بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی پلیمر

پایان نامه کارشناسی ارشد
(مهندسی پلیمر – صنایع پلیمر)

# مطالعه تأثیر پودر لاستیک ضایعاتی بر رفتار و خواص پلی اتیلن و مقایسه با ترموپلاستیک الاستومر مشابه

نگارش
مجید رضائی آبادچی

استاد راهنما
دکتر اعظم جلالی

استاد مشاور:
دکتر حسین نازکدست

زمستان ۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

**بسمه تعالی**

**فرم اطلاعات پایان‌نامه**

**کارشناسی- ارشد و دکترا**

تاریخ:
شماره:

**معاونت پژوهشی**
**فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷**

**مشخصات دانشجو:**

نام و نام خانوادگی: مجید رضائی آبادچی  دانشجوی آزاد ● بورسیه ○ معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۵۱۳۲۰۲۲  دانشکده: مهندسی پلیمر  رشته تحصیلی: مهندسی پلیمر  گروه: پلیمر

**مشخصات استاد راهنما:**

نام و نام خانوادگی: اعظم جلالی آرانی  درجه و رتبه: استادیار

نام و نام خانوادگی:  درجه و رتبه:

**مشخصات استاد مشاور:**

نام و نام خانوادگی: حسین نازکدست  درجه و رتبه: استاد

نام و نام خانوادگی:  درجه و رتبه:

**عنوان پایان‌نامه به فارسی :**

مطالعه تأثیر پودر لاستیک ضایعاتی بر رفتار و خواص پلی اتیلن و مقایسه با ترموپلاستیک الاستومر مشابه

**عنوان پایان‌نامه به انگلیسی:**

Study of the Effect of rubber powder upon behavior and properties of PE in comparison of similar TPE

نوع پروژه: کارشناسی ○ ارشد ● دکتر ا ○  سال تحصیلی: ۸۵

کاربردی ● بنیادی ○ توسعه‌ای ● نظری ○

تاریخ شروع : ۸۶/۸/۵  تاریخ خاتمه : ۸۷/۱۰/۸  تعداد واحد : ۹  سازمان تأمین کننده اعتبار : دانشگاه

**واژه‌های کلیدی به فارسی:** ترموپلاستیک الاستومر، پلی‌اتیلن سبک خطی، لاستیک طبیعی، پودر تایر ضایعاتی.

**واژه‌های کلیدی به انگلیسی :** Thermoplastic Elastomer ، Linear Low Density Polyethylene ، Natural Rubber ، Ground Tire Rubber.

| مشخصات ظاهری | تعداد صفحات | تصویر | جدول | نمودار | نقشه | واژه‌نامه | تعداد مراجع | تعداد صفحات ضمائم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱۱۶ | ۳۲ | ۵ | -- | -- | -- | ۴۷ | -- |
| زبان متن | فارسی ● | | انگلیسی | | چکیده | فارسی ● | | انگلیسی ● |
| یادداشت | | | | | | | | |

**نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه**

استاد:

دانشجو:

**امضاء استاد راهنما:**  **تاریخ:**

**تقدیم به:**

**پدر و مادر مهربان**

**و همسر گرامی‌ام**

**تقدیر و تشکر**

از سرکار خانم دکتر اعظم جلالی استاد گرانقدرم به خاطر راهنمایی‌های ارزنده در تمامی مراحل تحقیق و نگارش این پروژه، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقای دکتر حسین نازکدست استاد مشاور این پروژه کمال تشکر را دارم.

همچنین از پرسنل و مدیریت محترم شرکت کهرنگ لاستیک که در انجام تست‌های مختلف مرا یاری نمودند، بسیار سپاسگزارم.

