مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال هشتم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۰، تابستان ۱۴۰۲
Vol. 8, No. 2, Issue No. 30
Summer 2023, Quarterly
صفحه ۳۱-۱۹

Iran Polymer Technology: Research and Development

بازیافت تایرهای فرسوده

زهرا خوبی آرانی*

تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی پلیمر

چکیده ...

منبع اصلی لاستیک‌های ضایعاتی، تایرهای فرسوده است. بازیافت این تایرها به‌دلیل حجم بالای تولید و ساختار بسیار شبکه‌ای و درنتیجه ماهیت زیست‌تخریب‌ناپذیر از نظر محیط‌زیست اهمیت زیادی دارد. این امر منجر به لزوم یافتن روش‌های آسان، ارزان و با مصرف بهینه انرژی برای بازیافت تایرهای فرسوده شده است. تاکنون، مطالعات زیادی به بهبود روش‌های بازیافت متداول و معرفی روش‌های جدید برای مدیریت تایرهای فرسوده اختصاص داده شده‌اند. روکش مجدد، سوزاندن، گرماکافت و آسیاب کردن، روش‌های بازیافت تایرهای فرسوده هستند. با فرایند روکش مجدد، می‌توان عمر تایر استفاده شده را با حذف آج قبلی و اعمال آج جدید افزایش داد. در اثر سوزاندن تایرهای فرسوده می‌توان از انرژی بازیابی شده به‌عنوان منبع سوخت برای تولید بخار، انرژی الکتریکی و انرژی لازم در تهیه خمیر کاغذ، کاغذ، آهک و فولاد استفاده کرد. با تجزیه گرمایی تایرهای فرسوده در فرایند گرماکافت، می‌توان نفت، گاز و زغال به‌دست آورد. روش اصلی بازیافت تایرهای فرسوده، آسیاب کردن آن‌ها برای جاسازی ذرات در زمینه‌های پلیمری است. خرد کردن محیطی و سرمایشی رایج‌ترین روش‌های آسیاب کردن تایرهای فرسوده است. کاهش اندازه ذرات منجر به سطح ویژه بزرگ‌تر و توزیع بهتر آن‌ها در زمینه‌های پلیمری می‌شود. از این ذرات می‌توان به‌عنوان پرکننده در آسفالت، بتون و پلیمرهای شکننده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی:

تایر،
بازیافت،
لاستیک

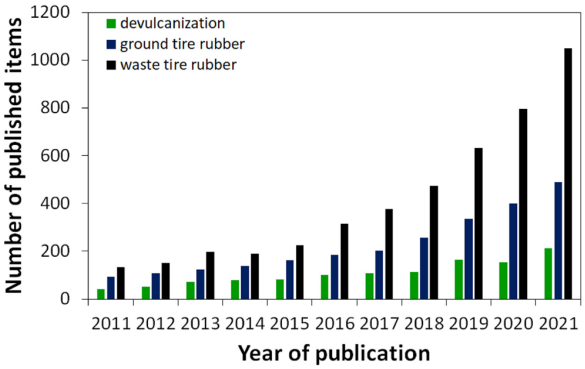
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
khoubi@sut.ac.ir

۱ مقدمه

لاستیک‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند وسایل خانگی، بهداشتی، نظامی، خودرو و ساختمان به‌صورت گسترده کاربرد دارند. انجمن سازندگان لاستیک و تایر اروپا (ETRMA) تخمین زدند ۶۵٪ تولید وسایل معمولی لاستیکی به بخش خودرو (مانند تایرها، درزگیرها، تیغه‌های برف پاک‌کن، کمربند، شیلنگ، واشر و ...) اختصاص دارد. در این میان، تایرهای خودروهای مسافربری و کامیون‌ها، کاربرد اصلی لاستیک‌های ولکانشی (Vulcanized) است. این محصولات در عمر خود در برابر شرایط سخت در هوای آزاد (Outdoor) مانند عوامل شیمیایی، دماهای بالا، تابش و تنش‌های برشی مقاومت بالایی نشان می‌دهند. در واقع، فرایند ولکانش منجر به تشکیل ساختار اتصال‌عرضی‌شده درون لاستیک می‌شود که می‌تواند آن را در برابر کاربردهایی با دمای بالا و برش شدید و عوامل محیطی مقاوم کند [۳-۱].

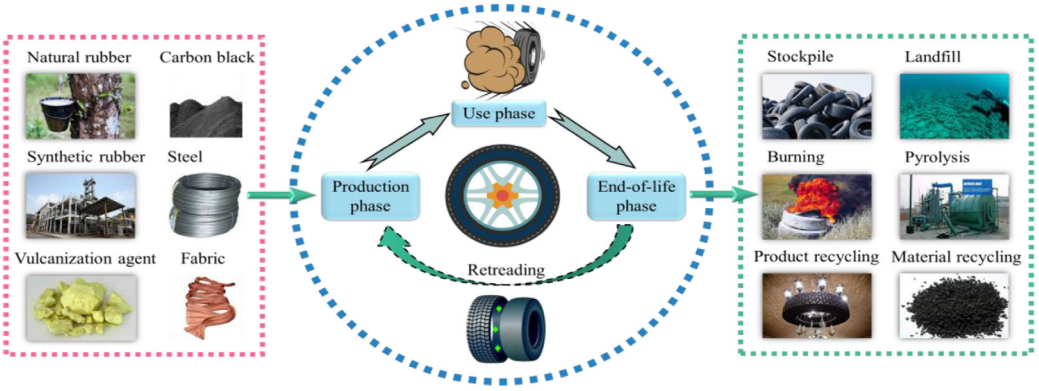
برخلاف انتظار عمر بالا از تایرهای جدید که حداقل هشتاد هزار مایل است، تعداد زیادی از لاستیک‌های فرسوده به‌صورت سالیانه در کل جهان به‌دلیل افزایش تعداد ماشین‌ها و جاده‌ها تولید می‌شود (حدود یک میلیارد در هر سال). پیش‌بینی شده است تعداد تایرهای فرسوده تولیدشده در محیط زیست تا سال ۲۰۳۰ به ۱۲۰۰ میلیون تایر در هر سال برسد. بنابراین، منبع اصلی لاستیک‌های ضایعاتی، تایرهای فرسوده است. از منظر محیط‌زیست، بازیافت این تایرها با ساختار زیست‌تخریب‌ناپذیر و حجم بالایی از تولید، نیازمند رویکردهای مدیریتی است و قوانین بازیابی و دفع (Disposal) تایرهای فرسوده توسط دولتمردان و سازمان‌های محیط‌زیست وضع شده است. از منظر اقتصادی، تایرهای فرسوده با هزینه کم می‌توانند در بازارهای مختلفی مانند سوخت‌های استخراج شده از تایر، روسازی آسفالت، بتون، آلیاژها وکامپوزیت‌های پلاستیکی و ترکیبات لاستیکی استفاده شوند. تعداد پژوهش‌های انجام شده در زمینه بازیافت تایرهای فرسوده نیز افزایش قابل‌توجهی در سال‌های اخیر داشته است، شکل ۱ [۶-۱].

چرخه عمر تایرها شامل اجزای اصلی برای تولید تایر و برخی از روش‌های دفع تایرهای فرسوده، در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌دلیل ترکیب درصد بسیار پیچیده (تعداد زیاد اجزای مختلف با محدوده گسترده‌ای از غلظت)، بازیافت تایرهای فرسوده از طریق روش‌های دوست‌دار محیط‌زیست و ارزان، چالشی جدی برای صنایع تایر محسوب می‌شود. روش‌های اصلی دفع تایرهای فرسوده را می‌توان به شش دسته تقسیم کرد: ۱- انباشت و خاک‌چال (Landfill) به‌عنوان



شکل ۱ تعداد مقالات منتشر شده دارای عبارات "واولکانش" (Devulcanization)، "لاستیک تایر آسیاب‌شده" (Ground Tire Rubber) و "لاستیک تایر فرسوده"، در بازه ۲۰۲۱-۲۰۱۱ بر اساس داده‌های پایگاه اسکاپوس [۴].

