



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli



Şubat 2025

İçindekiler Tablosu

1. GİRİŞ	4
2. TEKSTİL ARTIĞI/ATIĞI SINIFLANDIRILMASI	7
3. ÜRETİLEN TEKSTİL ATIKLARI MİKTARI	9
4. TEKSTİL ATIKLARININ YOĞUNLUĞU	13
5. TEKSTİL ATIKLARINI AKILLI TOPLAMA SİSTEMİ	15
6. TEKSTİLDE İKİNCİ EL	18
7. TEKSTİL ATIKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	22
7.1. KULLANILMIŞ GİYSİLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ.....	22
8. GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ	25
8.1. MEKANİK GERİ DÖNÜŞÜM.....	25
8.1.1. Tekstil Atıklarının Parçalanması.....	26
8.1.2. Sert Atıkların Ayrılması.....	27
8.1.3. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Harmanlanması.....	27
8.1.4. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Yırtma Makinelerine Hazırlanması ve Teslimi.....	27
8.1.5. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Yırılması.....	27
8.1.6. İşlenmiş Geri Dönüştürülmüş Elyafların Son Preslenmesi.....	28
8.1.7. Toz Toplama ve Filtreleme.....	28
8.2. KİMYASAL GERİ DÖNÜŞÜM.....	31
8.3. BİYOLOJİK GERİ DÖNÜŞÜM.....	34
8.4. KOMPOSTLAMA.....	35
8.5. TERMAL GERİ DÖNÜŞÜM.....	37
8.5.1. Piroliz.....	38
8.5.2. Gazlaştırma.....	40
8.6. HİDROTERMAL SIVILAŞTIRMA.....	40
8.7. PLAZMA ARK GAZLAŞTIRMASI.....	41
8.8. ENERJİ GERİ KAZANIMI.....	42
9. DÜZENLİ DEPOLAMA	44
10. KAYNAKLAR	47

Şekiller ve Tablolar

Şekil 1-1: 2019 Yılında Küresel Elyaf Üretim Payı.....	5
Şekil 1-2: 2020 Yılında Küresel Elyaf Üretim Payı.....	6
Şekil 2-1: Tüketim Öncesi, İlk Kategori, Tekstil Atıkları Yönetimi Örneği.....	7
Şekil 2-2: Tüketim Sonrası, İkinci Kategori, Tekstil Atıkları Yönetimi Örneği.....	8



Şekil 3-1: Giyim Üretiminin Tüketime Kadar Olan Farklı Aşamalarının Şematik Gösterimi ve Her Aşamadaki Çevresel Etkileri – Değiştirilmiş Şekilde Yeniden Basılmış	9
Şekil 3-2: AB Ülkelerinde Her Bir Vatandaş Giysi ve Ayakkabı Sağlanmasında	10
Şekil 3-3: Tekstil Atıkları	11
Şekil 4-1: Tekstil Atıklarını Balyalama Ekipmanı	14
Şekil 5-1: Akıllı Tekstil Atığı Toplama Bankaları	15
Şekil 5-2: Tekstil Veri Toplamada Blockchain, IoT ve Mobil Uygulamaların Entegrasyonu.	16
Şekil 6-1: Dünya Çapında 2021'den 2028'e İkinci El Giyim Pazarı Değeri (Milyar Dolar).....	19
Şekil 7-1: Tüketici Sonrası Tekstil Atıklarının Değerlendirilmesi İçin Çeşitli Çözümler	22
Şekil 7-2: Isı ve Oksijene Bağlı Olarak Termal Dönüşüm	23
Şekil 8-1: Hammaddeden Bertarafa Kadar Tekstil Atıklarının Akışı.....	25
Şekil 8-2: GSD Serisi Çift Rotorlu İnce Öğütücünün Bıçaklı Rotorları	27
Şekil 8-3: Yünlü ve Pamuklu Tekstil Atıklarının Geri Dönüşümü.....	29
Şekil 8-4: Tekstillerin Kapalı ve Açık Devre Mekanik Geri Dönüşümü.	30
Şekil 8-5: Kullanılmış Kıyafetlerden Üretilen Ekolojik İplikler.....	31
Şekil 8-6: Pamuğun Kimyasal Geri Dönüşüm Teknolojileri.....	32
Şekil 9-1: Tekstil Atıklarını Depolama.....	44
Şekil 9-2: Tekstil Atıkları Dağları.....	46
Tablo 8.1. Tekstil Atığı Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları	42
Tablo 8.2. Tekstil Atıklarının Kalorifik Özelliği	42
Resim 1. Tekstil İkinci El.....	20



1. GİRİŞ

Tekstil endüstrisi küreseldir. Tekstil endüstrisi dünya çapındaki atıkların yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır.

'Al, Kullan ve At' doğrusal ekonomi sistemi tekstil atığı oluşmasını teşvik etmektedir. Bir giysinin kullanılmayı bırakmadan önce ortalama kaç kez giyildiği - 15 yıl öncesine göre %36 oranında azalmıştır.

Giymeye devam edilebilecek giysileri bir kenara bırakıyorlar ve bazı giysilerin sadece yedi ila on kez giyildikten sonra çöpe atıldığı tahmin ediliyor.

Giyim, toplam tekstil pazarının %60'ından fazlasını temsil etmektedir. Moda endüstrisi muazzam miktarda atık üretmektedir. Tekstil sektörü küresel GSYİH'nın %2'sinden fazlasına (3.000 milyar dolar) katkıda bulunurken, kişi başına ortalama yıllık dünya çapında tüketim neredeyse iki katına çıkarak 7 kg'dan 13 kg'a çıkmıştır.

Küresel çapta tekstil elyafı üretim hacmi 1975 yılında yaklaşık 23,9 milyon metrik ton (MMT) iken, 2017 yılında 98,5 MMT'ye, 2019 yılında yaklaşık 111 MMT'a, 2022 yılında 116 milyon tona ve mevcut eğilimlerin devam etmesi halinde bu rakamın 2030 yılına kadar 148 milyon tona yükselmesi beklenmektedir.

Tekstil sektörü (üretim, imalat ve bertaraf yaşam döngüleri boyunca) yılda 1,2 milyar tondan fazla CO₂ emisyonundan veya küresel toplam sera gazı emisyonununun %8'inden sorumludur.

Tekstil liflerinin %63'ü petrokimya ürünlerinden elde edilmektedir. Geriye kalan %37'si ağırlıklı olarak pamuk bazlı ürünlerdir.

Dünyadaki pestisitlerin yaklaşık %11'i ve böcek ilaçlarının %24'ü geleneksel pamuk yetiştirmek için kullanılmaktadır. Dünya çapında kullanılan tüm herbisitlerin yaklaşık %7'si pamuk yetiştirme sürecinde kullanılmaktadır.

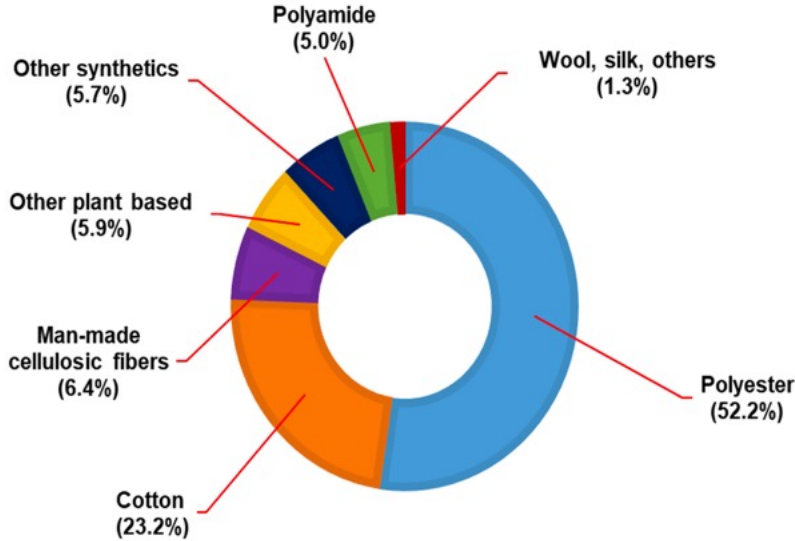
Tarımsal pestisitlerin aşırı kullanımı toprağın verimliliğini ve kalitesini azaltır ve biyolojik çeşitliliği ve mikroorganizmaları yok ederek toprağın biyolojik süreçlerini bozar.

Pamuklu tekstil su yoğun üretimdir ve kirlilikle ilişkili su yoğun bir üründür.

2017'deki küresel elyaf tüketimi %60 sentetik elyaf veya polyester/pamuk karışımı (polycotton) ve %40 selülozdan oluşuyor ki bu çoğu tekstilin tipik örneğidir. Yine de 2019'daki küresel elyaf pazarı polyester ve pamuk tarafından domine edildi (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**). Bu rakamlardan, tekstil atık yönetiminin tekstil endüstrisi, politika yapıcılar ve tüketiciler için muazzam zorluklar sunan kritik bir konu olduğu açıktır.

Sentetik lifler dünyada üretilen tüm liflerin %75'ini ve Türkiye dahil Avrupa'daki liflerin yaklaşık %80'ini oluşturur.





Şekil 1-1: 2019 Yılında Küresel Elyaf Üretim Payı

Bu tekstil liflerinin dünya üretimi 2021'de 113 milyon tondu. Giyim üretimi için en önemli sentetik lif, toplam lif üretiminin en büyük payını (%54) oluşturan polietilen tereftalattır (PET).

Ellen MacArthur Vakfı'na göre, küresel olarak her yıl tahmini 114 milyon ton tekstil atığı üretiliyor. Her yıl küresel olarak geri dönüşüm için yaklaşık 14 milyon ton giysi toplanıyor ve bunların yalnızca %12'si yalıtım gibi daha düşük kaliteli ürünlere dönüştürülüyor ve %1'den azı kapalı devre bir ekonomide yeni giysiler yapmak için kullanılıyor.

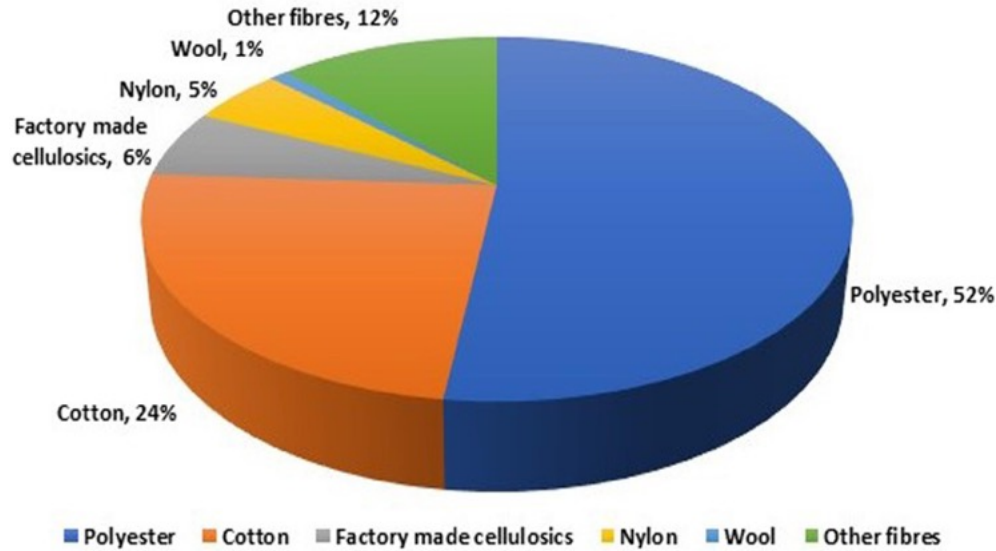
Tekstil endüstrisinde kullanılan en yaygın sentetik elyaflardan biri olan poliamidin 1 kg'ının üretimi için yaklaşık 160 kWh enerji kullanılmaktadır; enerji yoğun üretimdir.

Polyester, petrokimyasallardan üretilir ve çoğunlukla yenilenemeyen kaynaklardan sağlanan çok fazla enerji kullanılır. Aynı şekilde, naylon elyafların üretiminde sera gazı emisyonları ve partikül madde dahil olmak üzere zararlı çevre kirleticileri atmosfere salınır.

Küresel ölçekte tekstil atığı bileşimi **Şekil 1-2'**de verilmiştir.



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli



Şekil 1-2: 2020 Yılında Küresel Elyaf Üretim Payı.

Kaliforniya, çöp sahası atıklarını azaltmak için önemli tekstil geri dönüşüm yasasını yürürlüğe koydu. Kaliforniya, zorunlu giysi geri dönüşüm programını uygulayan ilk eyalet olmuştur.

2020'de, AB-27'de kullanılmış tekstillerin ayrı toplanması 1,7 ila 2,1 milyon ton aralığındaydı. 2025'ten sonraki tahminler, ayrı tekstil toplamalarında yılda 65.000 ila 90.000 tonluk bir yıllık artış öngörüyor.

“AB Üye Devletleri, 2025 yılından itibaren tekstiller için ayrı toplama sistemleri uygulamak zorundadır.” Avrupa Direktifi AB 2018. Piyasaya sürenler sorumluluğunda bu yapılacak.

Sentetik lifler dünyada üretilen tüm liflerin %75'ini ve Türkiye dahil Avrupa'daki liflerin yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Sentetik liflerin dünya genelinde üretimi 2021'de 113 milyon tondur.

Giyim sanayi üretimi için en önemli sentetik lif, toplam lif üretiminin en büyük payını (%54) oluşturan polietilen tereftalattır (PET).

Yeniden kullanılan bir pamuklu tişörtün karbon ayak izi, yeni bir tişörtün karbon ayak izinden yaklaşık 60 kat daha küçüktür.



2. TEKSTİL ARTIĞI/ATIĞI SINIFLANDIRILMASI

Tekstil atıkları genellikle tüketici öncesi, tüketici sonrası artık/atık olarak sınıflandırılır.

İlk kategori, tüketici öncesi tekstil artığı, tekstillerin üretimi, imalatı veya işlenmesi sırasında oluşur ve genellikle kumaş artıkları, iplikler veya reddedilen kusurlu ürünleri içerir. Lifli malzeme üretiminin bir yan ürünüdür, kırıntı artıklarıdır ve temiz atık olarak kabul edilir.

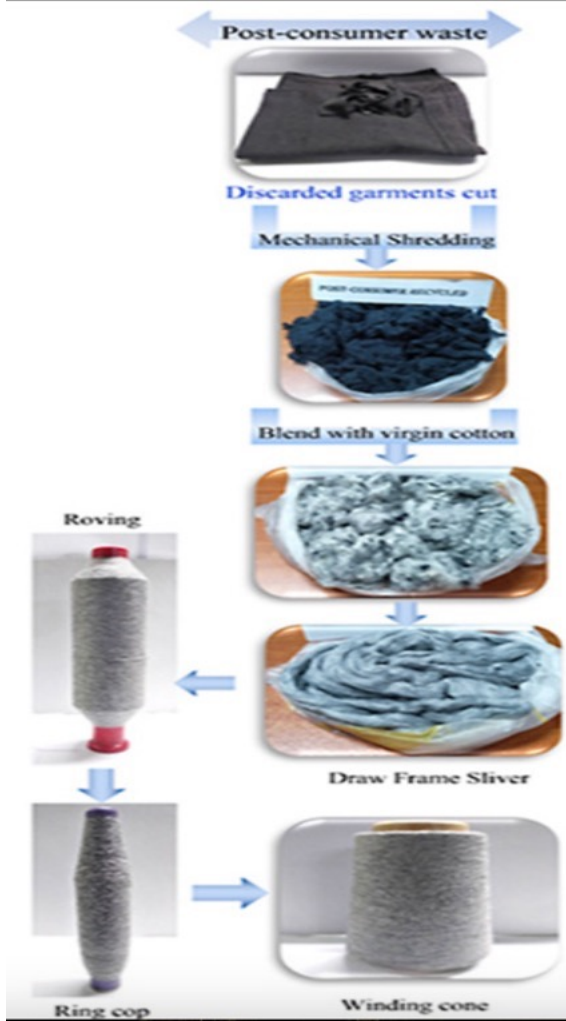
İlk kategori, lifli malzeme üretiminin bir yan ürünüdür ve temiz atık olarak kabul edilir. Tüketici öncesi tekstil artığı ayrıca satılmamış envanteri ve satışlardan iade edilenleri de içerir. Bu atık, biyolojik olarak parçalanabilen kumaş artıkları, elyaf tüyleri, elyaf artıkları ve iplik artıklarından oluşur. Bu nedenle, yeni hammaddeler oluşturmak için geri dönüştürülebilirler veya doğal koşullar altında parçalanabilirler.



