روش های نوین جهت بازیافت لاستیک های فرسوده و حذف اثرات مخرب زیست محیطی آن

دکتر مجتبی عزیزی *[۱]، علی صادقی کیا[۲]، محمد قریب بلوک[۳]، عباس عبدالملکی[۴]

۱- دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، صندوق پستی ۳۴۵۴-۱۶۷۶۵

۲- کارشناسی ارشد طراحی فرآیند-دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران

۳- کارشناس ارشد مدیریت شهری – دانشکده مدیریت دانشگاه آزاد واحد یادگار امام(ره)

۴- دانشجوی دکترای شیمی تجزیه، دانشکده شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

*** ایمیل نویسنده مسئول:azizi.m_58@yahoo.com**

خلاصه

در عصر حاضر، توسعه فنّاوری و افزایش بهره‌برداری از ماشین‌آلات و وسایل نقلیه، به محدودیت منابع انرژی فسیلی دامن زده است. در عین حال، انباشت زباله‌ها، به ویژه تایرهای کهنه، نگرانی‌های زیست‌محیطی را تشدید کرده است. این وضعیت ضرورت بازیافت تایرهای فرسوده و ایجاد محصولات جدید از آن‌ها را به یکی از اولویت‌های مهم و سودآور در سطح جهانی تبدیل کرده است. به همین دلیل بررسی روش ها و فرایندهای مختلف بازیافت لاستیک های فرسوده به منظور بازیابی و تولید مواد با ارزش، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به همین جهت در این مطالعه ابتدا به بررسی مشکلات محیط زیستی ذکر شده و آمار و ارقام موجود در این زمینه پرداخته شده و سپس روش‌های مرسوم بازیافت تایرهای فرسوده به همراه مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با توجه به مطالب گفته شده فرایند بهینه بازیافت لاستیک های فرسوده انتخاب گردیده است.

کلمات کلیدی: تایر فرسوده، بازیافت، فرایند پیرولیز، محیط زیست، ارزش افزوده

۱. مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های سریع در عرصه فنّاوری و افزایش استفاده از تجهیزات صنعتی و وسایل نقلیه، چالش‌های مربوط به منابع انرژی تجدیدناپذیر به شدت احساس می‌شود. همچنین، حجم بالای زباله‌های تولیدی، به ویژه تایرهای فرسوده، به معضلی جدی تبدیل شده است. این شرایط موجب شده است که بازیافت تایرهای فرسوده و تبدیل آن‌ها به محصولات جدید، به یکی از راهکارهای مؤثر و اقتصادی در بسیاری از کشورها تبدیل شود.[1]

۲. مشکلات زیست‌محیطی ناشی از لاستیک‌های فرسوده

استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی موجب گرمایش کره زمین و تولید گازهای آلوده‌کننده از جمله دی‌اکسید گوگرد[1] و اکسیدهای نیتروژن[2] شده است. تولید بیش از حد ضایعات جامد پدیده دیگری است که امروزه تبدیل به یک معضل نگران‌کننده جهانی شده است. در ساختار تایرها از ترکیبات پلیمری استفاده می‌شود که پس از پایان عمر استفاده تایرها، در طبیعت غیرقابل‌تجزیه بوده و سالیان درازی در طبیعت باقی می‌مانند؛ بنابراین تایرهای فرسوده نیز یک نوع از ضایعات غیرقابل‌تجزیه بوده و در برابر تخریب و تجزیه طبیعی مقاوم هستند. همین عوامل، نگهداری تایرهای فرسوده را به یک مشکل اساسی زیست‌محیطی در اغلب کشورهای توسعه‌یافته تبدیل کرده است [3].

از سویی در منابع متعددی ذکرشده است که پسماندهای پلیمری حتی تا ۱۰۰۰ سال در طبیعت باقی‌مانده و پس از این مدت تنها به‌صورت ذرات بسیار ریز تغییر شکل می‌دهند و وارد چرخه آب و غذا در محیط‌زیست می‌گردد، بنابراین می‌توان ادعا نمود که بدون یافتن راهکاری مناسب در مواجه با پسماندهای پلیمری، به‌زودی کره زمین توسط پسماندهای پلیمری پوشیده خواهد شد [4].

نیاز به‌صرف انرژی برای انهدام و یا تصفیه زباله‌ها باعث شده تا فکرهای نوینی در خصوص این معضل طرح و بررسی شود. افزایش مداوم میزان زباله‌ها، بررسی و توسعه‌ی راه‌های بهتر مدیریت آنها را ضروری می‌کند [2].