ضایعات جامد، ۲- روکش مجدد (Retreading) برای استفاده ثانویه، ۳- سوزاندن (Incineration) برای بازیافت انرژی، ۴- گرماکافت (Pyrolysis) برای تولید سوخت، دوده و سیم‌های فولادی، ۵- تولید محصولات بازیافتی به‌عنوان مثال ضربه‌گیرها، موانع سقوط و صخره‌های دریایی مصنوعی از تایرهای کامل و ۶- بازیافت به‌عنوان افزودنی لاستیکی پس از آسیاب مکانیکی [۷]. ابتدایی‌ترین روش مدیریت این ضایعات، دفن آن‌ها در زمین به‌عنوان زباله است که خطرات محیطی و بهداشتی در اثر وقوع آتش‌های تصادفی و هم‌چنین آلودگی منابع آب زیرزمینی را به دنبال دارد. آتش گرفتن لاستیک تایر فرسوده منجر به نشر اکسیدگوگرد، هیدروکربن‌های آروماتیک پلی‌سیکلی، ذرات ریز و ترکیبات سمی دیگر می‌شود. هرچند تایرهای فرسوده، ارزش گرمایی (Calorific Value) بالایی دارند تا به‌عنوان سوخت استفاده شوند، اما به‌عنوان پرکننده‌های فعال یا غیرفعال (عوامل چقرمه‌کننده برای گرمانرم‌ها، گرماسخت‌ها و لاستیک‌ها) مفیدتر هستند و سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارند. به‌منظور تهیه آلیاژ مذاب تایرهای فرسوده با پلیمرها، روش‌های آسیاب‌کردن (Grinding) برای کاهش اندازه و تولید لاستیک تایر آسیاب‌شده (Ground Tire Rubber, GTR) استفاده می‌شود. این لاستیک‌ها، اندازه ذرات کوچک دارند. البته اتصال ضعیف میان GTR و اکثر زمینه‌های پلیمری منجر به استحکام مکانیکی کم و دوام (Durability) کم آلیاژ حاصل می‌شود. این چالش مهم، عملکرد این آلیاژها را محدود می‌کند. برای غلبه بر این چالش، روش‌های مختلفی مانند اصلاح سطحی GTR، واولکانش (Devulcanization)،



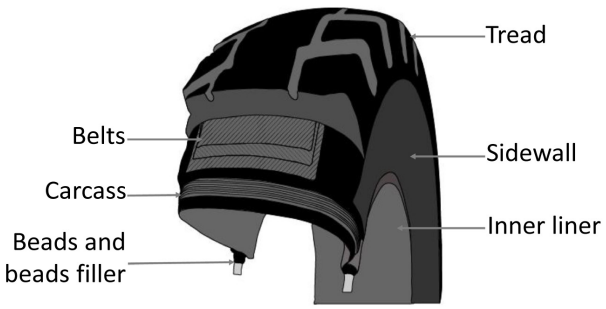
شکل ۲ چرخه عمر تایرها [۷].

ولکانش دینامیکی و افزودن عوامل اصلاح‌کننده برای افزایش چسبندگی بین‌سطحی زمینه–GTR استفاده می‌شود که یکنواختی و فرایندپذیری و هم‌چنین خواص مکانیکی و دوام این ترکیبات را افزایش می‌دهد [۸–۲،۱]. با توجه به اهمیت بازیافت تایرهای فرسوده در پژوهش حاضر، نخست ساختار تایر و ترکیب درصد آن به اختصار معرفی می‌شود. سپس روش‌های مختلف بازیافت تایرهای فرسوده معرفی و توضیح داده می‌شوند.

۲ ترکیب درصد تایر

هر تایر معمولی، از هفت جزء اصلی تشکیل شده است: آج (Tread)، تسمه‌ها (Belts)، دیواره‌های کناری (Side Walls)، منجید (Carcass)، آستر داخلی (Inner Liner)، طوقه‌ها (beads) و پرکننده طوقه‌ها (Beads Filler) [۹]. ساختار نمونه‌ای از یک تایر با اجزای مربوط در شکل ۳ نشان داده شده است.

آج، بخشی از تایر است که در تماس مستقیم با جاده بوده و حرکات مختلف وسیله نقلیه را ممکن می‌سازد. در واقع این بخش ایجاد تماس ثابتی را با جاده امکان‌پذیر کرده، هم‌چنین به‌دلیل مجاری قالب‌گیری شده در لاستیک، جریان آب را به سمت بیرون هدایت می‌کند. آج، عمدتاً از لاستیک طبیعی



شکل ۳ نمونه‌ای از ساختار تایر [۹].

(پلی‌ایزوپرن، NR) و لاستیک‌های مصنوعی تشکیل شده است. تسمه (Belt)، تکیه‌گاه ساختاری را برای لایه‌های بیرونی فراهم می‌کند که بسته به کاربرد تایر (خودرو مسافربری، کامیون، خارج از جاده یا راه‌سازی (Off-the-Road) و ...)، لاستیک، فولاد و الیاف در ترکیب درصد آن می‌تواند استفاده شود. دیواره جانبی، تایر را در تماس با رینگ چرخ (Wheel Ring) نگه می‌دارد. مواد موجود در دیواره جانبی نیازمند مقاومت خوب به رشد ترک و حمله توسط اوزون (O_3) در هوا است، درحالی‌که مقاومت سایشی، نیاز اصلی آج‌های لاستیک است. آستر داخلی که مسئول حفظ فشار هوا است، از لاستیک بیوتیل با عبورپذیری کم هوا و مقاومت غلتشی (Rolling Resistance) خوب تشکیل شده است. منجید، ساختار داخلی تایر را ایجاد می‌کند و از فلزات به‌هم‌پیچیده یا الیاف پلیمری پوشیده‌شده با لاستیک طبیعی تشکیل شده است. طوقه‌ها، ارتباط میان تایر و رینگ چرخ را ایجاد می‌کنند. هم‌چنین، پرکننده طوقه‌ها انتقال میان بخش سخت طوقه‌ها و آستر داخلی را فراهم می‌کنند. طوقه‌ها از سیم‌های فولادی پوشیده شده با آلیاژ فلز با مقاومت کششی بالا تشکیل شده که در لاستیک محصور شده‌اند [۱،۹].

مسئله مهم در مورد ترکیب درصد تایرها و قیمت‌گذاری تایرهای فرسوده، تفاوت در ترکیب درصد اجزا است. ترکیب درصد تایر به‌عوامل مختلفی بستگی دارد، چون نیاز است تایرها از مقاومت بسیار زیادی در شرایط سخت در هوای آزاد (عوامل شیمیایی، دماهای بالا، تابش و تنش‌های برشی) که در طول عمرشان انتظار می‌رود، برخوردار باشند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، اجزای اصلی ترکیب درصد تایر، لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی، دوده، فلز، الیاف و افزودنی‌های دیگر با غلظت مشخص هستند که به نوع تایر بستگی دارد. تایرهای کامیون در مقایسه با تایرهای خودروهای

جدول ۱ ترکیب درصد انواع تایر [۲].

مواد	تایر خودرو مسافربری	تایر کامیون	تایر خارج از جاده
لاستیک طبیعی	۲۲٪	۳۰٪	۴۷٪
لاستیک مصنوعی	۲۳٪	۱۵٪	
دوده	۲۸٪	۲۰٪	۲۲٪
افزودنی‌های دیگر (مانند عوامل پخت، الیاف و ...)	۱۴٪	۱۰٪	۱۹٪
فولاد	۱۳٪	۲۵٪	۱۰٪
وزن متوسط تخمینی تایر جدید (kg)	۸/۵	۶۵	–

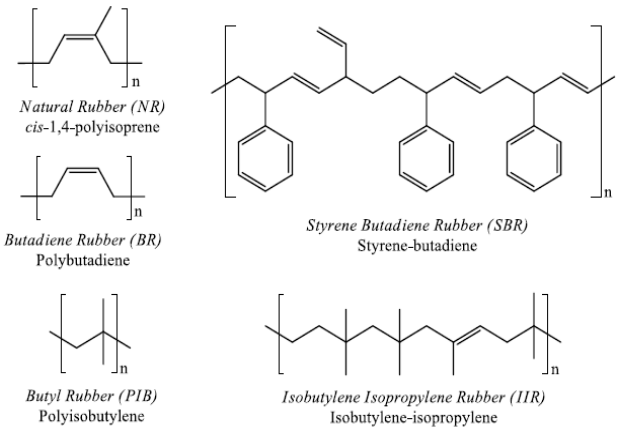
مسافربری مقدار بالاتری لاستیک طبیعی و مقدار کمتری دوده دارند. این امر به عملکرد بالاتر تایرهای خودروهای مسافربری مانند مقاومت غلتشی کم، مقاومت لغزشی بهبود یافته و مقاومت سایشی خوب نسبت داده می‌شود. تایرهای خارج از جاده، در مقایسه با تایرهای مسافربری (۵/۵٪ وزنی) و تایرهای کامیون (۱٪ وزنی)، مقدار بالاتری الیاف (۱۰٪ وزنی) دارند که ممکن است دشواری‌هایی را در مورد خلوص تایرهای فرسوده آسیاب‌شده بر اساس تایرهای خارج از جاده ایجاد کند. خواص محصول نهایی نیز به نوع تایر فرسوده بستگی دارد. برای مثال، استحکام کششی لاستیک احیاشده (Reclaimed) به‌دست آمده از آج تایرهای کامیون (۸ MPa)، حدود ۳۳٪ بیشتر از لاستیک احیاشده تهیه شده از تایرهای خودروهای مسافربری (۶ MPa) است [۹-۲،۱].