Şekil 2-1: Tüketim Öncesi, İlk Kategori, Tekstil Atıkları Yönetimi Örneği

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

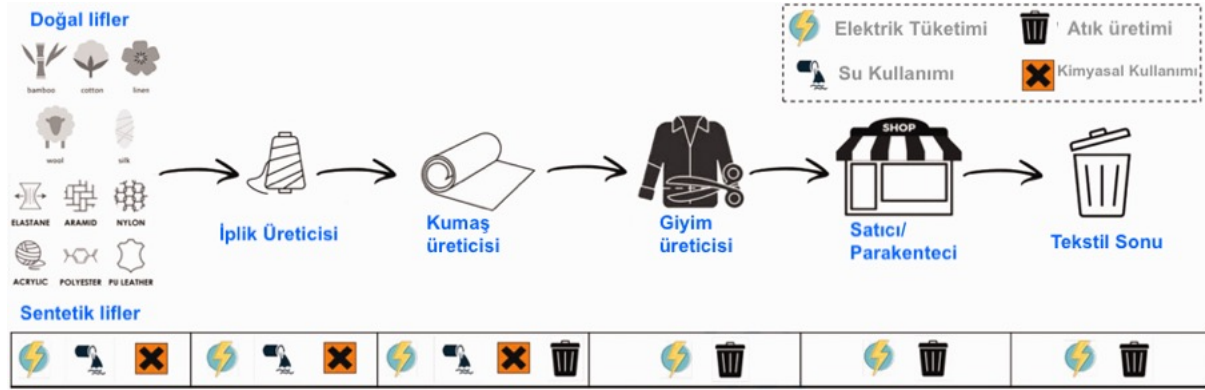
İkinci kategori, tüketici sonrası tekstil atığı, kullanılmış (atılmış) giysiler, yastık kılıfları, çarşaflar ve havlular gibi atık bozuldukları için değerli kabul edilmeyen ev tekstillerinden oluşur. Son olarak, ticari ve endüstriyel kaynaklardan kaynaklanabilen endüstriyel tekstil atığı, kirli atık olarak kabul edilir.



Şekil 2-2: Tüketim Sonrası, İkinci Kategori, Tekstil Atıkları Yönetimi Örneği

3. ÜRETİLEN TEKSTİL ATIKLARI MİKTARI

Tekstil endüstrisinin çeşitli sektörlerinde, elyaf üretmekten giyime (ve diğer ürünlere) kadar, su, kimyasallar, enerji tüketilir ve atık üretilir. **Şekil 3-1**, giyim yaşam döngüsündeki her bir ana aşamayla ilişkili bu dört parametreyi göstermektedir. Tekstil endüstrilerinin en önemli çevresel etkileri arasında karbondioksit (CO₂), su, kimyasal ve elyaf kirliliği yer almaktadır.



Şekil 3-1: Giyim Üretiminin Tüketime Kadar Olan Farklı Aşamalarının Şematik Gösterimi ve Her Aşamadaki Çevresel Etkileri – Değiştirilmiş Şekilde Yeniden Basılmış

Dünyadaki giysilerin yaklaşık üçte ikisi Çin'de üretilmektedir.

AB'deki giyim ve ayakkabı, ev tekstili, teknik tekstiller ve endüstri sonrası ve tüketici öncesi atıklar gibi toplam tekstil atığı 2019 yılında 12,6 milyon ton (Mt) olarak gerçekleştir. Giyim ve ayakkabı atığı ise 5,2 Mt (12 kg/(kişi-yıl)) olarak gerçekleştir.

2020 yılında, AB27'de toplam 1,95 milyon ton tekstil atığı ayrı olarak toplanmıştır. Bu, kişi başına 4,4 kilograma denk gelmektedir.

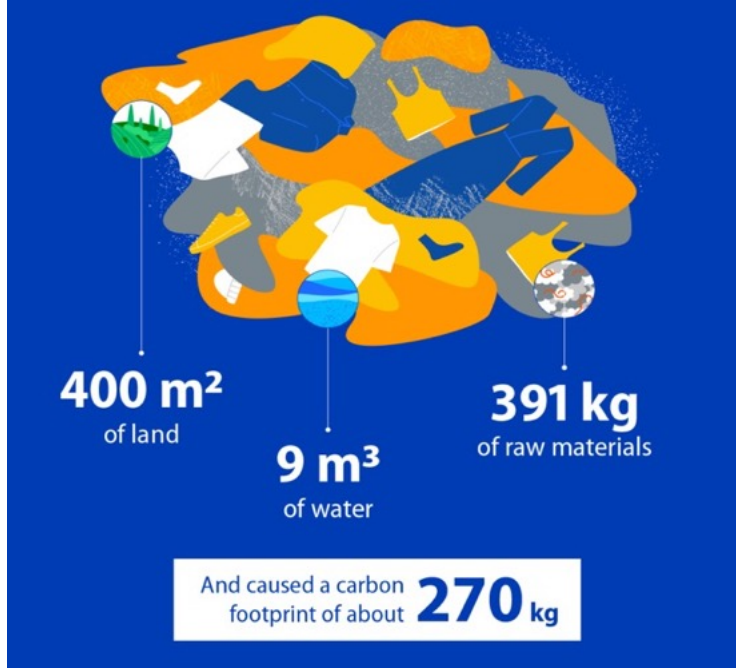
AB27'de ortalama olarak, tüketici sonrası atıklar, evsel ve evsel olmayan kaynaklarla birlikte üretilen tüm tekstil atıklarının %82'sini oluştururken, bunu sanayi sonrası atıklar (%17) ve tüketici öncesi atıklar (%1) takip etmektedir.

AB27'de tekstil atıkları en yüksek toplama oranına sahip ülkeler Lüksemburg (%50) ve Belçika (%50) olup, bu ülkeleri Hollanda (%37) ve Avusturya (%30) takip etmektedir.

Pamuk üretiminde önemli miktarda su tüketilir; dünyadaki toplam su tüketiminin yaklaşık %2,6'sı pamuk üretimine kullanılmaktadır. Yalnızca tekstil üretiminde sulama için yıllık yaklaşık 44 trilyon litre su kullanımına eşdeğerdir.

Her bir AB vatandaşına giysi ve ayakkabı sağlamak için ortalama 9 metreküp su, 400 metrekare arazi ve 391 kilogram (kg) hammadde gerekiyor. Ve kişi başına 270 kg sera gazı karbon emisyonu sebep oluyor. Bu, AB'de tüketilen tekstil ürünlerinin 121 milyon ton sera gazı emisyonu ürettiği anlamına geliyor (**Şekil 3-2**).

Sentetik tekstiller, üretilen her ton tekstil için yaklaşık 15-35 ton karbondioksit (CO₂) eşdeğeri üreterek önemli bir karbon ayak izine sahiptir. Sadece Avrupa'da, 2017 yılında giyim, ayakkabı ve ev tekstili üretimi ve işlenmesinden kişi başına 654 kg CO₂ eşdeğeri emisyon kaydedilmiştir.



Şekil 3-2: AB Ülkelerinde Her Bir Vatandaş Giysi ve Ayakkabı Sağlanmasında

Küresel düzeyde, tekstil atığının yaklaşık %75'i çöplüklerde bertaraf ediliyor, %25'i yeniden kullanılıyor veya geri dönüştürülüyor ve tüm tekstilin %1'den azı giyim için geri dönüştürülüyor.

Avrupa ülkeleri genelinde, giysilerin yalnızca %18'i yeniden kullanılıp geri dönüştürülürken, %30'u yakılıyor ve %70'lik önemli bir kısmı ise çöplüklere gönderiliyor.

Tekstil atıkları önemli çevresel sorunlar oluşturmaktadır. Tekstil ürünlerinin çoğu polyester gibi petrolden elde edilen ve biyolojik olarak kolayca parçalanmayan sentetik elyaflardan yapılmaktadır.

AB üye devletlerinin belediye atıkları için yeniden kullanım ve geri dönüşüm hedefleri 2025 yılına kadar %55, 2030 yılına kadar %60 ve 2035 yılına kadar %65 olarak belirlenmiştir.

2030 yılına kadar AB pazarına sunulan tekstil ürünleri uzun ömürlü ve geri dönüştürülebilir, büyük ölçüde geri dönüştürülmüş elyaftan yapılmış, tehlikeli maddeler içermeyen ve sosyal haklara ve çevreye saygılı olarak üretilmiş olacaktır.

Giysi kırpıntı artıkları, kullanılmış giysi atıkları, halılar, döşemeler, yataklar, yorganlar, perdeler, mobilyalar, koruyucu ekipman, otomobil sanayi atıkları ve üretim artıkları gibi sekiz farklı atık akışı özetlendiğinde, Avrupa Birliği'nde düzenli depolanan veya yakılan toplam tekstil miktarı yılda 9,35 milyon ton olarak hesaplanmıştır.

Toplam tekstil atığının %82'si tüketici sonrası atıktır. Geri kalanı ise üretimden veya satılmayan tekstillerden kaynaklanan tekstil atıklarıdır.

ABD'deki tüm tekstillerin yaklaşık %85'i çöplüklere atılmakta ve yalnızca %15'i bağışlanmakta veya geri dönüştürülmektedir.



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Amerika Birleşik Devletleri'nde, 2018'de tekstil atığı üretimi 17 milyon tona ulaşmıştır. Tekstil atıkları belediye katı atıklarının yaklaşık %5,8'sini oluşturmaktadır. Bu atığın yalnızca küçük bir kısmı, yaklaşık %15'i geri dönüştürülmekte ve çoğunluğu çöplüklerde son bulmakta veya yakılmakta, çevresel bozulmaya ve kaynak israfına katkıda bulunmaktadır.

Hindistan'da her yıl 7,8 milyon ton tekstil atığı oluşmaktadır.

Tek başına moda endüstrisinin, giysi üretimi için büyük miktarda su, enerji ve kimyasal tüketiminden sorumlu ve küresel atıksuyun %20'si tekstil boyama ve terbiye işlemi sonucu oluşuyor. Tekstil sanayi su yoğun sektördür.

Tekstil üretimi, önemli miktarda su, enerji ve kimyasal kullanımı ile kaynak yoğundur. Bir pamuklu tişört veya gömlek üretmek için tahmini olarak 2.700 litreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da bir kişinin 2,5 yıllık içme ihtiyacına karşılık gelmektedir.

Tekstil üretimde kullanılan boyalar ve kimyasallar nedeniyle endüstriyel su kirliliğine ciddi oranda katkıda bulunmaktadır.

Global ölçekte tekstil üretimi esnasında yılda 93 milyar metreküp su tüketiyor ve bunun büyük bir kısmı toksik kimyasallarla kirleniyor.

Modern giysilerin çoğu polyester gibi esasen plastik olan sentetik liflerden yapılmaktadır. Sentetik polimer esaslı tekstil atıkların doğada çok uzun yıllar bozulmadan kalırlar ve çöp depolama alanlarının ömrünü kısaltırlar. Tekstil ürünlerinin çöp sahalarında ayrışması 200 yıldan fazla sürebilir. Tekstil atıklarının ayrışması sırasında zehirli kimyasalların toprağa ve suya sızmasına neden olur, çevrede uzun vadeli kirliliğe neden olur ve çevreye mikroplastikler ve kimyasallar yayar. Bunlar kolayca biyolojik olarak parçalanmaz ve okyanuslarda mikroplastik kirliliğine katkıda bulunur.



Şekil 3-3: Tekstil Atıkları

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Sentetik tekstillerin yıkanması, her yıl okyanuslarda yarım milyon tondan fazla mikroplastığın birikmesine yol açmaktadır. Bu küresel soruna ek olarak, giyim üretiminin oluşturduğu kirliliğin, fabrikaların bulunduğu yerlerdeki yerel halkın, hayvanların ve ekosistemlerin sağlığı üzerinde yıkıcı bir etkisi var. Bu mikroplastikler deniz ekosistemlerine büyük zarar verir ve hatta besin zincirine girer.

Polyester çamaşırlardan oluşan tek bir çamaşır yükü, besin zincirine karışabilen 700.000 mikroplastik lifin dışarı atılmasına neden olabilir.

Sentetik esaslı tekstillerdeki mikroplastiklerin çoğu ilk birkaç yıkamada açığa çıkar. Hızlı moda, seri üretime, düşük fiyatlara ve birçok ilk yıkamayı teşvik eden yüksek satış hacimlerine dayanır.

Giysilerin yetersiz kullanımı ve geri dönüşüm eksikliği nedeniyle küresel olarak her yıl tahmini 500 milyar ABD doları değerindeki tekstili çöpe atmaktadır.

Sosyal olarak, tekstil atıklarının bertarafı sosyal eşitsizlikleri daha da artırmaktadır. Kullanılmış giysiler, ikinci el pazarlarında satılmadan önce, ayrıştırılmak, kategorize edilmek ve yeniden balyalanmak üzere gelişmiş ülkelerden düşük ve orta gelirli ülkelere gönderiliyor ve bu işlemler genellikle düşük ücretli işçiler tarafından gerçekleştiriliyor.

Bir kısmı pazarlara ulaşamayan giysiler katı atık olarak ele alınıyor, böylece düşük ve orta gelirli ülkelerin evsel atık sistemlerine yük bindirirken daha fazla çevresel sağlık tehlikesi getiriyor.

Üretilen toplam tekstil atığı miktarına ilişkin daha eksiksiz bir genel bakış elde etmek için, karışık belediye atığı fraksiyonundaki tekstil miktarının da dikkate alınması gerekmektedir.

Her yıl üretilen giysilerin %40'ı kadarı (60 milyar giysi) satılmıyor.

Tekstil atıklarını çöplüklere göndermekten alıkoymak için tekstil atıkları için yeniden kullanım ve geri dönüşüm teknolojilerini geliştirmek hayati önem taşımaktadır.

Küresel yapay tekstiller sorunu daha da kötüleştiriyor; tüm giysilerin yaklaşık %60'ı polyester, akrilik ve naylon gibi sentetik malzemelerden üretiliyor ve bunların hepsi plastikten üretilmektedir.



4. TEKSTİL ATIKLARININ YOĞUNLUĞU

Tekstil ürünlerinin, artıklarının ve atıklarının yoğunluğu 40 ila 68 kg/m³ arasında değişmektedir. Normal evsel atıkların (sıkıştırılmamış) yoğunluğu ise 500 kg/m³. Bunun anlamı tekstil atıkları kuru bazda (ki öyle olması lazım) yoğunluğu, evsel atıkların yoğunluğundan 10 kat daha düşüktür.

Sıkıştırılmamış, kullanılmış tekstil atıklarının yoğunluğunu yaklaşık 133,5 kg/m³'dur.

Sıkıştırılmış tekstil atıklarının yoğunluğu ise yaklaşık 265 kg/m³'tür. Yani sıkıştırma sonucu tekstil atıklarının yoğunluğu iki kat artırılabilir.

Toplama ve taşıma esnasında birim hacimde oldukça hafif olan tekstil artıkları, kırıntıları ve atıkları taşıma maliyeti çok yüksek olur. Bu yüzden tekstil artıkları, kırıntıları ve atıkları taşıma maliyetlerini düşürmek, kirlenmeyi önlemek, iş gücü kaybını ve alan gereksinimlerini azaltmak için ara sıkıştırma, balyalama, merkezleri oluşturmak ve akıllı taşıma sistemine geçmekte yarar vardır. Tekstil artıklarını, kırıntılarını ve atıklarını balyalama yaparak, hacmi azaltılır ve işyeri verimliliği artırılır.

Doğru balya makinesini seçmek, malzeme türü, hacim ve mevcut alan gibi faktörlere bağlıdır.

Uygun balya sıkıştırma, geçici depolama ve taşıma süreçlerini optimize etmek için hayati önem taşır.

Tekstil artıkların, kırıntıların ve atıkların yoğunluklarını artırmak için;

1. Hidrolik Sıkıştırıcılar
2. Pnömatik Sıkıştırma Sistemleri
3. Robotik Sıkıştırma
4. Yüksek Basınçlı Sıkıştırma
5. Gelişmiş Sarma Çözümleri

metotlarından biri ile sıkıştırma-balyalama yapılır.

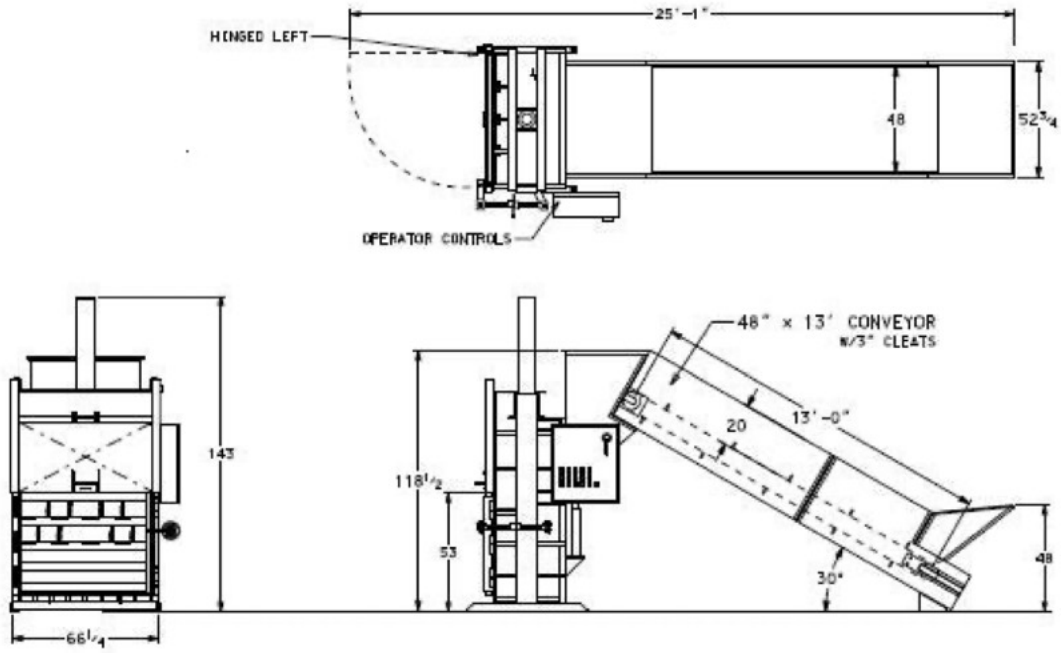
Konveyör bantları, besleme hunileri ve sıkıştırma odaları gibi gelişmiş özelliklerle tekstil balyalama makineleri büyük hacimli atıkların verimli bir şekilde işlenmesini sağlar. İşlem, atıkların besleme hunisi aracılığıyla makineye beslenmesiyle başlar. Konveyör bant daha sonra atığı sıkıştırma odasına taşır ve burada hidrolik veya mekanik basınç kullanılarak sıkıştırılır. Yeterince sıkıştırıldıktan sonra, makine atığı dayanıklı kayışlarla sarar ve sıkıca sıkıştırılmış bir balyaya sabitler. Tüm bu işlem hızlı bir şekilde gerçekleştirilir ve minimum manuel müdahale gerektirir, bu da tekstil atık yönetimi operasyonları için zamandan ve emekten tasarruf sağlar.

