنی قطبی به منظور افزایش برهم کنش بین سطحی و بهبود وضعیت پراکنش در ماتریس لاستیک استفاده می شود و همچنین باعث افزایش تراکم اتصالات عرضی ولکانیزات‌ها می شود،



شکل ۲ طرح‌واره مراحل آماده‌سازی و فرایند آمیزه لاستیکی EPDM
Figure 2. Schematic diagram of EPDM rubber compounding and processing

دو بار انجام می‌شود که باعث اختلاط بهتر می‌گردد. طرح‌واره فرآیند آماده‌سازی آمیزه در شکل ۲ آورده شده است. در این مرحله نانوسیلیکا به‌منظور افزوده‌شدن به آمیزه نیاز به پخش‌شدن در روغن داشت. (به بیان دیگر به‌منظور بهبود خواص و افزایش طول عمر قطعات از افزودن نانوسیلیکا در فرمول‌بندی استفاده می‌کنیم.) میزان ۴۰ گرم نانوسیلیکا در ۱۰۰ گرم روغن

۸۴۰ صنعتی با استفاده از دستگاه فراصوت میله‌ای با توان ۱۴۰۰ وات پخش شد. سپس عامل جفت‌کننده Si۶۹ به آمیزه اضافه و تمامی مراحل تکرار شد، با این تفاوت که مدت زمان آزمون‌ها ۳۰ روز بوده و در این مرحله دو نمونه قرص و اسلب نیاز بود.

۲.۲. تولید قطعه

از آمیزه نهایی خام برای اسلب ۵۰ گرم توزین شده، در

جدول ۱ مشخصات فیزیکی لاستیک EPDM و نانوسیلیکا (a) و فرمول‌بندی آمیزه لاستیکی EPDM حاوی نانوذره (b) و فاقد نانوذره (c)
Table 1. Physical properties of the EPDM rubber and nanosilica (a) and EPDM compound formulation without (b) and with nanoparticles (c)

(a)			(b)			(c)		
ENB Content		4.5%	Ingredients	Content (phr)	Content (%)	Ingredients	Content (phr)	Content (%)
Mooney Viscosity		72 MU (ML 1+4)	EPDM	100	45	EPDM	100	43.9
Specific Gravity		0.86	Oil	55.5	25	Oil	55.6	24.4
Ethylene Content		62%	Carbon	61.1	27.5	Carbon	61.1	26.9
Particle Size (Nano-silica)		11-14 nm	St. A	1.1	0.5	Si69	2.5	1.10
Purity (Nano-silica)		99 %	ZnO	2.2	1	Nano-silica	3.0	1.32
			S	0.55	0.25	St. A	1.1	0.49
			MBTS	1.1	0.5	ZnO	2.2	0.98
			TMTD	0.55	0.25	S	0.6	0.24
						MBTS	1.1	0.49
						TMTD	0.6	0.24

داده و در بین دو فک دستگاه رنومتر لاستیک MDR (SMD-200B) که دمای آن ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد است به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده تا پخت آمیزه مورد بررسی قرار گیرد.

همچنین بعد از افزودن نانوسیلیکا تصویربرداری TEM به‌منظور مطالعه پخش نانوذرات در لاستیک انجام شد. به‌علاوه از آزمون طیف‌سنجی فروسرخ در محدوده cm^{-1} ۴۰۰-۴۰۰۰ برای مطالعه اثر پیرشدگی حرارتی بر روی نمونه‌ها استفاده شد.

۴.۳.۲. ارزیابی طول عمر

بررسی طولانی مدت لاستیک با بهره‌گیری از معادله WLF انجام شده است. در این روش خاصیت مورد نظر در دماهای مختلف (در اینجا از ۲۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و در بازه زمانی کوتاه اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن خواص نمونه‌ها در دماها و زمان‌های مورد نظر، می‌توان فاکتور انتقال (a_T) را در دمای مرجع (۲۵ درجه)، با هدف ترسیم منحنی مرجع محاسبه کرد [۱۶]:

$$\text{Log} a_T = \frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2 + (T-T_{ref})} = \log \left(\frac{\tau_t}{\tau_{ref}} \right) \quad (2)$$

در معادله (۲)، T دمای تعیین‌شده، T_{ref} دمای انتقال شیشه‌ای و C_1 و C_2 ثوابت جهانی هستند. خاصیت قطعه طبق معادله (۳) و با استفاده از مانایی فشار محاسبه می‌شود.

$$\text{property} = \frac{(100 - \text{Compression set})}{100} \quad (3)$$

۳. نتایج و بحث

در مرحله اول پژوهش به بررسی و تخمین طول عمر قطعات از طریق آزمون کشش پرداخته شد که نتایج آن در جدول a۲ آورده شده است. در این آزمون دو پارامتر مهم موجود است که باید مورد بررسی قرار گیرند. همان‌طور که قبلاً گفته شد آزمون برای قطعات در چهار دمای ۲۵-۵۰-۷۰-۹۰ درجه در شرایط فرسودگی ۹۰ روزه انجام شد. با استفاده از نتایج آزمون طول عمر قطعات از طریق داده‌های استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی محاسبه می‌شود. در ادامه آزمون مانایی فشار بررسی شد. در این آزمون دو پارامتر مهم موجود است که باید مورد بررسی قرار گیرند. در این روش همانند آزمون کشش قطعات در چهار دما (۲۵-۵۰-۷۰-۹۰ درجه) در شرایط فرسودگی ۹۰ روزه قرار می‌گیرند (جدول b۳). با استفاده از آزمون ذکر شده، طول عمر قطعات از طریق آزمون مانایی فشار محاسبه می‌شود. در این کار دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ نتایج این بررسی‌ها با

قالب مخصوص در پرس به مدت ۶۰۰ ثانیه در دمای ۱۶۵ قرار گرفت تا پخت انجام شود. برای نمونه‌های قرص از قالب ۶ عددی استفاده شد؛ به‌طوری‌که ۶ قطعه ۲۰ گرمی از آمیزه خام تهیه شد و در قالب با دمای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. زمان لازم برای پخت قرص ۱۲۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

برای دستیابی به طول عمر مفید قطعات در این کار پارامترهای مهم فرایند که در ادامه ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت.

