نشریه صنعت لاستیک ایران
سال۲۹/شماره ۱۱۵/ پاییز ۱۴۰۳

علمی- فنی

مروری بر مبانی و کارایی استفاده از سامانه‌های پخت برگشت‌پذیر لاستیکی با چشم‌انداز کاربرد تایر

A Review of the Principles and Performance of Rubber Reversible Curing Systems with a Tire Application Perspective

چکیده

پیشگیری از چالش‌های بازیافتی لاستیک نیازمند توسعه روش‌های پخت برگشت‌پذیر بوده که از یک سوء متضمن خواص مکانیکی مطلوب در آمیزه‌ی لاستیکی باشد و از سوی دیگر استفاده مجدد از قطعات تولیدی را ممکن سازد. این روش‌ها شامل استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها، پخت‌های برگشت‌پذیر کووالانسی و پخت‌های برگشت‌پذیر غیرکووالانسی است. جایگزینی کامل یا جزئی چنین نوع اتصالاتی با اتصالات عرضی برگشت‌ناپذیر، چشم‌اندازی جدید و رویکردی پیشگیرانه در حل چالش بازیافت تایرها است. استفاده از پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر مانند دیلز-آلدر نتایج مطلوبی در القای قابلیت بازگشت‌پذیری پخت داشته است. باتوجه به سینتیک آهسته اتصال‌زدایی دیلز-آلدر در دماهای کاربری تایر (که حداکثر دمای آن می‌تواند ۸۰ درجه سانتیگراد باشد)، پیش‌بینی می‌شود که شیمی دیلز-آلدر برای کاربرد تایر در آینده ممکن باشد. شیمی ویتریمر از دیگر روش‌های موفق در ایجاد بازگشت‌پذیری برای پخت لاستیک است. پیاده‌سازی این روش با تنوع بسیار زیاد در عوامل شیمیایی مورد استفاده ممکن است. استفاده از پیوندهای فیزیکی و برهمکنش‌های ابرمولکولی تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده اما خواص مکانیکی حاصل‌شده در این روش معمولاً ضعیف‌تر از سایر روش‌ها است. استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها مبتنی بر کوپلیمرهای قطعه‌ای استایرنی از دیگر رویکردهای موفق است. سوال مهم قابلیت استفاده از این نوع جدید از زمینه پلیمری در کاربرد تایر و چگونگی تاثیر آن بر خواص مهندسی رویه تایر است. نتایج نشان داده است که ترموپلاستیک الاستومرها علاوه بر ایجاد چشم‌اندازی روشن در بازیافت الاستومرها، تاثیر بسیار مهمی بر کاهش مقاومت غلتشی و سایر خواص مثلث جادوئی تایر داشته‌اند.

کلمات کلیدی: بازیافت‌پذیر، برگشت‌پذیری پخت، ترموپلاستیک الاستومر، پیوندهای کووالانسی و غیرکووالانسی

نوع مقاله: پژوهشی

محمد عباسی[۱]، سحر طاوسی[۲]، محمد علیمردانی[۳*]

۱- گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- استادیار مهندسی پلیمر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات: M.Alimardani@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

۱- مقدمه

از حیاتی‌ترین بخش خودروها و تجهیزات حمل و نقل، می‌توان به تایرها اشاره کرد که توسعه صنعت خودروسازی جهانی باعث افزایش تقاضای قابل ملاحظه آن‌ها شده است. تقاضای رو به رشد تایر منتج به افزایش پسماند ناشی از تایرهای ازکارافتاده می‌شود که اغلب برای دفن و یا سوزاندن انباشته شده و منجر به آلودگی زیست محیطی جدی و خطرات بالقوه ایمنی می‌شوند [۱]. بنابراین، بازیافت تایرهای ازکارافتاده در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تاکنون روش‌های متعددی برای استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده به جهت عدم دفن کردن و یا سوزاندن آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. می‌توان مطابق با به روش‌های گوناگون بازیافت تایرها اعم از فیزیکی شامل خرد کردن تایرهای فرسوده و یا شیمیایی مانند تجزیه با اعمال حرارت بالا و غیره اشاره کرد (شکل ۱). هریک از این روش‌ها نیز به نوبه خود آلودگی‌های زیست محیطی، صرف هزینه و انرژی بالا برای خرد کردن و در عین حال تقاضای پایین برای چنین محصولی را به همراه دارد که بکارگیری این رویکردها را نیز محدود کرده است [۲]. رویکرد دیگر، استفاده از روش پیرولیز[1] است که هدف آن فرآیند پذیرکردن ضایعات تایر و تبدیل تایرها به سوخت مایع و سایر محصولات جانبی است [۳]. با اینحال، اگرچه این روش محدودیت زیست محیطی کمتری دارد، اما این فرآیند خارج از چرخه معمول بازیافت تایرهاست. این روش منجر به کاهش مصرف منابع طبیعی و انرژی مورد نیاز برای تولید محصولات جدید می‌شود، با این حال مقاومت شیمیایی و پایداری حرارتی تایر می‌تواند باعث اختلال در انجام این فرایند شود [۴]. صنعت مدرن تایرسازی، از تایرهای سبز به عنوان جایگزینی عالی برای تایرهای سنتی که نقش مهمی نیز در حفاظت از محیط زیست دارند، یاد می‌کند. زیرا مواد سمی و مضر کمتری در ساخت آن‌ها وجود دارد و سرعت تجزیه بالاتری دارند. در این تایرها ویژگی‌هایی اعم از زیست‌پایداری و قابلیت بازیافت، استفاده از مواد سبز و تجدیدپذیر به جای لاستیک مورد استفاده در تایر، پرکننده‌ها و سایر اجزای شیمیایی ترکیب، منجر به مقاومت غلتشی کم (مصرف سوخت و تولید کم) و آلودگی صوتی کمتر ناشی از غلتش آن‌ها می‌شود. علاوه بر آن چنین تایری به هنگام مصرف ریز ذرات سایشی زیست تخریب‌پذیر تولید می‌کند [۵]. این تفکر جدید در طراحی تایر در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

از نظر ساختاری و شیمیایی برای حصول خواص مکانیکی مطلوب در لاستیکها، وجود پیوندهای کووالانسی برگشت‌ناپذیر ضروری است. برخی از پلیمرهای مهم مورد استفاده در تایر به همراه نقش اصلی آنها در جدول ۱ معرفی شده‌اند [۶]. شبکه سه بعدی که به هنگام پخت این الاستومرهای غیراشباع شکل می‌گیرد، خاصیت الاستیکی و مکانیکی، مقاومت شیمیایی و پایداری حرارتی را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد [۷]. با این حال، برگشت‌ناپذیری این نوع از اتصالات، بازیابی و فرآیندپذیری مجدد الاستومر مورد استفاده در تایرها را دشوار کرده است که امکان بازیافت را از محصول می‌گیرد. بنابراین، انتظار بر این است که استفاده از روش‌های پیشگیرانه‌ای که پیش از تولید یک تایر می‌توان اتخاذ کرد، احتمال دست‌یابی به محصولی با قابلیت پخت مجدد را جهت بازیافت افزایش دهد. به همین جهت، مطالعه و بررسی انواع پیوندها به‌ویژه پیوندهای تشکیل‌دهنده زمینه پلیمری لاستیک‌ها، می‌تواند امید بخش این مهم باشد [۸].

