

DERLEME MAKALESİ

Atık Lastiklerin Yönetimi, Geri Dönüştürülmesi ve Çevresel Etkileri Üzerine Bir Derleme

Tuğçe AKCA-GÜLER¹, Ayşe YÜKSEKDAĞ², Börte KÖSE-MUTLU³, İsmail KOYUNCU⁴

Yazışma yazarı:
İsmail KOYUNCU,
koyuncu@itu.edu.tr

Referans: Akca-Güler, T.,
Yüksekdağ, A., Köse-Mutlu, B.,
Koyuncu, İ. (2025). Atık Lastiklerin
Yönetimi, Geri Dönüştürülmesi ve
Çevresel Etkileri Üzerine Bir
Derleme, *Çevre, İklim ve
Sürdürülebilirlik*, 26(1), 1-8.

Makale Gönderimi : 12 ARALIK 2024
Online Kabul : 3 ŞUBAT 2025
Online Basım : 7 ŞUBAT 2025

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, & Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uyg-Ar Merkezi, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0009-0004-8168-5060
²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, & Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uyg-Ar Merkezi, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-7751-7556
³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, & Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uyg-Ar Merkezi, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-9747-5499
⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, & Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uyg-Ar Merkezi, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-8354-1889

Özet Lastikler, doğal ve sentetik kauçuk, karbon siyahı, çelik gibi malzemelerden oluşan karmaşık mühendislik ürünleridir. Lastik sanayicileri Derneği (LASDER) verilerine göre ülkemizde her yıl 300.000 ton kullanım ömrünü tamamlayan atık lastik ortaya çıkar. Atık lastiklerin yönetimi, 2006 yılında çıkarılan "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği" ile düzenlenmiştir. Bu yönetmelik, lastik satan her üretici veya ithalatçının, piyasaya sürdüğü lastiklerin bir kısmını geri toplamasını ve geri dönüştürmesini zorunlu kılmaktadır. LASDER, 2023 yılında 222 bin ton atık lastiği geri kazanmış ve bugüne kadar toplamda 2 milyon ton atık lastiği geri dönüşüme kazandırmıştır. Bu geri dönüşümün ekonomiye katkısı ise yaklaşık 1,5 milyar TL olmuştur. Atık lastikler, dünya genelinde enerji üretiminde, inşaat sektöründe, asfalt içinde ve çeşitli endüstriyel alanlarda farklı amaçlarla yeniden kullanılmaktadır. Ömrünü tamamlamış lastikler, petrol ile benzer enerji verimliliği sağlar ve çevreye daha az zarar verirler. İnşaat sektöründe, yol yapımı ve dolgu malzemelerinde kullanımı yaygındır. Yeniden diş takma işlemi ise lastiklerin yeniden kullanılmasını sağlayarak enerji ve doğal kaynak tasarrufu yapar. Piroлиз yöntemi, lastiklerin yüksek sıcaklıkta ayrıştırılarak enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Genel olarak, atık lastiklerin geri dönüşümü, çevresel etkileri azaltırken, doğal kaynakları korur ve katı atık sahalarındaki yer sorununu çözer. Ancak, bu süreçlerin daha etkili ve verimli hale getirilmesi gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ömrünü tamamlamış lastik, geri dönüşüm, karbon siyahı, atıktan türetilmiş yakıt, çevresel etki

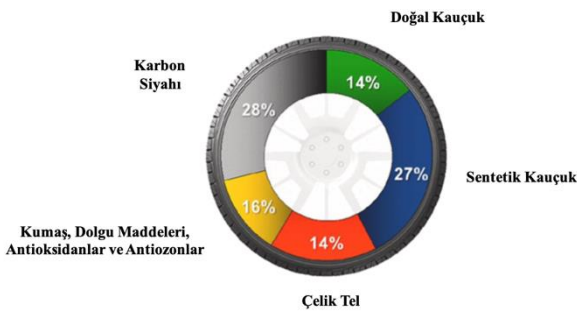
Management, Recycling, and Environmental Impacts of Waste Tires: A Review

Abstract Tires are complex engineering products made from materials such as natural and synthetic rubber, carbon black, steel, and other components. Every year, large amounts of waste tires, which are no longer usable and may harm the environment, are generated. In Turkey, the management of waste tires is regulated by the "Regulation on the Control of End-of-Life Tires," which was issued in 2006. According to this regulation, every manufacturer or importer selling tires is required to collect and recycle a portion of the tires they have placed on the market. LASDER, in 2023, recovered 222,000 tons of waste tires and has contributed a total of 2 million tons to recycling since its establishment. This recycling effort has brought approximately 1.5 billion Turkish Liras in economic benefits. Globally, waste tires are reused in various sectors such as energy production, construction, asphalt, and other industrial applications. End-of-life tires provide energy efficiency similar to petroleum and are less harmful to the environment. In the construction industry, they are widely used in road construction and as filler materials. Retreading, the process of reusing tires by replacing their tread, saves energy and natural resources. The pyrolysis method, which involves breaking down tires at high temperatures to convert them into energy, has its challenges due to high costs. Overall, the recycling of waste tires reduces environmental impacts, conserves natural resources, and alleviates space issues in landfills. However, these processes need to be made more effective and efficient.

Keywords: End of life tire, recycling, carbon black, waste derived fuel, environmental impact

1.Giriş

Küresel ekonominin büyümesi ve vatandaşların hareketlilik ihtiyaçları ile birlikte karayolu taşımacılığının artan hacmi, otomotiv sektörünün dikkatleri üzerine çekmesini sağlamıştır. Otomotiv endüstrisi hem ülkemiz hem de dünya ekonomisi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Küresel ölçekte ve ülkemizde otomotiv sektöründeki üretime bakıldığında Uluslararası Motorlu Araç İmalatçıları Örgütü verilerine göre 2022 yılında bir önceki yıla göre %6 oranında artış gözlemlenmiştir (Otomotiv Sanayii Derneği, 2023). Bu bağlamda, lastik sektörü de otomotiv endüstrisindeki gelişmelerden doğrudan etkilenmektedir. Dünya genelinde artan nüfus ve buna bağlı olarak yükselen araç talebi hem otomotiv hem de lastik üretiminde sürekli bir artışı beraberinde getirmektedir (Potkány vd., 2022). Lastik, taşıtların jantlarına yerleştirilen elastik tekerlek bandajıdır (Türk Dil Kurumu, 2024). Teknik anlamda ise, lastik belirli sıcaklık ve basınçta pişirilmiş, genellikle içerisinde bulunan hava ile hareketini başlatan, hızlandırıcı ve durmasını sağlayan, kullanım aracına göre farklı ebat ve tiplerde olabilen kauçuk hava yastığıdır (T.C. Devlet Planlama Teşkilatı, 2008). Temel olarak, araç ile yol yüzeyi arasındaki tek arayüzdür (Ghaffari vd., 2023). Enerji tüketimi ve araçtan yol yüzeyine güç aktarımında araçların kritik bileşenlerinden biridir ve sürüş güvenliği, yakıt tüketimi ve çevre koruma üzerinde önemli etkilere sahiptir (Trubia vd., 2020). Lastikler, doğal veya sentetik olarak kategorilere ayrılabiliriz çok sayıda kauçuk bileşeni, çeşitli karbon siyahı türleri, silika gibi dolgu maddeleri, tekstil ürünleri, kimyasallar ya da minerallerden oluşan karmaşık mühendislik ürünleridir. Bir lastik, ortalama olarak %14 doğal kauçuk, %27 sentetik kauçuk, %28 karbon siyahı, %14 çelik ve %16 diğer kimyasal ve dolgu maddelerinden oluşur (Şekil 1). Bu bileşenlerin her biri lastiğin performansını ve dayanıklılığını artırmak için dikkatle seçilmektedir. Üreticilerin üretim aşamasında önceliği, kullanılan bu bileşenlerin türünü ve oranını ayarlamaktır. Bu sayede aşınma, yağ, oksijen, kimyasal çözücüler ve sıcaklık parametrelerine karşı dayanıklı lastikler üretmektedir.