برخی از معضلات دفن تایرها عبارت‌اند از:

- مکان‌های ذخیره‌سازی و دفن تایرها محیط مناسبی برای زادوولد موجودات موذی ایجاد می‌کنند که سلامت انسان را به خط می‌اندازد.
- زمینی که تایرها در آن دفن می‌شود دچار آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود.
- خطر آتش‌سوزی در محل ذخیره‌سازی تایر بسیار بالاست و این مسئله می‌تواند باعث بروز آتش‌سوزی‌های خطرناک و غیرقابل‌کنترل شده و به‌تبع آن آلودگی هوای شدیدی در محیط ایجاد شود.
- باتوجه‌به هزینه‌های بالای دفن قانونی تایر، دفن غیرقانونی افزایش می‌یابد.
- با کاهش روزافزون فضای خالی و دفنگاه‌ها، دفن تایر روزبه‌روز گران‌تر خواهد شد.
- دفن تایر موجب اشغال زمین‌هایی می‌شود که می‌توان از آن‌ها استفاده‌های مفید دیگری نمود [5].

۳. آمار تولید لاستیک و لاستیک فرسوده

۱.۳. لاستیک

سالانه بیش از ۱ میلیارد حلقه تایر در جهان تولید می‌شود که سهم ایران ۳۵۰ هزار حلقه در سال است. این میزان تا پایان سال ۱۴۰۴ به رقم ۷۰۰ هزار حلقه در سال خواهد رسید. بیش‌ترین سهم مصرف سالانه تایر در دنیا با رقمی بالغ بر ۳۵۰ میلیون حلقه مربوط به ایالات متحده آمریکا است. این میزان در اروپا ۲۵۰ میلیون حلقه و در کشوری مثل ژاپن ۷۰ میلیون حلقه است. میزان مصرف تایر در ایران نیز رقمی بیش از ۲۵ میلیون حلقه در سال است [5].

در سال ۱۹۹۶، تقریباً ۲۶۶ میلیون حلقه تایر فرسوده در ایالات متحده آمریکا تولید شد که در سال ۱۹۹۹ این مقدار به ۸۰۰ میلیون رسید. در سال ۲۰۰۱، در انگلستان ۵۰ میلیون حلقه تایر که معادل با ۴۸۰ هزار تن است تولید شد و ۸۰ هزار

[1] SO_2
[2] NOX

تن از آن در دفنگاه‌های مخصوص مدفون گردید. در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ نیز در سراسر استرالیا ۲۴۰ هزار تن تایر فرسوده تولید شد. در ایران نیز سالانه حدود ۱۳ میلیون حلقه تایر فرسوده وارد محیط‌زیست می‌شود [1].

۲.۳. لاستیک فرسوده

طبق تعریف یک تایر فرسوده تایری است که قابل‌استفاده در وسایل نقلیه به‌عنوان چرخ نیست. میزان تولید سالانه تایرهای فرسوده در جهان بیش از ۱.۴ میلیارد حلقه و بر حسب وزن، بالغ بر ۱۷ میلیون تن تخمین زده می‌شود که ٪۹۰ آن مربوط به تایر خودروهای سواری و ٪۱۰ آن مربوط به تایر ماشین‌های سنگین است. این میزان هر ساله در جهان به دلیل توسعه فنّاوری‌های حمل‌ونقل روبه‌افزایش است. طبق آمار به‌دست‌آمده در کشورهای صنعتی، سالانه یک حلقه تایر به‌ازای هر شهروند مصرف می‌شود. هر تایر تازه ماشین‌سواری ۱۱ کیلوگرم وزن دارد و تایر فرسوده ماشین‌های سواری ۹ کیلوگرم است و برای ماشین‌های سنگین مثل اتوبوس و کامیون، تایر نو ۵۴ کیلوگرم و تایر فرسوده ۴۵ کیلوگرم است. چین، ایالات متحده و اتحادیه اروپا بیشترین مقدار تایرهای فرسوده را تولید می‌کنند. در چین در سال ۲۰۰۵ حدود یک تن تایر فرسوده تولید شده است که رشد ۱۲ درصدی سالیانه را نشان می‌دهد. مقدار تایرهای استفاده شده در همین سال در ایالات متحده بیش از ۲.۵ میلیون تن است. تولید تایرهای فرسوده در اتحادیه اروپا در واقع‌بین ۲.۵ تا ۳.۴ میلیون تن در سال را نشان می‌دهد. بد نیست بدانید که به‌ازای تولید هر لاستیک خودرو سواری دو بشکه نفت مصرف می‌شود. بزرگ‌ترین قبرستان لاستیک در جهان در کشور کویت قرار دارد، این قبرستان لاستیک به‌اندازه‌ای بزرگ است که از فضا دیده می‌شود [2].