بخش لاستیکی تایر (اکثراً در آج‌ها (۳۲/۵٪ وزنی) و دیواره کناری (۲۲٪ وزنی))، مخلوطی از لاستیک طبیعی و لاستیک‌های مصنوعی مانند پلی بوتادی‌ان (PB)، لاستیک استایرن-بوتادی‌ان (SBR) و بیوتیل‌رابر است [۹]. ساختار شیمیایی هر کدام از این لاستیک‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

دوده و سیلیکا نقش مهمی در تقویت مکانیکی و مقاومت سایشی تایر دارند که این امر به اندازه، ساختار و مقدار آن‌ها بستگی دارد. اخیراً ترکیبات سیلیکا توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند تا جایگزین دوده شده و تایرهایی تولید شود که بیشتر دوست‌دار محیط‌زیست هستند. فلزات، مانند فولاد و آلیاژها برای تقویت تایرها استفاده می‌شوند. هرچند الیاف مانند ریون طبیعی، پلی‌آمید و پلی‌استر عمدتاً در تایرهای خودروهای مسافربری استفاده می‌شوند تا جایگزین فلزات شوند و تایرهای سبک تولید کنند. عوامل ایجاد ولکانش (گوگرد و ترکیبات گوگردی) و افزودنی‌های مختلف (پایدارکننده‌ها، ضداکسایش‌ها، ضد اوزون‌ها، روغن‌ها و واکس‌ها) در ترکیب درصد تایر استفاده می‌شوند تا ساختار شبکه‌ای را القا کرده و تایر در مقابل تخریب نور، واکنش گرهای شیمیایی، دماهای بالا و زیست‌تخریب‌پذیری مقاومت کند. افزودنی‌های دیگر مانند مقدار کمی از عناصری همچون کلسیم، منیزیوم، سدیم، پتاسیم و کلرید می‌توانند برای بهبود خواص لاستیک و دوام آن اضافه شوند [۱].

۳ بازیافت تایر

همان‌طور که بیان شد، بازیافت تایرهای فرسوده به‌دلیل ساختار بسیار شبکه‌ای لاستیک‌های ولکانشی و ترکیب درصد شیمیایی آن‌ها که شامل فلزات سمی مانند فلزات سنگین است، از نظر محیط‌زیست اهمیت زیادی دارد. سالیانه در حدود ۲۷۰ میلیون تایر فرسوده به‌تنهایی در ایالت متحده آمریکا تولید می‌شود. این امر منجر به لزوم یافتن روش‌های آسان، ارزان و با مصرف بهینه انرژی (Energy-efficient) برای بازیافت تایرهای فرسوده می‌شود. از آن‌جایی که تایرهای فرسوده تخریب‌پذیری کمی در محیط دارند، راه‌حل‌های مختلفی برای استفاده مجدد از آن‌ها به‌منظور کاهش تعداد این تایرها معرفی شده است. بر



شکل ۴ ساختار شیمیایی لاستیک‌های استفاده‌شده در ترکیب درصد تایر [۹].

اساس انجمن ساخت تایر US، هنوز ۱۶٪ از تایرهای فرسوده خاک‌چال می‌شوند که به آسانی تخریب نشده و برای زمان‌های طولانی در محیط باقی می‌مانند. البته ۸۶٪ از تایرهای فرسوده با روش‌های مختلف مانند روکش مجدد، سوزاندن برای بازیابی انرژی، گرماکافت برای به‌دست آوردن گاز و دوده و هم‌چنین تراشه کردن (Shredding) برای تولید ذرات کوچک و استفاده از آن‌ها به‌عنوان پرکننده در زمینه‌های بسیار متنوعی مانند آسفالت، بتون و پلیمرها بازیافت می‌شوند. این روش‌های بازیافت نه فقط به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کنند، بلکه در رشد اقتصادی بازارهای زیادی مانند صخره دریایی مصنوعی، کنترل خوردگی، موج‌شکن‌ها، وسایل شناوری، پیست‌های ورزشی، سطح زمین بازی و کامپوزیت‌ها و آلیاژهای لاستیکی شده مشارکت دارند [۱].

راه‌حل ایده‌آل برای مدیریت تایرهای فرسوده، به‌وسیله استفاده کردن مواد خام کمتر و هم‌چنین ایجاد کاربردهای صنعتی با ارزش اقتصادی نباید اثر مضری بر محیط‌زیست و حفظ منابع طبیعی داشته باشد. تاکنون، مطالعات زیادی به بهبود روش‌های بازیافت متداول و معرفی روش‌های جدید برای مدیریت تایرهای فرسوده اختصاص داده شده‌اند. روش‌های اصلی برای بازیافت تایرهای فرسوده را می‌توان به روکش مجدد، سوزاندن، گرماکافت، احیا کردن، واولکانش و آسیاب کردن از طریق کاهش اندازه برای جاسازی آن‌ها در زمینه‌های پلیمری تقسیم‌بندی کرد [۱،۱۰] که در ادامه هر کدام توضیح داده می‌شوند.

۳–۱ روکش مجدد

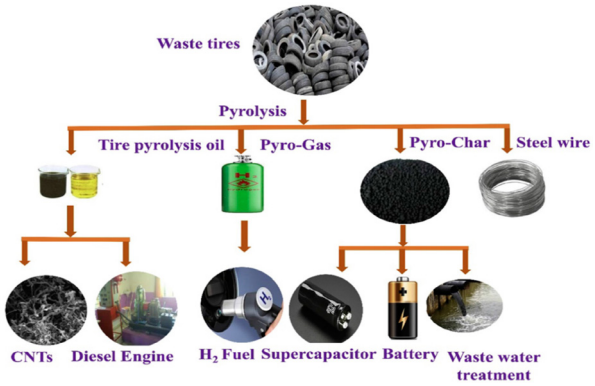
روکش مجدد، فرایندی برای افزایش زمان عمر تایر استفاده شده است که در آن پوشش آج برداشته شده و آج جدیدی با فرایندهای سرد یا گرم اعمال می‌شود. البته این روش فقط برای بازیافت تایرهایی است که به منجید آسیبی وارد نشده و بازرسی سایش و پارگی را گذرانده‌اند. معمولاً، منجید تایر از سامانه روکش کردن می‌گذرد تا آج جدیدی روی تایر ایجاد شود. فرایند روکش مجدد، انرژی را ذخیره می‌کند، چون فقط به ۳۰٪ از انرژی و ۲۵٪ از مواد خام مورد نیاز برای تولید تایر جدید نیاز دارد. به عبارت دیگر، ۸۳ لیتر نفت برای تولید تایر کامیون استفاده می‌شود، درحالی‌که روکش مجدد آن به ۲۶ لیتر نفت نیاز دارد. در واقع، هزینه تایر روکش مجدد داده‌شده در حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر از تایر جدید است. این روش نه‌تنها برای بازیافت تایرهای فرسوده مناسب است، بلکه هم‌چنین روشی بدون ضایعات و دوست‌دار محیط زیست است، چون ساب‌زنیِ (Buffing) لاستیک، تنها محصول جانبی است که می‌تواند پرکننده مناسبی برای بتون و کامپوزیت‌های پلیمری باشد. سه سامانه روکش‌دهی مجدد بر اساس سطح اصلاح‌شده موجود است: ۱– روکش‌دهی مجدد کامل که شامل جدید کردن آج و دیواره جانبی است. ۲– روکش کردن مجدد نیمه‌کامل که شامل جدیدکردن آج و بخشی از دیواره جانبی است. ۳– روکش مجدد فقط بر اساس سامانه چسبندگی که شامل روکش مجدد گرم (انجام ولکانش در دماهای قالب °C ۱۶۰–۱۵۰) و روکش مجدد سرد (انجام ولکانش در اتوکلاو در دماهای °C ۱۲۵–۹۸) است. برخی از معایب روکش‌دهی مجدد عبارتند از: کیفیت پایین، نگرانی برای ایمنی در سرعت‌های بالا و محدود کردن کاربرد این روش برای خودروهای مسافربری. با این وجود تایرهای کامیون که عمر مفید آن‌ها به پایان رسیده است، می‌توانند به آسانی روکش مجدد شوند [۱،۱۰].