Şekil 1. Lastiğin bileşenleri (Rogachuk ve Okolie, 2023).

Lastiklerin belirli bir kullanım ömrü olduğu göz önünde bulundurulduğunda, her yıl ortaya çıkan atık lastik miktarının da giderek arttığı kaçınılmazdır. İstatistiklere bakıldığında, küresel lastik pazarının 2021'de 2,35 milyar adede ulaştığı belirtilmiştir. Pazarın 2027'ye kadar 2,7 milyar adede ulaşması ve 2022-2027 arasında %2,8'lik bir bileşik yıllık büyüme oranına sahip olması ön görülmektedir. Atık lastikler (hurda lastikler; ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL)), yırtılma veya aşınma hasarı nedeniyle artık esas amacına uygun olmayan lastiklerdir. Kauçuğun doğal olmadığı durumlarda, bu bileşenlerin neredeyse tamamı fosil bazlı maddelerden oluşur ve bu da çevreyi kirleten bir faktördür. Bu nedenle, atık

lastiklerin bertaraf yönetimi ve geri dönüştürülmesi konusu çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir yer tutmaktadır (Czarna-Juszkiewicz vd., 2023). Tek bir lastiğin üretimi sırasında atmosfere 330 g CO₂ salınıyor ki bu da iklim açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Zerin vd., 2023). Dünya genelinde her yıl yaklaşık 1,5 milyar lastik kullanım ömrünü tamamladıktan sonra çöpe atılmakta, düzenli depolama sahalarında biriktirilmekte veya yakılmaktadır. Bu sayının 2030 yılına kadar 5 milyara ulaşması öngörülmektedir. Üretilen atık lastiklerin %60-80'i, herhangi bir atık yönetimi uygulanmaksızın doğrudan çevreye bırakılmakta ve "atık lastik dağları" olarak tanımlanan büyük yığınlar oluşturmaktadır (Moasas vd., 2022). Atık lastikler, küresel çapta üretilen toplam atıkların %2'sini teşkil etmektedir (Contec, 2024). Bu durum, hem çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır hem de atık yönetimi sistemlerinde önemli bir sorun alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Atık lastiklerin doğrudan çevreye bırakılması, özellikle alıcı ortamlarda kimyasal sızıntılara neden olması ve yangın riski taşınması sebebiyle çevre ve insan sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturur (Han ve Han, 2023). Depolanan lastikler, sivrisinekler gibi hastalık taşıyan vektörlerin üremesi için uygun ortamlar sağlarken, aynı zamanda çürüme süreçleriyle tehlikeler oluşturur. Hurda lastiklerin büyük bir kısmı, yanlış depolandıklarında veya döküldüklerinde, yangın tehlikesine ve toksik gaz salınımına (Baziene ve Vaiškunaite, 2016) yol açarak halk sağlığına ve çevreye zarar verirken, estetik kirliliğe de yol açmaktadır (Mrad ve El Samra, 2020). Ayrıca, lastiklerin aşınması sonucu yollara ve toprağa karışan mikroplastikler de önemli bir çevre sorunudur. Dayanıklı yapıları ve büyük hacim kaplamaları nedeniyle düzenli depolama alanlarının yetersizliği, atık lastiklerin küresel bir çevre sorunu haline gelmesine neden olmuştur (Ali vd., 2022). Bu durum, yasal düzenlemelerle atık lastiklerin çevreye bırakılmasının yasaklanmasını zorunlu kılmıştır (Trudsø vd., 2022). Bu bağlamda, atık lastiklerin yönetimi hem yasal bir zorunluluk hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, atık lastiklerin birer ulusal kaynak olduğu unutulmamalıdır. Bu atıklar, yalnızca bertaraf edilmesi gereken maddeler olarak değil, çeşitli işleme teknikleriyle ekonomik değeri yüksek nihai ürünlere dönüştürülebilecek potansiyele sahip bir hammadde olarak değerlendirilmelidir (Sienkiewicz vd., 2012). Mevcut istatistikler de bu süreci desteklemektedir. Örneğin, 1992'de Avrupa Birliği üye ülkelerinde malzeme geri dönüşüm oranı yalnızca %5 iken, 2017 itibarıyla bu oran %38'e yükselmiştir (Shulman, 2019). Günümüzde ise Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nde bu oran yaklaşık %90 seviyelerine ulaşmıştır (Valentini ve Pegoretti, 2022).

Bu derleme makalesi, literatür taraması yöntemi esas alınarak hazırlanmıştır. Araştırma sürecinde, 2010-2024 yılları arasındaki ulusal ve uluslararası akademik makaleler, sektörel raporlar, yasal düzenlemeler ve uygulama örnekleri incelenmiştir. Atık lastiklerin yönetimi, geri dönüşümü ve çevresel etkileri konularında yayımlanan çalışmalar taranmış ve bu alandaki gelişmeler özetlenmiştir. Çalışmada, özellikle Türkiye ve dünya çapındaki mevcut uygulamalar karşılaştırmalı olarak ele alınmış; LASDER ve benzeri kurumların sektörel katkıları analiz edilmiştir. Kapsam dışı bırakılan kaynaklar arasında, geri dönüşüm süreçleri ile doğrudan ilgisi bulunmayan veya yeterli bilimsel veri içermeyen yayınlar yer almaktadır.

Bu derleme makalesinin amacı, son yıllarda artan atık lastik hacminin yönetimi, geri dönüşümü ve çevresel etkilerini inceleyerek, Türkiye ve dünya genelindeki mevcut uygulamaları ve karşılaşılan zorlukları değerlendirmektir. Atık lastiklerin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir sorun teşkil ettiği göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada geri kazanım teknolojileri ve atık yönetimi stratejileri incelenecektir. Makale, aynı zamanda atık lastiklerin birer

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

hammadde kaynağı olarak nasıl değerlendirilebileceğini, elde edilebilecek yeni hammaddelerin hangi alanlarda kullanılabileceğini ve bu süreçlerin ekonomik ve çevresel etkilerini ele almayı hedeflemektedir.

2. Lastikten Türetilmiş Yakıt (LYT) Uygulamaları

ÖTL'ler, sahip oldukları yüksek ısı değerleri nedeniyle yakıt olarak kullanılabilirler. ÖTL'lerin yakıt olarak kullanımı geri dönüşüm olarak değerlendirilmez, ancak enerji geri kazanımı sayesinde faydalı bir kullanım olarak kabul edilmektedir (Dabic-Miletic vd., 2021). 2003 yılında, 130 milyon ÖTL, yakıt olarak kullanılmıştır (toplam üretimin yaklaşık %45'i). Bu rakamın 1991 yılında 25,9 milyon (toplam üretilenlerin %10,7'si) ile daha düşük bir değerde olduğu bilinmektedir. (US EPA, 2016a).