Özetle, tekstil artığını, kırıntısını ve atığını balyalama işlemi genel olarak besleme, sıkıştırma, balyalama ve çıktı halinde çalışır.

Günlük sıkıştırma tesisine gelecek tekstil atık miktarına bağlı olarak balyalama makinesi ve tesisi kapasitesi belirlenir.



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli



Şekil 4-1: Tekstil Atıklarının Balyalama Ekipmanı



5. TEKSTİL ATIKLARINI AKILLI TOPLAMA SİSTEMİ

Tekstil atıklarının toplanması iki unsurdan oluşur:

- i. Bertaraf için toplama,
- ii. Geri dönüşüm için toplama.

İlk unsur, tekstil atıklarının çoğunun çöp olarak bertaraf edilmesini içerir ve bu atıklar ya bir çöp sahasında ya da bir yakma fırınında bertaraf edilir.

Optimize edilmiş bir toplama sistemi, yerel sıfır atık çözümlerinin uygulanmasını destekleyebilir.

ABD'de tekstil atıklarının toplanması ve bertarafının yıllık maliyetinin yalnızca 2020'de 4 milyar ABD doları olduğu tahmin ediliyor.

Şehirlerde kullanılmış tekstil giysileri ve atıkları toplama bankalarının (kumbaralarının) sayısı ve erişilebilirliği iyileştirilmelidir. Belediyeler, yardım kuruluşlarıyla işbirliği yaparak, örneğin kağıt, cam, plastik ve metal (geri dönüşüm istasyonları) gibi geri dönüşüm için bankalarının (kumbaralarının) bulunduğu yerlere ve diğer erişilebilir yerlere kullanılmış giyim ve tekstil atığı için toplama bankaları yerleştirmelidir. Sokaklarda kesinlikle çöp konteynirleri olmamalı.

Toplama bankaları ayrıca çok aileli konutlara ve yerleşim alanlarının yakınlarına da yerleştirilebilir. Zorluk, bankalar için en uygun yerleri bulmak ve bunları yerleştirmek için mülk sahiplerinden izin almaktır. Bu nedenle, ev ile bırakma noktası arasındaki mesafe yürünebilir mesafede olmalıdır.



Şekil 5-1: Akıllı Tekstil Atığı Toplama Bankaları

Kullanılmış tekstiller, farklı bankalarda düzensiz bir oranda birikir ve bu da dolmadan önce geçen sürede büyük dalgalanmalara yol açar. Bu dalgalanmalar ve bazı mevsimsellikler nedeniyle, bankaları boşaltma sıklığı, bankaların taşmasını önlemek için verimsiz bir şekilde yüksektir.

Tekstil bankaların akıllı izlenmesi, kullanılmış tekstillerin yüksek oranda toplanmasını sağlamada önemli bir rol oynayan tekstil toplama tedarik zincirlerinin verimliliğini artıracaktır. Bu amaçla, bankalarda Nesnelere İnterneti (IoT) ve yapay zeka (AI) gibi modern teknolojiler, toplama verimliliğinin artırılması için yeni olanaklar sunmaktadır.

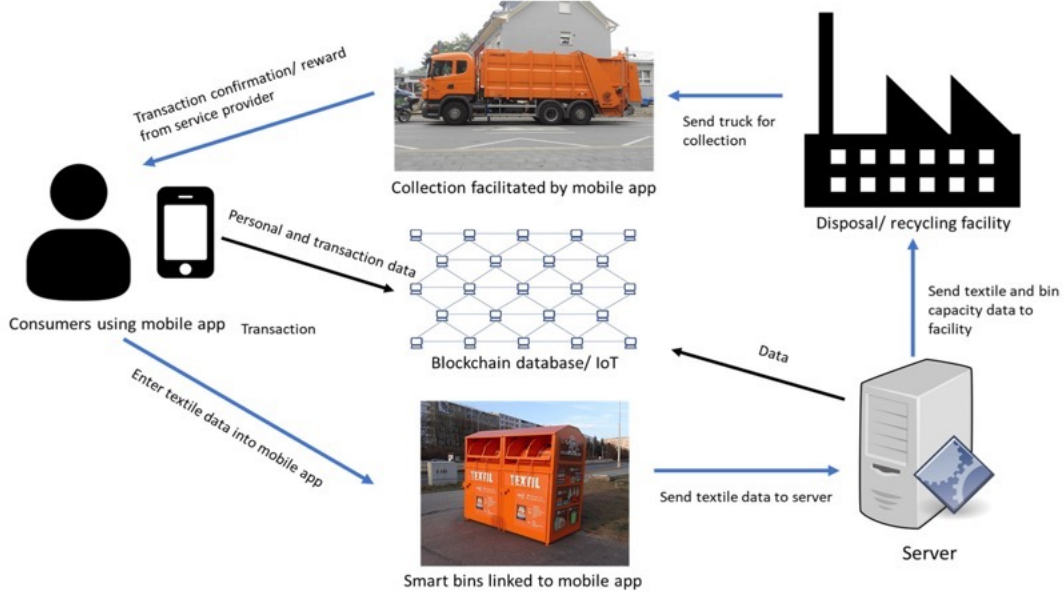


Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Sensör teknolojileri rota planlama ve kutularda biriken kullanılmış tekstillerin öngörülmesi için karar vermeye destekler. Tekstil atıklarının toplanması için akıllı bankaların tanıtımı, genel sistemin verimliliğini artırmak için bir rota optimizasyon sistemiyle birleştirilebilir.

Sensör tabanlı toplamanın kullanımı, geleneksel bir sisteme kıyasla maliyetleri %7,4 ve CO₂ emisyonlarını %10,2 oranında azaltır.

Evel atık durumunda, dizel tüketiminin 10 Lt/ton'a kadar olduğu bildirilmektedir, bu da yaklaşık 0,35 GJ/ton'a karşılık gelir. İkinci el tekstiller için toplam enerji talebi (bunların nakliyesi, ayıklanması, paketlenmesi vb.) 6 GJ/ton mertebesindedir. Ancak bu, üretimi için gereken ve 330 GJ/ton'a kadar ulaşan enerji talebiyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 5-2: Tekstil Veri Toplamada Blockchain, IoT ve Mobil Uygulamaların Entegrasyonu.

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve büyük veri, tekstil atıklarının etkili bir şekilde tanımlanmasını ve toplanmasını sağlamak için önerilmiştir. Örneğin, akıllı etiketler veya sensörler, konumlarını, kullanımlarını ve durumlarını izlemek için tekstil ürünlerine takılabilir. Bu, toplama rotalarını optimize etmeye, nakliye maliyetlerini düşürmeye ve tekstil atıklarının geri kazanım oranını artırmaya yardımcı olabilir.

IoT sensörleri, toplama rotalarının optimizasyonu için tekstil atığı konteynerlerinin alan kullanılabilirliğinin gerçek zamanlı izlenmesini sağlar (**Şekil 5-2**).

Ek olarak, radyo frekansı tanımlamasının izlenmesi ve kullanılmış tekstillerin miktarı, türü ve konumu hakkında girdi elde etmek için sensörler ve kameraların kullanımı yoluyla atık toplama optimizasyonuna katkıda bulunurlar. Bu, atık toplama ile ilişkili nakliye maliyetlerini, yakıt tüketimini ve sera gazı emisyonlarını düşürmeye yardımcı olur. Büyük veriler ayrıca kullanılmış tekstillerin arz ve talebini analiz etmek ve atık toplayıcıları geri dönüştürücülerle eşleştirmek için de kullanılabilir (**Şekil 5-2**). Özellikle kullanılmış tekstil toplama verimliliği ve etkinliği, atık üretimi, toplanması ve bertarafına ilişkin gerçek zamanlı verilerin tahmini analizlere ve karar

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

destek araçlarına aktarılmasıyla artırılır ve toplama rotaları, programları ve yöntemleri planlanır ve optimize edilir.

Kısaca, hem IoT hem de büyük veri, kullanılmış tekstil akışlarının ve toplayıcılarının performansının izlenebilirliğini, doğrulanmasını ve raporlanmasını sağlayarak atık toplama hizmetlerinin kalitesini ve güvenilirliğini artırırken yasadışı dökümü en aza indirir. Ancak, IoT ve büyük verinin işleyişi, maliyeti ve bakımı gelişmekte olan ülkeler için zorlayıcı olabilecek iyi kurulmuş altyapı, bağlantı ve güvenlik gerektirir, çünkü tekstil endüstrisinde genellikle düzenlemeler yoktur. IoT ve büyük veri, girdi verilerinin kullanılabilirliğine ve kalitesine, algoritmaların doğruluğuna, güvenilirliğine, çözümlerin uygulanabilirliğine ve ölçeklenebilirliğine dayanır, bunlar olmadan zaten hafif olan tekstil atıklarını yönetmedeki etkinlikleri tehlikeye girebilir.

Kirlenmeyi en aza indirmek için, mobil toplama ve kapıdan kapıya toplama veya izlenen/denetlenen toplama noktaları en iyi sonuçları vermektedir. Kapıdan kapıya toplama sistemlerini işletmek daha yüksek maliyetlere yol açsa da, bu, yeniden kullanılabilir giysilerin daha yüksek bir değere sahip olması ve atılacak çok daha az karışık atık olmasıyla telafi edilebilir. Ancak, kanıtlar, tekstil ürünlerinin kapıdan kapıya toplanmasının kağıt gibi diğer kuru geri dönüştürülebilir ürünlerle birleştirilmesinin kaldırım kenarı toplama kaplarından hırsızlığa yol açabileceğini ve izlenmesinin daha zor olduğunu göstermektedir. Getirme banklarında kirlenmeyi önlemek için, sokaklarda çöp konteynırlarını kaldırmak veya sokaktaki atık konteynırlarından uzağa yerleştirilmeli ve bağışlar yalnızca mühürlü torbalarda teşvik edilmelidir. Kamuoyunun farkındalığını artırmak için yazarlar, vatandaşların ihtiyaçlarını yakalamak için uygulamadan önce bir anket yapılmasını öneriyor. Tüm toplama noktaları için ortak bir 'marka' kullanımı, farkındalığı ve şeffaflığı daha da artırabilir.

Kullanılmış tekstillerin toplanması, özellikle gelişmekte olan ülkelerde genellikle yetersiz, verimsiz ve düzensizdir ve bu da geri dönüşüm endüstrisi için kesintiye uğramış ve güvenilmez tekstil atığı akışlarına yol açar.



6. TEKSTİLDE İKİNCİ EL

İkinci el giyim tüketimi, ürünlerin yeniden kullanımı yoluyla kullanım ömrünü uzatarak döngüsel ekonomilere geçişi destekleyebilir.

İkinci el kıyafetlerin yeniden kullanılma etkisi, yeni kıyafetler üretmekten 70 kat daha azdır.

Kullanılmış tekstiller ve tekstil atıkları miktarı büyük ölçüde tüketici davranışına bağlıdır. Atıkların bertaraf edilmesini önlemek için, tekstil ürünleri mümkün olduğunca uzun süre kullanılmalı, ihtiyaç duyulduğunda onarılmalı veya ikincil bir işlev için kullanılmalıdır. Tüketiciler ayrıca sadece gerekli gördükleri, ihtiyaç duydukları, ürünleri satın almalıdır.

Müşterilerden toplanan kullanılmış giysilerin ömrünü uzatmak için etkili bir çözüm, giysi kiralama, ikinci el satış yerleri ve ikinci el alışveriş merkezleri oluşturulmalı.

Yeni bir yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), ikinci el giysilerin 70 kat daha az çevresel etkiye sahip olduğunu öne sürüyor.

Yeniden kullanılan her yüksek/orta kaliteli giysi için "muazzam" 3 kg CO₂ tasarrufu olarak tanımlıyor.

Kullanılmış giysileri değerlendirmenin bir başka yolu da onları ikinci el giysi olarak satmaktır ve ikinci el satış merkezleri kurmak ve kurulmasına yardımcı olmaktır. Sürdürülebilir tüketim kavramı, bu tür ticarete yönelik artan bir ilgi oluşturmakta ve ikinci el alışverişin yaygınlaşmasına yol açmaktadır. İkinci el giysilerin küresel ticareti son zamanlarda büyüyen bir iş haline gelmiştir. Süreç, farklı aktörler tarafından gerçekleştirilen bir dizi işlemi içermektedir.

Ayıklanan yeniden kullanılabilir ikinci el mallar farklı boyutlarda balyalar halinde paketlenmekte ve emtia komisyoncuları tarafından ihracat pazarlarına satılmaktadır. Tüccarlar genellikle bunları konteyner yüküyle satın almakta ve daha sonra balyalar halinde piyasada satmaktadır.

Kullanılmış giysilerin tüketicilere satışı ise yerel sokak pazarlarında gerçekleştirilmektedir.

Giysilerin ömrünün sadece 3 ay uzatılması, karbon ve su ayak izlerinin %5-10 oranında azalmasına yol açmaktadır. Yılda iki milyon ton giysinin geri dönüştürülmesi, çevresel etki olarak bir milyon otomobilin sokaklardan kaldırılmasına eşdeğerdir. Günümüzde ikinci el giysiler, özellikle gelir düzeyinin çok düşük olduğu gelişmekte olan ülkelerde takdir edilen bir metadır.

İkinci el giysi pazarı aslında yerel mevzuata bağlıdır; örneğin bazı ülkelerde, olası hastalık bulaşması ve yeterli kalite kontrolün yapılmaması nedeniyle bebek giysilerinin ikinci el olarak ithalatı ve kullanılması yasaklanmıştır. Ticari düzenlemelerle ilgili diğer talepler balya ağırlığı sınırları, mallar için sağlık sertifikası, aşınma ve yıpranma derecesi vb. ile ilgilidir.

İkinci el kıyafetler piyasaya sunulmadan önce kalite kontrolü, dezenfeksiyonu ve tamiratlarının yapılması esastır.

İkinci el kıyafetlerin satışı, ikinci el mağazaları, konsinye veya yeniden satış mağazaları ve ayrıca sürekli artan gelirler elde eden çevrimiçi mağazalar tarafından gerçekleştirilmektedir.

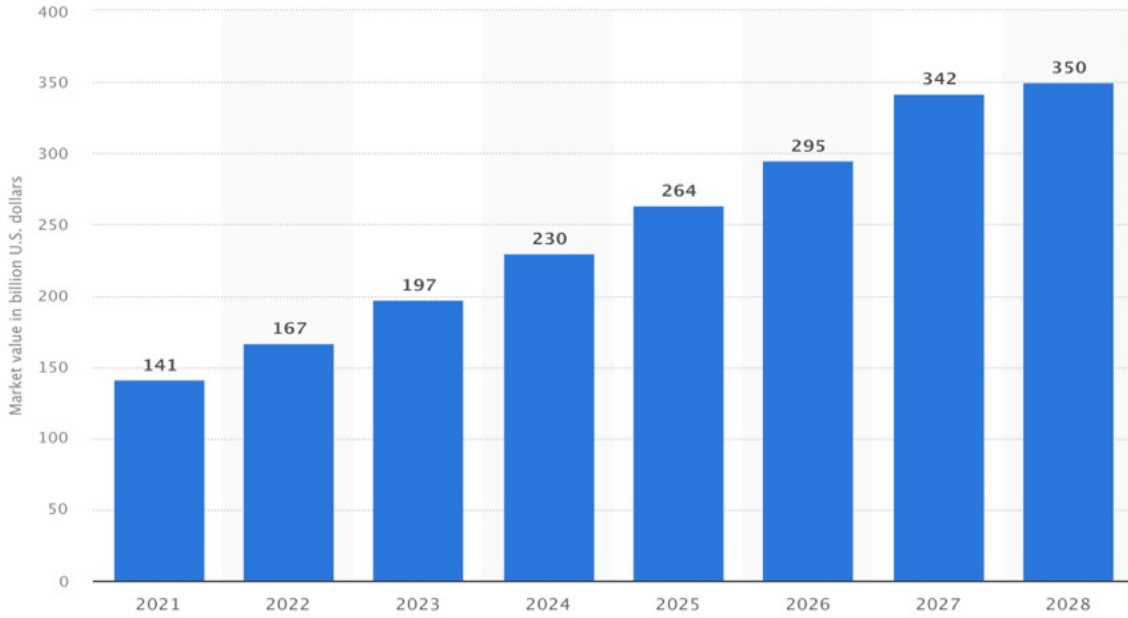


Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Günümüzde tüketiciler ikinci el alımlara değer vermeye başlamıştır; yapılan bir araştırma, kadınların en az %30'unun ikinci el kıyafetlerle 5 yıl öncesine göre daha fazla ilgilendiğini göstermektedir. Böyle bir davranışın ekonomi, stil algısı, ekolojik farkındalık, nostalji ve retro-moda zevki gibi farklı nedenleri vardır. Her zaman ekolojik nedenler baskın değildir. Bununla birlikte, ikinci el alışveriş dünya çapında gelişen bir olgudur. İkinci el alışverişini geliştirmek için tüketicilerin eğitimi şarttır. Bu faaliyetin sürdürülebilir kalkınmaya katkısının önemi vurgulanmalıdır.