## چکیده

هدف از انجام این پروژه تهیه و بررسی تأثیر پودر تایر ضایعاتی(GTR) بر رفتار و خواص پلی‌اتیلن سبک خطی(LLDPE) در مقایسه با ترموپلاستیک الاستومر مشابه پلی‌اتیلن سبک خطی / لاستیک طبیعی(LLDPE/NR) است. پودر تایر ضایعاتی در این آلیاژها جایگزین بخشی از لاستیک طبیعی شده است. اختلاط در یک مخلوط کننده داخلی از نوع برابندر در دمای بالا صورت گرفته است. دی کیومیل پراکسید(DCP) به عنوان عامل پخت و مالئیک انیدرید(MA) به عنوان عامل سازگارکننده در آمیزه‌ها استفاده شده است. بررسی خواص مورفولوژیکی و رئولوژیکی نمونه‌ها به کمک دستگاه‌های اسپکترومتر مکانیکی رئولوژیکی(RMS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) نشان می‌دهد برهمکنش مناسبی میان اجزاء در نمونه‌های سازگار شده ایجاد می‌شود. همچنین بررسی خواص مکانیکی نشان می‌دهد که نمونه‌های تهیه شده ویژگی‌های مواد ترموپلاستیک الاستومری را دارا می‌باشند.



**واژه‌های کلیدی:** ترموپلاستیک الاستومر((Thermoplastic Elastomer (TPE))، پلی‌اتیلن سبک خطی ((Linear Low Density Polyethylene(LLDPE))، لاستیک طبیعی((Natural Rubber (NR))، پودر تایر ضایعاتی((Ground Tire Rubber(GTR)).