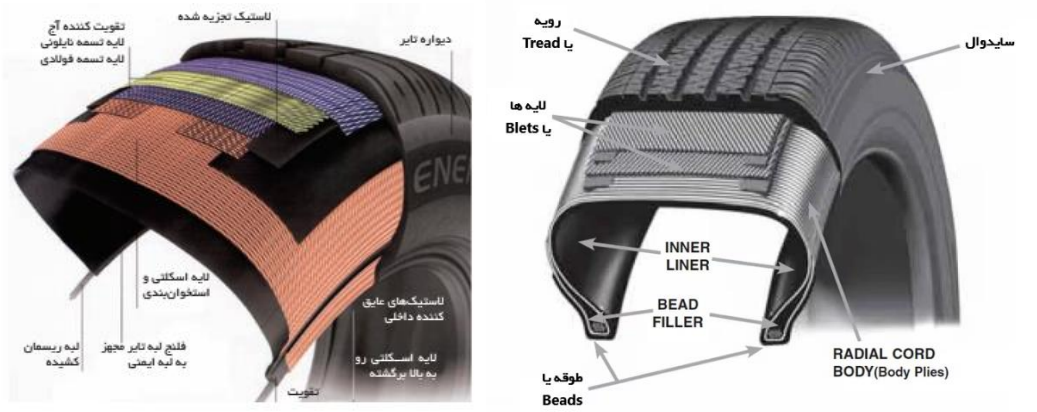
شکل ۱ – تصویر ماهواره‌ای از بزرگ‌ترین قبرستان لاستیک در کویت

۴. مواد سازنده تایر

تایرها در بیش از صد نوع مختلف تولید می‌شوند [2]، اما به‌طورکلی مجموعه‌ای متشکل از بخش‌های گوناگونی است که در شکل ۲ نشان‌داده‌شده است. این بخش‌ها عبارت از:

- لاینر (پوشش داخلی)
- لایه‌ها (سیم‌های فولادی تقویت شده با لاستیک)

- ترد[1] (رویه بیرونی که با کف جاده در تماس است)
- سایدوال[2] (لاستیک طبیعی و مصنوعی با درصد دوده‌ی کم) که دیواره تایر را تشکیل می‌دهد، است.



شکل ۲ - بخش‌های تشکیل‌دهنده تایر

ترکیبات تشکیل‌دهنده لاستیک شامل ۴۰ تا ۵۰ درصد لاستیک اعم از طبیعی و مصنوعی، ۲۸ درصد کربن سیاه، ۱۰ درصد سیم‌های فولادی، ۳ درصد گوگرد و دیگر ترکیبات مانند: مواد نفتی، ترکیبات آلی، سولفوره، اکسید روی و... است جدول ۱-۱ ترکیب درصد اجزای تشکیل‌دهنده دو نوع تایر خودرو سواری و کامیون را نشان می‌دهد [2]. زیربنای اصلی تایر، مواد پلیمری هستند و دوده یا کربن که به‌عنوان عامل تقویت‌کننده به آنها افزوده می‌شود. سیم و نوار نخی به‌منظور تثبیت و تقویت تایر و افزودنی‌ها برای بهبود خواص از جمله نرمی مورداستفاده قرار می‌گیرند. ترکیب دیگری که به لاستیک در حال پخت اضافه می‌شود، گوگرد است که به‌عنوان عامل ایجاد اتصال عرضی بین زنجیره‌های پلیمری به کار می‌رود [1].
کربن سیاه یا دوده استفاده شده، یک کربن آمورف[3] با ساختار شبه گرافیتی است و عمدتاً از طریق احتراق هیدروکربن‌های فسیلی تولید می‌شود [2].

قسمت پلیمری تایر از دودسته ماده طبیعی و مصنوعی تشکیل شده است، دسته اول که به آن کائوچوی طبیعی[4] هم گفته می‌شود، شیره درختان جنگلی از جمله ساپوریلا[5] و بالاتا[6] است که در کشور مالزی و اندونزی به‌وفور یافت می‌شود. کائوچوی طبیعی غالباً به رنگ قهوه‌ای خرمایی موجود است. لاستیک طبیعی یا کائوچو، سیس ۱ و ۴-پلی ایزوپرن است و مولکول‌های آن بر اثر کشش، بلوری می‌شوند، بدین ترتیب شکل مطلوبی از تقویت حاصل می‌شود [1].