۳–۲ سوزاندن

سوزاندن فرایندی گرمازاست که در بالای °C ۴۰۰ انجام می‌شود و به‌دلیل ارزش گرمایی بالای تایرهای فرسوده (۳۲/۶ MJ/kg) در مقایسه با زغال سنگ (۲۷/۹ MJ/kg–۱۸/۶)، از آن‌ها به‌عنوان منبع سوخت برای تولید بخار، انرژی الکتریکی و انرژی لازم در تهیه خمیر کاغذ، کاغذ، آهک و فولاد استفاده می‌شود. در واقع، برای تولید یک کیلوگرم لاستیک مصنوعی تایر، J ۱۲۸ انرژی استفاده شده و در مقابل با سوزاندن لاستیک، J/kg ۳۳–۲۷ انرژی تولید می‌شود که بسیار بیشتر از سوزاندن زغال سنگ‌های بسیار ارزان‌تر نیست. هم‌چنین گزارش شده است که در اثر سوزاندن تایر با فراهم کردن هوای محدود، می‌توان دوده را بازیابی کرد. این ماده بازیابی‌شده می‌تواند برای استفاده در صنایع در مقیاس کوچک برای تولید رنگ‌ها و جوهرهای چاپ استفاده شود. مزیت اصلی سوزندان، هزینه تولید انرژی کم و بیشینه بازیابی گرما است. البته در این روش، مواد لاستیکی ارزشمندی از بین می‌روند و آلودگی جوی در اثر گاز دودکش و نشر ذرات، منابع اصلی برای آلودگی هوا هستند که باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند[۱،۱۰].

۳–۳ گرماکافت

تایرهای فرسوده، منابع عالی هیدروکربن‌ها هستند که می‌توانند به شکل گاز، نفت و باقی‌مانده‌ها از طریق گرماکافت یا تجزیه گرمایی در صنایع پتروشیمیایی مجدداً استفاده شوند. گرماکافت، تخریب حرارتی تایرهای فرسوده در بالای °C ۴۰۰ در محیط بدون اکسیژن است که می‌تواند به واکنش‌های کاتالیزوری و غیرکاتالیزوری تقسیم شود. این فرایند معمولاً در دیگ‌های



شکل ۵ محصولات و کاربردهای گرماکافت تایر فرسوده [۱].

بخار، اتوکلاوها، کوره‌های چرخان و بسترهای سیال انجام می‌شود. محصولات اصلی گرماکافت تایر فرسوده عبارتند از: نفت (۶۰-۴۰٪ وزنی)، گاز (۲۰-۵٪ وزنی) و زغال (۴۰-۳۰٪ وزنی). نفت، گاز و باقی‌مانده‌ها می‌توانند به‌ترتیب برای سنتز نانولوله‌های کربنی (CNTs)، به‌عنوان سوخت در فرایند گرماکافت و تولید کربن فعال متخلخل استفاده شوند. دوده و مواد جامد دیگری که پس از گرماکافت باقی می‌ماند، می‌تواند به‌عنوان پرکننده استفاده شود. فرایند گرماکافت تایرهای فرسوده و کاربردهای اصلی در شکل ۵ نشان داده شده است. البته این راه‌حل برای مدیریت تایرهای فرسوده نیازمند کارخانه‌های بزرگ گرماکافت است که برای ساخت و اجرا (دمای بالا و فشار کم) با کاربردهای صنعتی محدود در مقیاس‌های بزرگ، هزینه‌بر هستند. هم‌چنین در این فرایند محصولات جانبی سمی تولید می‌شود و این فرایند به‌دلیل قیمت پایین نفت از لحاظ اقتصادی موفقیت‌آمیز نیست [۱،۱۰].

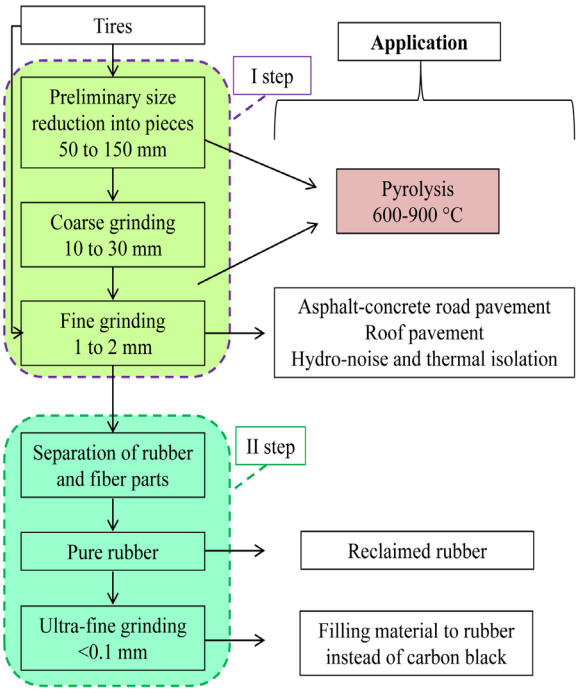
۳-۴ آسیاب کردن

در برخی از روش‌های بازیافت لاستیک‌های پخت شده، از لاستیک در همان حالتی که پخت شده است استفاده می‌شود. این امر غالباً به کاهش اندازه ذرات نیاز دارد که می‌توان به وسیله آسیاب‌کردن انجام داد. از این رو امروزه، روش اصلی بازیافت لاستیک‌های فرسوده، تراشه کردن و آسیاب کردن است. بر اساس داده‌های گزارش‌شده توسط ETRMA، تقریباً ۸۷/۵٪ از همه اشکال بازیافت، شامل تراشه‌کردن و خردکردن است. در میان عبارات مختلفی که برای لاستیک‌های فرسوده خردشده به‌کار می‌رود، به‌نظر می‌رسد عبارت لاستیک تایر آسیاب شده (GTR) بهترین گزینه است، چون منبع لاستیک خام و شکل نهایی مواد به‌دست آمده پس از کاهش اندازه را مشخص می‌کند. لاستیک تایر فرسوده (Waste Tire Rubber, WTR)، غبار تایر فرسوده (Waste Tire Dust, WTD)، لاستیک تایر ذره‌ای (Particulate Tyre Rubber)، پودر لاستیک (Rubber Powder)، لاستیک با کاهش اندازه (Size-reduced Rubber)، لاستیک گَرد شده (Pulverized Rubber)، لاستیک تایر خرد شده (Crumb Tyre Rubber) و دانه لاستیک (Rubber Granuulate) گزینه‌های دیگر هستند.

به‌منظور فراهم کردن بازیافت مؤثر، لاستیک‌های فرسوده باید قبل از تراشه‌کردن بر اساس منبع تفکیک شوند. این امر تکرارپذیری فرایند و بهبود کیفیت محصولات به‌دست‌آمده را افزایش می‌دهد. تایرهای فرسوده را می‌توان به دو گروه اصلی تایرهای خودروهای مسافربری و تایرهای کامیون تفکیک کرد. هم‌چنین، برخی از مواقع، تایرهای خارج از جاده به‌عنوان گروه سوم در نظر گرفته می‌شوند. این امر به تفاوت‌های اصلی در ترکیب درصد انواع تایر که در جدول ۲ خلاصه شد، مربوط می‌شود. البته باید به این نکته توجه کرد که جداسازی تایرهای خودروهای مسافربری و کامیون در مقیاس بزرگ ممکن است هزینه‌ها را افزایش دهد. محدودیت دیگر به میزان تایرهای فرسوده کامیون بر می‌گردد که کمتر از تایرهای خودروهای مسافربری است. بنابراین، معمولاً در طول تراشه‌کردن یا آسیاب‌کردن، مخلوط‌هایی از تایرهای خودروهای مسافربری و تایرهای کامیون به نسبت ۵۰/۵۰-۳۰/۷۰٪ استفاده می‌شود. تراشه کردن تایرهای فرسوده هم‌چنین نیازمند جداکردن تقویت‌کننده‌های نخ و فولاد از ذرات لاستیکی است که به‌ترتیب با جداکننده‌های بادی و الکترومغناطیسی در طول خردکردن انجام می‌شود. آسیاب‌کردن دومرحله‌ای تایرهای فرسوده و استفاده‌های محتمل از اندازه ذرات متفاوت ایجاد شده در شکل ۶ نشان داده شده است. در واقع محصولات حاصل از آسیاب تایرهای فرسوده به سه دسته تقسیم می‌شوند: فولاد، الیاف و لاستیک تایر فرسوده [۱۰-۱۱،۱-۲] که ترکیب درصد آن‌ها برای انواع تایر در جدول ۲ با هم مقایسه شده‌اند

جدول ۲ مقایسه درصد وزنی تایرهای فرسوده از منابع مختلف [۹].

مواد	تایر خودرو مسافربری	تایر کامیون	تایر خارج از جاده
لاستیک خردشده	۷۰	۷۰	۷۸
فولاد	۱۷	۲۷	۱۵
الیاف و ضایعات	۱۳	۳	۷

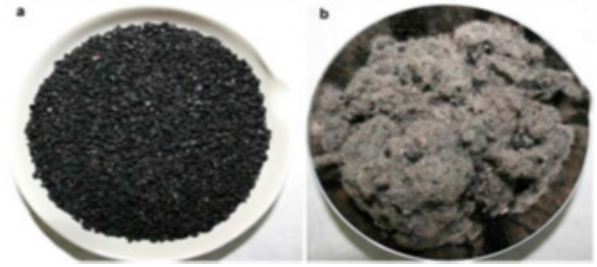


شکل ۶ آسیاب کردن دو مرحله‌ای تایرهای فرسوده و استفاده‌های محتمل از اندازه ذرات متفاوت ایجادشده [۵].