İkinci el tekstil sektörünü güçlendirmek ve geliştirmek gerekir. İkinci el tekstil ürünleri sterilize edildikten ve kalite kontrolü yapıldıktan sonra piyasaya sunulması esas olmalıdır.

2023 yılında, ikinci el ve yeniden satış giyiminin küresel pazar değerinin 197 milyar ABD doları değerinde olduğu tahmin ediliyor. Bu değer önümüzdeki yıllarda hızla artarak 2026 yılına kadar yaklaşık 100 milyar dolar artması öngörülüyor.



Şekil 6-1: Dünya Çapında 2021'den 2028'e İkinci El Giyim Pazarı Değeri (Milyar Dolar)

Son veriler, 2018 yılında Avrupa Birliği'nin Asya ve Afrika ülkelerine yaklaşık 1,5 milyon ton kullanılmış giysi ihraç ettiğini gösteriyor. 2019'da, AB'deki kullanılmış tekstil ürünlerinin yaklaşık %46'sı Afrika'ya ihraç edildi. Kullanılmış tekstil ithalatı, uygun fiyatlı giyim talebiyle yönlendirilen yerel yeniden kullanımı hedefleniyordu. Ancak 2020 yılında COVID-19'un yayılmasını önlemek için büyük kısıtlayıcı önlemler alınmıştır ve 2020 yılında giyim ithalatında %14'lük bir düşüş yaşandı, ancak bu, önceki on yıla göre orantısız bir artışı takip ediyor (2010'a kıyasla %64).

Diğer yandan, balyalar halinde gönderilen tekstil ürünlerinin çoğu, yeniden kullanıma uygun değildir ve genellikle açık çöplüklerde veya gayri resmi atık bertaraf kanallarında son bulmuştur.

Garson & Shaw tarafından yapılan bir araştırmaya göre Amerikalıların dörtte birinden fazlası (%28) çevresel nedenlerle ikinci el kıyafet satın almakta, %58'i bunu paradan tasarruf etmek için



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

yapmakta ve %75'i yerel ikinci el kıyafet mağazalarının sürdürülebilir topluluklar oluşturmaya yardımcı olduğu konusunda hemfikirdir.

Garson & Shaw, tekstil ürünlerin ikinci el giyim pazarına yönlendirilmesi halinde, ABD'de her yıl 255.747 ton tekstil atığın çöp sahalarına gitmesinin ve 458.307 ton giysinin yakılmasının önlenebileceğini ve her yıl 3 metrelik olimpik yüzme havuzuna eşdeğer su tasarrufu sağlanabileceğini iddia ediyor.

Günümüzde AB'nin kullanılmış tekstil ihracatının yaklaşık %46'sı Afrika ülkelerine yapılmaktadır; moda ürünlerinin kalitesi ne kadar düşükse, çöplüklere gitme olasılığı da o kadar yüksek olmaktadır.

2021 yılında Avrupa Birliği (%30), Çin (%16) ve Amerika Birleşik Devletleri (%15) iskartaya çıkarılmış, kullanılmış giysilerin önde gelen ihracatçıları olurken, Asya (%28, ağırlıklı olarak Pakistan), Afrika (%19, özellikle Gana ve Kenya) ve Latin Amerika (%16, ağırlıklı olarak Şili ve Guatemala) önde gelen ithalatçıları olmuştur.

Japonya'da yaklaşık 1,7 milyon ton elyaf ürünü atığı oluşuyor ve bunun büyük çoğunluğu giysi atığıdır. Japonya'da kullanılmış tekstil giysilerinin %66'sı yakma tesislerine ve çöp depolama sahalarına gönderiliyor, yalnızca %34'ü geri dönüştürülüyor veya yeniden kullanılıyor. Bu giysilerin çok azı keçe hammaddesi gibi başka bir şeye geri dönüştürülüyor.

Türkiye'de ikinci el, Kadıköy, Beyoğlu, Tahtakale, Eminönü ve Osmanbey'de bazı giyim mağazaları hariç, neredeyse yok denecek kadar azdır. Kullanılmış tekstil ürünlerinin sürdürülebilir yönetimi, döngüsel ekonomi, karbonsuzlaştırma ve bunun paralelinde toplam karbon salımının azaltılması için İstanbul başta olmak üzere büyük şehirlerde ikinci el piyasasının ve pazarının geliştirilmesi ve güçlendirilmesi gerekir.



Resim 1. Tekstil İkinci El

Dünyada ikinci el pazarında 2025'e kadar yüzde 300 oranında bir büyümenin olacağı tahmin edilmektedir.

2020'de ABD'de 33 milyon kişi ilk kez ikinci el giyim alışverişi yapmıştır.



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Dünyadaki ikinci el giyim pazarının değeri 2021'de 30 milyar dolar iken 2025'te 77 milyar dolar olması bekleniyor. Dolayısıyla markalar da bu alana yatırım yapmaya başladılar. ABD merkezli Tommy Hilfiger üç farklı konsept belirledi. Kendi web sitesinden alınıp iade edilenler, markanın müşterileri tarafından gönderilen eski kıyafetler ve geri dönüştürülen giysiler. Bu açıdan markaların ikinci el pazarında da rekabette öne çıkma peşinde olduğu görülüyor.

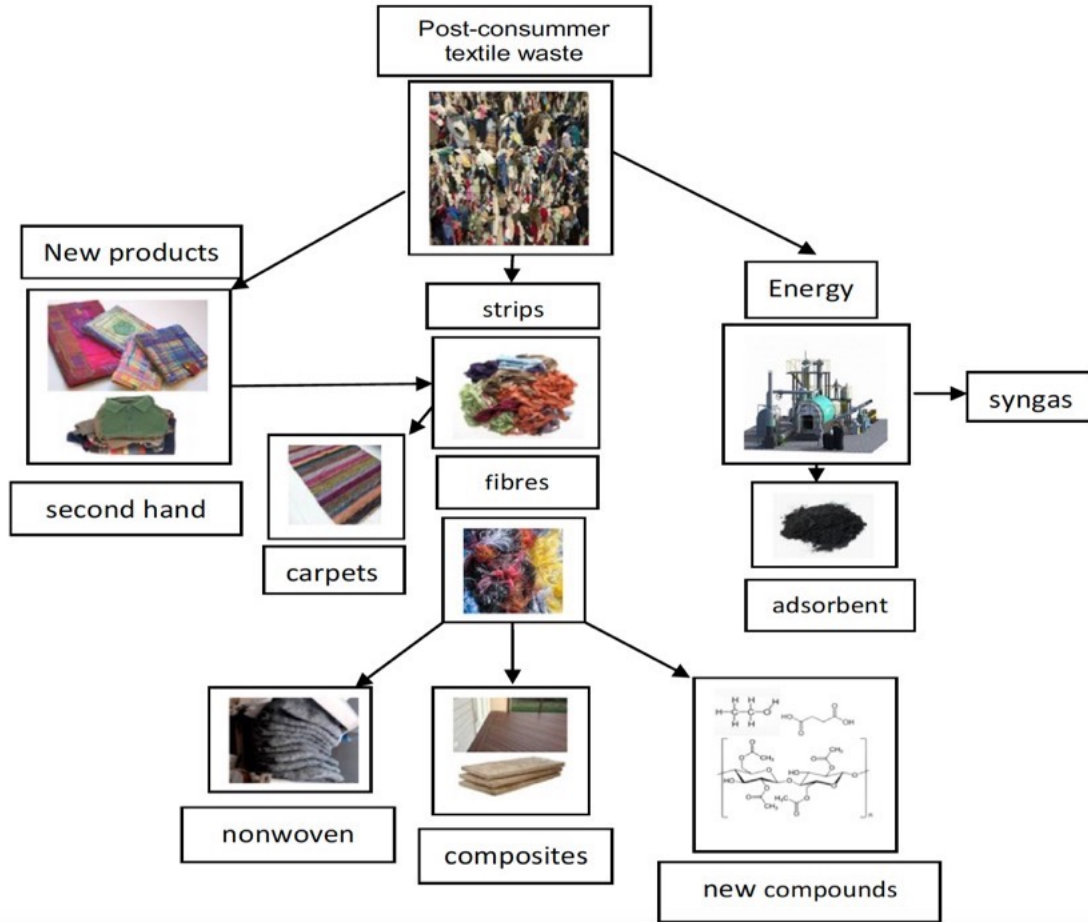
Moda devi H&M gibi Türkiye'de piyasanın güçlü giyim sektörü kullanılmış ikinci el ürünleri toplama ve güvenli şekilde yeniden satışı ile ilgili çalışmalar yapmalı.

İkinci el giysiler toplandıktan sonra başka ülkeye ihraç edilmesi çok yanlış uygulamadır. Bu kullanılmış giysilerin çöpe atılması anlamına gelmektedir. Örnek olarak Almanya'da ayrı olarak toplanan ikinci el giysiler, halılar, yorganlar ve yastıklar dezenfekte edilmeden Romanya'ya ihraç edilmekte ve burada çöp depolama alınan dökülmektedir.



7. TEKSTİL ATIKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tekstil artıklarının, kırıntılarının ve atıklarının değerlendirilmesi için birçok yol bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 7-1'de verilmiştir.



Şekil 7-1: Tüketici Sonrası Tekstil Atıklarının Değerlendirilmesi İçin Çeşitli Çözümler

7.1. KULLANILMIŞ GIYSİLERİN GERİ DÖNÜŞÜMÜ

Tekstillerin çevresel etkileri azaltılarak ömürleri uzatılır. Ancak, bu çözümün seçiminde ayıklama, paketlenme, nakliye vb. ek maliyetler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tür ikincil el giysilerin değerlendirilmesinin faydasının hesaplanması, tüm ek çevresel etkileri (örneğin, nakliye nedeniyle sera etkisi veya hastalık bulaşması nedeniyle insan sağlığının bozulması riski) içermelidir.

Tekstil artıkları ve atıkları geri kazanılabilir ve çeşitli ürünler için hammadde olarak yeniden kullanılabilir.

Bu süreçteki ilk adım, mekanik, kimyasal veya biyokimyasal olmak üzere farklı yöntemlerle tekstil malzemelerinden liflerin geri kazanılmasıdır. Bu ayrıştırılmış elyaflar daha sonra aşağıdakiler gibi çeşitli uygulamalara sahip farklı malzeme türleri için kullanılır.

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Tüketim sonrası tekstil atıklarının değerlendirmek için bir olasılık, dokunmamış (nonwoven) malzemeler elde etmek için işlemektir. Bu dönüşümdeki ilk adım, tekstil atıklarının tekstil parçalayıcı adı verilen özel bir makine tarafından kesilmesi ve parçalanmasıdır. Böyle bir makine, farklı çaplarda bir dizi eşleştirilmiş ruloya (2-8) ve yüzeyde sayısız iğneye sahiptir. Yüksek hızda dönerek, rulolar tekstil atığını tamamen parçalamaktadır.

Bu parçalanmış atıklardan, herhangi bir bağlayıcı olmadan yapıyı sağlamlaştıran iğneleme tekniği ile dokunmamış malzemeler üretilir. Geri kazanılan lifler temizlenir ve tarak aşamasına geçerek lifli bir ağa dönüştürülür ve son olarak dikenli iğnelerle delinerek konsolide edilir. Elde edilen nonwoven malzemeler, hijyenik mendil, peçete ve çocuk bezi gibi tek kullanımlık ürünler için kullanılabilir. Nonwoven malzemeler, liflerden ve gözeneklerden oluşan bir iskelete sahip özel yapılardır ve yalıtım uygulamaları için idealdir

Kullanılmış tekstil ürünlerinin çöp sahasına atılması, üretimleri sırasında kullanılan enerjisinin yanı sıra tedarik zincirindeki değerlerin de kaybı anlamına gelmektedir.

Tüketim sonrası kullanılmış tekstil atıklarının değerlendirilmesinin bir diğer yolu da enerji üretimidir. Atıktan enerjiye giden yol, sürdürülebilir bir atık değerlemesi ve artan enerji talebi nedeniyle oluşan baskının azaltılması için bir fırsattır.

Tekstil atıklarını enerji kaynağı olarak değerlendirmek için basit bir yöntem, pamuk atıklarını briketler halinde sıkıştırarak 10 barda saatte 2 ton buhar üreten 1.542 MW'lık bir kazanı ısıtmak için kullanmaktır. Dolayısıyla, tüketici sonrası tekstil atıklarından termal enerji üretebilir. Yanıcı yakıt olarak odunla yapılan bir karşılaştırma, atık pamuk alternatifinin çok daha düşük maliyetli olduğunu ortaya koymuştur.

Aslında, termal yöntemler atıkların ortadan kaldırılması için ilk uygulanan yöntemlerden biridir, yakma geleneksel olarak atıkların azaltılması için kullanılmaktadır. Termal teknolojiler piroliz, gazlaştırma ve yakmadır. Isıyı ve oksijeni esas alan biyokütlenin termal dönüşümü sağlanmaktadır. Bu süreçler, kömür gibi maddelerin yanı sıra ısı, buhar ve gazlar üretir.



Şekil 7-2: Isı ve Oksijene Bağlı Olarak Termal Dönüşüm

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Dönüşümün ısı ve oksijen olarak en düşük seviyesi piroliz işlemidir. Oksijene ihtiyaç duymaz (oksijensiz ortamda) ve biyokütle moleküllerinin parçalanmaya başlaması için yeterli yaklaşık 400 °C -700 °C arası ısıya ihtiyaç duyar. Proliz, oksijensiz ortamda, çok düşük ısı gerektirir.

Dönüşüm gazlaştırmasının orta seviyesidir. Pirolize göre daha fazla ısı gerektirir, ancak daha da önemlisi az miktarda oksijen eklenmesini gerektirir. Yanmaya yetecek kadar değil, ancak kısmen oksitlenmiş gaz ürünlerinin oluşumuna yol açacak kadar. Gazlaştırma, kontrollü oksijen şartlarında ve orta seviyede ısı ile kısmen oksitlenir. Yani gazlaştırma, kısmi O₂ ile ısıtmadır, ancak CO₂ ve H₂O oluşturmak için ortamda yeterli O₂ yoktur. Bunun yerine gazlaştırma CO ve H₂ oluşturulur.

Dönüşümün en üst seviyesi yanmadır. Sisteme kaldırılabileceği tüm oksijeni ve onu harekete geçirecek kadar ısıyı verdiğinizde, tıpkı bir kibrit gibi yanar.

Yakma işlemi, atıkların yakılmasıyla ısı enerjisi üretilmesi anlamına gelmektedir. Enerjinin yanı sıra karbondioksit, su buharı ve inorganik kül ortaya çıkmaktadır. Bu tür bir değerlendirme, yoğun yakma ve toksik emisyonlar gibi sorunlara neden olmaktadır. Çevre kirliliği göz önünde bulundurulmalıdır ve sonuç olarak, yakma tesisleri, atıkları enerjiye dönüştürmenin yanı sıra, ortaya çıkan zararlı ürünleri, özellikle de sera etkisi olan gazları hapsedmek zorundadır.

Katı atıklardan enerji geri kazanımı üzerine yapılan bir çalışmada, elektrik konfigürasyonlu bir yakma tesisi önerilmiştir. Prosedür, 370 kg CO₂ eşdeğeri/ton atık ile emisyonlarda azalma ve ayrıca bir miktar kar (kiloton atık başına 24,5 Euro) sağlamaktadır. Enerji geri kazanım verimi dikkate alındığında, tekstil atıkları için yakma önerilirken, ahşap, plastik ve kağıt geri dönüşümü için anaerobik sindirim daha uygun ve ekonomik görünmektedir.



8. GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ

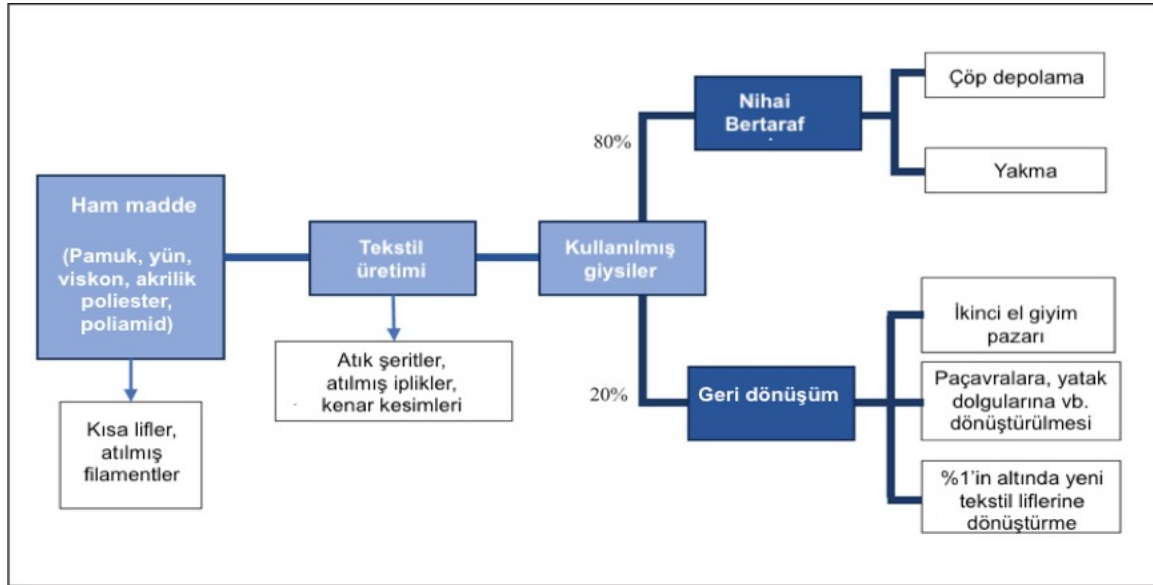
Tekstil atıkları, artık kullanılmayan ve genellikle çevre kirliliğine katkıda bulunarak atılan kumaşları ve giyim eşyalarını ifade eder. Tekstil atıklarına, yönetimine ve geri dönüşümü amaçlayan girişimlere kapsamlı bir bakış aşağıda verilmiştir.