نوعی دیگر از لاستیک طبیعی از مایع شیری‌رنگی به نام لاتکس[7] به دست می‌آید که از گیاهی به نام هیوی[8] گرفته می‌شود. این لاستیک پلیمری با زنجیرهای متشکل از حدود ۵۰۰۰ واحد مونومر ایزوپرن با وزن مولکولی ۲۰۰ هزار تا ۵۰۰ هزار است. لاستیک طبیعی دارای خاصیت منحصربه‌فردی است و به‌عنوان یک ترکیب ضروری برای تایر محسوب می‌شود [2]. به‌عنوان پیش‌نیاز ساختاری، مولکول‌های لاستیک‌های طبیعی و سنتزی باید طویل باشند. لاستیک طبیعی ۶ تا ۸ درصد

[1] Tread
[2] Sidewall
[3] Amorphous Carbon
[4] Natural Caucho
[5] Sapodilla
[6] Bullata
[7] Latex
[8] Hivie

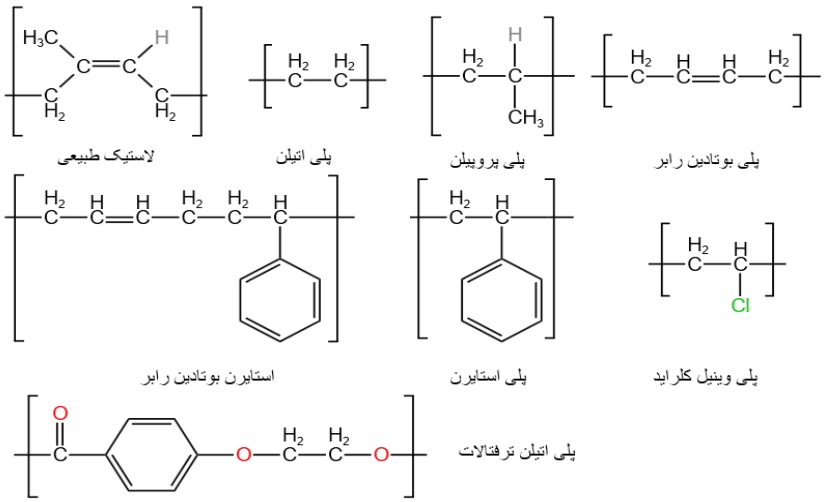
مواد غیر پلاستیکی دارد و در برابر گرما مقاومت زیادی نشان می‌دهد [1].

لاستیک سنتزی یا مصنوعی از هیدروکربن‌های اشباع نشده با استفاده از فرایند پلیمریزاسیون تولید می‌شود. پرمصرف‌ترین لاستیک سنتزی، لاستیک استایرن - بوتادین و لاستیک بوتیل است. فرمول مولکولی عمومی لاستیک به فرم C_xH_y است [2]. این لاستیک‌ها به دو گروه ولکانش پذیر و ولکانش ناپذیر دسته‌بندی شده است. ولکانش یک فرایند شیمیایی است که در آن لاستیک طبیعی، سنتزی و بسپارهای مشابه، با افزودن گوگرد و یا مواد بهبوددهنده و شتاب‌دهنده، به مواد پایدار تبدیل می‌شوند. این افزودنی‌ها، بسپار را به شکل اتصال عرضی با زنجیره‌ی بسپار در می‌آورند [1]. فرایند ولکانیزاسیون که در شکل ۵-۱ آمده است، فرایندی برگشت‌ناپذیر بوده و با مکانیسم‌هایی که هنوز شناخته نشده است انجام می‌شود. در این فرایند با ایجاد پیوندهای کربن - گوگرد بین زنجیرهای لاستیک و ایجاد اتصالات عرضی در میان آنها، به‌سختی و استحکام لاستیک افزوده می‌شود. همین استحکام و کشش بالای تایر موجب می‌شود که تجزیه تایر دشوار باشد [2].

بر اساس گزارش گروه مطالعات جهانی لاستیک در سال ۲۰۱۳، تولید رابر طبیعی تقریباً برابر با ۱۲ میلیون تن و رابر مصنوعی در حدود ۴۵.۵ میلیون تن بوده است که در مجموع رقمی بالغ بر ۲۷.۵ میلیون تن می‌گردد. از مقادیر مذکور هر ساله ۱۷ میلیون تن تنها به مصارف تولید تایر می‌رسد [4]. پرمصرف‌ترین لاستیک سنتزی، لاستیک استایرن-بوتادین است. از دیگر موارد می‌توان پلی بوتادی‌ان، پلی اتیلن-پروپیلن، نئوپرن و لاستیک‌های نیتریل را نام برد [1].

