

Köpük Polistiren Atıklarının Kimyasal Geri Dönüşümle Yeniden Kullanımı

Mehmet Kamalıoğlu 

Türk Havacılık ve Uzay Sanayi AŞ, Lojistik Baş Teknik Mühendisi/Kimya Mühendisi, 06500, Ankara, Türkiye

Öne Çıkanlar

- Plastikler artan bir oranda üretim ve tüketim içinde yer almakta ve doğada çok uzun süre kalabilmektedir.
- Katı atıkların yönetiminde fiziki olarak geniş alan kaplayan köpük polistirenlerin geri dönüşümü gözden kaçırılmamalıdır.
- Köpük polistirenden kimyasal geri dönüşümle elde edilen ürünün farklı amaçlarda kullanımı dikkat çekmektedir.

Makale Bilgileri

Geliş: 14/10/2024
Kabul: 31/03/2025

Anahtar Kelimeler

Atık Polistiren,
Kimyasal Geri
Dönüşüm,
Sülfonlama

Öz

Plastikler, artan sanayileşmeye, teknolojik gelişmeye ve artan nüfusa bağlı olarak özellikle 1950'lerden itibaren üretimden tüketime birçok ürünün bileşeni olarak kullanılmaktadır. Plastiklerin sahip olduğu maliyet avantajı, esneklik ve dayanıklılığı insan hayatını kolaylaştırmakta ancak diğer yandan ekolojik dengeye de zararlar yüklemektedir. Plastikler doğada uzun yıllarca bozunmadan kalabilen maddeler olması sebebiyle doğada atık olarak bırakılması, çevre kirliliği ile birlikte su ve toprak kirliliğini de getirmiştir. Bu sebeple, plastik atıkların yönetimi ulusal ve global çapta her ülkenin öncelikli konuları arasında yer almaya başlamıştır. Plastik atıkların içerisinde özellikle köpük polistirenden üretilen tek kullanımlık bardak, tabak, gıda ambalajı gibi ürünler ise gerek hacimsel gerekse kullan-at olmaları sebebiyle atık plastikler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Plastiklerin genel özelliği, geri dönüştürülebilir olmalarıdır ancak plastiklerin birbirinden farklı türlerinin bulunması her biri için farklı bir geri dönüşüm sürecini gerektirmektedir. Bu sebeple plastiklerin de kendi içerisinde ve kaynağında ayrıştırılması gerekmektedir. Köpük polistiren plastiklerin %90'ı da havadan oluşmaktadır bu sebeple hem hafif hem de hacimlidirler, geri dönüştürülebilmesi için toplanmasının yanında, öğütülmesi ve daha yoğun bir şekle sıkıştırılabilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, polistirenin kullanım alanlarına ve, özellikle atık köpük polistirenin kimyasal geri dönüşümü sonucunda elde edilen maddenin döngüsel ekonomi içinde yeniden kullanım alanlarına ilişkin araştırma yapılmıştır.

Reuse of Foam Polystyrene Waste by Chemical Recycling

Highlights

- Plastics are involved in production and consumption at an increasing rate and can remain in nature for a very long time.
- Recycling of foam polystyrene, which physically occupies a large area, should not be overlooked in the management of solid waste.
- The use of the product obtained by chemical recycling from foam polystyrene for different purposes attracts attention.

Article Info

Received: 14/10/2024
Accepted: 31/03/2025

Keywords

Waste Polystyrene,
Chemical Recycling,
Sulfonation

Abstract

Plastics have been used as components of many products from production to consumption, especially since the 1950s, due to increasing industrialization, technological development and increasing population. The cost advantage, flexibility and durability of plastics make human life easier, but on the other hand, they also cause harm to the ecological balance. Since plastics are substances that can remain in nature for many years without degrading, leaving them as waste in nature has caused environmental pollution as well as water and soil pollution. For this reason, the management of plastic waste has become one of the priority issues of every country on a national and global scale. Among plastic wastes, products such as disposable cups, plates and food packaging, especially those produced from foam polystyrene, have an important place among waste plastics. The general feature of plastics is that they are recyclable, but the existence of different types of plastics requires a different recycling process for each. For this reason, plastics must be separated within themselves and at their source. 90% of foam polystyrene plastics consist of air, so they are both light and bulky. In addition to collecting them for recycling, they also need to be ground and compressed into a more dense shape. In this study, research was conducted on the usage areas of polystyrene and, especially, the reuse areas of the material obtained as a result of the chemical recycling of waste foam polystyrene within the circular economy.

1. GİRİŞ

Geleneksel iktisat tanımına göre insanoğlunun ihtiyaçları sonsuz denecek kadar çoktur, oysa bu ihtiyaçları karşılayacak kaynaklar ise ne yazık ki sınırlıdır. Nüfusun artışına bağlı olarak günümüz dünyasında bu kaynakların tükenmesi sorunu ile daha fazla yüz yüze gelinmektedir. Petrolün keşfedilmesiyle doğal hammaddelerden faydalanılarak üretilen her çeşit ürünün yerine üretimi daha hızlı ve kolay olan plastikten üretilmiş ürünler almıştır. Bu sebeple 1950’li yıllardan bu yana plastikler tarımsal üretimden sağlığa, tekstilden otomotive, elektronikten kozmetiğe birçok alanda talep edilen bir madde hâline gelmiştir [1]. Artan talep sonucunda plastiğin dünyadaki yıllık üretimi geçen 70 yıl içerisinde 1.5 milyon tondan 2022 yılında 400 milyon tona ulaşmıştır [2, 3], bu miktarın 2050 yılında özellikle Çin’in plastiğe olan talebine bağlı olarak ikiye katlanacağı öngörülmektedir [4, 5].

Plastikle ilgili sorun esasen plastiğin nasıl kullanıldığından ziyade plastikten yapılan ürünlerin kullanımından sonraki sürecin yönetimiyle ilgilidir. Plastikler, kullanım sonrası çöpe atıldıklarında binlerce yıl çürümeden, paslanmadan ve biyolojik olarak bozulmadan doğada kalabilme özelliğine sahiptirler [6,7]. Doğada çözünmeden kalan bu atıklar, suyun ve toprağın kirlenmesine kısaca ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır [8-11]. Bu sebepler ve kaynakların kıtlığı dikkate alındığında gerek sürdürülebilir plastik atık yönetiminde gerekse çevre kirliliğinin önlenmesi noktasında plastiklerin doğaya karışmadan önce geri dönüşüm süreçlerine dâhil edilerek farklı tür, şekil ve amaçlarla yeniden üretim süreçlerine dâhil edilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Bu doğrultuda çeşitli uluslararası kuruluşlar da atık plastiklerin geri dönüşümü konusunda çeşitli çalışmalarda bulunarak konunun öneminin altı çizilmeye çalışılmıştır.

Örneğin, misyonu dünya çapında sürdürülebilir ve profesyonel atık yönetimini geliştirmek olan ve dünyanın dört bir yanındaki atık uzmanlarından oluşan Uluslararası Katı Atık Birliği (IWSA) yaptığı çalışmalarında katı atıkların yönetimine ve geri dönüşümüne dikkat çekmeye çalışmıştır. Bu yönde 2023 yılında Orta Doğu’da ilk kez Atık ve Kaynak Yönetimine ilişkin Dünya Kongresi’ni gerçekleştirmiştir [12]. 2024 yılının Eylül ayında ise “Atıktan Refaha: Sürdürülebilir Gelecek İçin Çözümler” mottosu ile kongresini Güney Afrika’da gerçekleştirmiştir [13].

Benzer şekilde, Ekonomik Kalkınma ve İktisadi İşbirliği Örgütü (OECD) de plastik atık yönetimi üzerine çok sayıda araştırma yapmış ve rapor sunmuş olup, raporlarında özellikle ülke bazında plastiklerin nasıl yönetildiğine dair önerilerine de yer vermektedir. Bu kapsamda, OECD, plastik üretiminin küresel görünümüne ilişkin 2022 yılında yayınladığı raporunda, plastik atıkların 2000-2019 dönemi arasında iki kattan fazla artarak 353 milyon tona ulaştığını, 1950’den beri plastiğin yalnızca %9’unun gerçekten geri dönüştürülebildiğini, yüzde 19’unun yakılarak enerjiye dönüştürüldüğünü, yarıya yakınının ise çöplüklere ya da doğaya bırakıldığını, yüzde 22’sinin ise kontrolsüz çöp sahalarına bırakıldığını, özellikle COVID-19 pandemisinin yaşandığı dönemde bireysel koruyucu kullanımının yaygınlaşması sayesinde plastik kullanımının geçici bir süre azaldığını ancak ekonominin 2021’de canlanmasıyla beraber plastik üretimi ve atık miktarının yukarı yönlü seyrinin yeniden başladığını belirtmektedir [14]. OECD, aynı yıl içinde yayınladığı farklı bir raporunda ise, plastik üretimine ilişkin genel görünümü vermekten ziyade, plastik atıkların azaltılması için koordinasyon içinde bir küresel çözüm için 2060 yılına kadar uygulanması gereken politika senaryolarına yer vermiştir [15].

Avrupa Topluluğu da konuya ilişkin döngüsel ekonominin ilkelerini izleyerek, kentsel plastik atıkların bertarafına yönelik bazı önlemleri hayata geçirmiş ve böylece Avrupa Birliği de plastik kirliliğine karşı öncü kuruluşlar arasında yer almıştır [16]. Öyle ki, tek kullanımlık plastiklerin yasaklanması, geri dönüşüm oranlarının artırılması ve üretici sorumluluğunun güçlendirilmesi gibi önemli düzenlemeleri içeren Avrupa Birliği Plastik Stratejisini 2019 yılında kabul etmiştir.

Birleşmiş Milletler de, plastik kirliliği konusunda küresel bir yaklaşım geliştirmek amacıyla pek çok rapor yayımlamıştır, bunlardan 2022 yılında Çevre Programı’na ilişkin yayınladığı raporunda, plastiğin sadece %9’unun geri dönüştürülebildiğini, plastik yönetimiyle ilgili etkin çözümlerin bulunmaması hâlinde su ekosisteminde birikecek 2022 yılında 1 milyon ton olan atık plastik miktarının 2040 yılına gelindiğinde yaklaşık 29 milyon ton olarak gerçekleşeceğini belirtmiştir [17].

Yapılan bir araştırma, denizlerdeki kirlilik sebebinin %60'ının tek seferlik plastiklerden oluştuğunu, 2021'de yürütülen başka bir araştırma ise denizlerde yaşayan canlı türünün yaklaşık 400'ünün plastik kirliliğinden etkilendiğini göstermektedir [18]. Birleşmiş Milletler, ayrıca sıfır atık girişimlerini artırmak amacıyla 30 Mart'ı "Uluslararası Sıfır Atık Günü" şeklinde duyurarak global düzeyde bir farkındalık oluşturmaya da çalışmaktadır. Birleşmiş Milletler, Küresel Atık Yönetimi Görünümüne ilişkin yayımladığı 2024 yılı raporunda ise, tüm paydaşların harekete geçmesi gerektiğinin altını çizerek, döngüsel ekonomi yaklaşımının benimsenmesi hâlinde küresel atık geri dönüşümünde ciddi bir iyileşmenin sağlanacağını, geriye kalan atıkların ise güvenli bir şekilde yönetilebileceğini vurgulamaktadır [19].