Lastikler, yakma ünitesinin türüne bağlı olarak ya bütün olarak ya da atık lastikten türetilmiş yakıt (ALTY) olarak bilinen, parçalanmış formda kullanılabilirle birlikte genel olarak yakma ünitelerinde işlenebilmesi için boyutlarının küçültülmesi gerekmektedir. Boyut küçültme işleminin yanı sıra, ALTY kullanımı tel sökme gibi ek fiziksel işlemler gerektirebilmektedir. Lastiklerin yakıt olarak kullanılmasının birkaç avantajı vardır:

- Lastikler, petrol ile aynı miktarda ve kömürden %25 daha fazla enerji üretir;
- ALTY'den çıkan kül kalıntıları, bazı kömür küllerine kıyasla daha düşük ağır metal içerebilir;
- Yüksek küçültülmüş kömürler ile karşılaştırıldığında, daha düşük NOx emisyonu oluştururlar (US EPA, 2016a; Kazemi vd., 2023).

Çevre Koruma Ajansı (EPA), yığınlar halinde ÖTL'lerin bertarafını, lastik yangınları ve yığınların sıvrisinek gibi hastalık taşıyıcıları için habitat sağlama potansiyeli nedeniyle kabul edilebilir bir yönetim uygulaması olarak değerlendirmemektedir. 2003 yılında, ABD'de 290 milyondan fazla kullanılmış lastik üretilmiştir. Bu lastiklerin yaklaşık 100 milyonu yeni ürünlere geri dönüştürülmüş ve 130 milyonu çeşitli sanayi tesislerinde ALTY olarak yeniden kullanılmıştır. ALTY uygulaması, kullanılmış lastiklerin uygun olmayan bir şekilde lastik yığınlarına atılmasını önlemek için kabul görmüş alternatiflerden biridir ve mevcut lastik stoklarının azaltılmasını sağlamaktadır (US EPA, 2016a). ÖTL'lerin yaygın bir şekilde yakıt olarak kullanıldığı sektörler çimento endüstrisi (Kishan vd., 2021), kâğıt endüstrisi (Barlaz vd., 1993) endüstriyel kazanlar (Li vd., 2010) ve elektrik üretim tesisleri (Amari vd., 1999) örnek olarak gösterilebilir.

3. İnşaat Mühendisliği Uygulamaları

Atık lastiklerin inşaat mühendisliği projelerinde kullanımı, dayanıklılık, esneklik ve çevre dostu özellikleri sayesinde giderek yaygınlaşmaktadır. Atık lastiklerin kullanıldığı ilk inşaat mühendisliği uygulama örneği olarak yol yapımı ve dolgu malzemesi uygulaması verilebilir. Atık lastikler, genellikle kırılmış parçacıklar (crumb rubber) veya lastik balyaları olarak yol yapımında alt tabaka ve dolgu malzemesi şeklinde kullanılır. Esnek yapıları sayesinde asfaltın çatlama riskini azaltır ve yolun ömrünü uzatır. ABD'deki bazı otoyol projelerinde, bir mil uzunluğunda yol yapımında 12.000'den fazla lastik kullanılmıştır. Minnesota'daki bir yol alt tabakası projesinde, lastik balyalarının yüksek drenaj kapasitesi ve zemin stabilitesi sağlama dikkat çekmiştir. Lastik balyaları, düşük taşıma kapasiteli zeminlerde, köprü destek dolguları ve eğimli arazilerde hafif dolgu malzemesi olarak da tercih edilir. Malzemenin ağırlığı geleneksel dolgu malzemelerinden %30 daha hafiftir. Bu özellik, zemine uygulanan yükü azaltarak stabiliteyi artırır. Colorado'daki bir köprü dolgu projesinde, 15.000'den fazla lastik balyası kullanılarak maliyet ve çevresel

fayda sağlanmıştır. Geri dönüştürülmüş lastikler, istinat duvarları ve baraj dolgu malzemesi olarak da kullanılmaktadır. İstinat duvarlarının arkasında su drenajını artırarak yer değiştirme riskini azaltır. Barajlarda ise hafif ve geçirimsiz bir yapı sunar. Kaliforniya'da bir baraj projesinde, bu amaçla 10.000'den fazla lastik parçası kullanılmış ve projeye çevresel katkı sağlanmıştır (US EPA, 2024).

Atık lastikler drenaj sistemlerinin inşasında da kullanılmaktadır. Atık lastik parçacıklarının gözenekli yapısı, suyun hızlıca tahliye edilmesini sağlar ve drenaj sistemlerinde önemli bir avantaj sunar. Yol kenarlarında, otoyollarda ve bina temellerinde kullanılan bu malzeme, su hasarını önler. Granül boyutları genellikle 5-15 mm arasında değişir. Daha ince granüller yalıtım amaçlı, daha büyük parçalar ise drenaj hatlarında kullanılır. Atık lastiklerin etkin olarak kullanıldığı bir diğer seçenek ise, katı atık depolama sahalarında kaplama ve drenaj malzemesi rolüdür. Bu uygulamalarda, sızıntı suyu yönetimi ve gaz tahliye sistemlerinde dolgu malzemesi olarak kullanıldıkları görülmüştür. Kaliforniya'daki bir düzenli depolama projesinde, lastik parçaları sayesinde sızıntı suyu tahliyesinde %25 daha hızlı bir drenaj sağlanmıştır. Son olarak, spor sahalarında sentetik çim alt tabakası olarak geri dönüştürülmüş lastik parçaları kullanılır. Bu malzeme, yüzeyin dayanıklılığını artırırken sporcuların yaralanma riskini azaltır. Ayrıca, park zeminlerinde yumuşatıcı malzeme olarak kullanılarak uzun ömürlü ve çevre dostu bir yüzey elde edilir (US EPA, 2024). İnşaat malzemesi olarak atık lastiklerinin kullanılmasında çevresel risklerin de izlenmesi ve kontrol edilmesi önem taşır. Atık lastiklerin çevresel etkileri üzerine yapılan araştırmalar, toksik madde sızıntısı riskinin düşük olduğunu göstermektedir. Ancak bazı durumlarda, düşük seviyede ağır metal salınımı gözlemlenmiştir. Bu salınımlar, mühendislik kontrollü kullanımlarda kabul edilebilir sınırların altında kalmaktadır. Drenaj performansı, suyun hızlıca tahliye edilmesini sağlarken altyapıların su hasarına karşı korunmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, atık lastiklerin kullanımı, çevresel faydalarının yanı sıra ekonomik avantajlar da sunmaktadır. Bir otoyol projesinde, lastik kullanımı toplam malzeme maliyetlerini %20 oranında azaltmıştır. Baraj ve istinat duvarı projelerinde ise bakım maliyetlerinin düşmesine katkı sağlamıştır (US EPA, 2024). Bu detaylar, geri dönüştürülmüş lastiklerin inşaat mühendisliği uygulamalarındaki kapsamlı ve çok yönlü faydalarını açıkça ortaya koymaktadır.