Geri Dönüşüm Oranları: dünyada tekstil atıklarının yalnızca küçük bir kısmı geri dönüştürülmektedir. ABD'de, tekstil atıklarının 2018 yılında üretilen toplam katı atıkların %5,3'ünü oluşturduğu, bunun %68,5'inin çöp sahalarına gönderildiği ve yalnızca %15,2'sinin geri dönüştürüldüğü tespit edilmiştir.

Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin'deki tekstil geri dönüşüm oranları sırasıyla %25, %15,2 ve %15'tir.

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada, tekstil atık malzemelerini geri dönüştürmek için farklı olası mekanizmaları tartışmıştır.

Yün, pamuk ve ipek gibi doğal elyaflar geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir.



Şekil 8-1: Hammaddeden Bertarafa Kadar Tekstil Atıklarının Akışı.

AB27'de kullanılmış giysilerin sadece %1 geri dönüştürülerek yeni tekstil liflerine dönüştürülmektedir.

8.1. MEKANİK GERİ DÖNÜŞÜM

Mekanik geri dönüşüm, elyafların polimer kimyasal yapısını önemli ölçüde değiştirmeden tekstil atıklarının ikincil ham maddeye işlenmesidir. Mekanik geri dönüşüm, toplama, tanımlama, ayırma, öğütme, tarama, karıştırma ve yeni elyaflara yeniden eğirme gibi temel işlem adımlarının kısmen değişken bir kombinasyonunu temsil eder.



Mekanik geri dönüşümün temel avantajı, liflerin kimyasal yapısını önemli ölçüde değiştirmeden, orijinal renkleriyle geri dönüştürülmesi nedeniyle boyama gibi kimyasal işlemlere gerek olmamasıdır.

Mekanik geri dönüşüm süreci birkaç iş adımından oluşur:

1. Tekstil atığının parçalanması,
2. Sert atıkların ayrılması,
3. Parçalanmış tekstil atığının harmanlanması,
4. Parçalanmış tekstil atığının hazırlanması ve yırtma makinelerine teslimi,
5. Parçalanmış tekstil atığının yırtılması,
6. İşlenmiş geri dönüştürülmüş elyafların son preslenmesi.

8.1.1. Tekstil Atıklarının Parçalanması

Parçalama, mekanik geri dönüşüm sürecinin ilk adımıdır. Tüketici öncesi veya sonrası tekstil atıkları öncelikle küçük parçalara parçalanır. Malzeme 15-60 cm²'lik parçalara kesilebilir. Parçalanmış atığın boyutu, geri dönüştürülmüş liflerin uzunluğunu ve kalitesini belirler - daha büyük kesilmiş parçalardan daha uzun lifler elde edilebilir.

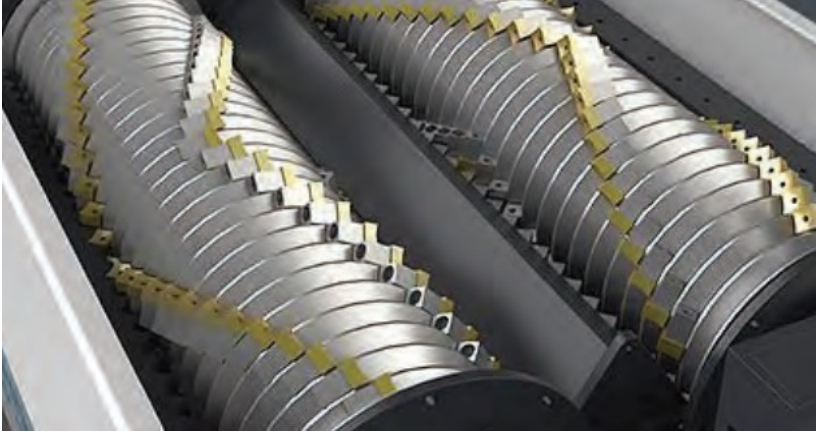
Tekstil atığı, parçalama makinesinin giriş konveyörüne yerleştirilir, pres silindirlerinin yardımıyla sıkıştırılır ve çelik rulo tertibatına iletilir. Tekstil atığı, bir parçalama makinesinin bir veya iki giyotin tipi veya döner kesicisi tarafından makas etkisi kullanılarak parçalanır. Giyotin tipi parçalayıcı, atığı bir salınımlı ve bir sabit bıçakla keser.

İkinci bıçak, kesilen tekstil parçalarının daha küçük ve daha düzgün bir boyuta sahip olmasını sağlamak için birincisine dik olarak konumlandırılır. Parçalama makineleri, sert bir metal nesne bulunursa çalışma sürecini durdurmak için metal dedektörleri (1. bıçağın önünde) kullanır. Ayrıca bir bıçak bileyici ve toz giderme sistemiyle donatılabilirler.

Mekanik geri dönüşüm sürecinin bir parçası olan parçalama sırasında, malzeme kayıplarının yanı sıra elyaf uzunluğu, düzgünlük ve tekdüzelik de kaybolur. Yeni giysilerin kalitesini ve bütünlüğünü sağlamak için en az %50 oranında saf yeni pamuk karıştırılmalıdır.

Döner kesicilerde makineler, üzerlerine çok sayıda bıçak sabitlenmiş bir veya iki rotor kullanır (**Şekil 8-2**). Atık, parçalama alanına iletilir ve dönen bıçaklarla temas ederek küçük parçalara kesilir.





Şekil 8-2. GSD Serisi Çift Rotorlu İnce Öğütücünün Bıçaklı Rotorları

8.1.2. Sert Atıkların Ayrılması

Atıkların parçalanmasından sonra, kesilmiş tekstil parçaları, ağır ve tekstil olmayan parçaları - deri etiketlerin parçaları, düğmelerin ve fermuarların kesilmiş parçaları ve diğer aksesuarlar ile kesilmemiş daha büyük tekstil parçalarını ayıran bir makine (temizleme tamburu, çırpıcı) tarafından işlenebilir. Tekstil kökenli olmayan kesilmiş parçalardan kaçınılmalıdır, çünkü daha sonra elyaf açma işlemini olumsuz etkileyebilirler. Sert parçalar geri dönüşüm makinelerinin mekanizmalarına bile zarar verebilir. Temizleme makinesi, kesilmiş tekstil atık parçalarının döndürüldüğü delikli bir tambur kullanır. Merkezkaç kuvveti ve mıknatısların yardımıyla istenmeyen parçalar bir tamburun deliklerinden düşer. Metal kökenli parçalar mıknatıslarla ayrılabilirken, diğerleri - merkezkaç kuvvetleriyle

8.1.3. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Harmanlanması

Tekstil atıkları parçalandıktan sonra düzgün bir şekilde karıştırılmalıdır. Farklı depolama kapasitelerine sahip çok çeşitli harmanlama kutuları, bir sonraki geri dönüşüm adımlarından önce kesilmiş tekstil atıklarını harmanlamak ve depolamak için kullanılır. Profesyonel literatürde bu tür ekipmanlar farklı şekilde adlandırılır: harmanlama ve depolama kutuları, kutu odaları, harmanlama kutuları, harmanlama odaları

8.1.4. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Yırtma Makinelerine Hazırlanması ve Teslimi

Besleme ünitesi adı verilen bir makine, kesilmiş tekstil atıklarını küçük tekstil parçalarını liflere ayıracak mekanizmalara teslim etmek için bir karıştırma kutusu ile bir yırtma makinesi arasına yerleştirilir. Titreşim yardımıyla tekstil parçaları, atığı bir yırtma makinesinin ana mekanizmalarına taşıyan bir teslim konveyörünün kayışına eşit şekilde yayılır.

8.1.5. Parçalanmış Tekstil Atıklarının Yırılması

Yırtma makineleri, parçalanmış tekstil malzemesinin küçük parçalarını yırtarak tek tek lifleri ayırır. Genellikle bir ila yedi bölümden (9'a kadar) oluşan modüler bir sisteme sahiptirler - çelik pimler veya testere telleriyle kaplı tamburlar veya silindirler. Parçalanmış tekstil parçaları, her

bölümde daha fazla ve daha ince pimler veya testere telleri bulunan ardışık tamburlardan geçer. Sonuç olarak, ayrı elyaf tutamları ve tek tek elyaflar açılır ve kirler uzaklaştırılır. Tamburların dönüş hızı ve parçalanmış tekstil malzemesi taşıma hızı, tekstil atığının niteliklerine ve geri dönüştürülmüş elyaf özelliklerine olan taleplere göre ayarlanır. Agresif bir mekanik eylem olan yırtılma, geri dönüştürülmüş elyafların uzunluğunun ve mukavemetinin azalmasına neden olur. Elde edilen liflerin bozunma seviyesi şunlara bağlıdır:

- Parçalanmış tekstil parçalarının boyutu - daha büyük parçalardan daha uzun lifler ayrılabilir, ancak bunların açma işlemi daha zordur ve lif kalitesini olumsuz etkileyebilir,
- İşlenmiş malzemelerin kökeni - farklı kökenli tekstiller (doğal veya sentetik) yırtılma işlemine farklı tepki verir,
- Tekstil atığının yapısı - örme ve gevşek dokuma atıklar daha kolay açılabilir ve daha yüksek kaliteli ve daha uzun geri dönüştürülmüş lifler elde edilebilir.

Geri dönüştürülmüş liflerin yalnızca %25-50'sinin 10 mm'den uzun olduğu tahmin edilmektedir. Bunlar ipliğe yeniden eğrilmek için kullanılamaz ve bunların %80-90'ı daha sonra dokusuz kumaşlara işlenir

8.1.6. İşlenmiş Geri Dönüştürülmüş Elyafların Son Preslenmesi

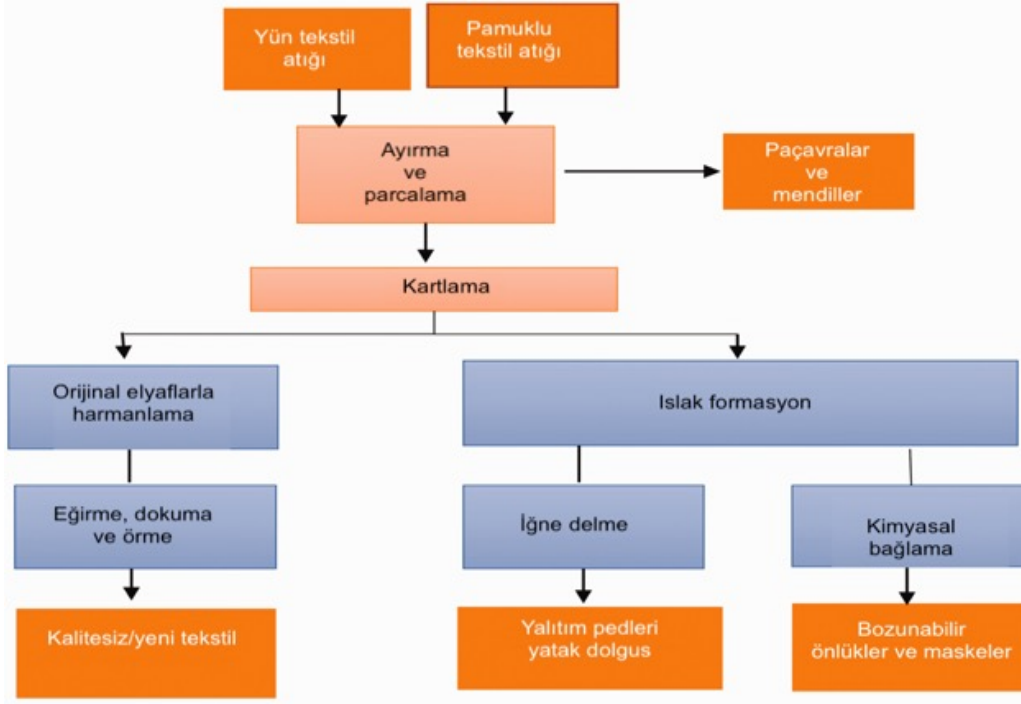
Tekstil geri dönüşüm sürecinin sonunda açılan elyaflar, daha sonraki kullanımları için depolanmak ve taşınmak üzere bir balya makinesi/balyalama presi tarafından gereken boyuttaki demetler halinde sıkıştırılır.

8.1.7. Toz Toplama ve Filtreleme

Geri dönüşüm sürecinin tüm aşamalarında ortam havasına büyük miktarda toz ve diğer kirlilikler salınır. Makinelerin kirlenmesini ve operatörlerinin sağlık sorunlarını önlemek için, toz toplayıcılar her geri dönüşüm makinesinde tozu yakalar ve merkezi bir filtreleme sistemine aktarır.

Pamuk ve yün kumaşlar, **Şekil 8-3**'teki çizime göre mekanik olarak geri dönüştürülür.





Şekil 8-3. Yünlü ve Pamuklu Tekstil Atıklarının Geri Dönüşümü

Teknoloji, elyafın elyaf uzunluğunu, mekanik atık işlemenin ayırt edici maksimum uzunluğu olan 10 mm'nin altına kıyasla 15 mm'de tutar. Saf pamuğun uzunluğu genellikle 20-25 mm'dir. Yaklaşık %50 geri dönüştürülmüş pamuk karışımı iplik, bu teknoloji kullanılarak işlenebilir. Benzer şekilde, Geotex de polyester elyafarla harmanlanmış %75-90 geri dönüştürülmüş pamuk karışımı iplikten oluşan iplik üretmek için %100 tüketici sonrası kumaşları geri dönüştürür ve oran, gereken uygulamaya bağlı olarak değişir.

Geri dönüştürülmüş pamuk atıklarından dokumasız kumaş üretimi yapılır. Dokumasız üretim, iplik ve kumaş üretimine kıyasla daha az üretim adımı gerektirdiğinden daha az maliyetli ve çevresel etkinin azaltılmasına katkıda bulunan yeni malzemelerle sonuçlanmaktadır. Geri dönüştürülmüş pamuk liflerinden dokumasız kumaşlar petrol sızıntısı temizleme bezleri, pamuklu malçlama filmleri, ısı yalıtım, gürültü yalıtım ve yatak dolgusu malzeme olarak kullanılır.

Yün, 200 yılı aşkın bir süredir geri dönüştürülen bir uygulama ile en çok geri dönüştürülen liflerden biri olarak kabul edilir. Yün lifleri nispeten uzundur ve uzunlukları mekanik geri dönüşümden sonra bile kabul edilebilir kalır. Bu nedenle, yüksek değerli tekstillerin üretiminde kullanılabilirler. Geri dönüşüm süreci pamuklu kumaşlar için olana benzerdir. Ancak, tekstil liflerini mekanik olarak geri dönüştürürken bir miktar saf lifle harmanlamak kaçınılmazdır. Yeniden eğriyen iplik genellikle işleme verimliliğini artırmak ve nihai ürünün gerekli performans özelliklerini karşılamak için bir miktar saf yün veya sentetik lifle harmanlanır.

Mekanik geri dönüşüm için hammadde, filament iplik, elyaf elyaf veya peletler (talaşlar) olabilir.

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Özellikle yalıtım veya halı dolgusu gibi düşük dereceli ürünler için tekstillerin parçalanması ve yeni elyaflara dönüştürülmesini içerir.

Mekanik geri dönüşüm türü büyük ölçüde açık devre ve kapalı devre işlemlere ayrılmıştır. Orijinal kumaşlardan farklı uygulamalar için elyafları yeniden üreten açık devre işlemi, mekanik geri dönüşümün en yerleşik biçimidir. Gürültü ve ısı yalıtım, araba koltukları, endüstriyel silme mendilleri ve yatak dolgusu malzemeleri ve benzerlerini yapmak için mekanik olarak elyaflar kumaşlardan çıkartılır (**Şekil 8-4**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.).



Şekil 8-4. Tekstillerin Kapalı ve Açık Devre Mekanik Geri Dönüşümü.

Tekstil atıklarındaki naylondan naylon ipliği yeniden üretmek için de teknoloji mevcuttur. İplik, mobilya ve halı yapmak için kullanılabilir.

Düşük kaliteli yün yalıtım malzemesi ve dokunmamış geri dönüştürülmüş elyaf parçalarından oluşan tekstil atıkları, eğim koruması için kalın halatlara dönüştürülmüştür.



Şekil 8-5. Kullanılmış Kıyafetlerden Üretilen Ekolojik İplikler.