جدول ۱ - ترکیب درصد دو نوع لاستیک سواری و سنگین

نوع لاستیک	سواری (درصد وزنی)	کامیون (درصد وزنی)
لاستیک	۴۷	۴۵
کربن سیاه	۲۱.۵	۲۲
فلز	۱۶.۵	۲۱.۵
الیاف	۵.۵	-
اکسید روی	۱	۲
سولفور	۱	۱
افزودنی‌ها	۷.۵	۵



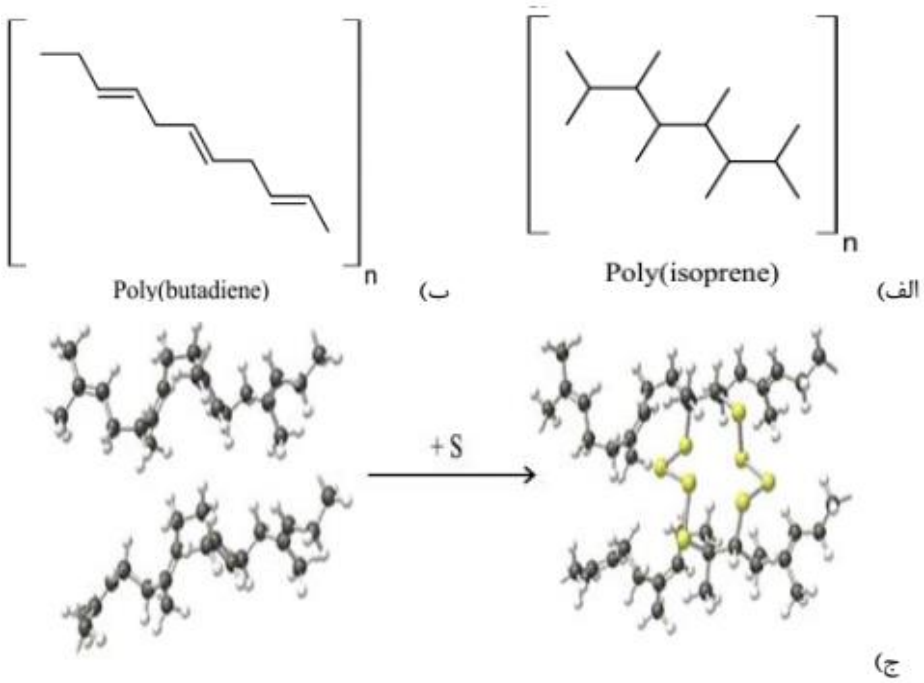
شکل ۳ - ساختار شیمیایی پلاستیک‌ها و لاستیک‌های پرکاربرد

همچنین تحلیل عنصری تایر فرسوده مورداستفاده در یکی از تحقیقات انجام شده در این زمینه در جدول ۲ قابل‌مشاهده است [1]:

جدول ۲ - تحلیل عنصری تایر فرسوده

عنصر	مقدار (درصد وزنی)
C	۸۳.۷
H	۶.۵
N	۰.۶
S	۱.۹
O	۷.۳
LHV[1] (MJ/kg)	۳۷

[1] Lower Heat Value



شکل ۴ – طرح‌واره‌ای از (الف) لاستیک طبیعی، (ب) لاستیک مصنوعی و (ج) ولکانیزاسیون لاستیک مصنوعی [2]

۵. روش‌های بازیافت لاستیک فرسوده

۵. ۱. مستقیم

سریع و کم‌هزینه‌ترین روش‌های بازیافت لاستیک‌های فرسوده که صرفاً اقدامی فیزیکی در خصوص لاستیک هستند، در این دسته قرار می‌گیرند. اغلب این روش‌ها به دلایل زیست‌محیطی قابل‌اجرا نمی‌باشند.

- دفن کردن

تایرهای فرسوده در دفنگاه‌های زباله‌های شهری یا در دفنگاه‌های خشک و مخصوص تایر فرسوده دفن می‌شوند، ازاین‌رو گورستان لاستیک به جایی گفته می‌شود که تایرها در زیر زمین دفن می‌شوند. در گورستان‌ها، لاستیک‌ها با تولید گاز متان باعث ایجاد آتش‌سوزی می‌شوند و همچنین برای حشرات موذی محیطی مناسب ایجاد می‌کنند. دفن تایرها در زیر زمین و تولید گاز توسط آنها منتج به پدیده‌ای به نام حباب‌زایی[1] می‌شود که این حباب‌های گازی باعث آلوده‌شدن منابع زیرزمینی مانند آب می‌شوند. همچنین دفن این نوع از زباله‌ها در دفنگاه‌های زباله‌های شهری باعث تسریع نفوذ شیرابه‌ها به عمق زمین و آلودگی منابع آب می‌شود. این روش یکی از مضرترین روش‌های مدیریت تایرهای فرسوده است و در بسیاری از کشورها از جمله ایران این کار ممنوع اعلام شده است [3].

