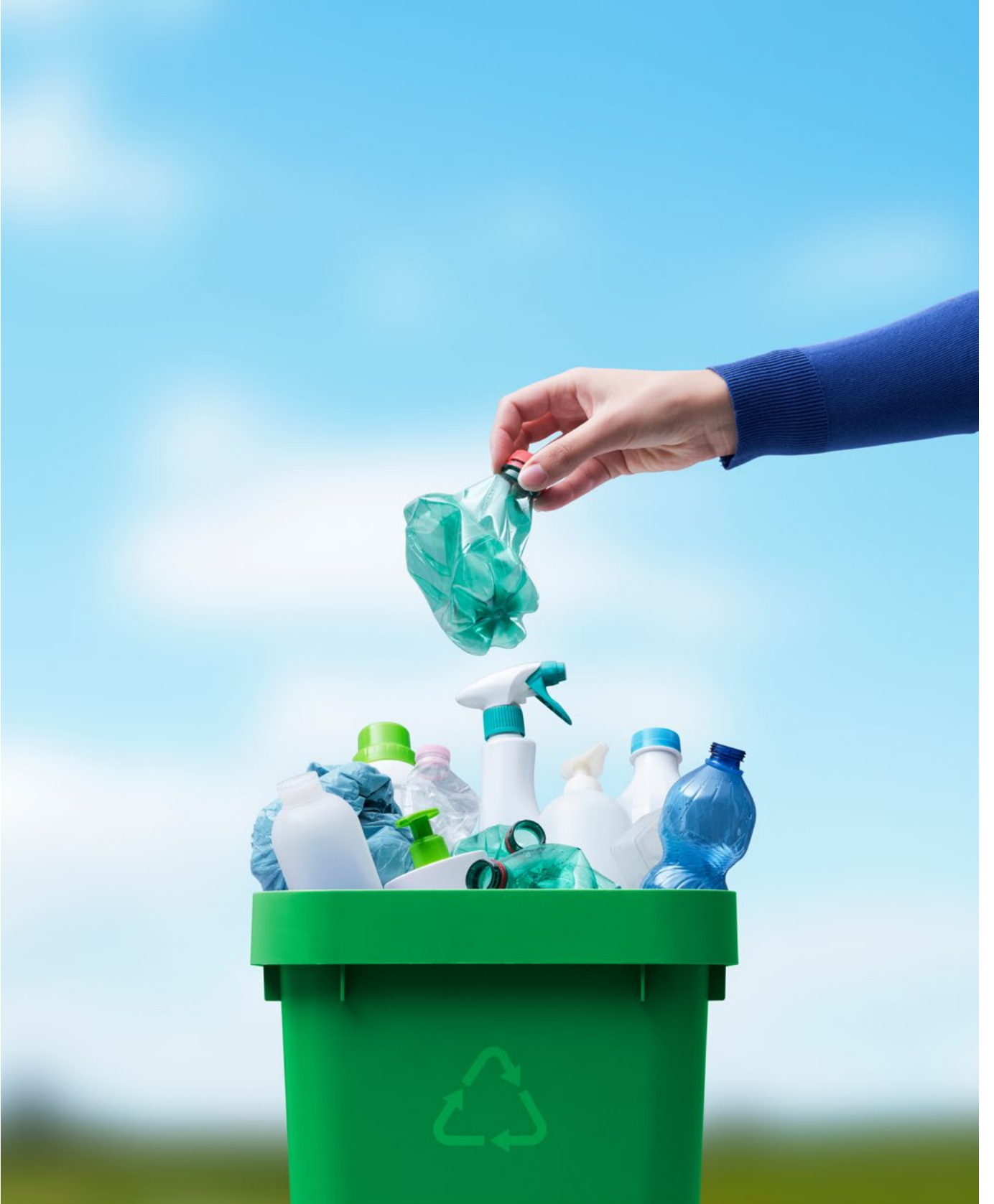


İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİ TERSİNE ÇEVİRECEK GERİDÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ

TREND ANALİZİ ARALIK 2022



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.



1. GİRİŞ

21'inci yüzyılda zorlu bir dönemden geçilmektedir. İnsanlık bir yandan küresel iklim değişikliği, diğer yandan küresel kaynakların hızla tükenmesi gibi kritik tehlikelerle karşı karşıyadır. Ancak COVID-19 pandemisi ve ardından tüm dünyada yaşanan enerji ve gıda güvenliğini tehlikeye atan sıkıntılar, ülkelerin iklim değişikliği ve kaynakların verimli kullanılması için artık kaçınılmaz olan adımları atmasını geciktirmektedir. Hatta Ukrayna-Rusya çatışmasında Rusya'nın doğalgaz sevkiyatını durdurma kararının ardından pek çok ülkenin kömür üretimi ve tüketimini artırma yönündeki kararlarında olduğu gibi geri adımlar atıldığı da görülmektedir.

Hem iklim değişikliği hem kaynakların tükenmesi tehlikelerine karşı önerilen en etkili yöntemlerden biri döngüsel ekonomiye geçiştir. Döngüsel ekonomi, "üret-kullan-at" şeklindeki geleneksel doğrusal sürecin yerine, "üret-kullan-dönüştür-yeniden dönüştür" modelini getirmeyi amaçlamaktadır. Doğrusal ekonominin sonucu daha fazla hammadde kullanımı, ihtiyaçtan fazla tüketim ve büyük boyutlarda çevre kirliliği ve iklim değişikliği olmuştur. Döngüsel ekonomi ise ürünlerin, sonsuz sayıda yeniden kullanılabilir hâle getirilmesi için uygun malzemeler ve yeniden kullanılmasına veya onarılmasına imkân tanıyan tasarımlarla piyasaya sunulması yoluyla,

kaynakları mümkün olduğunca uzun süre kullanımda tutmaya, kullanım sırasında maksimum değeri elde etmeye ve hizmet ömürlerinin sonunda ürünleri ve kullanılabilir malzemeleri geri kazanmaya ve geri dönüştürmeye odaklanmaktadır^[1].

Döngüsel ekonomi "3R ana eylemleri"; Azalt (Reduce), Tekrar kullan (Reuse) ve Geri dönüştür (Recycle) ilkeleri tarafından yönetilen ve atıklar ile işlenmemiş kaynak tüketiminin azaltılması gibi çok çeşitli eylemler içerir. Kaynak kullanımı en aza indirilir (azaltılır), ürünlerin ve parçaların yeniden kullanımı maksimize edilir (yeniden kullanılır) ve en az diğerleri kadar önemli son adım olarak da hammaddeler yüksek bir standarda göre yeniden kullanılır (geri dönüştürülür)^[2].

Döngüsel ekonominin oluşması için kritik unsur, mümkünse yüzde 100 dönüştürülebilir veya yeniden kullanılabilir ürün tasarımı ve ileri geridönüşüm yöntemleridir. Gelişmiş ülkelerde bu iki alanda yapılan Ar-Ge çalışmaları ile kamu ve özel sektör kuruluşlarının uygulamaları belirmeye başlamıştır. Analizimizde söz konusu çalışmalar aktarılacak; ileri geridönüşüm yöntemlerine, gelişmiş malzemelere, geridönüşüm araçlarına göz atılacaktır.

2. İLERİ GERİDÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Dünya genelinde her yıl 2,1 milyar tondan fazla katı atık üretilmekte ama bu miktarın sadece yüzde 16'sı geri dönüştürülebilmektedir^[3]. Dünya Bankasının 2018 tarihli raporuna göre acil önlem alınmadığı takdirde 2050'ye kadar dünya genelinde katı atık miktarı yüzde 70 daha artacaktır^[4]. Atıkların yarattığı sorunların giderilmesi için en etkili yöntemler bütünü olan döngüsel ekonomiye geçiş, bir tercih olmaktan çıkıp zorunluluk hâline gelmiştir.

Döngüsel ekonomiye olan ilgi arttıkça, geleneksel mekanik geridönüşümü tamamlayıcı yeni ortaya çıkan geridönüşüm teknolojilerinin uygulamaları hızla yayılmaktadır. Mekanik geridönüşüm, yüksek kaliteli, nispeten temiz ayrıştırılmış atıklarla etkilidir. Herhangi bir film veya başka malzemeyle kaplı olmayan camlar eritilerek kayıpsız olarak yeniden cam hammaddesi hâline getirebilir. Kompozit olmayan metaller kompres makinesinden geçirilip eritilerek ekonomiye yeniden kazandırılabilir; polimer içermeyen kâğıtlar ise su bazlı işlemlerle yeniden kâğıt yapımında kullanılabilirler. Mekanik geridönüşüm faaliyetleri 2022 yılı sonunda 60 milyar doların üzerine çıkması beklenen^[5] küresel geridönüşüm hizmetlerinin başlıca operasyon tipidir.

Ancak mekanik geridönüşüm sınırlı tipte ve kalitede atıkların yeniden kazanımında uygulanabilmektedir. Bilhassa doğada çözünmesi yüzyıllar alan plastikte uygulanabilirliği kısıtlıdır. Bu nedenle mekanik geridönüşümün yeni geridönüşüm yöntemleri ile desteklenmesi gerekmektedir. Günümüzde çeşitli malzemelere göre mekanik geridönüşümü destekleyecek yeni yöntemler geliştirilmekte ve bunlardan bazıları uygulamaya geçmektedir. Bu bölümde söz konusu yöntemlerden bazıları ele alınacaktır.

2.1 Plastik Geridönüşümünde Yeni Yöntemler

Sentetik polimerler ya da yaygın bilinen adıyla plastikler, doğanın sindiremediği, üretim ve bertaraf işlemleri sırasında çevreye ciddi zararlar veren maddelerdir. İlk kez 1907'de üretilen^[6] ve İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra yaygınlık kazanmaya başlayan sentetik polimerler hâlâ aramızdadır ve bazıları binlerce yıl^[7] bizimle olmayı sürdürecektir. Yapılan bir araştırmaya göre 1950'den beri üretilen plastik miktarı 10 milyar tona ulaşmış olup, önlem alınmazsa bu miktar 2050 yılında 34 milyar tona ulaşacaktır^[8]. Önlem alınması zorunludur, zira sentetik polimerler zamanla mikroskobik parçalara ayrılmakta, ancak kaybolmamaktadır. Bu minik parçalar okyanusta veya karada besin maddelerine ve suya karışıp canlıların bedenlerine girerek sağlığı olumsuz etkilemektedir^[9].

Bu kötüye gidişi durdurmak için bir yandan plastik üretimi azaltılmalı, öte yandan ise var olan plastiklerin geridönüşümü sağlanmalıdır. Plastik üretimini azaltmanın yöntemleri arasında doğada kısa sürede çözünebilir biyoplastik üretimini artırmak da bulunmaktadır. Var olan plastiklerin geridönüşümünün artırılması için de çeşitli yöntemler gündeme getirilmekte ve denenmektedir.

Dünyada küresel sentetik polimer üretiminin 460 milyon ton civarında olduğu ifade edilmektedir. OECD'ye göre yıllık plastik çöpü miktarı ise 2019 yılında 350 milyon tonun biraz üzerindedir^[10].

Dünya genelinde plastik geridönüşümü yapılmakla birlikte oranları en gelişmiş ülkelerde bile son derece düşüktür. OECD'nin bir araştırmasına göre küresel plastik atıkların sadece yüzde 9'u geri dönüştürülmekte, yarıya yakını (yüzde 49) ise çöplüklerde işlenmeden depolanmaktadır^[11]. Geri kalan plastik atıkları ise tehlikeli biçimde ya toplanmadan doğaya terk edilmekte (yüzde 22), dolayısıyla gıda ve sulara zehirli maddelerin karışmasına neden olmakta veya daha da tehlikelisi, yakılarak (yüzde 19) atmosfere zehirli gazların yayılmasına yol açmaktadır. Plastiğin geridönüşüm oranı bu konuda hassasiyeti ile bilinen Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde yüzde 14'e çıkarken, Ortadoğu ve Kuzey Afrika'da bu oran yüzde 5'e kadar gerilemektedir^[10]. Dolayısıyla plastiğin geridönüşüm oranını, çevreye zarar vermeden ve daha fazla sera gazı salımına yol açmadan artırmak iklim değişikliğine karşı mücadelede stratejik önem taşımaktadır.

2.1.1 Pirolizin Avantaj ve Dezavantajları

Dünyada plastik atıkların yaklaşık beşte biri yakılarak yok edilmeye çalışılmakta, bu da geri dönülmez çevresel zararlara yol açmaktadır. Bu yöntem yerine odun kömürü üretiminde kullanılan piroliz yöntemi önerilmektedir. Piroliz, plastik atıkların farklı sıcaklıklarda (300-900 °C), oksijensiz olarak yakılarak sıvı ve gaz yakıt hâline getirilmesi işlemidir. Piroliz işlemi oldukça basittir: Plastik atıklar oksijensiz veya düşük oksijenli ortamda bir tava üzerinde ısıtılır ve bir hidrokarbon karışımına dönüştürülür. Düşük ve yüksek ısı kullanarak işlemi hızlandırmak veya yavaşlatmak mümkündür. Pirolizde polimer kompozitler dahil olmak üzere plastik atıkların tasnif edilmesi, yıkanması veya harmanlanması gerekmektedir. Piroliz ile elde edilen hidrokarbonları hem akaryakıt hem de yeniden plastik hammaddesi olarak kullanmak mümkündür.

Bu avantajları dünyanın belli başlı kimya ve petrokimya şirketlerini piroliz yöntemine yatırım yapmaya yöneltmiş, "plastikten yakıt" geridönüşüm yükselen bir pazar hâline gelmiştir. Tahminlere göre küresel plastikten yakıt pazarı 2020 yılında 231 milyon dolara ulaşmıştır, ancak 2028 yılına kadar bu pazarın her yıl yaklaşık yüzde 29 büyümesi beklenmektedir^[12].

Ancak piroliz yöntemi, yakılarak imhaya alternatif ekonomik bir yöntem olmakla birlikte iklim değişikliği ile mücadeleye katkısı sınırlıdır. Birincisi piroliz yönteminde çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmakta ve dolayısıyla atmosfere karbondioksit salımı olmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre geri dönüştürülen plastiklerin her kilogramı için 3 kilogramdan fazla karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır^[13]. İkincisi piroliz ile elde edilen çıktılardan büyük bölümü, yüksek oranda sülfür içerdiği için yeniden plastik üretiminde değil, dizel gibi akaryakıt üretiminde kullanılmaktadır ki bunun da küresel ısınmaya doğrudan etkisi bulunmaktadır. Ayrıca PVC gibi plastik malzemelerin pirolizinde zehirli gazlar ortaya çıkmaktadır^[14].