*درصد مانایی فشار

*میزان کشش

*میزان کشیدگی تا پارگی

*مدول

*درصد DMA

*سختی

۳.۲. روش‌های آزمون

۱.۳.۲. آزمون مانایی فشار

در این مرحله قرص‌ها در دستگاه مانایی فشار تعبیه شده و به آون انتقال یافت. این آزمون برای دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ به مدت ۱، ۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۲۰، ۲۴، ۲۸، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ روز انجام شد. بعد از روزهای طی شده در هر دما سه نمونه استخراج و به مدت ۳۰ دقیقه استراحت داده می‌شد. سپس درصد مانایی با توجه به معادله ۱ اندازه‌گیری می‌شد.

$$\text{Compression Set}(\%) = \frac{d_0 - d_2}{d_0 - d_1} * 100 \quad (1)$$

که d_0 ضخامت اصلی نمونه است، d_1 ضخامت در حالت فشرده است و d_2 ضخامت پس از حذف بار است.

۲.۳.۲. آزمون کشش

در این مرحله اسلب‌های تولیدشده نیز مانند قرص‌ها در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ به مدت مشابه درون آون قرار گرفت و در روزهای تعیین‌شده با استفاده از قالب دمبل‌شکل ۳ نمونه دمبل‌شکل جدا و بعد از ۳۰ دقیقه استراحت با استفاده از دستگاه کشش آزمون استحکام انجام شد. از سطح مقطع شکست نمونه‌ها آزمون SEM توسط میکروسکوپ الکترونی پویشی (مدل Tescan Vega۳، جمهوری چک) با ولتاژ ۲۰ کیلوولت گرفته شد.

۲.۳.۳. آزمون رنومتر

در این مرحله ۱۰ گرم از آمیزه‌های تولیدی (بدون نانوسیلیکا-حاوی نانوسیلیکا) را بین دو قطعه فیلم قرار

زمان و در دمای مرجع آورده شده است. دما و روزها اندازه استحکام کششی کاهش پیدا کرده طبق استاندارد حداقل میزان استحکام کششی ۹-۹/۵ است. بیشترین کاهش در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد مگاپاسکال است که در آزمون‌های انجام شده با افزایش اتفاق افتاده است.

جدول ۲ نتایج آزمون استحکام کششی (a) و منابیی فشار (b) EPDM در دماهای مختلف
Table 2. Results of tensile (a) and compression set (b) of EPDM at different temperature

(a)

T=25 °C					
test	Aging time (day)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Modulus (MPa)
1	1	12.30	730	56	1.74
2	3	12.25	719.75	56	1.73
3	7	12.16	175.5	56	1.79
4	10	12.10	713.95	56	1.85
5	12	12.09	707	56	1.88
6	14	12.08	694.68	57	1.95
7	20	12.04	688.65	57	2.01
8	24	12.00	672.5	57	2.08
9	28	11.97	666.5	57	2.15
10	30	11.95	679.75	57	2.18
11	35	11.91	633.25	58	2.26
12	40	11.88	624.5	58	2.21
13	45	11.85	618	58	2.33
14	50	11.84	613.5	59	2.51
15	60	11.78	603.25	59	2.68
16	90	11.75	589.5	59	2.88
T= 50 °C					
1	1	12.09	732.50	56	1.61
2	3	12.08	719.26	56	2.01
3	7	12.06	695.50	56	1.75
4	10	12.04	678.65	56	2
5	12	12.03	664.85	56	1.95
6	14	12.02	664.30	56	2.03
7	20	11.99	642.84	57	1.71
8	24	11.97	588.50	57	1.85
9	28	11.94	562.45	57	1.60
10	30	11.92	536.40	57	2.22
11	35	11.91	510.35	58	2.26
12	40	11.89	484.30	58	2.17
13	45	11.80	458.26	58	2.11
14	50	11.65	432.21	60	2.18
15	60	11.43	406.16	62	2.20
16	90	11.00	380.11	62	2.27
T=70 °C					
1	1	12.52	521.66	57	2.20
2	3	12.42	519	57	2.27

3	7	12.21	515.65	57	2.2
4	10	12.11	511	57	2.18
5	12	11.99	499.62	58	2.2
6	14	11.87	494.66	58	12.1
7	20	11.80	471.5	58	2.37
8	24	11.76	459.33	58	2.45
9	28	1.51	431.8	58	2.34
10	30	11.45	425.36	58	2.48
11	35	11.39	382.86	61	2.19
12	40	11.3	378.5	61	2.34
13	45	11.23	361.36	61	2.57
14	50	11.13	350.62	61	2.59
15	60	11.08	339.65	63	2.52
16	90	10.35	326.87	63	2.53

T= 90 °C

1	1	12.41	507.33	57	2.40
2	3	12.36	481.0	57	2.35
3	7	11.68	465.55	57	2.37
4	10	11.29	421.5	59	2.73
5	12	11.13	401.87	59	2.72
6	14	10.39	389.65	59	2.53
7	20	9.95	371.5	60	3.12
8	24	9.52	356.54	60	2.91
9	28	9.31	337.5	60	2.90
10	30	8.77	321.51	61	3.04
11	35	8.23	295.6	61	3.02
12	40	7.69	248.22	62	2.90
13	45	7.15	209.5	62	3.34
14	50	6.07	179.0	63	3.26
15	60	2.83	84.25	64	3.11
16	90	1.75	22.75	65	3.21

(b)

test	Aging time (day)	Compression set (%)	Property
1	1	3.22	0.99957
2	3	3.58	0.99956
3	7	3.64	0.99950
4	10	3.68	0.99940
5	12	3.71	0.99939
6	14	3.73	0.99937
7	20	3.82	0.99933
8	24	3.87	0.99931
9	28	3.93	0.99929
10	30	3.96	0.99925