- استفاده مجدد

روکش و استفاده مجدد شیوه‌ی مدیریتی است که در قبال تایرهای فرسوده به کار می‌رود. روکش کردن و استفاده مجدد برای تایرهایی استفاده می‌شود که هنوز به طور کامل فرسوده نشده‌اند. استفاده از این شیوه‌ی مدیریتی در وسایل نقلیه

[1] Bubbling

سنگین به دلیل هزینه‌های بالاتر خرید تایر نو متداول‌تر است. در روکش و استفاده مجدد بیش از ٪۷۱ ارزش مواد اولیه حفظ می‌گردد. استفاده از تایرهای فرسوده در تولید تایرهای جدید، نیز دارای محدودیت‌هایی است. ازآنجاکه هنگام پردازش تایرهای فرسوده به‌منظور استخراج اجزای مفید آن، عملیات متعددی روی آن انجام می‌گیرد، خصوصیات لاستیک به‌دست‌آمده با مواد خام اولیه متفاوت است، به همین دلیل محدودیت‌هایی در استفاده از این نوع لاستیک در تولید لاستیک‌های جدید داریم [2].

در این روش هیچ تغییر فیزیکی و شیمیایی در ماده موردنظر صورت نمی‌پذیرد و پسماند، پس از شستشو و پاکیزگی کامل، مجدداً وارد چرخه مصرف می‌گردد. در برخی منابع روش مذکور را بازیافت مرتبه صفر[1] نامیده‌اند [4].

- بازیافت مکانیکی

در این روش ابتدا لاستیک به وسیله دستگاه‌های مخصوص به قطعات درشت درمی‌آید، سپس قسمت ترد و بلت آن که شامل نوارهای سیمی است، جداسازی شده و دوباره در صنایع بازیافت فلز استفاده می‌شود، از قطعات ریز شده لاستیک که اصطلاحاً «گرانول لاستیک» [2] گفته می‌شود به منظور تولید کف‌پوش، ماده مکمل بتن و یا ماده اولیه صنایع لاستیک‌سازی استفاده می‌شود. این روش یکی از روش‌های مناسب بازیافت تایرهای فرسوده است اما حجم بالای تولید تایر فرسوده در جهان و تقاضای صنایع وابسته به گرانول لاستیک متوازن نبوده و ازاین‌رو همواره مقدار زیادی از تایرهای فرسوده بدون استفاده می‌ماند که باعث مشکلات زیست‌محیطی می‌شود [3].

۲.۰.۵. بازیابی انرژی

در این نوع بازیافت هدف بهره‌گیری از ارزش حرارتی پسماند به‌منظور تولید انرژی حرارتی و یا تولید برق است. بازیابی انرژی به دلیل تأثیرات منفی آن بر سلامت هوا، به‌ندرت در کشورهای پیشرفته مورداستفاده قرار می‌گیرد، مگر با اعمال فنّاوری‌های بسیار پیشرفته کنترل آلودگی هوا که تا حد زیادی باعث کاهش سوددهی روش مذکور گردیده و نظرها را به سمت دیگر روش‌های بازیافت سوق داده است. در عمل مشخص شده است که استفاده از زباله‌سوزها، تنها مشکل پسماندهای پلیمری را به مشکل آلودگی هوا تغییر می‌دهد [4].

- ۱-۵-۲-۱- سوزاندن

سوزاندن یکی دیگر از راه‌های مدیریت تایرهای فرسوده است که مواد آلی به همراه سیم موجود در لاستیک می‌سوزند و به خاکستر، گاز و ذرات ریز معلق تبدیل می‌شوند. این فرایند حجم ضایعات را در حدود ۹۵ درصد کاهش می‌دهد و معمولا مقداری سیم در انتهای سوختن باقی می‌ماند؛ اما مشکل اصلی این فرایند آزادشدن حجم عظیمی از آلاینده‌هایی از جمله اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای کربن، هیدروکربن‌های فرار، دی اکسین‌ها، فوران‌ها، فلزات سنگین و... در فضای آزاد است که سبب شده است تا این روش در اکثر کشورها ممنوع اعلام شود [3].

- ۱-۵-۲-۲- احتراق مستقیم

در روش احتراق مستقیم تایر فرسوده در زباله‌سوزهای مخصوص و در حضور اکسیژن کافی سوزانده می‌شود و از انرژی حاصل از سوختن آن به‌عنوان انرژی حرارتی برای تولید بخار آب یا انرژی موردنیاز تولید برق استفاده می‌شود. در این روش تولید گازهای سمی باتوجه‌به حضور صافی‌های مخصوص در خروجی دستگاه به‌شدت کاهش می‌یابد؛ اما همچنان گازهای سمی مانند دی اکسین فوران در محیط‌زیست آزاد می‌شود که استفاده از این زباله‌سوزها را محدود کرده است همچنین این روش از هزینه سرمایه‌گذاری بالایی برخوردار است و به‌شرط عرضه انرژی در بازار جهانی، بازگشت سرمایه آن بیش از پنج سال است [3].