4. Kauçuklaştırılmış Asfalt Uygulamaları

Kırılmış lastik parçacıkları, son birkaç yıldır asfalt bağlayıcıları için bir modifikasyon maddesi olarak kullanılmaktadır. Doğal kauçuk, 1840 yılında geleneksel asfaltın ömrünü uzatmak amacıyla asfalt kaplamasında içinde ilk kez kullanılmıştır (Thompson ve Hoiberg, 1979). 1960 yılından itibaren ise asfalt kaplama endüstrisinde ikincil bir malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Aynı yıl, optimum karışım elde etme yöntemini belirlemek için bir çalışma yapılmıştır ve sonuçlar, 45 dakika ile 1 saat arasında bir karıştırma süresinin optimum mühendislik özelliklerine sahip bir asfalt karışımı ürettiğini göstermiştir (Epps, 1994). 1975 yılında, kırılmış parçacıklar asfalt karışımlarına dahil edilmiştir ve 1988'de Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), asfalt bağlayıcılarının, esas asfalt malzemesine %15 öğütülmüş lastik katılarak üretilmesi gerektiğini belirlemiştir (Presti vd., 2017). 1991'de, ABD hükümeti, kırılmış parçacıklar ile modifiye asfaltın kullanımıyla ilgili bir yasa çıkarmıştır. Bu nedenle, kırılmış parçacıklar ile modifiye asfalt üretim teknolojisini geliştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Scofield, 1989; Takal, 1991; Baker vd., 2003; Kuennen, 2004). Örneğin, Malezya Kamu İşleri Departmanı ve Malezya Kauçuk Araştırma Enstitüsü, kırılmış parçacıklar ile modifiye asfaltın yol yapım projelerinde kullanım etkinliğini belirlemek için çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmada asfalt karışımına %5 lastik tozu ilave edilerek

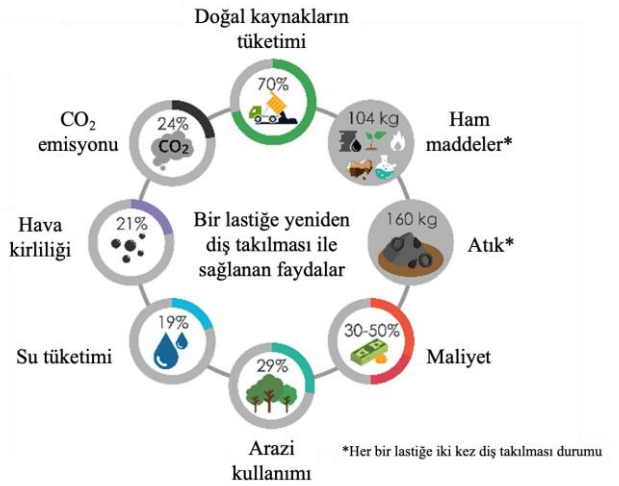
91,44 metrelik bir yol inşa edilmiştir. Ancak, 2016 yılında yapılan bir araştırma, asfaltın kırılmış parçacıklar ile modifiye edilmesinin, daha iyi bir yapışma sağladığı ve kısmi ikame ile sıcaklık hassasiyetine karşı daha fazla direnç gösterdiği için depolama kararlılığını artırabileceğini göstermiştir. Konvansiyonel asfalt karışımları ve kırılmış parçacıklar ile modifiye asfalt karışımlarının plastik akış değerleri, 2–4 mm'lik kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır (Ahmed, 2016). Kırılmış parçacıklar ile modifiye asfalt için benimsenen ıslak işlem, 1981 yılından bu yana Avrupa'da, özellikle Belçika, Fransa, Avusturya, Hollanda, Polonya ve Almanya'da yol kaplamalarını inşa etmek için başarıyla kullanılmıştır (Sousa, 2005; Mavridou vd., 2010; Milad vd., 2020). Daha yakın zamanda, Yunanistan ve Birleşik Krallık da yol yapımında lastik modifiyeli asfalt kullanmıştır. Kırılmış parçacıklar ile modifiye asfaltı en yaygın şekilde kullanan ülkeler ise Portekiz, İspanya, İtalya, Çek Cumhuriyeti ve İsveç'tir. Tayvan'da, ıslak işlemle üretilen kırılmış parçacıklar ile modifiye asfalt, rehabilitasyon çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür asfalt, ayrıca 2008 Olimpiyat Oyunları sırasında yeni projelerde ve bakım çalışmalarında, ayrıca Hong Kong'daki Eco Park Projesi'nde de kullanılmıştır. Brezilya ve Sudan, yeni yolların inşasında bu teknolojiye önemli yatırımlar yapmıştır (Milad vd., 2020).

5. Diğer Uygulamalar

Diğer uygulamalar temel olarak üç sınıfta ayrılmıştır: i) bütün lastikler ile kesilmiş, delinmiş lastiklerin kullanımı, ii) yeniden kullanım ve iii) piroliz. ÖTL'ler, çelik telleri çıkarıldıktan sonra kesilerek, delik açılarak veya şekil verilerek çeşitli zemin paspasları, kayışlar, conta takımları, ayakkabı tabanları ve iskele tamponları gibi lastik ürünlerine dönüştürülebilir (US EPA, 2016b).

Yeniden kullanım, atılmadan önce lastiklere daha uzun bir kullanım ömrü verme sürecidir (Forrest, 2014). Lastiğin nihai performansını belirlemesi sebebiyle en kritik bileşeni dişlerdir. Ayrıca lastiğin en kalın ve aşınmaya en duyarlı bileşenidir. Diş, yol yüzeyi ile lastik arasındaki tutuşu sağlar; bu nedenle zamana bağlı kullanımının ardından kalınlığı azalır ve yol yüzeyinde kayma meydana gelir. Bu noktada, tüketicilerin aşınmış lastiği yeni bir lastik ile değiştirmeyi ya da daha ucuz bir alternatif olan yeniden diş takmayı (retreading) tercih etmeleri gerekmektedir (Sharma, 2013; Battista, 2021).

Yeniden diş takma (retreading), aşınmış lastiklerin dişlerinin ısı ve basınç kullanılarak değiştirilmesiyle gerçekleştirilen güvenli bir yeniden üretim sürecidir. Bu süreç, lastiğin yapısını koruyarak ve performansını sürdürerek gerçekleştirilir (Battista, 2021). Bir lastiğe, türüne ve koşullarına bağlı olarak birkaç kez yeniden diş takılabilir; araba lastikleri 2–3 kez, hafif kamyon lastiklerine 4–5 kez, ağır kamyon lastiklerine 8–9 kez ve uçak lastiklerine ise 14 kez kadar yeniden diş takılabilmektedir (Sharma, 2013; Imbernon ve Norvez, 2016). Yeniden diş takma, enerji, malzeme ve doğal kaynak tasarrufu sağlayan bir yeniden kullanım yöntemidir. Güvenli, düşük maliyetli ve çevre dostu bir çözümdür. Yeniden diş takma, ormansızlaşmayı azaltmaya, doğal kauçuk endüstrisi için arazi kullanımını düşürmeye, hava kirliliği ve karbon dioksit emisyonlarını azaltmaya, ayrıca atık üretimini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Şekil 2, yeniden diş takmanın başlıca faydalarını özetlemektedir (Battista, 2021).



Şekil 2. Yeniden diş takılmış bir lastiğin başlıca tasarruf sağlayan faydaları (Battista, 2021).