8.2. KİMYASAL GERİ DÖNÜŞÜM

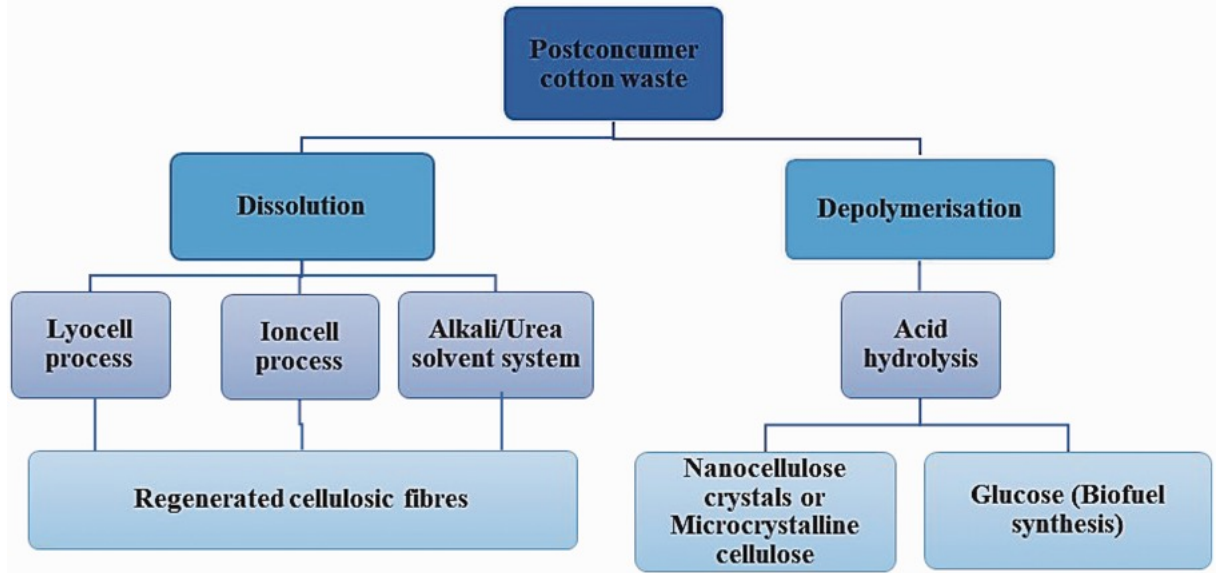
Küresel olarak, tüketici sonrası tekstil atıklarının %0,5'inden daha azı geri dönüştürülüyor.

Kimyasal geri dönüşüm ile eski tekstil ürünlerine yeni bir hayat verebilebilir.

Kimyasal geri dönüşüm, tekstil atıkların (pamuk ve polyester pamuk gibi) monomerlere veya yapı taşlarına parçalanmasını ve daha sonra kalitesini düşürmeden yeni liflere yeniden polimerize edilmesini sağlar.

Pamuklu kumaşların rejenerasyon elyaflarına kimyasal geri dönüşümü umut verici bir çözümdür. Ancak, pamuk liflerinin selüloz makro moleküllerindeki güçlü molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağları nedeniyle yaygın çözücülerde çözünmesi zordur. Pamuğun kimyasal geri dönüşüm süreci, selülozun çözünmesine ya çözücülerde polimer çözünmesine ya da glikoz monomerlerinin depolimerizasyonuna dayanır.

Çözücülerle tekstil atıklarını çözünmede, süreç kimyasal olarak modifiye edilmiş veya saf bir selüloz elyaf ürünü elde edebilir ve bu ürün rejenerasyon/geri dönüşümlü yapay selüloz elyafları için hammadde olarak da kullanılabilir. Bu süreç Lyocell işlemi, alkali/üre veya iyonik sıvı işlemi gibi farklı sistemlerle gerçekleştirilebilir. Son yıllarda Lyocell işlemi, tehlikeli yan ürünler (C_2 , H_2S , ağır metaller) üretmeden baskın viskon teknolojisine veya selüloz elyaflarının rejenerasyonuna basit bir fiziksel alternatif haline gelmiştir. Lyocell ve iyonik sıvı prosesleri, selülozik liflerin kimyasal olarak geri kazanılması için araştırılan baskın teknolojilerdir. Pamuğun kimyasal geri dönüşümüne genel bakış, **Şekil 8-6**'te gösterilmektedir.



Şekil 8-6. Pamuğun Kimyasal Geri Dönüşüm Teknolojileri.

Kimyasal geri dönüşüm, tekstil atıklarının monomerlerine veya oligomerlerine depolimerizasyonunu içerir ve bunlar daha sonra yeni elyaflara veya diğer ürünlere yeniden polimerize edilebilir.

Kimyasal geri dönüşüm, polyester malzemelerin kapalı devre kullanımını geliştirmek ve saf polyester malzemelerin kullanımını azaltmak için çekici bir işlemdir. PET elyafının en yaygın olarak bildirilen kimyasal geri dönüşüm işlemleri arasında metanoliz, glikoliz ve hidroliz bulunur.

Kimyasal geri dönüşüm, polyester, naylon ve akrilik içeren sentetik elyafların yanı sıra pamuk, yün ve ipek gibi doğal elyaflara da uygulanabilir. Ayrıca pamuk-polyester karışımı gibi karışık kumaşlardan farklı elyaf türlerini ayırabilir ve geri kazanabilir.

Tipik kimyasal geri dönüşüm yöntemleri hidroliz, glikoliz, metanoliz ve solvolizdir.

Hidroliz, suyla reaksiyona girerek oluşan kimyasal bir parçalanma sürecidir.

Hidroliz, farklı elyafları karışık kumaşlardan ayırmak için, değişen konsantrasyonlarda asit veya baz seçici kullanımıyla bir elyaf türünü çözerken diğerini sağlam bırakarak uygulanmıştır. Örneğin, hidroklorik asit (HCl) pamuk-polyester karışımındaki polyesteri seçici olarak çözebilir ve sodyum hidroksit (NaOH) pamuğu seçici olarak çözebilir. Ek olarak, sülfürik asit (H_2SO_4) pamuğu glikoza dönüştürebilir ve bu daha sonra sırasıyla esterifikasyon ve eterifikasyon yoluyla selüloz asetat ve sodyum karboksi metilselüloza dönüştürülebilir. Her iki malzeme de tekstil endüstrisinde katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

Konsantre ve seyreltik sülfürik asit (H_2SO_4) kullanan iki aşamalı bir asit hidroliz işleminin pamuk liflerinden glikoz verimini artırdığı bulunmuştur. Bununla birlikte, hidrolizin enerji ve su yoğun olması dezavantajı vardır; ikincisi asit veya baz kalıntıları içeren atık su oluşumuna yol açar. Geri dönüştürülmüş ürünlerin kalitesi ve sağlığı üzerinde de etkiler gözlemlenmiştir.

Kumaşlarla ilgili monomerlerine ayırmak için sulu bir ortamda asit veya alkali kullanan hidrolizden farklı olarak glikoliz, özellikle polyester kumaşların, çinko asetat veya antimon

trioksit gibi bir katalizör varlığında etilen glikol ile ısıtılmasını içerir. Polyesterin glikolizi, yeni polyester elyaflar veya filmler yapmak için saflaştırılabilen ve yoğunlaştırılabilen bis(2-hidroksietil) tereftalat (BHET) verir. Bu, mekanik geri dönüşümde de uygulanan kapalı devre bir işlemdir.

Atık polyester tekstillerin geri dönüşümüne glikoliz uygulanması enerji açısından verimlidir. Potansiyel olarak sentetik tekstil atığının hacmini azaltır ve kaynakların verimli kullanımını teşvik eder. Ancak, özellikle tekstil atıklarının renk giderimi, BHET'in saflaştırılması ve etilen glikolün geri kazanımı ile ilgili olarak teknik kısıtlamalarla karşı karşıyadır.

Metanoliz, polyester tekstil atıklarının geri dönüşümünde de yaygın olarak kullanılır. Atık polyester tekstiller küçük parçalara parçalanır ve bir reaktöre beslenir, burada metanol (CH_3OH) ve bir katalizör, genellikle çinko asetat veya antimon trioksit ile ısıtılır. Metanoliz, polyesteri öncelikle dimetil tereftalat ve etilen glikolden oluşan monomerlerine ayırır. Ürünler daha sonra metanolden ve katalizörden ayrılır ve damıtma veya kristalleştirme yoluyla saflaştırılır. Polikondensasyon yoluyla yeni polyester malzemelerin sentezinde kullanılabilirler. Ürün kalitesi açısından, metanoliz, saf polyestere benzeyen yüksek kaliteli geri dönüştürülmüş polyester üretebilmesi anlamında glikolizden daha iyidir, glikoliz ise daha düşük moleküler ağırlık ve viskoziteye sahip geri dönüştürülmüş polyester üretebilir ve böylece mekanik özelliklerini etkileyebilir. Her iki yöntem de enerji verimliliği ve daha düşük sera gazı emisyonu avantajları sunar. Ancak, çevresel etkileri ayrıca çözücülerin (etilen glikol veya metanol) ve katalizörlerin (çinko asetat veya antimon) geri kazanılma kapasitesine de bağlıdır. Her iki yöntem de yüksek sermaye ve işletme maliyetler, gelişmiş ekipman ve teknoloji gerektirir.

Aslında, metanoliz, bir reaktörde polimerleri monomerlerine ayırmak için bir çözücü ve bir katalizör kullanma genel teknolojisi olan solvolizin belirli bir biçimidir. Monomerler daha sonra çözücünden ve katalizörden ayrılır ve damıtma veya kristalleştirme yoluyla saflaştırılır. Polikondensasyon yoluyla yeni polimer malzemeler üretmek için kullanılabilirler.

Karışık tekstil atık akışlarında polyester (%100), pamuk, naylon, polyester-pamuk (%50/%50= ve spandeksi ayırmak için çinko oksit katalizörüyle mikrodalga destekli **glikoliz** işlemi polyesterin %90'ını geri dönüştürülebilir bir polyester molekülüne dönüştürdü ve pamuk yaklaşık %8'lik bir kütle kaybı yaşadı ancak bunun dışında sağlam kaldı. Böylece, karışık kumaşlarda polyester parçalanabilirken pamuk korundu.

Glikoliz, bir tekstilin büyük moleküllerini küçük moleküllere dönüştürmek için kullanılabilen bir bozunma işlemidir. Bu işlem, PET elyaf ve poliüretan gibi tekstil malzemelerini geri dönüştürmek için yaygın olarak kullanılır. Glikoliz, EG veya başka bir glikol ile BHET oluşturmak için PET'in depolimerizasyonunu içerir. EG'nin dimeri olan dietilen glikol, genellikle glikoliz işleminde oluşur ve bu da saf BHET elde etmek için ayırma ve saflaştırma adımları gerektirir.

Aminoliz süreci, alkoliz sürecinin aksine daha hafif reaksiyon koşulları gerektirir. Bu, amin grubunun hidroksil grubuna göre daha yüksek nükleofilik olmasından kaynaklanır. Ayrıca, mikrodalga ışınlanmasıyla birlikte homojen veya heterojen katalizörlerin kullanımı, reaksiyon



sürelerini ve sıcaklıkları azaltırken ürün verimini artırarak aminoliz verimliliğini artırır. PET aminolizinde iki ana yaklaşım vardır. İlk yaklaşım, PET liflerine farklı veya hatta iyileştirilmiş mekanik ve fiziko-kimyasal özellikler kazandıran polimerin kısmi bozunmasından oluşur. İkinci yaklaşım, tereftalamid bazlı monomerlerin oluşumuna yol açan tam bir depolimerizasyondan oluşur. İkinci yaklaşım, elde edilen monomerleri yapı taşları olarak kullanım için veya polimer yeniden işleme için dönüştürerek geri dönüşümü destekler. Bugüne kadar, yalnızca kısmi aminoliz süreci endüstriyel ölçekte geliştirilmişken, tam aminoliz hala laboratuvar ölçeğinde yürütülmektedir. Kısmi aminoliz yöntemleri, polimer bozunmasını önlerken yüzey türevlendirmesini mümkün kılar ve bu da çok sayıda işlevsel kısmın PET bazlı kumaşların yüzeyine kolayca yerleştirilmesini mümkün kılar. Örneğin, boyama, antibakteriyel gruplar ve hidrofilik işlevler tanıtılabilir ve bu modifikasyonlar, işlenmiş kumaşların mekanik özelliklerini saf elyaflara kıyasla önemli ölçüde etkilemez. Mevcut çalışmalarda, tam depolimerizasyon yaklaşımı çoğunlukla şişelerden PET pullarını içeren katalitik aminoliz işlemi etrafında dönmektedir. İşlemde en çok kullanılan katalizörlerden bazıları, sodyum, potasyum, çinko veya kurşun gibi metallerin asetat, sülfat, karbonat ve bikarbonat tuzlarını içerir. Bu nedenle, aminoliz geri dönüşümden ziyade PET geri dönüşümü ve PET elyaf işlevselleştirilmesi için yüksek bir potansiyel sunar. Ve teknik, büyük miktarlarda toksik amin ve yüksek sıcaklık kullanımından muzdarip olsa da, polimer kimyası veya diğer uygulamalar için yeni monomerler üretmek için birçok olasılık da sunar. PET tekstillerinin sürdürülebilir aminolizinin geliştirilmesi, sürecin endüstriyel uygulamalar için uygun olarak kabul edilmesine yol açacaktır.

8.3. BİYOLOJİK GERİ DÖNÜŞÜM

Tekstil atıklarını parçalamak için kimyasalların kullanımına dayanan kimyasal geri dönüşümden farklı olarak, biyokimyasal geri dönüşüm, tekstil atıklarını yeni lifler veya malzemeler için daha basit moleküllere parçalamak için enzimler veya mikroorganizmalar gibi biyolojik ajanlar kullanır. Kimyasal geri dönüşüm gibi, biyokimyasal geri dönüşüm de biyolojik ajanların türüne ve özelliğine bağlı olarak doğal lifler, sentetik lifler ve karışımli kumaşlar için geçerlidir. Enzimatik hidroliz, mikrobiyal fermantasyon ve anaerobik sindirim, biyokimyasal geri dönüşümün örnekleridir.

Enzimatik hidroliz, parçalanmış tekstil atığının bir reaktörde asit veya alkali yerine selülaz, β -glukozidaz veya kütinaz gibi su ve enzimlerle ısıtılması dışında kimyasal hidrolize prosedürel olarak benzerdir. Li ve arkadaşları, tekstil atığının NaOH/üre ile kimyasal ön işleminin aslında hidroliz verimini artırdığını ortaya koydu ve böylece gelişmiş verimlilik için farklı geri dönüşüm yöntemlerinin potansiyel kombinasyonunu önermiştir. 50 °C ve pH 5'te 20 FPU/g selülaz ve 10 U/g β -glukozidaz eklendiğinde tekstil atıklarından optimum glikoz ve polyester geri kazanımını gözlemlediler. Humicola insolens'ten elde edilen kütinaz kullanılarak karışık PET-pamuklu tekstillerdeki PET'in nemli katı hal enzimatik hidrolizi, 55 °C'de 7 günlük inkübasyonun ardından %30 tereftalik asit verdi. Cellic CTec2 (Novozymes A/S, Bagsværd, Danimarka) selülazlar kullanılarak eş zamanlı veya ardışık pamuk depolimerizasyonu ile glikozun %83'üne kadar geri kazanıldı. Üç glikozid hidrolaz içeren Cellic CTec2, glikoz üretmek için tekstil ve karton atıklarının



enzimatik hidrolizinde de uygulandı ve bu daha sonra limonen sentezlemek için mevalonat yoluyla E. coli tarafından metabolize edildi.

Mikrobiyal fermantasyon, tekstil atıklarından selülaz ve ksilanaz gibi enzimler üretmek için kullanılabilir. Selülaz ve ksilanaz, doğal liflerde yaygın olarak bulunan selülozu ve hemiselülozu parçalayabilen enzimlerdir. Mikroorganizmalarla aşılardan önce selüloz ve hemiselülozu açığa çıkarmak için tekstil atığının ön işleme de gereklidir. Hu ve arkadaşları, otoklavlama, alkali ön işlem ve öğütme yoluyla modifiye edilmiş farklı oranlarda pamuk ve polyester içeren altı tip pamuk/polyester tekstilinin katı hal fermantasyonunu gerçekleştirdiler. *Aspergillus niger* CKB'nin spor süspansiyonu, tekstil atığında fungal selülaz üretmek için kullanıldı. Selülaz daha sonra çıkarıldı ve %70,2'lik bir şeker geri kazanım verimi sağlayan tekstil atığı hidrolizi için kullanıldı. Aynı bir çalışmada, *Trichoderma reesei* ATCC 24449, tekstil atıklarının su altında mantar fermantasyonunda mantar selülazı üretmek için kullanıldı ve bu daha sonra tekstil atıklarını hidrolize etmek için kullanıldı. Bununla birlikte, glikoz geri kazanım verimi %41,6 idi.

Ayrıca, mikrobiyal fermantasyon tekstil atıklarından organik asitler üretmek için kullanılmıştır. Bu alandaki çalışmalar sınırlı olsa da, Li ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışma, glikoz açısından zengin ancak boyalarla kirlenmiş hidrolizat üretmek için karışık tekstil atıkları üzerinde enzimatik hidrolizi içeriyordu. Boyaları gidermek için biyokömür (biochar) kullanıldı ve süksinik asit üretmek için yerinde lifli yataklı bir biyoreaktörde hidrolizatın sonraki fermantasyonu üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı gözlemlendi. Tekstil atıklarından organik asit üretiminin, atık tekstillerin biyolojik olarak parçalanabilir kısmının, organik asitlerin üretimi için mikrobiyal fermantasyona tabi tutulan bir biyomolekül olan glikoza biyolojik olarak dönüştürülmesini içerdiği dikkat çekicidir. Bu, önceden işlenmiş pamuk liflerinin önce glikoz üretmek için enzimatik sakkarifikasyona tabi tutulduğu başka bir çalışmada da belirgindir. Glikoz daha sonra biyoetanol, sorbitol ve laktik asit üretmek için fermantasyon veya hidrojenasyon için girdi olarak kullanıldı. Çalışma, renkli pamuk liflerinin hidrojen peroksit (H_2O_2) - asetik asit (CH_3COOH) - NaOH karışımı ile ön işleminin boyaların giderilmesini kolaylaştırdığını ve içindeki selülozun sindirilebilirliğini artırdığını ortaya koydu. Pamuk-PET tekstillerinin NaOH-etanol ön işlemi ayrıca glikoz verimini iyileştirdi ve enzimatik hidroliz üzerine tereftalik asit ve etilen glikol üretimine katkıda bulundu.