[۹]. شکل ۷، تصاویر نمونه‌ای از ذرات لاستیکی خردشده و الیاف جداشده در طول فرایند اسیاب کردن را نشان می‌دهد.

لاستیک خردشده را می‌توان بر اساس اندازه ذرات تقسیم‌بندی کرد، برای مثال به تراشه (۳۰۰ mm–۵۰)، دانه (granulate) (mm ۵۰–۰/۱۵) و پودر ریز (کمتر از ۵۰۰ میکرون) [۱]. در صنعت ساختمان، لاستیک تایر فرسوده نیز به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود، شکل ۸ [۱۳]:

• تجمعات تراشه لاستیک (Shredded or Chipped Rubber Aggregate) که تجمعات درشت (Coarse Aggregate) نیز نام‌گذاری می‌شوند.



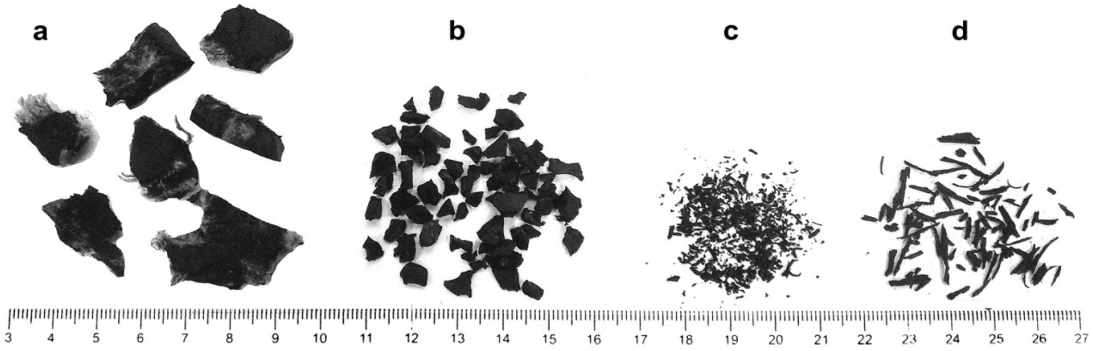
شکل ۷ تصاویر نمونه‌ای از ذرات لاستیکی خرد شده (۱۰–۱ میلی متر) (a) و الیاف تقویت‌کننده (b) [۱۲].

• تجمعات لاستیک خردشده (Crumb Rubber Aggregate) که اندازه لاستیک خردشده معمولاً بین ۴/۷۵ mm و ۰/۴۲۵ است.

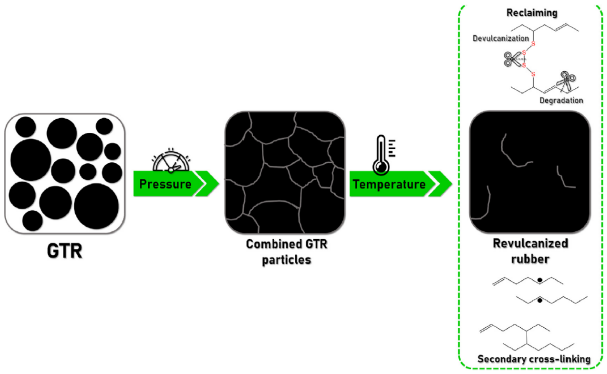
• لاستیک تایر آسیاب‌شده (Ground Tire Rubber) که تجمعات لاستیک از مش شماره ۴۰ (۰/۴۲۵ mm) عبور می‌کند.

• تجمعات لاستیک لیفی (Fiber Rubber Aggregate) که در مراجع مختلف، به‌صورت متفاوت: با طولی معمولاً بین ۸/۵ mm و ۲۱/۵ و متوسط ۱۲/۵ mm یا به شکل نوارهایی با طول کمتر یا مساوی ۸ mm گزارش شده است.

یکی از ساده‌ترین روش‌های استفاده مستقیم از GTR، تف‌جوشی (Sintering) فعال است. این روش، امکان تولید موادی را فراهم می‌کند که کاملاً از GTR تهیه شده‌اند. به‌کارگیری فشار و دمای بالا، ذرات GTR را به اشکال ساده تبدیل می‌کند. طرح‌واره‌ای از سازوکار اصلی در تف‌جوشی فعال در شکل ۹ نشان داده شده است. معمولاً دما و فشار بالا منجر به تشکیل رادیکال‌های آزاد در ساختار GTR می‌شود که ممکن است دو فرایند متضاد واولکانش/تخریب GTR و اتصال عرضی ثانویه آن را سبب شود. واولکانش و تخریب GTR، قابلیت جریان‌پذیری آن را بهبود می‌دهد، درحالی‌که اتصالات عرضی ثانویه بر خواص کششی GTR تف‌جوشی‌شده اثرگذار



شکل ۸ تجمعات لاستیک: A) تراشه (Shredded)، B) خردشده (Crumb)، C) آسیاب‌شده (Ground یا Granular) و D) لیف (Fiber).



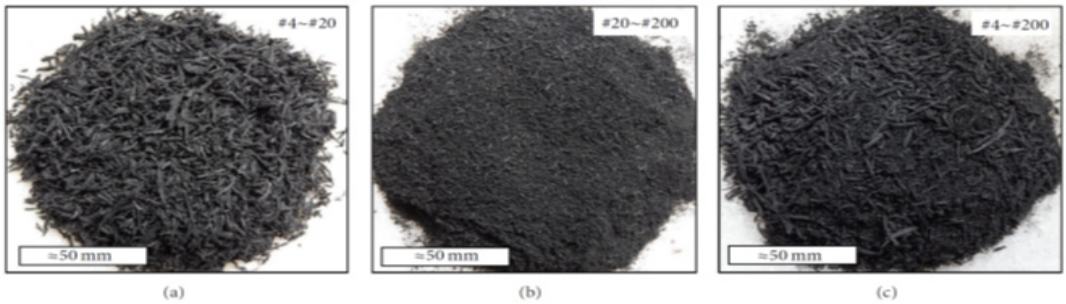
شکل ۹ طرح‌واره‌ای از سازوکار اصلی در تف‌جوشی فعال [۴].

است [۴].

تف‌جوشی فعالِ لاستیک‌های فرسوده، می‌تواند بدون افزودنی‌ها و با استفاده از سامانه‌های پخت یا اتصال‌دهنده‌های چسبندگی مانند لاتکس یا غالباً پلی‌یورتان‌ها استفاده شود. تف‌جوشی فعال GTR بدون افزودنی‌ها یا اصلاح‌کننده‌ها به ساخت محصولات لاستیکی با شکل ساده و ارزان با کیفیت نسبتاً کم محدود می‌شود. به‌کارگیری ذرات لاستیکی با اندازه کمتر یا سطوح بیشتر، راه‌حلی برای بهبود فرایند (کاهش دما و یا فشار) و خواص مکانیکی لاستیک‌های ولکانشی است. راه‌حل دیگر، استفاده از پرکننده‌هاست که می‌تواند خواص عملکردی مواد بر پایه لاستیک تایر فرسوده را بهبود دهد [۴].

همان‌طور که قبلاً بیان شد، تایرهای فرسوده دارای لاستیک‌های طبیعی و مصنوعی هستند که تقویت‌کننده‌های مناسبی برای تولید کامپوزیت هستند. تراشه‌کردن تایرهای فرسوده به GTR با اندازه ذرات کوچک و سطح ویژه بزرگ‌تر، توزیع پرکننده درون زمینه را بهبود داده، احتمال اتصال بهتر با زنجیرهای پلیمری را افزایش می‌دهد. آلیاژ کردن تایرهای فرسوده با مواد خام اولیه (Virgin)، نه‌تنها هزینه محصولات نهایی را کاهش می‌دهد، بلکه مقدار استفاده از موادخام را نیز کاهش می‌دهد. برای مثال، افزودن تایر خردشده به‌عنوان پرکننده‌های سبک در آسفالت در بزرگراه‌ها استفاده می‌شود تا کیفیت سطح جاده (شیارشدگی کمتر سطح)، پایداری گرمایی و مقاومت در برابر زمان‌دهی را بهبود دهد. تایرهای فرسوده هم‌چنین برای کاربردهای ساختمانی به‌عنوان پرکننده در ملات بتون برای تولید کامپوزیت‌های بتونی با مقاومت بیشتر در برابر خمش، بارگذاری دینامیکی و ترک استفاده می‌شوند. در واقع، لاستیک‌های خرد شده می‌توانند به‌عنوان ماده‌ای استفاده شوند که جایگزین همه یا جزئی از تجمعات معدنی شوند و مواد کامپوزیتی حاصل کنند که بیشتر دوست‌دار محیط‌زیست باشد. آن‌ها هم‌چنین خواص عایق حرارتی و صوتی را بهبود داده، جذب رطوبت و عبورپذیری نسبت به یون‌های کلرید را کاهش می‌دهند. آلیاژ کردن تایرهای فرسوده با زمینه‌های پلیمری (گرماسخت‌ها، گرمانرم‌ها و لاستیک‌ها) منجر به آلیاژهای کامپوزیتی سبز و با هزینه پایین می‌شود که احتمال تجاری‌سازی آن‌ها به‌عنوان جانشینی برای محصولات معادل موجود وجود دارد. این کامپوزیت‌های پلیمری در کاربردهای مختلفی مانند کفپوش، سطوح زمین بازی، پیست‌های ورزشی و اجزای خودرو استفاده می‌شوند [۵،۱].