11	35	4.03	0.99922
12	40	4.10	0.99920
13	45	4.28	0.99916
14	50	4.55	0.99912
15	60	4.93	0.99910
16	90	5.00	0.99905
T= 50 °C			
1	1	15.41	0.84585
2	3	15.62	0.84372
3	7	15.84	0.84159
4	10	16.05	0.83946
5	12	16.59	0.83401
6	14	16.99	0.8301
7	20	17.58	0.82418
8	24	17.97	0.82026
9	28	18.16	0.81835
10	30	18.55	0.81443
11	35	19.10	0.80900
12	40	19.75	0.80250
13	45	21.50	0.78500
14	50	22.14	0.77860
15	60	23.25	0.76750
16	90	32.50	0.67500
T= 70 °C			
1	1	13.68	0.86320
2	3	15.87	0.84123
3	7	16.00	0.84000
4	10	17.75	0.82250
5	12	22.85	0.77150
6	14	27.75	0.72247
7	20	37.36	0.62635
8	24	40.25	0.59748
9	28	45.95	0.54041
10	30	48.54	0.51450
11	35	51.14	0.41350
12	40	53.73	0.38890
13	45	56.32	0.36430
14	50	58.91	0.33970
15	60	61.50	0.31510
16	90	72.30	0.29050
T= 90 °C			
1	1	18.41	0.81585
2	3	23.87	0.76124
3	7	29.35	0.61350
4	10	34.82	0.59912
5	12	40.29	0.55451

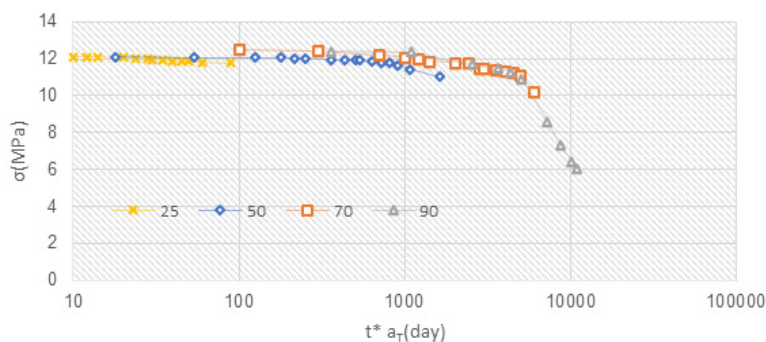
6	14	45.76	0.53005
7	20	51.23	0.50055
8	24	56.7	0.47106
9	28	62.17	0.44156
10	30	67.64	0.41207
11	35	74.80	0.38257

این استاندارد می‌توان طول عمر مفید قطعه را با کمک نمودارهای مرجع در شکل ۳ و b^۳ بر اساس نتایج استحکام کششی و ازدیاد طول تا نقطه پارگی، به ترتیب حدود ۲۸ و ۳۵ سال تخمین زد.

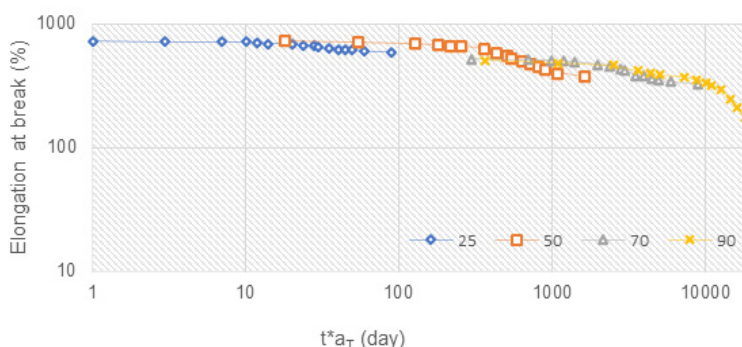
آزمون مانایی فشار طبق استاندارد ISO ۸۱۵ انجام گرفت. در این مرحله درصد مانایی و میزان افت خواص قطعات بررسی شد. در شکل b^۴ خاصیت قطعات که در دماهای ۲۵-۵۰-۷۰-۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد افت خواص بسیار کم است ولی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خاصیت قطعات در حال کاهش است و در دمای ۹۰ درجه

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد با افزایش دما و روزها میزان افزایش طول تا نقطه پارگی کاهش می‌یابد. بیشترین میزان فرسودگی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق افتاده است. کاهش فزاینده در ازدیاد طول تا نقطه پارگی و افزایش سختی با زمان بر اساس نتایج مندرج در شکل a^۴ (به‌ویژه در دماهای بالا) نشانگر دو پدیده شکست زنجیره‌ها و شبکه‌ای شدن آن‌ها در اثر پیرشدگی حرارتی است [۱۷].

به‌منظور تخمین طول عمر مفید قطعه استاندارد کاری واشرها برای انتقال آب سرد (حداقل میزان استحکام کششی ۹ مگاپاسگال و افزایش طول تا نقطه شکست ۳۰۰ درصد) در نظر گرفته شد. با توجه به

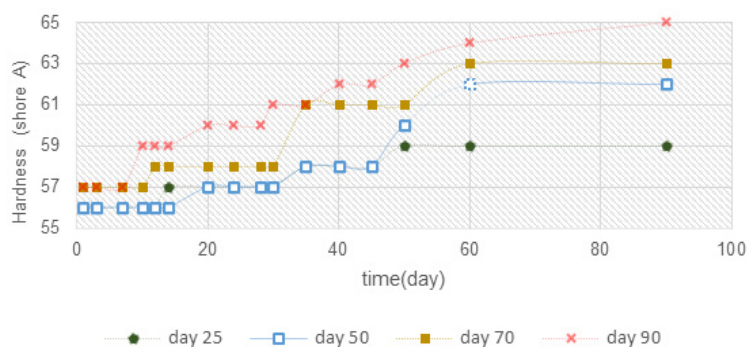


(a)

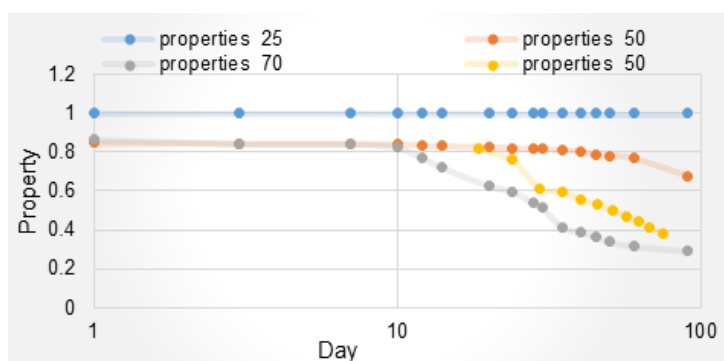


(b)

شکل ۳ نمودار انطباق دما-زمان داده‌های استحکام کششی (a) و ازدیاد طول تا نقطه پارگی (b) در دمای مرجع ۲۵ °C
Figure 3. Time-temperature superposition curve of tensile strength (a) and elongation at break (b) data at a reference temperature of 25 °C



(a)



(b)

شکل ۴ تغییرات سختی (a) و خاصیت قطعات (b) EPDM برحسب زمان (روز) در دماهای ۲۵-۵۰-۷۰ و ۹۰ درجه
Figure 4. Hardness (a) and property (b) of specimens versus time (day) at 25-50-70 and 90 °C

این شکل گویای آن است که با افزایش دما و روزها، میزان استحکام کاهش یافته است، اما شیب کاهش به مراتب کمتر از نمونه‌های فاقد نانوذره است. عمر مفید قطعه بر اساس استحکام کششی با افزایش درصد تخریب تا حفظ ۷۵٪ استحکام اولیه معادل ۹/۵-۹ MPa، حدود ۵۴ سال تخمین زده می‌شود.