Benzer çalışmaları Dünya Doğayı Koruma Vakfı (WWF) da yürütmüş olup plastik kirliliği ile mücadelede dünya çapında çeşitli kampanyalar yürütmekte ve ülkelerin plastik atık yönetimi konusunda atması gereken adımlara dair tavsiyelere yer vermektedir (World Wide Fund for Nature (WWF), *Plastics and the Environment* 2022).

Dünya'nın yılda 2,01 milyar ton katı atık ürettiği ve bu katı atıkların en az %33'ünün güvenli bir şekilde yönetilemediğini, katı atık miktarının artan tüketime bağlı olarak 2050 yılında 3,40 milyar tona ulaşacağını öngören Dünya Bankası, katı atıkların dağılımında %44'lük gıda atıkları ve %17'lik kâğıt atıklarını %12 ile plastik atıklarının takip ettiğini de belirtmektedir [20].

Plastik atıkların seyrini Türkiye açısından incelediğimizde, Türkiye'nin 2021 yılında çıkardığı atık plastik miktarı ile (5 milyon 600 bin ton), en fazla atık plastik oluşturan ülke sıralamasında 9'uncu sırada yer aldığı görülmüştür [21]. Bu durum plastik atıkların, tüm dünya genelinde olduğu gibi Türkiye açısından da önemli bir çevre sorunu oluşturduğunu ve atık plastiklerinin yönetimi ve geri dönüşümü üzerinde etkin politikalar uygulanması gerekliliğini göstermektedir. Türkiye'de plastik atıkların yönetimi konusunda çeşitli kamu ve özel sektör çalışmaları yapılmaktadır. Örneğin, yerel ve küresel anlaşmalardaki hedef ve politikaları uygulayabilmek için Türkiye kalkınma planlarında çeşitli yol haritaları hazırlamıştır. Bu minvalde 2024 ile 2028 yıllarını kapsayan 12'nci beş yıllık kalkınma planında, katı plastik atıkların yarattığı çevre problemleri daha kapsamlı ele alınmış ve plastik atıkların yönetimine uygun daha kapsamlı politika önerilerine yer verilmiştir [22].

21'inci yüzyılın insan sağlığına ve ekosisteme en geniş çaplı zarar veren çevresel faktörünün artan nüfusa ve ekonomik genişlemeye bağlı olarak üretiminin hızla katlandığı plastikler olmuştur. Plastik atıkların çoğalmasının iklim değişikliğinden doğal kaynakların tükenmesine, su ve toprak kirliliğinin artmasına kadar canlıların yaşamına yönelik oluşturduğu tehditler göz önüne bulundurulduğunda, atık plastiklerin yakılması ve ekosistemin içine serbest bırakılması yerine bu atıkların döngüsel ekonomi içerisinde yer almasını sağlamak amacıyla plastik atıklarının iyi bir şekilde yönetilmesi gerekliliği daha iyi anlaşılmaktadır [23].

Elbette atık plastiklerin azaltılması için öncelikle plastik tüketiminin azaltılması ve tüketicinin bu konuda bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Ancak bunlara ek olarak plastik atıkların etkin bir şekilde dönüştürülerek yeniden ekonomiye kazandırılması da gerekmektedir [24]. Bu yönde birçok ülke geri dönüşüm programlarını güçlendirmiştir. Almanya, Hollanda, Japonya, ABD ve İsveç sıfır atık hedeflerine ulaşmak için geri dönüşüm programlarını güçlendirmeye çalışan ülkeler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bazı ülkeler plastik atıkların azaltılması için plastik poşet kullanımının yasaklanması veya ücretlendirilmesi gibi adımlar atarken, bazıları ise plastik atıkların ithalatını sınırlandırmak veya tamamen yasaklamak şeklinde adımlara yönelmişlerdir. Birçok ülkede ise, bu seçeneklerin yanı sıra plastiklerin geri dönüşümünü daha verimli hale getirecek yeni teknolojiler üzerinde çalışılmaktadır. Atık plastiklerin azaltılmasında geri dönüşüm çok önemli bir stratejidir çünkü geri dönüşüm sayesinde bir yandan plastiklerin yeniden kullanılabilir hale getirilmesi sağlarken, diğer taraftan plastik üretimi için kullanılan hammaddenin miktarı da azaltılacağından doğal kaynakların korunmasına, aynı zamanda yeni plastiklerin üretilmesinden çok daha az enerjiye ihtiyaç duyduğundan enerji tasarrufuna da katkı sağlanmış olur.

Atık plastiklerin geri dönüşümünde genel olarak üç yöntem kullanılmaktadır ve literatürde en fazla tercih edilen geri dönüşüm yöntemi ise birincil geri dönüşüm olan fiziksel geri dönüşüm olmuştur. Atık plastiklerin kimyasal geri dönüşüm yöntemi ise daha çok fiziksel geri dönüşümü daha zahmetli ve maliyetli olan plastikler için tercih edilen bir yöntemdir. Literatürde plastik atıkların geri dönüşüm yöntemi olarak enerji geri kazanımı da kullanılmaktadır, ancak bunun gerçek bir geri dönüşüm olup olmadığı konusu tartışmalıdır. Kısaca plastiklerin geri dönüşümünde kullanılacak yöntem plastiğin türü, geri dönüşümden beklenen hedef, zaman ve imkâna bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [25].

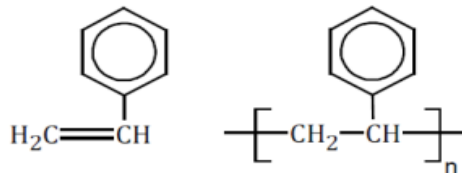
Plastiklerin birçok çeşidi bulunmakla birlikte kullanım oranlarına bakıldığında ilk üç sırada sırasıyla polietilen (PE) polipropilen (PP) ve polistiren (PS) yer almaktadır [26, 27]. Bu plastiklerden polistiren (PS) daha çok strafor ya da köpük olarak bilinen bir plastik türü olmakla birlikte düşük maliyetli ve yalıtımda çok başarılı olan bir plastik çeşidi olması sebebiyle gıda, ambalaj ve inşaat gibi birçok endüstride de yaygın kullanılmaktadır [27, 28]. Ancak, polistirenin de görüldüğü kadar saf ve beyaz olmadığı, içerisinde bulunan stirenin kansorejen bir madde barındırması sebebiyle doğada geri dönüştürülmeden bırakılmasının insan sağlığı açısından riskli olduğu da düşünülmektedir [8-11]. Bu sebeple polistiren plastik atıkların da mutlaka kontrol altına alınması ve mümkünse farklı şekillerde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu konuda son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmış ve araştırmalar hâlen devam etmektedir. Bu çalışmada atık polistirenlerin kimyasal geri dönüşüm yöntemi uygulanarak hangi alanlarda verimli şekilde yeniden kullanılabilmesine ilişkin yapılan çalışmalara yer verilerek atık polistiren plastiklerin ve dolayısıyla çevre kirliliğinin azaltılması konusunda farkındalık oluşumuna katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. POLİSTİREN YAPISI VE GERİ DÖNÜŞÜMÜ

2.1. Polistirenin (PS) ve Köpük Polistirenin (EPS) Genel Yapısı

İlk defa Alman eczacı Eduard Simon tarafından 1839 yılında keşfedilen polistiren [29], ısıtıldığında yumuşayan, saydam, katı, kırılğan, kokusuz, parlak, işlenmesi zahmetsiz ve az maliyetli olan bir polimer olup kısaca PS şeklinde ifade edilmektedir. Diğer bir ifade ile oda sıcaklığında katı şekilde bulunan bir termoplastiktir ve yüksek sıcaklık altında eriyik kıvama gelir, daha sonra soğutma işlemi ile tekrar katı yapıya kavuşturulur.

Yaygın şekilde kullanılan polistiren görece daha ekonomik ve sert bir polimer olmakla birlikte aromatik yapıdaki bir polimer zinciri özelliğine de sahiptir. Bu zincir, 750 ile 1300 monomer biriminden oluşmakla birlikte 100°C'nin altındaki sıcaklıkta şeffaf ve katı hâlde, 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda akışkan bir yapıya ve kolayca kalıplanıp şekillenen bir yapıya sahip ve aromatik stiren monomerinden sentezlenen bir termoplastiktir [30, 31]. Stiren ise 145°C'de kaynamaya başlayan ve bu sıcaklık değerinde kendi kendine polimerleşebilen ve petrokimya endüstrisinde üretilen sıvı yapıdaki bir hidrokarbon molekülünden oluşan bir sıvıdır, polistirenin tüm atomları güçlü C-C ve C-H bağları ile bağlı olduğundan, özel bir işlem olmadan bozulmaları da zordur (Şekil 1) [32-34].



Şekil 1. Stiren ve Polistirenin Yapısı

Polistiren, termoplastik yapıya sahip olduğundan ısıtılıp soğutularak işlenebilmekte ve kalıplanabilmektedir. Oda sıcaklığı koşullarında katı yapıda olan polistiren yüksek sıcaklık koşullarında kalıplanmakta ve soğutularak amaçlanan şekil ve boyuttaki ürünlerin elde edilmesinde kullanılabilir [35] ayrıca, çeşitli pigmentlerden faydalanılarak istenilen renkteki malzemelerin üretiminde de kullanılabilir.

Polistiren, günümüzde antişok, kristal ve köpük polistirenden oluşmak üzere genel olarak 3 türde üretime girmektedir. Bu üretimlerden, stiren polimerleştirilmesiyle elde edilen türüne kristal veya genel maksatlı polistiren (GPPS); stiren monomerinin polibutadien kauçuğu ile aşıl原因arak üretilen türüne antişok polistiren (HIPS); polistiren taneciklerinin şişirilmesiyle ve birbiri ile kaynaşmasıyla üretilen türüne ise köpük polistiren (EPS) denilmektedir [30, 35]. GPPS kristal nitelikte olup saydam yapıdadır ve genellikle gıda paketlenmesinde tercih edilmekte; HIPS darbelere karşı yüksek dayanıklılığa sahip, saydam olmayan bir yapıdadır ve daha çok levha, elektronik cihazların yapımında tercih edilirken [36-38]; kapalı gözenekli ve tipik olarak beyaz renkli köpük polistiren ise daha çok ısı yalıtımında tercih edilen bir polistirendir.