پیشگیری از چالش‌های بازیافتی قطعات لاستیکی نیازمند توسعه روش‌های پخت برگشت‌پذیر بوده که از یک سو متضمن خواص مکانیکی مطلوب در آمیزه‌ی لاستیکی باشد و از سوی دیگر استفاده مجدد از قطعات تولیدی را ممکن

1.Pyrolysis

سازد. استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها، امکان استفاده از پیوندهای مختلف، شامل برگشت‌پذیر کوالانسی و برگشت‌پذیر غیرکوالانسی، را فراهم می‌کند که در ادامه به طور کامل به آن پرداخته می‌شود.

۲- استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها در تایر

ترموپلاستیک الاستومرها (TPEs) به عنوان عضوی از یک خانواده متنوع از مواد با رفتار شبه‌لاستیکی هستند که برخلاف لاستیک‌های با اتصالات برگشت‌ناپذیر معمولی، قابلیت فرآیندپذیری مجدد را دارند [۹]. حضور شبکه‌های سه بعدی فیزیکی، الاستیسیته[1] و برگشت‌پذیری لازم را به پلیمر در محدوده دمای کارکرد خاصی می‌دهد اما به طور همزمان این امکان را فراهم می‌آورد تا در دمای بالا ماده رفتار گرمانرمی داشته باشد. ماهیت ترموپلاستیک الاستومرها، بر مبنای دو فاز پلیمری برگشت‌پذیر حرارتی است که جایگزین پیوند عرضی شیمیایی موجود در الاستومرهای گرماسخت می‌شوند. برای تضمین تشکیل اتصالات عرضی فیزیکی، بخش‌های پلیمری دو نوع ساختار مخالف به نام " نرم " و " سخت " دارند (شکل ۳). به طور خاص، بخش سخت جزء اصلی اتصالات عرضی فیزیکی است و مسئول مقاومت در ترموپلاستیک الاستومرهاست که با تشکیل بلورهای کوچک به وجود می‌آید و دائمی نیستند و با افزایش دما یا تورم از بین می‌روند. درسمت دیگر، بخش نرم خاصیت الاستومری دارد همچنین این فاز توسط یک دمای انتقال شیشه‌ای پایینتر از دمای عملکرد تعیین می‌شود [۱۰]. بخش‌های سخت و نرم در نتیجه ناسازگاری این دو نوع زنجیر پلیمری است که ترشوندگی[2] نامطلوب داشته و به اندازه کافی قابلیت انحلال ندارند که به یک فاز همگن برسند.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی در خصوص استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها در رویه‌ی تایر به عمل آمده است. سوال مهم قابلیت استفاده از این نوع جدید از زمینه پلیمری در کاربرد تایر و چگونگی تاثیر آن بر خواص مهندسی رویه تایر است. چوول[3] و همکاران در سال ۲۰۱۷، در گزارش‌های مهم و متعددی که در قالب ثبت اختراع از شرکت میشلن[4] منتشر شده است به تاثیر استفاده از یک ترموپلاستیک الاستومر بر خواص آمیزه رویه تایر پرداختند [۶, ۱۱-۱۴]. بر طبق این گزارشات، ترموپلاستیک الاستومرهای قطعه‌ای استایرنی هنگامی که در ترکیب رویه تایر به میزان مشخصی جایگزین الاستومر استایرن- بوتادی‌ان شوند، عملکرد تایر را بهبود می‌بخشند [۱۵]. بر مبنای نتایج حاصل شده، ترکیب جدید به کاهش بسیار زیاد در مقاومت غلتشی منجر شد [۱۱]. یکی دیگر از ویژگی‌های بارز تایر که برای طراحان بسیار چالش برانگیز است، حفظ تعادل بین ویژگی‌های متضاد رویه است. بهبود در هریک از سه ویژگی مهم مقاومت غلتشی[5]، مقاومت در برابر سایش[6] و چسبندگی خیس۶ که از آن به مثلث جادوئی[7] یاد می‌شود با تضعیف ویژگی دیگر همراه می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که ترموپلاستیک الاستومر پلی‌استایرن هیدروژنه (SEBS) مورد استفاده در ترکیب‌بندی رویه تایر، منجربه بهبود همزمان چسبندگی خشک و عملکرد بهتر مقاومت غلتشی می‌شود [۱۶].

در گزارش دیگری که در سال ۲۰۱۷ توسط مادلین[8] و همکاران صورت گرفت، مشاهده شد که به هنگام استفاده از یک ترموپلاستیک الاستومر حاوی استایرن (TPS) و جایگزینی آن با الاستومر استایرن بوتادی‌ان و اضافه شدن به ترکیب‌بندی رویه تایر، عملکرد تایر بهبود می‌یابد. همچنین توازن مطلوبی در خواص مثلث جادویی حاصل می‌شود (شکل ۳). استفاده از TPS به جای SSBR موجب کاهش ۲۵ درصدی در مقاومت غلتشی شده که به تبع آن بر کاهش مصرف سوخت خودرو بسیار موثر خواهد بود [۱۶]. نتایج واتس[9] و همکارانش نشان داد که کوپلیمرهای با قطعه‌های انتهایی پلی

1. Elasticity 2. Wet 3. Chouvel 4. Michelin
5. Rolling resistance 6. Abrasion resistance 7. Magic Triangle 8. Madeleine 9. Watts

لاکتیک اسید[1] و قطعه میانی نوعی از پلی کاپرولاکتون[2]خواص کششی، ازدیاد طول در پارگی و میزان اتلاف بسیار مناسب برای کاربردهای لاستیکی دارد و ویژگی‌های آن به نحوی است که با انواع کوپلیمرهای قطعه‌های استایرنی رقابت می‌کند. خواص استثنایی چنین مواد زیست-پایداری تابعی از گره‌خوردگی‌ها، دمای انتقال شیشه‌ای، شاخص‌های برهمکنش و درجه بلورینگی است. به طور ویژه، اثر دما و بر خواص مکانیکی مواد ذکر شده بسیار زیاد است. با این حال به رغم استفاده گستردهای که از پلی لاکتیک اسید می‌شود اما دمای انتقال شیشه‌ای نسبتا پایین (۵۵ درجه سانتی‌گراد) آن عملکرد دمای بالای این نوع از ترموپلاستیک الاستومرها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و انواع دیگر ترموپلاستیک الاستومرها با قطعه‌های سخت ظاهر می‌شوند.

وانگ[3] نشان داد که ایجاد کامپوزیتی از ترموپلاستیک الاستومر باقابلیت پخت (TPV) و لاستیک SBR منجر به بهبود خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام پارگی آمیزه کمک کند. در بررسی مشابه، امکان ترکیب این نوع از ترموپلاستیک الاستومر با آمیزه لاستیک طبیعی نیز تایید شد. تأثیر TPV بر NR با بهبود فرایندپذیری آمیزه همراه بوده است. بااین‌وجود، ترکیب TPV و NR منجر به افت رفتار الاستومری شده است که می‌تواند استفاده از آن را برای یک ترکیب‌بندی تایری محدود کند [۱۷]. اکویپو[4] و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی گسترده حول تأثیرگذاری لاستیک طبیعی در حالت خالص و اصلاح‌شده، لاستیک طبیعی اپوکسی‌دار شده (ENR) و همچنین لاستیک طبیعی پیوند با PMMA بر ترموپلاستیک پلی‌یورتان (TPU) پرداخت نتایج نشان‌می‌دهد ترکیب TPU/MNR خواص مکانیکی مطلوب با بهبود الاستیسیته و کاهش سختی ترکیب در مقایسه با سایر آمیزه‌های لاستیکی ایجاد می‌شود. با برجسته‌تر شدن اثرات آنتروپی در ترکیب آمیزه‌ها ضریب اتلاف پایین‌تر گزارش شده‌است. با این حال پایین بودن استحکام پارگی کامپوزیت‌ها باعث کاهش دوام و ازکارافتادگی زودهنگام برای آمیزه‌ها می‌شود که به‌کارگیری این ترکیب‌بندی را در آمیزه‌های تایری ناممکن می‌کند. همچنین تأثیر پرکننده تقویت‌کننده که جزءای جدایی‌ناپذیر از ترکیبات تایری است مورد بررسی قرار نگرفته است [۱۸].