## فهرست مطالب


**مقدمه** ..... ۱

**فصل اول- بازیافت تایر و کاربردهای آن** ..... ۲

۱-۱ تاریخچه بازیافت لاستیک ..... ۳

۱-۲ علت بازیافت تایرهای فرسوده ..... ٤

۱-۳ بازیافت تایرهای فرسوده ..... ٥

۱-۳-۱ بازیافت تایر به صورت پودر ..... ٥

۱-۳-۲ بازیافت تایر به صورت کائوچوی احیاء شده ..... ۷

۱-۳-۳ استفاده مجدد از تایرهای فرسوده ..... ۱۰

۱-٤ کاربردهای پودر تایر ضایعاتی ..... ۱۲

**فصل دوم- مبانی آلیاژها و آمیزه‌های پلیمری** ..... ۱٥

۲-۱ مقدمه ..... ۱٦

۲-۲ مفهوم سازگاری ..... ۱۸

۲-۳ انتخاب اجزاء آلیاژ ..... ۲۰

۲-٤ روش‌های آلیاژسازی ..... ۲۱

۲-٤-۱ آلیاژسازی مذاب ..... ۲۱

۲-٤-۲ آلیاژسازی محلول ..... ۲۲

۲-٤-۳ آلیاژسازی واکنشی ..... ۲۲

۲-٤-٤ آلیاژسازی لاتکس ..... ۲۳

۲-٥ مورفولوژی سیستم‌های پلیمری ..... ۲۳

۲-٦ روش‌های سازگارسازی آلیاژهای پلیمری ..... ۲٥

۲-۷ روش‌های تجربی تعیین میزان سازگاری آلیاژهای پلیمری ..... ۲۷

۲-۸ خواص مکانیکی آلیاژهای لاستیک و پلاستیک ..... ۳۰
۲-۹ عوامل مؤثر در مقاوم کردن ترموپلاستیک‌ها ..... ۳۰
۲-۱۰ ترموپلاستیک الاستومرها ..... ۳۶
۲-۱۱ دسته‌بندی ترموپلاستیک الاستومرها ..... ۳۷
۲-۱۱-۱ کوپلیمرهای بلاک استایرنی ..... ۳۸
۲-۱۱-۲ کوپلیمرهای مالتی- بلاک کریستالی ..... ۳۹
۲-۱۱-۳ ترموپلاستیک الاستومرهای حاصل از آلیاژ پلاستیک / الاستومر ..... ۴۰
۲-۱۱-۴ کوپلیمرهای گرافت، آیونومرها ..... ۴۱
۲-۱۲ ساختار فازی ترموپلاستیک الاستومرها ..... ۴۲
۲-۱۳ مزایا و معایب ترموپلاستیک الاستومرها ..... ۴۴
۲-۱۴ ترموپلاستیک الاستومرهای پخت دینامیکی شده(TPVs) ..... ۴۵
۲-۱۵ اصول و مبانی پخت دینامیکی ..... ۴۷
۲-۱۵-۱ سازگاری پلاستیک و لاستیک ..... ۴۷
۲-۱۵-۲ ساختار بین فازی ..... ۴۸
۲-۱۵-۳ کریستالینیتی فاز پلاستیکی ..... ۴۸
۲-۱۵-۴ ولکانیزاسیون لاستیک ..... ۴۸
۲-۱۵-۵ کنترل مورفولوژی و اندازه ذرات ..... ۴۹
۲-۱۵-۶ کنترل ویسکوزیته مذاب ..... ۵۱
**فصل سوم- مروری بر مطالعات انجام شده** ..... ۵۲
۳-۱ مقدمه ..... ۵۳
۳-۲ بررسی تأثیر اندازه و مساحت سطح ذرات ..... ۵۴
۳-۳ دولکانیزاسیون ..... ۵۵
۳-۴ روش‌های اصلاح سطحی ..... ۵۵

۳-٤-۱ اکسیداسیون سطحی ..... ٥٥
۳-٤-۲ روش‌های دیگر اصلاح سطحی ..... ٥٦
۳-٥ افزودن عوامل سازگارکننده ..... ٥٦
**فصل چهارم- معرفی مواد** ..... ٦١
٤-۱ پودر تایر بازیافتی(GTR) ..... ٦٢
٤-۲ لاستیک طبیعی(NR) ..... ٦٣
٤-۳ پلی اتیلن خطی با دانسیته پایین(LLDPE) ..... ٦٥
٤-٤ سایر اجزاء ..... ٦٧
**فصل پنجم- بخش تجربی** ..... ٧١
٥-۱ اجزاء آمیزه ..... ٧٢
٥-۲ تهیه نمونه‌ها ..... ٧٣
٥-۲-۱ تهیه مستربچ لاستیک طبیعی/ پودر لاستیک بازیافتی/ مالئیک انیدرید(NR/GTR/MA) ..... ٧٤
٥-۲-۲ تهیه مخلوط‌ها ..... ٧٤
٥-۳ دستگاه‌ها ..... ٧٥
٥-۳-۱ مخلوط کننده داخلی ..... ٧٥
٥-۳-۲ قالبگیری فشاری ..... ٧٥
٥-٤ آزمون‌ها ..... ٧٦
٥-٤-۱ آزمون بر روی پودر لاستیک ..... ٧٦
٥-٤-۲ آزمون کشش ..... ٧٦
٥-٤-۳ سختی ..... ٧٦
٥-٤-٤ آزمون با میکروسکوپ الکترونی ..... ٧٧
٥-٤-٥ آزمون اسپکترومتری مکانیکی رئولوژیکی(RMS) ..... ٧٧
٥-٤-٦ بررسی مانایی فشاری ..... ٧٨

**فصل ششم- نتایج** ..... ۷۹

۶-۱ ویژگی‌های پودر لاستیک ..... ۸۰

۶-۲ رفتار رئولوژیکی ..... ۸۲

۶-۳ بررسی مورفولوژی ..... ۸۷

۶-۴ خواص مکانیکی ..... ۹۱

**نتیجه گیری** ..... ۱۰۰

**پیشنهادات** ..... ۱۰۱

**مراجع** ..... ۱۰۲

**مقدمه**

کاربرد وسیع قطعات لاستیکی و به خصوص تایر وسایل نقلیه، منجر به ایجاد حجم عظیمی از قطعات لاستیکی و تایرهای فرسوده شده است. از آنجائیکه این محصولات گرماسخت بوده و در برابر تخریب‌های بیولوژیکی مقاوم هستند، امروزه مسئله بازیافت تایرهای فرسوده و یافتن روشی مناسب برای بکارگیری مجدد این مواد، به یکی از مهمترین چالش‌های پیش روی کشورهای صنعتی تبدیل شده است.