Tekstil pamuk atıkları, glikoza, ya da daha yaygın bilinen adıyla şekere enzimatik hidrolizle dönüştürülebilir.

8.4. KOMPOSTLAMA

Kompostlama, pamuk bazlı tekstil atığı gibi organik atıkları besin açısından zengin bir toprak takviyesine parçalamak için biyolojik bozunmanın gücünü kullanan doğal bir işlemdir.

Bu işlem, değerli besinleri toprağa geri döndürmeye yardımcı olur ve ekstraktif tarım uygulamalarından sonra besin açısından fakir toprakları eski haline getirmek veya bahçe yataklarında katkı maddesi olarak kullanılabilir.



Ayrıca toprak yapısını iyileştirmeye, erozyonu azaltmaya ve toprağın su tutulmasını artırmaya yardımcı olduğu bilinmektedir ve bu da onu her türlü bahçe ve tarımsal amaç için inanılmaz derecede kullanışlı bir araç haline getirir. Kompostlama, aktif fazında organik atık hacmini yarıya kadar önemli ölçüde azaltabilen çok verimli, düşük teknoloji ve biyo-oksitatif bir işlemdir. Sürdürülebilir bir ortam oluşturmaya yardımcı olur ve bitkiler için harika bir besin kaynağı sağlar. Kompostlama, oksijen açısından zengin bir ortamda karmaşık organik maddeleri daha basit maddelere parçalamak için bakteri ve mantar gibi mikroorganizmalardan yararlanır.

Pamuk atığı, bertarafı ilgili büyük bir soruna neden olmaktadır ve kompostlama, çöp depolamadan daha iyi bir çözümdür. Hem kompostlanmış hem de solucan gübresi haline getirilmiş pamuk atığı, besin kaynağı olarak faydalı olabilir.

Solucan kompost gübresi, atıkları kompostta dönüştürmek için solucanlara güvenir. Pamuklu atık substratıyla test edildiğinde, kompost ve solucan gübresi örneklerinde bakteri çeşitliliği hemen hemen aynıydı. Ancak, bakteri izolatlarının yoğunluğu solucan gübresi örneklerinde kompost örneklerine göre daha fazlaydı ve bu da daha üstün humus üretimiyle sonuçlandı

Kompostlama, kullanılmış yünün atıkların bertarafı için ideal bir yöntemdir çünkü sadece atıkları dezenfekte etmekle kalmaz, aynı zamanda çevresel etkisini de azaltır. Organik atıkları stabilize ederek ve organik gübreler üreterek dairesel tarımı teşvik eder ve kompostlanmış yün, ham yünden daha etkili bir gübredir.

Hindistan'da, mikrobiyal aşı maddesi olarak farklı konsantrasyonlarda sığır gübresi ve kaya fosfatı ile birlikte atık yünün kompostlanmasının etkisini belirlemek için bir araştırma yürütülmüştür. Bu bulgulara dayanarak, yün atığı gibi dayanıklı malzemelerin parçalanmasını katalize etmek için bir aşı maddesi olarak bulamaç kullanmanın avantajlı olduğu belirtilmiştir. Özellikle, %10 oranında sığır gübresi (kuru ağırlığa göre) ve %2 oranında kaya fosfatı karışımı kullanıldığında, farklı oranlarda gübre ve kaya fosfatı kullanılmasına kıyasla daha yüksek kaliteli bir kompost elde edilmiştir.

Sonuç olarak, yün atığı gibi kalıcı malzemelerin etkili kompostlanması için %10 kuru ağırlık ve %2 kaya fosfatı kombinasyonu bulamacın aşı olarak kullanılması önerilir. Kompostlama, özellikle koyunların öncelikle et üretimi için yetiştirildiği dünya bölgelerinde düşük kaliteli veya dışkıyla kirlenmiş yünün işlenmesi için giderek daha popüler hale gelen bir seçenektir. Bu ekolojik ve uygun maliyetli yöntem, Teksas'ta büyük bir başarıyla test edilmiş ve çöplüklerde son bulan atık miktarını azaltmaya yardımcı olmuştur.

Tekstil boyaları ve terbiye kimyasalları sıklıkla formaldehit bazlı reçineler, amonyak, asetik asit, büzülmeye dirençli kimyasallar, optik beyazlatıcılar, soda külü, kostik soda ve ağartıcı dahil olmak üzere çevre için tehdit oluşturan tehlikeli bileşikler içerir. Giysilerde kullanılan boyalar genellikle sentetiktir ve biyolojik olarak birikebilen ve yaban hayatına zarar verebilen ağır metaller içerir. Dahası, zararlılara karşı direnç için pamuk ve yünü işlemek için kullanılan kimyasallar kompostlama sırasında meydana gelen mikrobiyal süreçleri bozabilir. Bu toksik maddeler yalnızca bunları içeren liflerden yapılan kompostu kirletmekle kalmaz, aynı zamanda



toprak mikroorganizmalarının ölümüne ve tarımsal üretkenliğin azalmasına da yol açar. Özellikle azo boyalar ekosistemlere karşı yüksek düzeyde toksisite gösterir. Bu etkileri en aza indirmek için işlenmiş tekstil atıklar kompost yığnında kompostlanmamalıdır. Boyaların ve kimyasalların kompostlama üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirmek için mümkün olduğunda doğal ve organik malzemeler kullanmak önemlidir. Ayrıca kompostlama işleminin, süreci optimize etmek için kontrollü ve iyi muhafaza edilen bir ortamda yapılması gerekir.

Tekstil atıklarının kompostlama sırasında parçalanmasının nispeten uzun zaman alabileceğini ve sentetik liflerin biyolojik bozunmaya karşı özellikle dirençli olduğunu belirtmekte fayda var. Sentetik ve karışımli tekstiller, tekstil atığının büyük bir oranını oluşturduğundan, bunları kompostlama için doğal liflerden ayırmak zor olabilir ve bu da potansiyel olarak kompostu kirletebilir. Bu yüzden bu tür karışık tekstil atıklarının kompost olarak kullanılması doğru değildir.

8.5. TERMAL GERİ DÖNÜŞÜM

AB27’de giyim (tekstil) atıklarının yaklaşık %30’u yakma tesisine gönderiliyor.

Termal geri dönüşüm, giderek artan ve ilgi gören bir diğer önemli tekstil geri dönüşüm teknolojisidir. Tekstil atıklarının, piroliz, gazlaştırma, hidrotermal sıvılaştırma ve plazma ark gazlaştırması dahil olmak üzere termal işlemler yoluyla yakıt veya ısı gibi enerji ürünlerine dönüştürür. Bu teknoloji, elastan, polipropilen ve poliüretan gibi geri dönüştürülemeyen malzemelere ek olarak düşük kaliteli veya kirli tekstilleri de işleyebilir.

Piroliz, oksijen yokluğunda organik malzemelerin termal ayrışmasını içerir ve sentez gazı, yağ ve kömür üretir.

Gazlaştırma, yakıtlara veya kimyasallara dönüştürülebilen sentez gazı elde etmek için yüksek sıcaklıkta ve kısmi oksijenli ortamda organik malzemelerin kısmi oksidasyonudur. Her iki yöntem de atık pamuk, polyester, naylon ve diğer sentetik veya doğal liflerin geri dönüşümü için uygulanabilir. Hidrotermal sıvılaştırma, ıslak biyokütleyi, suyun varlığında yüksek basınç ve sıcaklık altında yağa ve gaza dönüştürür ve pamuk, yün, ipek ve diğer selülozik veya proteinli liflerin geri dönüşümü için uygundur. Plazma ark gazlaştırması, gazı iyonize eden ve yüksek sıcaklıkta plazma oluşturan bir elektrik arkı üreten bir plazma meşalesi kullanarak organik maddelerden sentez gazı ve cüruf üretir. Bu yöntem karışık veya kirlenmiş tekstil atıkları için kullanılabilir.

Bir çalışmada polyester elyaf, pamuk ve yün üzerinde karbondioksit atmosferinde piroliz ve gazlaştırmanın etkileri araştırılmış ve bunların ilgili kinetik ve termal dinamiklerinin farklı olduğu ortaya çıkarılmıştır. Piroliz ve gazlaştırma aktivasyon enerjileri de farklıdır. Tekstil atıklarının karbondioksitli ortamında gazlaştırılması, sentez gazı üretimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Kwon ve arkadaşları, atık tekstillerin karbondioksitli ortamda katalitik pirolizini gerçekleştirmiş ve ek karbon monoksit verimiyle sentez gazı ve metan üretimini ortaya çıkarmıştır. Kobalt (Co) bazlı bir katalizörün kullanılması, hidrojen gazı ve karbon monoksit üretimini sırasıyla üç kat ve sekiz kat artırmıştır. Yusuf ve arkadaşları, bir pilot piroliz tesisi



kullanarak tiftik mikrofiberleri üzerinde piroliz gerçekleştirmiş ve yıllık olarak üretilen 45 ton tiftik mikrofiberden 13,8 ton yağ, 21,5 ton gaz ve 9,7 ton kömür üretme potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Bu, yıllık 120.400 ABD doları kar ve ton başına 42.039.000 kg CO₂ eşdeğerinde bir azalma anlamına gelmektedir. Tek adımlı düşük sıcaklıklı piroliz yoluyla pamuklu tekstil atıklarından kömür bazlı adsorbanlar üretme girişimi yapıldı. Adsorbanlar iyi Cr(VI) giderme kapasitesi gösterdi, dolayısıyla pamuklu tekstil atıklarının adsorbanlara dönüştürülmesinde düşük sıcaklıklı pirolizin ekonomik ve teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca pirolizin, bir pilot piroliz tesisinde boya giderimi ile ve olmadan atık kotları piroliz ederek yakıtların geri kazanılması için uygulanabilir bir yöntem olduğu gösterildi. Kotların toplam %82'si sıvı-gaz ürünlerine dönüştürüldü ve boya giderimi olmadan kotların pirolizinin %37,6'ya kadar yüksek biyo-yag verimi ve daha kısa piroliz süresi sağladığı bulunmuştur.

8.5.1. Piroliz

Piroliz, yüksek sıcaklık ve basınç kullanan bir PET termokimyasal geri dönüşüm işlemidir. Kuru damıtma olarak da adlandırılan piroliz işlemi, genellikle bir tüp veya otoklav tipi reaktöründe gerçekleştirilir.

Piroliz, gazlara (CO, CO₂, H₂ ve C₁-C₄ hidrokarbonlar), bir sıvıya (yağ) ve bir katıya (kömür) yol açan oksitleyici ajanların yokluğunda malzemenin termal bozulmasından oluşur. İşlem 400-700 °C sıcaklıkta gerçekleştirilir.

Piroliz, katı atıklardaki karbon polimerlerini parçalamak ve bunları katı, sıvı ve gaz halinde üç piroliz ürününe dönüştürmek için kullanılabilen umut verici bir teknolojidir. Piroliz, daha önce sınıflandırılmamış çeşitli tekstil malzemelerine veya yalnızca atıktan enerjiye dönüştürme tesislerinde işlenecek çok malzemeli tekstil ürünlerine uygulanabilir. PET'ler, piroliz için uygun değildir, çünkü aşırı gaz açığa çıkarır (%20-40 ağırlıkça).

Piroliz, tekstil atıklardaki karbon polimerlerinin ayrışmasından katı, sıvı ve gaz halinde ürünler üretebilir. Pirolizden önce ayrıştırılmamış farklı tekstil malzemeleri tekstil ürünlerinde kullanılabilir. Oksijensiz ortamda piroliz, C/H/O elementlerini yeniden atayarak organik molekül atığını üç fazlı pirolizatlara dönüştürür.

Termokimyasal işlemlerle üretilen sentez gazından hidrokarbonlar ve alkoller yapılabilir. Piroliz işlemleri ön işlem gerektirmez, bu da onları kirli atıkların işlenmesi için uygulanabilir bir seçenek haline getirir. Kimyasal yöntemlerle (biyokimyasallar dahil) karşılaştırıldığında piroliz daha az kimyasal kullanır, daha az atık üretir ve daha hızlı ölçeklendirilebilir.

Kimyasal yöntemler daha fazla sayıda kimyasal gerektirir, atık üretir ve işlemlerin büyük ölçekte büyütülmesi için önemli miktarda zaman gerektirebilir. Aromatik hidrokarbonlar, tekstil atıklarından yapılan en yaygın sıvı ürünlerdir.

Pirolizde, çalışma parametreleri oluşan yağ ve katran miktarını etkiler. 500 °C'de hidrokarbon bileşikleri ve aromatik oksijen keşfedildi. Ayrıca, alkilfenoller > 600 °C'de üretildi ve O₂ verimi 800 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda düşmeye başladı. 800 °C'de yoğunlaştırılabilir bileşiklerde naftalin veya benzen gibi ikame edici gruplar içermeyen aromatik bileşikler bulundu. Buna



karşılık, üç ve dört halka içeren aromatik hidrokarbon bileşikleri, reaksiyon sıcaklığı yaklaşık 850 °C olduğunda üretilir.

Bir piroliz reaktörü, pamuklu tekstil atıklarını 10-20 nm çapında karbon nano topuna (CB) dönüştürür. Beton kompozit uygulamalarında, tekstil atığı piroliz kömürü birincil dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Pamuk atığı pirolitik kömürü bir adsorban olarak da kullanılabilir. Kömürün Cr (VI) üzerindeki adsorpsiyon performansı ölçüldüğünde, kömür-FeCl₃'ün en yüksek adsorpsiyon kapasitesi 70,39 mg/g olarak bulunmuştur. Tekstil atıklarının pirolizi ile elde edilen kömürün fonksiyonelleştirilmesine yönelik yeni bir yöntem ve kullanılmıştır.

Ek olarak, tekstil atıklarına bağlı olarak boyut küçültme, kirletici madde giderme, kurutma ve ayırma gibi bazı ön işlem adımlarının yapılması gerekir. Tekstil atıklarının türüne bağlı olarak organik maddeleri temel bileşenlerine ayırmak için kullanılan bir tekniktir.

Yağlar: Yakıt, yağlayıcı veya kimyasal olarak kullanılabilirler.

- Pamuk ve yün gibi doğal lifler, alifatik ve aromatik hidrokarbonlar, karboksilik asitler ve alkollerin bir karışımını içeren yağlar üretir. Protein içeren yün, aminler ve amidler gibi nitrojen bileşikleri de içerebilir.
- PET gibi sentetik elyaflar, tereftalik asit ve türevleri de dahil olmak üzere aromatik hidrokarbonlar açısından zengin yağlar ve kaprolaktam veya türevlerini içeren poliamid (nylon) yağları üretir.
- Karışımlar ve kompleks tekstiller, geniş yelpazede organik bileşikler içeren yağlar üretir.

Gazlar: Enerji kaynağı olarak kullanılabilirler.

- Doğal lifler: CO, CO₂, H₂ ve hafif hidrokarbonlar (örneğin metan, etilen) açısından zengindir.
- Sentetik lifler: Polimer türüne bağlı olarak, PET pirolizi daha fazla CO ve CO₂ üretme eğilimindedir. Nylon, amonyak veya hidrojen siyanür gibi daha yüksek seviyelerde azotlu gazlar üretebilir. Karışımlar ve karmaşık tekstiller: CO, CO₂, H₂, hafif hidrokarbonların ve likra, elastan ve nylon durumunda, hammaddede bu elementler mevcutsa muhtemelen azotlu veya sülfürlü gazların (SO₂, H₂S, SO₃) karmaşık bir karışımıyla sonuçlanır.

Charcoal (kömür): İnce küresel karbon siyahı (CB) parçacıkları üretmek için yeniden işlenebilir. Karbon siyahı (CB), çimento kompozit uygulamalarında dolgu maddesi olarak karbon nanotüpler veya grafen ile birlikte kullanılabilir.

- Doğal lifler: Başlıca karbondan oluşur ve selüloz veya proteinli malzemenin dokusunun bir kısmını koruyabilen bir yapıya sahiptir (protein yapısı genellikle piroliz işlemi sırasında parçalansa da, kömürleşmiş malzeme daha fazla işlenmeden önce bu protein içeren malzemelerin orijinal dokusunun bir kısmını koruyabilir).
- Sentetik elyaflar: Karbon içerebilen ancak sentetik kökeni yansıtan daha yüksek derecede aromatikliğe sahip olan herhangi bir katı kalıntıdır.



- Karışımlar ve kompleks tekstiller: Hammadde çeşitliliğini yansıtan karbon içeriği ve mineral kalıntıları (inorganik dolgu maddeleri, metalik bileşikler, alev geciktiriciler, pigmentler).

8.5.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma işlemi, tekstil atıklarını yüksek sıcaklıklarda (400–1000 °C) ve düşük oksijenli veya oksijensiz koşullarda geri dönüştürür. Pirolize benzer şekilde, gazlaştırma yüksek konsantrasyonlarda karbon ve hidrojen içeren gazlar üretir.

Zehirli gazlar ve kirli kül açığa çıkarabilen alev geciktirici pamuklu tekstillerin yakılmasına bir alternatif olarak önerilmiştir.

Tekstil atıkları, ağızlı yataklı bir gazlaştırma tesisinde gazlaştırılır.