Piroliz, organik bileşiklerin, düşük moleküler ağırlıklı ürünlere dönüşmesi için 400-1200 °C arasında, düşük veya normal basınç altında ve inaktif bir atmosferde gerçekleşen termokimyasal ayrışma işlemidir (Forrest, 2014; Imbernon ve Norvez, 2016; Bockstal vd., 2019). Atık lastiklerin pirolizi sonucunda katı, sıvı ve gaz fazlarında olmak üzere farklı değerli kimyasal bileşikler üretilir. Bu bileşikler, petrokimya, enerji veya çelik sanayilerinde kullanılabilir, katkı maddesi ve hammadde kullanılabilir potansiyeline sahiptir (Forrest, 2014; Bockstal ve diğerleri, 2019). Katı ürünler arasında düşük kaliteli karbon siyahı/karası, uçucu kül, kömür ve çinko, silikatlar, demir oksit, sülfürler, karbonatlar gibi diğer inorganik maddeler bulunur (Imbernon ve Norvez, 2016). Karbon fraksiyonu, aktif karbon, geri kazanılmış karbon karası ve dolgu maddesi olarak kullanılabilir inorganik bileşiklerin üretilmesi için işlenebilmektedir (Shulman, 2019; Torretta vd., 2015). Sıvı fraksiyon, ağır yakıt yağına benzer yüksek kalorifik değere sahip, su, katran, aromatik hidrokarbonlar ve organik maddeler (yağlar) içerir; bunlar genellikle sülfür kirlenimleri temizlendikten sonra dizel yağları ve diğer petrokimyasal ürünlerle karıştırılarak kullanılabilir (Torretta vd., 2015). Gaz fazı ise, organik bileşikler açısından zengin olup, hidrojen (H₂), metan (CH₄), etilen (C₂H₄), etan (C₂H₆), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) ve hidrojen sülfür (H₂S) gibi bileşenler içerir (Imbernon ve Norvez, 2016). Artıtıldığında, bu fraksiyon piroliz işlemine gerçekleştirilmek için bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Forrest, 2014). Ancak, petrokimyasal hammadde ve enerji maliyetlerinin artması, bu yöntemin potansiyelini artırmakla birlikte, dünya genelinde enerji elde etmek amacıyla yakma işlemine kıyasla daha az kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek işletme ve bakım maliyetleri ile elde edilen ürünler için geniş bir tüketim pazarının olmaması, başarılı bir piroliz sürecinin uygulanmasının önündeki ana engellerdir (Isayev, 2013; Battista, 2021).

6. Çevresel Etkiler

Atık lastikler, modern zamanların önemli çevresel tehditlerinden biri olarak tüm ülkeleri ciddi şekilde zorlamaktadır. Ulusal ve uluslararası düzeydeki geri dönüşüm çabalarına ve düzenlemelere rağmen, lastikler hala yanlış bir şekilde bertaraf edilmektedir. Yanlış bertaraf eylemlerinin uzun vadeli çevresel sonuçları vardır. Lastikler, biyolojik olarak çözünebilir materyaller değildir. Lastiklerin doğada çözünmemesi, uzun yıllar boyunca ekosistemde kalmalarına yol açar. Bu süreç, estetik ve fonksiyonel sorunlar yaratırken, aynı zamanda yerel ekosistemleri de olumsuz etkiler. Özellikle büyük depolama alanlarında, lastiklerin biriktiği alanlar önemli

bir çevresel tehdit oluşturur. Depolama alanlarında biriken lastikler, yer kaplayarak depolama alanlarını doldurur ve bu durum, doğal kaynakların tükenmesine neden olur. Aynı zamanda, lastiklerin içinde bulunan kimyasallar suya ve toprağa sızarak ekosistemi tehdit edebilir. Lastiklerin içerisindeki kimyasal maddeler, sızıntı yoluyla toprağa ve suya karışabilir. Özellikle ağır metaller, poliaromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) gibi zararlı bileşikler, çevresel kirliliği artırır ve su ekosistemleri üzerinde kalıcı hasara yol açabilir. Lastiklerin atık yönetiminde önemli zorluklardan biri, bu kimyasalların uzun vadeli etkilerinin izlenmesinin zorluğudur (Eco Green Equipment, n.d.).

Lastiklerin atılması, özellikle hava kirliliği, su kirliliği ve iklim değişikliği üzerinde de önemli etkilere yol açabilir. Güneşte bekleyen lastikler, metan gazı yayarak sera etkisini artırabilir ve iklim değişikliğine katkı sağlar. Ayrıca, lastikler yandığında toksik dumanlar çıkar, bu dumanlar kimyasallar içerir ve su kaynaklarına zarar verebilir. Lastiklerin uzun süre konması, toprakta bulunan faydalı bakterileri öldürür, bu da bitki ve hayvanların besin kaynaklarını kaybetmesine ve ekosistemlerin bozulmasına yol açar. Ayrıca, lastiklerin depolanması sırasında meydana gelen yangınlar, çevreye ciddi zararlar verebilir. Bu yangınlar, toksik gazların salınımına neden olarak hava kalitesini bozar ve insan sağlığını tehdit eder (Eco Green Equipment, n.d.). Bununla birlikte, atık lastiklerin çevresel etkilerini azaltmanın birkaç yolu mevcuttur. Geri dönüşüm, atık lastiklerin çevreye zarar vermesini engelleyebilecek en etkili yöntemlerden biridir. Lastiklerin geri dönüşümü, onları yeni inşaat malzemeleri, yol yapımı ve diğer endüstriyel ürünler için kullanılabilir hale getirir. Ayrıca, bu süreç, doğal kaynakların daha az kullanılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olur. Geri dönüştürülmüş lastikler, aynı zamanda katı atık depolama sahalarındaki yer kaplamayı azaltır. Sonuç olarak, atık lastiklerin çevresel etkilerini azaltmak hem geri dönüşüm hem de düzenli atık yönetimi stratejileriyle mümkündür. Ancak, bu süreçlerin her biri kendi zorluklarını ve maliyetlerini beraberinde getirir. Atık lastiklerin doğrudan çevreye bırakılmasının önüne geçmek için daha etkili atık yönetim politikalarına ve geri dönüşüm sistemlerine ihtiyaç vardır.

7. Türkiye'de Mevcut Atık Lastik Yönetimi

Türkiye'de atık lastiklerin yönetimi 2006 yılında yayınlanmış, "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği" çerçevesinde gerçekleştirilmektedir (Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, 2015). Bu yönetmeliğe göre, lastik satan her üretici veya ithalatçı, piyasaya sürdüğü lastiklerin belirli bir oranını toplamak ve geri kazanmak zorundadır. İlk başta %30 olarak başlayan kota yükümlülüğü, günümüzde %80'e ulaşmıştır. Bunun nedeni, satılan bir lastiğin, ömrünü tamamladığında %20 oranında aşınmış olmasıdır. Bu yönetmeliğin yanı sıra, 2007 yılında atık lastiklerin geri kazanımını teşvik etmek amacıyla kâr amacı gütmeyen Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER) kurulmuştur (LASDER, 2024). Lasder üyeleri olan Brisa, Continental, Goodyear, Michelin, Prometeon, Pirelli, Hankook ve Anlaş markalarının yönetmelik gereği piyasaya sürdüğü lastikleri toplayarak geri dönüşüme kazandırmayı hedeflemektedirler. LASDER'in 2023 yılında 222 bin ton atık lastik toplayarak geri kazanıma verdikleri belirtilmektedir. Kurulduklarından bu yana ise 2 milyon ton atık lastiği geri dönüşüme kazandırdıkları bilinmektedir. Malzeme olarak geri kazandırılan atık lastiklerin ekonomiye katkısı ise yaklaşık 1,5 milyar liradır. Ayrıca, en az 15 çimento fabrikası, ÖTL'yi alternatif yakıt olarak kullandığını belirtilmektedir. Bunun yanında, atık lastik geri kazanım tesisi olarak İstanbul'da Gazisan tesisi bulunmaktadır (Gaksan, 2024). Burada, ömrünü tamamlamış lastiklerden elde edilen granüller, suni çim sahalar, yürüyüş yolları, koşu pistleri ve rekreasyon alanlarında kullanılır.