Polistiren oda sıcaklığı koşullarında katı yapıda bulunabildiği için günlük hayatta çok sık kullanılabilir. Mantar ya da bakterilerin üremesine sebep olacak bir ortama imkân vermediği düşünüldüğünden, özellikle yiyecek ve içecek ambalajlanmasında çok yaygın şekilde tercih edilmektedir. Daha evvel de belirtildiği üzere, polistiren proses edilebilmesi çok kolay olan ve uygun akışkan yapısı sayesinde de enjeksiyonların kalıplanmasında tercih edilen en ideal plastiklerden biridir [39]. İlâveten kolaylıkla istenilen renge dönüştürülebilme, şeffaflık ve berraklık gibi mükemmel optik özellikleri gösteren polistiren, yüksek kırılma indisiyle (1.60) optik plastik parçaların üretiminde de çok sık kullanılmaktadır. Optiklik ve üretimsel özelliklerinin yanında polistiren ortalamada bir mukavemet özelliği de göstermektedir (50-60 MPa civarında bir gerilme direnci göstermektedir). Kırılgan olması ve yük altında eğilme sıcaklığının diğer plastiklerle kıyaslandığında daha düşük olması (82-88°C) gibi mekanik özellikleri bakımından ise genellikle çok sık talep edilen bir plastik olmamaktadır. Polistiren UV-ışınlarından çok kolay etkilenecek bozulabilmektedir, bu sebeple de uzun süre boyunca dış ortamdaki alanlarda kullanıma elverişli görülmemektedir. Polistiren dış alanlarda UV-ışınları sebebiyle kısa bir süre içinde beyazlığını ve parlaklığını kaybetmekte ve mekanik özellikleri de zayıflamaktadır [31, 40].

Polistireni diğer termoplastiklere göre daha avantajlı duruma getiren özelliği, sahip olduğu amorf yapısından kaynaklanmaktadır. Kristal bir yapıda olmamasından dolayı eriyik hâle geçerken daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır [31]. Kristalizasyon enerjisinin olmaması, ısıtılıp soğutulma süreçlerini hızlandırırken, kalıplanmasını da hızlandırmaktadır. Polistirenin amorf yapısı, kristal yapıdaki polietilen ve polipropilen gibi plastiklere kıyasla kalıplama sürecinde çekme (shrinkage) miktarının da daha minimal gerçekleşmesine olanak sağlar (0.004-0.007 cm/cm) [30, 31]. Polistiren ayrıca, elektrik izolasyonunu sağlama bakımından da diğer polimer çeşitleri içinde en iyisi olarak görülmektedir. İlâveten, polistiren asit ve tuzlara karşı yüksek dayanıklılığa, iyi su dayanımına, yüksek darbe ve gerilme direncine de sahiptir.

Kısaca polistiren mükemmel bir maliyet/performans oranına sahip olmasından dolayı ambalaj sanayisinin yanında, aydınlatma malzemesinin üretiminden levha yapımına, kaset kutularından çatı kaplamaya, tıbbi tüplerin üretiminden, oyuncaklara, çim ve bahçe ekipmanlarından mutfak ve banyo aksesuarlarına, elbise askılarından kozmetik kutularına kadar birçok tüketim malında kullanılmakta [40, 41], çoğu zaman daha maliyetli polimerlerin yerine de tercih edilebilmektedirler [42].

Bu çalışmanın ana konusunu oluşturan köpük polistiren (EPS) ise, polistirenin bir türevi olup, polistiren taneciklerinin şişirilmesiyle ve birbirine kaynaşmasıyla elde edilen kapalı gözenekli ve tipik olarak beyaz renkli bir termoplastiktir. EPS, temelde polistirenin içine gazların enjekte edilmesiyle elde edilmiş hacmi genişletilmiş halidir, bu şişirme işlemi sayesinde polistirenin hacmi yaklaşık 50-100 kat artırılarak çok daha hafif ve düşük yoğunluktaki köpük polistiren elde edilmektedir. İlk defa 1950’li yıllarda “Styropor” isimli Alman bir firma tarafından üretilmiştir ve kısa süre içinde dünya genelinde kullanılmaya başlanmıştır [43]. Köpük polistiren hem ısıya hem soğuğa karşı koruma sağlayan çok iyi bir ısı yalıtım malzemesi olma özelliği sayesinde, özellikle binalarda, duvarlarda, yerden ısıtma döşemelerinde, tavanlarda ve çatıların yalıtımında izolasyon malzemesi olarak kullanılmakla birlikte kullan-at bardakların ve tabakların yapımında da daha fazla tercih edilmektedir [30, 31].

Köpük polistiren (EPS), diğer ısı yalıtım malzemelerine kıyasla daha ekonomik olması sebebiyle gerek ülkemizde gerek dünyada hızla yayılmıştır. Ekonomikliğinin yanında, EPS genel olarak hafif olma, nemi hapsetme, kolayca şekillenebilme, kırılabilirliğinin düşük olması, ağırlığı ve taşıma masrafının düşük olması, kolayca geri kazanılabilir özelliklerine sahip bir termoplastik olarak görülmektedir [43, 44].

2.2. Geri Dönüşüm

Geri dönüşüm, teknolojik, ekonomik ve yönetsel yönleri içinde barındıran çok yönlü bir süreçtir. Diğer bir tanımlamaya göre ise atık malzemelerin orijinal veya başka amaçlarla üretilen ürünlere, malzemelere veya maddelere dönüştürüldüğü herhangi bir geri kazanım işlemidir. Özellikle 1980’li yıllardan sonra katı atık sorununun dünyada ciddi boyuta ulaşması, ülkelerin bu soruna çareler bulmaya yönelik politikalar geliştirmesine de ivme kazandırmıştır. Bu yönde yapılan çalışmaların genel olarak “atığın toplanması veya azaltılmasına yönelik politikalar, katı atıklarda bulunan çeşitli maddelerin geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımına yönelik politikalar ile yeniden kullanılamayacak kısmın emniyetli bir şekilde yok edilmesini içeren politikalar” şeklinde 3 başlık altında toplandığı görülmüştür [24, 45]. Ancak bu politikaların tek başına uygulanması istenen sonucu vermeyeceğinden, katı atık sorunun çözümünde birden fazla politika ve stratejinin birlikte uygulanması gerekmektedir. Bu politikalar atıkların azaltılmasından geri dönüşüm teşviklerinin artırılmasına, çevre dostu vergilendirmeden atık ithalatının kısıtlanmasına, halkı bilinçlendirmeden atıkların enerjiye dönüştürülmesine kısaca daha verimli bir atık yönetim sisteminin kurulmasına kadar çok geniş bir yelpazeyi kapsadığından bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmalıdır.

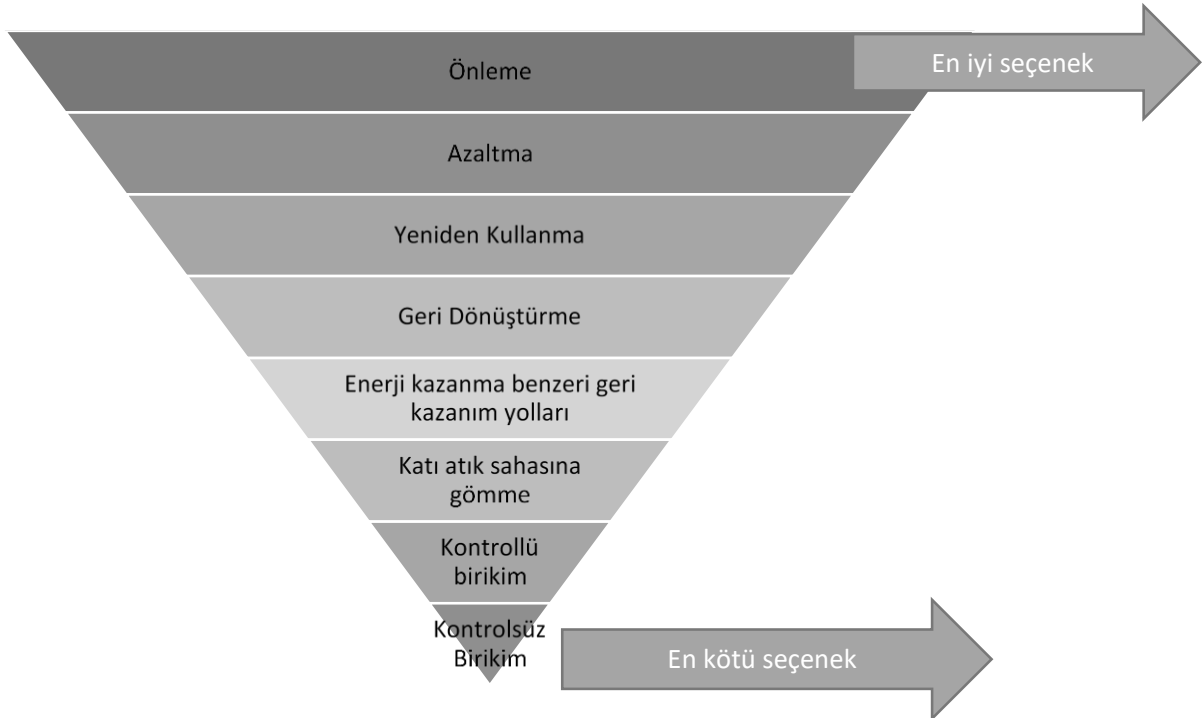
Günümüz koşullarında kâğıtların, metallerin ve cam gibi katı atıkların geri dönüşümü yaygın bir şekilde kullanılmakta ancak katı atıkların içinde önemli bir alanı kapladığı bilinen plastikler için aynı yaygın geri dönüşüm işlemleri bulunmamaktadır. Plastiklerin toplama, ayırma ve mekanik geri dönüşüm yoluyla yaşam döngülerine dahil edilmesinde de bazı başarılar elde edilmiştir ancak tek kullanımlık plastik atıklarının geri dönüştürülmesiyle elde edilen ürünlerin yalnızca daha düşük kalitedeki uygulamalar için kullanılması ve bu ürünlerin de nihayetinde çöplüklere atılması ya da enerji geri kazanımı olarak yakılması sebebiyle sınırlı olduğu, bu anlamda kimyasal geri dönüşümün plastik atıklarının oluşturduğu soruna çözüm bulma konusunda en umut verici yöntem olduğu düşünülmektedir [46, 47].

Polistiren ise, sanayileşme ve nüfus artışına bağlı olarak artan plastik üretiminde en fazla kullanılan plastiklerden biridir ancak polistiren sıkıştırıcı sistemlerine ve lojistiğe gereken yatırımın yapılmamasından dolayı genellikle kaldırım kenarlarında toplanmakta olan atıklara ilişkin geri dönüşüm programlarında yer almamakta, yer aldığı ise ayrıştırılmamakta ve geri dönüştürülmemektedir [48, 49]. Bu sebeple özellikle fiziki olarak fazla yer kaplayan atık polistirenlerin geri dönüşümü gerek çöp kirliliğinin azaltılması gerekse plastiklerin etkin kullanımı açısından da önemlidir. Atık plastiklerin yeniden değerlendirilmesine yönelik yapılan faaliyetler incelendiğinde, birincil ve ikincil geri kazanım şeklinde isimlendirilen mekanik geri dönüşüm, üçüncül geri kazanım şeklinde ifade edilen kimyasal geri dönüşüm ve dördüncül geri kazanım şeklindeki enerji kazanımlı geri dönüşüm yöntemlerinin kullanıldığı görülmüştür [24].