2.1.2 Glikoliz ile PET Dönüşümü

AB, plastik geridönüşümünde sürdürülebilir çözümler geliştirmek için, hidroliz, glikoliz, alkoliz, metanoliz dahil olmak üzere çok sayıda kimyasal yöntemin denendiği projeye destek vermektedir. Bunlardan biri olan ChemPET, glikoliz adı verilerin tüm canlı metabolizmalarındaki bir kimyasal tepkimeyi taklit ederek PET plastiklerini yüksek saflıkta geri dönüştürmeyi amaçlamaktadır. İtalyan Garbo firması tarafından yürütülen projede yüksek saflık oranına erişildiği belirtilmektedir. Firmaya göre yeni yöntem ile petrol ürünü kullanmadan PET üretmek ve yeniden kullanmak mümkün olabilecektir. Firma ilk fabrikasını İtalya’da açmaya hazırlanmaktadır^[15]. Kimyasal glikoliz yöntemiyle PET geridönüşümüne ilişkin olarak ABD ve Avrupa’nın diğer ülkelerinde de çalışmalar bulunmaktadır^[16]. Bu yöntem özellikle tek kullanımlık poşet ve içecek şişelerinin yapımında kullanılan ve plastik atıkların yaklaşık üçte birini^[17] oluşturan PET plastiklerin geridönüşümünü düşük çevresel etki ile sağladığı için önemlidir. Ancak diğer plastik türlerine uygulanması şimdilik mümkün görünmeyen ve alternatiflerine kıyasla yüksek maliyetli olan bu yöntemin yaygınlık kazanması kuşkuludur.

2.1.3 Solvent İle Polipropilen (PP) Geridönüşümü

Otomotiv sanayiinde kullanılan parçalardan, tekstil ve gıda paketlemesine kadar geniş kullanım alanı bulunan Polipropilen (PP), dünyada en çok kullanılan ikinci sentetik polimer türü olmasına rağmen şu anda sadece yüzde 1’i geri dönüştürülmektedir^[17].

Sert, opak ve sağlam bir malzeme olan PP’nin geridönüşümü için kimyasal çözücü (solvent) kullanılması üzerinde çalışmalar ümit verici noktaya gelmiştir. ABD merkezli Procter & Gamble (P&G), PureCycle teknolojisinin patentini almıştır. Bu teknolojiye, ne olduğu ticari sır olarak korunan bir solvent, rüzgâr veya güneş enerjisinden elde edildiği belirtilen elektrik yardımıyla, zehirli gaz çıkışına izin vermeden PP atıklarını, renk, koku ve kirleticilerden arındırarak saf reçine hâline getirmektedir. İlk PureCycle tesisinin yaklaşık 55 bin ton polipropileni saflaştırması beklenmektedir^[18]. Küresel PP üretimi ise yıllık yaklaşık 75 milyon ton^[19] seviyesindedir. Dolayısıyla dünyanın çok daha fazla PP geridönüşümü kapasitesine ihtiyacı vardır. Dünya genelinde 25 PureCycle tesis kurmayı hedefleyen P&G, çeşitli ülkelerde şirketlerle ortak tesis kurmak üzere de anlaşmalara varmıştır^[20].

2.1.4 Plastiklere Biyolojik Dönüşüm

Plastiklerin fiziksel veya kimyasal yöntemler yerine biyolojik yöntemlerle geridönüşümünün sağlanması için araştırmaları uzun süredir devam etmekte ve çeşitli bakterilerle yapılan denemelerde başarı kazandığı dünya kamuoyuna yansımaktadır^[16].

Yakın dönemde yine AB destekli bir Fransız firmasının geliştirdiği yöntem dünyada büyük yankı uyandırmıştır. Carbios firmasının geliştirdiği yöntemde bir enzim ile PET türü plastik atıklarının biyolojik geridönüşüm

sürecinin 24 saate kadar düşürüldüğü ve yüzde 97 oranında geridönüşüm elde edildiği kaydedilmektedir^[21]. Carbios, Fransa’da 50 bin tonluk bir biyolojik plastik geridönüşüm tesisi kurmuştur^[22].

2.2 Elektronik Atıkların Geridönüşümü

Teknolojik ürünlerin çeşidi arttıkça ve kullanımı yoğunlaştıkça elektronik atıklar dünya genelinde büyük sorun oluşturmaya başlamıştır. Küresel olarak yılda 50 milyon tonu aşan elektronik atıkların sadece beşte birinden azı geri dönüştürülebilmektedir^[23].

Elektronik atıkların geridönüşümü, ciddi çevre kirliliğinin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Çoğu elektronik ürün, plastiğin yanı sıra kurşun, kadmiyum ve civa gibi ağır toksik maddeler içerir ve elektronik atıklar yakıldığında toksinler atmosfere, toprağa ve suya karışabilir. Bu toksinler besin zincirinde biyolojik olarak birikebilir ve bu sadece doğal yaşamı değil sağlığımızı da olumsuz yönde etkileyebilir.

Üzerindeki nadir ve değerli malzemeler nedeniyle elektronik cihazların geridönüşümü ekonomik açıdan da büyük önem taşımaktadır. Örneğin 1.000 adet akıllı telefonun geridönüşümünden 2,5 kg alüminyum, 1,5 kg bakır, 34 gram altın, 340 gram gümüş ve 15 gram paladyum ile 1 gram platin elde etmek mümkündür^[24]. Eylül 2022 itibarıyla 6,64 milyar akıllı telefonun kullanımında olduğu^[25] dikkate alınırsa, bu cihazların geridönüşümünün ne kadar önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır.

Elektronik atıkların geleneksel geri dönüştürme yöntemi değerli parçaların sökülerek alındığı mekanik ayırma ardından kalan plastiklerin yakılması veya kimyasal çözeltilerle geri dönüştürülmesi şeklinde olmaktadır. Bu yöntem emek yoğunudur ve bu nedenle gelişmiş ülkeler çoğunlukla bu işlemi elektronik atıkları üçüncü dünya ülkelerine “ihraç ederek” yaptırmaktadır. Ancak Çin’in 2017 yılında yurtdışından atık ithalini yasaklaması dengeleri değiştirmiş^[26], gelişmiş ekonomileri yeni ve ekonomik atık geridönüşüm yöntemlerini geliştirmeye yönlendirmiştir.

Elektronik atıkların geridönüşümünde verimi artırmak ve ölçek ekonomisine ulaşarak maliyetleri düşürmek için üçüncü bölümde örnekleri verilen yeni malzemeler ve dördüncü bölümde özetlenen bazı araç ve sistemler geliştirilmiştir. Ancak gelişmiş ülkelerde elektronik atık sorununu çözmek için öncelikle atık miktarını azaltıcı önlemlere başvurulmaktadır.

2.2.1 Güvenli Bilişim Varlıklarını Elden Çıkarma Hizmetleri

Gelişmiş ülkelerde elektronik atıkların azaltılması için teşvik edilen yöntemlerden biri “Güvenli Bilişim Teknolojileri Varlıklarının Elden Çıkarılması”dır (Secure IT Assets Disposition -SITAD). Bu hizmeti sağlayan şirketler kişi ve kuruluşlardan aldıkları bilgi teknolojileri cihazlarını üzerindeki kişisel verileri tamamen yok ettikten sonra gerekli parça değişimleri ve yazılım güncellemelerinin ardından yeniden kullanılabilir hâle getirmektedirler. Bu tür hizmetler Türkiye’de de başlamıştır.

2.2.2 Dijital Pasaport ve Dijital İkiz

Döngüsel ekonominin oluşturulması için üzerinde durulan yöntemler arasında, özellikle üretimi, kullanımı, geridönüşümü veya bertarafında yüksek sera gazı emisyonu ortaya çıkan ürünlerin “dijital pasaportunun” çıkarılması bulunmaktadır. 2050 yılına kadar karbon nötr olma hedefi belirleyen AB'nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'nda yer alan Sürdürülebilir Ürünler Girişimi, tüketici elektroniği, bilişim ve iletişim teknolojileri, hazır giyim, mobilya, çelik, çimento ve kimya sektörlerinin ürünlerine dijital pasaport zorunluluğunu öngörmektedir. Söz konusu sektörlerin ürünlerine entegre edilecek dijital ürün pasaportu, bu ürünün nasıl üretildiğini, hangi malzemelerin kullanıldığını, nasıl tamir edileceğini veya nasıl geri dönüştürüleceğini bilmediğimiz için çoğu zaman atık hâline gelen ürün ve malzemelerin değerlerini koruyabilmek amacıyla standart bilgileri kapsayacaktır^[27]. Bu şekilde toplanan ve sunulan veriler, ürünlerin döngüsel tasarımını destekleyecek, yeniden kullanılma ve ömürlerinin sonunda uygun şekilde geri dönüştürülme şansını artıracaktır. Dahası dijital pasaport, kullanıcılara, olası yeniden kullanım seçeneklerine veya ürünü nasıl elden çıkarmaları gerektiğine dair doğru yönlendirmeler sunacak ve ürünlerin tedarik zincirleri hakkında daha fazla bilgi vermesini sağlayacaktır. Dijital pasaportların sürdürülebilir ürünleri teşvik etmesi, ekonomik aktörler arasında yeni iş fırsatları sunması, tüketicilerin sürdürülebilir seçimler yapmasına yardımcı olması, ilgililerin yasal yükümlülüklerine uygunluğu doğrulamasını sağlaması ve döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırması beklenmektedir.

Herhangi bir nesnenin, cihazın, hizmetin fiziksel olarak yapılmadan dahi dijital ortamda bire bir kopyasının çıkarılması olan dijital ikiz teknolojisi^[28] ise ürün ve sistemlerin ömrünü uzattığı için elektronik ve bilişim teknolojileri alanında bir önleyici çözüm olarak ilgi görmektedir. Dijital ikizler, elektronik ürün ve bilgi işlem teknolojileri sistemlerinin gerçek zamanlı olarak takibini sağlamakta, bunların uzun süre devre dışı kalmalarına, yüksek maliyetli onarımına veya tümüyle kullanılmaz hâle gelmelerine neden olabilecek olası sorunları önceden haber vererek önlem alınmasına imkân tanımaktadır.

2.3 Lityum İyon Bataryalarının Geridönüşümü

Enerji depolama cihazları olarak lityum iyon bataryaları içeren elektrikli araçların geliştirilmesiyle, tüm endüstride lityum iyon pillere olan talep artmaktadır. Tahminlere göre 2022 yılı sonunda dünyadaki tüm lityum iyon bataryalarının toplam kapasitesi 500 gigavattı aşacaktır. Ancak asıl büyüme kapıdadır: 2020-2030 yılları arasında lityum iyon bataryalarının toplam kapasitesinin 10 kat artarak 2.700 gigavattın üzerine çıkması beklenmektedir^[29].

Mevcut ticari lityum iyon bataryalar, geçiş metalleri oksitleri veya fosfatları, alüminyum, bakır, grafit, zararlı lityum tuzlarının yanı sıra organik elektrolitler ve diğer kimyasalları içermektedir^[30]. Bu nedenle, kullanılmış lityum iyon pillerin geridönüşümü ve yeniden kullanımı katı düzenlemelere tabi tutulmazsa, çevre ve doğal kaynaklar üzerinde ciddi olumsuz etkileri olacaktır. Ancak,

lityum iyon pillerin enerji yoğunluğu yüksektir ve çok sayıda türü bulunmaktadır. Bu farklılıklar atık lityum iyon pillerin geridönüşümünü zorlaştırmaktadır^[31].

Lityum pillerin geridönüşüm maliyeti çok yüksektir. On yıllardır uygulamada olan geleneksel yöntem **pirometalurjidir**. Bu yöntemde batarya parçalara ayrılıp malzeme yoğun ısıyla yakılıp eritilmektedir. Basit ve hızlı bir yöntem olmasına rağmen kobalt elde etmeye yöneliktir. İşlem sırasında lityum ve manganez büyük ölçüde yok olmaktadır. Üstelik yüksek enerji harcanan bu işlem sırasında zehirli gazlar ortaya çıkmaktadır^[31].

Lityum iyon bataryaların geridönüşümü için geliştirilen bir diğer yöntem ise **hidrometalurjidir**^[32]. Bu yöntemde bataryaların malzemeleri su ve kimyasallarla işlemde geçirilerek geri dönüştürülmektedir ve bataryaların değerli metalleri oldukça saf şekilde geri kazanılmaktadır. Üstelik zehirli gaz çıkışı olmamakta ve düşük düzeyde enerji harcanmaktadır. Ancak pirometalurjik yöntemde göre daha uzun bir işlem süresi olup, atık suların temizlenmesi sorun oluşturmaktadır.

Lityum iyon bataryalarının geridönüşümü için biyolojik süreçler üzerinde de çalışılmıştır. **Biyoliç** adı verilen biyolojik işlemde, bataryaların üzerindeki metaller, mikroorganizmaların aktiviteleri ile üretilen organik ve inorganik asitler kullanılarak çözülmektedir. Süreç nispeten düşük enerji sarfiyatı gerektirmektedir, üstelik çevre dostu ve az maliyetlidir. Ancak uygulamada uzun reaksiyon süresi, düşük kinetik hızı, verimliliğin stabil olmaması ve mikroorganizmaların yetiştirilmesi gibi bazı sıkıntılar nedeniyle biyoliç, deneysel bazda kalmış ve ticarileşmemiştir^[32].

Bu nedenle bilim insanları lityum iyon bataryalar için **doğrudan fiziki geridönüşüm işlemi** önermektedir. Doğrudan geri kazanım, kimyasal yöntemler kullanmadan kullanılmış bataryalardan faydalı bileşenlerin geri kazanılması işlemidir. Bataryalar önce boşaltılmakta ve binlerce hücreye ayrılmaktadır. Sıcaklık ve basınç düşürüldükten sonra, CO₂ elektrolitten ayrıştırılmakta ve elektrolit yeniden üretilmektedir. Hücreler daha sonra demonte edilmekte, kırılmakta ve sıralanmaktadır. Son olarak, katot malzemesi toplanmakta ve yeniden kullanılmaktadır. Doğrudan fiziksel geri kazanım teknolojisi, kısa operasyon süresi, düşük enerji tüketimi, çevre dostu olması ve yüksek geri kazanım oranına sahip olması gibi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş malzemenin yeni malzemenin uzun vadede özelliklerini koruyup korumayacağı açık değildir. Bu yöntem çevreyi en az etkileyecek en yüksek kazanımlı yöntem olmakla birlikte uzun bir süreçtir ve maliyetleri yüksektir^[31].

2.4 Tekstil Atıklarının Geridönüşümü

Son 10 yılda üretimini ikiye katlayan tekstil, yaklaşık bir trilyon dolarlık büyüklüğü ile dünyanın en büyük ve en yaygın sektörlerinden biridir^[33]. Hazır giyim ve aksesuarlar tekstil sektörünün üçte ikisini oluşturmakla birlikte teknik tekstil ve ev tekstili üretimi de hızla büyümektedir. Dünya genelinde yaklaşık 80 milyar kalem tekstil ürünü üretildiği tahmin edilmektedir^[34]. Tekstilin ana hammadde pamuk olmakla birlikte sentetik polimer bazlı elyaf ve ipliklerin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca



tekstil endüstrisinde, boyalar, ağır metaller, çözücüler ve yüzey aktif maddeler dahil olmak üzere çok sayıda kimyasal, giysi ve diğer ürünleri üretmek için kullanılmaktadır. Bu kimyasalların varlığı, tahliye edilen katı atıkları ve atık suları toksik hâle getirmektedir.