آلیاژ کردن زمینه پلیمری و GTR (اصلاح سطحی‌شده) با مقاومت ضربه و کشسانی ممکن است منجر به خواص بهبودیافته آلیاژ مانند استحکام کششی و ازدیاد طول در پارگی شود که به میزان برهم‌کنش سطحی میان GTR و زمینه بستگی دارد. جاسازی حتی ۱۰٪ وزنی از GTR درون زمینه‌های پلیمری (گرمانرم‌ها، گرماسخت‌ها و لاستیک‌ها) منجر به مصرف زیادی از تایرهای فرسوده به‌عنوان جایگزین جزئی از پلیمرهای استفاده نشده می‌شود. البته بارگذاری GTR در مواد کامپوزیتی به دلیل برهم‌کنش ضعیف میان GTR و پلیمر منجر به کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژها می‌شود. به همین دلیل مطالعات زیادی برای یافتن روش‌های مناسب جاسازی مقادیر بالاتر GTR (بالای ۵۰٪ وزنی) درون زمینه‌های پلیمری انجام شده است تا هزینه‌ها و استفاده از مواد دست‌نخورده کاهش یابد. رویکردهای مختلفی مانند سازگار کردن، اصلاح سطحی و احیا برای حل این چالش و بهبود چسبندگی بین‌سطحی میان اجزا معرفی شده است. کوپلیمرها با بخش‌های مشابه با اجزای آلیاژ می‌توانند برای سازگاری آلیاژهای پر شده با GTR با عمل‌کردن به‌عنوان پل‌های فیزیکی/شیمیایی در پلیمرهای امتزاج‌ناپذیر استفاده شوند تا سازگاری را بهبود دهند. برای مثال، پلی‌اتیلن پیوندخورده با انیدریدمالئیک (PE-g-MA) به‌عنوان سازگارکننده‌ای شناخته‌شده، برای کاهش واکشش سطحی و پایداری مورفولوژی آلیاژهای پلی‌الفین پرشده با GTR استفاده می‌شوند. احیای لاستیک برای تخریب جزئی ساختار شبکه‌ای شده و القای سیالیت بیشتر زنجیر (آزادی مولکولی) برای اتصال بهتر GTR با زنجیرهای زمینه نیز استفاده می‌شود. هم‌چنین، اصلاح سطحی منجر به تولید گروه‌های کربونیل، هیدروکسیل، هیدروپروکسی و پروکسی روی سطح GTR می‌شود تا برهم‌کنش با پلیمرهای قطبی یا سازگارکننده‌های فعال را افزایش دهد. در این روش، عوامل اکسیدکننده مانند پرمنگنات‌پتاسیم ($KMnO_4$)، اسیدنیتریک (HNO_3) و پرکسیدهیدروژن (H_2O_2) و اسیدسولفوریک (H_2SO_4)، هم‌چنین تابش انرژی (مانند

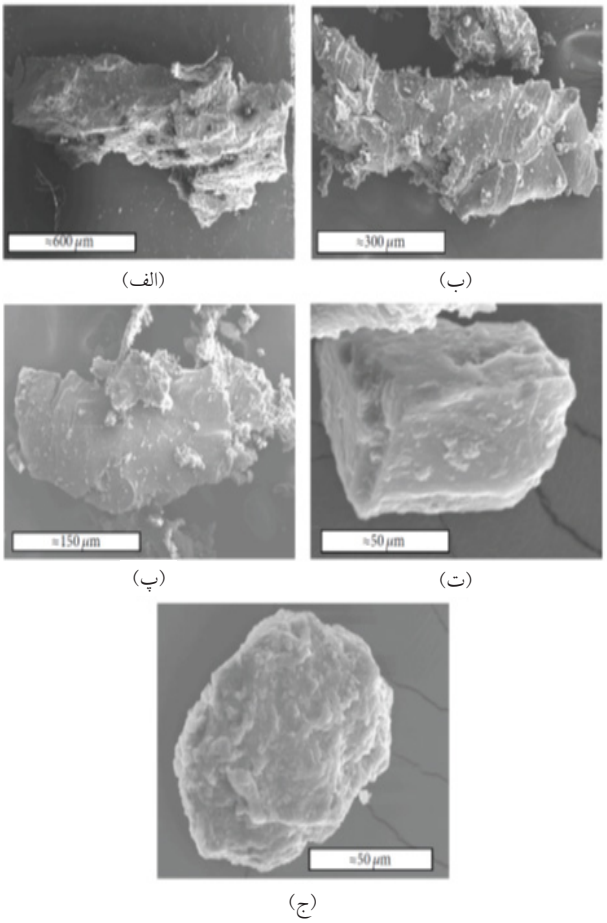


شکل ۱۰ نمونه‌ای از ذرات لاستیک خردشده با مش‌های مختلف [۱۴].

مایکروویو، گاما و پلاسما) و امواج فراصوت برای آمایش سطح GTR استفاده شده‌اند. آمایش GTR در حضور حلال‌ها یا اسیدها نیازمند شستن محصولات به‌دست‌آمده و هم‌چنین آمایش (Treatment) ضایعات آب است که بر هزینه نهایی محصول GTR اصلاح‌شده اثرگذار است. بسیاری از روش‌های آمایش GTR معمولاً بازدهی کمی دارند و به‌صورت متوالی انجام می‌شوند. این نقایص، محدودیت اصلی برای پیاده‌سازی روش‌های آمایش از آزمایشگاه به مقیاس صنعتی است [۲-۱].

فرایندهای آسیاب‌کردن مختلفی مانند سرمایشی (Cryogenic Grinding)، محیطی (Ambient Grinding)، خیس یا محلولی، استفاده از امواج فراصوت و برش با آب تحت فشار (جت آب) وجود دارند، اما رایج‌ترین روش در مقیاس صنعتی، روش سرمایشی و محیطی است. سازوکارهای متفاوت شکستن در روش‌های مختلف، بر مشخصاتی مانند اندازه، سطح، شکل و توپوگرافی لاستیک حاصل اثرگذار است. این مشخصات بر خواص نهایی محصول نیز مؤثرند، برای مثال، این تفاوت‌ها باعث می‌شود فرآورش بعدی مانند اختلاط با زمینه دست‌نخورده و کاربرد محصولات بر پایه GTR که با روش خردکردن محیط به‌دست آمده‌اند، نتایج بهتری را در مقایسه با محصولات به‌دست‌آمده با روش سرمایش ارائه دهند. معمولاً توزیع اندازه ذرات و اندازه متوسط ذرات، مشخصات اصلی هستند که کاربردهای بالقوه GTR را مشخص می‌کنند، درحالی‌که اثر منبع لاستیک فرسوده و میزان تخریب یا چگالی اتصالات عرضی معمولاً نادیده گرفته می‌شود. کاهش اندازه ذرات GTR، منجر به افزایش هزینه نهایی مواد می‌شود که به مصرف انرژی در طول خرد کردن مربوط می‌شود. گزارش شده است که هزینه آسیاب کردن ذرات لاستیک به اندازه ۳ mm-۱ تقریباً ۱۲۰ یورو به ازای هر تن، برای ذرات ۲/۵ mm-۰/۸ تقریباً ۱۳۰ یورو برای هر تن و برای ذرات کمتر از ۰/۸ mm تقریباً ۳۰۰ یورو برای هر تن است [۱۰-۱،۲]. نمونه‌ای از ذرات لاستیکی خردشده با مش‌های مختلف در شکل ۱۰ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با اندازه‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

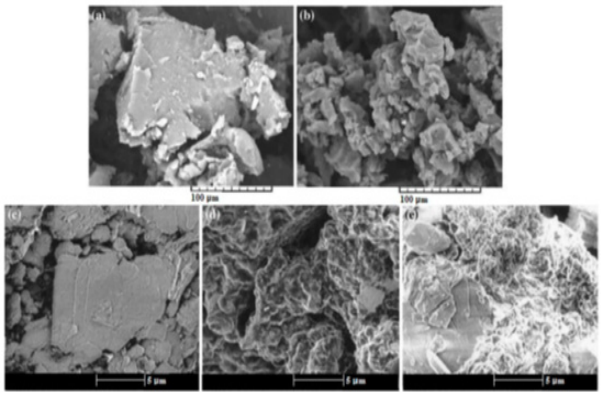
در آسیاب کردن محیطی، غالباً از آسیاب‌های متداول لاستیک با توان بالا (آسیاب دوغلتکی) استفاده می‌شود که شکاف (nip) آن‌ها در فاصله کمی تنظیم شده است. با این روش نسبتاً ارزان،



شکل ۱۱ تصاویر SEM ذرات لاستیک خرد شده با اندازه‌های مختلف [۱۴].