مطالعات آمیت کومارسن[5] و همکاران در سال ۲۰۲۲ نشان داد که نوعی ترموپلاستیک الاستومر با ساختار سندیوتاکتیک دارای پتانسیل برآوردن الزامات کاهش ضریب مقاومت غلتشی تایرها از طریق کاهش اتلاف ترکیب است. خواص TPE سندیوتاکتیک می‌تواند به افزایش مدول ترکیب، هیسترسیس و ویژگی‌های رشد ترک خستگی در زمینه کمک کند. این تحقیق دو نوع از TPE در یک ترکیب دیواره جانبی بر اساس ترکیبی از NR و لاستیک بوتادین (BR) ارائه کرد. جایگزین‌کردن TPE با BR در ترکیب درصدهای ۵۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب منجر به کاهش ۲۴ درصد و ۱۸ درصد در ضریب اتلاف ($\tan\delta$) در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با آمیزه مرجع می‌شود. علاوه بر این، استفاده از TPE به میزان ۵۰ Phr منجر به افزایش ۱۲ درصدی سختی دینامیکی می‌شود. پراکندگی یکنواخت TPE در زمینه لاستیکی از طریق تجزیه‌وتحلیل میکروسکوپ اتمی نشان می‌دهد نرخ رشد ترک خستگی کاهش‌یافته ترکیب دیواره جانبی تایر با افزودن ترموپلاستیک الاستومر به دلیل انحراف در مسیر ترک محرز می‌شود [۱۹, ۲۰].

۳- طراحی سامانه‌های لاستیکی با پخت برگشت‌پذیر از طریق تغییر پیوند

القای قابلیت فرایندپذیری مجدد و بازیافت لاستیک می‌تواند با حضور پیوندهای عرضی که به‌صورت دینامیکی قابلیت شکست و احیای برگشت‌پذیر دارند صورت پذیرد. بااین‌حال، اتصالات عرضی قابل‌تعویض[6] اغلب منجر به خواص مکانیکی متوسطی می‌شود که با مقاومت کم در برابر خزش[1]، گرما یا

1.Polylactic Acid 2. Polycaprolactone 3. Wang
4. Ekvipoo Kalkornsurapranee 5. Amit Kumar Sen 6. Exchangeable

رطوبت همراه است. در این بخش، ابتدا مروری بر ماهیت و معرفی انواع پیوندها و سپس بررسی امکان یا عدم امکان استفاده از آن‌ها در لاستیک‌های مورداستفاده در ترکیب تایر گزارش می‌گردد.

۳-۱- انواع پیوندها

ماهیت پیوندها به دو دسته کلی برگشت‌پذیر (فیزیکی) و برگشت ناپذیر (کووالانسی شیمیایی) تقسیم کرد [۲۱]. با توجه به شکل ۵، پیوندهای برگشت‌پذیر فیزیکی همان گروه‌های سوپرامولکولی[۲] هستند. از نقطه نظر سازوکار مولکولی می‌توان گفت، این گروه‌ها دارای قابلیت نوعی برهم‌کنش هستند تا امکان شکست و بازتشکیل آن‌ها با اعمال محرک بیرونی همچون دما فراهم شود. پیوندهای هیدروژنی[۳]، برهم‌کنش یونی[۴]، پیوند پای-پای[۵] و پیوندهای فلز-لیگاند از این دسته از پیوندها هستند. این پیوندهای غیرکووالانسی برگشت‌پذیر اغلب به‌عنوان پیوندهای فداشونده فیزیکی عمل می‌کنند. بنابراین، ابتدا با انرژی مکانیکی در اثر بارگذاری خارجی شکسته می‌شوند تا از آسیب شبکه غیرقابل برگشت متقابل محافظت کند. در نتیجه، ساختار سه‌بعدی ترکیبات لاستیکی را حفظ می‌کند [۲۲]. از طرف دیگر، پیوندهای کووالانسی شیمیایی موجود در سامانه برای افزایش خواص عملکردی آمیزه نیاز است. اتصالات عرضی دائمی نوعی از این پیوندها هستند که قابلیت شکست و بازتشکیل را ندارند. با این حال، نوع دیگری از پیوندهای شیمیایی موسوم به شبکه اتصالات قابل تنظیم[۶] توسط پیوندهای کووالانسی پویا تشکیل می‌شوند. این پیوندها دائما شکسته و مجدد شکل می‌گیرند. مانند پیوندهای گوگرد-گوگرد، دیلز-آلدر[۷] و ویتریمرها [۸] که از پیوندهای سوپرامولکولی قوی‌تر و پایدارتر هستند [۲۳]. در ادامه به بررسی برخی از این پیوندها و نحوه عملکرد آنها پرداخته شده است.

۳-۲- پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر

یک روش ممکن برای بازیافت و یا استفاده مجدد از الاستومرهای پخت شده، تشکیل شبکه‌های با اتصالات کووالانسی برگشت‌پذیر است [۲۴]. پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر می‌توانند از یک سو آرایش و ساختار پیوند خود را از طریق واکنش برگشت‌پذیر، ناشی از محرک‌های خارجی از جمله گرما و یا نور تغییر دهند و از سوی دیگر در غیاب این محرک‌ها، پایداری و خواص مکانیکی مشابه با پلیمرهای با اتصالات کووالانسی برگشت ناپذیر را از خود نشان می‌دهند. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی روی استفاده از پیوندهای کووالانسی برگشت‌پذیر در سنتز مواد جدید اختصاص یافته است که نه تنها بر معایب پلیمرهای کووالانسی دائمی غلبه می‌کند، بلکه قابلیت‌های جدیدی را نیز به الاستومر القا می‌کند. ویژگی‌هایی مانند خواص مکانیکی، خود ترمیمی، فرآیندپذیری مجدد، بازیافت درحالت جامد از جمله این موارد هستند [۲۵].