Bunlardan, birincil ve ikincil geri kazanımı içeren mekanik geri dönüşüm yöntemi daha çok termoplastikler için kullanılmakta olup, bu işlemin amacı plastik atıklarından orijinal polimerlerden elde edilebilen ürünlere eşdeğer ürünler veya eşdeğer olmayan ikinci kalitede ürünler elde etmektir [50]. Bu dönüşüm atıkların toplanması ile başlamakta, plastik aglomerlerin ekstrüzyonunu içeren yeniden ekstrüzyon adımı ile son bulmaktadır [51]. Birincil kazanımda kullanım sonrası temiz olarak toplanabilen atıklar ya da imalat esnasında tıraşlama gibi işlemler sırasında oluşan atıkların toplanıp yeniden kullanılması söz konusu iken, ikincil geri kazanımda kullanımdan sonra kirlenmiş olan plastik atıklarının temizlenmesi, kurutulması vb. işlemlerin ardından bir doğrayıcı aracılığıyla küçük ebatlara getirilip, eritilerek yeniden işlenmesi gerçekleştirilmektedir. İkincil geri kazanımla elde edilen ürün, birincil geri kazanıma kıyasla daha düşük niteliktedir. Mekanik geri dönüşüm, düşük maliyetli ve güvenilir olması nedeniyle en fazla tercih edilen geri dönüşüm yöntemidir ancak bu geri dönüşüm sonucunda da yine atık plastikler oluşmaktadır [24, 46].

Üçüncül geri kazanım olarak ifade edilen kimyasal geri dönüşüm yöntemi ise, daha çok fiziksel geri dönüşümü daha zahmetli ve maliyetli olan plastikler için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, hidroliz, metanoliz, aminoliz ve glikoliz gibi işlemleri içermekle birlikte yüksek sıcaklıkta ve basınçta gerçekleşen bazı kimyasal geri dönüşüm tekniklerini de içermektedir [24, 52]. Bu yöntemde amaç, atığın çeşitli kimyasal işlemlerden faydalanılarak farklı kimyasallara veya değerli hammaddelere dönüştürülmesidir. Plastik atıkların kimyasal geri dönüşüm yöntemine tabi tutulmasıyla elde edilmesi istenen amaç da bu maddelerin bazı değerli sıvı yakıtlarına ve yeni kimyasallara dönüştürülebilmesini sağlamaktır [53-55]. Hatta, plastik atıklarının kimyasal geri dönüşümle özellikle, yakıt türevlerine veya daha değerli kimyasallara dönüştürülmesine yönelik çalışmalar geleceği olan bir çözüm olarak da görülmektedir [56-60]. Kimyasal geri dönüşümle yararlı ürünlere dönüştürme atık köpük polistirenin (EPS) geri dönüşümü için en uygun yöntem olarak görülmektedir ancak atık EPS'nin geri dönüşümünde de atıkların ayrıştırılması zorluğu ile karşı karşıya kalınmaktadır [61]. Bu sorunu çözmek için üreticilerin, üretim atıklarını geri dönüştürmelerini sağlamak amacıyla üretim tesislerinde geri dönüşüm tesislerini hayata geçirmesi önemli görülmektedir [24, 56, 62]. Bu çalışmada amaçlanan da, köpük polistiren (EPS) atıklarının azaltılması ve döngüsel ekonomiye kazandırılmasını sağlamak amacıyla bu atıkların çevreye ve insan sağlığına zararsız olan kimyasal geri kazanımlarının araştırılması olmuştur.

Literatürde plastik atıkların geri dönüşümünde dördüncül ve son geri dönüşüm yöntemi olarak enerji geri kazanımı da kullanılmaktadır, ancak bunun gerçek bir geri dönüşüm olup olmadığı konusu tartışmalıdır [24]. Enerji kazanımlı dördüncül geri kazanım yönteminde atık plastiklerden enerji elde edilmesi amaçlanmakta ve bu amaçla plastikler yakılmaktadır. Bu yöntem özellikle pazarı olmayan atıklar için tek uygun bertaraf yöntemi olarak da görülmektedir [30]. İlk defa, çöplerin yakılmasına ilişkin tesis 1885 yılında ABD'de inşa edilmiş ve o yıllarda bu tesisin benimsediği amaç sadece kentsel katı atığın azaltılması olmuştur. Ancak 1970'lere gelindiğinde Avrupa'da enerji kazanımı teknolojilerinin gelişmesiyle ve petrol krizinin etkileriyle birlikte çöp yakma tesisleri sayıca çoğalmıştır [63]. Bu yöntem, bir yandan pazarı olmayan atıklar için tek uygun bertaraf yöntemi olarak değerlendirilebilirken diğer yandan atıkların yakılması sonucu ortaya çıkan toksik gazların insan sağlığına tehdit oluşturması sebebiyle çok da tercih edilmemektedir [30]. Plastik atıkların yakıt olarak üretimde kullanılması, en son düşünülmesi gereken bir yöntem olarak da değerlendirilmektedir [45].



Şekil 2. Atık Yönetimi Piramidi

Dünya Bankası'nın 2017 yılında atık yönetimine ilişkin yayımladığı raporda, plastik atıkların daha oluşmadan kaynakta önlenmesi en iyi seçenek olarak sunulurken; katı atıkların doğaya kontrollü veya kontrolsüz şekilde bırakılması ise en kötü seçenekler arasında yer almıştır (Şekil 2). Küresel boyuttaki güncel duruma baktığımızda ise plastik atıkların %70'inden fazlasının ya düzenli depolama sahalarına ya da doğaya bırakıldığını düşündüğümüzde en kötü seçeneğin takip edildiğini söylemek yanlış olmayacaktır. Atık hiyerarşisinde geri dönüşüm en üst sıralarda yer almasa da, verimli geri dönüşümün plastik atıklarının olumsuz etkilerini azalttığı da yaygın olarak kabul edilmektedir [24, 56, 62]. Kısaca plastiklerin geri dönüşümünde kullanılacak yöntem atık plastiğin türü, geri dönüşümden beklenen hedef, zaman ve imkâna bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [24, 56].

3. ATIK EPS'İN KİMYASAL GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Modern plastik endüstrisinin en önemli malzemelerinden biri olan polistirenler (PS), ucuz olmaları ve geleneksel geri dönüşüm yöntemleriyle daha düşük değerli malzemelere dönüştürülmeleri nedeniyle neredeyse hiçbir zaman geri dönüşüm programlarında yer almamaktadırlar. Geri dönüşüm yerine atık polistirenlerin büyük bir kısmı ya yakma yöntemiyle ya da daha az gelişmiş olan ülkelerde depolanmak suretiyle bertaraf edilmektedir [64].

Atık yönetimi ile başa çıkabilmenin en etkili çözümlerinden biri, kuşkusuz kullanılarak atık hâline gelen plastikleri kimyasal modifikasyonlarla faydalı ürünlere dönüştürebilmektir [24]. Kimyasal geri dönüşüm, mekanik geri dönüşüm ve yakmayla karşılaştırıldığında genellikle daha fazla enerji tüketen ve daha maliyetli olan bir yöntem olarak görüldüğünden çok fazla tercih edilememiştir, ancak günümüzde plastiklerin daha ucuz ve daha verimli yöntemler geliştirilmek suretiyle kimyasal geri dönüşüme tabi tutulması önemli bir alan haline gelmiş ve bu yönde çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir [56, 62].

Kimyasal geri dönüşüm metotlarına yönelik yapılan literatür taramasında çeşitli kategorilere ayrıldığı ancak temel olarak dört başlık altında toplandığı görülmüştür. Bunlar; depolimerizasyon, piroliz, gazlaştırma ve sülfonlama-modifikasyon şeklinde isimlendirilmektedir [65, 66]. Depolimerizasyon, plastiklerin polimer zincirlerinin kimyasal reaksiyonlar yoluyla kırılması işlemidir diğer bir ifadeyle polimerleri oligomerlere veya monomerlere çevirme işlemi olarak da tanımlamak mümkündür [24, 50]. Bu yöntem daha çok PET, poliamid, poliüretan gibi kondenzasyon polimerizasyonu ile üretilen plastiklerde tercih edilmektedir. Piroliz ise, plastiklerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta ısıtılması işlemiyle kimyasal dönüşümü şeklinde ifade edilebilir. Kısaca plastiklerin havasız ortamda yakılması süreci olarak ifade edilebilen bu metotta ortaya çıkan hidrokarbon buharı çeşitli wax, yağ ve gaz gibi maddeleri içermektedir [55]. Çeşitli ayırma ve saflaştırma aşamalarından sonra elde edilen bu yağ, petrokimya endüstrisinin ana girdilerinden olan nafta veya benzeri rafine ürünleri ile belirli bir miktarda karıştırılarak tekrardan monomer ve polimer üretiminde kullanılabilir [55, 56, 67]. Bu metot ise daha çok polietilen, polipropilen, polistiren gibi polimerlerden üretilen plastik mamullerde, karışık plastik atıklarının geri dönüştürülmesinde ve enerji üretiminde tercih edilmektedir [55, 65]. Gazifikasyon ise plastiklerin yine oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıkta dönüşümünü sağlayan bir başka kimyasal işlem türüdür. Bu yöntem sayesinde plastik atıklarından daha faydalı gazların elde edilmesine imkan sağlanmaktadır [67, 68]. Kimyasal geri dönüşüm metodları arasında sayılabilecek bir diğer metod ise sülfonlamadır. Bu yöntemde, plastiklerin kimyasal yapısına sülfürik asit veya sülfonik asit grupları eklenerek, moleküllerinin elektriksel ve kimyasal davranışlarını değiştirilebilmekte böylece pastiklere yeni fonksiyonel özellikler kazandırılabilir [68, 69].

3.1. Atık Köpük Polistirenin Kimyasal Geri Dönüşümünden Elde Edilen Maddenin Kullanımı

Plastik malzemeler, kullanılmalarından sonra bile bazı faydalı özelliklerine sahip çıkabildikleri için görece daha ucuz bir malzeme özelliğini taşımaktadırlar. Diğer plastiklerde olduğu gibi polistiren de kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklı olmayan bir termoplastik olarak görülmekte ancak özellikle alkali metaller, halid asitler, indirgeyen ve yükseltgeyen bileşikler söz konusu olduğunda daha dirençli bir yapıya sahiptir.

PS zinciri, nitrik asit kullanılarak nitrataştırılabilir ya da konsantre sülfürik asit kullanılarak sülfonlaştırılabilir özelliğe de sahiptir. Stiren içerisine eklenecek az miktardaki komonomer ile stirenin istenilen özellikleri korunabilirken, ayrıca ısı ve darbeye dayanım gibi özelliklerinin iyileşmesi de sağlanabilmektedir. Normalde darbeye karşı oldukça kırılğan bir yapıda olan PS, komonomerlerin sağladığı avantajla darbeden kaynaklı enerjiyi absorbe ederek daha sağlam ve tok bir malzeme hâline dönüşebilmektedir [24, 30].