[1] Zero Level Recycle
[2] Tire Granol

- ۱-۵-۲-۳- احتراق مشترک

در روش احتراق مشترک تجهیزات تقریباً مشابه با روش احتراق مستقیم هستند، با این تفاوت که لاستیک‌های ضایعاتی با سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ در تجهیزات بسترسیال مانند سیکلون‌ها مخلوط می‌شوند و سپس حرارت داده می‌شوند. این روش نیز مانند روش بالا از هزینه سرمایه‌گذاری بالایی برخوردار است و زمان رسیدن به سود عمده آن طولانی مدت است [1].

۱-۵-۳- بازیابی مواد[1]

دستیابی به محصولات باارزش نظیر انواع سوخت و مواد شیمیایی (بنزن، تولوئن و...)، در این نوع بازیافت مدنظر قرار می‌گیرد. در راستای این هدف، از فرایندهای متنوعی بهره گرفته می‌شود که می‌توان به گازی کردن[2]، کراکینگ بخار و انواع پیرولیز[3] نام برد [4].

- ۱-۵-۳-۱- گازی کردن

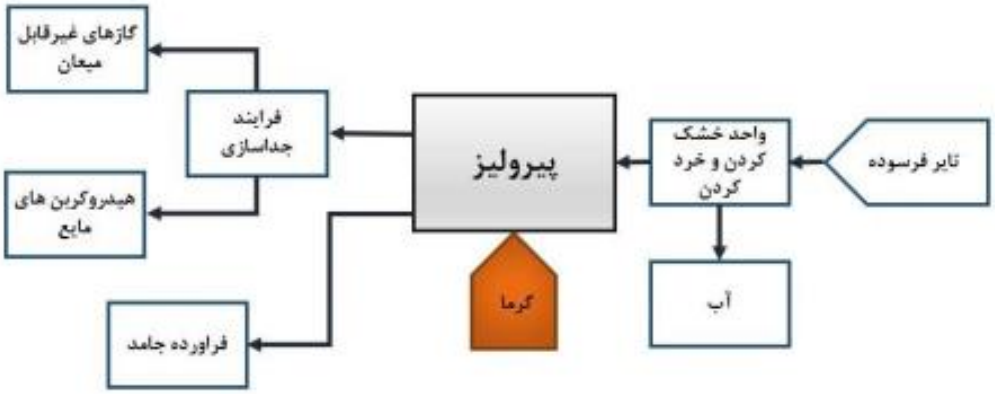
در این فرایند تایر فرسوده در واکنشگاه‌های مخصوص و در غیاب اکسیژن تا دمای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند که بر اثر این فرایند، ترکیبات آلی موجود در خوراک به گازهای منوکسید کربن، هیدروژن و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند. گازهای حاصل که گاز سنتز[4] نامیده می‌شوند، قابلیت راه‌اندازی نیروگاه برق و تولید انرژی موردنیاز واحدهای جانبی را دارند. باتوجه‌به اینکه فرایند گازی کردن از چرخه کارنو پیروی می‌کند، نسبت به روش احتراق مستقیم و احتراق مشترک دارای بازدهی بالاتری است. این روش مانند دو روش مذکور دارای هزینه نصب و راه‌اندازی بالایی است و دوره بازگشت سرمایه آن طولانی مدت است. از دیگر عوامل چالش‌برانگیز فرایند گازی کردن، واکنش در دمای بالا است. تأمین تجهیزات که قادر به تحمل دماهای بالا (تا ۱۲۰۰ درجه‌سانتی گراد) را داشته باشند بسیار هزینه‌بر است و از سوی دیگر برای رسیدن به دماهای بسیار بالا صرف انرژی بسیار زیاد ضرورت دارد. در نتیجه باتوجه‌به اینکه یکی از اهداف اصلی، استفاده از مواد دورریز و تولید مواد سودمند با هزینه تقریباً پایین است، این فرایند از نظر اقتصادی چندان مقرون‌به‌صرفه نیست [3].