معمولاً ذراتی با مش ۱۰ تا ۳۰ حاصل می‌شود. البته با چند مرحله انجام دادن آسیاب، می‌توان اندازه ذرات را تا مش ۴۰ کاهش داد، اما هزینه فرایند افزایش می‌یابد. شکل ذراتی که با این روش تولید می‌شود، بی‌نظم است. این روش گرمای زیادی تولید می‌کند و دما ممکن است تا ۱۳۰ °C افزایش یابد. این امر خطر احتراق کنترل‌نشده لاستیک در طول آسیاب‌کردن را افزایش می‌دهد و می‌تواند لاستیک را تخریب کند. هم‌چنین، اگر لاستیک به درستی سرد نشود، ممکن است به هنگام انبارداری اشتعال ایجاد شود [۱۰-۲،۱].

آسیاب کردن سرمایشی از گازهای مایع شده استفاده می‌کند تا قطعات (Chips) لاستیکی الاستیک را به ذرات شکننده تغییر دهد و تخریب لاستیک را در اثر حرارت به وجود آمده ناشی از برش خوردن در شرایط محیطی از بین ببرد. برای ایجاد سرمایش، معمولاً از نیتروژن مایع یا دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی استفاده می‌شود. نیتروژن مایع به‌دلیل امکان تماس فیزیکی کافی و حفظ محیطی خنثی در طول آسیاب‌کردن برای جلوگیری از اکسایش ترجیح داده می‌شود. در این فرایند، خرده‌های لاستیک در اثر کاهش دما به زیر دمای انتقال شیشه‌ای، به ذرات شکننده تبدیل می‌شوند. عملیات مکانیکی در طول آسیاب‌کردن سرمایشی می‌تواند با ضربه (آسیاب چکشی)، سایش یا فشار انجام شود. آسیاب کردن سرمایشی در مقایسه با فرایندهای آسیاب کردن محیطی و محلولی، از نرخ تولید بالاتری برخوردار است و انرژی کمتری برای آسیاب‌کردن استفاده می‌کند. هم‌چنین در این فرایند، گرمای کمی تولید شده یا اصلاً گرمایی ایجاد نشده و نتیجتاً تخریب کمی در لاستیک حاصل می‌شود. علاوه‌براین، تقریباً همه الیاف یا فولاد از لاستیک جدا شده که منجر به بازدهی بالایی از محصولات قابل استفاده و اتلاف کم در لاستیک می‌شود. خواص مختلف: وزن مخصوص، شکل ذره، مساحت سطح و میزان اکسایش، هم‌چنین خلوص محصول و هزینه‌های تولید GTR به‌دست‌آمده با دو روش محیطی و سرمایشی در جدول ۳ مقایسه و حالت سطح ذرات لاستیک تایر آسیاب‌شده با فرایندهای مختلف در شکل ۱۲ مقایسه شده‌اند. آسیاب‌کردن سرمایشی، در مقایسه با آسیاب‌کردن محیطی منجر به سطح ذرات لاستیکی نسبتاً صاف می‌شود. بنابراین، ذرات GTR به‌دست آمده از فرایندهای سرمایشی، زبری سطح کمتر و مساحت سطح ویژه کمتر دارند که منجر به اتصال فیزیکی ضعیف با زمینه پلیمری به هنگام آلیاژ می‌شود. اندازه ذراتی که با این روش به‌دست می‌آیند، بسیار کم است (از مش ۳۰ تا ۱۰۰). به‌طورکلی در همه موارد، اندازه ذرات ریز به‌وسیله تعداد چرخه‌های آسیاب کردن و زمان اقامت در فرایند آسیاب‌کردن



شکل ۱۲ نمونه‌ای از حالت سطح ذرات لاستیک تایر آسیاب‌شده که با فرایندهای آسیاب کردن مختلف تولید شده‌اند: a) مکانیکی-محیط، b) جت آب، c) آسیاب خاری (Pin Mill)- سرمایشی، d) آسیاب چرخشی-محیط و e) آسیاب چرخشی- سرمایشی [۱۵]

کنترل می‌شود. هر چه اندازه ذرات کمتری مورد نیاز باشد، هزینه فرایند نیز افزایش می‌یابد. به‌دلیل قیمت بالای کاهش اندازه ذرات در سرما، این فرایند برای لاستیک‌های ارزان قیمت مانند لاستیک‌های تایر از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست و معمولاً کاهش اندازه ذرات آن‌ها به روش مکانیکی انجام می‌شود. البته برای لاستیک‌های گران‌قیمت مانند لاستیک‌های فلوئوروکربنی ممکن است اقتصادی باشد [۱۰-۲،۵،۱].

آسیاب‌کردن خیس بر اساس صفحات آسیاب‌کننده چرخشی است که با هم حرکت کرده و با آب روغنکاری می‌شوند. آب هم‌چنین برای کنترل دما به کار می‌رود. در این روش، به جت آب با فشار بالای ۲۰۰ psi نیاز است. مشخصات مختلفی مانند نرخ جریان آب و مساحتی که آب پرفشار اعمال می‌شود،

جدول ۳ مقایسه روش‌های آسیاب کردن تایرهای فرسوده: محیطی و سرمایشی [۲].

		محیطی	سرمایشی
خواص GTR	وزن مخصوص	یکسان	یکسان
	شکل ذره	بی‌نظم	منظم
	مساحت سطح	اسفنجی/به‌خوبی توسعه‌یافته	صاف/به‌خوبی توسعه‌نیافته
	میزان اکسایش	زیاد	کم
خلوص محصول		کم	زیاد
هزینه‌های تولید		کم	زیاد

می‌توانند بازده این فرایند را مشخص کنند. آسیاب‌کردن محلولی به‌صورت گسترده در اثر متورم کردن قطعاتِ (Chips) لاستیک، درون حلالی مانند هیدروکربن‌های کلرینه شده یا آروماتیک قبل از تغذیه درون شکاف صفحات آسیاب‌کننده انجام می‌شود تا پودرهای تایر (کمتر از mm ۱) به‌دست آید. ریزترین اندازه ذرات (از مش ۴۰۰ تا ۵۰۰) با فرایند آسیاب کردن محلولی ایجاد می‌شود. مزایای ذرات ریز، فرایندپذیری خوب و امکان تولید ورقه‌های کلندر شده و اکسترود شده صاف است [۱،۱۰].

در روش‌های گَردسازی (Pulverization)، با استفاده از اکسترودر تک‌پیچه یا دوپیچه، برش فشاری در دمای مشخص به لاستیک وارد می‌شود. اصطکاک حاصل، مقدار قابل‌توجهی گرما تولید می‌کند که منجر به تخریب جزئی در لاستیک می‌شود. هم‌چنین ممکن است اکسایش سطح ذرات لاستیک و کلوخه‌ای شدن بخشی از ذرات رخ دهد. شکل ذرات بی‌نظم بوده و ساختار آن‌ها متخلخل است. چگالی اتصالات عرضی پودر حاصل در مقایسه با گرانول‌های لاستیک اولیه کمتر بوده که نشان‌دهنده رخ دادن جزئی واولکانش است [۱۰].

۳-۵ احیا کردن

قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش آمایش لاستیک تایر آسیاب‌شده، احیا کردن است. این روش بر پایه واولکانش استوار است که در آن گسسته‌شدن پیوندهای بین‌مولکولی شبکه شیمیایی مانند پیوندهای کربن-گوگرد یا گوگرد-گوگرد همراه با کوتاه شدن رنجیر رخ می‌دهد. در واقع، واولکانش شکست بسیار انتخابی پیوندهای اتصال‌عرضی سولفیدی رخ می‌دهد، در حالی که در احیاکردن لاستیک، پارگی زنجیر اصلی نیز اتفاق می‌افتد. افزایش میزان پارگی زنجیر اصلی منجر به کاهش وزن مولکولی پلیمر و افزایش میزان پراکندگی می‌شود که معمولاً خواص مکانیکی لاستیک احیاشده ولکانشی که ولکانش مجدد نام‌گذاری می‌شود را تضعیف می‌کند. در این روش، لاستیک فرسوده با استفاده از انرژی گرمایی و مکانیکی و روش‌های شیمیایی به حالتی تبدیل می‌شود که می‌تواند مجدداً مخلوط شده، فرایند و پخت شود [۲،۱۰].