بازیافت تایرهای فرسوده علاوه‌بر ذخیره منابع طبیعی محدود منجر به کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از رهاسازی آنها در محیط می‌شود. بیشتر تایرهای فرسوده یا به عنوان سوخت سوزانده می‌شوند و یا زیر خاک دفن می‌گردند و تنها درصد کمی از آنها برای تولید محصولات ثانویه‌ای چون پودر لاستیک، (PE) ، استفاده می‌شوند. در سالهای اخیر کاربرد مجدد پودر تایر در ترموپلاستیک‌هایی همچون پلی‌اتیلن بیش از پیش رایج شده است. به علت سازگاری / چسبندگی (PS) و پلی‌استایرن (PP) پلی‌پروپیلن و اکریل آمید (EVA)ضعیف بین پودر و پلیمر از سازگار کننده‌های مختلفی همچون اتیلن وینیل استات و ... جهت افزایش سازگاری و بهبود خواص استفاده می‌شود. در این پروژه ترموپلاستیک(AAm) تهیه شده و خواص مکانیکی، مورفولوژیکی و (GTR) حاوی پودر تایر بازیافتی LLDPE/NR الاستومر رئولوژیکی آمیزه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق ابتدا به اهمیت بازیافت لاستیک، روش‌های بازیافت، و برخی از کاربردهای لاستیک بازیافتی پرداخته می‌شود. فصل دوم به معرفی آلیاژهای پلیمری و ترموپلاستیک الاستومرها اختصاص دارد. در فصل سوم مروری بر تحقیقات صورت گرفته انجام شده است. در فصول چهارم و پنجم به ترتیب به معرفی مواد اولیه، آزمونها و دستگاه‌های مورد استفاده، پرداخته شده است. نتایج تجربی در فصل ششم، و نتیجه‌گیری و پیشنهادات نیز در فصل پایانی ارائه شده است.

# فصل اول

# بازیافت تایر و کاربردهای آن

# فصل اول

# بازیافت تایر و کاربردهای آن

## ۱-۱ تاریخچه بازیافت لاستیک

بازیافت در صنعت لاستیک تقریباً به قدمت تولید صنعت لاستیک است. چارلز مکینتاش[۱] در سال ۱۸۲۰ تنها یک سال پس از آغاز تولید لباس بارانی از پارچه لاستیکی، نیازمند میزان زیادی لاستیک شد تا حدی که توان واردات آن را نداشت. توماس هانکوک[۲] همکار پژوهش‌گر او راه حل جدیدی برای وی یافت. هانکوک دستگاهی ساخت که پسماندهای لاستیک ایجاد شده طی فرآیند تولید بارانی را آسیاب و سپس این خرده‌های لاستیک را به صورت بلوک‌های لاستیکی، یکپارچه می‌نمود و دوباره وارد فرآیند تولید می-کرد. با این وجود دوران بازیافت آسان لاستیک عمر کوتاهی داشت[۱و۲].

ولکانیزاسیون، فرآیند مقاوم سازی آمیزه لاستیکی در برابر شرایط جوی، که دستیابی به صنایع نوین لاستیک را امکان پذیر ساخت، بازیافت لاستیک را دشوارتر کرد. هنگامی که آمیزه ولکانیزه می‌شود، دیگر ذوب کردن آن برای تولید محصول جدید امکان‌پذیر نیست، زیرا این فرآیند باعث می‌شود تمامی مولکول‌های

[۱] Charles Macintosh
[۲] Thomas Hancock

محصول لاستیکی به هم متصل شده و مولکول شبکه‌ای بزرگتری را ایجاد کنند که به آسانی جاری نمی-شود. تا قرن بیستم بازیافت در کوتاه مدت کاملاً به صرفه بود زیرا در آن هنگام هنوز کائوچوی طبیعی یا مصنوعی، قیمت بالایی داشت. در سال ۱۹۱۰ هر اونس کائوچو هم قیمت یک اونس نقره بود. این یکی از دلایلی بود که سبب می‌شد در ابتدای قرن بیستم به طور متوسط بیش از نیمی از هر محصول لاستیکی، از لاستیک بازیافتی تشکیل شده باشد.