Artan sentetik polimer ve çeşitli toksik madde kullanımının yanı sıra tekstil geridönüşümünü önemli hâle getiren bir diğer unsur da kıyafetlerin ömrünün kısalmasıdır. 10 yıl önceye kıyasla, giysilerin atılmadan önce giyilme süresinin yaklaşık yüzde 40 oranında kıaldığı tahmin edilmektedir^[35]. Tahminlere göre dünya genelinde her yıl 92 milyon ton tekstil atığı ortaya çıkmaktadır. Bu eğilim sürerse 2030 yılında küresel tekstil çöpü miktarı 134 milyon tona çıkacaktır^[36]. Tekstil sektörünün doğaya zararı bununla da kalmamaktadır: Sektör, küresel sera gazı salımının yüzde 10'undan^[37] ve küresel atık sularının yüzde 20'sinden sorumludur^[38].

Plastikte olduğu gibi tekstil atıklarının üçte ikisi ya yakılmakta ya da çöp sahasına gömülmektedir. Geridönüşüm için toplananların önemli bir bölümü mekanik yöntemlerle işlem gördükten sonra ev tekstilinde dolgu malzemesi olarak veya yalıtım ve temizlik bezleri olarak kullanılmaktadır. Toplananın yüzde 1'inden azı yeni kıyafet yapımında kullanılmaktadır^[35]. Bu durum çevreyi kirlettiği gibi tekstil sektörünün sürdürülebilirliğine zarar vermektedir. Tekstil atıklarının geridönüşümünün sağlanması hâlinde küresel ekonomiye yılda 560 milyar dolar ek katkı sağlanabileceği belirtilmektedir^[39].

Hâlen tekstil geridönüşümünde iki yöntem kullanılmaktadır: **Mekanik** ve **kimyasal** geridönüşüm. Mekanik geridönüşüm tekniğinde kumaş; kesme, parçalama,

hallaçlama ve diğer mekanik işlemlerle liflere ayrılır. Mekanik geridönüşüm makineleri, kumaşı kademeli olarak küçük parçalara bölerek lifli hâle getirir ve elde edilen bu lifler, iplik veya dokusuz kumaş üretiminde yeniden kullanılır^[40]. Bu yöntem düşük maliyetli olmakla birlikte, iplere ve dokumalara zarar vermekte ve elde edilen ürün düşük kaliteli olmaktadır^[41]. Ayrıca sentetik polimer içeren tekstil ürünlerini mekanik olarak ayırmak güçtür. Söz konusu kumaşlar için kimyasal geridönüşüm uygulanmaktadır. Bu yöntemde polimer içeren tekstil atıkları, çeşitli kimyasallar kullanılarak çözülmekte ve yeniden ip yapımında kullanılacak lifler veya polimer reçinesi ya da yapıştırıcı yapımında kullanılacak malzemeler üretilmektedir^[42].

Son yıllarda tekstil ürünlerinin geridönüşümünün artırılması için çeşitli yöntemler üzerinde durulmaktadır.

2.4.1 Kumaştan Biyogaz Üretimi

Bitkisel ve hayvansal atıklarda olduğu gibi kumaş atıklarının geridönüşümünde **anaerobik sindirim yöntemi** ile biyogaz üretimi ön plana çıkmaktadır. Pamuk anızları, küspeleri, tıbbi pamuk atıkları ve pamuklu tekstil ürünleri de bu yöntemle biyogaza dönüştürülebilmektedir. Bu yöntemde atıklar oksijensiz ortamda yaşayabilen anaerobik bakteriler tarafından çözülmekte ve biyogaz elde edilmektedir. Kot pantolonlar gibi polyester de içeren pamuklu giysiler de öncesinde işlem gördükten sonra biyogaz üretiminde kullanılabilir. Ancak biyogazın iklim değişikliğine karşı etkin bir çözüm olduğu tartışmalıdır. Biyogaz üretimi, özellikle hayvancılık faaliyetlerinden ortaya çıkan metan gibi tehlikeli gazın atmosfere

karışmasını ve doğalgaz ihtiyacını azalttığı için etkin bir yöntem olarak görülmektedir. Ancak biyogaz kullanımını da en az doğalgaz kadar karbondioksit salımına yol açmaktadır^[43].

2.4.2 Tekstilden Tekstil Geridönüşümü İçin Yeni Atımlar

Tekstil atıklarından biyogaz ve fermantasyon yoluyla biyoetilen üretimi^[44] geri dönüştürülmeyecek pamuk veya tekstil atıklarının enerji malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak tekstil geridönüşümünün döngüsel hâle gelmesi için düşük kaliteli tekstil atıklarından kaliteli kumaş elde edilmesi gereklidir. Böylece tekstil sektörünün hammaddelere daha az bağımlı hâle gelmesi hedeflenmelidir.

Hâlen mekanik geridönüşüm tekniği ile tekstil ürünleri elyaf ve ipliğe dönüştürülmekle birlikte, elde edilen ürünler genellikle düşük kaliteli kalmaktadır. İpek, yün^[45] veya gerçek deri^[46] gibi değerli tekstil hammaddelerinin mekanik geridönüşümünde ilerleme sağlanmıştır. Örneğin İngiltere merkezli Worn Again firması, hem doğal elyaf (pamuklu) hem de sentetik (polyester) tekstil ürünlerini kimyasal yöntemle geri kazanmaktadır. Bu sistemde, tekstil atıklarının tamamı (kullanılmış veya satılmamış tekstil ürünleri, tekstil üretiminde çıkan atıklar vb.) çeşitli mekanik işlemlerin ardından kimyasal işlemlerden geçirilmektedir. Doğal elyaf malzemeler daha sonra selüloz, sentetik atıklar ise PET reçinesi hâline getirilmekte, bu iki madde doğal ve sentetik katkı maddeleriyle birlikte yeniden iplik hâline getirilmekte ve üretime yeniden kazandırılmaktadır^[47]. Worn Again uluslararası tekstil endüstrisinden destek görmektedir. Şirket ilk geridönüşüm tesisini kurmak için harekete geçmiştir^[48].

İsveçli Renewcell de atık doğal elyafın kimyasal yöntemle doğada çözünebilir sentetik tekstil hammaddesi hâline getirecek bir geridönüşüm sistemi geliştirmiştir. Bu sistemde pamuk atıkları ve kullanılmış pamuklu kumaşlar kimyasal yöntemle boya gibi kirleticilerden arındırılarak "circulose" adı verilen bir selüloz hamuruna dönüştürmektedir. Bu hamur daha sonra doğada çözünebilir viskon ve liyosel gibi sentetik kumaşlar hâline getirilebilmektedir^[49].

2.4.3 Tekstil Atıklarından Plastik ve İnşaat Malzemesi Üretimi

Sentetik iplik ve elyaf kullanılan tekstil ürünleri atıklarının plastik hammaddesine dönüştürülmesine de başlanmıştır. Fransa merkezli Carbois, enzimler kullanarak, sentetik tekstil atıklarını kullanarak "yüzde 100 geri dönüştürülmüş Saflaştırılmış Tereftalik Asit (rPTA) içeren ilk plastik şişeyi ürettiğini" duyurmuştur^[50].

Tekstil atıklarının yapı sektöründe kullanılacak şekilde geridönüşümü için de çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin tekstil atıklarından ses ve sıcaklık izolasyonu sağlayan kaplama malzemeleri üretilmekte^[51] ve bu atıklar beton takviye malzemesi olarak kullanılabilir^[52]. Örneğin Fransa'da bir firma tekstil atıklarının organik bir yapıştırıcı ile sıkıştırılması sonucu FabBrick adını verdiği sert ve izolasyon kabiliyeti yüksek bir kaplama

malzemesi geliştirmiştir^[53]. Lifli halı atıklarının yapıların zeminlerini güçlendirmek için kullanılması da gündemdedir^[54]. Ayrıca tekstil atıkları Tekstil Takviyeli Beton (TTB) yapımında kullanılmaktadır. TTB yeni bir yapı malzemesidir ve son yıllarda cephe sistemleri, sandviç panel ve dış mekân mobilyaları gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Genel olarak TTB, yüksek performanslı cam elyafı ve karbon gibi malzemelerden elde edilen ince tel hâlindeki ipliklerle dokunmuş yüzeyler üzerine beton uygulanmasıyla elde edilmektedir. Bu uygulama betonu, kırılma, çatlama ve korozyona karşı daha dirençli hâle getirmektedir. Bu ince tellerin farklı polimerlerle kaplanması, TTB'nin dayanıklılığını bir kat daha artırmaktadır^[55]. Ayrıca düşük kaliteli yünden yapıyalıtım malzemeleri üretilmektedir.

2.5 Organik Atıkların Geridönüşümü

Bitki ve hayvan kaynaklı atıklara "organik atık" adı verilmektedir. Evlerden ve işyerlerinden toplanarak çöp alanlarına taşınan atıkların önemli bir bölümü organik atıklardır. Organik atıklar, doğada mikroorganizmalar yardımıyla bozularak temel bileşenlerine ayrılır^[56]. Ancak doğada çözünür olması organik atıkların çevreye etkisi olmadığı anlamına gelmemektedir. Organik atıklar, özellikle gıda kayıpları ve atıkları, önemli ölçüde sera gazı üretimi ile iklim değişikliğinin nedenleri arasında bulunmaktadır. Gıdanın üretimi, nakliyesi ve işlenmesinde önemli ölçüde karbondioksit salımı olmaktadır. Ayrıca çöpe atılan organik atıklar, son derece zehirli bir sera gazı olan metan salımına neden olmaktadır.

Tahminlere göre günümüzde üretilen gıdaların üçte birinin sonu çöplük olmaktadır^[57]. Bir başka deyişle yaklaşık 1,3 milyar ton meyve-sebze, et, süt ürünleri, deniz ürünleri, tahıllar ya daha üretim yerinde (tarla, bahçe, ahır vb.) kalmakta ya dağıtımda kaybedilmekte ya da son tüketim noktasında (restoran, market, evler vb.) çöpe atılmaktadır^[58]. Sadece gıda kayıplarına son verilmesinin sera gazı emisyonunu yüzde 6 ila yüzde 8 oranında azaltabileceği belirtilmektedir^[58].

Gıda kaybını ve gıda israfını geniş ölçekte önlemek, büyük miktarlardaki çevresel zararı ve biyolojik çeşitlilik kaybını dengeleyecek ve gıda güvenliğinden yoksun nüfuslar için gıdaya erişilebilirliği artıracaktır. Gıda üretim, dağıtım ve tüketim sistemlerinin döngüsel hâle getirilmesi ise gezegenimizin kaynaklarının sürdürülebilir olarak kullanımına imkân tanıyacaktır.

Organik atıkların geridönüşümünde öncelikle gıdaların çöpe gitmesinin engellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla düzenlenen bilinçlendirme kampanyalarının yanı sıra çeşitli mekanizmalar üzerinde durulmaktadır. Pek çok ülkede oteller, süpermarket, restoran ve diğer perakende gıda noktalarından ihtiyaç fazlası, tüketilmemiş veya son kullanma tarihi geçmiş ürünlerin yeniden kazanılması için sivil inisiyatifler ve dijital platformlar oluşturulmaktadır. Örneğin Hollanda merkezli Instock platformu^[59], satıcılar için artık ekonomik değeri bulunmayan gıdaları alarak gıda kurtarma merkezinde ayrıştırdıktan sonra bunları başka gıda ve içeceklere dönüştürebilecek firmalara göndermektedir.

Fransa’da kurulan Organix firması^[60] ise, organik atık üreticileri (perakendeciler, tarım kooperatifleri vb.) ile atıkları biyoyakıtlara dönüştüren şirketler arasında bağlantı kuran bir platformdur. Organik atıkların ekonomiye kazandırılması için de çeşitli yöntemler üzerinde durulmaktadır.

2.5.1 Bitki Atıklarından İnşaat, Seramik ve Cam Malzemeleri Üretimi

Betonu korozyon ve çatlaklardan korumak amacıyla yapılan araştırmalarda havuç ve turp gibi kök sebzeler bilim insanlarının radarına girmiştir. İngiltere’nin Lancaster Üniversitesi bilim insanları, pancar ve havuçtan elde edilen minik “nano boyutlu” trombositlerin eklenmesinin, betonu güçlendiren ürün olan kalsiyum silikat hidrat miktarını artırarak daha güçlü bir karışım oluşturduğunu tespit etmiştir^[61]. Araştırmacılara göre bitkisel özlü trombositler, grafen ve karbon nanotüplerden daha güçlüdür ve üstelik bu sayede çok daha ucuza beton elde edilebilir.

Pirinç kabuklarının yakılmasından elde edilen pirinç kabuğu külleri de, yoğun silika içeriği ile inşaat ve seramik malzemesi olarak kullanabilmektedir. Çin, Hindistan, ABD ve Brezilya gibi ülkelerde, işlenen pirinçlerin kabukları genellikle yakılarak enerji elde etmekte kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar yakımdan sonra ortaya çıkan pirinç kabuğu küllerinin seramik, cam, çimento, yalıtkanlar, refrakter tuğlalar ve emici malzemelerde kullanılabileceğini ortaya çıkarmıştır. Araştırmalara göre pirinç kabuğu külü, ateşe dayanıklıdır, su geçirmez ve elektrik iletmez ve çok hafiftir. Bu nedenle çimento ve seramik harcına katılarak, daha güçlü beton veya refrakter seramik elde etmek mümkündür^[62].

2.5.2 Sebze ve Meyvelerin Yenmeyen Kısımlarından İlaç Yapımı

Bazı meyve sebzelerin yenmeyen kabukları, çekirdekleri, tohumları, posaları ve yaprakları ilaç endüstrisi açısından önem taşımaktadır. Söz konusu atıklar genellikle biyoaktif fitokimyasallar üretmektedir ve bunlar çeşitli hastalıkların tedavilerinde kullanılan ilaçların üretiminde kullanılmaktadır^[63]. Örneğin Avustralya’da araştırmacılar meyve suyu üretiminde kullanılan portakalların atık kabuklarından kanser önleyici takviye ilaçları üretmektedir^[64]. Bitki atıklarından elde edilen biyoaktif fitokimyasallar aynı zamanda gıda koruma maddeleri ve kozmetik üretiminde de kullanılmaktadır.

2.5.3 Organik Atıkların Gübre ve Biyoplastik Üretiminde Kullanımı

Organik atıkların geridönüşümünde yeterince olgunluğa ulaşmış kimyasal yöntemler de bulunmaktadır. Organik atıkların kimyasal ve biyolojik süreçlere tabi tutularak doğal gübre üretilmesi yıllardır yapılmaktadır. Organik atıklardan kompost gübre yapımı dünyada 2021 yılında 6 milyar doları aşan bir pazar büyüklüğüne ulaşmıştır^[65].