Köpük polistiren (EPS) muhteviyatının %90-95'i havadan oluşmaktadır, bu havanın birtakım özel işlemlerden sonra köpükten ayrıştırılması sağlanarak straforun tekrardan polistiren hâline geri dönüştürülmesi sağlanabilmektedir. Kısaca, üretilen ürünler tekrar ham maddeye dönüştürülebilmektedir [24, 30, 50]. Köpük polistirenin hammaddesinin petrol olduğu ve dünyadaki petrol rezervlerinin 2020 itibari ile 50-55 yıl ömrü olduğu düşünülürse köpük polistiren atıklarının geri dönüştürülerek yeniden hammadde hâline getirilmesinin doğal kaynakların tasarruflu kullanımı açısından önemi daha da anlaşılabilir olmaktadır. Atık köpük polistirenin geri dönüşümünde, genel olarak plastiklerin geri dönüşümünde kullanılabilen birçok yöntem kullanılabilir, ancak en uygun yöntemler olarak mekanik ve kimyasal geri dönüşüm sayılmaktadır. Mekanik geri dönüşüm özellikle temiz EPS atıkları için en yaygın ve pratik bir yöntem olarak görülürken; kimyasal geri dönüşüm ise daha kirli veya karmaşık EPS atıkları için daha uygun görülmektedir.

Ayrıştırma süreçlerinin zaman ve maliyet gerektirmesi kimyasal geri dönüşümü EPS atıklarının geri dönüşümüne en uygun yöntem haline getirmekle kalmamış, bu metodun diğer plastiklere nazaran daha geniş çevresel katkısı sağlayacağına dair yapılan çalışma sonuçlarında da yer edinmiştir [56, 70]. Benzer şekilde Lindstrom ve arkadaşları da yaşam döngüsü metodolojisi kullanarak atık EPS'lerin bertarafına ilişkin yaptıkları değerlendirme sonucunda, kapalı döngü yeniden kullanım sistemi her ne kadar en çok tercih edilen sistem olarak görülse de, klasik geleneksel geri dönüşüm yöntemlerinin EPS atıklarının bertarafı için daha uygun yöntem olduğunu savunmuşlardır [71]. Bu gerçeklikten kaynaklı olsa gerek, dünyada ve ülkemizde köpük polistirenlerin geri dönüşümünü sağlayan firma ve tesis sayısında da son yıllarda bir artış yaşanmıştır.

Atık köpük polistirenin (EPS) kimyasal geri dönüşümüne ilişkin yapılan çalışmalar incelendiğinde, akademik çalışmaların bulunduğunu söyleyebiliriz ancak bu çalışmaların yeterli olduğunu söylemek pek mümkün değildir. Genel olarak atık köpük polistirenin kimyasal geri dönüşüm metotlarıyla değerli kimyasallara dönüştürülmek suretiyle döngüsel ekonomi içerisinde yer alması gerektiği görüşü hakimdir [54]. Bu yönde yapılan bazı çalışmalarda atık köpük polistirenin özellikle suda çözünebilir türevlerine çevrilerek polimerik flokülün şeklinde kullanımı; sülfone türevlerinin iyon değiştirici reçine olarak kullanımı veya beton katkı maddesi olarak kullanımı şeklinde geri kazanım yollarının kullanıldığı görülmüştür [31, 48-50]. İlâveten literatürde atık köpük polistirenlerin, seyreltik çözeltilerde bulunan kurşun ve kadmiyum gibi iyonların uzaklaştırılabilmesinde [72], filtrasyon uygulamalarında [73] ve membran hazırlanmasında [74] kullanımı ile ilgili çalışmaların bulunduğu da görülmüştür.

Çalışmanın konusunu oluşturan atık EPS'nin sülfonlanması ise şişirilmiş polistirenin kimyasal yapısına sülfonik asit gruplarının ($-SO_3H$) eklenmesi işlemidir. Bu işlem, genellikle polistirenin yüzey özelliklerini modifiye etmek veya polimerin belirli işlevsellik kazanmasını sağlamak amacıyla yapılır. Şişirilmiş polistiren, genellikle düşük yoğunluklu, hafif ve esnek bir plastik malzemedir, sülfonlama yöntemiyle bu malzemenin kimyasal, fiziksel ve elektriksel özellikleri iyileştirilebilmektedir. Atık EPS'nin sülfonlanmasına yönelik çalışmalarda, bu malzemenin biyomedikal cihazlar veya biyosensörler gibi uygulamalarda, su arıtma ve kimyasal filtreleme uygulamalarında ve paketlenme ve inşaat malzemeleri üretiminde faydalı olabileceğine ulaşıldığı görülmektedir. Çalışmalardan bazılarını somutlaştırmak gerekirse örneğin, Sulkowski ve arkadaşları atık EPS'leri kimyasal reaksiyonlar sonucu polimerik çözeltilere dönüştürmeyi çalışırken [75, 76], Bajdur ve arkadaşları da atık EPS'lerden verimli polielektrolit elde etmek amacıyla EPS atıklarının sülfonik türevlerini çalışmışlardır [61]. Bezer şekilde Abbes ve arkadaşları da., kimyasal geri dönüşümle ilgili çalışmalarda bulunmuş ve atık EPS'ler katyon değiştirici reçineye çevrilerek sulu çözeltilerde bulunan metallerin bertaraf edilmesinde kullanılmıştır [72]. Dimitris ve arkadaşları ise atık EPS'lerin kimyasal geri dönüşümüne yönelik yakın zamanda yapılan bazı çalışmaları araştırmışlardır [68].

Kimyasal geri dönüşümle, üretilen plastik tonajında 2.3 tonluk daha az karbondioksit salınımının olduğunu belirten çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [69], bu sebeple global petrokimya şirketleri son yıllarda umut vaad eden, çevre dostu olan ve daha az enerji gerektiren bu alana büyük yatırımlar planlamaktadır.

Özetle; atık EPS'nin sülfonlanması ve plastiklerin kimyasal modifikasyonuna yönelik yatırım; çevre bilinci, sürdürülebilirlik ve yeni teknolojilere duyulan ilgiyle beraber her geçen gün artmaktadır. Bu alandaki araştırmalar, malzeme biliminde yeni fırsatlar oluştururken, çevresel etkilerin azaltılması ve döngüsel ekonomiye katkı sağlanması adına da önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle su arıtma, biyoteknoloji, ambalaj sektörleri, inşaat, otomotiv ve elektronik alanlarında sülfonlanmış EPS kullanımı potansiyel bir alan olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu çalışmada atık köpük polistirenin kimyasal geri dönüşüm methodologyyla geri dönüştürülmesi sonucu elde edilen ürünlerin özellikle *atık su arıtımında* ve *betonda katkı maddesi olarak kullanımı* üzerinde durulacaktır.

3.1.1. Kimyasal geri dönüştürülmüş atık EPS'nin kirli su arıtımında kullanımı

Sanayi ve evsel kullanım sonrasında biriken atık suların temizlenmesi ve tekrar kullanıma elverişli hâle getirilmesi çevrenin korunması ve kıt olan doğal su kaynaklarının sürdürülebilir kılınması açısından ciddi bir öneme sahiptir [77]. Bu süreçte, atık suların temizlenebilmesi amacıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemlerinden faydalanılabilmektedir.

Atık suların kimyasal arıtma sürecinde, sudaki kirleticiler kimyasal maddeler kullanılarak çöktürülmekte veya nötrale hâle getirilmektedir. Su arıtma kimyasalları arasında tuz, klor, kostik, hidroklorik asit, antiseptik ve polielektrolit gibi çeşitli kimyasal maddeler yer almaktadır. Kullanılan kimyasallar, atık suyun içindeki zararlı molekülleri ayrıştırır ve uzaklaştırır. Özellikle, polielektrolitler sulu çözeltilerin akışı ve kararlılığı ile ilgili özelliklerinin ayarlanmasında, çözeltide askıda kalan parçaların stabilize edilmesinde, yoğunlaştırma ve çöktürme işleminin başlatılmasında etkilidirler ve bu özellikleri sayesinde su arıtma sistemlerinde tercih edilirler [77]. Atık su arıtımında yaygın olarak kullanılan temel işlemlerden biri koagülasyon (pıhtılaştırma) diğeri ise flokülasyon (yumuşaklaştırma) işlemleridir. Koagülasyon ve flokülasyon işlemleri birbirini takip eden işlemlerdir. Bu işleme sürecinde suyun bulanıklaşmasına neden olan ve zararlı mikroorganizmaların gelişmesine zemin hazırlayan partiküller çöktürülmekte, çökelti hâline gelen partiküller bir arada tutularak büyük ve kolay çıkarılabilir partikül hâline getirilerek sudan uzaklaştırılmaktadır. İşlem sonucunda suya kirlilik veren maddeler giderilebilmekte ve arındırılan atık su sulamada veya endüstriyel proseslerde yeniden kullanılabilir hâle gelmektedir [78, 79].

Polimer atıklarından kaynaklanan çevre kirliliği sorunu, bunların kimyasal olarak faydalı ürünlere dönüştürülmesiyle çözülebilir. Kanalizasyon arıtımında kimyasal olarak değiştirilmiş polimer atıklardan etkili flokülantların elde edilmesi bu yollardan biri olarak görülmektedir. Polimer atıklarının sülfonlanmış türevleri, anyonik tipteki polielektrolitlerin özelliklerini sergilemektedir. Elde edilen polimerler, enerji santralleri, çelik fabrikaları ve kömür madenlerinin su sirkülasyon sistemlerinde kanalizasyonların arıtılması işlemleri için gerekli olan flokülasyon özelliklerine sahip kimyasal bileşimlerdenir. Sülfonasyon nispeten basittir ve elde edilen polistiren türevleri suyun arıtılması için kullanılabilir yapıdadır.

Sülfonlanmış polistiren, su arıtma ve askıda kalmış parçacıkların çöktürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Sülfonlama sürecinde atık polistirene negatif yüklü sülfonik asit grupları eklenmektedir, böylece polistirenin yapısı değişmekte ve bu malzeme suyla etkileşime girerek elektrokimyasal reaksiyonlara girebilen bir polielektrolite dönüşmektedir. Elde edilen bu polielektrolit, suyun içinde kalan küçük patikülleri birbirine çekip birleşmelerini sağlar ve bu birleşen büyük partiküllerin çökmesini kolaylaştırır ve böylece suyun temizlenmesi sağlanır. Buna ilişkin yapılan çalışmalardan en bilindik olanı Sulkowski ve arkadaşları tarafından 2005 yılında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de gösterilmektedir. Bu çalışma ile atık polistirenin sülfonlanması ile elde edilen polielektrolit, askıda kalan parçaların çöktürülmesi prosesinde kullanılmış ve bulanıklık takip edilerek polielektrolitin optimum dozajına ulaşılmaya çalışılmıştır [75]

Çizelge 1. Değişik reaksiyon sürelerinde elde edilen polielektrolitler ile yapılan çöktürme işlemlerinde bulanıklık takibiyle optimum dozajın belirlenmesi çizelgesi