Tekstil atıklarındaki alev geciktiriciler gazlaştırma sıcaklığını ve sentez gazı üretimini düşürdüğü bulunmuştur. Tekstil atıkları gazlaştırmasından önce alev geciktiricinin uzaklaştırılması, daha yüksek uçucu madde içerikleri ve nem ve daha düşük karbon konsantrasyonları ile sonuçlanmıştır. Vela ve arkadaşları, akışkan yataklı bir reaktör kullanarak pamuk ve polyesterin buhar gazlaştırmasını gerçekleştirdiler ve pamuğun sentez gazı üretimi için daha uygun olduğunu buldular. Polyester ve karışımları, sentez gazına ek olarak aromatik bileşikler üretti. Çalışma, tekstil atıklarından sentez gazı ve aromatiklerin geri kazanılması için gazlaştırmanın potansiyelini vurguladı.

Gazlaştırma işlemleri tekstil atıkları daha yüksek sıcaklıklarda geri dönüştürür. Gazlaştırma, atığın kendisiyle kimyasal reaksiyonlar içerdiği için pirolizden daha zordur.

Aktivasyon enerjilerini düşüren ZnO ve Fe (II) oksit gibi katalizörlerin kullanılması ve kompozit katalizörün katalitik etkisinin tek bir katalizörden daha iyi olmasıyla, bu bulgular CO₂ atmosferi altında atık tekstilin enerji kullanımının geliştirilmesinde faydalı olabilir.

Piroliz daha yüksek oranda gaz atık vermesine rağmen, gazlaştırma çok daha yüksek bir gaz fraksiyonu verir. Gazlaştırma kullanıldığında, artan basınç H₂ gazı konsantrasyonlarının, kalorifik değer, verimin ve CO₂'nin artmasına yol açabilir. Bunun aksine, çalışma sıcaklıkları arttıkça, sentez gazı üretimi artarken, kömür verimi düşer. Reaktör yatağına ve akış düzenine bakarak çeşitli gazlaştırıcı tiplerini ayırt etmek mümkündür. En yaygın gazlaştırma yöntemleri sabit yataklı veya akışkan yataklı gazlaştırıcı kullanır. Öte yandan, hidroliğin kurulum şekli nedeniyle daha iri katı parçacıkların ayrılması zordur.

Gazlaştırma kullanıldığında amaç, hidrojen, CO₂ ve metan (CH₄) gibi bileşikler içeren sentez gazı üretmektir. Etilen ve kül yan ürünlerinin bir karışımı oluşabilir.

8.6. HİDROTERMAL SIVILAŞTIRMA

Tekstil atıklarının hidrotermal sıvılaştırılması, ayırma veya renk giderme işlemine gerek kalmadan biyo-yağ ve monomerlerin geri kazanılması için bir yol sağlar. Tüketici sonrası polyester ve pamuklu tekstiller üzerinde hidrotermal sıvılaştırma gerçekleştirildi ve %95



pamuk/%5 polyester karışımının alkali koşullar altında 325 °C'de %26 ile en yüksek biyo-yağ verimini verdiği ortaya çıktı.

Organik maddeleri ayrıştırmak için hidrotermal yöntem, yüksek sıcaklık ve basınçlarda kimyasal kristalleştirme kullanır.

Hidrotermal yöntem, karbon-polimer atıklarının parçalanması için umut verici bir alternatiftir. Bu yöntem su kullanır ve kullanılan sıcaklık aralığına göre sıcak su ekstraksiyonu, basınçlı sıcak su ekstraksiyonu, arıtma, hidrotermal karbonizasyon ve hidrotermal sıvılaştırma gibi beş kategoriye ayrılabilir.

Hidrotermal işlem 280 °C'ye yakın bir sıcaklık gerektirir. Hidrotermal yöntemin uzun reaksiyon süreleri ve yüksek basınçlar dahil olmak üzere bir dizi dezavantajı vardır.

Bir çalışmada araştırmacılar, makroalg *Fucus serratus* kullanarak naylon 6 net atığının dönüşümü için hidrotermal sıvılaştırma hakkında çalışmışlardır. Naylon 6 ve *F. serratus*'un 50/50 karışımı %17'ye kadar biyo-ham petrol verimi üretebilir. Naylon 6, naylon 6'dan türetilen bir molekül olan kaprolaktam üretimi sırasında tamamen parçalandı. Xu ve diğerleri, yüzey aktif maddelerin hidrotermal karbonizasyonu katalize etmek için kullanıldığını buldular.

Hidrotermal işlemdeki bir adım, polyester-pamuk elyaf atık karışımını daha küçük parçalara ayırmayı ve bir diğeri de bu karışımın sulu bir fazda organik asit katalizörü ile dağıtılarak ürünler üretmeyi içerir. Yüksek basınç, reaksiyon sıcaklığının 140 °C'ye çıkmasına neden oldu. Bu, %99 polyester elyaf agregasının geri dönüşüm verimini ve pamuk elyaf parçalarının geri dönüşüm veriminin etkileyici bir şekilde %81'ini de elde etti. Bir çalışmada, yüksek verimli hidrofobisite elde etmek için hidrotermal karbonizasyon sıcaklığını düşürerek katalizör olarak $FeCl_3$ kullanıldı.

%50 pamuk/%50 polyester karışımından daha fazla tereftalik asit üretmiştir.

Hidrotermal yaklaşım, tekstil atıkları için ön işlem olarak da kullanılabilir. Bir çalışmada, 320 °C'de 60 dakika boyunca hidrotermal olarak ön işleme tabi tutulan pamuklu tekstil atıkları %23,3 biyo-ham petrol verimi ile sonuçlanmıştır. Ek olarak, karbon açısından zengin biyokömür elde edilmiş ve alternatif katı biyoyakıt veya elektrokimyasal karbon malzemesi olarak kullanılabilir. Hongthong, *Fucus serratus*'un 350 °C'de farklı oranlarda çeşitli naylon polimerlerinin varlığında hidrotermal sıvılaştırılmasının, naylon 6'nın kaprolaktama tamamen parçalanması ve naylon 6/6'nın siklopentanona kısmen parçalanmasıyla sonuçlandığını bulunmuştur; bu, biyoyakıt üretimi için makroalgların hidrotermal sıvılaştırılmasına eklendiğinde, belirli naylon tekstillerinin parçalanma ve monomerlerinin geri kazanılma potansiyelini göstermektedir.

8.7. PLAZMA ARK GAZLAŞTIRMASI

Plazma ark gazlaştırması, enerji geri kazanımı için belediye katı atıklarını gazlaştırmak için kullanılmıştır. Bir plazma reaktöründe buhar ve oksijenin varlığında ve yokluğunda belediye katı atıklarının gazlaştırılması, metan, etan, hidrojen, karbondioksit ve karbon monoksit üretimiyle sonuçlanmıştır.

Oksijen ve buharın varlığı karbon monoksit oluşumunu artırmıştır.



Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

Tekstil atıklarının plazma ark gazlaştırması üzerine çalışmalar şu anda sınırlı olsa da, bu yöntem termal olarak geri dönüştürülmüş atıklara bir alternatif sunmaktadır.

Tekstil atıklarının termal geri dönüşümü, atıktan enerji ve yakıt geri kazanımı avantajı sunar. Ancak, yeterli şekilde işlenmezse insan sağlığına ve çevreye zarar verebilecek azot oksitler, kükürt oksitler, dioksinler, furanlar ve ağır metaller gibi zararlı emisyonlar da üretebilir.

Termal geri dönüşümün özellikle elektrik, doğal gaz, katalizörler ve su olmak üzere yüksek enerji ve kaynak gereksinimleri vardır ve bu da geri dönüşümün faydalarını telafi edebilir. Ölçeklenebilir teknolojilerin eksikliği, tam ölçekli maliyet etkin uygulamasını sınırlayabilir ve dolayısıyla uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Termal geri dönüşüm teknolojilerinin avantajları ve dezavantajlarının bir özeti **Tablo 8.1**'de verilmiştir.

Tablo 8.1. Tekstil Atığı Geri Dönüşüm Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları

Teknoloji	Avantajları	Dezavantajları
Mekanik geri dönüşüm	Liflerden polimeri geri kazanır	Liflerin kalitesini ve mukavemetini azaltır
Mekanik—yalıtım/yapı malzemelerine dönüştürme	Atık lifleri dolgu veya takviye olarak kullanır	Son kullanım uygulamalarını sınırlar
Kimyasal geri dönüşüm	Atık liflerden monomerleri geri alır	Yüksek sermaye ve kimyasal girdi gerektirir
Biyokimyasal geri dönüşüm - mikrobiyal fermantasyon	Atık lifleri biyoyakıtlara veya biyoplastiklere dönüştürür	Uygun mikroorganizmaların mevcudiyetine bağlıdır
Biyokimyasal geri dönüşüm - anaerobik sindirim	Atık lifleri biyogaz veya komposta ayrıştırır	Biyolojik olarak parçalanabilirliği artırmak için liflerin ön işleme tabi tutulması gerekir
Biyokimyasal geri dönüşüm - kompostlama	Atık lifleri organik gübreye dönüştürür	Sadece doğal liflere uygulanabilir
Kimyasal ve biyokimyasal geri dönüşüm - elyaf rejenerasyonu	Selüloz veya protein bazlı atıklardan yeni lifler üretir	Karmaşık ve maliyetli süreçleri içerir
Termal geri dönüşüm—piroliz	Kömür, petrol ve gaz ürünleri üretir	Sera gazları ve toksik emisyonlar salınır; yüksek enerji girdisi gerektirir
Termal geri dönüşüm-gazlaştırma	Tekstili hidrojen açısından zengin sentez gazına dönüştürür; karbondioksit dönüşümünü artırır	Yüksek sıcaklık ve oksijen kaynağı gerektirir; yüksek enerji girişi gerektirir
Termal geri dönüşüm - hidrotermal sıvılaştırma	Tekstili biyo-yağa veya biyokömüre dönüştürür	Yüksek basınç ve su tüketimi gerektirir; yüksek enerji girişi gerektirir

8.8. ENERJİ GERİ KAZANIMI

Hızlı modada polyesterin yaygınlığı, yüksek kalorifik değeri nedeniyle atık-enerji tesislerinde yakılan kullanılmış tekstil miktarının artmasına katkıda bulunuyor.

Tekstil atığı enerji yoğun bir atık türüdür. Üretim hammaddesine bağlı olarak değişik oranlarda tekstil atıkları oluşmaktadır. Çeşitli tekstil atıklarının kalorifik değerleri **Tablo 8.2**'de verilmiştir.



Tablo 8.2. Tekstil Atıklarının Kalorifik Özelliği

Polimer/lif	Enerji tüketimi (MJ/kg lif)
Doğal polimerler	
Keten	10
Pamuk	55
Yün	63
Sentetik polimerler	
Viskon	100
Polipropilen	115
Polyester	125
Akrilik	175
Naylon	250

Not: 1 Megajoule/kg = 238.85 Kilocalories/kg

Tekstil atıkları evsel atıklarla karıştırılmadan, ıslatılmadan kaynağında ayrı toplanır, belli merkezde yoğunluğunu artırmak şartıyla sıkıştırılırsa atık yakma tesisleri için önemli enerji kaynağı olarak kullanılır. Yanma sonucu sifıra yakın kül oluşur. Kısaca tekstil atıkları önemli karbon kaynağıdır. Atık yakma tesisinde veya çimento sanayi yüksek fırında yakılması veya piroliz gazlaştırma şartıyla sera gazı emisyonunu azaltmasında önemli kaynaktır.



9. DÜZENLİ DEPOLAMA



Şekil 9-1. Tekstil Atıklarını Depolama

Tekstil atıkları hafif oldukları için çöp depolama alanlarında çok büyük yer kaplarlar ve alan işgal ederler.

1 kg tekstil atıkları çöp depolama alanlarında yaklaşık 0,96 m² yer kaplamaktadır. Bunun anlamı tekstil atıkları çöp depolama alanında yoğun yer işgal ederler.

Tekstil atıklarını çöp depolama alanlarına ekonomik taşıma maliyeti mutlaka tespit edilmeli.

Dünya çapında, tekstil atıklarının yaklaşık %87'sinin ilk kullanımdan sonra çöplüğe atıldığı veya yakıldığı tahmin edilmektedir. Bunların %90'ından fazlası yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir niteliktedir. Bu da tahmini olarak yıllık 100 milyar ABD dolarından fazla değer kaybına denk gelmektedir.

Dünya'da her saniye bir çöp kamyonu dolusu tekstil atığı çöplüğe dökülüyor ya da yakılıyor.

Çin'de 2022 yılında 26 milyon ton giysi atığı oluşmuş, bu atıkların sadece %20'den azı geri dönüştürülmüş ve önemli kısmı çöp sahalarına dökülmüştür.

2018 yılı verilerine göre ABD'de, yani toplam tekstil atığının %68,5'ulaştırılan 11,3 milyon ton tekstil atığı, çöp sahalarına dökülmüştür. Bu, tüm katı atık depolama sahasına atılan katı atıkların %7,7'e denk gelmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (USEPA) göre, tekstil atıklarının çöp depolama alanlarının yaklaşık %5'ini kapladığını tahmin etmektedir.

Kuzey Amerika'da her yıl 10 milyon ton evsel tekstil atığı depolama alanlarına dökülmektedir.

AB tüketicilerinin her yıl attığı 5,8 milyon ton tekstilin yalnızca dörtte biri geri dönüştürülüyor. Friends of the Earth Europe'a göre, geriye kalan 4,3 milyon ton çöp depolama alanına atılıyor.

İngiltere'de, yılda 336.000 tonunu tekstil atığı çöpe atılmaktadır.

Miktar açısından bakıldığında, Türkiye'de her yıl 1.155.000 ton tekstil atığı ortaya çıkmakta ve bu atıklar geri kazanılabilir niteliktedir. Yılda yaklaşık 912.500 ton tekstil atığı çöp depolama

Tekstil Sektöründe Döngüsel Ekonomiye Geçmeli

sahasına gönderilmektedir. Bu tekstil atığının 500 bin tonunun evsel tekstil atığı olduğu tahmin edilmektedir.

İstanbul ölçeğinde evsel atıkların %5,06'sını tekstil atıkları oluşturmaktadır. İstanbul'da günlük olarak 16.500 ton evsel atık oluşmaktadır. İstanbul'da yılda 303 bin ton tekstil atığı çöp depolama alanında depolanmaktadır.

Çöp sahalarına gönderilen evsel tekstil atıklarının %29'unun saf pamuktan, %24'ünün ise saf polyesterden üretildiği tahmin edilmektedir. Diğer bir deyişle, Türkiye'de her yıl yaklaşık 145 bin ton saf pamuk ürünü ve 112 bin ton saf polyester ürünü israf edilmektedir.

Sentetik tekstil atıklarının çöplüklerde bozulması 200+ yıl sürebilir.

Tekstil atıklarının çöp sahalarına atılmasının maliyeti, Fransa da dahil olmak üzere Avrupa'daki bazı ülkelerde ton başına yaklaşık 60 avrodur.

Tekstil atıklarının karada basit bir şekilde bertaraf edilmesi, üretimi ve taşınması için malzeme, enerji ve işgücü kaybına neden olmaktadır. Sentetik malzemelerin ayrışması zordur ve doğal tekstil atıklarının ayrışması CO₂'nin yanı sıra CH₄'de üretmektedir, bu nedenle tekstil atıklarının bertarafı aynı zamanda ekonomik bir kayıp ve kirlilik kaynağıdır.

Tekstil atıkları depolama, tekstil yönetimi hiyerarşisinde en az tercih edilen seçenek olmasına rağmen, büyük miktarlarda tekstil atığı hala toprağa atılmaktadır.

Son olarak, tekstil atık yönetiminin atık toplama, geri dönüşüm, kompostlama ve hatta düzenli depolama gibi farklı meslekleri içeren ve bazı sosyal sorunları da çözen büyük bir iş yaratma potansiyelini temsil ettiğini belirtmek gerekir.

Tüm evsel tekstil atıkları düzenli depolama sahasının yanına yapılan bir geri dönüşüm tesisinde geri dönüştürüldüğünde 301,68 ton/yıl CO_{2eq} eşdeğer azaltımı ile minimum çevresel etkiler gözlemlenmiştir.

Tekstil atığı dağlarına dur demek gerekir.





Şekil 9-2: Tekstil Atık Çöp Dağları

10. KAYNAKLAR

- <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/europes-used-textiles-are-an>
- <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20201208STO93327/the-impact-of-textile-production-and-waste-on-the-environment-infographics>
- <https://www.mdpi.com/2673-7248/3/4/27>
- <https://www.mdpi.com/2673-7248/2/1/10>
- <https://www.theguardian.com/fashion/2024/jan/18/its-the-industrys-dirty-secret-why-fashions-oversupply-problem-is-an-environmental-disaster>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344922000052>
- <https://www.uffizio.com/blog/managing-textile-waste-collection-system/>
- https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2020/12/story/20201208STO93327/20201208STO93327_en.pdf
- <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1528>
- <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/11638>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590262824000510>
- <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00405175231210239>
- <https://www.mdpi.com/2075-471X/8/4/27>
- <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X241257093>
- <https://www.semanticscholar.org/reader/580d101cd2dd79dd5827c3980925fe4026b191cc>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623002974>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022025634>
- https://www.caa.go.jp/policies/future/topics/meeting_008/materials/assets/future_caa_cms201_220325_02.pdf
- <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/00405175241247806>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624039404>
- <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2389/2024/0040-23892404024N.pdf>
- <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/gc/d4gc00911h>
- <https://www.mdpi.com/1420-3049/30/2/299>
- <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ado6827>