Organik atıkların geridönüşümünde ümit vadeden bir başka yöntem ise biyoplastik üretimidir. Doğada çözülebilen bir çeşit yapay polimer olan biyoplastik malzemelerin üretiminde gerek duyulan hammaddelerin büyük

bir kısmı, gıda endüstrisinin atık ve yan ürünlerinde bol miktarda bulunmaktadır. Dolayısıyla, biyoplastik üretimindeki rolleri, sürdürülebilirliği ve kâr sağlamayı teşvik eden döngüsel bir ekonominin gelişimi için hayati önem taşımaktadır.

Organik atıklardan biyoplastik üretimi konusunda aralarında Türkiye’nin de bulunduğu pek çok ülkede deneysel çalışmalar yürütülmektedir^[66]. ABD’de kurulan bir start-up şirketi ise hem organik atıkları hem de kullanılmış biyoplastikleri yeniden biyoplastiğe çevirdiğini bildirmektedir^[67].

2.6 Yüzde 100 Geri Dönüştürülebilir Yapılara Doğru

İnşaat faaliyetleri iklim ve çevre yönünden olumsuz sonuçlar doğuran sektörlerin başında gelmektedir. Yapı malzemelerinin üretiminde, yapı malzeme ve teçhizatının taşınmasında, yapı imalatında, yapıların yenilemeleri ve yıkımlarında çevre açısından olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyinin (World Business Council for Sustainable Development -WBCSD) 2018 tarihli bir raporuna göre, inşaat sektörü küresel sera gazı emisyonlarının yüzde 40’ından sorumludur^[68]. İnşaat sektörü ayrıca dünya genelinde katı atıkların yüzde 50’sini üretmektedir^[69]. Bu nedenle dünya genelinde inşaat ve yıkım atık ve molozlarının bertarafı katı kurallarla düzenlenmektedir. Düzenlemeler inşaat ve yıkım atıkları bertarafı işlerinin önemli bir ekonomik faaliyet hâline gelmesine yol açmıştır. Tahminlere göre dünya genelinde inşaat ve yıkım atıkları 2021 yılında 32,6 milyar dolara ulaşmıştır. Bu pazarın 2030 yılına kadar yılda ortalama yüzde 6,1 büyüyerek 55,54 milyar dolara ulaşması beklenmektedir^[69]. İnşaat atıkları ve molozları, içerdiği kum, çakıl, ahşap (kontraplak dahil), alçı, demir-çelik, diğer metaller ve plastik gibi ekonomiye yeniden kazandırılabilir malzemelerden oluşmaktadır. Ayrıca pek çok ülkede beton geridönüşüm makineleri geliştirilmiştir ve bunlar betondan kum, çakıl ve demiri kalitelerini kaybetmeden ayırarak ekonomiye yeniden kazandırmaktadır^[70].

Ancak tahminlere göre dünyada inşaat ve yıkım atıklarının sadece yüzde 19’u ekonomiye kazandırılmaktadır^[71]. Gerisi ya yakılmakta ya da çöplüklere atılmaktadır. İnşaat ve yıkım atıklarının geridönüşümünün sağlanması için bu atıkların yapı malzemesi olarak kullanılması yönünde ilerlemeler kaydedilmektedir. Bölüm 2.4.3’te belirtildiği üzere tekstil atıklarından yapı dış yalıtımı için kaplama malzemeleri üretilmektedir. Organik atıkların doğrudan tuğla üretiminde kullanılması da giderek yaygınlık kazanan bir uygulamadır^[72]. Örneğin StoneCycling, “her metrekaresinde 91 kilogram çöpün kullanıldığı” tuğlalar üretmektedir^[73].

Yapı sektöründe geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı atıkların geri kazanımını hızlandırabilir. Ancak bu tür malzemeler inşaat sektörünü döngüsel hâle getirmektedir. Yapı sektörünün döngüsel hâle getirilmesi için yapıların tümüyle geri dönüştürülmesi gerekmektedir. Bir yapının tümüyle geri dönüştürülebilir olması için ise, doğada çözünmeyen plastikler ve kimyasallardan arındırılması gereklidir. Dolayısıyla geleceğin yapılarının boya, yapıştırıcı, kimyasal izolasyon malzemesi ve her türlü

sunu plastikten arındırılması gerekmektedir. Bunun için de yapıların yüzde 100 geri dönüştürülebilir olacak şekilde yapılması gereklidir. Gelişmiş ülkelerde tümüyle geri dönüştürülmek üzere tasarlanmış binaların sayısı giderek artmaktadır^[74]. Örneğin Hollanda'nın başkenti Amsterdam'da en küçük vidasına kadar yeniden geri dönüştürülebilir malzemenin tasarlanmış büyük bir iş merkezi faaliyete geçmiştir^[74]. Ancak bunlar sınırlı sayıda ve yasal zorlamaların bulunmaması bu alanın gelişmesindeki en önemli engel olarak durmaktadır. Ayrıca binaların sismik hareketlere, kötü hava koşullarına ve şiddetli yağışlara dayanıklılığı konusunda çekinceler sürmektedir.

2.7 Geridönüşümde Otomasyon

Geridönüşüm hâlen emek yoğun bir faaliyettir. Atıkların toplanması, temizlenmesi, sınıflandırılması, depolanması, geridönüşüm tesislerine aktarımı ve buralarda geridönüşüm işlemlerine tabi tutulmasında yüz binlerce kişi çalışmaktadır. Bu sektörde çalışanların sağlığı ve can güvenliği önemli bir meseledir. COVID-19 pandemisi sırasında atık toplama ve bertarafında çalışanlar, zaruri meslek grupları arasında sayılmalarına rağmen, sağlık riskleri güvence altına alınamadığı için çalışamaz hâle gelmişler, bu nedenle dünyanın pek çok kentinde çöp toplama faaliyetleri zaman zaman askıya alınmak zorunda kalmıştır^[75]. Geridönüşüm sektöründe işgücü sıkıntısı olağanüstü durumlar dışında da sorun teşkil etmektedir. Bu kirli olduğu kadar yeknesak işte personel devir hızı hiçbir sektörde olmadığı kadar yüksektir^[76]. Dolayısıyla geridönüşüm sistemlerinin otomasyonu, hem geridönüşümde kayıpların en aza indirgenmesi, hem geri dönüştürülen malzemelerin saflık derecesinin yükseltilmesi, hem de bu sektörde insan işgücü ihtiyacının en aza indirilmesi açısından neredeyse tek çözüm haline gelmiştir.

Gelişmiş ülkelerde geridönüşüm süreçlerinin otomasyonu konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Atıkların toplanmasından işlenmesine kadar her türlü aşamada, pnömatik sistemlerden, robotlardan, nesnelerin internetinden, yapay zekâdan, bilgisayarlı görü ve görüntü işlemeden ve lazerli sistemlerden yararlanılmaktadır.

2.7.1 Otomatik Atık Toplama Sistemleri

Geleneksel atık toplama sistemi çöp konteynerlerine bırakılan atıkların araçlarla toplama merkezi ve çöplüklere bırakılması şeklindedir. Bu son derece verimsiz, pahalı ve sera gazı emisyonu yüksek bir yöntemdir. Son yıllarda yüzde 100 elektrikli^[77] ve hidrojenli^[78] sürücülü veya sürücüsüz^[79] çöp toplama araçları geliştirilmiştir.

Ancak geridönüşüm süreçlerini karbon nötr hâle getirmek ve verimi artırmak için atık toplama araçlarının karbon nötr hâle getirilmesi yeterli değildir. Kullandığı yakıt ne olursa olsun katı atık toplama araçları kent trafiğini olumsuz etkileyebilmekte, aktarma sırasında kayıplar yaşanabilmektedir.

Katı atıkların toplanması sırasında çevre üzerinde en az etkiyi yaratmak ve geridönüşüm verimini artırmak için gelişmiş ülkelerde "Otomatik Katı Atık Toplama

Sistemleri" (Automatic Solid Waste Collection System-AWCS) giderek yaygınlık kazanmaktadır. Pnömatik atık toplama sistemi olarak da adlandırılan bu sistemler, bir bina, toplu konut, iş merkezi ve hatta bir yerleşim genelinde, yeraltına yerleştirilen pnömatik borular ve konveyörlerle atıkları belli bir merkezde toplamaktadır. AWCS, binalara yerleştirilen öğütücülerle katı atıkları çok küçük parçalar hâline getirmekte, bu parçalar belli bir noktaya kadar vakumlu borularla taşınmakta, sonrasında yeraltı taşıma hatlarıyla nihai toplama noktalarına ulaşmaktadır. Bir şehir genelinde AWCS sistemi, Güney Kore'nin "akıllı şehri" Songdo'da kurulmuştur. İslah edilmiş topraklar üzerinde inşaatı 2001 yılından bu yana süren kentte, çöp toplama araçları bulunmamaktadır. Atıklar otomatik olarak ayrılmakta ve geri dönüştürüldüğü, biyoyakıt elde etmek için gömüldüğü veya yakıldığı bir atık işletmesine yeraltına kurulan boru ve tünel sistemleri ile ulaşmaktadır. Hatta birçok konut ve işyerinde atıklar mutfaklara kurulan sistemlerle doğrudan toplanmaktadır^[80]. Üstelik sistemin çalışması için sadece yedi çalışanın yeterli olduğu belirtilmektedir^[81]. AWCS sistemleri dünya genelinde küçük ama canlı bir pazar oluşturmuştur. 2020 yılında 252 milyon dolarlık AWCS pazarı, tahminlere göre 2030 yılına kadar yılda ortalama yüzde 10,7 büyüyerek yarım milyar dolara ulaşacaktır^[82].

Songdo, baştan akıllı bir şehir olarak tasarlanmıştır ve atık toplama sistemi de buna göre geliştirilmiştir. Yeni teknolojilerle mevcut şehirleri geridönüşüm açısından akıllı hâle getirmek de mümkündür. 21'inci yüzyılın çığır açan teknolojilerinin yardımıyla geridönüşüm süreçlerinde önemli ölçüde iyileştirmeler sağlanabilir. Örneğin atık toplama noktaları, sensörler ve bilgisayarlı görü teknolojisi ile otomatik olarak atıkları tanımlayıp ayıracak ve dolduklarında çöp toplama araçlarını uyaracak hâle getirilebilir (Bkz. Bölüm 4).

Atık toplama araçlarının, 5G ve nesnelerin interneti uygulamalarıyla dolu konteynerleri önce alacak şekilde, hem zaman (trafiği dikkate alarak) hem de mesafe olarak en kısa rota planlaması ile hareket etmesi sağlanabilir. Bir hesaba göre, sadece atık toplama sisteminin akıllı hâle getirilmesi Türkiye'de çöp toplama maliyetlerinde yüzde 45'e yakın oranda, bir diğer deyişle 460 milyon dolar tasarruf sağlayabilir^[83].

2.7.2 Tam Otomatik Katı Atık İşleme Tesisleri

COVID-19 pandemisi sırasında çöplerin, özellikle geri dönüştürülebilir katı atıkların yönetiminde yaşanan sıkıntıların yanı sıra Çin'de 2017'de uygulanmaya başlayan ve giderek tüm dünyada standart hâle gelen, geri dönüştürülmüş malzemelerde yüksek saflık oranı zorunluluğu, tam otomatik katı atık ayırma merkezlerine yönelimi artırmıştır.

Çin'in 2017 yılında yürürlüğe giren "Ulusal Kılıç (National Sword)" programı, geri dönüştürülmüş malzemelerde saflık oranını yüzde 90'dan yüzde 99,95'e çıkarmıştır^[84]. Çok daha yüksek saflıkta geri dönüştürülmüş malzemeye ulaşmanın yolu ise katı atık ayırma merkezlerini tam otomatik hâle getirerek, manuel atık tasnifinde hata, kayıp ve kaçakların bertaraf edilmesidir.

Katı atık işleme tesisleri, yapay zekâ, makine öğrenmesi, robotlar ve bilgisayarlı görü teknolojisi ile tümüyle insansız hâle getirebilir, atıklar malzemelerine göre yüzde 100 verimle tasnif edilebilir ve geridönüşüm sürecine çıkarılabilir. Tam otomatik katı atık işleme merkezleri, optik tarayıcılar ve sensörlerle donatılmıştır ve tüm geri dönüştürülebilir katı atıklar hatasız olarak ayrıştırılabilmekte ve saflaştırılabilmektedir^[84]. Geleneksel sıralama yöntemlerinden farklı olarak, yakın kızılötesi ve derin öğrenme teknolojilerinin birleşimi, tasnif doğruluğu ve saflık seviyelerinde en yüksek performansları sağlayabilir. Gelişmiş sensörler ve yapay sinir ağlarının gücü ile sınıflandırma sistemi, örneğin işlenmiş ahşap (sunta, kontrplak, MDF vb.) ve işlenmemiş ahşap gibi farklı malzeme türlerini ayırt etmek için eğitilebilir. Nitekim ABD'nin Colorado eyaletinde bir geridönüşüm tesisini işleten Alpine Recycling, AMP Robotics tarafından geliştirilen geridönüşüm robotları sayesinde, atık yığınları içinde kahve fincanlarını seçip ayırdığını belirtmektedir^[85]. Atıklar arasında değer açısından ayrı bir yeri olan metallerin ayrıştırılması için lazer teknolojilerinden de yararlanılması yönünde çalışmalar umut vericidir^[86]. Almanya'da yapılan bilimsel çalışmalarda, sadece değerli metallerin (alaşım dahil olmak üzere) değil, kağıtların arasındaki yabancı maddelerin ayıklanmasında da ilerleme kaydedilmiştir. Çin'de bazı firmalar, elektronik atıkların tümüyle ayrıştırılıp geri dönüştürüldüğü kapalı sistemler geliştirmiş ve piyasaya sunmuşlardır^[87]. Türkiye'nin ilk tam otomatik katı atık ayrıştırma merkezi 2018 yılında İstanbul Pendik'te açılmıştır^[88].

3. YENİ GERİ DÖNÜŞTÜLEBİLİR MALZEMELERİ

Döngüsel ekonomiye ulaşmanın olmazsa olmazlarından biri, ürünlerin uzun ömürlü, tamir edilebilir, başka amaçlar için kullanılabilir ve tümüyle geri dönüştürülebilir olarak tasarlanmasıdır. Bu amaca ulaşmanın yollarından biri ürünlerin doğada çözünebilir, düşük maliyetli ve doğayı kirletmeden geri dönüştürülebilir malzemeden yapılmasıdır. Son yıllarda tümüyle geri dönüştürülebilir malzemelerin geliştirilmesinde önemli mesafe katedilmiştir.