اما از سال ۱۹٦۰ میزان لاستیک بازیافتی به کاربرده شده در هر محصول به زیر ۲۰ درصد رسید، چرا که واردات نفت ارزان و رشد تولید کائوچوهای مصنوعی هزینه‌های تولید را پایین آورد. توسعه تایرهای رادیال در اواخر دهه ٦۰ میلادی تقریباً پایانی بر صنعت بازیافت لاستیک گشت زیرا به این ترتیب آسیاب کردن لاستیک عملی بسیار پرهزینه و بدون توجیه اقتصادی می‌شد، به گونه‌ای که در سال ۱۹۹۵ تنها ۲ درصد از ترکیب محصولات لاستیکی، بازیافتی بود[۱و۲].

## ۱-۲ علت بازیافت تایرهای فرسوده

همان طور که پیش‌تر گفته شد، تایرهای فرسوده تا دهه ۱۹٦۰ بازیافت می‌شدند. از آن زمان به بعد، نفت ارزان و دشواری خرد کردن تایرهای بلت سیمی، صرفه اقتصادی را کاملاً در دور ریختن تایرها قرار داد. چنین عملی برای بشر و سلامت محیط زیست، پیامدهای منفی دارد. از جمله افزایش آلودگی و مصرف انرژی و اتلاف منابع محدود مانند نفت و فولاد. بازیافت تایر فقط قسمتی از تلاش‌هایی است که جامعه، صنعت و افراد می‌توانند برای کاهش مشکلات ناشی از ضایعات دور ریز تایر انجام دهند.

## ۱-۳ بازیافت تایرهای فرسوده

به طور کلی بازیافت تایرهای فرسوده به سه صورت انجام می‌گیرد[۱و۲]:

الف- بازیافت تایر به صورت پودر

ب- بازیافت تایر به صورت کائوچوی احیاء شده[۱]

ج- استفاده مجدد از تایرهای فرسوده

در میان این روش‌ها، پودر تایر فرسوده کاربردهای گسترده‌تری یافته است. در ادامه به شرح هر یک از روش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱-۳-۱ *بازیافت تایر به صورت پودر*

اولین مرحله فرآیند بازیافت(به جز روکش کردن) کاهش اندازه تایرها به وسیله آسیاب کردن آنها است. در حال حاضر سه روش برای آسیاب کردن لاستیک ضایعاتی وجود دارد:

**آسیاب کردن اتمسفری[۲]**

در آسیاب کردن اتسفری، ابتدا لاستیک ضایعاتی ولکانیزه به تکه‌های تقریباً ۵ یا ۲ سانتیمتری تبدیل می-شود. سپس لاستیک تکه تکه شده از روی جداسازهای مغناطیسی و مکش هوا برای جدا کردن فلز و الیاف عبور داده می شود. سپس با عبور این ماده از غلتک‌های آسیاب محیطی یا اتمسفری، اندازه ذرات کوچک‌تر می‌شوند و یا به وسیله آسیاب کردن در حضور سیال سرمازا به ذرات خیلی ریزتری تبدیل می‌شوند. اندازه ذره و توزیع اندازه ذره در آسیاب کردن اتمسفری به تعداد دفعات عبور مواد از درون غلتک و نوع غلتلک بستگی دارد. فرآیند اتمسفری اغلب شامل یک غلتک لاستیکی متداول با توان بالا یا یک غلتک شکننده با

[۱] Reclaim
[۲] Ambient Grinding

شکاف (Nip) کم بین دو رول می‌باشد.