۳-۲-۱- پیوندهای دیلز-آلدر

مطالعاتی بر استفاده از واکنش‌های دیلز-آلدر به عنوان روشی برای دستیابی به اتصالات عرضی برگشت‌پذیر تمرکز کرده‌اند. واکنش‌های دیلز-آلدر یک واکنش اضافه شدن حلقه (۲+۴) بین دی-ان[۹] غنی از الکترون و دی انوفیل[۱۰] خالی از الکترون است که یک محصول حلقه ششتایی تولید می‌کند که می‌تواند از طریق واکنش عکس دیلز-آلدر در دماهای بالاتر به صورت واکنش برگشتی عمل‌کند شکل ۶. این واکنش به دلیل سینتیک سریع و شرایط واکنشی معتدل یکی از انتخاب‌های مطلوب است. یکی از مثال‌های نمادین واکنش دیلز-آلدر بین گروه‌های فوران[۱] و مالئیمید[۲] است. همچنین مالئیمید

1.Creep 2. Supramolecular Networks 3. Hydrogen Bonds 4. Ionic Interaction 5. π-π Interaction
6. Covalent Adaptable Network (CAN) 7. Diels–Alder 8. Vitrimers 9. Diene 10. Dienophile

می‌تواند با لاستیک طبیعی و سپس با فورفوریل آمین [3] وارد واکنش شود و لاستیک طبیعی متصل به گروه فوران (NR-g-furan) حاصل شود. با استفاده از این شبکه‌های دارای اتصالات عرضی برگشتپذیر، لاستیک پخت شده می‌تواند به طور مکرر ترمیم و مجددا استفاده شود. درنتیجه چرخه عمر نیز افزایش و منابع پسماند کاهش می‌یابند. این سناریو برای لاستیک EPDM نیز تایید شده است (شکل ۷) [۲۴].

الیان تروواتی[4] و همکاران در سال ۲۰۱۶ دریافتند که امکان اتصال عرضی لاستیک طبیعی به روش برگشتپذیر راه را برای یک حالت ساده بازیافت چنین قطعات الاستومری اساسی مانند لاستیک باز می‌کند. از سوی دیگر، اتصال لاستیک طبیعی با نانوالیاف سلولزی از طریق یک شبکه پیوسته از پیوندهای کووالانسی باید به طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی کامپوزیت را افزایش دهد. باتوجه‌به اینکه حداکثر دمایی که یک تایر در حال استفاده می‌تواند تجربه کند، حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد است و علاوه بر این، باتوجه‌به اینکه فرایند اتصال‌زدایی دیلز-آلدر نسبتاً کند است، تایرها بدون ازدست‌دادن عملکرد خود برای مدت طولانی این شرایط را تحمل می‌کنند. مطالعات فوق نشان‌دهنده اثبات این موضوع بود، اما برای تبدیل آن به یک برنامه کاربردی فناورانه از نظر فرایند بازیافت واقعی، به تحقیقات بیشتری نیاز است [۲۶].

همچنین پلیمر مورداستفاده دیگر در صنعت تایر، لاستیک ایزوبوتیلن ایزوپرن[5] است، مصطفی[6] و همکارانش در سال ۲۰۱۳ استفاده از شیمی دیلز-آلدر برای ایجاد قابلیت برگشت پذیری پخت در لاستیک ایزوبوتیلن ایزوپرن استفاده کردند. با این حال، به کارگیری شیمی دیلز - آلدر در ایزوپرن با محدودیت‌هایی همراه است که از آن جمله می‌توان به عدم تکمیل مطلوب واکنش و حصول مخلوطی از محصول‌های متنوع بدست آمده در حین اصلاح دی-ان اشاره کرد. به عنوان سایر محدودیت‌های دیلز-آلدر می‌توان به بررسی‌های پائولو تاناسی[7] و همکاران در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد که در آن مشاهده شد در این سامانه‌ها مدول ذخیره و مدول اتلاف، با افزایش دما کاهش می‌یابند، زیرا با انجام واکنش عکس دیلز-آلدر شبکه اتصالات عرضی خود را از دست می‌دهد و ماده نرمتر می‌شود. برعکس، با کاهش دما، مدول به دلیل فرآیند ایجاد اتصالات عرضی که توسط واکنش دیلز- آلدر انجام می‌شود، افزایش می‌یابد. بنابراین در این سامانه‌ها تابعیت دمایی خواص افزایش می‌یابد [۲۷].

۲-۲-۳-پیوندهای بر پایه ویتریمرها

یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای بدست آوردن مادهای با خواص لاستیکی بسیار خوب اعم از الاستیسیته، خواص کششی بالا، مقاومت در برابر حلال، ویژگی‌های اتلافی مناسب و همچنین قابلیت فرآیندپذیری مجدد، واردکردن پیوندهای عرضی ویتریمر در یک لاستیک مطابق با شکل ۸ است [۲۸]. از نظر تحول زمانی، تاریخچه ویتریمرها به فعالیت لیبلر[8] و همکاران در سال ۲۰۱۱ برمی‌گردد [۲۹].

ویتریمرها شبکه‌های دائمی از زنجیره‌های پلیمری هستند که از طریق پیوند کووالانسی پویا به هم متصل شده‌اند و به شبکه اجازه می‌دهند تا توپولوژی (مکان)[9] خود را تغییر دهد و در عین حال تعداد پیوندهای شیمیایی ثابتی را در تمام دماها حفظ کند. همچنین دو روش اصلی برای تهیه ویتریمرها وجود دارد. در روش اول با استفاده از بسپارش مونومرهای چندعامله[10] شبکه‌ای با پیوندهای کووالانسی پویا ایجاد می‌شود. در حالی که در روش دوم، با هموپلیمریزاسیون در حضور یک جزء دوعامله حاوی پیوند کووالانسی پویا، ویتریمر تولید می‌شود [۳۰]. بنابراین، خواص ویسکوالاستیک ویتریمرها توسط دو دمای انتقال مختلف تعیین می‌شود. یکی دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) و دیگری دمای انتقال انجماد توپولوژیکی (T_v)، که انتقال از یک جامد ویسکوالاستیک به یک مایع ویسکوالاستیک را توصیف

1. Furan 2. Maleimide 3. Furfuryl amine 4. Eliane Trovatti 5. Isobutylene-Isoprene Rubber (IIR)
6. Mostafa 7. Paolo Thanassi 8. Leibler 9. Topology 10. Multifunctional monomers

می‌کند [۳۱]. مطابق با شکل ۹، در دماهای زیر ویتریمرها، واکنش‌های تبادل پیوند آهسته است و توپولوژی شبکه منجمد می‌شود، بنابراین ماده مانند یک ترموست رفتار می‌کند [۳۲]. در دماهای بالاتر از، ویسکوزیته ویتریمرها، به شکل آرنیوسی کاهش می‌یابد. همچنین در بالای خود، مواد مبتنی بر ویتریمر واکنش‌های تبادل را سریع نشان می‌دهند که شبکه را قادر می‌سازد جریان یابد، بنابراین نواحی شیشه‌ای[1] قابلیت تغییر شکل، فرآیند مجدد، بازگشت‌پذیری (بازیافت) و خود ترمیم‌شدن را بدست می‌آورند [۲۳]. یکی از رویکردهای آسان برای دستیابی به ویتریمرهای الاستومری با استحکام مکانیکی، قابلیت انعطاف، چکشخواری و قابلیت بازیافت، اصلاح سطح سیلیکا با گروه‌های سلیلاتر[2] مطابق با شکل ۱۰ است. سیلیکا به دلیل سیلان‌های سطحی فراوان هم بهعنوان تقویت‌کننده و هم به‌عنوان پیوند متقابل عمل می‌کند تا به شبکه‌ها استحکام مکانیکی و استحکام شیمیایی بدهد.