3.1 Geri Dönüştürülebilir Tekstil Malzemeleri

Tekstil ve hazır giyim endüstrisi, küresel sürdürülebilirlik çabaları kapsamında yeni malzemelerin geliştirilmesine önem veren sektörlerden biridir. Bugün dünyada 95 start-up şirketi, yeni nesil moda ve tekstil malzemeleri geliştirmek üzere çalışmalar yürütmektedir^[89]. Söz konusu şirketler, bitkisel özler, mantar köklerinden elde edilen miselyum, hayvan hücresi kültürleri, çeşitli özel bakteriler, geri dönüştürülmüş malzemeler ve bazı özel malzemelerle yeni nesil deri, ipek, yün, kürk ve kuş tüyü malzemeler geliştirmektedir. Söz konusu araştırmalar otomotiv şirketlerinden lüks modaevlerine, spor giyim markalarından mobilya şirketlerine uzanan geniş bir yatırımcı grubundan destek görmektedir. 2021 yılında söz konusu şirketlere yapılan yatırım miktarının 863,6 milyon

dolara ulaştığı belirtilmektedir^[89]. Bunlar arasında imkânsız gibi görünen maddelerden tekstil hammaddesi üretim teknolojisi geliştirenler de bulunmaktadır.

3.1.1 Sütten İplik

Tekstil ve hazır giyim endüstrisinde geri dönüştürülebilir malzeme üretimi için diğer sektörlerin atıklarını kullanmak çifte yarar sağlayabilir. Örneğin Almanya'da QMillk adlı start-up, ekonomik değeri düşük peynir ve bozuk sütlerden tekstil sektöründe kullanılabilecek lifler elde etmektedir. Şirket daha sonra bu lifleri, "ipek benzeri bir dokuya" sahip olduğunu belirttiği ipliklere dönüştürmektedir. Bunlar daha sonra jarse veya dokuma kumaşlar ya da keçe gibi diğer tekstiller yapmak için kullanılabilir^[90]. Ömrünü tamamlayan kumaş daha sonra çözünebilir ve tarım için kompost gübre yapımında kullanılabilir.

3.1.2 Ot Köklerinden Doğal Olarak Örülmüş Kumaş

Doğal malzeme kullanarak neredeyse hiç enerji harcamadan kumaş üretmenin mümkün olduğu da kanıtlanmıştır. Hollanda'da yaşayan Alman sanatçı Diana Sherer, bir şablon üzerinde yetiştirdiği yulaf otlarının köklerinin şablonun şeklini aldığını, hafif ama güçlü bir kumaş elde edilebileceğini göstermiştir^[91].

3.1.3 Sığır Gübresinden İplik

Birleşmiş Milletlerin tahminlerine göre küresel hayvancılık sektörü küresel ısınmaya yol açan sera gazlarının yüzde 14,5'inden sorumludur ve söz konusu emisyonun yüzde 44'ü çok tehlikeli metan gazıdır^[92]. Hayvancılık sektörünün emisyonlarını azaltmak için dünya genelinde kırmızı et tüketiminin azaltılmasının teşvik edilmesinin yanı sıra organik kullanımının yaygınlaştırılması ve biyogaz üretiminin artırılmasına çaba gösterilmektedir. Bir başka yöntem de hayvan gübresinin biyoplastik ve tekstil ipliği üretiminde kullanımı olabilir. Hollanda'da Inspidere adlı bir şirket, yeni tekstil ipliklerinin üretimi için "Mestic" adını verdiği bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde yüzde 35 oranında selüloz içeren gübre kapalı bir sisteme alınarak işleme tabi tutulmakta ve doğal selüloz elde edilmektedir. Doğal selüloz daha sonra viskoz ve selüloz asetat olmak olarak iki malzemeye dönüştürülmektedir. Viskoz kumaş yapımında, selüloz asetat ise doğada çözünebilir biyoplastik üretiminde kullanılmaktadır. Şirket hayvan gübresinden elde edilen selülozun kâğıt yapımında da kullanılabileceğini belirtmektedir^[93].

3.1.4 Bitkilerden Deri

Hayvan derisinden çanta, ayakkabı ve aksesuarlar hazır giyim endüstrisinin vazgeçilmez malzemeleri arasındadır. Ancak deri, kimyasal işleme tabi tutulmuş hayvan postudur. Bir metre kare postun deri hâline getirilmesi için krom gibi ağır metaller, cila, boya ve diğer kimyasal maddelerin yanı sıra 16.500 litre su kullanılmaktadır^[94]. Dolayısıyla iklim değişikliği ve ekolojik denge açısından geleneksel deri üretimi sürdürülebilir değildir. Deri malzemesini, daha doğal ve hayvan dışı organik kaynaklardan elde etmek için çok sayıda çalışma yürütülmektedir.

ABD'nin Tufts Üniversitesi bilim insanları, üç boyutlu yazıcılarla ipekten deri benzeri bir malzeme üretmişlerdir^[95]. Ancak bunun sürdürülebilir bir çözüm olacağı kuşkuludur. Zira ipek yüksek maliyetli ve nadir bulunan bir malzemedir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi ise henüz deri endüstrisinin ihtiyacını karşılamak üzere kitlesel üretime uygun hâle gelmemiştir.

Daha erişilebilir ve düşük maliyetli malzemelerden deri üretimi çalışmaları da yürütülmektedir. Örneğin Danimarkalı Beyond Leather firması Leap adını verdiği elma atıklarından üretilmiş bir deri benzeri malzeme tanıtmıştır^[96]. Firmaya göre, meyve suyu ve diğer gıda sanayiinde kullanılan elmaların posalarından elde edilen kısa elyaflar ve polimerlerin kat kat işlenmesiyle "örülen" Leap'in üretim sürecinde geleneksel deri endüstrisine kıyasla yüzde 85 daha az karbondioksit ortaya çıkmaktadır.

Elma posalarının dışında üzüm kabuklarından^[97], pirinç kabuklarından^[98], mantarlardan^[99], alglerden^[100], ananas yapraklarından^[101], kahve telvesinden^[102] vb. bitkisel atıklardan deri benzeri tekstil ve hazır giyim malzemeleri geliştirilmektedir. Son yıllarda iklim değişikliği, ekoloji ve hayvan hakları hassasiyetinin artması, vejetaryen ve vegan beslenme tarzının yaygınlaşmasıyla birlikte moda endüstrisinin de bu tür malzemelere daha fazla ilgi gösterdiği ve koleksiyonlar oluşturduğu görülmektedir.

3.1.5 Boya ve Kimyasallar Yerine Enzim

Tekstil ürünlerinin üretiminde büyük hacimlerde su ve kimyasal madde tüketilmektedir. Tekstil sanayiinde kullanılan organik ve kimyasal boyaların 100.000'den fazla çeşidi olduğu belirtilmektedir^[103]. Öyle ki tekstil endüstrisi, dünya genelinde üretilen boyaların üçte birini tüketmektedir. Üstelik tekstilde kullanılan sentetik boyaların bir kısmını çıkarmak neredeyse imkânsız olduğu için bu boyaların kullanıldığı tekstil ürünlerinin geridönüşümü ve tekstil boyalarının karıştığı suların artırılması zorlaşmaktadır.

Bilim insanları tekstil sektörünün yarattığı pek çok çevre sorununun çözümü için enzimler üzerinde durmaktadır. Tüm canlıların hücrelerinde bulunan selüloz ve lakkaz gibi enzimler tekstil boyalarını oksitleyerek çözebilmektedir. Bu tür enzimler, tekstil atık sularının artırılmasının yanı sıra, su ve enerji sarfiyatı yüksek kot taşıma işlemlerinde ponza taşının yerine kullanılabilmektedir^[104].

3.2 Ekonomik ve Dayanıklı Biyoplastik

Bitkisel yağlar, bitki nişastaları ve mikroorganizmalar gibi yenilenebilir biyolojik kaynaklardan elde edilen plastiklerdir. Biyolojik kaynaklardan polimer elde edilerek doğada çözünebilir plastik üretimi dünyada son derece yaygındır. Bir tahmine göre, küresel biyoplastik pazarı yedi milyar doların üzerine çıkmıştır ve 2026 yılına kadar her yıl yüzde 20'nin üzerinde büyüyerek 23 milyar doların üzerine çıkacaktır^[105]. Biyoplastikler, sentetik plastik kirliliğinin tehlikeli boyutlara ulaştığı günümüzde ciddi bir alternatif malzemedir. Ancak sentetik plastiklere göre daha dayanıksız oluşu ve yüksek maliyeti, biyoplastiklerin kullanımının artmasının önündeki engellerdir^[105]. Bu nedenle bilim insanları daha düşük maliyette

ve daha sağlam biyoplastik üretmenin yollarını aramaktadır. Filotu (*Miscanthus giganteus*), üzerinde durulan bitkilerin başında gelmektedir. Çok hızlı büyüyen, boyu 12 metreye ulaşabilen bu muazzam boyutlu otların hücre duvarlarındaki selüloz, biyoplastik yapımına çok uygundur. Üstelik bu otlar, dayanıklı olmaları, suyu verimli kullanmaları, engebeli ve düşük verimli arazilerde büyüyebilmeleri nedenleriyle çok düşük maliyetle yetiştirilebilmektedir^[106]. Bu avantajlardan yararlanmak isteyen, Hollanda'da kurulmuş bir start-up, Vibers adını verdiği filotu'ndan biyoplastiğin üretimine başlamıştır^[106]. Filotu, potansiyel bir biyoyakıt olarak araştırmacıların dikkatini çekmiştir^[107].

Dayanıklı biyoplastik üretimi, giderek daha büyük bir sorun hâline gelen elektronik atıkların geridönüşümü açısından da büyük önem taşımaktadır. Dünyada her yıl 50 milyon tonun üzerinde çevreye zararlı elektronik çöpü olduğu tahmin edilmektedir^[108]. Elektronik cihazların değerli parçaları düşünüldüğünde, bu aynı zamanda ciddi bir ekonomik kayıptır.

ABD'de bazı üniversiteler^[109] ve bazı uluslararası elektronik firmaları^[110], elektronik devrelerin biyoplastikten imal edilmesi ve devrelerin üç boyutlu yazıcılarla biyolojik mürekkeple hazırlanması için çalışmalar yürütmektedir.

3.3 Geri Dönüştürülebilir Yapı Malzemeleri

Döngüsel ekonomide yapı sektöründe malzeme açısından inovasyonun desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Pek çok ülke, inşaat faaliyetlerinde geri dönüştürülebilir veya geridönüşümden kazanılmış malzemelerin kullanılmasını desteklemektedir. Bunun sonucunda bazı sıra dışı malzeme çözümleri sektöre sunulmaya başlanmıştır.

3.3.1 Geri Dönüştürülmüş Plastikten Yol ve Kaldırım Kaplaması

Plastiklerin geridönüşümüne ilişkin en büyük sorun, geri dönüştürülmesinin sınırsız olmamasıdır. Plastikler, geliştirilen en yeni tekniklerle bile en fazla 10 kez geri dönüştürülebilir^[111]. Geri dönüştürme sayısı plastik türüne bağlıdır ve çoğu plastik bir veya iki kez geri dönüştürüldükten sonra polimer yapılarının bozulması nedeniyle bir daha kullanılamaz hâle gelmektedir. Bu nedenle plastik atıklarının geridönüşüm sonrasında uzun süre kullanılabilir olması büyük önem taşımaktadır. Geri dönüştürülmüş plastiklerin en uzun süre kullanılabilmesi için ise inşaat sektörüdür. Dolayısıyla pek çok ülke ve uluslararası kuruluş atık plastiklerin yapı malzemesi olarak kullanılmasını teşvik etmektedir.

Atık plastikler yol ve kaldırım kaplamaları, yol sanat yapıları, yapıların izolasyonu ve engebeli tarım arazilerinin teraslı hâle getirilmesinde kullanılabilmektedir^[112]. Bu alanda özel girişimler de artmaktadır. Örneğin, Hollanda merkezli VolkerWesser, üretiminde sera gazı salımı olan asfalt veya beton yerine kullanılabilen bir hazır yol kaplama elamanı olan PlasticRoad'u^[113] geliştirmiştir. Tümüyle geri dönüştürülmüş plastikten üretilen (metrekaresinde 25 kilogram atık plastik kullanılmaktadır) bir

sandviç tipi yapı elemanı olan PlasticRoad çok sayıda avantaj sunmaktadır. Öncelikle PlastikRoad üretimi asfalt veya beton üretimine göre çok daha az sera gazı emisyonu ile yapılmaktadır. Bu yeni yapı elemanı ayrıca çok daha hafif, ancak çok daha uzun ömürlüdür. PlasticRoad'un, standart yolların beklenen ömrünün üç katı kadar dayanabildiği ifade edilmektedir. Ayrıca sandviç yapısı sayesinde gerektiğinde sensörlerin yerleştirilmesinde, elektrik üretimini sağlayacak fotovoltaik panellerin veya piezoelektrik sistemlerin yerleştirilmesine uygundur. Aynı şekilde, bu sandviç yapı yağmur sularının toplanması için de kullanılabilir.

ABD merkezli ByFusion firması ise, sadece mekanik tasniften geçmiş, ısı veya kimyasal işlem görmemiş plastik atıkları yüksek basınçla sıkıştırarak ByBlock adını verdiği yapı tuğlaları üretmektedir^[114]. Firma ByBlock tuğlaların geleneksel tuğla veya diğer yapı duvar elemanlarına kıyasla çok daha hafif, esnek, darbelere dayanıklı, su ve ısı yalıtımlı ve kolay işlenebilir (kaplanabilir, diğer yapı elemanlarıyla birleştirilebilir, boyanabilir vb.) olduğunu belirtmektedir.

3.3.2 Hafriyattan Beton İkamesi

Yapılarda üretiminde sera gazı salımı yüksek çimento-dan beton yapılması yerine alternatif arayışları da sürmektedir. Bunun için geleneksel yöntemlerin modernize edilmesi de üzerinde durulan yöntemlerden biridir. Örneğin betonun yerine 4.000 yıldan uzun bir süredir yapıyı bilinen kil ağırlıklı tuğla yapıyı tekniği düşünülmektedir. "Sıkıştırılmış toprak" (Rammed Earth) adı verilen bu yöntemde, kum, kireçtaşı, kil ve en fazla yüzde 10 oranında çimento kullanılarak elde edilen karışım sıkıştırılmakta ve sert, dayanıklı, izolasyon kabiliyeti yüksek bir tür beton elde edilmektedir^[115]. Sıkıştırılmış topraktan yapılmış yapılar, Çin Seddi veya İspanya'daki Elhamra Sarayı gibi yapılarda kanıtlandığı üzere binlerce yıl ayakta kalabilmektedir^[116].

Günümüzde sıkıştırılmış toprak yönetimi binlerce yıl önce olduğu gibi katmanlar hâlinde malzemelerin sıkıştırılmasıyla yapılmaktadır^[117]. Öte yandan modern teknoloji uygulamaları da gelişmektedir. Örneğin üç boyutlu yazıcılar kullanılarak doğrudan yapı inşasında da kullanılmaktadır^[118]. Gerek geleneksel yöntemle gerekse üç boyutlu yazıcıyla yapılsın, sıkıştırılmış toprakla bina yapımı, beton yapılara kıyasla daha pahalıya mal olmakta ve daha uzun sürede tamamlanmaktadır^[117]. Ancak uzun ömrü, ısı ve su yalıtım özellikleri, özellikle yapıların soğutulması veya ısıtılmasında enerji tasarrufu sağlaması, sıkıştırılmış toprak yapıları cazip kılmaktadır.