<i>Türü NaPSS^a</i>	0.25/0.87/480,000	0.50/0.98/490,700	0.75/1.02/478,500	1.0/1.05/510,000	2.0/1.09/520,000	3.0/1.08/550,000	5.0/0.95/570,000
Doz (mg/dm ³)	Bulanıklık [NTU]/bulanıklık değişimi (%)						
0.000	360/0	360/0	360/0	360/0	360/0	360/0	360/0
0.001	210/42	180/50	240/33	250/31	167/54	202/44	216/12
0.002	181/50	156/57	170/52	190/47	125/65	185/49	158/56
0.003	155/57	121/66	150/58	145/59	76/79	146/59	110/69
0.004	110/69	87/76	139/61	125/65	55/85	110/69	64/82
0.005	86/76	71/80	120/67	101/72	49/86	71/30	30/92
0.006	72/80	58/84	91/74	74/79	30/92	42/88	42/88
0.007	65/82	42/88	80/78	51/86	51/86	65/82	54/85
0.008	51/86	35/90	61/83	45/88	67/81	72/80	64/82
0.009	42/88	50/86	45/87	21/94	89/75	86/76	88/75
0.010	38/89	67/97	31/91	42/88	129/64	112/69	94/74
0.011	45/88	75/79	68/81	68/81	150/58	134/63	98/73
0.012	82/77	90/75	75/79	82/77	167/54	145/60	100/72

^a Sentez Süresi(h)/n.sülfür/M_n,

Sulkowski'nin bu çalışmadaki ana hedefi, atık polistirenin yeniden kullanılabilir ve çevre dostu bir materyale dönüştürülmesi ile su arıtma sürecinde etkili bir polielektrolit üretmektir. Yaptığı deneysel çalışma sonucunda, örneğin 0.25 saatlik reaksiyon süresinde en iyi bulanıklık giderilmesine 0.010 mg/dm³ polielektrolit kullanıldığında, 1 saatlik sürede 0.009 mg/dm³ polielektrolit kullanıldığında, 5 saatlik reaksiyon süresinde ise en iyi berraklığa 0.005 mg/dm³ polielektrolit kullanıldığında ulaşıldığı, bu miktarlardan sonraki doz artışlarında bulanıklık seviyesinde azalma yerine bir artış yaşandığı görülmektedir. Tabloda koyu renkte gösterilen bulanıklık seviyeleri, aynı sütunda belirtilen reaksiyon süresi içinde bulanıklığı en iyi azaltan optimum polielektrolit dozunu göstermektedir. Sulkowski ve arkadaşları tarafından gerek 2005 gerekse 2010 yıllarında yapılan çalışmalarda [75, 76], sudaki bulanıklığın ne kadar azaldığı takip edilerek optimum seviye belirlenmeye çalışılmış, sentezlenen topaklaştırıcıların, bulanıklığın ve çözünmüş safsızlıkların konsantrasyonunun azalmasına neden olduğu ve ayrıca arıtılmış suyun kalite parametresini geliştirdiği görülmüştür [75]. Sonuç olarak atık köpük polistirenin kimyasal modifiyesi ile elde edilen ürünlerin çalışılan çözeltilerin bulanıklığında önemli bir azalmaya sebebiyet verdiği, elde edilen ürünün atık su arıtımında flokülant olarak başarıyla kullanılabileceği çıkarımına erişilmiştir.

Holboke ve diğerleri de, atık köpük polistiren bardaklar kullanarak yaptıkları kimyasal modifikasyon çalışmalarında, konsantre sülfürik asit ve gümüş sülfattan faydalanarak anyonik türde bir polielektrolit olan sodyum polistiren sülfonatu (NaPSS) elde etmişlerdir [80]. Holboke ve arkadaşları, yaptıkları bu çalışma ile atık polistirenin sülfolanması suretiyle elde edilen bu yeni NaPSS polielektrolit sulu çözeltisinin de yine su arıtımında ayrıştırıcı olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Atık köpük polistirenin kimyasal geri dönüşümüne dair çeşitli çalışmalarda bulunulmuştur. Bu çalışmaların birçoğunda, atık köpük polistirenler sülfat asidi ile sülfolanmış ve reaksiyonlarda katalizörlü ya da katalizörsüz ortamda gerçekleştirilerek elde edilen ürünler genellikle sodyum tuzuna dönüştürülerek yapılan uygulamalar içinde kullanılmıştır. Bu yönde Kılıç tarafından yapılan çalışmada da, atık köpük polistirenin katalizörlü bir ortamda sülfolanması sonucu oluşan ürünlerin kirli suların koagülasyon/flokülasyon metodu ile arıtılması çalışmalarında etkili bir flokülant yardımcısı şeklinde kullanılabileceğine erişildiği görülmüştür [39].

Kısaca, atık köpük polistirenin sülfolanarak polielektrolit haline getirilmesi ve su arıtma gibi çevre dostu uygulamalarda kullanılmasının, çevre kirliliğini azaltmak ve endüstriyel atıkları değerlendirmek için etkili bir yöntem olduğunu söylemek gerekmektedir.

3.1.2. Kimyasal geri dönüştürülmüş atık EPS'nin beton içeriği olarak kullanımı

Atık EPS'nin değerlendirilebileceği bir diğer alan yapı sektörüdür ve bu atıkların beton içeriğinde agrega olarak kullanımına dair literatürde çok fazla çalışma bulunmaktadır. Ancak kimyasal geri dönüşümle elde edilen çözeltinin betonda kullanımına dair yapılan çalışmalar görece daha az sayıdadır. Bildiğimiz üzere, bir betonun kalitesinin artırılabilmesi için su/çimento oranının düşürülmesi yani ortamdaki fazla suyun çekilmesi gereklidir.

Bir beton harcı oluşturulurken katkı maddesi olarak birçok kimyasal kullanılmaktadır ve bu maddelerin etkinliği molekül ağırlığına, yüzey aktivitelerine ve kimyasal yapılarına bağlı olarak değişebilmektedir. Atık polistirenlerin sülfolanmasıyla elde edilen ürünün beton harcında katkı maddesi olarak kullanımına yönelik en bilinen çalışmalar Assunção ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaların birinde köpük polistiren bardak atıkları sodyumpolistiren sülfonat (NaPSS) sentezinde kullanılmış ve sonucunda suda çözünebilen polielektrolitler elde edilmiştir ve bu sulu çözelti portland çimentosu ile hazırlanmış betonda katkı maddesi olarak kullanılmıştır (Çizelge 2) [81].

Çizelge 2. Test numunesi için kullanılan betonun içeriği

Material	(%)
Portland Çimentosu	14.84
Kum (İncelik Modülü 2,2)	28.19
Kırmataş (Maksimum Boyutu 19 mm)	49.11
Su	7.86

Assunção ve arkadaşları tarafından NaPSS çözeltisi içeren betonun dayanım testi ve çimento dağılım testi sonuçları ise Çizelge 3'te gösterilmektedir [81]. Buna göre, birim çimento başına %0.3 NaPSS kullanılmış, 7 ve 28 günlük bekleme sonrasında ayrı ayrı mekanik test yapılmış ve su/çimento oranı ile çimento dağılımı ölçülmüştür. İlk ölçümde su/çimento oranı kontrol numunesi ile aynı tutularak çimentonun yayılımındaki artış gözlenmiştir. İkinci ölçümde ise su ihtiyacının azaldığı ve betonun dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3. NaPSS çözeltisi içeren betonun dayanım testi ve çimento dağılım testi sonuçları

Numune	Su/Çimento Oranı	Çimento yayılımı	Basma Kuvveti (MPa)	
	(w/c)	(mm)	7 günlük	28 günlük
Kontrol	0.53	53	29.22	35.17
NaPSS 0.3% (A)	0.53	210	29.37	37.26
NaPSS 0.3% (B)	0.46	49	34.66	43.57

Diğer bir ifadeyle, analiz sonucunda, NaPSS çözeltilisinin çimento yayılımını %300'den fazla artırdığı, betondaki su içeriğinde %13.2 oranında bir azalmanın gerçekleştiği ve basma kuvvetinin de 28 günlük donma süresinden sonra kontrol numunesine kıyasla %23.9 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, atık köpük polistiren kaplardan elde edilen NaPSS sulu çözeltilisinin su/çimento sistemlerinde beton harcındaki su içeriğini azaltıcı ve beton dayanıklılığını artırıcı katkı maddesi olarak da kullanılabileceğini göstermesi açısından önemli bir yere sahiptir.

Kısaca, sülfonlanmış atık EPS'nin suyu tutma ve su geçişini engelleme özellikleri sayesinde betonun su yalıtımında kullanılabilir olduğu; elde edilen polielektrolit özelliklerinin betonda kimyasal bağlar kurarak betonun bağlama kapasitesini iyileştirebileceği ve betonun dayanıklılığını artırabileceği, aynı zamanda beton karışımındaki suyun yönetilmesine yardımcı olacağı görülmüştür. Bu sebeple olsa gerek, EPS'nin beton karışımında kullanımı sürdürülebilir inşaat uygulamaları geliştiren firmalar ve araştırmacılar için ilginç bir konu olmuştur. Ancak yine de, elde edilen malzemenin bu alanda kullanımına yönelik uzun vadeli dayanıklılığı ölçen daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

4. SONUÇ

Malzemelerin geri dönüşümü meselesi, yenilenemeyen hammadde tüketiminden kaçınılmasında hem çevresel hem de ekonomik bir menfaat görülmesi sebebiyle kıymetli bir araştırma ve uygulama alanı hâline gelmiştir. Geri dönüşüm dünyanın artan nüfusuna ve artan tüketimine bağlı olarak artan atıkların çevreden uzaklaştırılmasına da alternatif bir çözüm olarak görülen bir alan olmuştur. 2050 yılına gelindiğinde aynı dönem nüfus artışının iki katından daha fazla artacağı öngörülen küresel atık miktarının yönetimi, doğal kaynakların ömrünün uzatılması ve daha yaşanabilir bir ekolojik denge sağlanabilmesi açısından da önemlidir. Katı atıklar içerisinde büyüklük anlamında üçüncü sırada yer alan plastiklerin genellikle PE, PVC, PP ve PS plastiklerinden oluştuğu görülmektedir.

Günlük hayatımızda kolaylık getiren ve erişimi kolay olan plastiklerin bazıları uzun süreli kullanılabilirken bazıları ise tek kullanımlık tasarlanmaktadır. Uzun ya da kısa süreli olmasına bakılmaksızın plastiklerin her türü kullanımdan sonra atık hâlini almaktadırlar, ancak çoğu tek kullanımlık olarak tasarlandığından özellikle ambalajlar dünyadaki plastik atıkların yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Atık plastiklerin çoğu biyolojik olarak ayrışmak yerine, ışığın etkisiyle mikroplastik olarak adlandırılan daha küçük parçacıklara dönüşerek doğanın kirlenmesine dolayısıyla tüm canlıların zarar görmesine neden olabilmektedirler. Bu sebeple, katı atıkların günümüzün en önemli çevre problemi hâline geldiği dünyamızda, daha yaşanabilir ve sürdürülebilir bir çevre sağlanabilmesi için plastik katı atıkların geri dönüşümlerinin çok iyi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Plastikler, kullanıldıktan sonra geri kazanılabilme özelliğine sahip olduklarından tekrardan işlenerek yeni ürünlerin elde edilmesinde kullanılmaktadırlar ancak, küresel çapta üretilen plastiğin yalnızca %9'u yeniden dönüşüme uğratılabilmektedir. Geriye kalan atıkların %70'inden fazlası ise katı atık sahalarına gömülür ya da doğaya bırakılmaktadır. Atık plastikler içerisinde önemli bir yere sahip olan köpük polistiren atıkları ise, günlük hayatta kullanılan plastikler içerisinde en fazla yer tutan plastik türlerinden olmasına rağmen geri dönüşüm programlarında kullanımındaki büyüklüğüne rağmen yeterince yer alamayan plastiklerden biridir. Köpük polistiren üretiminin artan nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmeye bağlı olarak arttığı dolayısıyla tek kullanımlık olarak tasarlanan köpük polistiren atık miktarının da büyük bir hızla arttığı ve daha da artacağı yadsınamaz bir gerçek olarak karşımızda durmaktadır. Bu çerçevede köpük polistiren atıklarının azaltılabilmesi ve sürdürülebilir bir tüketim için bu polistirenlerin ya üretim ve kullanım aşamasında kaynağında kısıtlanması ya da atık hâline gelmişlerinin geri dönüşüm yöntemi ile yeniden sürdürülebilir tüketime dâhil edilmesi gerekecektir.