علاوه بر این، این شبکه‌های دائمی می‌توانند ساختار توپولوژی را بر اساس ترانس‌اکسی‌آلکیلاسیون ناشی از دما در فاز الاستومر- سیلیکا تغییر دهند و انعطاف‌پذیری و بازیافت‌پذیری را برای مواد حاصل کنند. از رویکرد فوق به‌عنوان یک راه‌حل آسان و جهان - شمول به‌سوی ویتریمرهای هیبریدی آلی/غیرآلی ادغام شده یاد شده است. برای اثبات این مفهوم از لاستیک طبیعی اپوکسیدار شده برای ترکیب با سیلیکا استفاده شد. بخش‌های اپوکسی می‌توانند با گروه‌های سیلانول[3] سطحی روی ذرات سیلیس در حضور کاتالیزور اسید لوئیس واکنش دهند و باعث ایجاد پیوندهای سیلیلاتری[4] تعویضی شوند. در چنین شرایطی، سیلیس هم به‌عنوان تقویت‌کننده و هم به‌عنوان پیوند متقابل برای تقویت شبکه‌ها با استحکام شیمیایی و مکانیکی عمل می‌کند. در همین حال، شبکه‌های تشکیل شده می‌توانند ساختار شبکه توپولوژیکی را بر اساس واکنش‌های ترانس‌آلکیلاسیونس‌طحی در دماهای بالاتر تغییر دهند که بازیافت‌پذیری و انعطاف‌پذیری را به مواد هیبریدی ارائه می‌کند [۳۳]. با این حال، اعمال پیوندهای ویتریمری محدودیت‌ها و چالش‌هایی را به همراه دارد. به عنوان مثال، عملکرد مکانیکی، به ویژه استحکام کششی نهایی ویتریمرهای الاستیک طراحی شده، هنوز در مقایسه با ترموپلاستیک الاستومرهای صنعتی و گرماسخت ناکافی است. همچنین، ویتریمرهای الاستیک در مقیاس آزمایشگاهی سنتز می‌شوند که هنوز از کاربردهای صنعتی در مقیاس بزرگ فاصله دارند.

۳-۲-۳- ترانس آلکیلاسیون

طبق بررسی‌های تانگ[5] و همکاران در سال ۲۰۱۸، یک روش امکانپذیر برای بازیافت لاستیک پخت شده با گوگرد واکنش تبادل ترانس آلکیلاسیون[6] پیوندهای C-S (کربن-گوگرد) است که بازآرایی شبکه با اتصال عرضی لاستیکی را امکان‌پذیر می‌کند و به مواد قابلیت فرایندپذیری مجدد می‌دهد (شکل ۱۱). فرآیند پخت گوگرد باعث ایجاد اتصالات تک، دی و پلیسولفیدی[7] بین زنجیرهای لاستیکی می‌شود. به خوبی مشاهده شده است که پیوندهای دی و پلی سولفیدی به صورت دینامیکی عمل می‌کنند که می‌توانند بعد از گرم شدن تحت واکنش‌های مبادله[8] قرار بگیرند، درنتیجه در سطح مولکولی، تنها مانع برای بازیافت لاستیک‌های پخت شده با گوگرد، ممکن است به دلیل وجود پیوندهای تک سولفیدی برگشت ناپذیر باشد. سازوکار واکنش ترانس‌آلکیلاسیون[9] پیوندهای C-S ممکن است به دنبال یک جایگزین نوکلئوفیلی[10] از نوع SN_2 باشد که در آن اتم گوگرد نوکلئوفیلهای تی-الاتر به گروه آلکیل نمک سولفونیم[11] حمله می‌کنند و منجر به انتقالات آلکیلی برای تولید نمک سولفونیم می‌شود [۳۳].

1. Glassy 2. Salyl ether 3. Silanol 4. Silyl ether 5. Tang 6. Trans alkylation
7. mono, di and polysulfide 8. Exchange reaction 9. Transalkylation 10. Nucleophilic 11. Alkyl sulfonium salt

گوگردزدایی[1] که در نتیجه شکستن از طریق عملیات فیزیکی و شیمیایی است، یک روش امیدوارکننده برای بازیافت است. اما این روش نیز چالش و محدودیت‌های خود را دارد؛ زیرا گوگردزدایی ممکن است منجر به شکستن زنجیرهای پلیمری شود که خواص محصول را بعد از فرایند بازیافت کاهش دهد [۳۴].

۳-۳- پیوندهای غیر کووالانسی برگشت‌پذیر

پیوندهای غیر کووالانسی برگشت‌پذیر با پیوندهای کووالانسی متفاوت هستند، زیرا این پیوندها شامل انتقال الکترون نمی‌شوند، بلکه شامل تغییرات پراکنده‌تری از بر همکنش‌های الکترومغناطیسی بین مولکول‌ها هستند. پیوندهای غیر کووالانسی را می‌توان به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد، مانند اثرات الکترواستاتیک، نیروهای واندروالسی و پیوندهای سوپرامولکولی که مورد آخر در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۳-۳- بر همکنش‌های سوپرامولکولی[2]

برهمکنش‌های فوق مولکولی از دسته برهمکنش‌های غیرکووالانسی مانند، پیوندهیدروژنی، پیوند یونی، پیوندهای π-π و ترکیبات لیگاند-فلز می‌باشند. مطالعاتی پیرامون ادغام پیوندهای سوپرامولکولی و لاستیک طبیعی مطابق با شکل ۱۲ صورت پذیرفته است. از این طریق بهبود فرآیند خودترمیمی با ترکیب phr ۲۰ آلژینات سدیم [3] و لاستیک طبیعی، به بیش از ۵۰ درصد رسیده است [۳۵]. با این حال، با توجه به مقایسه‌ای که در جدول ۲ برای پیوندهای مختلف گزارش شده است به خوبی می‌توان پیبرد که برهمکنشهای فوق مولکولی ضعیفتر از آن هستند که به تنهایی بتوانند مورد استفاده قرارگیرند و در خیلی از مواقع به عنوان پیوندهای فداشونده[4] همراه با اتصالات عرضی کووالانسی دائمی یا پویا عمل می‌کنند. با این حال، این برهمکنشهای برگشتپذیر می‌توانند خواص مکانیکی پلیمرها را به طور خود به خود بازیابی و اصلاح کنند تا یکپارچگی و خواص آنها حفظ شود. در نتیجه می‌توان گفت استحکام پیوند لزوما با استحکام کششی و راندمان خودترمیم شوندگی در پلیمرها مرتبط نیست [۲۳].

۴- نتیجه‌گیری

حجم عظیم مواد الاستومری زیست تخریب‌ناپذیری که هر ساله تولید و سپس به پایان چرخه مصرف خود می‌رسد، چالش بسیار مهم اقتصادی و زیست‌محیطی به دنبال دارد. رویکردهای در دسترس فعلی استفاده مجدد از این مواد در شکل پودر شده و یا بازپخت شده است که معمولاً با کاهش خواص در زمینه پلیمری جدید همراه می‌شود. در رویکرد دیگر، تلاش می‌شود که چالش بازیافت ناپذیری با اصلاح ریز ساخت‌های الاستومرها مرتفع شود و به طور پیشگیرانه صرفاً سامانه‌های باقابلیت پخت برگشت‌پذیر مورداستفاده قرار گیرد. نتایج در خصوص استفاده از پیوندهای دیلز-آلدر و شیمی ویتریمر به‌رغم ضعف‌هایی که هر یک از این دو روش دارند، برای ایجاد شبکه برگشتپذیر رضایتبخش بوده است. استفاده از ترموپلاستیک الاستومرها با پیوندهای فیزیکی یکی دیگر از مسیرهای موفق است. نشان‌داده‌شده است که استفاده از این مواد در کاربرد رویه تایر علاوه بر مزیت برگشتپذیری پخت، تأثیرات بسیار مطلوبی بر خواص رویه تایر دارد. نقش تقویت‌کنندگی ترموپلاستیک الاستومرهای قطعه‌ای و نیاز به کاهش استفاده از پرکننده تقویتی به هنگام استفاده از آنها، یکی از سازوکارهای احتمالی تأثیر مثبت ترموپلاستیک الاستومرها بر کاهش مقاومت غلتشی تایر است.