Sıkıştırılmış toprak malzemelerin maliyetini düşürecek çözümler de geliştirilmektedir. Örneğin Belçika merkezli BC Materials^[119] şirketi, inşaat hafriyatlarında ortaya çıkan toprakları alarak sıkıştırılmış toprak malzemelere çevirmektedir. Böylece sıkıştırılmış toprak malzemesi tedarik maliyetleri azalmakta, hafriyat atıklarının ve hafriyatların taşınmasının yol açtığı ekolojik sorunların önüne

geçilmekte ve atık topraklar da sürdürülebilir biçimde yeniden ekonomiye kazandırılmaktadır.

3.4 Atık Plastikten Grafen

Atık plastikler çağın "mucize malzemeleri" olan nanomalzemelere de dönüştürülebilir. ABD'nin Rice Üniversitesi araştırmacıları, plastik atıklarının aniden aşırı ısınma ve elektrik akımına tabi tutulduğunda grafene dönüştüğünü keşfetmişlerdir. Laboratuvar denemelerinde bu yöntemle "yüksek kaliteli, turbostatik grafen" elde edildiği bildirilmiştir^[120]. Bilim insanları bu süreç için 23 kilo-jul enerji harcamışlardır. Ancak plastik atığının son derece değerli grafene dönüştürülmesi bu maliyeti önemsiz kılmaktadır.

Bilim insanları ayrıca, plastik atıklarının piroliz yöntemiyle geri dönüştürülme işlemi sırasında ortaya çıkan ekonomik değeri olmayan küllerin de grafen üretiminde kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir. Bu yolla elde edilen grafenin betona katılması hâlinde, betonun dayanıklılığının yüzde 35 oranında arttığı da kaydedilmektedir^[121].

Nanomalzemeler, sağlıktan ulaşıma, enerjiden inşaat kadar pek çok alanda döngüsel ekonomiye desteklerken sera gazı emisyonlarını azaltacak özelliklere sahiptir^[122]. Bunlar arasında ekolojiyi yakından ilgilendiren uygulamalar da vardır. Örneğin nanomalzemeler tuzlu veya atık suların arıtılmasında kullanılmaktadır^[123]. Öte yandan nanomalzemelerin çevreye etkisine ilişkin olarak ciddi kuşklar bulunmaktadır. Bu arada çok sayıda bilim insanı, nanomalzemelerin havaya, suya ve toprağa verilebileceği zararların kapsamlı biçimde araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır^[124].

3.5 Kâğıt, Silikonun Yerini Alabilir

Silikon bazlı elektronik ürünler hayatın pek çok alanında kağıdın yerini almıştır. Ancak artan elektronik atıkların yarattığı sorunlar nedeniyle elektronikte silikon yerini kâğıda bırakabilir.

Geliştirilen kâğıt tabanlı elektronik cihazlar bu durumu değiştirebilir. Portekiz'deki AlmaScience Teknoloji İnovasyon Laboratuvarı tarafından geliştirilen "PaperWeight digital"^[125] kâğıt, mantar veya kumaşlardan imal edilebilmektedir. Bu teknolojiye bir yarı iletken (genellikle silikon) yerine, elektrik akımı verildiğinde aktif hâle gelen biyopolimerler kullanılmaktadır. Söz konusu biyolojik polimerler sadece elektrik akımına değil basınç ve bükülmelere de duyarlıdır. Bu nedenle dokunmatik ekran olarak da kullanılabilirler. Ayrıca geleneksel elektronik cihazlara kıyasla çok daha geniş boyutlarda üretilebilirler.

Biyolojik polimer bazlı elektroniklerin üretimi, silikon bazlılara kıyasla daha kolaydır ve bu nedenle günümüzde belli ülkelerin elinde yoğunlaşan silikon bazlı yarı iletken üretimine kıyasla daha yaygın olarak üretilebilir ve dolayısıyla maliyetleri de daha düşük olabilir. Ayrıca, ürün ömrünün sonuna ulaştıklarında, zehirli madde salmazlar ve yaygın olarak yürütülen kâğıt geridönüşüm süreçleriyle yeniden kazanılabilirler.



4. YENİ GERİDÖNÜŞÜM ARAÇLARI

Döngüsel ekonomilerin oluşturulması ve sürdürülebilmesi için hassas, verimli ve ekonomik geridönüşüm araçlarına da ihtiyaç vardır. 21'inci yüzyıl teknolojileri geridönüşüm araçlarını gelişmiş kabiliyetlerle donatmaktadır. Bunlardan bazıları bu bölümde gözden geçirilecektir.

4.1 Geridönüşüm Robotları

Geridönüşüm faaliyetleri yüksek maliyetlidir. ABD'de yapılan araştırmalara göre atıkları geri dönüştürmeye çalışma maliyeti, onları çöplüğe atmanın maliyetinden 2-5 kat daha fazladır^[126]. Çevrenin korunması ve ekonomik kazanımları nedeniyle geridönüşüm faaliyetlerinin sürdürülmesi kaçınılmazdır ancak maliyetlerin düşürülmesine ihtiyaç vardır. Bunun için üzerinde durulan yöntemlerden biri atıkların tasnifini daha hızlı ve daha hassas yapabilecek geridönüşüm robotlarının kullanılmasıdır. Yapay zekâ destekli görü alanındaki gelişmelerle artık atık tasnifinde robotları kullanmak mümkündür. Bilgisayarlı görü teknolojisi, bir nesnenin yapıldığı malzeme türünü algılamaktadır. Bir robot kolu, malzemeleri bir taşıma bandından alır ve malzeme türüne bağlı olarak farklı kanallara bırakabilir. Yapılan bir araştırmaya göre insanlar saatte 200 parça atık tasnif edebilirken, tasnif robotları için bu sayı 2.000 ila 4.200 arasında değişmektedir^[127]. Bu da tasnif hızının 10 kat artması anlamına gelmektedir.

Geridönüşüm merkezlerinde robot kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Küresel atık tasnif robotları pazarının büyüklüğünün 2021 yılında 1,7 milyar dolara ulaştığı

ifade edilmektedir^[128]. Geridönüşüm robotları, atıkların türüne ve geridönüşüm ihtiyaçlarına göre ayarlanabilmektedir. Örneğin metal yoğun atıkların tasnifinde manyetik ayırıştırma ve güçlü kaldırma özelliklerine sahip robotlar kullanılmaktadır. Daha hassas işlemler için de robotlar geliştirilmiştir. Örneğin ABD merkezli teknoloji devi Apple, şirketin ürettiği başta akıllı cep telefonları olmak üzere elektronik ürünleri son derece hassas biçimde ayırıştırabilecek robotlar geliştirmiştir. Daisy, şirketin yeni ürün karşılığı topladığı eski cihazları dikkatli biçimde ayırıştırıran üç modüllü bir robot sistemidir. Sistem önce cihazların bataryalarını sökmekte (robot cihazların minik vidalarını açabilmektedir), ardından ekranlarını kırılmadan ayırmakta ve sonrasında değerli parça ve malzemeleri ayıklamaktadır^[129].

Geridönüşüm robotlarının yüksek maliyeti, daha fazla yaygınlaşmalarının önündeki en önemli engeldir. ABD, Avrupa ve Japonya'da 40'tan fazla geridönüşüm sistemine tasnif robotları sağlayan ABD merkezli AMP Robotics'in robotları 300.000 dolara satılmakta ve ayda 6.000 dolara kiralanmaktadır^[130]. Robotların geridönüşüm tesislerinde standart hâle gelmesi için çok daha fazla robot üreticisinin çok daha makul fiyatta robot üretimine ihtiyaç vardır.

4.2 Geridönüşüm Tarayıcıları

Geridönüşüm sektöründeki kuruluşlar plastiklerin tasnifi için görsel tanımlama cihazlarını kullanmaya başlamıştır. Bunlardan bir olan "Plas'Tri", plastik bileşimini tespit edebilen taşınabilir bir optik araçtır. Atık plastiğe doğru tutulan cihaz ekranında plastiğin türünü (PP, PE veya PET) kısa sürede bildirmektedir. Plas'Tri kullanımı, günde

25 ton plastik işleyebilen bir merkezde ayda 3.000 avroya kadar tasarruf sağlayabilmektedir^[131].

Şili merkezli Sortile ise tekstil atıklarının hassas biçimde ayrıştırılması için bir cihaz geliştirmiştir. Bu cihaz, genellikle beyin, kas ve dokudaki kan oksijen seviyesini izlemek için kullanılan “Yakın Kızılötesi Spektroskopi (Near Infrared Spectroscopy -NIRS)” tekniğini kullanarak kıyafetleri lif bileşimine göre hızlı ve verimli bir şekilde tasnif edebilmektedir^[132]. Makine öğrenmesi algoritmalarıyla desteklenen sistemin tekstil ürünlerini yüzde 95 oranında isabetle tasnif edebildiği belirtilmektedir.

4.3 Sıfır Atıklı Geridönüşüm Makinesi

Sentetik polimer malzemelerin geridönüşümü oldukça güç olduğu gibi geliştirilen yöntemlerde, atık su, atık sera gazı gibi yeni sorunlar ortaya çıkmaktadır. Geridönüşüm yöntemi ne kadar gelişmiş olursa olsun, tasnif edilemeyen, kullanılamayacak kadar bozulmuş olan veya ekonomik değerini yitirmiş olan parçalar yeniden çöplüklerin yolunu tutmaktadır.

ABD merkezli teknoloji firması IBM, hiç değilse plastik atıklar için “sıfır atıklı bir geridönüşüm makinesi” icat etmiştir. Firmanın 2019’da duyurduğu yeni bir makine ise plastik malzemelerin sıfır atıkla yeniden kullanılabilir tozlara dönüşümünü sağlamaktadır. VolCat adı verilen bu makineye getirilen plastik içerikli atıkların yıkanması, etiket ve boyalarından kurtulması gerekmemektedir. Cihazın en önemli parçası 200 derece ısı üzerine çıkıp yüksek basınç üretebilen bir ‘reaktör’dür. Şirketin açıklamasına göre bu reaktörü bir “düdüklü tencereye” benzetmek mümkündür^[133]. Plastik şişeler, kaplar ve PET bazlı kumaşlar ayrıştırılmadan veya öğütülmeden oldukları gibi bu reaktöre atılmaktadır. Reaktörde yüksek sıcaklık, basınç ve reaktöre enjekte edilen kimyasal katalizörler plastik atıklarını yeniden neredeyse hiç kullanılmamış plastik hammaddesi kalitesinde beyaz bir toz hâline getirmektedir. Makine ayrıca pamuklu-polyester karışımı kumaşlardaki pamuk liflerini de ayırabilmekte ve yeniden kullanılabilir hâle getirebilmektedir. Benzeri makineler farklı türden atıklar içinde geliştirilir ve yaygınlaştırılırsa geridönüşümde ölçek ekonomisi gerçekten yakalanabilecek, atıklar çok daha büyük hızda yeniden kazanılabilecektir.

4.4 Atık Plastiği Doğrudan Kullanan Üç Boyutlu Yazıcı

VolCat, plastik atıklarını olduğu gibi yeniden plastik hammaddesine çevirirken, bir başka ABD merkezli firma, onları doğrudan üç boyutlu yazıcıda başka nesnelere hâline getirmeyi başardığını ileri sürmektedir. Re:3d adındaki firmanın geliştirildiği Gigabot X adlı üç boyutlu yazıcı, plastik atıklarını önce küçük parçalara ayırıyor, ardından eritip üç boyutlu imalatta kullanıyor. Ancak bu sistem henüz VolCat gibi atığı doğrudan kullanmıyor: Plastik atığın yabancı maddeler ve etiketlerden arındırılmış ve yıkanmış olması gerekiyor^[134].

4.5 Akıllı Çöp Konteynerleri

Döngüsel bir ekonomiye ulaşmada atıkların verimli biçimde toplanması büyük önem taşımaktadır. Bunun

için öncelikle halkın atıklarını ayrıştırarak geridönüşümde tasnif yükünün azalmasına katkı sağlamasının teşvik edilmesi veya katı atık toplama noktalarının bu tasnifi otomatik olarak yapacak kadar “akıllı” olması gereklidir.

Son yıllarda sayıları giderek artan akıllı çöp konteynerleri her iki amaca da hizmet edebilmektedir. Gelişmiş ülkelerde kullanıma sunulan akıllı çöp konteynerleri, tüketicileri belli bir ödeme karşılığında atıklarını ayrıştırarak atmaya teşvik ederken, sensörleri sayesinde atık toplama sistemlerini daha verimli hâle getirmektedir.

Güney Kore merkezli Superbin firmasının “Nephron” adını verdiği akıllı çöp konteyneri, bunların gelişmiş örneklerinden biridir. Bilgisayarlı görü ve yapay zekâyâ sahip Nephron, atıkları görüntülerinden tanıyıp, cins, saflık derecesi, ağırlığı ve kalitesi gibi pek çok kritere göre tasnif etmekte ve tüketicilere atığın türü, kalitesi ve miktarına göre belli bir ödeme yapmaktadır^[135]. Makine aynı zamanda dolduğunda veya arıza yaptığında durumu merkeze bildirmektedir.

ABD merkezli akıllı geridönüşüm çözümleri firması Eco ATM tarafından geliştirilen bir elektronik atık toplama makinesi ise, elektronik atıklar için geliştirilmiştir ve bu atıkları getirenlere anında nakit para önermektedir^[136]. Şirketin internet sitesinde ve akıllı cep telefonu uygulamasında kullanıcıların elektronik cihazlar için ödenecek miktarı önceden öğrenmesi mümkündür.

Polonyalı şirket Bin-e tarafından geliştirilen akıllı çöp konteyneri ile, yapay zekâyâ nesne tanıma teknolojisi kullanılarak geri dönüştürülebilir malzemeler ayrı bölümlere tasnif edilmektedir. Makine tasniften sonra atıkları sıkıştırmakta ve her bir bölmenin doluluk oranını izlemektedir. Akıllı çöp konteynerleri atık tasnifinde insani hataları sıfırlamakta, malzeme işlemeyi hızlandırmakta ve kolay hâle getirmektedir. Bu atık yönetimi maliyetleri yüzde 80 oranında azaltılmaktadır^[136].

5. SONUÇ

İklim değişikliği, ekolojik sorunlar ve dünya kaynaklarının hızla tükenmesi döngüsel ekonomik modelin bir tercih olmaktan çıkıp zorunluluk hâline gelmesine yol açmıştır. Döngüsel ekonomi öncelikle ürünlerin daha az tüketilmesini, var olan ürünlerin uzun ömürlü olmasını ve geri dönüştürülebilir olarak tasarlanmasını gerektirmektedir. Bunun için ise yeni yöntem, malzeme ve araçların geliştirilmesi gereklidir. 21’inci yüzyıl teknolojileri bu üç alanda da inovasyonu hızlandıracak kabiliyetler sunmaktadır. Nitekim son yıllarda geridönüşüm süreçlerini önemli ölçüde iyileştiren, hızlı ve verimli hâle getiren yenilikler birbiri ardına tanıtılmaktadır. Döngüsel ekonomiye geçiş, bu açıdan bakıldığında yakın gelecekte ekonomik büyümenin en önemli itici güçlerinden biri olacaktır. Dolayısıyla döngüsel ekonomi konusunda stratejiler ve yol haritaları belirleyerek bu alanda inovasyon ve girişimleri desteklemek stratejik bir adım olacaktır. Bu aynı zamanda gelecek nesillerle ve dünyamıza karşı bir borçtur.