Polistiren, sanayileşmenin ve nüfusun artışına bağlı olarak artan plastik üretiminde en fazla kullanılan plastiklerden biri olmasına rağmen geri dönüşümünde aynı ilgiyi görememektedir. Bu durum özellikle fiziki olarak fazla yer kaplayan atık köpük polistirenlerin geri dönüşüm programlarına dâhil edilebilmesi için gerekli olan polistiren sıkıştırıcı sistemlerine ve lojistiğine gerekli yatırımın yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Atık polistirenlerin yeniden değerlendirilmesine yönelik yöntemler incelendiğinde, mekanik kimyasal ve enerji kazanımlı geri dönüşüm yöntemlerinin kullanılabildiği görülmüştür.

Atık plastiklerin yönetilebilmesinin en ideal seçeneklerinden biri kullanılmış atık plastiklerinin kimyasal modifikasyonlarla daha faydalı ürünlere dönüştürülebilmesidir. Kimyasal geri dönüşümle ilgili çeşitli çalışmalar bulunmakta ancak yeterli olduğunu söylemek pek mümkün değildir. Köpük polistiren muhteviyatının %90-95'i havadan oluşmaktadır, bu hava bazı işlemlerin kullanılmasıyla köpükten ayrıştırılmakta ve böylece straforun yeniden hammadde hâline dönüştürülebilmesi sağlanabilmektedir. Köpük polistirenin (EPS) hammaddesinin petrol kaynaklı olduğu ve dünyadaki petrol rezervlerinin yarım yüzyıllık bir ömrünün kaldığı dikkate alınırsa köpük polistiren atıklarının yeniden hammadde hâline getirilmek suretiyle geri kazanılmasının doğal kaynak stoğu üzerindeki etkisi daha iyi anlaşılabilecektir.

Atık köpük polistirenin (EPS), daha maliyetsiz olduğu düşünülen kimyasal geri dönüşümüne ilişkin yapılan çalışmalardan birinde, atık su arıtımında kullanılan kimyasallardan polielektrolitin elde edilmesi amacıyla atık köpük polistirenin sülfone türevleri hazırlanarak anyonik yapıdaki bu polielektrolitlerin flokülasyon özelliklerinin test edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda polielektrolitlerin flokülasyonel özelliklerinin ticari anyonik polielektrolitlerle benzerlik gösterdiği ve sentezlenen çözeltilerin suyun berraklığını artırmada etkili olduğuna ulaşıldığı görülmüştür. Bir diğerinde ise, atık plastik kaplardan elde edilen polistiren sülfonat, çimento bazlı malzemelerde katkı maddesi olarak kullanılmış ve analiz sonucunda bu çözeltinin betondaki su içeriğinin azaltılması ve basınç dayanımı kazanımında iyileştirmeler sağlanması amacıyla etkin bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği görülmüştür. Bu sonuçlar, atık EPS'nin kimyasal dönüşümüyle elde edilen maddelerin koagülasyon ve flokülasyon yardımcı maddesi olarak su ve atık su arıtımında ya da betondaki su miktarının azaltılmasında etkili bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında, atık EPS'nin birincil ve ikincil mekanik geri kazanımlarının zahmetli, ve maliyetli olduğu bir ekonomik ortamda, ülkelerin köpük atıklarının daha az maliyetli ve daha az zahmetli olduğu düşünülen kimyasal geri dönüşüm metoduyla geri dönüştürülmesine ve elde edilen maddenin özellikle su arıtımında ve beton hazırlanmasında kullanılmasının teşvik edilmesine yönelik politikalar üretmesinin gerek sürdürülebilir bir ekonomi gerekse yaşanabilir bir ekolojik denge açısından daha faydalı olacağı düşünülmektedir. Benzer şekilde, kimyasal geri dönüşümün daha fazla şirket tarafından benimsenmesini ve piyasanın ilgisini çekebilmesini sağlamak amacıyla bu yöndeki cezalandırma/vergilendirme veya çevresel maliyetlere entegre eden diğer düzenlemelere yönelik çalışmalar yapılması, geri dönüşümün daha başarılı olmasını sağlayacak daha sıkı ambalaj düzenlemelerinin ve atıkların bertarafına yönelik daha sıkı düzenlemelerin uygulamaya koyulmasının da döngüsel ekonomiye giden yolu açacağı da düşünülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI

Mehmet Kamaloğlu: Metodoloji, Araştırma, İçerik analizi, Makalenin yazımı-İnceleme ve Düzenleme.

KAYNAKLAR

- [1] Huang, Z., Shanmugam, M., Liu, Z., Brookfield, A., Bennett, E. L., Guan, R., Vega Herrera, D. E., Lopez-Sanchez, J. A., Slater, A. G., McInnes, E.J.L., Qi, X. and Xiao, J. (2022). Chemical Recycling of Polystyrene to Valuable Chemicals via Selective Acid-Catalyzed Aerobic Oxidation under Visible Light. *Journal of the American Chemical Society*, 144 (14), 6532-6542. DOI: 10.1021/jacs.2c01410
- [2] Plastics Europe. (2023). Plastics the fast Facts. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>, Son Erişim Tarihi: 10 Mart 2024.
- [3] Simon, N., Raubenheimer, K., Urho, N., Unger, S., Azoulay, D., Farrelly, T., Sousa, J., van Asselt, H., Carlini, G., Sekomo, C., Schulte, M. L., Busch, P.-O., Wienrich, N. and Weiland, L. A. (2021). Binding global agreement to address the life cycle of plastics. *Science*, 373, 43-47. DOI: 10.1126/science.abi9010

- [4] European Environment Agency Website Plastics. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/indepth/plastics#:~:text=Global%20consumption>, Son Erişim Tarihi: 10 Ağustos 2024.
- [5] Lebreton, L. and Andrady, A. (2019). Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Communications*, 5(6). DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>
- [6] Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J.H., Abu-Omar, M., Scott, S. L. and Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494-3511 DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b06635
- [7] Miao, Y., von Jouanne, A. and Yokochi, A. (2021). Current technologies in depolymerization process and the road ahead. *Polymers*, 13(3), 449. <https://doi.org/10.3390/polym13030449>
- [8] MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B. and Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, 373(6550), 61-65. DOI: 10.1126/science.abg5433
- [9] Santos, R. G., Machovsky-Capuska, G. E. and Andrades, R. (2021). Plastic ingestion as an evolutionary trap: Toward a holistic understanding. *Science*, 373(6550), 56-60. DOI: 10.1126/science.abh0945
- [10] Stubbins, A., Law, K. L., Muñoz, S. E., Bianchi, T. S. and Zhu, L. (2021). Plastics in the Earth system. *Science*, 373(6550), 51-55. DOI: 10.1126/science.abb0354
- [11] Weiss, L., Ludwig, W., Heussner, S., Canals, M., Ghiglione, J.-F., Estournel, C., Constant, M. and Kerhervé, P. (2021). The missing ocean plasticsink: Gone with the rivers. *Science*, 373 (6550), 107-111. DOI: 10.1126/science.abe0290
- [12] International Solid Waste Association (ISWA). (2024a). Annual Report 2023. <https://www.iswa.org/annual-reports/?v=ebe021079e5a>, Son Erişim Tarihi: 8 Mart 2024.
- [13] International Solid Waste Association (ISWA). (2024b). Waste to Wealth: Solutions for a Sustainable Future. <https://iswa2024.org/>, Son Erişim Tarihi: 8 Mart 2024.
- [14] OECD. (2022a). Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. *OECD Publishing*, Paris. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>.
- [15] OECD. (2022b). Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. *OECD Publishing*, Paris. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- [16] Cregut, M., Bedas, M., Durand, M. and Thouand, G. (2013). New Insights into Polyurethane Biodegradation and Realistic Prospects for the Development of a Sustainable Waste Recycling Process. *Biotechnology Advances*, 31, 1634-1647. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.011>
- [17] United Nations Environment Programme (UNEP) Annual Report 2022. <https://www.unep.org/resources/annual-report-2022>, Son Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2024.
- [18] Euronews Website. BM'den Plastik Kirliliğine Karşı İddialı Adım. <https://tr.euronews.com/2022/03/03/bm-den-plastik-kirliligine-kars-iddial-ad-m-uluslararası-sozlesme-2024-te-imzaya-ac-lacak>, Son Erişim Tarihi: 19 Eylül 2023.
- [19] United Nations Environment Programme (UNEP). Global Waste Management Outlook 2024. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>, Son Erişim Tarihi: 15 Ağustos 2024.
- [20] World Bank (WB) (2018). What a Waste. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *Urban Development Series*, World Bank Group, 3-29.
- [21] Öztürk, M. AB'nin atık ihracatının ana hedefi Türkiye mi? Independent Türkçe. <https://www.indyturk.com/node/517611/t%C3%BCrki%C3%87yedenseler/abnin-at%C4%B1k-ihracat%C4%B1n%C4%B1n-ana-hedefi%C3%BCrkiye-mi>, Son Erişim Tarihi: 17 Kasım 2023.
- [22] Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB). (2023). Kalkınma Planları. <https://www.sbb.gov.tr/kalkinma-planlari/>, Son Erişim Tarihi: 17 Kasım 2023.
- [23] Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- [24] Gama, N., Barros-Timmons, Ana M. M. V. and Ferreira, A. (2023). Creating a Roadmap Towards Circularity in the Built Environment, *The Recycling of Construction Foams: An Overview*, 95-105. 10.1007/978-3-031-45980-1_9
- [25] Rahimi, A. and García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1, No. 0046. <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0046>
- [26] Plastic Oceans. Plastics: It's Not All the Same. <https://plasticoceans.org/7-types-of-plastic/>, Son Erişim Tarihi: 9 Nisan 2024.
- [27] David, E. (2001). Polymer foams: trends in use and technology. *Rapra Technology Ltd.*, Shawbury.
- [28] Lee, S.T. and Ramesh, N.S. (2004) Polymeric foams: mechanisms and materials. *CRC Press*, London and New York
- [29] Andrady, A. L. and Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*, 364(1526), 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- [30] Eaves, D. (2004). Handbook of polymer foams. *Rapra Technology Ltd.*, Shawbury.