این فرآیند ذراتی بی‌نظم، زبر و دندانه‌دار با اندازه ذرات ۱-٦ میلیمتر تولید می‌کند. به علاوه، مقدار گرمای قابل توجهی در طول فرآیند لاستیک تولید می‌شود. گرمای اضافی می‌تواند لاستیک را تخریب کند و اگر محصول به روش صحیحی سرد نشود، در زمان نگهداری امکان احتراق وجود دارد.

### آسیاب کردن درحضور سیال سرمازا[۱]

روشی مناسب برای به دست آوردن ذرات لاستیکی با مش خیلی ریز، سرد کردن تکه‌های تایر ضایعاتی در نیتروژن مایع تا زیر دمای انتقال شیشه‌ای آن(عموماً در محدوده ۳۰- تا ℃ ۸۰-) و سپس پودر کردن آنها به وسیله یک غلتک ضربه‌ای[۲] است. لاستیک خرد شده در حضور سیال سرمازا دارای اندازه ذره بسیار ریزتری نسبت به فرآیندهای دیگر است. این فرآیند برای لاستیک‌های ارزان همچون تایرهای ضایعاتی، به دلیل مقدار نیتروژن مایع یا دیگر مایعات سرمازایی که برای یخ بستن یا خنک کردن لاستیک نیاز می‌باشد، اقتصادی نیست. این فرآیند ممکن است برای لاستیک‌های گران قیمتی همچون فلوئوروکربن‌ها اقتصادی باشد. این فرآیند سطوح شکست نسبتاً صافی را ایجاد می‌کند. گرما در این فرآیند تولید نمی‌شود یا گرمای تولیدی کم است. این منجر به تخریب کم لاستیک می‌شود. به علاوه، مهمترین خصوصیت فرآیند آن است که تقریباً تمام الیاف و فولاد از لاستیک جداسازی می‌شود که به بازدهی بالای محصول و اتلاف کم لاستیک منجر می‌شود.

### آسیاب کردن مرطوب[۳]

لاستیک آسیاب شده مرطوب با استفاده از سوسپانسیون آبی ذرات لاستیکی و یک غلتک نوع آسیاب آردی

[۱] Cryogenic Grinding
[۲] Hammer
[۳] Wet Grinding

تولید می‌شود. در این روش لاستیک به طور ظریفی ریز می‌شود و عموماً ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ میکرون ساخته می‌شود. بعد از فرآیند آسیاب کردن آب از خرده لاستیک‌ها جداسازی شده و لاستیک خشک می‌شود. مزیت ذرات حاصل، شامل فرآیندپذیری خوب، تولید ورقه‌های کلندر شده و محصولات اکسترود شده نسبتاً صاف است. عیب این روش این است که پودر لاستیک باید خشک شود.

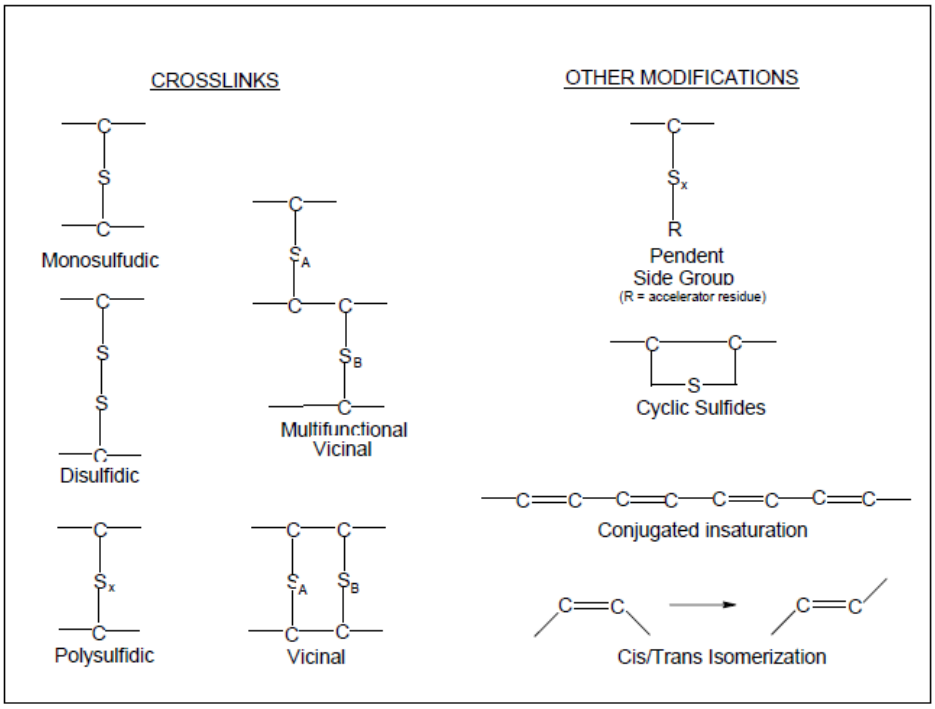
دیگر فرآیندهای بازیافت شامل روش‌های مکانیکی و مکانیکی- حرارتی است که فقط لاستیک‌های ولکانیزه را خرد می‌کنند و آنها را دولکانیزه[۱] نمی‌کنند.