مشخصه ساده‌ای وجود ندارد که بتوان تمایز شفافی میان احیا و واولکانش لاستیک را ایجاد کرد. با استفاده از نظریه هوریکس (Horikx) می‌توان تفاوت میان این دو مشخصه را تعیین کرد. البته بر اساس این نظریه، شرایط استخراج/تورم (مانند دما، زمان، وزن نمونه، نوع حلال استفاده شده و ...) بر مقادیر مشخصات استفاده شده برای تخمین پارگی زنجیر اصلی به صورت انتخابی اثرگذارند [۲].

۳-۶ واولکانش

۳-۶-۱ امواج ماکروویو

در این روش، از مقدار کنترل‌شده‌ای از امواج ماکروویو برای واولکانش لاستیک‌های پخت شده گوگردی استفاده می‌شود. این مواد باید به اندازه کافی قطبی باشند تا انرژی امواج را با نرخ مناسبی برای تولید گرمای لازم برای واولکانش بپذیرند. در این روش گرما بسیار سریع و به‌صورت یکنواخت در لاستیک تولید می‌شود. با توجه به انرژی پیوند نسبی پیوندهای کربن-کربن، کربن-گوگرد و گوگرد-گوگرد (جدول ۴)، فرض می‌شود که در واقع پارگی اتصالات عرضی کربن-گوگرد و گوگرد-گوگرد رخ می‌دهد. در نهایت لاستیک حاصل باید به حالتی برسد که بتواند با مواد دیگر ترکیب و مجدداً پخت شود تا محصول مفیدی مانند شیلنگ با خواص فیزیکی مورد نظر را حاصل کند. این روش به صورت ناپیوسته انجام شده و تجهیزات گران‌قیمتی دارد.

۳-۶-۲ امواج فراصوت

این فرایند بسیار سریع، ساده، مؤثر و بدون نیاز به مواد شیمیایی و حلال است و می‌تواند در چند ثانیه اتصالات‌عرضی را در شبکه‌های گوگردی و پرکسیدی از بین ببرد. البته اکثر مراجع بر ولکانش لاستیک به جای واولکانش به وسیله امواج فراصوت اشاره می‌کنند. این فرایند می‌تواند به صورت پیوسته به همراه اکسترودر برای انواع مختلفی از لاستیک‌ها و مواد گرماسخت استفاده شود. لاستیک حاصل نرم بوده که آن را برای فرایندپذیری، شکل‌دهی و پخت مجدد به روشی بسیار مشابه با لاستیک استفاده نشده (Virgin)، امکان‌پذیر می‌سازد. پس از پخت مجدد، نمونه‌های لاستیکی خواص مکانیکی خوبی را نشان می‌دهند که قابل مقایسه با لاستیک‌های استفاده‌نشده پخت‌شده است یا از آن‌ها بالاتر است. شکست اتصالات شیمیایی در اثر امواج فراصوت با تخریب جزئی زنجیرهای پلیمری همراه است [۵،۱۰].

جدول ۴- انرژی پیوندها در لاستیک پخت‌شده گوگردی [۵].

نوع پیوند	انرژی پیوند (kJ/mol)
$-C-S_x-C-$	کمتر از ۲۷۰
-C-S-S-C-	۲۷۰
-C-S-C-	۲۸۶
-C-C-	۳۵۳

۴ نتیجه‌گیری

بزرگ‌ترین بازار مصرف کالاهای لاستیکی، تایرهای خودروهای مسافربری و کامیون‌ها، است. از منظر محیط‌زیست، بازیافت این تایرها با ساختار زیست‌تخریب‌ناپذیر و حجم بالایی از تولید، نیازمند رویکردهای مدیریتی است. با استفاده از روکش مجدد، سوزاندن، گرماکافت و آسیاب‌کردن، می‌توان تایرهای فرسوده را بازیافت کرد. درصورتی‌که به منجید تایر فرسوده آسیبی وارد نشده و بازرسی سایش و پارگی را گذرانده باشد، می‌توان زمان عمر یک آن را با روکش مجدد افزایش داد. در اثر سوزاندن تایر، می‌توان انرژی را بازیابی کرد. هم‌چنین، می‌توان به‌وسیله گرماکافت یا تجزیه گرمایی تایر، گاز، نفت و زغال به‌دست آورد. آسیاب‌کردن، روش اصلی بازیافت لاستیک‌های فرسوده است. آلیاژکردن GTR با زمینه‌های پلیمری منجر به آلیاژهای کامپوزیتی سبز و با هزینه پایین می‌شود که احتمال تجاری‌سازی آن‌ها به‌عنوان جانشینی برای محصولات معادل موجود وجود دارد. این کامپوزیت‌های پلیمری در کاربردهای مختلفی مانند کفپوش، سطوح زمین بازی، پیست‌های ورزشی و اجزای خودرو استفاده می‌شوند. از GTR هم‌چنین به‌عنوان پرکننده در آسفالت و بتون استفاده می‌شود. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد با بازیافت مؤثر تایرهای فرسوده، آینده روشنی برای استفاده از آن‌ها در بازارهای مختلف وجود دارد.

مراجع

1. Fazli A., Rodrigue D., Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (Gtr)/Rubber Compounds: A Review, *Journal of Composite Science,* 4, 103, **2020**.

2. Formela K., Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies – Recent Advances, Challenges and Future Trends, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research,* 4, 209-222, **2021**.

3. Siddika A., Mamun M. A. A., Alyousef R., Amran Y. H. M., Aslani F., Alabduljabbar H., Properties and Utilizations of Waste Tire Rubber in Concrete: A Review, *Construction and Building Materials,* 224, 711–731, **2019**.

4. Formela K., Waste Tire Rubber-Based Materials: Processing, Performance Properties and Development Strategies, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research,* 5, 234-247, **2022**.

5. Lapkovskis V., Mironovs V., Kasperovich A., Myadelets V., Goljandin D., Crumb Rubber as a Secondary Raw Material from Waste Rubber: A Short Review of End-of-Life Mechanical Processing Methods, *Recycling,* 5, 1-20, **2020**.

6. Archibong F. N., Sanusi O. M., Médéric P., Hocine N. A., An Overview on the Recycling of Waste Ground Tyre Rubbers in Thermoplastic Matrices: Effect of Added Fillers, *Resources, Conservation & Recycling,* 175, 105894, **2021**.

7. Li J., Chen Z., Xiao F., Amirkhanian S. N., Surface Activation of Scrap Tire Crumb Rubber to Improve Compatibility of Rubberized Asphalt, *Resources, Conservation & Recycling,* 169, 105518, **2021**.

8. Liang H., Gagné J. D., Faye A., Rodrigue D., Brisson J., Ground Tire Rubber (Gtr) Surface Modification Using Thiol-Ene Click Reaction: Polystyrene Grafting to Modify a Gtr/Polystyrene (Ps) Blend, *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology,* 36, 1-21, **2019**.

9. Bockstal L., Berchem T., Schmetz Q., Richel A., Devulcanisation and Reclaiming of Tires and Rubber by Physical and Chemical Processes: A Review, *Journal of Cleaner Production,* 236, 117574, **2019**.

10. The Science and Technology of Rubber, Fourth ed.; Academic Press, USA, **2013**.

11. Karger-Kocsis, Mészáros L., Bárány T., Ground Tyre Rubber (Gtr) in Thermoplastics, Thermosets and Rubbers, *Journal of Materials Science,* 48, 1-38, **2013**.

12. Fernández A., Barriocanal C., Alvarez R., Pyrolysis of a Waste from the Grinding of Scrap Tyres, *Journal of Hazardous materials,* 203, 236–243, **2012**.

13. Najim K. B., Hall M. R., A Review of the Fresh/Hardened Properties and Applications for Plain- (Prc) and Self-Compacting Rubberised Concrete (Scrc), *Construction and Building Materials,* 24, 2043–2051, **2010**.

14. Cetin A., Effects of Crumb Rubber Size and Concentration on Performance of Porous Asphalt Mixtures, *International Journal of Polymer Science,* 2013, 1-10, **2013**.

15. Zebala J., Ciepka P., Reza A., Janczur R., Influence of Rubber Compound and Tread Pattern of Retreaded Tyres on Vehicle Active Safety, *Forensic Science International,* 167, 173–180, **2007**.