- [31] Aksit, M., Zhao, C., Klose, B., Kreger, K., Schmidt, H.W. and Altstädt, V. (2019). Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive. *Polymers*, 11 (268). DOI: 10.15495/EPub_UBT_00005007
- [32] Fried, J. R. (2003). Polymer science and technology. *Pearson Education*; New Jersey.
- [33] Achilias, D. S., Kanellopoulou, I., Megalokonomos, P., Antonakou, E. and Lappas, A. A. (2007). Chemical recycling of polystyrene by pyrolysis: Potential use of the liquid product for the reproduction of polymer. *Macromol Materials and Engineering*, 292(8), 923-934. <https://doi.org/10.1002/mame.200700058>
- [34] Tiwary, P. and Guria, C. (2010). Effect of metal oxide catalysts on degradation of waste polystyrene in hydrogen at elevated temperature and pressure in benzene solution. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 298-307. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0235-7>
- [35] Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkıran, İ., Yağcı, M. A., Cöbek, M. and Bilgiç, T. (1999). Polimerler I. *Pagev Yayınları*.
- [36] Brennan, L., Isaac, D. and Arnold, J. (2002). Recycling of acrylonitrile-butadiene-styrene and high-impact polystyrene from waste computer equipment. *Journal of Applied Polymer Science*, 86(3), 572-578.
- [37] Inagaki, Y. and Kiuchi, S. (2001). Converting waste polystyrene into a polymer flocculant for wastewater treatment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 3(1), 14-19.
- [38] Inagaki, Y., Kuromiya, M., Noguchi, T. and Watanabe, H. (1999). Reclamation of Waste Polystyrene by Sulfonation. *Langmuir*, 15(12), 4171-4175.
- [39] Kılıç, F. (2007). Atık şişirilmiş polistirenin kimyasal geri kazanımı. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [40] Saçak, M. (2005). Polimer Kimyası. *Gazi Kitabevi*, Ankara.
- [41] Karaduman, A. (1998). Plastik atıkların geri kazanımının araştırılması. Doktora tezi. *Ankara Üniversitesi*.
- [42] Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı (PAGEV). Polistiren. <https://pagev.org/polistiren#:~:text=Genelde%20polistiren%20kald%C4%B1r%C4%B1m%20kenar%C4%B1nda%20toplanan,yat%C4%B1r%C4%B1m%C4%B1n%20yap%C4%B1lmmas%C4%B1ndan%20%C3%B6t%C3%BCr%C3%BC%20geri%20d%C3%B6n%C3%BC%C5%9Ft%C3%BCr%C3%BC>, Son Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2024.
- [43] Eaves, D. (2001). Polymer Foams-Trends in Use and Technology. *Rapra Technology Limited*, Sawbury.
- [44] Beswick, R. Hd. and Dunn, D. J. (2002). Plastics and Packaging. Western Europe and America.
- [45] OECD (2015). Environment at a Glance 2015: OECD Indicators. *OECD*, Paris <http://www.oecd.org/environment/indicators-modellingoutlooks/environment-at-a-glance-19964064.htm>, Son Erişim Tarihi: 16 Nisan 2024.
- [46] Kosloski-Oh, S. C., Wood, Z. A., Manjarrez, Y., de los Rios, J. P. and Fieser, M. E. (2021). Catalytic Methods for Chemical Recycling or Upcycling of Commercial Polymers. *Materials Horizons*, 8, 1084-1129. <https://doi.org/10.1039/d0mh01286f>
- [47] Garcia, J. M. and Robertson, M. L. (2017, Kasım 17). The future of plastics recycling. *Science*, 358, 6265, 870-872. <https://www.jstor.org/stable/26400835>
- [48] Gardiner, F. and Garmson, E. (2010). Plastics and the environment. *iSmithers Rapra Publishing*, Shawbury
- [49] Harrison, R. M. and Hester, R. E. (2018). Plastics and the environment. *Royal Society of Chemistry*, Cambridge
- [50] Yang, W., Dong, Q., Liu, S., Xie, H., Liu, L. and Li, J. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *Procedia Environ Science*, 16, 167-175
- [51] Ulcay, Y. (2004). Improvement of Waste Recycling in Pet Fibre Production. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 231-237.
- [52] Goodship, V. (2007). Plastic Recycling. *Science Progress*, 90(4) 245-268. <https://doi.org/10.3184/003685007X228748>
- [53] Karayıldırım, T., Yanık, J., Uçar, S., Sağlam, M. and Yüksel, M. (2001). Conversion of plastics/HVGO mixtures of fuels by two-step processing. *Fuel Processing Technology*, 73, 23-35.
- [54] Huang, Z., Shanmugam, M., Liu, Z., Brookfield, A., Bennett, E.L., Guan, R., Vega Herrera, D.E., Lopez-Sanchez, J.A., Slater, A.G., McInnes, E. J. L., Qi, X. and Xiao, J. (2022 Nisan). Chemical Recycling of Polystyrene to Valuable Chemicals via Selective Acid-Catalyzed Aerobic Oxidation under Visible Light. *J Am Chem Soc.*, 144(14), 6532-6542. DOI: 10.1021/jacs.2c01410
- [55] Yoshida, E. (2023). Vacuum pyrolysis depolymerization of waste polystyrene foam into high-purity styrene using a spirit lamp flame for convenient chemical recycling. *RSC Sustain.*, 1, 2058-2065. <https://doi.org/10.1039/D3SU00207A>
- [56] Vollmer, I., Jenks, M. J. F., Roelands, M. C. P., White, R. J., vanHarmelen, T., de Wild, P., van der Laan, G. P., Meirer, F., Keurentjes, J.T. F. and Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402-15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- [57] Ikura, M., Stanculescu, M. F. and Kelly, J. (1999). Short Contact Time Thermal Cracking of Carbonaceous Wastes to Alpha Olefines. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 89-105.
- [58] Kaminsky, W. and Kim, J. S. (1999). Pyrolysis of Mixed Plastics into Aromatics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 127-134.

- [59] Schirmer, J., Kim, J. S. and Klemm, E. (2001). Catalytic degradation of polyethylene using thermal gravimetric analysis and a cycled-spheres-reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 60, 205-217.
- [60] Karagöz, S., Yanik, J., Uçar, S., Sağlam, M. and Song, C. (2003). Catalytic and Thermal Degradation of High-Density Polyethylene in Vacuum Gas Avers Non-Acidic and Acidic Catalysts. *Applied Catalysis A*, 242, 51-62.
- [61] Bajdur, W., Pajaczkoeska, J., Makarucha, B., Sulkowska, A. and Sulkowski W. W. (2002). Effective Polyelectrolytes Synthesised from Expanded Polystyrene Waste. *European Polymer Journal*, 38, 299-304.
- [62] Ignatyev, I. A., Thielemans, W. and Vander Beke, B. (2012). Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7 (6), 1579-1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- [63] Rand, T., Haukohl, J. and Marxen, U. (2000). Municipal Solid Waste Incineration: Decision Makers' Guide. The World Bank, Washington D.C. Son Erişim Tarihi: 20 Haziran 2024.
- [64] Chaukura, N., Gwenzi, W., Bunhu, T., Ruziwa, D. T. and Pumure, I. (2016). Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 157-165.
- [65] British Plastic Federation (BPF) (2021). Chemical Recycling 101. Chemical Recycling 101 (bpf.co.uk).
- [66] Quinteiro, P., Gama, N. V., Ferreira, A., Dias, A. C. and Barros-Timmons, A. (2022). Environmental assessment of different strategies to produce rigid polyurethane foams using unrefined crude glycerol. *Journal of Cleaner Production*, 371,133554, 1-12. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133554.
- [67] Maafa, I. M. (2021). Pyrolysis of polystyrene waste: a review. *Polym (Basel)* 13, 1-30.
- [68] Jeswania, H., Krügerb, C., Russ, M., Horlacherc, M., Antony, F., Hanne, S. and Azapagica, A. (2021). Life Cycle Environmental impacts of Chemical Recycling via Pyrolysis of Mixed Plastic Waste in Comparison with Mechanical Recycling and Energy Recovery. *Science of the Total Environment*, 769(1). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
- [69] Dimitris, S. A., Andrioitis, L., Ioannis A. K., Dimitra, A. L., Nikolaos P. N., Siafaka, P., Tsagkalias, I. and Tzintzou, G. (2012). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Material Recycling - Trends and Perspectives*, 1-63. DOI: 10.5772/33457
- [70] Lim, Y. S., Izhar, T.N.T., Zakarya, I.A., Yusuf, S. Y., Zaaba, S. K. and Mohamad, M. A. Life Cycle Assessment of Expanded Polystyrene. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 920,1, 01203036,7. Doi:10.1088/1755-1315/920/1/012030
- [71] Lindstrom, T. and Hickers, A. L. Life cycle assessment of expanded polystyrene shipping boxes at a public research institution: insights for infrastructure at the end of life. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(3), 031001. DOI: 10.1088/2634-4505/ac80d1
- [72] Abbes, I. B., Bayoudh, S. and Baklouti M. (2006). Converting Waste Polystyrene into Adsorbent: Potential Use in The Removal of Lead and Calcium Ions from Aqueous Solution. *Journal of Polymers and the Environment*, 14 (3), 249-256.
- [73] Shin, C. (2006). Filtration Application from Recycled Expanded Polystyrene. *Journal of Colloid and Interface Science*, 302 (1), 267-271.
- [74] Yamaki, T., Kobayashi, K., Asano, M., Kubota, H. and Yoshida, M. (2004). Preparation of Proton Exchange Membranes Based on Crosslinked Polytetrafluoroethylene for Fuel Cell Applications. *Polymer*, 45(19), 6569-6573. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.07.048>.
- [75] Sulkowski, W. W., Wolinska, A., Szoltysik, B., Bajdur, W. M. and Sulkowska, A. (2005). Preparation and Properties of Flocculants Derived from Polystyrene Waste. *Polymer Degradation and Stability*, 90, 272-280.
- [76] Sulkowski, W. W., Nowak, K., Sulkowska, A., Wolinska, A., Bajdur, W. M., Pentak, D. and Mikula, B. (2010). Chemical Recycling of Polystyrene. Sulfonation with Different Sulfonation Agents. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 523(1), 218/[790]-227/[799]. <https://doi.org/10.1080/15421401003720140>
- [77] Gomes Amaro, N. N., Borges França, K., Batista de Souza Neto, O., da Silva Cruz, W. and de Vasconcellos Araújo, M. Polystyrene composite system: An alternative for wastewater treatment. *Water Science& Technology*, 90(3),791-806. doi: 10.2166/wst.2024.198.
- [78] Satyanarayan, S., Ramakant and Vanerker, A. P. (2005). Conventional approach for abattoir wastewater treatment. *Environmental Technology*, 26, 441-447.
- [79] Amuda, O. S., and Alade, A. (2006) Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater. *Desalination*, 196, 22-31.
- [82] Holboke, A. E. and Pinnell, R. P. (1989). Sulfonation of Polystyrene. *Journal of Chemical Education*, 66(7), 613-614.
- [81] De Assunção, R. M., Royer, B., Oliveira, J. S., Rodrigues Filho, G. and De Castro Motta, L. A. (2005). Synthesis, characterization, and application of the sodium poly (styrenesulfonate) produced from waste polystyrene cups as an admixture in concrete. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(5), 1534-1538.