شکل b5 مقادیر ازدیاد طول تا نقطه شکست را تحت شرایط فرسودگی در روزهای مختلف با حضور نانوسیلیکا نشان می‌دهد. با افزایش دما و روزها میزان افزایش طول تا نقطه شکست کاهش یافت. به‌منظور تخمین طول عمر مفید قطعه با توجه به استاندارد کاری ذکر شده در قبل حداقل میزان افزایش طول تا نقطه پارگی، طول عمر قطعه بیشتر از تخمین قبلی و حدود ۶۳ سال است. سختی قطعات حاوی نانوسیلیکای اصلاح‌شده مطابق آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است با دما و روزهای فرسودگی در قیاس با نمونه‌های قبل (شکل a ۴) با شیب کمتری افزایش داشت. بالا رفتن سختی بر طول عمر قطعه اثر دارد. زیرا با افزایش سختی ساختار قطعه دچار تغییرات شده و به تدریج تخریب می‌شود [۱۷].

همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده خاصیت قطعات با در نظر گرفتن مانایی فشار (جدول b3) در حضور نانوسیلیکا در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که افت خواص در دماهای ۲۵ تا ۵۰ درجه

سانتی‌گراد به شدت دچار افت خواص شده‌اند. طبق مطالعات و مقالات بررسی شده حداکثر فرسودگی قطعه ۵۰٪ است. بر اساس داده‌های جدول ۲ و فاکتور انتقال در این حالت عمر قطعه را می‌توان حدود ۲۰ سال تخمین زد. اما به دلیل استفاده واشرها برای انتقال آب سرد می‌توان درصد تخریب را تا ۲۵٪ تغییر داد که در این صورت طول عمر قطعه حدوداً ۳۸ سال پیش‌بینی می‌شود.

در مرحله دوم آزمایش به بررسی خواص و طول عمر قطعات در حضور نانوسیلیکا و جفت‌کننده سیلانی پرداخته شد که با استفاده از نتایج آزمون آزمایش‌های صورت‌گرفته، طول عمر قطعات از طریق آزمون کشش تخمین زده شد. جدول a3 نتایج این بررسی‌ها را در هر دما و زمان نشان می‌دهد. مشابه قبل دیگر آزمون مورد بررسی مانایی فشار است که در این آزمون دو پارامتر محاسبه شد. دما همانند آزمون کشش در محدوده ۲۵ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد و برای روزهای متوالی تنظیم شد. با استفاده از نتایجی که در جدول b3 آورده شده است. طول عمر قطعات نانوکامپوزیت از طریق نتایج آزمون مانایی فشار نیز محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل نتایج بخش دوم آزمایش در شکل a ۵ آورده شده است. نمودار استحکام کششی نمونه‌های حاوی نانوذرات اصلاح‌شده تحت شرایط فرسودگی در

جدول ۳ نتایج آزمون کشش (a) و مانایی فشار (b) نمونه های حاوی نانوذره در دماهای مختلف
 Table 3. Tensile (a) and compression set (b) results of samples containing nanoparticles at different temperatures
 (a)

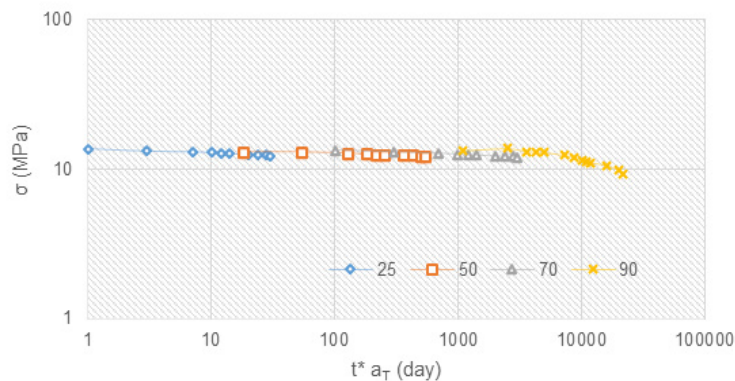
T=25 °C					
test	Aging time (day)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Modulus (MPa)
1	1	13.65	632	57	1.86
2	3	13.20	620	57	2.01
3	7	13.05	585	57	2.07
4	10	12.93	580	57	1.93
5	12	12.81	575	57	1.79
6	14	12.69	570	57	1.65
7	20	12.57	565	58	1.81
8	24	12.45	560	58	1.95
9	28	12.40	555	58	2
10	30	12.34	550	58	1.77
T= 50 °C					
1	1	13.15	605	57	2.27
2	3	13.09	597	57	2.22
3	7	12.87	576	57	2.17
4	10	12.63	578	57	2.36
5	12	12.58	566.5	58	2.55
6	14	12.53	564	58	2.41
7	20	12.41	559.3	58	1.87
8	24	12.39	554.5	58	1.99
9	28	12.23	549.8	59	2.01
10	30	12.12	545	59	1.68
T= 70 °C					
1	1	13.40	579	57	2.3
2	3	13.10	572.5	57	2.19
3	7	12.78	572.4	58	2.15
4	10	12.60	541	58	2.41
5	12	12.53	520	58	2.32
6	14	12.39	519	58	1.98
7	20	12.26	507	58	3.01
8	24	12.14	501	59	1.88
9	28	12.01	498	59	1.93
10	30	12.89	478	59	1.57
T=90 °C					
1	1	13.5	587	56	1.74
2	3	13.27	575	56	1.73
3	7	13.73	573	56	1.79
4	10	13.12	551	56	1.85
5	12	13.07	542	56	1.88
6	14	12.91	530	57	1.95
7	20	12.35	518	57	2.01