Pirolitik yağ jeneratörlerde elektrik üretiminde, rejenere kauçuk ise otomotiv yan sanayinde ve izolasyon malzemesi olarak değerlendirilir. Geri kazanılmayan lastikler, çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılırken, lastiklerden çıkan kaliteli çelik teller demir-çelik sektöründe ham madde olarak kullanılmaktadır. İstanbul'da faaliyet gösteren bir diğer şirket NET PLASMAK'tır (Tübitak, 2024). Buradaki geri dönüşüm tesisinde otomobil, kamyon, iş ve tarım makinelerinin ÖTL'sinin geri dönüştürüldüğü belirtilmektedir. Burada ÖTL'ler tel, kauçuk granül ve tekstil parçacıklarına ayrılmaktadır. Elde edilen granüller, halı saha zeminleri, lastik karo taşı ve makine takozu üretiminde, çelik teller metal sanayinde, tekstil parçaları ise kort bezi olarak kullanılmaktadır. Ankara'da ise AKO Grup tarafından Ankara Temelli'de kurulan ÖTL Geri Dönüşüm Tesisi, yıllık 75 bin ton lastik atığını ayrıştırarak rejenere kauçuk ve çelik gibi sanayi için ham maddeye dönüştürmektedir. Tesis, Türkiye'nin yıllık atık lastiklerinin dörtte birini geri dönüştürme kapasitesine sahiptir ve bu da her yıl 280 bin ton karbon salınımının engellenmesini sağlamaktadır (AKO ÖTL, 2022).

8. Dünyadaki Atık Lastik Uygulamaları

Dünyada atık lastiklerin yönetimi, geri dönüşümü ve yeniden kullanımı konularında çeşitli yenilikçi uygulamalar ve politikalar geliştirilmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, atık lastikler enerji geri kazanımı ve depolama, kauçuk üretimi ve inşaat sektöründe alternatif malzeme olarak kullanılmaktadır. Avrupa Birliği'nde, 1999 yılında yürürlüğe giren Atık Depolama Direktifi, lastiklerin çöplüklerde depolanmasını yasaklayarak, bu yöntemle bertaraf edilen lastik miktarında önemli bir azalmaya neden olmuştur. Avrupa Birliği'nde hurda lastiklerin geri dönüştürülmesi ve enerji geri kazanımı konusunda sıkı düzenlemeler uygulanmakta olup, üye devletler bu sayede hurda lastiklerin %90'ından fazlasını geri kazanarak yeniden kullanıma kazandırmaktadır. Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Birliği (ETRMA) verilerine göre, 2018 yılında Avrupa Birliği'ne üye 32 ülke kapsamında ÖTL'lerin %91'i (3,26 ton) malzeme geri dönüşümü ve enerji geri kazanımı için toplanmıştır (Rauch vd, 2024). ÖTL'lerin %61,75'i inşaat, otomotiv ve mühendislik sektörlerinde malzeme geri kazanımıyla, %32,85'i ise enerji geri kazanımıyla, çoğunlukla çimento fırınlarında ve enerji santrallerinde kullanılarak işlem görmüştür. Ayrıca, Portekiz, İspanya, İtalya, Çek Cumhuriyeti ve İsveç kırınıtı kauçuğu asfalt uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bilema vd., 2023).

ABD ve Kanada gibi ülkelerde, atık lastiklerin geri dönüşüm oranı oldukça yüksektir ve büyük bir kısmı çimento fabrikalarında enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. ABD Lastik Üreticileri Birliği'nin (USTMA) verilerine göre, 2019 yılında ABD'de yaklaşık 304 milyon ÖTL üretilmiştir. Bu ÖTL'lerin geri dönüşümü, çeşitli alanlarda değerli kullanım alanları bulmaktadır. Örneğin, lastik türevi yakıt yüksek sıcaklıkta çalışan yanma cihazlarında enerji üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş lastikler inşaat mühendisliği projelerinde, özellikle istinat duvarı dolgusu ve yol onarımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

1988'de Amerikan Malzeme Test ve Topluğu (ASTM), asfalt bağlayıcı üretiminde orijinal asfaltın performansını iyileştirmek amacıyla %15 oranında öğütülmüş kauçuk eklenmesini önermiştir, bu da asfalt karışımlarının esnekliğini ve dayanıklılığını artırmıştır (Shu ve Huang, 2014). Ayrıca, kauçuk oyun alanları ve bahçelerde yaygın olarak tercih edilmekte, kırınıtı kauçuk ise atletik pistlerin yüzeylerinde ve asfalt karışımlarında yer almaktadır. Arizona gibi bazı eyaletler atık lastiklerin enerji kaynağı olarak kullanılmasını teşvik ederken, Kaliforniya gibi bölgeler kauçuk eklenmiş

asfalt yoluyla geri dönüşüme odaklanmaktadır. Ayrıca, ABD genelinde lastik depolarını temizleme çabaları başarılı olmuş ve depolanan lastiklerin %93'ünden fazlası geri dönüştürülmüştür (Mouneir ve El-Shamy, 2024). Kanada'nın ise 1990 yılında Ontario, Hagersville'de meydana gelen büyük lastik yangını, lastik geri dönüşümünü gündeme getirmiştir ve güvenli, sürdürülebilir atık yönetimine olan ihtiyacı ortaya koymuştur (Hassan ve Rodrigue, 2024). Kanada her yıl yaklaşık 33 milyon lastik üretmektedir ve Kuzeybatı Toprakları bu üretim içinde diğer eyaletlere kıyasla oldukça küçük bir paya sahiptir. Manitoba eyaletinde yıllık yaklaşık 1 milyon lastik işlenerek inşaat mühendisliği projelerinde yaygın olarak kullanılan lastik türevi agrega üretilmektedir. Yukon Bölgesi, her yeni lastik için 5\$ vergi alınarak işlenmek üzere Alberta'ya gönderilen lastiklerin toplandığı aktif bir geri dönüşüm programına sahip tek bölgedir. Kuzeybatı Toprakları'ndaki bazı büyük belediyeler, eski lastik stoklarını düzenli depolama alanlarında veya sermaye projelerinde potansiyel kullanıma yönelik parçalayıp depolamaktadır (Sebastian ve Louis, 2022). Avustralya'da her yıl yaklaşık 56 milyon ÖTL üretilmekte, ancak bunların yaklaşık 27 milyonu geri dönüştürülmemektedir. Geri dönüştürülmeyen lastiklerin büyük bir kısmı denizaşırı ülkelere ihraç edilmekte, geri kalanı ise düzenli depolama alanlarına gönderilmektedir. Avustralya'da geri dönüştürülen ÖTL'lerin çoğunluğu, parçalanarak oyun alanları gibi yapıların inşasında kullanılmaktadır. Japonya, atık lastiklerin termal geri dönüşümünde önemli bir lider olarak, bu sürecin çevreye olan zararlarını en aza indirmek için ileri teknoloji kullanmaktadır. Bu uygulamalar, atık lastiklerin bertaraf edilmesinden kaynaklanan çevresel sorunları azaltırken, sürdürülebilir kaynak kullanımını da desteklemektedir. Güney Afrika'nın Batı Kap bölgesinde yaklaşık 800 milyon ÖTL stoklanmış halde bulunurken yalnızca %20'den az bir ÖTL'nin geri dönüşüme gönderildiği belirtilir (Numfor vd., 2022).