1. Desulfurization 2. Supramolecular 3.Sodium alginate (SA) 4. Sacrificial bonds

مراجع

1. FREEDONIA, G., World Enzymes: Industry Study with Forecasts for 2017 & 2022. The Freedonia Group, 2014.

2. Han, W., D. Han, and H. Chen, Pyrolysis of Waste Tires: A Review. Polymers, 2023. 15(7): p. 1604.

3. Serio, M.A., et al., Pyrolytic reprocessing of scrap tires into value-added products, in Conversion and utilization of waste materials. 2023, Routledge. p. 105-122.

4. Hu, S., et al., Highly Efficient Pyrolysis of Waste High-Temperature Vulcanized Silicone Rubber Assisted by Mechanochemical Milling. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022. 62(1): p. 238-246.

5. Shoul, B., et al., Investigating the potential of sustainable use of green silica in the green tire industry: A review. Environmental Science and Pollution Research, 2022. 29(34): p. 51298-51317.

6. Naddeo, M., et al., Degradable elastomers: Is there a future in tyre compound formulation? Molecules, 2021. 26(15): p. 4454.

7. Myhre, M., et al., Rubber recycling: chemistry, processing, and applications. Rubber chemistry and technology, 2012. 85(3): p. 408-449.

8. Chavhan, P., et al. Recycling of Rubber Scrap Tyres and Its Processes of the Utilization. in 2022 5th International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST). 2022. IEEE.

9. Morton, M., Rubber technology. 2013: Springer Science & Business Media.

10. Holden, G., Thermoplastic elastomers, in Applied Plastics Engineering Handbook. 2024, Elsevier. p. 97-113.

11. Chouvel, C., E. Custodero, and M. Greiveldinger, Tire provided with a tread comprising a thermoplastic elastomer and a diene elastomer. 2017, Google Patents.

12. Vincent, A., et al., Tire provided with a tread comprising a thermoplastic elastomer. 2019, Google Patents.

13. Chouvel, C., Tire provided with a tread comprising a diene elastomer and thermoplastic elastomer system. 2020, Google Patents.

14. Chouvel, C., Tire provided with a tread comprising a diene elastomer, a thermoplastic elastomer and a thermoplastic resin having polyphenylene ether patterns. 2021, Google Patents.

15. Vincent, A. and E. Custodero, Tire provided with a tread comprising a thermoplastic elastomer. 2017, Google Patents.

16. Harper, M., et al., Tire tread performance modification utilizing polymeric additives. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2017. 1(2017-01-1502): p. 179-189.

17. Wang, Z., W. Yu, and X. Cheng, Mechanical and morphological properties of thermoplastic vulcanisates based on ethylene vinyl acetate copolymer and styrene butadiene rubber. Plastics, rubber and composites, 2011. 40(5): p. 229-233.

18. Thitithammawong, A., et al., The use of reclaimed rubber from waste tires for production of dynamically cured natural rubber/reclaimed rubber/polypropylene blends: Effect of reclaimed rubber loading. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2019. 29(2).

19. Kalkornsurapranee, E., et al., Novel thermoplastic natural rubber based on thermoplastic polyurethane blends: Influence of modified natural rubbers on properties of the blends. Iranian Polymer Journal, 2012. 21: p. 689-700.

20. Sen, A.K., et al., Improvement of thermo-mechanical and fatigue crack growth resistance of tire sidewall compound by introducing syndiotactic polybutadiene. Journal of Applied Polymer Science, 2022. 139(28): p. e52602.

21. Jiang, Q., et al., Biodegradable Natural Rubber Based on Novel Double Dynamic Covalent Cross-Linking. Polymers, 2022. 14(7): p. 1380.

22. Sani, N.F.M., et al., Intrinsic self-healing rubber: A review and perspective of material and reinforcement. Polymer Testing, 2022. 111: p. 107598.

23. Wemyss, A.M., et al., Dynamic crosslinked rubbers for a green future: A material perspective. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2020. 141: p. 100561.

24. Tanasi, P., et al., Thermo-reversible crosslinked natural rubber: A Diels-Alder route for reuse and self-healing properties in elastomers. Polymer, 2019. 175: p. 15-24.

25. Zhang, Z.P., M.Z. Rong, and M.Q. Zhang, Polymer engineering based on reversible covalent chemistry: A promising innovative pathway towards new materials and new functionalities. Progress in Polymer Science, 2018. 80: p. 39-93.

26. Trovatti, E., et al., Furan-modified natural rubber: A substrate for its reversible crosslinking and for clicking it onto nanocellulose. International journal of biological macromolecules, 2017. 95: p. 762-768.

27. Abd Rabo Moustafa, M.M. and E.R. Gillies, Rubber functionalization by Diels–Alder chemistry: from cross-linking to multifunctional graft copolymer synthesis. Macromolecules, 2013. 46(15): p. 6024-6030.

28. Imbernon, L. and S. Norvez, From landfilling to vitrimer chemistry in rubber life cycle. European Polymer Journal, 2016. 82: p. 347-376.

29. Alabiso, W. and S. Schlögl, The impact of vitrimers on the industry of the future: Chemistry, properties and sustainable forward-looking applications. Polymers, 2020. 12(8): p. 1660.

30. Van Zee, N.J. and R. Nicolaÿ, Vitrimers: Permanently crosslinked polymers with dynamic network to-

pology. Progress in Polymer Science, 2020. 104: p. 101233.

31. Denissen, W., J.M. Winne, and F.E. Du Prez, Vitrimers: permanent organic networks with glass-like fluidity. Chemical science, 2016. 7(1): p. 30-38.

32. Capelot, M., et al., Metal-catalyzed transesterification for healing and assembling of thermosets. Journal of the american chemical society, 2012. 134(18): p. 7664-7667.

33. Tang, Z., et al., A real recycling loop of sulfur-cured rubber through transalkylation exchange of C–S bonds. Green Chemistry, 2018. 20(24): p. 5454-5458.

34. Liu, R., et al., Preparation and properties of diolefin rubber based on dynamically reversible bonding crosslinking. Polymer Engineering & Science, 2022.

35. Shen, Q., et al., Sodium alginate crosslinked oxidized natural rubber supramolecular network with rapid self-healing at room temperature and improved mechanical properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021. 150: p. 106601.

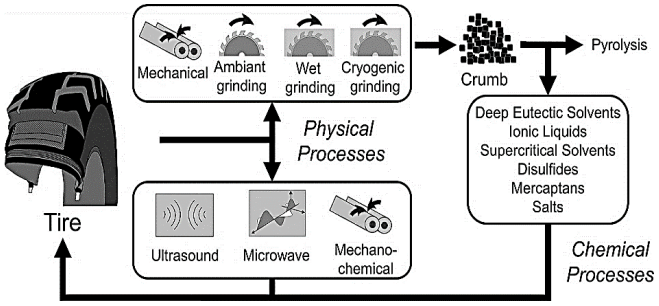
36. Bockstal, L., et al., Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. Journal of Cleaner Production, 2019. 236: p. 117574.