8	24	11.89	506	57	2.08
9	28	11.5	494	57	2.15
10	30	11.25	482	57	2.18

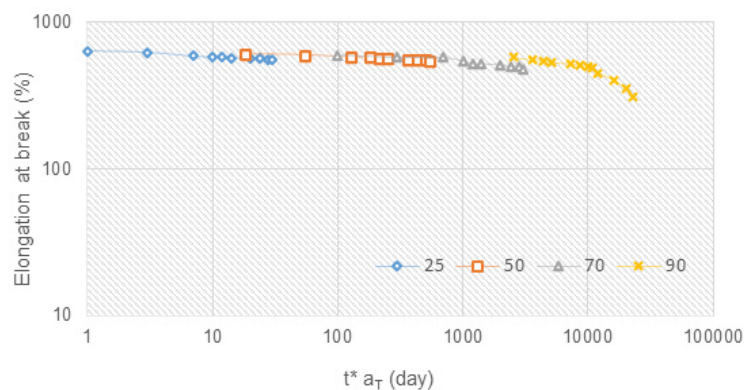
(b)

T=25 °C			
test	Aging time (day)	Compression set (%)	Property
1	1	2.77	0.9723
2	3	2.02	0.9798
3	7	2.64	0.9736
4	10	2.99	0.9701
5	12	3.12	0.9688
6	14	3.25	0.9675
7	20	3.38	0.9662
8	24	3.51	0.9649
9	28	3.64	0.9636
10	30	3.77	0.9623
T=50 °C			
1	1	4.41	0.9559
2	3	7.16	0.9284
3	7	8.09	0.9191
4	10	11.59	0.8840
5	12	11.87	0.8813
6	14	12.15	0.8785
7	20	12.43	0.8757
8	24	12.71	0.8729
9	28	12.99	0.8701
10	30	13.27	0.8673
T=70 °C			
1	1	5.21	0.9479
2	3	8.11	0.9189
3	7	10.93	0.8907
4	10	11.01	0.8899
5	12	12.92	0.8708
6	14	14.36	0.8564
7	20	16.10	0.8390
8	24	17.32	0.8268
9	28	21.60	0.7840
10	30	28.78	0.7122
T= 90 °C			
1	1	11.47	0.8853
2	3	14.28	0.8572
3	7	16.56	0.8344
4	10	16.86	0.8314
5	12	20.41	0.7959
6	14	21.5	0.7850

7	20	25.9	0.7410
8	24	32.2	0.6750
9	28	41.6	0.5840
10	30	47.4	0.5260



(a)



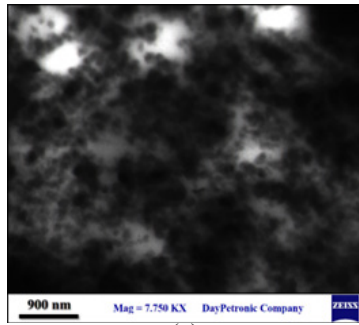
(b)

شکل ۵ نمودار انطباق دما-زمان داده‌های استحکام کششی (a) و ازدیاد طول تا نقطه پارگی (b) در دمای مرجع ۲۵ °C (نمونه‌های حاوی نانوذره)
Figure 5. Time-temperature superposition curve of tensile strength (a) and elongation at break (b) data at a reference temperature of 25 °C (samples containing nanoparticles)

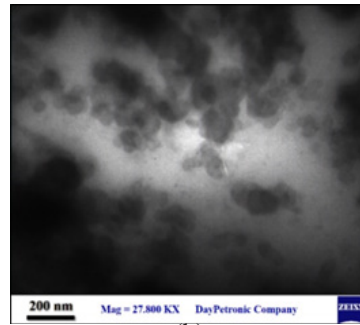
طول تا نقطه پارگی را در نمونه‌های حاوی نانوذره در مقایسه با نمونه‌های فاقد آن در شرایط یکسان توجیه کرد (جداول ۲ و ۳). در حضور نانوذره همانند آزمون نمونه‌های قبل چنانچه افت خاصیت تا ۵۰٪ مدنظر قرار گیرد، طول عمر قطعه به بالاتر از ۳۵ سال خواهد رسید که نشان از بهبود ۷۵٪ در افزایش طول عمر مفید دارد.

داده‌های رئومتر بیانگر این نکته است که افزودن این مقدار نانوذره اصلاح‌شده به ترکیب تقریباً بر زمان

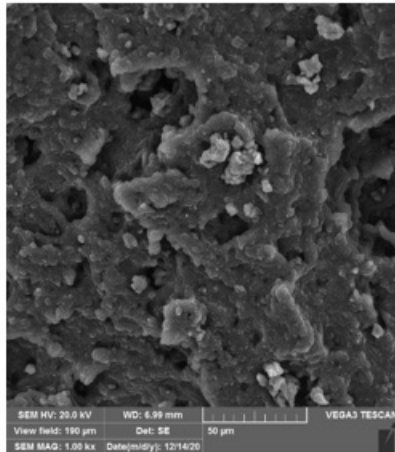
نسبت به نمونه‌های قبل کاهش چندانی ندارد؛ به‌گونه‌ای که حتی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد افت خواص چشمگیر نبود. این اثر را می‌توان به پخش مطلوب نانوذرات اصلاح‌شده در زمینه و تشکیل ناحیه بین‌سطحی مناسب و قوی بین نانوذرات و الاستومر از طریق واکنش جفت‌کننده با گروه OH آزاد نانوسیلیکا از یک سو و اتصال گوگردی با پیوندهای غیراشباع در الاستومر مرتبط دانست [۱۸] (شکل ۷). به‌همین دلیل می‌توان افزایش استحکام کششی و کاهش ازدیاد



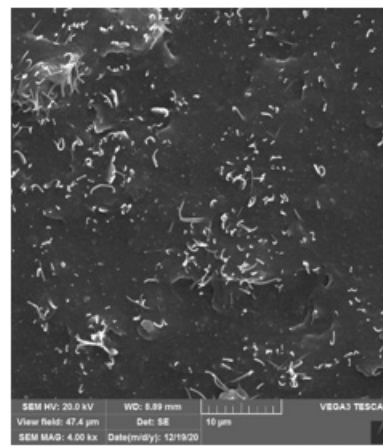
(a)