9. Sonuç

Lastikler, doğal veya sentetik olarak kategorize edilen çok sayıda kauçuk bileşeni, çeşitli karbon siyahı türleri, silika gibi dolgu maddeleri, tekstil ürünleri, kimyasallar ya da minerallerden oluşan karmaşık mühendislik ürünleridir. Bir lastik, ortalama olarak %14 doğal kauçuk, %27 sentetik kauçuk, %28 karbon siyahı, %14 çelik ve %16 diğer kimyasal ve dolgu maddelerinden oluşur. Atık lastikler, yırtılma veya aşınma hasarı nedeniyle artık esas amacına uygun olmayan lastiklerdir. Lastiklerin belirli bir kullanım ömrü olduğu göz önünde bulundurulduğunda, her yıl ortaya çıkan atık lastik miktarının da giderek arttığı kaçınılmazdır. Türkiye'de atık lastiklerin yönetimi 2006 yılında yayınlanmış, "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği" çerçevesinde gerçekleştirilmektedir (Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği, 2015). Bu yönetmeliğe göre, lastik satan her üretici veya ithalatçı, piyasaya sürdüğü lastiklerin belirli bir oranını toplamak ve geri kazanmak zorundadır. Geri kazanım yöntemlerinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin lastikler yakıt olarak kullanıldığında petrol ile aynı miktarda ve kömürden %25 daha fazla enerji üretir, oluşan küller kömür küllerine kıyasla daha düşük ağır metal içerebilir. Atık lastiklerin inşaat mühendisliği projelerinde kullanımı, dayanıklılık, esneklik ve çevre dostu özellikleri sayesinde giderek yaygınlaşmaktadır. Atık lastikler, genellikle kırılmış parçacıklar veya lastik balyaları olarak yol yapımında alt tabaka ve dolgu malzemesi şeklinde kullanılır. Lastik balyaları, düşük taşıma kapasiteli zeminlerde, köprü destek dolguları ve eğimli arazilerde hafif dolgu malzemesi olarak da tercih edilir. Atık lastikler drenaj sistemlerinin inşasında da kullanılmaktadır. Atık lastik parçacıklarının gözenekli yapısı, suyun hızlıca tahliye edilmesini sağlar ve drenaj sistemlerinde önemli bir avantaj sunar. Kırılmış lastik parçacıkları, son birkaç yıldır asfalt bağlayıcıları için bir

modifikasyon maddesi olarak kullanılmaktadır. Yeniden diş takma, aşınmış lastiklerin dişlerinin ısı ve basınç kullanılarak değiştirilmesiyle gerçekleştirilen güvenli bir yeniden üretim sürecidir. Bu süreç, lastiğin yapısını koruyarak ve performansını sürdürerek gerçekleştirilir. Yeniden diş takma, enerji, malzeme ve doğal kaynak tasarrufu sağlayan bir yeniden kullanım yöntemidir. Yeniden diş takma, ormansızlaşmayı azaltmaya, doğal kauçuk endüstrisi için arazi kullanımını düşürmeye, hava kirliliği ve karbon dioksit emisyonlarını azaltmaya, ayrıca atık üretimini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Piroliz ise organik bileşiklerin, düşük moleküler ağırlıklı ürünlere dönüşmesi için 400-1200 °C arasında, düşük veya normal basınç altında ve inaktif bir atmosferde gerçekleşen termokimyasal ayrışma işlemidir. Ancak lastiklerin pirolizi yüksek işletme ve bakım maliyetleri ile elde edilen ürünler için geniş bir tüketim pazarının olmaması, başarılı bir piroliz sürecinin uygulanmasının önündeki ana engellerdir.

Lastik geri dönüşümünün zorlukları, yalnızca teknik engellerle sınırlı değildir; ekonomik, çevresel ve lojistik faktörler de önemli rol oynamaktadır. Lastiklerin geri dönüşümü, karmaşık yapıları nedeniyle oldukça zordur ve genellikle kimyasal, fiziksel veya biyolojik yöntemlerin bir kombinasyonunu gerektirir. Ancak her bir yöntem, farklı avantajlar ve sınırlamalar sunar. Örneğin, mekanik yöntemler, lastiklerin daha büyük parçalara ayrılmasını sağlar ancak bu yöntemle elde edilen ürünlerin kalitesi sınırlıdır. Kimyasal yöntemler ise daha kaliteli geri dönüşüm sağlar, ancak genellikle daha pahalıdır ve çevresel etkileri olabilir. Bu yüzden, etkin bir geri dönüşüm süreci için bu yöntemlerin birleşimi en verimli çözüm olarak görülmektedir. Ayrıca, lastiklerin dögüsel ekonomiye dahil edilmesi, yalnızca geri dönüşüm değil, aynı zamanda yeniden kullanım ve tasarım aşamalarında yapılan iyileştirmeleri de gerektirir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

10. Kaynaklar

- Ahmed, Z. A. A. (2016). Modification of asphalt binder with various percentages of crumb rubber in flexible pavement (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).
- AKO ÖTL (2022) <https://www.akootl.com/tr/anasayfa> (Son erişim tarihi: 23.09.2024)
- Ali, U. F. M., Hussin, F., Gopinath, S. C. B., Aroua, M. K., Khamidun, M. H., Jusoh, N., Ibrahim, N., & Ahmad, S. F. K. (2022). Advancement in recycling waste tire activated carbon to potential adsorbents. c. *Environmental Engineering Research*, 27(6), 0–1.
- Amari, T., Themelis, N. J., & Wernick, I. K. (1999). Resource recovery from used rubber tires. *Resources Policy*, 25(3), 179-188.
- Baker, T. E., Allen, T. M., Jenkins, D. V., Mooney, T., Pierce, L. M., Christie, R. A., & Weston, J. T. (2003). Evaluation of the use of scrap tires in transportation related applications in the State of Washington. *Washington State Department of Transportation, Washington, DC*, 20(3).
- Barlaz, M. A., Eleazer II, W. E., & Whittle, D. J. (1993). Potential to use waste tires as supplemental fuel in pulp and paper mill boilers, cement kilns and in road pavement. *Waste management & research*, 11(6), 463-480.
- Baziene, K., & Vaiškunaite, R. (2016). Research of sustainable use of tire shreds in landfill. *Sustainability (Switzerland)*,

8(8), 767.