37. Amin, S. and M. Amin, Thermoplastic elastomeric (TPE) materials and their use in outdoor electrical insulation. Rev. Adv. Mater. Sci, 2011. 29(1): p. 15-30.

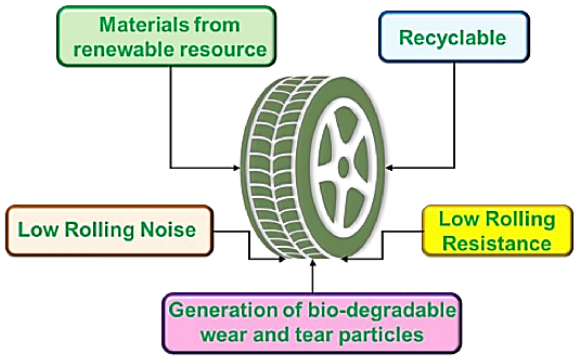
38. Luo, J., et al., Elastic vitrimers: Beyond thermoplastic and thermoset elastomers. Matter, 2022. 5(5): p. 1391-1422.

39. Wu, S., et al., Malleable organic/inorganic thermosetting hybrids enabled by exchangeable silyl ether interfaces. Journal of Materials Chemistry A, 2019. 7(4): p. 1459-1467.

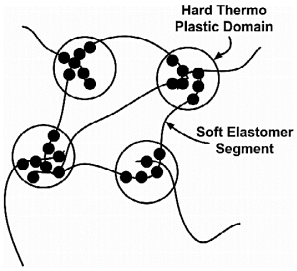
شکل‌ها و جداول:



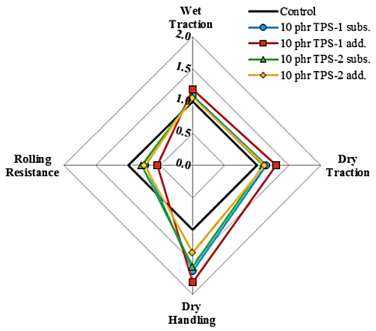
شکل ۱: روش‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده جهت استفاده مجدد از لاستیک‌های فرسوده [۳۶].



شکل ۲: تصویری از جنبه‌های مختلف طراحی در یک تایر سبز با قابلیت جایگزینی برای تایرهای صنعتی سنتی [۵].



شکل ۳: تصویر بخش‌های نرم الاستومری و سخت پلاستیکی ترموپلاستیک الاستومر [۳۷].



شکل ۴: نحوه عملکرد و میزان تعادل ایجاد شده با اضافه کردن مقادیر TPS [۱۶].

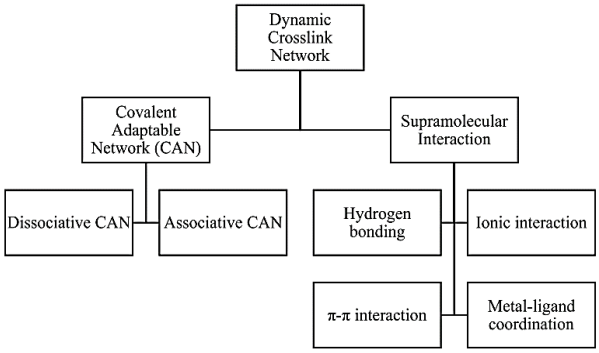
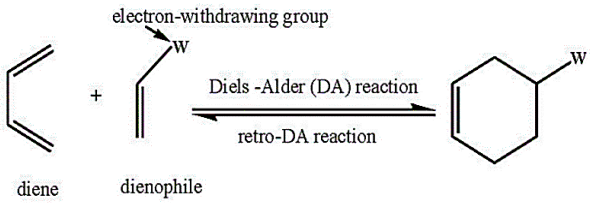
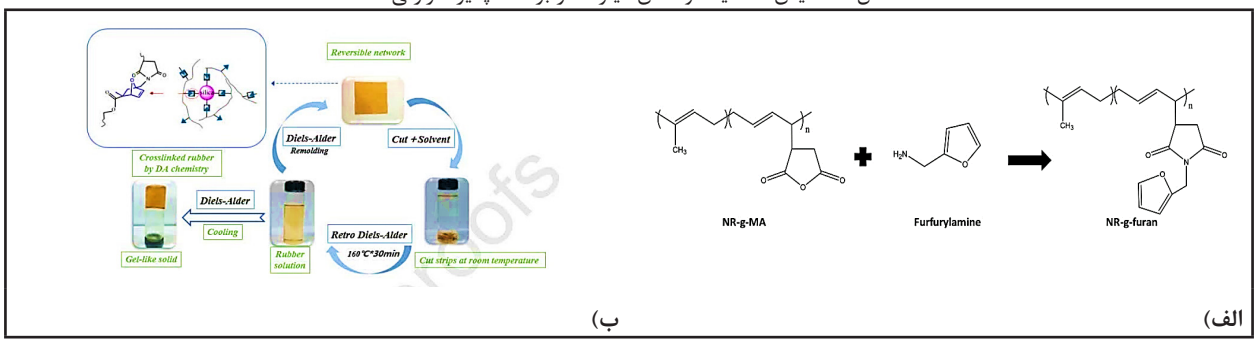


Fig. 1. Classification of dynamic crosslinked networks.

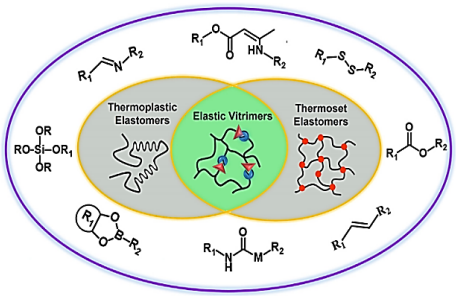
شکل ۵: دسته‌بندی انواع پیوندهای برگشت‌پذیر [۲۲].



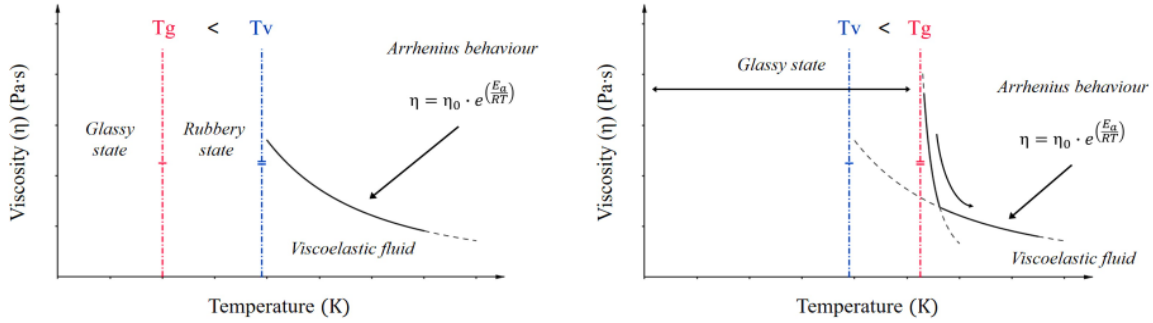
شکل ۶: نمایش شماتیک واکنش دیلز-آلدر برگشت‌پذیر حرارتی [۲۴].