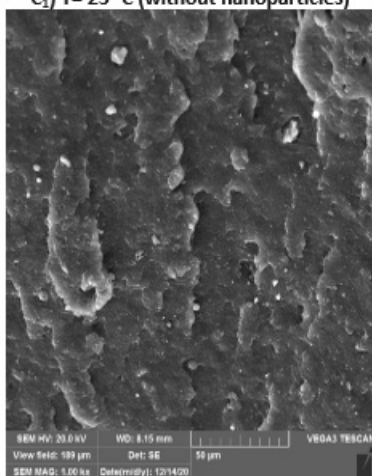
(b)



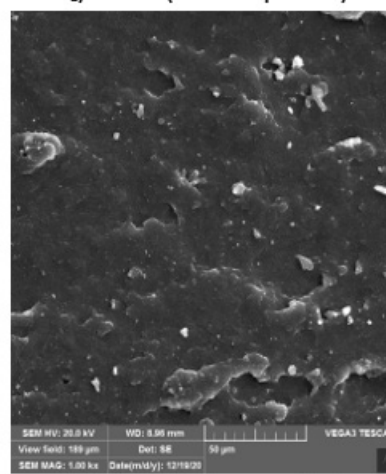
C₁ T= 25 °C (without nanoparticles)



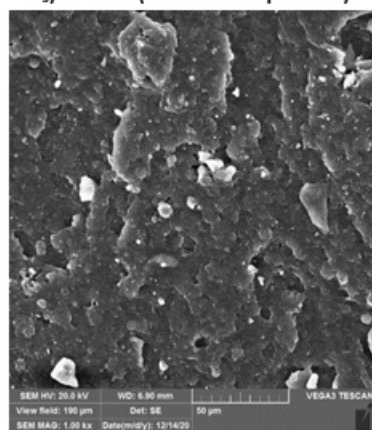
C₂ T= 25 °C (with nanoparticles)



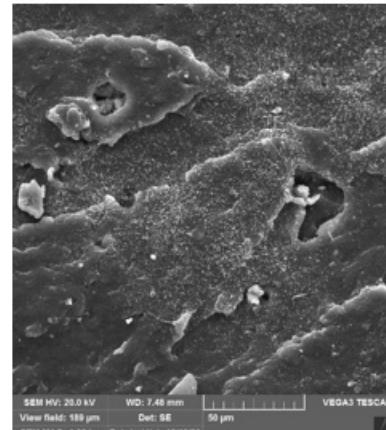
C₃ T= 50 °C (without nanoparticles)



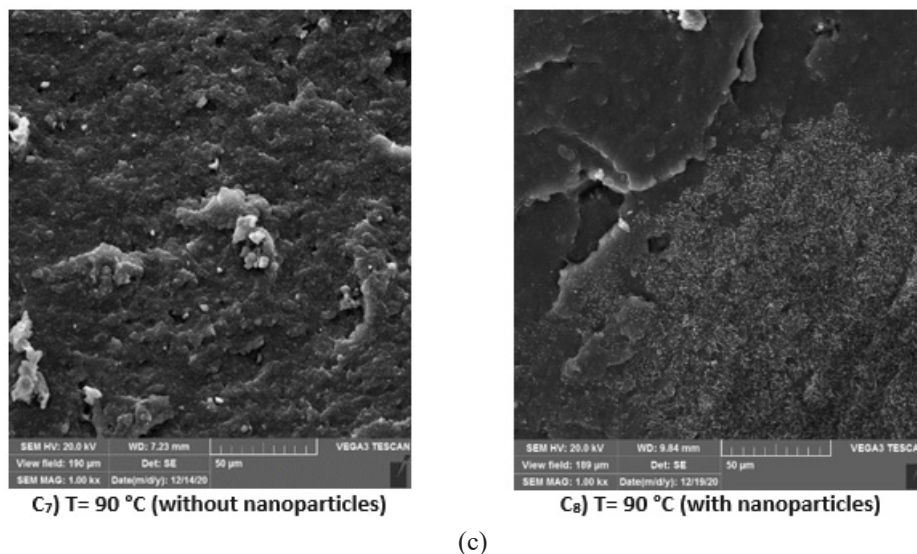
C₄ T= 50 °C (with nanoparticles)



C₅ T= 70 °C (without nanoparticles)



C₆ T= 70 °C (with nanoparticles)

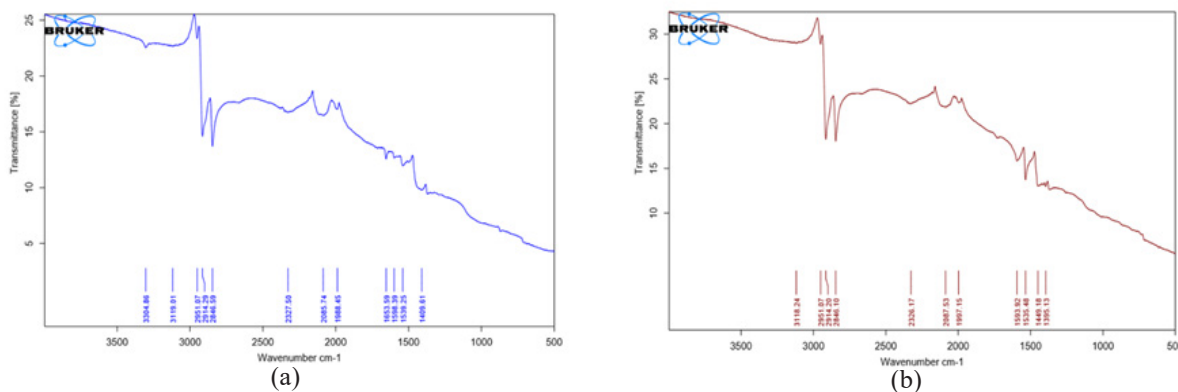


شکل ۸ (a,b) تصاویر TEM نمونه حاوی نانوسیلیکا و (c) تصاویر SEM نمونه‌های آزمون کشش در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد (نمای سطح مقطع)

Figure 8. (a,b) TEM images of nano-silica containing samples in two magnifications (c) SEM images of tensile test specimens at temperatures of 25, 50, 70 and 90 °C (cross section view)

تخریب نمونه تحت فرسودگی حرارتی به دلیل اکسایش واحدهای اتیلن-پروپیلن باشد [۲۴، ۲۵]. در نمونه حاوی نانوذره سیلیکا قله‌های مربوطه ظاهر نشد که می‌توان اینگونه توجیه کرد که حضور نانوذره سیلیکا و عامل جفت‌کننده سیلانی باعث افزایش مقاومت حرارتی نمونه شده است.