### ۱-۳-۲ بازیافت تایر به صورت کائوچوی احیاء شده

#### فرآیند احیاء لاستیک ولکانیزه(Reclaiming Process)

فرآیند احیاء روشی است که در آن لاستیک ضایعاتی ولکانیزه شده با استفاده از انرژی مکانیکی، حرارتی یا شیمیایی به حالتی تبدیل می‌شود که می‌توان آن را مجدداً مخلوط و ولکانیزه نمود. بخش عمده فرآیند احیاء ، دولکانیزاسیون است. دولکانیزاسیون لاستیک فرآیند شکست شبکه شیمیایی اتصال‌های عرضی(شکل ۱-۱) همراه با کوتاه‌تر شدن زنجیره‌های بزرگ- مولکول ، با استفاده از انرژی مکانیکی، حرارتی یا شیمیایی است.

[۱] Devulcanization




شکل( ۱-۱) ساختارهای کلی در پخت گوگردی لاستیک طبیعی[۳].

از جمله روش‌های احیاء لاستیک ولکانیزه شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

**فرآیند احیاء گرمایی**: قدیمی‌ترین شکل دولکانیزاسیون است که در سال ۱۸۵۸ ثبت شد. در دولکانیزاسیون گرمایی، لاستیک را به مدت طولانی در مجاورت دماهای بالا قرار می‌دهند. به این ترتیب پیوندهای گوگردی آن شکسته می‌شود. چنین فرآیندی، سبب شکست زنجیره‌های پلیمری نیز می‌شود که به شدت کیفیت لاستیک را کاهش می‌دهد. این روش امروزه به ندرت به کار برده می‌شود.

**دولکانیزاسیون مکانیکی**: در این روش، تکه‌های لاستیکی ریز (معمولاً مش۳۰ ) با روغن‌های مختلف بازیابی مخلوط شده و در معرض دمای بالا همراه با انرژی مکانیکی شدید برای تبدیل شدن به ریکلیم قرار داده می‌شوند.

**دولکانیزاسیون میکروویو:** این فرآیند گرما را خیلی سریع و یکنواخت به لاستیک ضایعاتی اعمال می‌کند. این روش با کاربرد مقدار کنترل شده از انرژی میکروویو، لاستیک‌های پخت شده با گوگرد که شامل اجزاء یا گروه‌های قطبی باشند مثل شیلنگ‌ها را دولکانیزه می‌کند. ماده استفاده شده در فرآیند میکروویو باید به اندازه کافی قطبی باشد تا انرژی کافی را بپذیرد و گرمای لازم برای دولکانیزاسیون را تولید نماید. این روش یک فرآیند ناپیوسته است و به تجهیزات گران قیمتی نیاز دارد.