KAYNAKÇA

- [1] *Scientific and Technical Advisory Panel*, (2018), "Plastics and the circular economy", (Haziran 2018), <https://stagef.org/sites/default/files/publications/PLASTICS%20for%20posting.pdf>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [2] *Türkiye Döngüsel Ekonomi Platformu*, "1- Döngüsel ekonomi nedir?", https://donguseleekonomiplatformu.com/knowledge-hub/articler_1-what-is-the-definition-of-a-circular-economy_11.html?page=3. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [3] *The World Bank*, "WHAT A WASTE 2.0", https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [4] *The World Bank*, (2018), "Global Waste to Grow by 70 Percent by 2050 Unless Urgent Action is Taken: World Bank Report", (20 Eylül 2018), <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [5] *Statista*, "Global waste recycling services market size in 2020 and a forecast to 2030", <https://www.statista.com/statistics/239662/size-of-the-global-recycling-market/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [6] *Vikipedi*, "Plastik", <https://tr.wikipedia.org/wiki/Plastik>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [7] Chamas, Ali; (2020), "Degradation Rates of Plastics in the Environment", *ACS Publications*, (3 Şubat 2020), <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06635>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [8] *Grid Arendal*, "Global plastic production, accumulation and future trends", <https://www.grida.no/resources/15041>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [9] *Eufic*, (2021), "Microplastics in food and water – are they harmful to human health?", (24 Haziran 2021), <https://www.eufic.org/en/food-safety/article/microplastics-in-food-and-water-are-they-harmful-to-human-health>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [10] *OECD*, (2022), "Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD", (22 Şubat 2022), <https://www.oecd.org/newsroom/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [11] *Circular.*, (2022), "9% of global plastic waste is recycled while 22% is 'mismanaged' – OECD", (23 Şubat 2022), <https://bit.ly/3GGISVj>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [12] *Grand View Research*, "Plastic To Fuel Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Pyrolysis, Gasification, Depolymerization), By End-fuel (Sulfur, Hydrogen, Crude Oil), By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028" <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-to-fuel-market>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [13] *The Engineer*, (2020), "Future recycling technologies must consider climate change", (10 Eylül 2020), <https://www.theengineer.co.uk/content/opinion/future-recycling-technologies-must-consider-climate-change>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [14] Uzochukwu Eze, Wilson; (2021), "Future recycling technologies must consider climate change", *AIMS Press*, (19 Temmuz 2021), <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/ctr.2021003?viewType=HTML>
- [15] *Sustainable Plastics*, (2019), "Garbo to build large-scale PET chem recycle plant in Italy", (19 Ağustos 2019), <https://www.sustainableplastics.com/news/garbo-build-large-scale-pet-chem-recycle-plant-italy>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [16] Thiyagarajan, Shanmugam; (2022), "Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes", *National Center for Biotechnology Information*, (Aralık 2022), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8978869/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [17] *OECD*, "Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options", <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/71a51317-en/index.html?itemId=/content/component/71a51317-en#section-d1e3612>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [18] COOK, STACEY; "Innovations in recycling", *National Geographics*, <https://on.natgeo.com/3GKgb0h>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [19] *Statista*, "Market volume of polypropylene worldwide from 2015 to 2021, with a forecast for 2022 to 2029", <https://www.statista.com/statistics/1245169/polypropylene-market-volume-worldwide/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [20] *PURECYCLE*, "One Goal: A Pure Planet", <https://purecycle.com/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [21] *EU Recycling*, (2018), "Chemisch gereinigt: Recyclingkunststoffe", (Ağustos 2018), <https://eu-recycling.com/Archive/20623>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [22] Ladent, Emmanuel; (2022), "Our waste is valuable: how one company is creating a circular economy for plastics", *World Economic Forum*, (27 Haziran 2022), <https://www.weforum.org/agenda/2022/06/plastics-biorecycling-circular-economy/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [23] *United Nations University*, (2020), "Global E-Waste Surging: Up 21% in 5 Years", (2 Temmuz 2022), <https://unu.edu/media-relations/releases/global-e-waste-surging-up-21-in-5-years.html#info>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [24] Nogrady, Bianca; (2016), "DERGİ - Akıllı telefonlar değerli metallere dolu", *BBC*, (18 Ekim 2016), <https://www.bbc.com/turkce/vert-fut-37691957>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [25] *Bank My Cell*, "HOW MANY SMARTPHONES ARE IN THE WORLD?", <https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [26] Song, Na; (2021), "The waste ban in China: what happened next? Assessing the impact of new policies on the waste management sector in China", *Springer Link*, (18 Kasım 2021), <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-021-01101-y>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [27] CENGİZHAN, MELİS; (2022), "Dijital Ürün Pasaportu nedir? AB'nin Sürdürülebilir Ürünler Girişimi'nde nasıl bir rol oynuyor?", *İklim Gazetesi*, (29 Mart 2022), <https://iklimgazetesi.com/dijital-urun-pasaportu-nedir-abnir-surdurulebilir-urunler-girisiminde-nasil-bir-rol-oynuyor/>
- [28] *STM ThinkTech*, (2019), "Dijital İkiz Teknolojileri ve Üretim Faydaları", (14 Mayıs 2019), <https://thinktech.stm.com.tr/dijital-ikiz-teknolojileri-ve-uretime-faydaları>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [29] *Statista*, "Estimated capacity of lithium-ion batteries placed on the global market in 2020 with forecast for 2021 through 2030", <https://www.statista.com/statistics/1246914/capacity-of-lithium-ion-batteries-placed-on-the-global-market/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [30] *Solar Reviews*, (2022), "Are lithium ion batteries recyclable?", (19 Nisan 2022), <https://www.solarreviews.com/blog/are-lithium-ion-batteries-recyclable>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [31] Zhou, Li-Feng; (2020), "The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries", *Frontiersin*, (3 Aralık 2020), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2020.578044/full>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [32] *Turchem*, (2022), "Lityum-İyon Bataryalardan Değerli Metallerin Kazanımı (2)", (1 Haziran 2022), <https://www.turkchem.net/lityum-iyon-bataryalardan-degerli-metallerin-kazanimi-2.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [33] *Grand View Research*, "Textile Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Cotton, Wool, Silk, Chemical), By Product (Natural Fibers, Nylon), By Application (Technical, Fashion), By Region, And Segment Forecasts, 2022 – 2030", <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/textile-market>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [34] Wicker, Alden; (2020), "Fashion has a misinformation problem. That's bad for the environment.", *Vox*, (31 Ocak 2020), <https://www.vox.com/the-goods/2020/1/27/21080107/fashion-environment-facts-statistics-impact>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [35] Souchet, Francois; (2019), "Fashion has a huge waste problem. Here's how it can change", *World Economic Forum*, (28 Şubat 2019), <https://www.weforum.org/agenda/2019/02/how-the-circular-economy-is-redesigning-fashions-future/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [36] Beall, Abigail; (2020), "Why clothes are so hard to recycle", *BBC*, (13 Temmuz 2020), <https://www.bbc.com/future/article/20200710-why-clothes-are-so-hard-to-recycle>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [37] *United Nations*, (2018), "Putting the brakes on fast fashion", (12 Kasım 2018), <https://www.unep.org/news-and-stories/story/putting-brakes-fast-fashion>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)

- [38] *UNECE*, (2018), "UN Alliance aims to put fashion on path to sustainability", (12 Temmuz 2018), <https://www.unecce.org/info/media/presscurrent-press-h/forestry-and-timber/2018/un-alliance-aims-to-put-fashion-on-path-to-sustainability/doc.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [39] Souchet, Francois; (2019), "Fashion has a huge waste problem. Here's how it can change", *World Economic Forum*, (28 Şubat 2019), <https://www.weforum.org/agenda/2019/02/how-the-circular-economy-is-redesigning-fashions-future/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [40] Celep, Gizem; Tetik, Gamze D.; Yılmaz, Fulya; (2022), "Limitations of Textile Recycling: The Reason behind the Development of Alternative Sustainable Fibers", *Intechopen*, (9 Haziran 2022), <https://www.intechopen.com/online-first/82044>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [41] *Textile Excellence*, (2021), "Breakthroughs In Textile Recycling Technologies", (2 Mart 2021), <https://www.textileexcellence.com/news/breakthroughs-in-textile-recycling-technologies/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [42] Guebitz, Georg M.; (2022), "ENZIME BASED RECYCLING PROCESSES", *degrit*, https://www.researchgate.net/publication/364065246_ENZYME_BASED_RECYCLING_PROCESSES/fulltext/63384a359cb4fe44f3f39933/ENZYME-BASED-RECYCLING-PROCESSES.pdf. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [43] Juliani, Tim; (2020), "Is Biogas a "Green" Energy Source?", *World Wild Life*, (24 Eylül 2020), <https://www.worldwildlife.org/blogs/sustainability-works/posts/is-biogas-a-green-energy-source>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [44] Stark, Alexander; (2018), "Textile Bioreactor Converts Waste into Biogas and Bioethanol", *World Wild Life*, (18 Eylül 2018), <https://www.lab-worldwide.com/textile-bioreactor-converts-waste-into-biogas-and-bioethanol-a-757039/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [45] *euomaglia*, "Who we are", <https://www.euomaglia.it/en/who-we-are/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [46] *Conserve Energy Future*, "Is Leather Recyclable? (And Is It Sustainable?)", <https://www.conserve-energy-future.com/is-leather-recyclable.php>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [47] *worn again*, <https://wornagain.co.uk/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [48] *worn again*, (2022), "Worn Again Technologies secures new investment to build ground-breaking textile recycling facility", (7 Ekim 2022), <https://wornagain.co.uk/worn-again-technologies-secures-new-investment-to-build-ground-breaking-textile-recycling-facility/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [49] *Renewcell*, <https://www.renewcell.com/en/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [50] *Carbios*, (2019), "CARBIOS produces first PET-bottles from 100% recycled plastic waste using Company's breakthrough technology", (27 Şubat 2019), <https://www.carbios.com/en/carbios-produces-first-pet-bottles-from-100-recycled-plastic-waste-using-companys-breakthrough-technology/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [51] Jordeva, Sonja; (2019), "Textile as a sustainable insulating material for buildings", (Ocak 2019), https://www.researchgate.net/publication/334758325_Textile_as_a_sustainable_insulating_material_for_buildings. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [52] Pichardo, Patricia Peña; (2017), "Waste and Recycled Textiles as Reinforcements of Building Materials", (20 Aralık 2017), <https://www.intechopen.com/chapters/56947%20>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [53] Martinko, Katherine; (2021), "These Eye-Catching Bricks Are Made from Textile Waste", (8 Mart 2021), <https://www.treehugger.com/bricks-made-textile-waste-5115277>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [54] Ghiassian, Hossein; (2004), "Soil Reinforcement with Recycled Carpet Wastes", *SAGE Journals*, (Nisan 2004), <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X04043938>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [55] Kurban, Mutlu; Babaarslan, Osman; (2020), "Tekstil Takviyeli Beton Üretiminde Kullanılmak Üzere Yüksek Performanslı Hibrit İplik Geliştirilmesi Ve Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu", (30 Aralık 2020), *TEKSTİL VE MÜHENDİS* <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1481362>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [56] *ScienceDirect*, "Organic Waste", <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/organic-waste>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [57] Lewis, Jangira; (2022), "How Does Food Waste Affect the Environment?", *Earth.com*, (17 Ekim 2022), <https://earth.org/how-does-food-waste-affect-the-environment/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [58] *World Wild Life*, "Fight climate change by preventing food waste", <https://www.worldwildlife.org/stories/fight-climate-change-by-preventing-food-waste>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [59] *Instock*, <https://www.instock.nl/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [60] *Organix*, <https://www.organix.suez.fr/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [61] Quirke, Joe; (2018), "Carrots make concrete stronger, study finds", *Global Construction*, (25 Temmuz 2018), <https://www.globalconstructionreview.com/carrots-make-concrete-stronger-study-finds/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [62] Hossain, SK S.; (2018), "Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review", *Taylor & Francis Online*, (3 Ekim 2018), <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21870764.2018.1539210>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [63] Evcimen, Mustafa; Aslan, Recep; (2015), "Yaygın Kullanıma Sahip Tıbbi Aromatik Bitkilerdeki Bazı Antioksidan Fitokimyasalların Fizyolojik Etkileri", *Kocatepe Veteriner Dergisi*, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/387249>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [64] *The University of Sydney*, (2017), "The secrets of citrus in cancer prevention", (4 Ağustos 2017), <https://sydney.edu.au/engineering/news-and-events/2017/08/04/the-secrets-of-citrus-in-cancer-prevention.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [65] *Yahoo Finance*, (2022), "Compost Market Global Market Report 2022", (4 Kasım 2022), <https://yhoo.it/3V7OUJM>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [66] Özen, Özge; Erdem İşmal, Özlenen; (2022), "Bitkisel atıkların biyoplastiklere dönüşümü: Tasarım ve sanat çalışmaları için çevre dostu bir alternatif", *Yıldız Journal of Art and Design*, (Haziran 2022), <https://yjad.yildiz.edu.tr/storage/upload/pdfs/1656575220-tr.pdf>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [67] Peters, Adele; (2021), "This startup turns food waste into bioplastic that can break down in the ocean", *Fast Company*, (19 Ekim 2021), <https://www.fastcompany.com/90687372/this-startup-turns-food-waste-into-bioplastic-that-can-break-down-in-the-ocean>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [68] Müller, Michael; "Putting the construction sector at the core of the climate change debate", *Deloitte*, <https://www2.deloitte.com/ce/en/pages/real-estate/articles/putting-the-construction-sector-at-the-core-of-the-climate-change-debate.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [69] *GlobeNewswire*, (2022), "Construction and Demolition Waste Market Size [2022-2030] to Reach USD 55.54 Billion and Exhibit a CAGR of 6.1% | The Brains Insights", (24 Mayıs 2022), <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/24/2449117/0/en/Construction-and-Demolition-Waste-Market-Size-2022-2030-to-Reach-USD-55-54-Billion-and-Exhibit-a-CAGR-of-6-1-The-Brains-Insights.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [70] Sami Çivioğlu, Furkan; (2020), "GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGASI İLE ÜRETİLEN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI", *AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ*, (Ocak 2020), <https://acikerisim.aku.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/11630/8399/10216432.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [71] *Stone Cycling*, (2021), "Circular Economy in Construction Industry: Waste = Raw Material", (3 Mayıs 2021), <https://www.stonecycling.com/news/circular-economy-in-construction-industry/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [72] Demir, İsmail; Elmalı, Muhammet; (2020), "ORGANİK ATIKLARIN YAPI MALZEMESİ OLARAK KULLANILIRLIĞININ ARAŞTIRILMASI", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1244200>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [73] *Stone Cycling*, "WasteBasedBricks®", <https://www.stonecycling.com/wastebasedbricks/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [74] *Franceinfo*, (2016), "Environnement : des bâtiments entièrement recyclables", (30 Aralık 2016), https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/environnement-des-batiments-entierement-recyclables_1993537.html. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [75] *Recycling Product News*, (2020), "Commentary: Automating recycling is good strategy during Covid-19 and for the future", (19 Mayıs 2020), <https://www.recyclingproductnews.com/article/33891/commentary-automating-recycling-is-good-strategy-during-covid-19-and-for-the-future>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)