شکل ۹ بیانگر نتایج آزمون FTIR دو نمونه فاقد و حاوی نانوذره است. نمونه‌های مورد آزمایش به مدت ۱۴ روز تحت فرسودگی حرارتی در دمای ۹۰ درجه قرار گرفتند. مشخصات کامل پیوندهای جذبی دیده‌شده در لاستیک EPDM در جدول ۵ آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای هر دو نمونه دو قله ارتعاش کششی (C-H) در عددهای موجی



شکل ۹ آزمون FTIR نمونه‌های لاستیک EPDM با (a) و بدون نانوذره (b) پس از پیرشدگی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۴ روز
Figure 9. FTIR results of EPDM rubber samples (a) with and (b) without nanoparticles after aging at 90 °C for 14 days

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه با موفقیت طول عمر مفید قطعات لاستیک و همچنین بهبود خواص و طول عمر مفید را با استفاده از آزمون‌های کشش و مانایی و DMA مشخص کرد. آزمایش‌ها براساس روش‌های آرنیوس و ویلیامز-لندل-فری طراحی شدند. نمونه‌ها برای تعیین طول عمر مفید و اثر نانوسیلیکا بر طول عمر و خواص تحت آزمون‌های کشش و مانایی و آزمون DMA قرار

cm^{-1} (۲۸۴۵-۲۹۵۰)، دو قله ارتعاش خمشی و قیچی در عددهای موجی cm^{-1} (۱۳۷۴-۱۴۵۳) و همچنین پیوند (C-H) در عدد موج cm^{-1} ۷۵۰ مشاهده می‌شود که به الاستومر EPDM مرتبط است و نتیجه ارتعاش خمشی بانند C-H پیوند دوگانه کربن-کربن است [۲۷-۲۳]. در نمونه بدون نانوذره دو قله در بازه cm^{-1} (۱۵۸۰-۱۷۱۵) مشاهده می‌شود که می‌تواند بیانگر وجود گروه عاملی کربونیل (O=C) بوده و حاکی از

جدول ۵ اعداد موجی پیوند ها و گروه های عاملی EPDM
Table 5. Wavenumbers of chemical bonds and functional groups of EPDM

No	Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
1	C-H Symmetric stretching	2950
2	C-H Asymmetric stretching	2845
3	C=O Carbonyl vibration	1715
4	CH ENB double bound	750
5	CH ₃ Bending vibration	1374
6	CH ₂ Scissoring vibration	1453

سبب بهبود خواص مکانیکی-حرارتی قطعه و بر اساس تخمین‌های صورت‌گرفته از نتایج آزمایش‌ها، افزایش طول عمر مفید را نتیجه داد؛ به‌طوری‌که بر اساس داده‌های ازدیاد طول تا نقطه پارگی این زمان به حدود ۶۳ سال افزایش یافت.

قدردانی

این مقاله نتیجه طرح پژوهشی پل در قالب حمایت از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد. نویسندگان این مقاله از آقای دکتر محمدرضا ظهیرامامی مدیرعامل شرکت تولیدی صنعتی فراسان و خانم مهندس لاله کوهستانی مدیریت شرکت فرایش‌تاز هونام به‌خاطر حمایت مالی و فراهم کردن امکانات انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

گرفتند. از بین روش‌های پیشنهادی روش مناسبی برای تعیین طول عمر مفید قطعه انتخاب شد و مشخص شد که تطابق خوبی بین مدل و داده‌های تجربی وجود دارد. پارامترهای مناسب برای این کار کشش، کشیدگی تا نقطه پارگی، کشیدگی نرمال، سختی، مدول، میزان افت خاصیت و درصد مانایی است که در ابتدا بهترین روش محاسبه طول عمر مفید قطعه استفاده از آزمون مانایی فشار است. سپس می‌توان از کشیدگی تا نقطه پارگی، کشیدگی نرمال و کشش برای تعیین طول عمر مفید قطعه استفاده کرد. سختی و مدول چندان تأثیر بسزایی بر طول عمر قطعه ندارند؛ ولی به‌عنوان دو پارامتر مهم شناخته می‌شوند. با استفاده از روش آزمون مانایی فشار طبق استاندارد ISO ۸۱۵ میزان طول عمر قطعات ۳۸ سال شناخته شد و با استفاده از آزمون کشش طبق استاندارد ISO ۱۲۲۴۴ و با کمک داده‌های افزایش طول تا نقطه پارگی طول نیز این زمان حدود ۳۵ سال برآورد شد. بعد از اینکه تأثیر هر کدام از پارامترها مشخص شد و درستی مدل اثبات شد، قطعات جدید با افزودن نانوسیلیکا و عامل جفت‌کننده تهیه شدند، سپس تمام آزمون‌ها تکرار شده و طول عمر قطعات محاسبه شد. از آنجایی که قطعات لاستیکی مورد آزمایش در دماهای پایین قرار می‌گیرند پس فرمول‌بندی مورد استفاده برای چنین شرایطی طراحی شده است. در نتیجه طبیعی است که تحت دماهای بالا فرسودگی به سرعت اتفاق بیفتد. همان‌طور که مشاهده شد در دماهای بالا و به‌ویژه دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین تخریب اتفاق افتاد و آمیزه به‌شدت دچار افت خواص شد. از آنجا که واشربند مورد استفاده در مجاورت آب سرد (بیشینه دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار می‌گیرد، قطعات لاستیکی مورد استفاده در دماهای پایین دچار فرسودگی کمتر می‌شوند. بارگذاری نانوذرات سیلیکای اصلاح‌شده در آمیزه و سازگاری بالای آن با الاستومر