**دولکانیزاسیون فراصوتی**: از آنجائیکه پیوندهای گوگرد- گوگرد و گوگرد- کربن انرژی پیوندی کمتری نسبت به پیوندهای کربن- کربن دارند، ( C- –C-S-S-C– (۲۶۸ kJ/mol) , –C-Sx-C– (۲۵۱ kJ/mol) ,S-C– (۲۸۵ kJ/mol))، در نتیجه امواج مافوق صوت در مقادیر معین، در حضور فشار و حرارت، ممکن است ترجیحاً به شکست اتصال‌های گوگردی در لاستیک‌های پخت شده منجر شود. فرآیند دولکانیزاسیون مافوق صوتی بسیار سریع، ساده، کارآمد و عاری از حلال و مواد شیمیایی است، ولی بسیار پرهزینه است.

**دولکانیزاسیون باکتریایی**: در این روش، تایر تا پودرشدن، آسیاب می‌شود. سپس در مایع مخصوصی تشکیل سوسپانسیون می‌دهد. این ماده مخصوص، سرشار از باکتری‌های خورنده گوگرد است. این فرآیند از نظر روش، عملی است اما به دلیل پیچیدگی، بسیار پرهزینه است.

**دولکانیزاسیون شیمیایی:** فرآیند شیمیایی روشی ممکن برای دولکانیزاسیون با استفاده از عوامل شیمیایی است که به باندهای کربن- گوگرد یا گوگرد- گوگرد حمله می‌کنند. این فرآیند بسیار کند است و مشکلات زیادی با برداشتن حلال ها و ضایعات اضانی تولید شده به شکل لجن می‌آفرینند.

### ۱-۳-۳ *استفاده مجدد از تایرهای فرسوده*

استفاده مجدد از تایرهای فرسوده نه تنها به خاطر کاهش حجم ضایعات بلکه به خاطر میزان انرژی‌ای که از تولید نکردن تایر نو ذخیره می‌شود، امکانات بالقوه‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد. از جمله کاربردهای مجدد تایرهای فرسوده می‌توان به روکش کردن مجدد آنها، استفاده به عنوان سوخت در کوره‌های سیمان، ذوب فلزات و بویلرهای صنعتی، و پیرولیز[۱] اشاره کرد. از دیگر کاربردها می‌توان به ساخت سدها و اسکله‌های لاستیکی، دیوار چینی انبارهای زیرزمینی و ... اشاره نمود.

**پیرولیز**

روشی دیگر برای بازیافت تایرهای فرسوده پیرولیز است. پیرولیز تجزیه حرارتی لاستیک‌ها در غیاب هوا و اکسیژن جهت تولید روغن‌ها و گازها برای استفاده مجدد در صنایع پتروشیمی است. دوده و دیگر مقادیر جامد باقیمانده پس از پیرولیز می‌توانند به عنوان پرکننده استفاده شوند. فعالیت‌های پژوهشی در پیرولیز لاستیک تایر برای بازیافت مایع هیدروکربنی و دوده در سال‌های ۱۹۷۰- ۱۹۶۰ کاملاً وسیع بود و منجر به ساخت کارخانه‌ای برای پیرولیز تایرهای ضایعاتی در سال ۱۹۷۰ شد. پس از آن مطالعات مهمی بر روی پیرولیز تایر انجام شد. ولی، این تلاش‌ها به دلیل قیمت پایین روغن خام با شکست مواجه شد. همچنین کارخانه‌های پیرولیز پساب‌های ضایعاتی سمّی تولید می‌کنند که خود یک مشکل زیست محیطی است.

**سوزاندن**

روش ثبت شده دیگر برای استفاده از تایرهای لاستیکی فرسوده، سوزاندن آنها برای به دست آوردن انرژی است. در حقیقت، برای ساختن یک کیلوگرم لاستیک تایر مصنوعی مقدار ۱۲۸ ژول انرژی مصرف می‌شود. در مقایسه، مقدار گرمای بازیافت شده با سوزاندن لاستیک ۳۳- ۲۷ ژول بر کیلوگرم است. که چندان بالاتر

[۱] Pyrolysis