- [76] U.S. Bureau of Labor Statistics, “Waste Management and Remediation Services: NAICS 562”, <https://www.bls.gov/iag/tgs/iag562.htm>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [77] Shahan, Zachary; (2021), “NYC Buying 7 Electric Garbage Trucks”, *Clean Technica*, (16 Temmuz 2021), <https://cleantechnica.com/2021/07/16/nyc-buying-7-electric-garbage-trucks/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [78] Kim, Hyung-kyu; (2021), “Hyundai Motor unveils world’s first hydrogen garbage truck”, *The Korea Economic Daily*, (30 Aralık 2021), <https://www.kedglobal.com/hydrogen-economy/newsView/ked202112300011>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [79] Seven, Onur; (2017), “Sürücüsüz çöp kamyonları geliyor”, *Donanim Haber*, (22 Mayıs 2017), <https://www.donanimhaber.com/Surucusuz-cop-kamyonlari-geliyor--91215>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [80] Teh, David; Khan, Tehmina; (2020), “As cities grow, the Internet of Things can help us get on top of the waste crisis”, *Eco-Business*, (31 Ocak 2020), <https://www.eco-business.com/opinion/as-cities-grow-the-internet-of-things-can-help-us-get-on-top-of-the-waste-crisis/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [81] Arbes, Ross; Bethea, Charles; (2014), “Songdo, South Korea: City of the Future?”, *The Atlantis*, (27 Eylül 2014), <https://www.theatlantic.com/international/archive/2014/09/songdo-south-korea-the-city-of-the-future/380849/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [82] C, Amar; S, Onkar; (2021), “Automated Waste Collection System Market by Type”, *Allied Market Research*, (Haziran 2021), <https://www.alliedmarketresearch.com/automated-waste-collection-system-market-A07867#:~:text=An%20automated%20waste%20collection%20system,sealed%20and%20in%20compacted%20containers>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [83] Öztürk, Mustafa; (2017), “ATIK TOPLAMA MİKTARI ve MALİYETİ %50 DÜŞÜRÜLEBİLİR”, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, http://www.cvresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/PNAVvqKEjOtl.pdf. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [84] Tomra, (2020), “LES TECHNOLOGIES DE TRI AVANCÉES, POUR FAIRE FACE AUX PERTURBATIONS DES ACTIVITÉS DE RECYCLAGE EN PÉRIODE DE PANDÉMIE”, (22 Nisan 2020), <https://languagesites.tomra.com/fr-fr/sorting/recycling/recycling-news/2020/new-sorting-technology-can-help-overcome-recycling-business-disruptions>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [85] aclima, (2019), “How artificial intelligence helps recycling become more circular”, (Haziran 2019), <https://aclima.eu/how-artificial-intelligence-helps-recycling-become-more-circular/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [86] *Recycling Magazine*, (2021), “Laser-based sensor technology for recycling metals”, (25 Ocak 2021), <https://www.recycling-magazine.com/2021/01/25/laser-based-sensor-technology-for-recycling-metals/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [87] Suny Group, “E WASTE PCB CIRCUIT BOARD RECYCLING MACHINE”, <https://bit.ly/3V8m4Jh>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [88] Pendik Belediyesi, “Ambalaj Atıkları Ayrıştırma Tesisi”, <https://www.pendik.bel.tr/yer/detay/ambalaj-atiklari-ayrıştırma-tesisi>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [89] *Material Innovation Initiative*, https://www.materialinnovation.org/_files/ugd/858509_f2f76b597a0548799f85e00fd3269942.pdf. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [90] QMILK, <https://www.qmilkfiber.eu/?lang=en>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [91] *TOAST Magazine*, (2021), “Transforming Roots into Weavings with Visual Artist Diana Scherer”, (26 Ekim 2021), <https://www.toa.st/blogs/magazine/diana-scherer>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [92] *Food and Agriculture Organization of the United States*, “Key facts and findings”, <https://www.fao.org/news/story/en/item/197623/iconde/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [93] *Inspidere*, <https://www.inspidere.com/mestic/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [94] Somody, Fruzsina; (2021), “Why does the leather industry need to change?”, *Leap*, (12 Temmuz 2021), <https://www.explore-leap.com/post/why-the-leather-industry-needs-to-change>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [95] Sertoğlu, Kubi; (2021), “SCIENTISTS 3D PRINT BIODEGRADABLE LEATHER PRODUCTS MADE OF SILK”, *3D Printing Industry*, (6 Mayıs 2021), <https://3dprintingindustry.com/news/scientists-3d-print-bio-degradable-leather-products-made-of-silk-189706/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [96] *Leap*, <https://www.explore-leap.com/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [97] Finney, Alice; (2022), “Meng Du creates Unwasted bags from grape leather”, *dezeen*, (4 Mart 2022), <https://www.dezeen.com/2022/03/04/meng-du-unwasted-bags-grape-leather/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [98] Hahn, Jennifer; (2022), “MCQ infuses rice-leather jacket with custom fragrance”, *dezeen*, (16 Şubat 2022), <https://www.dezeen.com/2022/02/16/mcq-natural-fiber-welding-leather-jackets/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [99] Hahn, Jennifer; (2022), “Mari Koppanen wraps seating collection in traditional Transylvanian mushroom leather”, *dezeen*, (2 Şubat 2022), <https://www.dezeen.com/2022/02/02/mari-koppanen-fomes-amadou-seating-design/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [100] Finney, Alice; (2022), “Peelsphere is a leather-alternative biomaterial made from fruit waste and algae”, *dezeen*, (12 Ocak 2022), <https://www.dezeen.com/2022/01/12/peelsphere-youyang-song-leather-alternative-biomaterial-fruit-waste/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [101] Tucker, Emma; (2016), “Leather alternative Piñatex is made from pineapple leaves”, *dezeen*, (9 Haziran 2016), <https://www.dezeen.com/2016/06/09/pinatex-ananas-anam-vegan-leather-alternative-ethical-recycled-pineapple-leaves-sustainable-materials-design-camper/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [102] Hahn, Jennifer; (2020), “TömTex is a leather alternative made from waste seafood shells and coffee grounds”, *dezeen*, (22 Ağustos 2020), <https://www.dezeen.com/2020/08/22/tomttx-leather-alternative-biomaterial-seafood-shells-coffee/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [103] Demiralp, Begüm; Büyük, İker; Aras, Sümer; Cansaran Duman, Demet; (2015), “Lakkaz enziminin endüstriyel ve biyoteknoloji alanında kullanımı”, *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, https://jag.journalagf.com/turkhijyen/pdfs/THDBD_72_4_351_368.pdf. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [104] *The Conversation*, (2019), “Five weird and wonderful ways nature is being harnessed to build a sustainable fashion industry”, (27 Ağustos 2019), <https://theconversation.com/five-weird-and-wonderful-ways-nature-is-being-harnessed-to-build-a-sustainable-fashion-industry-119840>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [105] *Marketsandmarkets*, (2021), “Biodegradable Plastics Market by Type, End Use Industry, and Region – Global Forecast to 2026”, (Eylül 2021), https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biodegradable-plastics-93.html?gclid=Cj0KCQjw48OaBhDWARlSAMD966BhYooxC0DAoAhAvkhnSI0dasbzmJYnJw4VbqBXTN-GpWu5F64ZYf0aAmkvEALw_wcB. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [106] *Bioplastics Magazine*, (2018), “Elephant grass is new ‘local feedstock’ for bioplastics”, (29 Mayıs 2018), <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20180529-New-bioplastics-based-on-elephant-grass.php>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [107] *Agri-TechE*, (2021), “Elephant grass – a biofuel that improves soil says Earlham Institute”, (28 Haziran 2021), <https://www.agri-tech-e.co.uk/elephant-grass-a-biofuel-that-improves-soil/#:~:text=micanthus%2C%20commonly%20known%20as%20elephant,climate%20zones%20and%20land%20types>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [108] *E-waste Monitor*, <http://ewastemonitor.info/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [109] Wood, Matt; (2021), “For a sustainable future, scientists rethink plastics and devices”, *uchicago news*, (24 Haziran 2021), <https://news.uchicago.edu/story/sustainable-future-scientists-rethink-plastics-and-devices>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [110] *NEC*, (2016), “Bioplastics for Electronic Equipment”, (Ağustos 2016), <https://www.nec.com/en/global/rd/technologies/bioplastics/bioplastics2.html>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [111] Young, Olivia; (2021), “How Many Times Can Plastic Be Recycled?”, *Treehugger*, (13 Ağustos 2021), <https://www.treehugger.com/how-many-times-can-plastic-be-recycled-5184396>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [112] *Azo Materials*, (2005), “Retaining Walls, Roads and Erosion Control Systems Constructed From Recycled Tyres In A Cost, Technologically and Ecologically Effective System - Supplier Data by Ecoflex”, (13 Ekim 2005), <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3069>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)

- [113] *Plastic Road*, <https://plasticroad.com/en/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [114] *By Fusion*, <https://www.bymfusion.com/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [115] Craven, Jackie; (2018), "What is Rammed Earth Construction?", *Thoughtco*, (19 Kasım 2018), <https://www.thoughtco.com/what-is-rammed-earth-construction-177948>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [116] *Science20*, (2009), "Rammed Earth Ancient Building Technique Could Be In Our Eco-Friendly Future", (2 Haziran 2009), https://www.science20.com/news_articles/rammed_earth_ancient_building_technique_could_be_our_ecofriendly_future. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [117] Marie Conklin, Lisa; (2022), "What Is Rammed Earth Construction? A Green Way To Build a Stylish, Energy-Efficient Home", *Realtor*, (24 Haziran 2022), <https://www.realtor.com/advice/buy/what-is-rammed-earth-construction/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [118] Thukral, Chi; (2021), "THIS 3D PRINTED HOUSE IS MADE FROM A MIX OF SOIL, STRAW, SAND, AND OTHER SUSTAINABLE MATERIALS!", *Yanko Design*, (14 Nisan 2021), <https://www.yankodesign.com/2021/04/14/this-3d-printed-house-is-made-from-a-mix-of-soil-straw-sand-and-other-sustainable-materials/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [119] *BC Materials*, https://bcmaterials.org/en_3_home.html. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [120] *AG Chemical Group*, "How Nanotechnology Can Recycle Waste Plastic", <https://blog.agchemigroup.eu/how-nanotechnology-can-recycle-waste-plastic/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [121] *Nanochemi Group*, (2021), "Waste Plastic Makes Nanomaterial for Better Plastic and Concrete" <https://blog.nanochemigroup.cz/waste-plastic-makes-nanomaterial-for-better-plastic-and-concrete/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [122] Ray, Unmesh; (2019), "The Environmental Impact of Nanotechnology", *Azo Nano*, (4 Ocak 2019), <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5114#:~:text=Therefore%2C%20by%20detecting%20pollutants%20by,hazardous%20chemicals%20in%20water%20bodies>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [123] Alizad Oghyanous, Farid; (2021), "Nanoparticles in Wastewater Treatment", *intech Open*, (21 Eylül 2021), <https://www.intechopen.com/chapters/78696#:~:text=A%20nano%2Dmembrane%20is%20responsible,nanomaterials%20used%20as%20nano%2Dmembranes>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [124] Khan, Marzia; (2022), "The Environmental Impact of Graphene Nanomaterials", *Azo Nano*, (12 Temmuz 2022), <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6223>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [125] *Portugal Actual*, (2022), "Laboratório de Inovação Tecnológica Al-mascience lança produto digital baseado em papel", (31 Mayıs 2022), <https://www.portugal-actual.com/blog/params/post/4071811/laboratorio-inovacao-tecnologica-almascience-lanca-produto-digital-papel>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [126] FAIRCHILD, MARK; (2022), "Recycling Robots: How They Work & Are They Worth the Investment?", *How to Robot*, (18 Ocak 2022), <https://www.howtorobot.com/expert-insight/recycling-robots>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [127] Hayes, James; (2021), "AI-driven robotics key to recycling's challenges", *Engineering and Technology*, (15 Eylül 2021), <https://eandt.theiet.org/content/articles/2021/09/ai-driven-robotics-key-to-recycling-s-challenges/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [128] C, Amar; S, Onkar; (2022), "Waste Sorting Market Research, 2031", *Allied Market Research*, (Haziran 2022) <https://www.alliedmarketresearch.com/waste-sorting-robots-market-A08250#:~:text=The%20global%20waste%20sorting%20robots,part%20in%20almost%20every%20industry>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [129] Brant, John; (2022), "These Revolutionary Recycling Technologies Can Help Divert Climate Catastrophe", *Popular Mechanics*, (25 Ağustos 2022), <https://www.popularmechanics.com/technology/robots/a40823583/recycling-technologies-climate-catastrophe/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [130] Cai, Kenrick; (2020), "Rise of the Recycling Robots", *Forbes*, (12 Kasım 2020), <https://www.forbes.com/sites/kenrickcai/2020/11/12/rise-of-the-recycling-robots/?sh=74a1cbf465f9>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [131] *Plastri*, <https://plastri.fr/eng/home/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [132] Secon, Holly; (2022), "Textile recycling tech startup triumphs in Circularity 22's Accelerate competition", *Greenbiz*, (20 Mayıs 2022), <https://www.greenbiz.com/article/textile-recycling-tech-startup-triumphs-circularity-22s-accelerate-competition>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [133] Hirsh, Sophie; (2019), "This new system could change how we recycle", *Dünya Ekonomik Forumu*, (20 Şubat 2019), <https://www.weforum.org/agenda/2019/02/ibm-develops-innovative-recycling-system-for-fabric-dirty-plastic-bottles-and-more/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [134] re:3D, (2020), "Trash to Treasure: from Reverse Pitch to ReStore", (24 Haziran 2020), <https://re3d.org/trash-to-treasure-from-reverse-pitch-to-restore/>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [135] *superbin*, "Nephron", <https://www.superbin.co.kr/en/company/nephron>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)
- [136] *Big Rentz*, (2021), "8 Innovative Smart Waste Management Technologies", (15 Ekim 2021), <https://www.bigrentz.com/blog/smart-waste-management>. (Erişim Tarihi: 25 Kasım 2022)



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