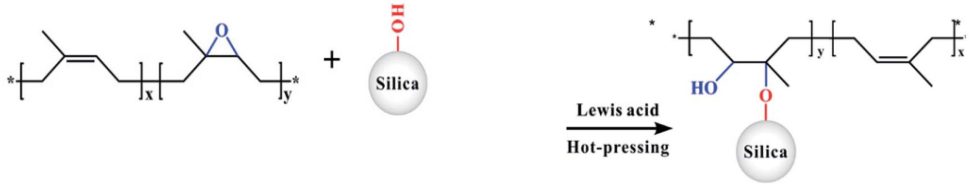
شکل ۷: واکنش شیمیایی بین NR-g-MA و فورفوریل آمین (الف) و همچنین شماتیک ترکیبندی و بازفرآیند لاستیک EPDM (ب) [۲۴].



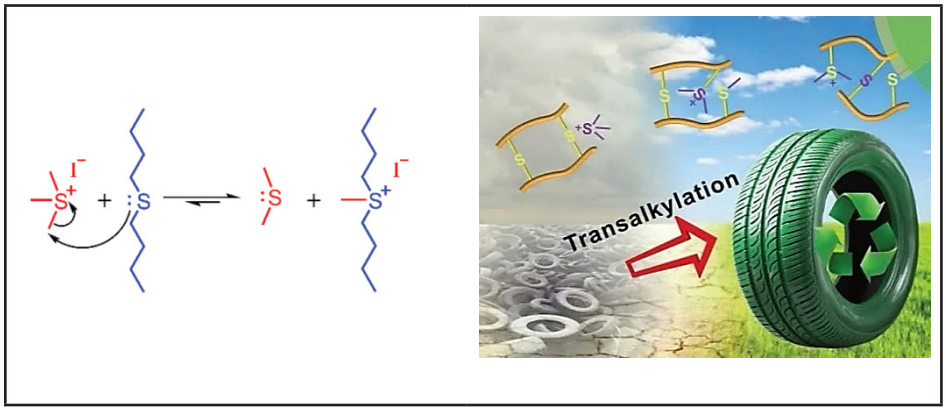
شکل ۸: ویتریمرهای الاستیک بر اساس پیوندهای کووالانسی دینامیکی مختلف [۳۸].



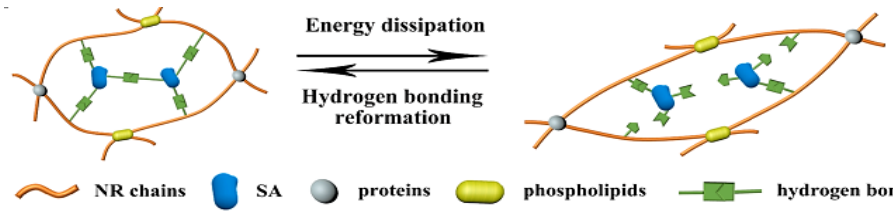
شکل ۹: رابطه میان دمای انتقال شیشه‌ای و دمای توپولوژیکی با رفتار ویتریمرها، سمت چپ: در صورت کمتر از در این سناریو، حالت شیشه‌ای و حالت لاستیکی قابل تشخیص است. سمت راست: با فرض کمتر از، جریان فقط در بالای قابل توجه است و بازآرایی پیوند متقابل دینامیک در نهایت غالب می‌شود [۲۹].



شکل ۱۰: اتصال عرضی برگشتپذیر توسط سیلیکا بر مبنای پیوند سیلیل اتر سطحی [۳۹].



شکل ۱۱: شماتیک واکنش ترانس آلکیلاسیون C-S و سولفید بوتیل [۳۳].



شکل ۱۲: تصویر سازوکار اتلاف انرژی برای فیلم کامپوزیت NR/SA از طریق شکست برگشتپذیر و اصلاح پیوندهای هیدروژن تحت تغییر شکل [۳۵].

جدول ۱: الاستومرهای استفاده شده در ترکیب تایر [۶].

الاستومر	ویژگی اصلی
لاستیک طبیعی[۱]	مقاومت در برابر پارگی/ مقاومت غلتشی پایین
پلی ایزوپرن[۲]	مقاومت در برابر پارگی
لاستیک بوتادین[۳]	مقاومت در برابر سایش
لاستیک استایرن بوتادین[۴]	مقاومت در برابر لغزش
لاستیک ایزوبوتیلن ایزوپرن[۵]	نفوذپذیری کم در برابر گاز
لاستیک ایزوبوتیلن ایزوپرن هالوژنه[۶]	نفوذپذیری کم در برابر گاز

جدول ۲: مقایسه میزان استحکام پیوندهای کووالانسی و غیرکووالانسی [۲۳].

نوع برهمکنش پیوندها	میزان استحکام (mol/kJ)
پیوند کووالانسی	۴۰۰-۱۰۰
کولمبی	۲۵۰
پیوند هیدروژنی	۶۵-۱۰
یون-دوقطبی	۲۰۰-۵۰
دوقطبی-دوقطبی	۵۰-۵
کاتیون-	۸۰-۵
	۵۰-۰
واندروالسی	کمتر از ۵
فلز-لیگاند	۴۰۰-۰

1. Natural Rubber 2. Polyisoprene 3. Butadiene Rubber
4. Styrene Butadiene Rubbe r 5.Isobutylene Isoprene Rubber 6. Halogenated Isobutylene Isoprene Rubber

IRM

Iranian Rubber Magazine
Vol.29, NO.115, Autumn 2024
Science & Technology

A Review of the Principles and Performance of Rubber Reversible Curing Systems with a Tire Application Perspective

Mohammad Abbasi[1], Sahar Tavosi[2], Mohammad Alimardani[3]*

1- Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Polymer Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor of Polymer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran Corresponding author

*Corresponding author Email: M.Alimardani@modares.ac.ir

Abstract

Preventing the challenges of rubber recycling requires the development of reversible curing methods, which on the one hand include favorable mechanical properties in the rubber compound, and on the other hand, enable the reuse of rubber parts. These methods include the use of thermoplastic elastomers, covalent reversible curing, and non-covalent reversible curing. The complete or partial replacement of irreversible crosslinking systems with this type of reversible junction is a new perspective and a preventive approach to solving the tire recycling challenge. The use of reversible covalent bonds such as Diels-Alder seems to be important for engineering applications. Due to the slow kinetics of Diels-Alder reverse reactions at the tire operating temperatures of Tire (the maximum temperature of which can be 80 °C), it is predicted that Diels-Alder chemistry can be a promising successful system. Vitrimer chemistry is another successful method in creating cure reversibility for rubber. Implementing this method with its great diversity in the chemical agents used is also possible. The use of physical bonds and supramolecular interactions has attracted a lot of research, but the mechanical properties obtained in this method are usually weaker than other reversible chemical methods. It has been reported that thermoplastic elastomers based on styrene block copolymers are efficient for tire applications. The important question is the ability to use this new type of polymer matrix in tire application and how it affects the engineering properties of the tire tread. The results have shown that thermoplastic elastomers, as the most effective candidate for solving the rubber recycling challenge have had an .additional important effect on reducing rolling resistance and other properties of the magic triangle of tires

Keywords: Recyclability; Curing reversibility; Thermoplastics elastomer; Covalent and non-covalent bonds