- Bilema, M., Yuen, C. W., Alharthai, M., Al-Saffar, Z. H., Al-Sabaei, A., & Yusoff, N. I. M. (2023). A Review of Rubberised Asphalt for Flexible Pavement Applications: Production, Content, Performance, Motivations and Future Directions. *Sustainability*, 15(19), 14481.
- Bockstal, L., Berchem, T., Schmetz, Q., & Richel, A. (2019). Devulcanisation and reclaiming of tires and rubber by physical and chemical processes: A review. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117574.
- Contec (2024), Ulaşılabilir Link: <https://contec.tech/tire-waste-statistics-need-to-know/> (Son Erişim Tarihi: 03.10.2024)
- Czarna-Juszkiewicz, D., Kunecki, P., Cader, J., & Wdowin, M. (2023). Review in Waste Tire Management—Potential Applications in Mitigating Environmental Pollution. *Materials*, 16(17), 5771.
- Dabic-Miletic, S., Simic, V., & Karagoz, S. (2021). End-of-life tire management: a critical review. *Environmental science and pollution research*, 1-18.
- Eco Green Equipment. (n.d.). Environmental impacts of waste tire disposal: <https://ecogreenequipment.com/environmental-impacts-of-waste-tire-disposal/#:~:text=Tires%20do%20not%20decompose.,can%20contribute%20to%20climate%20change.> (Son erişim tarihi 22 Kasım 2024)
- Epps, J. A. (1994). *Uses of recycled rubber tires in highways* (Vol. 198). Transportation Research Board.
- Forrest, M. (2014). Recycling and re-use of waste rubber.
- Gaksan (2024) <http://gaksan.com.tr/services/omrunu-tamamlamis-lastik-otl-geri-kazanimi/3> (Son erişim tarihi: 23.09.2024)
- Ghaffari, M., Aliahmadi, A., Khalkhali, A., Zakeri, A., Daim, T. U., & Yalcin, H. (2023). Topic-based technology mapping using patent data analysis: A case study of vehicle tires. *Technological Forecasting and Social Change*, 193, 122576.
- Han, W., Han, D., & Chen, H. (2023). Pyrolysis of waste tires: a review. *Polymers*, 15(7), 1604.
- Hassan, M. R., & Rodrigue, D. (2024). Application of Waste Tire in Construction: A Road towards Sustainability and Circular Economy. *Sustainability* 16(9), 3852.
- Imbernon, L., & Norvez, S. (2016). From landfilling to vitrimer chemistry in rubber life cycle. *European Polymer Journal*, 82, 347-376.
- Kazemi, M., Parikhah Zarmehr, S., Yazdani, H., & Fini, E. (2023). Review and perspectives of end-of-life tires applications for fuel and products. *Energy & Fuels*, 37(15), 10758-10774.
- Kishan, G. S., Sakthivel, M., Vijayakumar, R., & Lingeshwaran, N. (2021). Life cycle assesment on tire derived fuel as alternative fuel in cement industry. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5483-5488.
- Kuennen, T. (2004). Asphalt rubber makes a quiet comeback. *Better Roads*, 74(5).
- LASDER (2024) Lastik Sanayicileri Derneği; <https://www.lasder.org.tr> (Son erişim: 23.09.2024)
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., & Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste management*, 30(11), 2235-2246.
- Mavridou, S., Oikonomou, N., & Kalofotias, A. (2010). Worldwide survey on best (and worse) practices concerning rubberised asphalt mixtures implementation (number of different cases, extent of application. *Thessaloniki: EU-LIFE+ Environment Policy and Governance. ROADTIRE D, 2, 1-1.*
- Milad, A., Ahmeda, A. G., Taib, A. M., Rahmad, S., Solla, M., & Yusoff, N. I. M. (2020). A review of the feasibility of using crumb rubber derived from end-of-life tire as asphalt binder modifier. *Journal of Rubber Research*, 23, 203-216.
- Moasas, A. M., Amin, M. N., Khan, K., Ahmad, W., Al-Hashem, M. N. A., Deifalla, A. F., & Ahmad, A. (2022). A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01677.
- Mouneir, S. M., & El-Shamy, A. M. (2024). A review on harnessing the energy potential of pyrolysis gas from scrap tires: Challenges and opportunities for sustainable energy recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106302.
- Mrad, M., & El-Samra, R. (2020). Waste tire management: Lebanon case study. *Journal of Waste Management and Disposal*, 3(1), 101.
- Numfor, S. A., Corder, G., Halog, A., & Matsubae, K. (2022). A Review of End-of-Life Tire Recycling in Australia, Japan, South Africa and Cameroon. *Academia Letters*, 2.
- Otomotiv Sanayii Derneği, (2023). Otomotiv sanayii 2022 yılı küresel değerlendirme raporu, İstanbul, Türkiye. Ulaşılabilir Link: <https://www.osd.org.tr/saved-files/PDF/2023/09/14/2022%20Kuresel%20Degerlendirme%20Raporu.pdf> (Son erişim tarihi: 23 Eylül 2024)
- Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği (2015); <https://www.mevzuat.gov.tr/File/GeneratePdf?mevzuatNo=10799&mevzuatTur=KurumVeKurulusYonetmeliği&mevzuatTertip=5> (Son erişim tarihi: 23.09.2024)
- Potkány, M., Krajčírová, L., & Osvaldová, M. (2022). Business Plan Concept for the Production of Rubber-Based Noise Reduction Walls in Slovakia for the Potential of Worn Tires Material Recovery. *Management Systems in Production Engineering*, 30(2), 140–145.
- Presti, D. L., Memon, N., Grenfell, J., & Airey, G. (2017). Alternative methodologies to evaluate storage stability of rubberised bitumens. *Adv Mater Sci Eng*, 2, 12.
- Rauch, R., Kiro, Y., Engvall, K., Kantarelis, E., Brito, P., Nobre, C., Santos, S. M., & Graefe, P. A. (2024). Hydrogen from Waste Gasification. *Hydrogen*, 5(1), 70–101.
- Rogachuk, B. E., & Okolie, J. A. (2023). Waste tires based biorefinery for biofuels and value-added materials production. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100476.
- Scofield, L. (1989). *The History, Development, and Performance of Asphalt Rubber at ADOT: Special Report.*

- Arizona Department of Transportation.
Sebastian, R. M., & Louis, J. (2022). Waste management in Northwest Territories, Canada: Current practices, opportunities, and challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106930.
- Sharma, A. (2013). Retreading of tyres. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(6).
- Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 67, 217–224.
- Shulman, V. L. (2019, January). Tire recycling. *In Waste* (pp. 489-515). Academic Press.
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32(10), 1742–1751.
- Sousa, J. B. (2005). Experiences with use of reclaimed rubber in asphalt within Europe. *Birmingham: sn Rubber in Roads*.
- Teşkilatı, T. D. P. (2008). Araç lastiği-plastik ürünler çalışma grubu raporu. *Devlet Planlama Teşkilatı dokuzuncu kalkınma planı, Kimya sanayii özel ihtisas komisyonu, Ankara, Türkiye*.
- Takal, H. B. (1991). Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber. *Tire Rubber Asph. Pavements*, 1339, 23.
- Thompson, D. C., & Hoiberg, A. J. (1979). Bituminous materials: asphalt tars and pitches. *New York*.
- Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste management*, 45, 152-160.
- Trubia, S., Severino, A., Curto, S., Arena, F., & Pau, G. (2020). Smart roads: An overview of what future mobility will look like. *Infrastructures*, 5(12), 107.
- Trudsø, L. L., Nielsen, M. B., Hansen, S. F., Syberg, K., Kampmann, K., Khan, F. R., & Palmqvist, A. (2022). The need for environmental regulation of tires: Challenges and recommendations. *Environmental Pollution*, 311, 119974.
- Tübitak (2024) <https://tubitak.gov.tr/tr/haber/omrunu-tamamlamis-lastikler-icin-geri-donusum-tesisi-kuruldu> (son erişim tarihi: 23.09.2024)
- Türk Dil Kurumu – Bilim ve Sanat Terimleri Ana Sözlüğü, <https://sozluk.gov.tr/> (son erişim tarihi: 23 Eylül 2024)
- U.S. Environmental Protection Agency (2024-1). (Son erişim tarihi: 22 Kasım 2024)
- US EPA, 2016a
<https://archive.epa.gov/epawaste/conserva/materials/tires/web/html/tdf.html> (Son erişim tarihi: 27.11.2024)
- US EPA, 2016b:
<https://archive.epa.gov/epawaste/conserva/materials/tires/web/html/markets.html> (Son erişim tarihi: 02.12.2024)
- US EPA, 2024,
https://archive.epa.gov/epawaste/conserva/materials/tires/web/html/civil_eng.html (son erişim tarihi: 27.11.2024)
- Valentini, F., & Pegoretti, A. (2022). End-of-life options of tyres. A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 5(4), 203–213.
- Zerin, N. H., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., & Sayem, A. S. M. (2023). End-of-life tyre conversion to energy: A review on pyrolysis and activated carbon production processes and their challenges. *Science of the Total Environment*, 905, 166981.