مراجع

- Haffman W., Rubber Technology Handbook, Hanser Publishers, Germany, 11-18, 1989.
- Guan H., Yang F. and Wang Q., Study on Evaluation Index System of Rubber Materials for Sealing, Materials & Design, 32, 2404-2412, 2012.
- El Yaagoubi M., Juhre D., Meier J., Kröger N., Alshuth T. and Giese U., Lifetime Prediction of Filled Elastomers Based on Particle Distribution and the J-integral Evaluation, International Journal of Fatigue, 112, 341-354, 2018.
- Ezzati P., Ghasemi P., Karrabi M. and Azizi H., Rheological Behaviour of PP/EPDM Blend: The Effect of Compatibilization, Iranian Polymer Journal, 17, 669-679, 2008.
- Peng Q., Zhu Z., Jiang C. and Jiang H., Effect of Stress Relaxation on Accelerated Physical Aging of Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber Using Time-Temperature-Strain Superposition Principle, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2, 61-68, 2019.
- Irfan M.S., Gill Y.Q., Hashmi M., Ullah S., Saeed F. and Qaiser A.A., Long-term Stress Relaxation Behavior of Polyaniline-EPDM Blends Using the Time-Temperature-Strain Superposition Method, Materials Research Express, 6, 025318 2019.
- Darestani Farahani T. and Bakhshandeh G., Study of the Effect of Aging in Brake Fluid on Physico-Mechanical Properties and Thermal Resistance of EPDM Rubber Compounds Containing Various Contents of DCP, Iranian Journal of Polymer Science and Technology (in Persian), 5, 299-305, 2004.
- Le Huy M. and Evrard G., Methodologies for Lifetime Predictions of Rubber Using Arrhenius and WLF Models, Macromolecular Materials and Engineering, 261-262, 135-142, 1998.
- Castaño N., de Greiff M. and Naranjo C.A., Applied Rubber Technology, Hanser Publisher, Germany, 14-20, 2001.
- Abouel-Kasem A., Lifetime Estimation and Design of Elastomeric Seals with Reinforced Metal End Caps, Sealing Technology, 2006, 5-9, 2006.
- Sadeghi H. and Shakouri Z., Effect of Surface Modification on Reinforcing Efficiency of Carbon Black, Silica and Nano-calcium Carbonate in NR/EPDM Compound, Iranian Rubber Magazine (in Persian), 68, 5, 2012.
- Abtahi M. and Bakhshandeh G.R., Effect of Different Coupling Agents on Mechanical Properties of Silica Filled Reinforced EPDM Rubber Compounds, Iranian Journal of Polymer Science and Technology (in Persian), 6, 349-355, 2003.
- Dohi H. and Horiuchi S., Locating a Silane Coupling Agent in Silica-Filled Rubber Composites, Langmuir, 23, 12344-12349, 2007.
- Sae-oui P., Sirisinha C., Thepsuwan U. and Hatthapanit K., Roles of Silane Coupling Agents on Properties of Silica-filled Polychloroprene, European Polymer Journal, 42, 479-486, 2006.
- Wang Z., Lu Y., Liu J., Dang Z., Zhang L. and Wang W., Preparation of Nano-Zinc Oxide/EPDM Composites with Both Good Thermal Conductivity and Mechanical Properties, Journal of Applied Polymer Science, 119, 1144-1155, 2011.
- Ronan S., Novel Approach to Predicting the Lifetime of Elastomers Undergoing Stress Relaxation, Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology, 2009.
- Ghosh D. and Khastgir D., Degradation and Stability of Polymeric High-Voltage Insulators and Prediction of Their Service Life through Environmental and Accelerated Aging Processes, ACS Omega, 3, 11317-11330, 2018.
- Choophun N., Chaiammart N., Sukthavon K., Veranitisagul, Laobuthee A., Wathanaphanit A. and Panomsuwan G., Natural Rubber Composites Reinforced with Green Silica from Rice Husk: Effect of Filler Loading on Mechanical Properties, Journal of Composites Science, 6, 639, 2022.
- Mokhtari Dizaji S., Katbab A.A. and Hajibabazadeh S., Role of Interfacial Compatibilizer and Functionality of Rubber Phase on Micromorphology Development and Mechanical Properties of PP/EPDM/Nanosilica Ternary Nanocomposite, Polymer Bulletin, 80, 1353-1368, 2023.
- Tian Q., Yuan Tang Y., Ding T., Li X. and Zhang Z., Effect of Nano-Silica Surface-Capped by Bis[3-(triethoxysilyl)propyl] Tetrasulfide on the Mechanical Properties of Styrene-Butadiene Rubber/Butadiene Rubber Nanocompos-

ites, Journal of Polymer Research, 10, 190-193, 2018.

21. Hajibabazadeh S., Palahang M. and Razavi Aghjeh M.K., Effect of Morphology Development on Mechanical Properties and Fracture Behavior of PP/EPDM/SiO₂ Blend-Nanocomposites, Polymer Testing, 73, 124-134, 2019.

22. Gharzouli N., Doufnoune R., Riahi F. and Bouchareb S., Effects of Nanosilica Filler Surface Modification and Compatibilization on the Mechanical, Thermal and Microstructure of PP/EPR Blends, Journal of Adhesion Science and Technology, 33, 445-467, 2019.

23. Morlat-Therias S., Mailhot B., Gardette J., Siva C., Haidar B. and Vidal A. Photooxidation of Ethylene-Propylene-Diene/Montmorillonite Nanocomposites, Polymer Degradation and Stability, 90, 78-85, 2005.

24. Delor-Jestina F., Lacostea J., Barrois-Oudin N., Cardinet C. and Lemairea J., Photo, Thermal and Natural Ageing of Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) Rubber Used in Automotive Applications. Influence of Carbon Black, Crosslinking and Stabilizing Agents, Polymer Degradation and Stability, 64, 469-477, 2000.

25. Rodríguez F.I.R., Moraes J.R. and Marinkovic B.A., Natural Aging of Ethylene-Propylene-Diene Rubber under Actual Operation Conditions of Electrical Submersible Pump Cables, Materials (Basel), 14, 5520, 2021.

26. Seo Y.D., Lee H.S., Kim Y.S. and Song C., A Study on the Aging Degradation of Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) under LOCA Condition, Nuclear Engineering and Technology, 43, 279-286, 2011.

27. Bansod N.D., Kapgate B.P., Maji P.K., Bandyopadhyay A. and Das C., Functionalization of EPDM Rubber Toward Better Silica Dispersion and Reinforcement, Rubber Chemistry and Technology, 92, 219-236, 2019.