- ۱-۵-۳-۲- پیرولیز

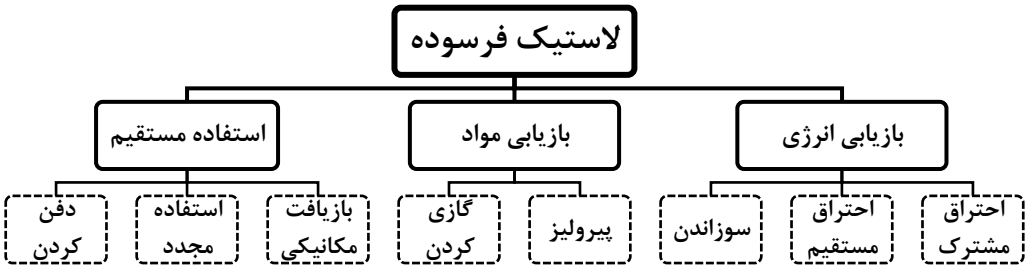
به‌طورکلی به تجزیه حرارتی ترکیبات آلی در غیاب اکسیژن در دمای معین و در یک محفظه بسته پیرولیز گفته می‌شود. پیرولیز تایرهای فرسوده به‌صورت فرایند تجزیه حرارتی ترکیبات تشکیل‌دهنده تایر در دمای معین و در حضور گاز بی‌اثر و یا در حضور مقدار جزئی هوا تعریف می‌شود. در فرایند پیرولیز تایر سه محصول جامد، مایع و گاز تولید می‌شود که بسته به شرایط و تجهیزات مورداستفاده درصد هر یک و ترکیبات تشکیل‌دهنده آن‌ها متغیر است. در حالت کلی می‌توان گفت در یک فرایند پیرولیز بین ۵ تا ۲۰ درصد وزنی گاز، ۴۰ تا ۶۰ درصد وزنی مایع و ۳۰ تا ۴۰ درصد وزنی جامد تولید می‌شود. در این میان محصول مایع که دارای ارزش حرارتی بالا و ترکیبات باارزشی است، را می‌توان به‌عنوان سوخت، حلال، افزودنی مجاز سوخت و بهبوددهنده خواص سوخت‌های حاصل از نفت خام مورداستفاده قرار داد. محصول جامد حاصل از فرایند نیز درصورتی‌که دمای فرایند به‌اندازه کافی بالا باشد و مواد اولیه خاصیت الاستیسیته خود را ازدست‌داده باشند، می‌توان به‌عنوان دوده مورد مصرف صنعتی قرار داد [1].

باتوجه‌به تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های مختلف بازیافت و بررسی اقتصاد هر کدام از آن‌ها، روش پیرولیز هم به دلیل هزینه تجهیزات و آلودگی کمتر نسبت به روش‌های بازیابی انرژی و هم به دلیل ارزش‌افزوده بیشتر، فرایندی مناسب و با توجیه اقتصادی به شمار می‌آید.

[1] Feedstock
[2] Gasification
[3] Pyrolyse
[4] Syn Gas



شکل ۵ – طرح‌واره ساده فرایند پیرولیز [1]



شکل ۶ – دسته‌بندی کلی روش‌های بازیافت تایر فرسوده

۶. نتیجه‌گیری

در نهایت، بازیافت تایرهای فرسوده به‌عنوان یک ضرورت برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی و بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی، به ویژه از طریق روش پیرولیز، مورد توجه قرار می‌گیرد. این روش به دلیل تولید سه نوع محصول ارزشمند شامل روغن، گاز و کربن سیاه، به‌عنوان یک راهکار اقتصادی و پایدار شناخته می‌شود. روغن حاصل از پیرولیز می‌تواند به‌عنوان سوخت یا افزودنی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که گاز تولیدی نیز قابلیت استفاده به‌عنوان منبع انرژی را دارد. همچنین، کربن سیاه به‌عنوان ماده اولیه در صنایع لاستیک‌سازی کاربرد دارد. مزیت دیگر این روش، کاهش آلودگی محیط‌زیست و نیاز به دفن زباله است، زیرا فرآیند پیرولیز آلودگی کمتری نسبت به سوزاندن تایرها ایجاد می‌کند. به‌طور کلی، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بازیافت، به‌ویژه پیرولیز، نه تنها به حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه به توسعه اقتصادی و ایجاد اشتغال در جوامع محلی نیز منجر خواهد شد.

۷. مراجع

۱. امیری، ز. و فرشچی تبریزی، ف. (۱۳۹۶)، "پیرولیز تایرهای فرسوده در یک راکتور ناپیوسته چرخان،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت.

۲. شجری سفیده خوان، گ.، قلی زاده، م. و هو، ش. (۱۳۹۸)، "مطالعه ی اثر کاتالیزور بیوچار بر روی فرآیند پیرولیز تایر فرسوده جهت تولید سوخت،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت.

۳. تاج الدینی، م. و فرشچی تبریزی، ف. (۱۳۹۷)، "پیرولیز کاتالیستی تایرهای فرسوده در یک راکتور ناپیوسته چرخان،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی شیمی و نفت.

۴. اکرامی، ح. و قربانیان، س. (۱۳۹۶)، "شبیه سازی استحصال گازوئیل از پسماندهای پلیمری از طریق فرآیند پیرولیز،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی شیمی.

۵. میرعبداله، ا. و پازکی، م. (۱۳۹۷)، "بررسی و تولید کربن فعال از پسماند صنعت لاستیک سازی به روش هیدروترمال،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست.