



**KALKINMA AJANSLARI**  
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



**İZMİR**  
**KALKINMA**  
**AJANSI**

# İZMİR RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI GERİ DÖNÜŞÜMÜ YOL HARİTASI

2023

**İZMİR RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI**  
**GERİ DÖNÜŞÜMÜ YOL HARİTASI**  
**2023, İZMİR**

**Yayın Sahibi**

İzmir Kalkınma Ajansı  
Megapol Çarşı Kule, Halkapınar Mahallesi,  
1203/11. Sk. No: 5-7, Kat: 19  
35170 Konak/İzmir  
Tel : 0232 489 81 81  
Faks : 0232 489 85 05  
E-posta: info@izka.org.tr

**Grafik Tasarım**

Orçun ANDIÇ  
Hasan Can ÇAKIR

© 2023, İZKA. Tüm hakları saklıdır. Bu eserin tamamı ya da bir bölümü, 4110 sayılı Yasa ile değişik 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu uyarınca, kullanılmazdan önce hak sahibinden 52. maddeye uygun yazılı izin alınmadıkça, hiçbir şekil ve yöntemle işlenmek, çoğaltılmak, çoğaltılmış nüshaları yayılmak, satılmak, kiralanmak, ödünç verilmek, temsil edilmek, sunulmak, telli/telsiz ya da başka teknik, sayısal ve/veya elektronik yöntemlerle iletilmek suretiyle kullanılamaz.

Hazırlanmış olan çalışmanın tüm hakları İzmir Kalkınma Ajansı'na aittir. Bu İZKA eserinden kaynak gösterilmek suretiyle alıntı yapılabilir.



**KALKINMA AJANSLARI**  
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ



**İZMİR**  
**KALKINMA**  
**AJANSI**

İZMİR  
RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI  
GERİ DÖNÜŞÜMÜ YOL HARİTASI

—  
2023







# İÇİNDEKİLER

<b>YÖNETİCİ ÖZETİ</b>	<b>9</b>
<b>BÖLÜM 1. GİRİŞ VE ARKA PLAN</b>	<b>16</b>
1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi Sektörünün Durumu	19
1.2. Türkiye'de ve İzmir'de Rüzgâr Enerjisi Sektörünün Durumu	22
<b>BÖLÜM 2. SEKTÖRÜN GERİ DÖNÜŞÜM AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ</b>	<b>24</b>
2.1. Alternatif Geri Dönüşüm Olanakları	29
2.2. Dünyadan İyi Uygulama Örnekleri	32
<b>BÖLÜM 3. TÜRKİYE'DE RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI GERİ DÖNÜŞÜM OLANAKLARI</b>	<b>36</b>
3.1. Senaryo 1: Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm (Yakıt Üretim) Tesisi	44
3.2. Senaryo 2: Rüzgâr Türbin Kanatlarından Piroлиз Yöntemiyle Değerli Ürün Eldesi	56
<b>BÖLÜM 4. YENİLİKÇİ FİKİRLER VE İLERİYE DÖNÜK AR-GE İHTİYAÇLARI</b>	<b>64</b>
4.1. Yenilikçi Fikirler	65
4.2. Ar-Ge Çalışmaları	67
<b>BÖLÜM 5. RÜZGÂR TÜRBİNİ GERİ DÖNÜŞÜMÜ YOL HARİTASI</b>	<b>70</b>
5.1. Paydaşlar ve Olası Roller	71
5.2. Koşullar, Gereksinimler ve Fırsatlar	74
5.3. Eylem Planı	78
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>83</b>
<b>EK 1. Çimento Sektöründe Alternatif Hammadde Olarak Kullanılmasına Onay Verilmiş Atık Kodları</b>	<b>86</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

<b>ŞEKİL 1.1.</b>	ABD’de Yer Alan Bir Depolama Sahasında Rüzgâr Türbin Kanatları	17
<b>ŞEKİL 1.2.</b>	Ülke Bazında 2020 Yılındaki Kurulu Rüzgâr Türbini Sayıları	19
<b>ŞEKİL 1.3.</b>	Rüzgâr Enerjisi Kapasitesine Göre Dünyanın İlk 10 Ülkesi	19
<b>ŞEKİL 1.4.</b>	Avrupa’da Kapasiteye Göre Karasal Rüzgâr Türbini Yaşları	20
<b>ŞEKİL 1.5.</b>	Rüzgâr Enerjisi Endüstrisinden Kaynaklanacağı Tahmin Edilen Küresel Kompozit Atık Hacmi	21
<b>ŞEKİL 1.6.</b>	Rüzgâr Enerjisi ve Diğer Sektörlerden Kaynaklanan Kompozit Atık Miktarı (kt/yıl)	21
<b>ŞEKİL 1.7.</b>	Türkiye’de Yıllar İçinde Devreye Alınan Rüzgâr Santralleri	22
<b>ŞEKİL 1.8.</b>	Türkiye’de Yıllık Rüzgâr Enerjisi Üretim Miktarı (GWh) ve Ülke İçindeki Payı (%)	22
<b>ŞEKİL 1.9.</b>	İllere Göre Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü (MW)	23
<b>ŞEKİL 2.1.</b>	Rüzgâr Türbini Kanat Atıklarının Yönetimi: Mevcut Durum Süreç Akım Şeması	25
<b>ŞEKİL 2.2.</b>	2014-2018 Yılları Türkiye’deki Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisi Sayıları	26
<b>ŞEKİL 2.3.</b>	2014-2018 Yılları Türkiye’deki Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesislerinde İşlem Gören Atık Miktarları (Bin Ton)	27
<b>ŞEKİL 2.4.</b>	2014-2018 Yılları Türkiye’deki İşlem Türüne Göre Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisi Sayısı	27
<b>ŞEKİL 2.5.</b>	2014-2018 Yılları Türkiye’deki İşlem Türüne Göre Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesislerinde İşlem Gören Atık Miktarı (Bin Ton)	28
<b>ŞEKİL 2.6.</b>	Türkiye Çimento Fabrikaları Bölgesel Dağılımı, 2021	30
<b>ŞEKİL 2.7.</b>	Aalborg, Danimarka’da Türbin Kanadından İnşa Edilmiş Bir Bisiklet Korunağı	32
<b>ŞEKİL 2.8.</b>	Geri Dönüştürülmek Üzere Hazırlanan Türbin Kanatları	32
<b>ŞEKİL 2.9.</b>	Rüzgâr Türbini Geri Dönüşümünden Elde Edilen Ürünler	33
<b>ŞEKİL 2.10.</b>	Geocycle Firmasının Tanıtım Görseli	34
<b>ŞEKİL 2.11.</b>	CTP Atıkları	34
<b>ŞEKİL 2.12.</b>	Thisted, Danimarka’da Cam Elyafından Üretilmiş Gürültü Bariyeri	35
<b>ŞEKİL 2.13.</b>	Rüzgâr Türbin Kanadından Elde Edilen Yalıtım Ürünü	35
<b>ŞEKİL 3.1.</b>	2023-2036 Yılları Arasında Türkiye’de Ömrünü Tamamlaması Beklenen Türbin Kanat Sayıları	37

<b>ŞEKİL 3.2.</b>	2022-2036 Yılları Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının İllere Dağılımı	37
<b>ŞEKİL 3.3.</b>	Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının Harita Üzerinde Dağılımı	38
<b>ŞEKİL 3.4.</b>	2023 -2036 Yılları Arasında Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının Boyutları	38
<b>ŞEKİL 3.5.</b>	Dünya, Avrupa ve Türkiye'de Kompozit Malzemenin Sektörler Arasında Dağılımı (%)	39
<b>ŞEKİL 3.6.</b>	Türkiye'de Kompozit Sektöründe Yer Alan Firmaların Bölgesel Dağılımı, 2020	41
<b>ŞEKİL 3.7.</b>	Kompozit Sektörü İhracat-İthalat Kalemleri (Milyon Avro), 2017	41
<b>ŞEKİL 3.8.</b>	2022 -2036 Yılları Arasında Tesiste İşlem Görecek Atıkların Çeşit ve Miktar Dağılımı	43
<b>ŞEKİL 3.9.</b>	Rüzgâr Türbini Kanat Atıklarının Yönetimi: Mevcut Durum ve Yatırıma Konu Yakıt Üretim Tesisi Genel Süreç Akım Şeması	44
<b>ŞEKİL 3.10.</b>	Kırma/Parçalama Sistemi Genel Proses Akışı	45
<b>ŞEKİL 3.11.</b>	Senaryo 1'de Yatırıma Konu Tesisin Süreç Akış Şeması	46
<b>ŞEKİL 3.12.</b>	2016-2020 Yılları Arasında Türkçimento'ya Kayıtlı ve Kayıtlı Olmayan Türkiye'deki Tüm Çimento Fabrikalarının Kapasite Miktarları (Bin Ton)	47
<b>ŞEKİL 3.13.</b>	2016-2020 Yılları Arasında Türkçimento'ya Kayıtlı Çimento Fabrikalarının Kapasite Kullanım Oranları	47
<b>ŞEKİL 3.14.</b>	2007-2018 Yılları Türkiye'de Çimento Sektöründe ATY Kullanım Miktarı (Bin Ton)	48
<b>ŞEKİL 3.15.</b>	2007-2018 Yılları Türkiye'de Çimento Sektöründe ATY İkame Oranı	48
<b>ŞEKİL 3.16.</b>	Piroliz Sistemi Genel Proses Akışı	57
<b>ŞEKİL 3.17.</b>	Piroliz Tesisi Örnek Gösterim Şeması	58
<b>ŞEKİL 3.18.</b>	Rüzgâr Türbini Kanatlarının Piroliz Öncesi (a) ve Piroliz Sonrası (b) Görünümü ile Kısa Elyaf/Dolgu Ürünleri (c) ve Yalıtım Malzemesi Ürünü (d) Örnekleri	58
<b>ŞEKİL 3.19.</b>	Piroliz İşlemi Sonucunda Elde Edilen Ürünler: Pirolitik Yağ ve Karbon Siyahı	59
<b>ŞEKİL 4.1.</b>	Cam Elyaf Malzemededen Yapılmış Tasarım Örnekleri	65
<b>ŞEKİL 4.2.</b>	Atık Rüzgâr Türbin Kanatlarından Yapılan Fonksiyonel Şehir Mobilyaları Örnekleri	65
<b>ŞEKİL 4.3.</b>	Siemens Gamesa tarafından üretilen RecyclableBlades	68

## TABLO LİSTESİ

<b>TABLO 3.1.</b>	Malzeme Fiziksel Özellikleri ve Sistem Temel İşletme Parametreleri	45
<b>TABLO 3.2.</b>	Tahrik/Güç Ünitesi Teknik Bilgileri	46
<b>TABLO 3.3.</b>	Sistemin Genel Boyutları ve Besleme Ünitesi Teknik Bilgileri	46
<b>TABLO 3.4.</b>	Kesme ve Eleme Üniteleri Teknik Bilgileri	46
<b>TABLO 3.5.</b>	Tesis Sabit Yatırım Maliyet Kalemleri	49
<b>TABLO 3.6.</b>	Tesis Yıllık Gider Maliyet Kalemleri	50
<b>TABLO 3.7.</b>	Tesis Maliyet ve Gelir Kalemleri	51
<b>TABLO 3.8.</b>	Geri Kazanım İşlemleri	54
<b>TABLO 3.9.</b>	ATY Hazırlama Tesislerinde Hazırlanacak Yakıtın Özellikleri	55
<b>TABLO 3.10.</b>	Piroliz İşlemi Sonucunda Üretilecek Ürünlerin Ortalama Verimleri	56
<b>TABLO 3.11.</b>	Piroliz İşlemi Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Uygulama Alanları	59
<b>TABLO 5.1.</b>	Rüzgâr Türbini Kanatlarının Geri Dönüşümü Konusunda Tespit Edilen Fırsatlar ve Sorunlar/ Engeller Matrisi	76



## KISALTMALAR

<b>ABD</b>	Amerika Birleşik Devletleri
<b>ATY</b>	Atıktan Türetilmiş Yakıt
<b>CEFIC</b>	Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi
<b>CTP</b>	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
<b>ÇED</b>	Çevresel Etki Değerlendirmesi
<b>EBRD</b>	Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası
<b>EPD</b>	Çevresel Ürün Beyanı
<b>EuCIA</b>	Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği
<b>GFB</b>	Geçici Faaliyet Belgesi
<b>İZKA</b>	İzmir Kalkınma Ajansı
<b>LDPE</b>	Düşük Yoğunluklu Polietilen
<b>ÖTL</b>	Ömrünü Tamamlamış Lastikler
<b>RES</b>	Rüzgâr Enerji Santrali
<b>STK</b>	Sivil Toplum Kuruluşu
<b>TRL</b>	Teknoloji Hazırlık Seviyesi
<b>TÜBİTAK</b>	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
<b>TÜREB</b>	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
<b>WindEurope</b>	Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği
<b>YEKA</b>	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı



## YÖNETİCİ ÖZETİ

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması ve yaygınlaşması ile büyüyen bir sektör haline gelmiştir. Öte yandan, ortalama 20 yıllık ömürlerinin sonunda rüzgâr türbinleri atık olarak ortaya çıkmaktadır. Ek olarak, rüzgâr türbinlerinin üretimi sırasında da hâlihazırda üretim atıkları meydana gelmektedir. Tipik bir rüzgâr türbini, rüzgâr kanatları, dişli kutusu, elektrik jeneratörü ve kule gibi birçok bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden kaynaklı inşaat ve yıkım atıkları (beton atıkları), metaller, nadir toprak elementleri, birtakım yağlar ve kompozit malzeme atıkları söz konusudur. İnşaat atıkları için ayırma ve geri kazanım teknolojileri gelişmiş ve yaygındır (WindEurope, 2020). Beton atıkları genellikle agrega halinde çimento yapımı, taşkın koruması için beton setleri, dolgu yapımı vb. birçok şekilde yeniden kullanılabilir. Bununla birlikte, kule, nasele, şanzıman ve jeneratörde bulunan alüminyum, bakır, demir gibi talebi yüksek olan metaller ile elektronik ve dişli gibi türbin bileşen malzemelerinin de yaklaşık yüzde 85'inin geri dönüştürülebildiği veya yeniden kullanılabilir olduğu bilinmektedir. Genellikle jeneratörde bulunan nadir toprak elementleri ise manuel olarak ayırma, eritme gibi yöntemlerle geri kazanılmaktadır. Yağlar ise toprağın kontamine olmaması için uzman personel tarafından jeneratör ve hidrolik sistemden boşaltılmakta ve yönetmeliklere uygun şekilde yönetilmektedir. Ancak verimlilik açısından hafif olmaları ve şiddetli hava koşulları için dayanıklı olmaları amacıyla kompozit malzemelerden üretilen kanatların geri dönüştürülmeleri ve tekrar katma değerli ürünler elde edilmesi mümkün olamamaktadır.

Türkiye nispeten genç rüzgâr türbin altyapısına sahiptir ancak yakın gelecekte rüzgâr türbinlerinin bir kısmının ömrünü tamamlayacak olması sebebiyle rüzgâr türbin atıklarının yüksek miktarlarda çıkacağı öngörülmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarının geri dönüşümü için mevcut bir uygulama bulunmadığı düşünüldüğünde ise atık depolama alanlarında bertaraf edilmesi beklenen bu malzemelerin önemli bir ekonomik kayıp doğuracağı görülmektedir.

Ülkemizde rüzgâr enerji santralleri ve ilgili ekipmanların üretimi ağırlıklı olarak İzmir ve çevresinde konumlanmıştır. Dolayısıyla İzmir bir rüzgâr enerjisi merkezi haline gelmiştir. İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA), İzmir'in yeşil ve mavi büyüme hedeflerine katkı sağlamak ve TR31 bölgesinin mevcut altyapısını, coğrafi avantajını ve yetkinliklerini kullanarak rüzgâr türbini geri dönüşümü sektörünün gelişimine öncülük yapmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma ile, sektörün rekabetçi ve sürdürülebilir gelişimini sağlayacak işbirliklerinin hayata geçirilebilmesine yönelik İzmir ilinde rüzgâr türbini kanadı geri dönüşümü yol haritası hazırlanması ve yenilenebilir enerji ve çevre teknolojileri konularında katma değer artırılması hedeflenmiştir.

### Giriş ve Arka Plan

Küresel rüzgâr enerjisi piyasası, teknolojik yenilikler ve ölçek ekonomisi sayesinde son 10 yılda kapasitesinin neredeyse dört katına çıkmıştır. Dünya çapındaki tüm rüzgâr tesislerinin toplam kapasitesi şu anda 744 GW'a ulaşmıştır (World Wind Energy Association (WWEA), 2021). Karasal Rüzgâr Türbinlerinin Hizmetten Çıkarılması Endüstrisi Kılavuzu'na göre, Avrupa'da toplamda 34.000 türbin 15 yaşında veya daha eskidir (WindEurope, 2020). Türkiye'de ise özellikle son yıllarda gerçekleştirilen yatırımlar sayesinde rüzgâr enerjisinin toplam kurulu gücü 9.305 MW'a ulaşmış ve toplam ulusal elektrik üretimindeki payı %8'i geçmiştir. Ülkemizde halen işletmede olan 239 adet santralde toplam 3.591 adet rüzgâr türbini bulunmaktadır (TÜREB, 2021). Mevcut kurulu güç açısından öne çıkan ilk dört il sırasıyla İzmir (1.798 MW), Balıkesir (1.220 MW), Çanakkale (751 MW) ve Manisa'dır (717 MW).

Mevcut durumda dünyada olduğu gibi ülkemizde de türbin kanadı atıkları çok büyük oranda atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değere dönüştürülememektedir. Dünyada rüzgâr türbin atıklarının yönetimi için sürdürülebilir, ticari ölçekte başarı örneği olabilecek çalışmalar oldukça yeni ve çok sınırlı sayıdadır. Rüzgâr enerjisi kurulumundaki hızlı artış nedeniyle, rüzgâr türbin kanatlarından



kaynaklanan kompozit atık miktarının da gelecekte oldukça artması beklenmektedir. Bu nedenle türbin kanat atıklarının değerlendirilerek ekonomiye kazandırılmasına yönelik çalışmaların tüm dünyada hızlanacağı bir döneme girilmektedir. Rüzgâr kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12 ile 15 ton arasındadır. 2019 yılında 185 bin ton olan rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan toplam kompozit atık miktarının, 2039'da yaklaşık 8,8 milyon tona ulaşması beklenmektedir ve bu durum geri dönüşüm ihtiyacını daha da artırmaktadır (FutureBridge, 2020).

## Türkiye'de Sektörün Geri Dönüşüm Açısından Değerlendirilmesi

Ülkemizde kurulu 3.591 türbin, her türbinde 3 adet kanat olduğu için toplam yaklaşık 10.773 kanat mevcut olduğunu göstermektedir. Türkiye nispeten genç rüzgâr türbinlerine sahip olsa da, kanatların üretimi sürecinde fabrikalarda ortaya çıkan üretim atıkları/fireleri ve santral sahalarında doğa olayları vb. sebeplerle hasara uğrayarak işlevini kaybettiği için atık olarak genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilen kanatlar bulunmaktadır.

Rüzgâr türbin kanadı atıkları için çözümün bir parçası olabilecek önemli sektörlerden bir tanesi atık miktarlarındaki artışa paralel olarak önemli bir sektör haline gelen atık geri dönüşüm sektörüdür. TÜİK tarafından yayınlanan verilere göre, Türkiye'de 2018 yılında 166 atık bertaraf tesisi ve 2.057 atık geri kazanım tesisi olmak üzere toplam 2.223 atık yönetim tesisi faaliyet göstermiştir. En çok geri dönüştürülen atıkların başında kağıt, plastik ve cam atıklar gelmektedir. Bugüne kadar ülkemizde rüzgâr türbin kanadı atıkları büyük hacimlerde ortaya çıkmamış olduğu için, kanat atıklarının geri dönüşümü konusunda bir ihtiyaç oluşmamıştır. Bu nedenle hâlihazırda ülkemizde kanat atıklarının geri dönüşümü konusunda herhangi bir geri dönüşüm tesisi bulunmamaktadır ancak yakında bu atıkların artacak olması sebebiyle ülkemizin bu soruna hazırlıklı olması ve özellikle Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve Avrupa ülkelerinde uygulamaları görüldüğü üzere Türkiye'de de alternatif çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (WindEurope), Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi (Cefic) ve Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği'nin (EuCIA) yayınladığı "Rüzgâr Türbini Kanadı Döngüselligi" raporuna göre, rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknoloji hazırlık seviyelerinde (TRL 4 ile 9 arasında) çeşitli alternatif teknolojiler vardır fakat henüz hepsi ticari ölçekte mevcut değildir ve maliyet-etkin bir çözüm sunmaktan uzaktır. Bu alternatif teknolojiler;

- ▶ mekanik öğütme
- ▶ termal (piroliz, akışkan yatak) işlemler
- ▶ termo-kimyasal (solvoliz) işlemler
- ▶ elektro-mekanik (yüksek voltajlı darbe parçalanması) işlemler veya
- ▶ bu işlemlerin kombinasyonlarıdır.

Dünyadaki geri dönüşüm uygulama örneklerine bakıldığında, ABD, Almanya ve Danimarka'nın bu alanda önde gelen ülkeler olduğu görülmektedir. Bu ülkelerde gerçekleştirilen geri dönüşüm uygulamaları, çimento tesislerinde hammadde ve yakıt olarak (ATY) kullanılması, ömrünü tamamlamış türbin kanatlarından cam elyafın geri kazanılması çalışmaları, kompozit cam elyaf atıklarından elyaf, pelet, inşaat malzemesi, panel, gürültü bariyeri, ısı yalıtım/izolasyon malzemeleri gibi çeşitli ürünler üretilmesi olarak sıralanabilmektedir. Ek olarak dünyada, rüzgâr türbin kanatlarının kullanım ömürleri tamamlandıktan sonra ileri dönüşüm (upcycling) olarak da adlandırılan uygulamalara yönelik, türbin kanatlarının oyun alanları veya şehir mobilyası olarak kullanımı veya türbin kanatlarının bazı spesifik yapısal ürünlerinin, inşaat amaçlı kullanımı (bisiklet korunağı, köprü, yürüme yolları, mimari uygulamalar vb.) örnek olarak verilebilmektedir.

Yapılan tüm değerlendirmeler ışığında kısa vadede hayata geçirilebilecek en uygun çözüm, diğer ülkelerde de yaygınlaşmaya başlayan kırma, ayrıştırma, yakıt üretimi ve çimento vb. tesislerde enerji kaynağı olarak kullanım süreçlerinden oluşan geri dönüşüm uygulamasıdır. Atık geri dönüşümü sektörünün ürettiği katma değerli ürünlere verilebilecek güzel bir örnek atıktan türetilmiş yakıttır (ATY). ATY genellikle enerji kullanımı yoğun olan endüstrilerde kömür alternatifi olarak tercih edilmekle beraber, en yaygın kullanımı çimento tesislerinde ek yakıt olarak değerlendirilmesidir.

Çimento sektörünün Türkiye'deki durumu incelendiğinde, kapasite bakımından oldukça gelişmiş durumda olduğu görülmektedir. Türkiye çimento sektörü üretiminde Avrupa'da 1. dünyada 6. sırada yer almaktadır. Mevcut durumda çimento tesislerinde türbin kanadı atıklarının değerlendirilemiyor olmasındaki en büyük etken ise bu atıkları, çimento tesislerinin talep ettiği yaklaşık 50x50 mm boyutlarına indirgeyebilecek kırıcıların bulunduğu bir geri kazanım tesisinin olmamasıdır.

Eski türbin kanatlarının geri dönüştürülmesinin rüzgâr sanayii için yakın gelecekte öncelikli konulardan birisi olacağı düşünüldüğünden, çimento sektörü dışında, rüzgâr türbin atıklarının çeşitli ürünlerde, örneğin betonda ve asfaltta kullanılabilmesi, dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilmesi de gündemde olacaktır. Bu nedenle, uygulamaların yalnızca çimento sektöründe ek yakıt olarak kullanımıyla kalmayacağı yukarıda bahsedilen alternatif teknolojilerin de yoğun olarak araştırılacağı ve uygulamaya konacağı öngörülmektedir. Bu teknolojiler arasında dünyada en yaygın olarak araştırılan, piroliz teknolojisidir. Türkiye'de genellikle ömrünü tamamlamış lastik pirolizi gerçekleştirilmektedir ve pazar bu yönde kurulmuştur. Bu tesislerde kaynak olarak ömrünü tamamlamış lastik ve plastik atık başta olmak üzere pek çok karbon bazlı atık piroliz işlemine tabi tutulmaktadır. Piroliz işleminden elde edilen ürünler karbon siyahı, pirolitik yağ ve pirolitik gazdır.

## Türkiye'de Rüzgâr Türbin Sektöründe Geri Dönüşüm Olanakları

Ülkemizin rüzgâr enerji santralleri son 15 yılda artmaya başlamıştır ve önümüzdeki 5 yılın tamamlanmasını takiben pek çok santral 20 yaşını doldurmaya başlayacaktır. 10 yıl içinde ömrünü tamamlamış türbin kanadı miktarının yıllık 5 bin ton, takip eden 5 sene içinde (2036 yılında) ise yıllık 13.750 ton mertebelerine ulaşması beklenmektedir. Önümüzdeki 15 yılda Türkiye'de ortaya çıkması beklenen yaklaşık 8.000 türbin kanadının 2.063 adedi İzmir (%27,1), 1.420 adedi Balıkesir (%18,6), 1.101 adedi Manisa (%14,5), 888 adedi Çanakkale (%11,7), 384 adedi Afyon (%5,0) ve 377 adedi (%4,9) Aydın'da olacaktır. Bu doğrultuda, rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümüne olan talebin en fazla, rüzgâr türbinlerinin en yoğun bulunduğu, dolayısıyla en fazla atığın çıkacağı İzmir ilinde ve çevresinde

olacağı öngörülmektedir. Ek olarak, rüzgâr türbin kanatları kompozit malzemelerden üretildiği için diğer sektörlerden atık olarak çıkan kompozit malzemeler de rüzgâr türbinleri ile birlikte geri dönüştürülmek üzere değerlendirilebilecektir. Kompozit sektörünün Türkiye'deki büyüme durumu incelendiğinde, Avrupa ve dünya büyüme hızının üzerinde olduğu görülmektedir. Kompozit sektöründeki büyüme, kompozit atıkların gelecekte daha çok çıkacağına ve rüzgâr türbin kanatlarının geri dönüşümü için olan ihtiyaç ile bir sinerji yaratılmasının mümkün olduğuna işaret eder. Dolayısıyla, bu çalışmada rüzgâr türbin kanat atıkları ile CTP atıkları birlikte ele alınmıştır. Rüzgâr türbin geri dönüşümüne oluşacak talebin analizi aşağıdaki gibidir:

- ▶ İzmir'de 2021 yılı itibarıyla çıkan ve depo sahalarına gönderilen üretim atıkları yaklaşık 4.000 ton/yıl seviyesindedir.
- ▶ 2011-2021 yılları arasında toplam devreye alınmış kanat ağırlığı, yıllık ortalama %10 seviyesinde artış göstermektedir. Bu artışın Türkiye kanat üretim kapasitesine ve aynı zamanda kanat üretim atıklarının yıllık artışına aynı şekilde yansıtacağı, önümüzdeki 15 yıl içerisinde kanat üretim atıklarının da her yıl %10 oranında artacağı beklenmektedir.
- ▶ Rüzgâr türbini geri dönüşümü için bir tesis kurulması durumunda, İzmir ve çevre illerde ömrünü tamamlamış kanatlar bu tesiste işlem görebilecektir. Bu nedenle İzmir, Çanakkale, Manisa, Balıkesir, Bursa, Afyon, Denizli, Muğla, Aydın illerinden çıkacak olan ömrünü tamamlamış kanatlar hesaplanarak talebe dair girdi teşkil etmiştir.
- ▶ Kanat ve kanat komponentlerinin üretiminin mevcut durumda kümelendiği İzmir ve çevresinin ilerleyen yıllarda da üretimde önde gelen bölge olacağı düşünülmektedir.
- ▶ İzmir ve çevre illerde üretilen CTP atıklarının Türkiye'deki toplam CTP atıklarının yaklaşık %15'ini kapsadığı varsayımıyla bu miktarda atığın da işleme gireceği beklenmektedir.
- ▶ Türkiye'de ağırlıklı olarak kanat üretiminden kaynaklanan CTP içerikli birikmiş toplam 12.500 ton atığın %50'sinin İzmir ve çevre illerde depolanmakta olduğu ve ilk 5 yıl içinde aşamalı olarak bu atıkların buldukları depo alanlarından alınarak olası tesiste işlem görmek üzere temin edilebileceği öngörülmektedir.

Önümüzdeki 15 yılda kullanım ömrünü dolduracak türbin kanatlarının markalarına bakıldığında ise sırasıyla Nordex, Enercon, Vestas, GE ve Siemens'in öne çıktığı görülmektedir. Halen ülkemizde mevcut kurulu güç ve yıllık üretim açısından da öne çıkan bu markalar rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümü için atılacak adımlarda kritik öneme sahip olacaktır.

Türkiye'de rüzgâr türbin atıklarının ve diğer CTP atıklarının birlikte düşünüldüğü sektörün geri dönüşümü ihtiyacına olan talebi göz önüne seren bu veriler değerlendirildiğinde ve özellikle rüzgâr türbin geri dönüşümü üzerine yoğun çalışan Avrupa'daki çalışmalar incelendiğinde Türkiye için değerlendirilen alternatif geri dönüşüm olanakları iki senaryo altında ele alınmıştır:

- ▶ Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm (yakıt üretim) tesisi kurularak atıkların geri dönüşümünün sağlanması
- ▶ Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşümü için piroliz teknolojisinin kullanılması ile değerli ürün eldesi

#### **Senaryo 1:** Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm (Yakıt Üretim) Tesisi

İlk olarak bir geri dönüşüm tesisi kurularak, özellikle kompozit malzemelerden oluşan rüzgâr türbini kanat atıklarının parçalanıp, çimento ve/veya yakma tesislerinde kullanımı mümkün yakıt haline getirilmesi senaryosu ele alınmıştır. Kurulacak bir yakıt üretim tesisinin, hâlihazırda mevcut bir geri dönüşüm tesisine entegre olarak çalışmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Mevcut durumda görece genç rüzgâr santrallerine sahip olan ülkemizde ömrünü tamamlamış ve kullanım dışı kalmış türbin kanatları oldukça sınırlı sayıdadır. Bu senaryodaki tesisin, kompozit atıklar dışındaki farklı atıkları da işleyebilecek özellikte başka bir tesis bünyesinde kurulması, gerektiğinde atıkların harmanlanarak piyasanın ihtiyaç duyacağı farklı özelliklerdeki yakıtların üretilmesine olanak tanıyacaktır. Rüzgâr türbini kanatlarının atık olarak oluşturduğu noktadan itibaren farklı sektörlerde enerji veya alternatif hammadde olarak kullanılabilmesi için ilgili sektörlerin kullanılabileceği boyutlara getirilmesi gerekmektedir. Yerinde kesilerek en fazla 1,5 m boyutlarına getirilen atık malzemelerin bahsi geçen kırma/parçalama sistemi vasıtasıyla en fazla 50 mmx50 mm boyutlara getirilmesi sağlanacaktır.

İzmir'de halihazırda faaliyet gösteren 3 ATY tesisi ve Türkçimento'ya kayıtlı 2 çimento fabrikası bulunmaktadır. Türkiye'deki çimento tesisleri incelendiğinde, özellikle 2017-2018 yılları arasında olmak üzere üretim kapasitelerinde sürekli bir artış olduğu görülmektedir. 2017 yılında çimento sektöründe yaklaşık 758.111 ton ATY kullanılmıştır. Bu sayede yaklaşık olarak 300.000 ton fosil yakıt tasarrufu yapılmış ve %4,7'lik ısı yer değiştirme sağlanmıştır (Oyak Çimento, 2019). Avrupa Birliği'nde ise yapılan ısı yer değiştirme %41'dir ve çimento üretiminde Avrupa'da birinci olan Türkiye'nin bu konuda gelişme potansiyeli yüksektir.

Böyle bir tesis kurulması durumunda, ilk yatırım maliyeti 1.161.000 ABD Doları, yıllık işletme maliyeti ise 310.226 ABD Doları olarak hesaplanmıştır. Tesisin atık bertaraf getirisi ve yakıt satış getirisi olarak iki temel gelir kalemi olacaktır ve yıllık geliri 564.000 ABD Doları seviyelerinde olacaktır. Bu hesaplamalar doğrultusunda tesisin yıllık net getirisi 253.774 ABD Doları, geri ödeme süresi ise 4,6 yıl olarak bulunmuştur.

Çevresel açıdan incelendiğinde, rüzgâr enerjisi kullanımının çevreye olan etkisinin yaklaşık %70'i türbinlerin üretiminde kullanılan malzemelerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle hizmet ömrü sonunda optimum geri dönüşümün sağlanması ekonomik ve çevresel açıdan önem taşımaktadır. Ayrıca, atıkların yakıt olarak kullanılmasıyla, birincil yakıt olarak doğal kaynaklar ve madenler kullanılmamış olmakta; fosil yakıt yerine ikame edilmesiyle sera gazı emisyonlarında azalma gerçekleşmektedir. Öte yandan, düzenli depolama sahaları çok çeşitli çevre ve insan sağlığı sorunlarına neden olabilmektedir, bu nedenle yalnızca atık malzemeler yeniden kullanılamıyorsa, geri dönüştürülemiyorsa veya geri kazanılamıyorsa başvurulmalıdır. Düzenli depolama sahalarında biriktirilen atık malzemelerin çoğunun ayrışması çok uzun yıllar aldığından, etkili uzun vadeli stratejilere ve tesislere ihtiyaç vardır. Ek olarak, geri dönüştürülebilir atıklar depolandığı için, bu malzemeler kullanılmakta ve geri dönüştürülüp katma değer yaratılabilecek iken ülke ekonomisine kazandırılmamaktadır (SL Recycling, 2020). Sonuç olarak, kullanım ömrünü dolduran rüzgâr türbini kanatlarının depolama sahasında depolanması yerine geri dönüştürülmesi, yukarıda bahsedilen olumsuzlukların önlenmesini sağlayacaktır.



Mevzuatsal açıdan incelendiğinde, Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği'nin EK 4'ünde ek yakıt kullanacak tesislerin kabul edebileceği atıkların listesi verilmektedir ve türbin kanat atıklarının dahil olduğu 17 02 03 atık kodu bu listede yer almaktadır. Dolayısıyla, bu atıkların çimento tesislerinde ek yakıt olarak kullanılmasının önünde yasal bir engel bulunmamaktadır.

Kanatların bir sonraki başlıkta anlatılan piroliz yöntemi ile geri dönüşümünün yapılabilmesi için de kanatların küçük boyutlara parçalanması gerekmektedir. Bu tarz bir kırma tesisi kanatların katma değerli ürünlere dönüşebilmesini de destekleyecektir.

### **Senaryo 2: Rüzgâr Türbin Kanatlarından Piroliz Yöntemiyle Değerli Ürün Eldesi**

Rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için dünyada araştırmaları süren geri dönüşüm teknolojilerinden biri piroliz işlemidir (TRL 9). Bu nedenle, ikinci olarak rüzgâr türbin atıklarına piroliz teknolojisinin uygulanması senaryosu ele alınmıştır. Atık lastik/plastik/kauçuk piroliz tesisleri teknolojileri dünyada geliştirilmekte olup, yapılan Ar-Ge çalışmalarında görüldüğü üzere cam elyaf takviyeli plastikler de piroliz işlemiyle geri dönüştürülebilmektedir. Piroliz işleminin sonucunda pirolitik yağ, karbon siyahı ve pirolitik gaz elde edilebilmektedir (Huayin, 2021). Elde edilecek pirolitik yağ oranının %40-50 arasında olacağı öngörülmekte olup, bu pirolitik yağın kalitesinin endüstriyel ısıtma/yakma için ideal olduğu belirtilmektedir. Pirolitik yağ çimento, seramik, cam fabrikalarında, enerji santrallerinde, çelik üretim fabrikasında, kazan fabrikasında vb. yerlerde ısıtma malzemesi olarak kullanılabilir. Karbon siyahı, yakıt olarak pelet veya briket haline getirilebilmekte, daha fazla işlenerek boru, kablo kılıfı vb. yapmak için temel malzeme olarak plastik fabrikasına ya da inşaat sektörüne cüruf olarak satılabilir. Pirolitik gaz ise, kömür/odun/petrol/doğal gaz yerine reaktörü ısıtmak için yakıt olarak fırına geri beslenebilmektedir.

Genellikle rüzgâr türbini kanat atıkları çok büyük boyutta olduklarından makineye beslenebilmesi için çapı 1,4 m'den ve uzunluğu 6 m'den küçük olacak şekilde kesilmelidir (Huayin, 2021). Piroliz yöntemi için çeşitli teknolojiler bulunmaktadır. Sistem kesikli (batch) ve sürekli (continuous) prensipte olabilmektedir. Kesikli sistemlerin sürekli sistemlere göre ürün işleme kapasitesi daha düşük olmaktadır.

Çalışma kapsamında halihazırda piroliz tesisi olarak faaliyet gösteren firmalarla da iletişime geçilmiştir. Endüstriyel ölçekte faaliyet gösteren tesisler genel olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin piroliz yoluyla geri dönüşümü üzerine çalışmaktadır. Öte yandan, görüşmelerde rüzgâr türbini kanadının da piroliz işlemi için uygun olabileceği ancak kesikli reaktör tipinin kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu sayede içeriğindeki elyaflar geri kazanılabilecektir (Era Çevre Teknolojileri, 2021).. Kesikli reaktörlerin en büyük avantajı malzeme için çok küçük boyutlara indirgemenin beklenmemesi ve daha düşük işletme maliyeti oluşudur.

Piroliz, geri dönüşümü zor olan malzemelerin geri dönüştürülmesi süreçlerinde çözüm üretebilecek yöntemlerden birisidir. Piroliz yöntemi ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüştürülmesinde teknik olarak uygun bir seçenek olarak değerlendirilmesine rağmen, pahalı ve enerji ihtiyacı olan bir prosestir. Kanatların depolama sahalarına atılmasını önleyen, devlet ve özel sektörden gelen finansal teşvik ile uygulanabilir hale gelebilecek bir çözümdür. Kesikli sistemlerin sürekli sistemlere göre maliyeti daha düşük iken, ürün işleme kapasitesi de daha düşük olmaktadır. Rüzgâr türbin kanadı için kesikli reaktörlerin kullanılması durumunda, kapasiteye göre çok sayıda kesikli reaktör ihtiyacı doğabilecektir. Bu da yine maliyeti artıracak bir unsur olacaktır. Öte yandan, büyük boyutlu rüzgâr türbinleri ile, gerekli atık hacmi ve mekanik özelliklere ulaşılarak piroliz pazar hacmi buna göre büyüyebilecektir. Ayrıca, piroliz işlemi sonucunda üretilen pirolitik yağ ve gazın enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi, piroliz teknolojisinin ölçeğinin kolayca büyütülebilmesi ve karbon fiber kompozitlerin geri dönüştürülmesi için hâlihazırda çalışmalar bulunması bu teknolojinin avantajları olarak sayılabilmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020). Öte yandan, düzenli depolamanın daha ucuz bir seçenek olması mevcut pazarda tutunmayı zorlaştıracaktır. Ancak, değişen politikaların bu gibi teknolojilerin ticari ölçekte gelişmesine etkisi olacağı söylenebilmektedir.

06/10/2010 tarihli 27721 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan "Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik" in 4. maddesinin "k" bendine göre, piroliz tesisleri yakma tesisi olarak tanımlanmıştır. Tesisler bu yönetmelikle belirlenen kurallara uymakla yükümlüdür. Ancak piroliz ve diğer kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin iklim değişikliğine etkisi yakma işleminden

(insinerasyon) önemli ölçüde daha düşük olduğu belirtilmektedir. Ek olarak, tesis kendi ürettiği enerji ile beslenmektedir ve bu sayede tesisin enerji ihtiyacını karşılamak için fosil kaynakların tüketimi olmayacaktır.

### Yenilikçi Fikirler ve İleriye Dönük Ar-Ge İhtiyaçları

Atıkların bir yakıt üretim tesisinde işlenerek çimentoda ek yakıt olarak kullanılması alternatifi ile piroliz yönteminin ele alındığı senaryoların ötesinde gerçekleştirilebilecek faaliyetler bulunduğu düşünülmektedir. Bu doğrultuda 2 odak grup toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu toplantılar, bugüne kadar yapılan araştırma ve görüşmelerden yola çıkarak tespit edilen mevcut ihtiyaçlara göre odaklandırılmıştır.

### Yenilikçi Fikirler Geliştirilmesine Olan İhtiyaç

Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümü uygulamalarından bir tanesi de kanatların şehir mobilyası veya şehirde görsel tasarım unsurları olarak kullanımudur. İzmir Kalkınma Ajansı, rüzgâr türbin üreticileri, enerji yatırımcısı, İzmir Büyükşehir Belediyesi yetkilileri ve tasarımcıdan oluşan katılımcılarla rüzgâr türbini kanatlarının parklarda ve kamusal alanlarda şehir mobilyaları olarak kullanımının, konuyla ilgili fırsatlar ve işbirliği olasılıklarının tartışıldığı ilk odak grup toplantısı gerçekleştirilmiştir. Amaç, kullanım dışı kanatların yenilikçi fikirlerle tasarım unsurlarına ya da bank, aydınlatma direği, oyun parkı gibi şehir mobilyalarına dönüştürülebilmesidir. Bu odak grup toplantısı görüşlerinden elde edilen çıktılara göre, malzeme karakterizasyonu ve yapısal ihtiyaçlar belirlendikten sonra rüzgâr türbin kanatlarından fonksiyonel tasarımlar ya da şehir mobilyaları yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

### Ar-Ge Çalışmalarına Olan İhtiyaç

Türkiye'deki Ar-Ge altyapısının, yöntemlerinin, konuyla ilgili fırsatlar ve işbirliği olasılıklarının tartışıldığı, araştırma kurumları ve geri dönüşüm sektörünün bir araya getirildiği ikinci bir odak grup toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu odak grup toplantısı görüşlerinden elde edilen çıktılara göre, yoğun Ar-Ge çalışmalarına

ihtiyaç olduğu, üniversite ile sanayi işbirliğinde ortak projeler geliştirerek Ar-Ge faaliyetleri yürütülebileceği ve öncül çalışmaların yürütülmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Atıkların inşaat sektöründe, beton, asfalt üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanımlarının öne çıktığı söylenebilmektedir. Öte yandan, kamu politikalarının önemli bir yere sahip olduğu ifade edilmektedir.

### Rüzgâr Türbin Sektöründe Geri Dönüşüm Yol Haritası

Rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümüne etkin bir çözüm bulmak için rüzgâr enerjisi değer zinciri ile ilgili diğer sektörler arasında bir sinerji geliştirilmelidir. Ülkemizde rüzgâr sanayii ve geri dönüşüm için sinerji yaratılabilecek diğer sektörlerden önemli aktörler faaliyet alanlarına göre aşağıdaki kategorilerde listelenmiştir:

- ▶ Kanat Üretim Tesisleri
- ▶ Türbin Komponent/Hammadde Üreticileri
- ▶ Türbin Üreticileri
- ▶ Diğer Sektör Üreticileri
- ▶ Atık Yönetim Firmaları/Kurumları
- ▶ Çimento Tesisleri
- ▶ Kırıcı Ekipman Firmaları
- ▶ Ar-Ge/Tasarım Kuruluşları
- ▶ Teşvik Kurumları

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen paydaş gruplarından 41 kurum/kuruluş ile yarı yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu görüşmeler çerçevesinde ilgili paydaş gruplarının uzmanlık alanlarını, ihtiyaçlarını, işbirliği potansiyellerini ortaya koymak ve sektörel bilgi/veri edinmek amacıyla değerlendirilmeler yapılmıştır. Rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü için gerçekleştirilecek faaliyetlerde, başta İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) olmak üzere kanat üretim tesisleri, türbin üreticileri, enerji yatırımcıları, atık yönetim firmaları, çimento tesisleri ve Ar-Ge/tasarım kuruluşlarının önemli role sahip olduğu görülmektedir. Rüzgâr türbinlerinin geri kazanılması için yapılacak çalışmalarda bahsi geçen her bir tarafın sürece dahil olması gerektiği düşünülmektedir. Öte yandan, benzer malzeme kullanan sektörlerin de geliştirilecek işbirlikleri içerisinde olması ile sektörler arası sinerji

yaratılabilecek ve adımların daha kolay atılması ve etkili olması sağlanabilecektir. Bunun nedeni, yatırımcıların daha fazla miktarda atığın ele alınmasıyla olası bir tesis yatırımında maliyet etkin çözümler elde edebilecek olmasıdır. Öte yandan, bakanlık, belediye ve kalkınma ajansları gibi ilgili kamu kurumlarının sağlayacağı destek ve finansal teşviklerin rüzgâr sanayiinde geri dönüşüm sektörünün yaratılmasına büyük etkisi olacaktır. Ek olarak, geri dönüşümü teşvik eden politikaların varlığı, süreci hızlandıracak, tarafların sorumluluğunu artırarak çevreye olumlu katkılar sağlayacaktır.

Genel olarak, Türkiye'de sektördeki mevcut durum ve geri dönüşüm süreçlerinin değerlendirilmesi aşağıda özetlenmektedir:

- ▶ Türbin kanatları ve kompozit atıkları genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir.
- ▶ Tüm paydaş kategorileri bu atıkların bertarafı ile ilgili sıkıntı yaşamakta olup, olası geri dönüşüm alternatiflerine açıktır.
- ▶ Rüzgâr türbini kanatlarının ve kompozit atıkların geri dönüşümü amacıyla çeşitli Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Ancak bu çözümlerin hiç biri endüstriyel ölçekte mevcut değildir.
- ▶ Türbin kanatlarının yapısını oluşturan kompozit malzemelerin atıklarının temel geri dönüşüm alternatifi olarak çimento endüstrisi öne çıkmaktadır. Ayrıca, ülkemizde kompozit atık miktarı artmaya devam etmektedir. Kısa vadede en uygun kullanım alanının çimento ve atık yakma tesisleri olduğu düşünülmektedir.
- ▶ Türbin kanatlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alındığında, bu atıkların geri dönüşümünde, en büyük ortak problem uygun kırıcıların olmaması ve bu konuda yatırımların bulunmamasıdır.
- ▶ Kompozit geri dönüşümü sektörler arası bir sorundur. Uygun maliyetli çözümler ve sektörler arası işbirliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Yukarıda ifade edilen çalışmalar sonucunda, rüzgâr türbininin geri dönüşümü için belirlenen amaçlar doğrultusunda aşağıda verilen üç hedef ortaya konmuştur.

- ▶ **Hedef 1:** Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması
- ▶ **Hedef 2:** Yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi
- ▶ **Hedef 3:** Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi

Bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için atılması gereken adımlar ve ilgili aktörler, eylem planı altında verilmiştir. Her bir hedef için 7 eylem olmak üzere toplamda 21 eylem oluşturulmuştur.

1. Hedef: Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması
  - 1.1. Rüzgâr enerjisi sektörü ve diğer ilişkili sektörler arası işbirliğinin sağlanması
  - 1.2. Atık envanterinin hazırlanması
  - 1.3. Pilot deneme çalışmalarının yapılması
  - 1.4. Detaylı fizibilite çalışmasının yapılması
  - 1.5. Sektörler arası atık sürdürülebilirliğinin sağlanması
  - 1.6. Teşvik mekanizmalarının oluşturulması
  - 1.7. Mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması
2. Hedef: Yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi
  - 2.1. Türbin ve kanat üreticilerinin gizlilik koşullarının belirlenmesi
  - 2.2. Malzeme analizlerinin yapılması
  - 2.3. Yapısal ihtiyaçların belirlenmesi
  - 2.4. Tasarım yarışması düzenlenmesi
  - 2.5. Üniversitelerde mimarlık bölümlerinde bitirme projeleri hazırlanması
  - 2.6. Fonksiyon seçiminin yapılması
  - 2.7. Kullanılmayan veya atık olarak çıkan rüzgâr türbin kanatlarının tasarım unsurlarına ya da şehir mobilyalarına dönüştürülmesi
3. Hedef: Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi
  - 3.1. Sektörler arası bağlantıların kurulması
  - 3.2. Rüzgâr enerjisi sektörüne yönelik Ar-Ge desteklerinin oluşturulması
  - 3.3. Çalışma gruplarının oluşturulması
  - 3.4. Ar-Ge projelerinin hazırlanması ve yaygınlaştırma çalışmaları yürütülmesi
  - 3.5. Geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılmasının araştırılması
  - 3.6. Üretimde mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması
  - 3.7. Atıkta mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması



## BÖLÜM 1.

# Giriş ve Arka Plan

---

Rüzgâr enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağı olup kullanımı her geçen gün artmaktadır. İlk rüzgâr türbinlerinin kurulumu daha eskilere dayansa da, 1990'ların sonu itibarıyla rüzgâr enerjisi sektörü dünyada diğer pek çok enerji kaynağına oranla oldukça hızlı bir büyüme göstermiştir. Özellikle türbin çeşitlerinin ve türbin yüksekliklerinin gelişmesiyle birlikte rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi maliyetleri her geçen gün düşmeye devam etmektedir. Kurulmaya başlandığı ilk günlerdeki 50-100 kW'lık kapasiteli santraller yerine günümüzde kurulan rüzgâr türbinlerinin güç kapasiteleri 10 MW'ı, kanat uzunlukları ise 100 m'yi aşmıştır.

Tüm dünyada ve ülkemizde rüzgâr enerjisinin çevre üzerine olumsuz etkisinin yok denecek kadar az olduğu düşünülmektedir. Fakat rüzgâr türbinlerinin üretim süreçlerinden kaynaklı atıklar ile ömürlerini tamamlayan türbinlerin kanatları başta olmak üzere yönetilmesi gereken atık problemleri bulunmaktadır. Dünyada bu atıkların yönetimi için sürdürülebilir, ticari ölçekte başarı örneği olabilecek çalışmalar oldukça yeni ve çok sınırlı sayıdadır. Mevcut durumda dünyada olduğu gibi ülkemizde de türbin kanadı atıkları çok büyük oranda atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değere dönüştürülememektedir. Durumun ciddiyeti, Amerika Birleşik Devletleri'nde yer alan bir depolama alanını gösteren Şekil 1.1'deki fotoğraftan anlaşılabilir. Bu nedenle, özellikle son 10 yılda tüm dünyada rüzgâr sanayii kaynaklı atıkların geri dönüşüm olanaklarına yönelik araştırmalara hız verilmiştir.

### ŞEKİL 1.1. ABD'de Yer Alan Bir Depolama Sahasında Rüzgâr Türbin Kanatları



Kaynak: Martin, 2020

Yaklaşık 20 yıllık kullanım ömrüne sahip rüzgâr türbin kanatlarının zorlu iklim koşullarında sağlam kalabilmeleri için hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilmeleri yıllar içinde bir zorunluluk haline gelmiştir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemetleri, düşük ağırlıkları, tasarım esneklikleri, elektrik yalıtımı, paslanmazlık ve aşınmazlık gibi önemli özellikleri sayesinde pek çok sektörde kullanım alanına sahiptir. Kompozit ürünler, reçineler, termoset/termoplastik malzemeler, cam elyaf ve karbon elyaf gibi farklı hammadde gruplarının bir araya getirilmesi ile oluşan yapılardır. Bu nedenle türbin kanatları cam elyaf ve termoset reçineler başta olmak üzere farklı hammaddelelerin birleştirilmesiyle kompozit olarak üretilmektedir. Malzeme özellikleri sayesinde kompozit ürünlerin kullanımı ve üretimi dünyada olduğu gibi Türkiye'de de hızla artmaktadır (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2020). Türkiye'de kompozit malzeme kullanımı ilk defa kaportası fiberglastan (cam elyaf) üretilmiş yerli otomobil ile 1960'lı yıllarda başlamıştır. Günümüzde ise insansız hava araçlarının parçaları dahil olmak üzere pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2020). Son yıllarda kompozit sektörü ülkemizde hızlı büyüme trendine devam ederek yaklaşık 8.200 çalışan, 1,5 milyar Avro ciro ve yıllık 280.000 tonluk üretim hacmi ile katma değeri yüksek ürünler üreten bir sektör haline gelmiştir (Kimya Sanayii Çalışma Grubu, 2018). Bu sektörde halen orta/büyük ölçekli 180 şirkete ek olarak kısmen kompozit üretimi gerçekleştiren 700-800 şirket bulunmaktadır.

Öte yandan, kimyasal özellikleri nedeniyle kompozit kanatların geri dönüşümü teknik olarak oldukça zordur ve geri dönüşüm süreçleri ticari olarak maliyet-etkin olmaktan uzaktır. Cam elyaf takviyeli plastikler (CTP) olarak anılan bu malzemeler genellikle ısıyla sertleşen plastiklerden (polyester veya epoksi reçine) ve cam elyaflardan oluşan yapılardır. Bu kompozit malzemeler üretim esnasında sertleştikten sonra tekrar termal olarak ayrıştırılmaları veya eritilmeleri mümkün olamamaktadır. Dolayısıyla, dünyada son yıllarda kompozit kanatların ve bu kanatların üretimi esnasında ortaya çıkan benzer yapıdaki kompozit atıkların geri dönüşümü konusunda Ar-Ge faaliyetleri yürütülmektedir. Özellikle termal/kimyasal geri

dönüşüm teknolojileri geliştirme çalışmaları devam etmektedir ancak bu teknolojiler henüz yaygın ve ticari boyuta ulaşmamıştır.

Bu çalışma kapsamında son yıllarda dünyada ivme kazanan rüzgâr türbini komponentlerinin mümkün mertebe katma değerli ürünlere dönüşümünü ortaya koymak üzere;

- ▶ Enerji ve ilgili diğer sektörlerde pazar ve potansiyel araştırması,
- ▶ Mevcut geri dönüşüm sektörünün yetkinliklerinin ve altyapısının değerlendirilmesi,
- ▶ İlgili diğer sektörlerle yaratılabilecek sinerji olanaklarının ortaya koyulması,
- ▶ Belirlenecek alternatif geri dönüşüm senaryoları için ihtiyaçların belirlenmesi,

çalışmaları katılımcı süreçler ile gerçekleştirilmiştir.

Bu raporun ilgili bölümlerinde anlatıldığı üzere, ilk olarak mevcut durum analizi yapılmıştır. Bu kapsamda, masa başı çalışma ile Türkiye ve yakın çevrede rüzgâr enerji sektörünün geri dönüşüm potansiyeli açısından bölgesel ve ulusal mevcut durumu ortaya koyulmuş, mevcut durumda ömrünü dolduran veya zarar gören türbin unsurlarının nasıl yönetildiğine yönelik bilgiler toplanmış ve geri dönüşüm sektörünün mevcut durumu ve altyapı olanakları irdelenmiştir. Akabinde, literatür taraması gerçekleştirilerek dünyadan başarılı uygulama örnekleri araştırılmış ve bu örneklerin Türkiye için uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Katılımcı bir süreç yürütmek üzere paydaş görüşmeleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak rüzgâr enerjisi sektöründen ve sinerji yaratılabilecek diğer sektörlerden yerel/ulusal önemli aktörler belirlenerek

paydaş haritalaması yapılmıştır. Daha sonra, kanat üretim tesisleri, türbin komponent/hammadde üreticileri, türbin üreticileri, diğer sektör üreticileri, atık yönetim firmaları/kurumları, çimento tesisleri, kırıcı ekipman firmaları, Ar-Ge/tasarım kuruluşları, teşvik kurumlarından oluşan 41 paydaş ile yarı-yapılandırılmış mülakatlar gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, rüzgâr enerjisi sektörü ve sinerji yaratılabilecek diğer sektör aktörlerinin bir araya geldiği iki odak grup toplantısı gerçekleştirilmiş ve geliştirilebilecek işbirliği olanaklarına yönelik tartışma ortamı yaratılmıştır. Tespit edilen ihtiyaç ve fırsatlar doğrultusunda odak grup toplantılarından biri yenilikçi fikirlere diğeri ise Ar-Ge faaliyetlerine odaklandırılmıştır.

Gerçekleştirilen mevcut durum analizi, literatür taraması ve paydaş görüşmeleri değerlendirmelerinde iki senaryo öne çıkmıştır. İlk senaryo, dünyada rüzgâr türbin kanatlarının geri dönüşüm alternatifi olarak ticari ölçekte uygulaması bulunan, bu atıkların ek yakıt olarak çimento tesislerinde kullanılması üzerine rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm (yakıt üretim) tesisi kurulmasıdır. İkinci olarak, henüz ticari ölçekte uygulamada bulunmayan ancak geri dönüşüm teknolojileri arasında en yaygın araştırılan piroliz yöntemi ele alınmış ve rüzgâr türbin kanatlarından piroliz yöntemiyle değerli ürün eldesi olanağı incelenmiştir. Her iki senaryo, teknik, ekonomik, çevresel ve mevzuatsal açıdan değerlendirilmiştir.

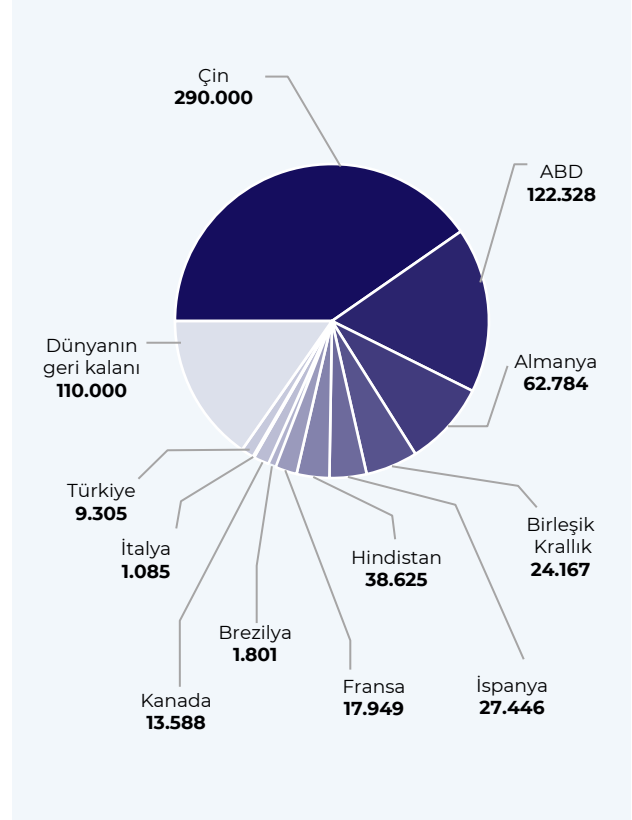
Yukarıda ifade edilen çalışmalar sonucunda, rüzgâr türbinin geri dönüşümü için üç hedef ortaya konmuştur. Bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için atılması gereken adımlar ve ilgili aktörler belirlenmiş ve eylem planı oluşturulmuştur.

## 1.1. Dünyada Rüzgâr Enerjisi Sektörünün Durumu

Küresel rüzgâr enerjisi piyasası, teknolojik yenilikler ve ölçek ekonomisi sayesinde son 10 yılda kapasitesinin neredeyse dört katına çıkmıştır. Bu süreçte rüzgâr enerjisi dünya çapında maliyet açısından en rekabetçi enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir.

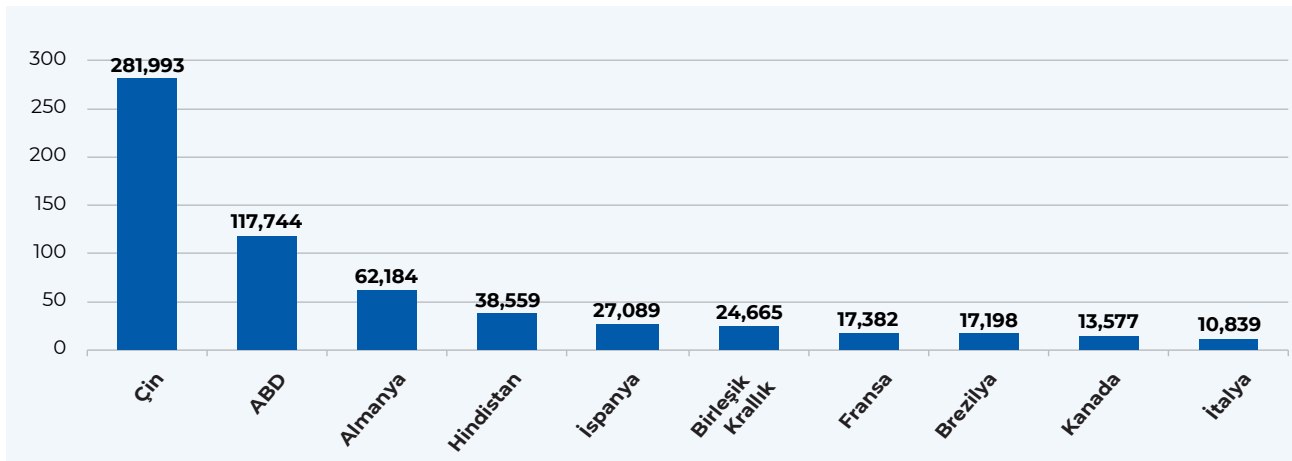
Dünya Rüzgâr Enerjisi Birliği tarafından Mart 2021'de yayınlanan verilere göre, 2020 yılında rüzgâr enerjisi piyasasına toplam 93 GW kapasitesinde yeni rüzgâr türbinleri eklenerek büyük bir büyüme gerçekleşmiştir. Dünyanın toplam rüzgâr enerjisinin yarısından fazlasını oluşturan, en büyük iki rüzgâr enerjisi piyasasına sahip Çin ve ABD, dünyada yeni kurulan rüzgâr türbinlerinin %75'ini inşa ederek 2020'de rekor bir büyümeye imza atmıştır (Global Wind Energy Council (GWEC), 2021). Çin, ABD ve Rusya dahil olmak üzere bazı ülkeler yeni kurulum rekorları kırarken, çoğu Avrupa pazarında sadece mütevazı bir büyüme görülmüştür. Ülkeler bazında kurulu rüzgâr türbin sayıları ve en yüksek kapasiteye sahip ülkeler sırasıyla Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te görülmektedir. Dünya çapındaki tüm rüzgâr tesislerinin toplam kapasitesi şu anda 744 GW'a ulaşmıştır ve bu, dünyanın elektrik talebinin %7'sini üretmek için yeterlidir (World Wind Energy Association (WWEA), 2021).

**ŞEKİL 1.2. Ülke Bazında 2020 Yılındaki Kurulu Rüzgâr Türbini Sayıları**



Kaynak: World Wind Energy Association (WWEA), 2021

**ŞEKİL 1.3. Rüzgâr Enerjisi Kapasitesine Göre Dünyanın İlk 10 Ülkesi**



Kaynak: IRENA, 2021

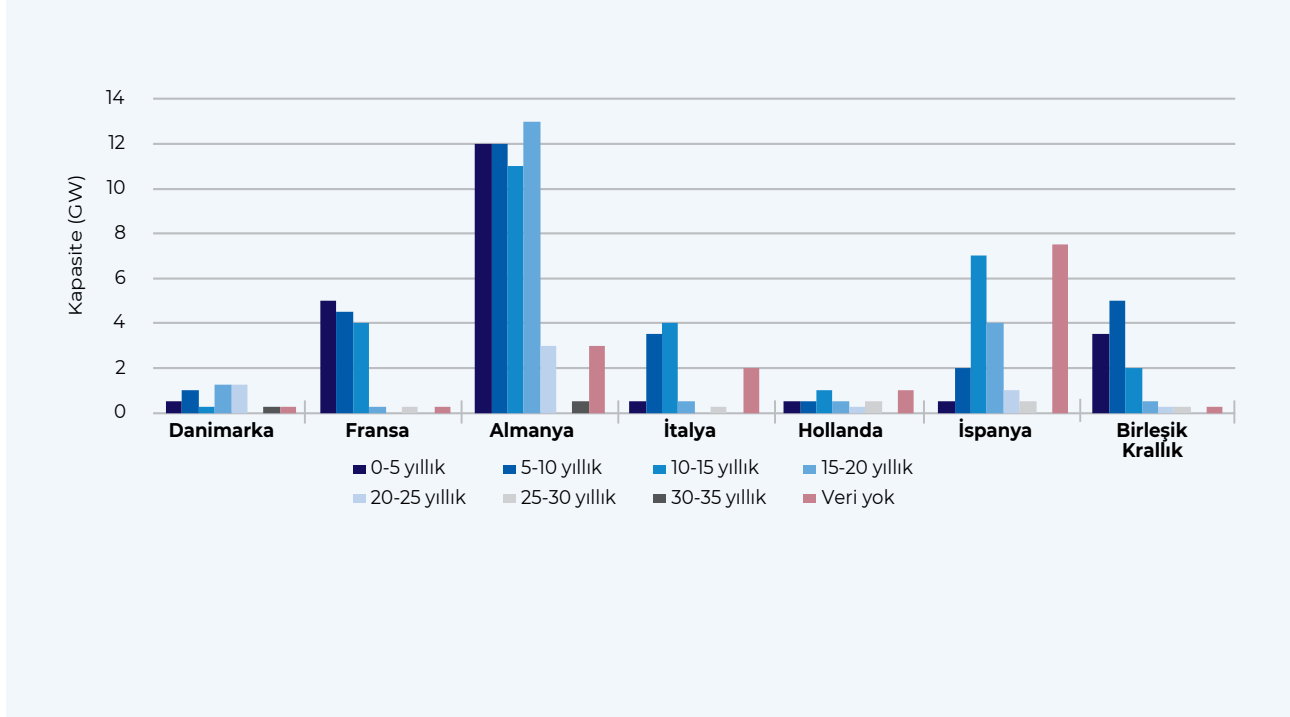


WindEurope tarafından 2020 yılında yayınlanan "Rüzgâr Türbini Kanadı Döngüsellliği" raporuna göre, Danimarka, Almanya, İspanya ve Hollanda, Avrupa'nın en olgun rüzgâr enerjisi pazarlarıdır. 15 yaşın üzerindeki türbinlere bakıldığında, bu ülkeler sırasıyla 2,74 GW (~%57), 17 GW (~%33), 5 GW'tan (~%33) fazla ve 0,6 GW (~%21) kapasite değerlerine, yani planlanan hizmet ömürlerinin sonuna gelmiş olan, şebekeye bağlı önemli bir rüzgâr tesisi kapasitesine sahiptir. Avrupa'da bazı ülkelerdeki karasal rüzgâr türbini yaşları kapasitelerine göre Şekil 1.4'te verilmiştir. Karasal Rüzgâr Türbinlerinin Hizmetten Çıkarılması Endüstrisi Kılavuzu'na göre, toplamda 34.000 türbin 15 yaşında veya daha eskidir. Örneğin, 2016'da Almanya'da yaklaşık 3.400, Danimarka'da 1.250 rüzgâr türbini 20

yıllık çalışma ömrünü aşmıştır. İspanya'da 2016 yılında 500'den fazla türbin 20 yıllık ömrünü tamamlamıştır ve bu sayı 2020'de 4200'ün üstüne çıkmıştır. Birleşik Krallık ise, 15 yıldan daha eski olan mevcut kurulu kapasitenin %10'una denk gelen, nispeten daha genç bir filoya sahiptir (WindEurope, 2020).

WindEurope, Avrupa'da yaklaşık 2 GW kurulu güce sahip kullanım ömrünü doldurmuş rüzgâr türbinlerinin yeni türbinler ile değiştirileceğini ve diğer bir 2 GW'lık türbin grubunun 2023 yılına kadar tamamen hizmet dışı bırakılacağını tahmin etmektedir. Bu, yaklaşık 4.700 türbinin (veya 40.000 ila 60.000 tona eşdeğer 14.000 kanat) hizmet dışı bırakılabileceği ve sürdürülebilir bir şekilde imha edilmesi gerektiği anlamına gelmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020).

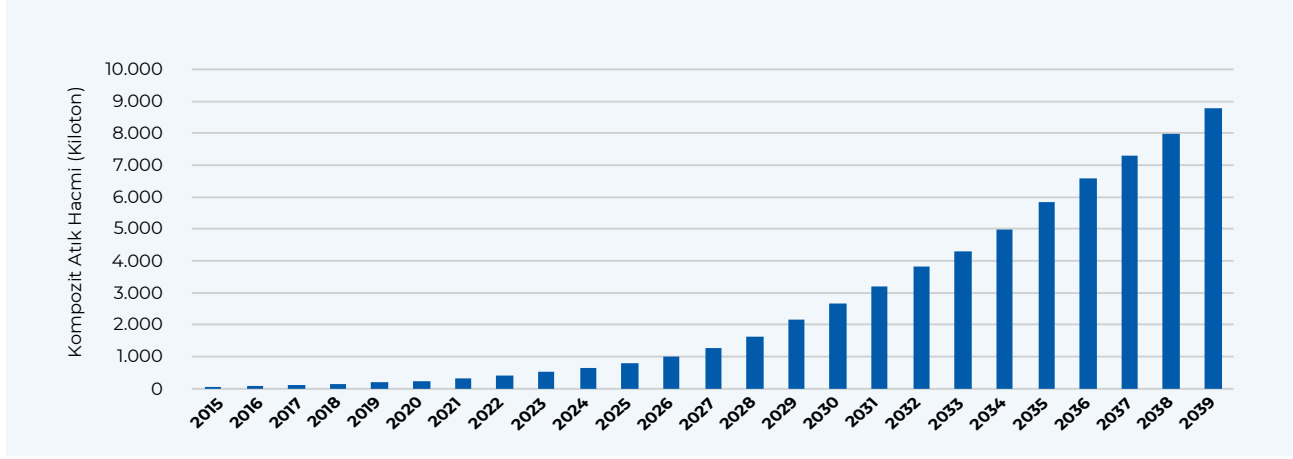
**ŞEKİL 1.4.** Avrupa'da Kapasiteye Göre Karasal Rüzgâr Türbini Yaşları



Kaynak: WindEurope, 2020

Avrupa'da olduğu gibi dünyanın diğer pek çok ülkesinde de önümüzdeki yıllarda yaklaşık 20 yıllık ekonomik ömrünü dolduracak kompozit yapıdaki türbin kanatları atık olarak ortaya çıkacaktır (Şekil 1.5). Rüzgâr enerjisi kurulumundaki hızlı artış nedeniyle,

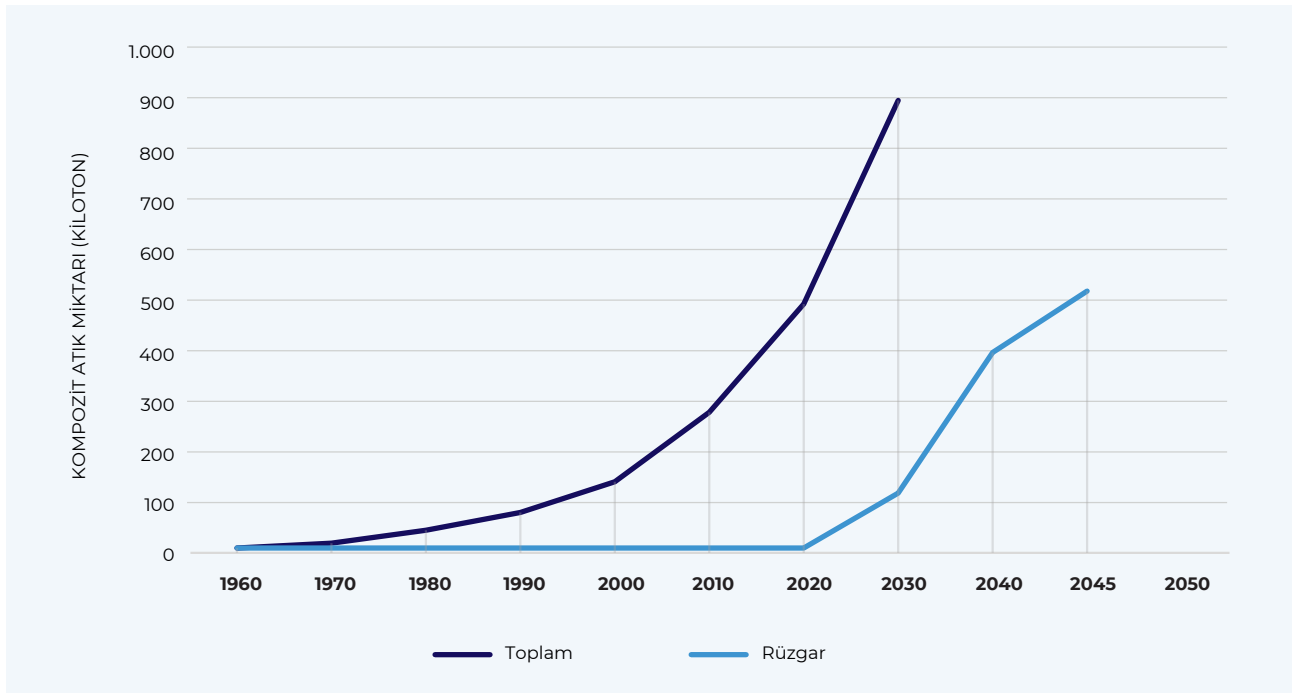
rüzgâr kanatlarından kaynaklanan kompozit atık miktarının da gelecekte oldukça artması beklenmektedir. Bu nedenle türbin kanat atıklarının değerlendirilerek ekonomiye kazandırılmasına yönelik çalışmaların tüm dünyada hızlanacağı bir döneme girilmektedir.

**ŞEKİL 1.5. Rüzgâr Enerjisi Endüstrisinden Kaynaklanacağı Tahmin Edilen Küresel Kompozit Atık Hacmi**

Kaynak: FutureBridge, 2020

Rüzgâr enerjisi sektörünün diğer kompozit atık üreten sektörlerle kıyasla kompozit atık üretimindeki değişimi Şekil 1.6'da sunulmaktadır. Rüzgâr kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12 ile 15 ton arasındadır.

2019 yılında 185 bin ton olan rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan toplam kompozit atık miktarının, 2039'da yaklaşık 8,8 milyon tona ulaşması beklenmektedir ve bu durum geri dönüşüm ihtiyacını daha da artırmaktadır (FutureBridge, 2020).

**ŞEKİL 1.6. Rüzgâr Enerjisi ve Diğer Sektörlerden Kaynaklanan Kompozit Atık Miktarı (kt/yıl)**

Kaynak: WindEurope, 2020

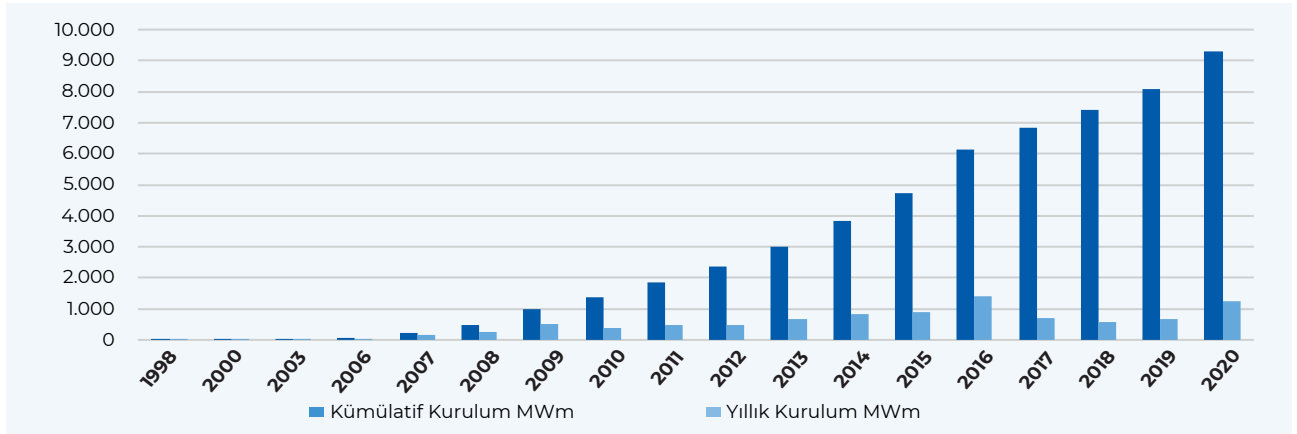
## 1.2. Türkiye’de ve İzmir’de Rüzgâr Enerjisi Sektörünün Durumu

Türkiye’de özellikle son yıllarda gerçekleştirilen yatırımlar sayesinde rüzgâr enerjisinin toplam kurulu gücü 9.305 MW’a ulaşmış ve toplam ulusal elektrik üretimindeki payı %8’i geçmiştir. 2020 yılında rüzgâr enerji santrallerine 1,6 Milyar Avro yatırım yapılan ülkemiz bu alanda Avrupa’da İngiltere (13,5 Milyar Avro), Hollanda (7,9 Milyar Avro), Almanya (2,2 Milyar Avro) ve Fransa’nın (1,8 Milyar Avro) ardından 5. sırada yer almıştır. Bununla birlikte sektör hızlı bir büyüme trendi göstermeye devam etmektedir. İnşa halindeki santral sayısı 41, önümüzdeki dönemlerde faaliyete geçmesi beklenen bu santrallerin

kurulu gücü ise 1.872 MW seviyesindedir. Türkiye’de yıllar içerisinde kurulan rüzgâr enerjisi santrallerinin kümülatif ve yıllık kurulum güçleri Şekil 1.7’de görülmektedir.

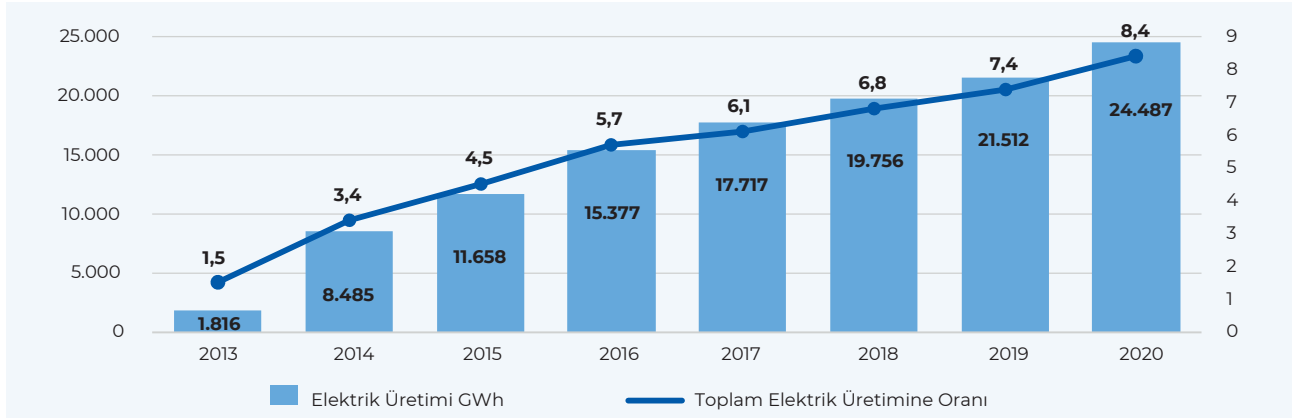
Ülkemizde mevcut kurulu güç ve yıllık elektrik üretim kapasitesi açısından Ege ve Marmara Bölgeleri öne çıkmaktadır. Şekil 1.9’da görülebileceği üzere, mevcut kurulu güç açısından öne çıkan ilk dört il sırasıyla İzmir (1.798 MW), Balıkesir (1.220 MW), Çanakkale (751 MW) ve Manisa’dır (717 MW). Bu dört ildeki rüzgâr türbin santrallerinin toplam kurulu gücü ülkemizin %47,9’unu oluşturmaktadır.

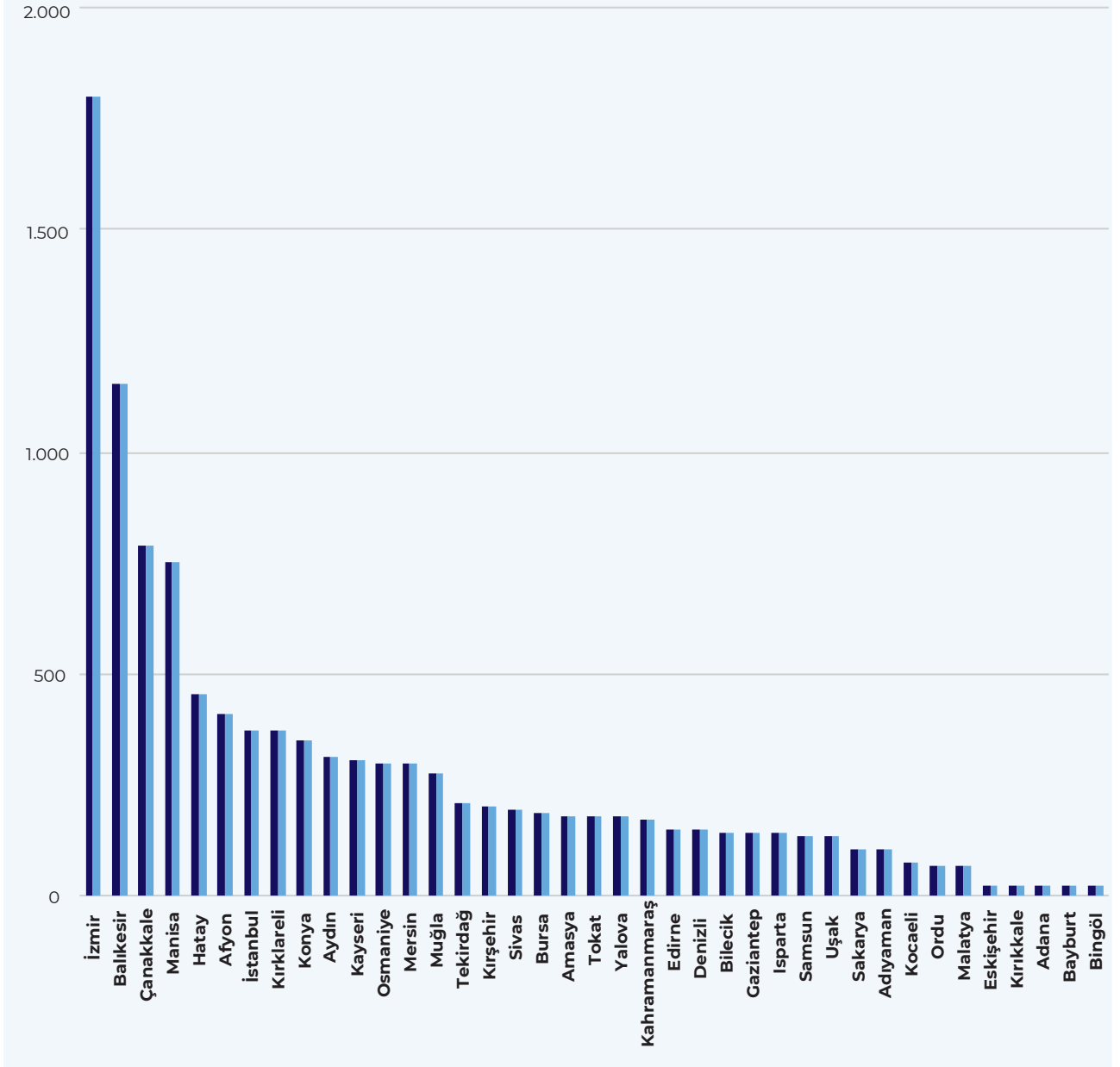
**ŞEKİL 1.7.** Türkiye’de Yıllar İçinde Devreye Alınan Rüzgâr Santralleri



Kaynak: TÜREB, 2021

**ŞEKİL 1.8.** Türkiye’de Yıllık Rüzgâr Enerjisi Üretim Miktarı (GWh) ve Ülke İçindeki Payı (%)



**ŞEKİL 1.9.** İllere Göre Rüzgâr Enerjisi Kurulu Gücü (MW)



BÖLÜM 2.

# Sektörün Geri Dönüşüm Açısından Değerlendirilmesi

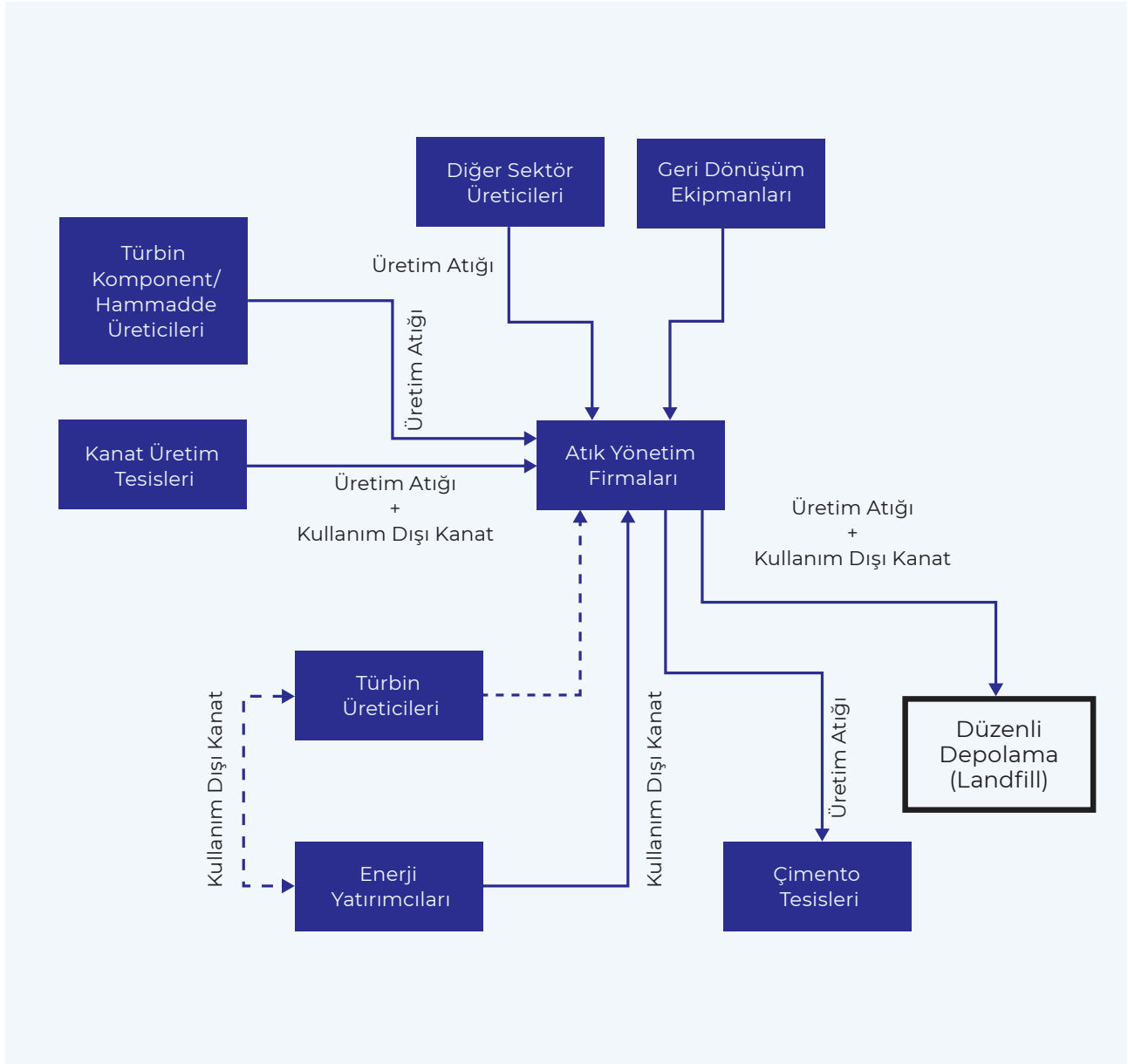
---

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi dünyada olduğu kadar Türkiye’de de hızla büyüyen bir sektördür. Türkiye nispeten genç rüzgâr türbinlerine sahiptir ve en yaşlı türbinleri kullanım ömrünü önümüzdeki 5 yılın sonunda doldurmaya başlayacaktır. Mayıs 2021 itibariyle Türkiye’de yaklaşık 9,3 GW kapasitesinde 239 rüzgâr enerji santrali ile kurulu 3.591 türbin bulunmaktadır (TÜREB, 2021). Bu da ülkemizde, her türbinde 3 adet kanat olduğu için toplam yaklaşık 10.773 kanat mevcut olduğunu göstermektedir. Ömrünü tamamlayan kanat atıklarına ek olarak kanatların

üretimi sürecinde fabrikalarda ortaya çıkan üretim atıkları/fireleri ve santral sahalarında doğa olayları vb. sebeplerle hasara uğrayarak işlevini kaybettiği için atık olarak bertaraf edilen kanatlar bulunmaktadır. Bu atıklar genellikle düzenli depolama sahalarında depolanmaktadır.

Rüzgâr türbin sektörünün atıklarının yönetimi konusunda paydaş görüşmeleri ve araştırmalardan elde edilen bilgiler ışığında oluşturulan atık yönetim süreci Şekil 2.1’de sunulmaktadır.

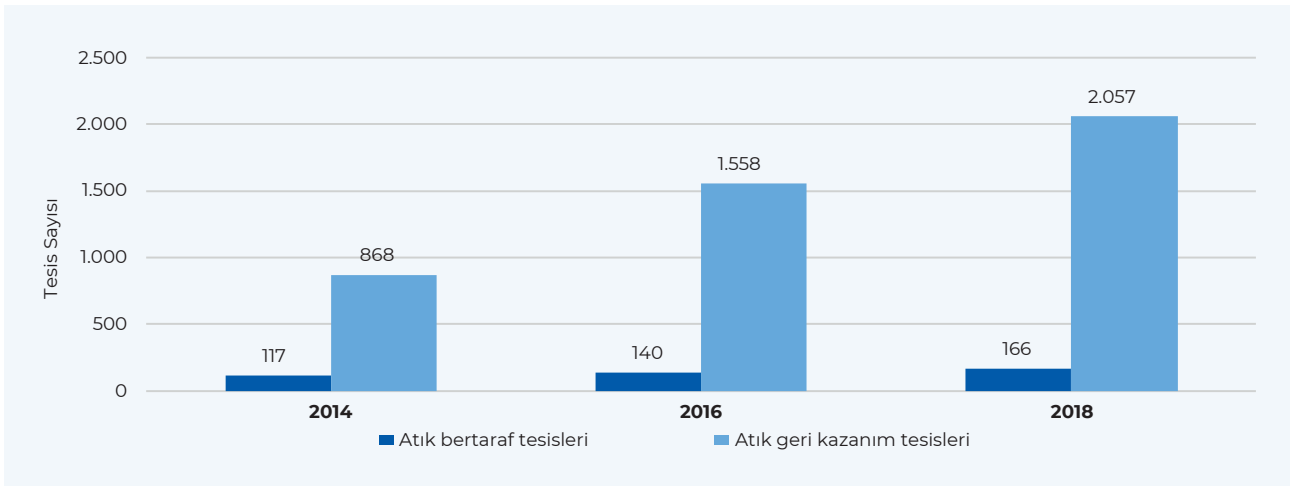
**ŞEKİL 2.1.** Rüzgâr Türbini Kanat Atıklarının Yönetimi: Mevcut Durum Süreç Akım Şeması



Bu atıkların düzenli depolama sahalarında depolanarak bertaraf edilmeleri yerine, geri dönüşüm alternatifleri rüzgâr enerjisi sektöründe araştırma konusudur. Olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için atık olarak çıkan ve ömrünü dolduran rüzgâr türbinlerinin atık depolama sahalarında depolanması yerine, özellikle ABD ve Avrupa ülkelerinde uygulamaları görüldüğü üzere Türkiye’de de alternatif çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbin kanadı atıkları için çözümün bir parçası olabilecek önemli sektörlerden bir tanesi atıkların geri dönüşümüdür. Atık geri dönüşümü sektörü, ekonomik büyüme, teknolojik gelişme, sanayileşme, kentleşme ve refah seviyesinin yükselmesi gibi nedenlerle atık miktarlarındaki artışa paralel olarak önemli bir sektör haline gelmiştir. Türkiye’deki atık bertaraf ve geri kazanım tesisleri incelendiğinde, bu tesislerin yıllar içerisinde arttığı görülmektedir ve sektör yıllar içerisinde 5 milyar Avro’luk bir pazar büyüklüğüne ulaşmıştır. Geri kazanım tesislerinin sayısı bertaraf tesislerinin sayısından fazla seyrederken, geri kazanım tesislerinde işlem gören atık miktarı daha az olmuştur. Bu durum bertaraf tesislerinin atık kapasitesinin çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. TÜİK tarafından yayınlanan verilere göre, Türkiye’de 2018 yılında 166 atık bertaraf tesisi ve 2.057 atık geri kazanım tesisi olmak üzere toplam 2.223 atık yönetim tesisi faaliyet göstermiştir. Tesis

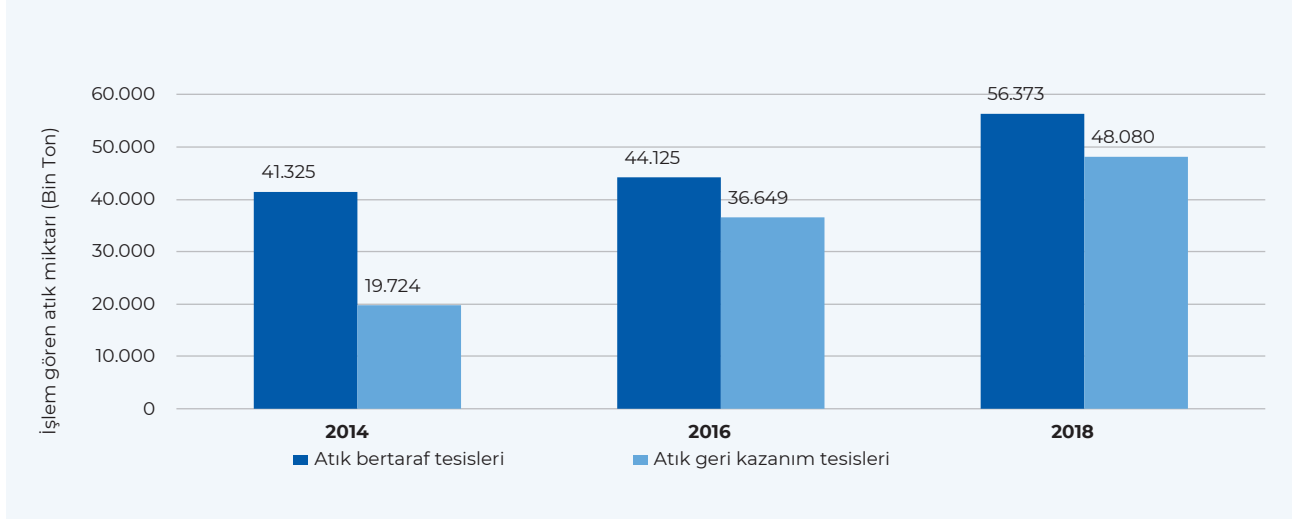
sayısında 2016 yılına kıyasla yaklaşık %30’luk artış olmuştur. 757 bin ton/yıl toplam kapasiteye sahip 7 yakma tesisinde 65 bin tonu tehlikeli ve 429 bin tonu tehlikesiz olmak üzere toplam 494 bin ton atık bertaraf edilmiştir. Atık geri kazanım lisanslı 40 beraber yakma (ko-insinerasyon) tesisinde 1 milyon ton atık yakılarak enerji geri kazanımı gerçekleştirilmiş; lisanslı diğer 2009 atık geri kazanım tesisinde ise toplam 47 milyon ton metal, plastik, kâğıt, mineral vb. atık geri kazanılmıştır. En çok geri dönüştürülen atıkların başında kâğıt, plastik ve cam atıklar gelmektedir. İzmir ilinde ise atıkların kaynak tiplerine göre ayrıştırıldığı ve geri dönüştürüldüğü etkili bir atık yönetim sistemi bulunmamaktadır. Bu nedenle atık geri dönüşümü oranının %10 civarında düşük oranda seyrettiği söylenebilmektedir (İZKA, 2020). Öte yandan, İzmir’in Bölgesel Girdi-Çıktı Tablosunun Güncellenmesi çalışmasına göre, yeniden değerlendirme sektörü bölgede ileri ve geri bağlantısı yüksek kilit sektörler arasındadır. Şekil 2.2’de 2014 ve 2018 yılları arasında Türkiye’deki atık bertaraf ve geri kazanım tesislerinin sayıları, Şekil 2.3’te ise bu tesislerde işlem gören atık miktarları verilmiştir. Bertaraf tesisleri düzenli depolama ve yakma tesislerini; geri kazanım tesisleri ise kompost, beraber yakma ve metal, plastik, kâğıt, mineral vb. atıkların geri kazanımı tesislerini kapsamaktadır.

**ŞEKİL 2.2. 2014-2018 Yılları Türkiye’deki Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisi Sayıları**



Kaynak: TÜİK, İstatistiklerle Çevre, 2018

**ŞEKİL 2.3.** 2014-2018 Yılları Türkiye'deki Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesislerinde İşlem Gören Atık Miktarları (Bin Ton)

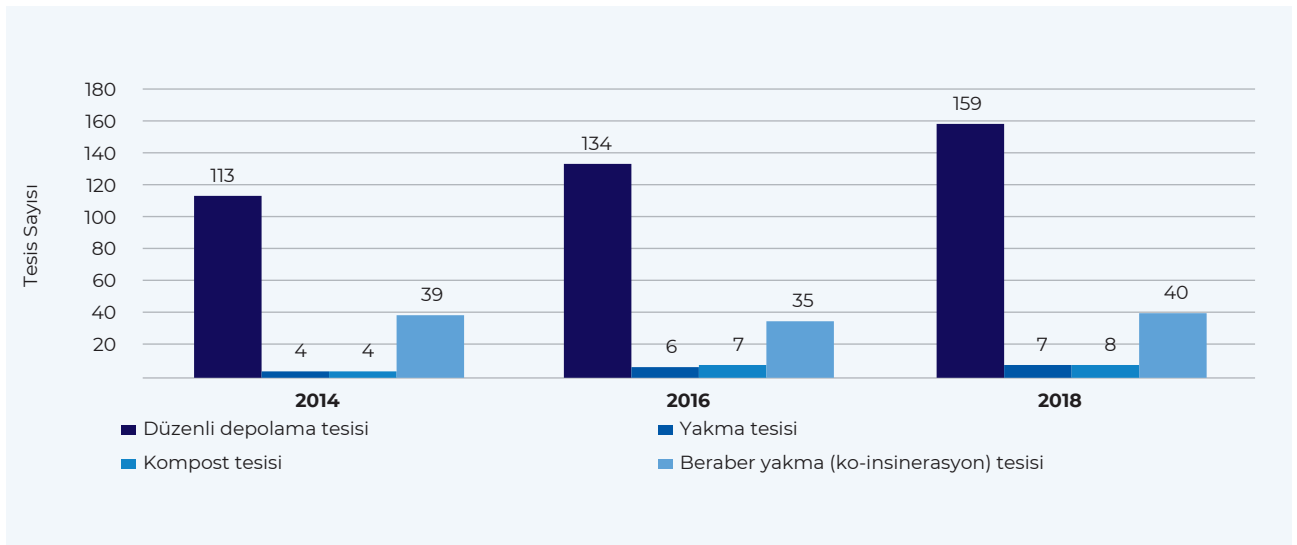


Kaynak: TÜİK, İstatistiklerle Çevre, 2018

Şekil 2.4'te atık bertaraf ve geri kazanım tesisi sayıları tesislerin yaptığı işlem türüne göre verilmiştir. Bu işlem türleri düzenli depolama tesisi, yakma tesisi, kompost tesisi ve beraber yakma tesisi olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, Şekil 2.4'te gösterilen geri kazanım tesislerine ek olarak, 2014, 2016 ve 2018 yıllarında sırasıyla 825, 1.516 ve 2.009 tane metal, plastik, kağıt, mineral vb. atıkların geri kazanımını yapan tesis bulunmaktadır.

Tesis sayıları fazla olmasına karşın yine kapasite ve işlem kompleksliği nedeniyle işlem gören atık miktarı düzenli depolama tesisindeki atık miktarına göre daha az olmuştur. Tesislerde 2014-2018 yılları arasında işlem gören atık miktarları işlem türüne göre Şekil 2.5'te gösterilmiştir.

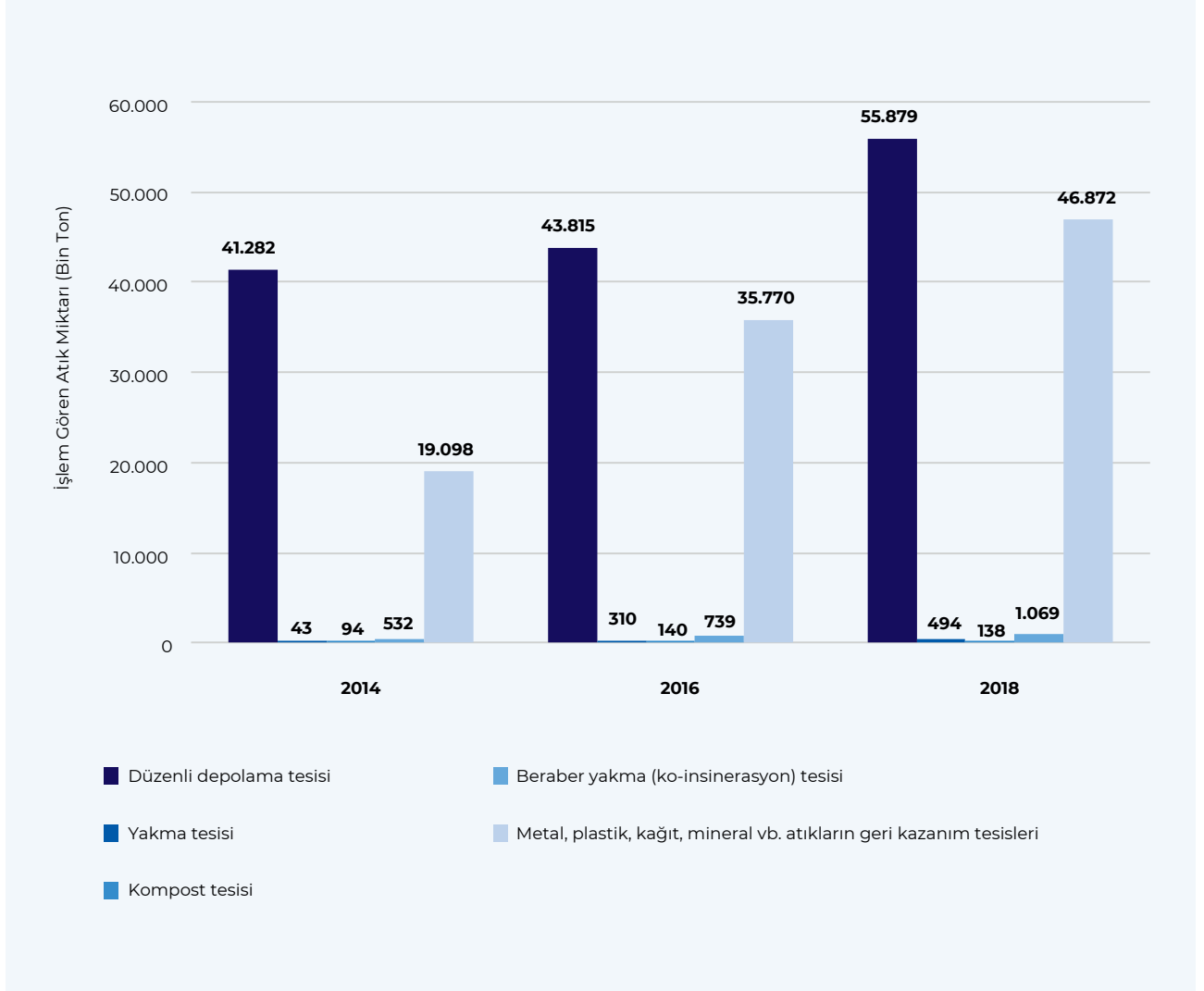
**ŞEKİL 2.4.** 2014-2018 Yılları Türkiye'deki İşlem Türüne Göre Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesisi Sayısı



Kaynak: TÜİK, İstatistiklerle Çevre, 2018



**ŞEKİL 2.5.** 2014-2018 Yılları Türkiye'deki İşlem Türüne Göre Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesislerinde İşlem Gören Atık Miktarı (Bin Ton)



Kaynak: TÜİK, İstatistiklerle Çevre, 2018

## 2.1. Alternatif Geri Dönüşüm Olanakları

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (WindEurope), Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi (Cefic) ve Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği'nin (EuCIA) yayınladığı "Rüzgâr Türbini Kanadı Döngüsellliği" raporuna göre, rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknoloji hazırlık seviyelerinde (TRL 4 ile 9 arasında) çeşitli alternatif teknolojiler vardır fakat henüz hepsi ticari ölçekte mevcut değildir ve maliyet-etkin bir çözüm sunmaktan uzaktır. Bu alternatif teknolojiler, mekanik öğütme, termal (piroliz, akışkan yatak), termo-kimyasal (solvoliz) veya elektro-mekanik (yüksek voltajlı darbe parçalanması) işlemler veya bu işlemlerin kombinasyonlarıdır. Bahsi geçen yöntemlerin elyaf kalitesine (uzunluk, mukavemet, sertlik özellikleri) çeşitli olumsuz etkileri olabildiği için, geri dönüştürülmüş elyafların kullanım alanları konusunda da daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca, aynı rapora göre, günümüzde kompozit atıkların geri dönüşümü için en yaygın teknoloji çimento endüstrisinde yakıt kaynağı olarak kullanımınıdır. Artan atık miktarıyla başa çıkabilmek için yakıt olarak kullanım olanaklarının yaygınlaştırılması gerektiği ifade edilmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020).

Rüzgâr türbini kanatları için en iyi strateji, malzemenin kullanım ömrü boyunca maksimum değerinin elde edilmesini sağlamak için, tasarım, test, bakım, iyileştirme ve uygun geri dönüşüm teknolojisini birleştiren entegre bir stratejidir. Kompozit malzemelerin parçalarına ayrılması, toplanması, taşınması ve işlenmesi sonrası değer zincirine yeniden entegrasyonu için belirli lojistik ve teknolojik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, tasarım sırasında malzeme seçiminin ve kullanım ömrü sonunda farklı atık yönetimi yöntemleri ile ilişkili çevresel etkilerin daha iyi anlaşılmasını gerektirir. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi bugün rüzgâr türbinlerinin de yapısını oluşturan kompozit atıkların geri dönüşümü için ticari ölçekte temel çözüm çimento üretiminde veya atıktan enerji üretimi gerçekleştiren tesislerde yakıt kaynağı olarak kullanılmasıdır. Çimento tesisleri büyük hacimlerde atıkları işleyebilmektedir.

Bugüne kadar ülkemizde rüzgâr türbin kanadı atıkları büyük hacimlerde ortaya çıkmamış olduğu için, kanat atıklarının geri dönüşümü konusunda bir ihtiyaç oluşmamıştır. Bu nedenle hâlihazırda ülkemizde kanat atıklarının geri dönüşümü konusunda herhangi bir geri dönüşüm tesisi bulunmamaktadır ancak yakında bu atıkların artacak olması sebebiyle ülkemizin bu soruna hazırlıklı olması ve çözüm üretmesi gerekmektedir. Yapılan tüm değerlendirmeler ışığında kısa vadede hayata geçirilebilecek en uygun çözüm, diğer ülkelerde de yaygınlaşmaya başlayan kırma, ayrıştırma, yakıt üretimi ve çimento vb. tesislerde enerji kaynağı olarak kullanım süreçlerinden oluşan geri dönüşüm uygulamasıdır.

Atık geri dönüşümü sektörünün ürettiği katma değerli ürünlere verilebilecek güzel bir örnek atıktan türetilmiş yakıttır (ATY). Son yıllarda ülkemizde de yaygınlaşmaya başlayan bu yakıt endüstriyel/evsel atıkların yüksek ısı değerine sahip olan kısımlarının ayrıştırılıp düşük nem seviyesinde harmanlanması ile elde edilmektedir. ATY'nin içeriğindeki ısı enerjisi ve mineral miktarı, yakıtın termal süreçlerde optimum kullanımına imkan verecek şekilde hazırlanmaktadır. ATY üretiminde atık solvent, tekstil atıkları, endüstriyel atıklar, endüstriyel çamurlar, atık plastikler, organik/anorganik atıklar, tüketime uygun olmayan atıklar, atık yağlar, kompozit atıklar ve ambalaj atıkları gibi malzemeler kullanılmaktadır. ATY üretim süreci temel olarak 3 aşamadan oluşur:

1. ATY olabilecek atıkların diğer atıklardan ayrıştırılması
2. Atıkların nemi yüksek olduğu durumlarda kurutulması ve yakıt içeriğine zarar vermeyecek oranlarda içeriğinin hazırlanması
3. Yakıt hammaddesinin istenilen ölçüde boyutlandırılması ve balyalanması

Atığın kaynağı ve içeriğine göre değişmekle birlikte endüstriyel atıklardan üretilmesi durumunda ATY'lerin ısı kapasiteleri 3.500-4.000 kcal/kg seviyelerinde olmaktadır. ATY genellikle enerji kullanımı

yoğun olan endüstrilerde kömür alternatifi olarak tercih edilmekle beraber, en yaygın kullanımı çimento tesislerinde ek yakıt olarak değerlendirilmesidir.

Çimento sektörünün Türkiye'deki durumu incelendiğinde, kapasite bakımından oldukça gelişmiş durumda olduğu görülmektedir. Çimento sektörü pek çok atık türünü alternatif hammadde ya da ek yakıt olarak kullanabilmektedir. Geçmişte bu atıkların da çimento tesislerinde değerlendirilmeleri için denemeler yapılmıştır. Mevcut durumda çimento tesislerinde türbin kanadı atıklarının değerlendirilemiyor olmasındaki en büyük etken bu atıkları, çimento tesislerinin talep ettiği yaklaşık 50x50 mm boyutlarına indirgeyebilecek kırıcıların bulunduğu bir geri kazanım tesisinin olmamasıdır. Bu malzemeleri parçalayabilme yeteneğine sahip kırıcıların bulunduğu bir geri kazanım ve yakıt üretim tesisinin kurulması ve böylece küçültülen parçaların çimento endüstrisinde ek yakıt olarak kullanılması ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların çimento tesislerinde ek yakıt olarak kullanılması ile çimento üretiminin karbon ayak izi de azaltılabilecektir. Dünyada çimento üretim ve satışına

1878 yılında başlanmış, Türkiye çimento sektörü ile 1912 yılında özel sektör girişimi ile tanışmıştır. Çimento, dünyada en çok tüketilen yapı malzemesi betonun temel bir bağlayıcısıdır. Türkiye çimento sektörü üretiminde Avrupa'da 1. dünyada 6. sırada yer almaktadır ve 55 entegre çimento fabrikasıyla 2019 yılı verilerine göre dünyadaki 2. en büyük çimento ve klinker ihracatçısıdır. TÜİK verilerine göre, 2019 yılında toplam 23 milyon ton ve 877 milyon ABD Doları değerinde çimento ve klinker ihracatı gerçekleştirilmiştir. 2020 yılında ise toplam ihracat %27 oranında artarak 1 milyar 116 milyon ABD Dolarına ulaşmıştır. Türkiye'deki çimento üretim tesislerinin bölgesel dağılımı Şekil 2.6'da verilmiştir. Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği (Türkçimento) verilerine göre, 2020 yılında İzmir ve çevresini de kapsayan Ege Bölgesi'nde iç satış ve dış satış sırasıyla 4.930.105 ton ve 1.058.399 ton değerlerine ulaşmıştır. Bu değerlerle Ege Bölgesi ülkemiz çimento sektöründe toplam iç satışın %9'unu dış satışın ise %6,5'ini oluşturmaktadır. İzmir'de faaliyet gösteren Türkçimento'ya kayıtlı 2 çimento fabrikası bulunmaktadır.

**ŞEKİL 2.6. Türkiye Çimento Fabrikaları Bölgesel Dağılımı, 2021**



Eski türbin kanatlarının geri dönüştürülmesinin rüzgâr sanayii için yakın gelecekte öncelikli konulardan birisi olacağı görülmektedir. Çimento sektörü dışında, rüzgâr türbin atıklarının kırıldıktan sonra çeşitli ürünlerde, örneğin betonda ve asfaltta kullanılabilirdiği, dolgu malzemesi olarak değerlendirilebildiği de bilinmektedir.

Bu nedenle, uygulamaların yalnızca çimento sektöründe ek yakıt olarak kullanımıyla kalmayacağı yukarıda bahsedilen alternatif teknolojilerin de yoğun olarak araştırılacağı ve uygulamaya konacağı öngörülmektedir. Bu teknolojiler arasında dünyada en yaygın olarak araştırılan piroliz teknolojisi.

Piroliz tesislerinin Türkiye'deki durumu incelendiğinde, 2017 verilerine göre, Türkiye'de Geçici Faaliyet Belgesi'ne (GFB) sahip 3 adet, Çevre İzni lisanslı 6 adet olmak üzere toplamda 9 adet piroliz tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde kaynak olarak ömrünü tamamlamış lastik ve plastik atık başta olmak üzere pek çok karbon bazlı atık piroliz işlemine tabi tutulmaktadır. Türkiye'de genellikle ömrünü tamamlamış lastik pirolizi gerçekleştirilmektedir ve pazar bu yönde kurulmuştur. Ömrünü tamamlamış lastik pirolizi sonucunda karbon siyahı, pirolitik yağ ve pirolitik gaz açığa çıkmaktadır.

Üretilen karbon siyahı bazı sektörlerde dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Karbon siyahı kullanılarak araba yedek parçaları, konveyör bant ve halı sahalarda taban halısı üretilebilmektedir. Açığa çıkan pirolitik yağ ise geçmişte distile edildikten sonra mazot ve benzeri akaryakıt olarak kullanılabilmek üzere satılabilmektedir fakat yeni düzenlemelerle atık idaresi sadece elektrik enerjisi üretiminde kullanılmasına izin vermektedir. Ayrıca bu pirolitik yağ, çimento fabrikalarında alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Son olarak açığa çıkan pirolitik gazın kalorifik değeri yüksek olduğu için jeneratörlerde yakılarak elektrik veya ısı üretmek amacıyla kullanılabilir. Ömrünü tamamlamış lastiklerin piroliz tesislerinde işlem görerek lisanslı tesislerde mevcut yakıtı ilave yakıt olarak kullanılması ile Türkiye'de bu yönde enerji geri kazanımı gerçekleştirilmektedir. Atık lastikten enerji geri kazanımı için Çevre İzni ve lisansı almış çimento fabrikası sayısı 2017 yılı verilerine göre 34 adettir. Ayrıca, Türkiye'de piroliz tesislerinde elde edilen pirolitik yağ ve gazın TSE K 214 "pirolitik sıvı yakıt" ve TSE K 213 "pirolitik gaz yakıt" standartlarını sağlaması gerekmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018).



## 2.2. Dünyadan İyi Uygulama Örnekleri

Rüzgâr türbinlerinin sürdürülebilir atık yönetimi için uygulanan seçenekler atık oluşumunu engelleme, atığın yeniden kullanılması, atığın başka amaca yönelik kullanımı, atığın geri dönüşümü, geri kazanımı veya bertaraf edilmesidir (WindEurope, 2020). Dünyada, rüzgâr türbin kanatlarının kullanım ömürleri tamamlandıktan sonra ileri dönüşüm (upcycling) olarak da adlandırılan uygulamalara yönelik kullanımı aşağıdaki biçimlerde olabilmektedir:

- ▶ Türbin kanatlarının oyun alanları veya şehir mobilyası olarak kullanımı
- ▶ Türbin kanatlarının bazı spesifik yapısal ürünlerinin, inşaat amaçlı kullanımı (bisiklet korunağı (Şekil 2.7), köprü, yürüme yolları, mimari uygulamalar vb.) (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020).

### ŞEKİL 2.7. Aalborg, Danimarka'da Türbin Kanadından İnşa Edilmiş Bir Bisiklet Korunağı



Kaynak: Eilers, 2020

Dünyadaki geri dönüşüm uygulamaları örneklerine bakıldığında ise, ABD, Almanya ve Danimarka'nın bu alanda önde gelen ülkeler olduğu görülmektedir.

### Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

ABD'de Veolia adlı firma, General Electric (GE) Yenilenebilir Enerji firmasının sahip olduğu kullanım ömrünü doldurmuş rüzgâr türbini kanatlarını çimento üretiminde değerlendirmektedir. Bu geri dönüşüm sayesinde rüzgâr enerjisinin çevresel faydaları artmakta ve CO2 emisyonununun %27, su kullanımının %13 azaltılması sağlanmaktadır. Bu uygulama ile geri dönüştürülen 7 ton ağırlığındaki tek bir rüzgâr türbini kanadı sayesinde, çimento fırınlarında yaklaşık 5 ton kömür, 2,7 ton silika, 1,9 ton kireç taşı ve yaklaşık 1 ton ek mineral bazlı hammadde tasarrufu sağlanmaktadır. Ağırlıklı olarak cam elyaftan oluşan kanatlar, rüzgâr türbinlerinden çıkarıldıktan sonra, parçalama tesisinde parçalanmakta ve istenmeyen bazı maddelerden ayrıştırılmaktadır. Elde edilen kırılmış ve ayrıştırılmış malzeme daha sonra çimento üretimi amacıyla gerekli olan kömür, kum ve kil yerine fırınlarda kullanılmaktadır. Böylece kanadın %90'ından fazlası yeniden kullanılabilir: Bunun %65'i çimento fabrikalarında hammadde olarak ve %28'i ise çimento fırınında yakıt olarak (ATY) kullanılmaktadır (McEntee ve Cappadona, 2020). Şekil 2.8'de GE Yenilenebilir Enerji firmasının Veolia için geri dönüştürülmek üzere hazırladığı türbin kanatları görülebilmektedir.

### ŞEKİL 2.8. Geri Dönüştürülmek Üzere Hazırlanan Türbin Kanatları



Kaynak: Karidis, 2021

2021 yılında, ABD'deki iki büyük kuruluş olan PacificCorp ve MidAmerican Enerji, atık olarak ortaya çıkan türbin kanatlarını atık depolama sahalarında depolamak yerine geri dönüştürmek amacıyla Carbon Rivers isimli firma ile ortaklık planlarını duyurmuştur. Carbon Rivers tarafından kullanılan teknoloji, ABD Enerji Bakanlığı tarafından hibe finansmanı yoluyla desteklenmekte ve ömrünü tamamlamış türbin kanatlarından cam elyafın geri kazanılması hedeflenmektedir (Gignac, 2021).

Global Fiberglass Solutions (GFS), rüzgâr enerjisi,

havacılık, denizcilik ve imalat sektörleri dahil olmak üzere farklı endüstrilere endüstriyel cam elyaf atık geri dönüşüm hizmetleri sunmaktadır. GFS, Şekil 2.9'da gösterildiği üzere, kompozit cam elyaf atıklarından elyaf, pelet, inşaat malzemesi ve panel gibi çeşitli ürünler üretmektedir. Kompozit cam elyaf atıklarının bu şekilde yeniden değerlendirilmesi sonucunda, ilgili atıkların depolama sahalarında toprağa gömülmesi engellenmektedir. Döngüsel ve sıfır atık çözümü olarak da ifade edilen bu uygulama ile türbin kanatlarının karbon ayak izi azaltılmaktadır.

### ŞEKİL 2.9. Rüzgâr Türbini Geri Dönüşümünden Elde Edilen Ürünler



Kaynak: <https://www.globalfiberglassinc.com/products>

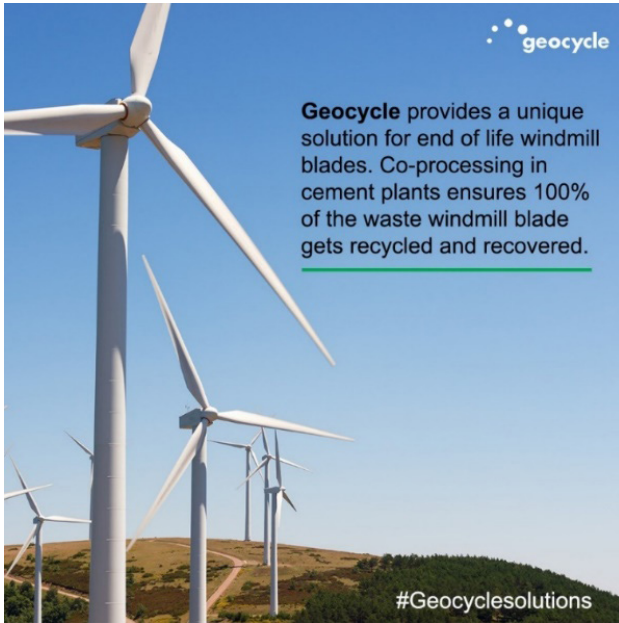
## Almanya

Almanya'da 2009 yılında toplam organik içeriği %5'ten daha yüksek olan atıkların doğrudan depolanması yasağı yürürlüğe girmiştir. Bu yasak kapsamında, cam elyafların tutunması için kullanılan reçine sebebiyle organik içerikli olan türbin kanatları da depolanmamaktadır. Bu düzenleyici kısıtlamaya istinaden, büyük miktardaki CTP atıkların geri dönüşümü

için çimentoda işlenmesi çözümü geliştirilmiştir. Almanya'da 2014 yılında kurulan Neowa GmbH şirketi, sökülen rüzgâr türbinlerinden elde edilen CTP atıklar ve kağıt endüstrisinden kaynaklanan atıklar dahil olmak üzere farklı malzemeleri geri kazanan bir tesise sahiptir. Yılda yaklaşık 65.000 tonluk üretim kapasitesi ile farklı sektörlerle hizmet vermektedir. Firma, 2017

yılında rüzgâr türbinlerinin devre dışı bırakılmasından kaynaklanan cam elyaf kompozit kanat atıklarının çimento endüstrisinde malzeme ve termal geri dönüşümü çalışmalarıyla Avrupa "GreenTec Ödülü"nü kazanmıştır. Şekil 2.10'da tanıtım görseli bulunan atık yönetim firması Geocycle, HolcimAG ve Zajons firmaları aracılığıyla 10 yıldır rüzgâr türbini kanatlarından çimento üretilmesini sağlamaktadır. Bu geri dönüşüm uygulamasında, türbin kanatları bulunduğu sahada kesilerek daha küçük parçalara dönüştürülmekte ve bu sayede nakliye maliyetleri azaltılmaktadır. Daha sonra bu küçük parçalar çimento tesislerinde enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar yerine kullanılmaktadır.

#### ŞEKİL 2.10. Geocycle Firmasının Tanıtım Görseli



Kaynak: Geocycle ve Holcim Ltd. <https://www.energy-xprt.com/services/processing-of-rotor-blades-178781>

Neocomp firması ise, CTP atıkları ve benzer özelliklere sahip kullanım dışı türbin kanatlarını işleyerek bunları yüksek kaliteli yakıtlar ve lifler üretmektedir. Firma, geri dönüşümün yanı sıra nakliye hizmeti de vermektedir. Almanya'nın Bremen şehrindeki işleme tesisi yıllık 80.000 ton üretim kapasitesine sahiptir. Neocomp, kimyasal veya ısıl işlemler ile geri dönüşümü oldukça güç olan bu malzemelerin sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde işlenmesini sağlayabilmek için mekanik bir işlem uygulamaktadır. Bu proses,

Bremen tesislerinde rüzgâr türbin kanatları gibi mukavemeti yüksek malzemelere özel olarak tasarlanmış bir teknoloji yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Tesiste geri dönüştürülmeyi bekleyen CTP atıklara bazı örnekler Şekil 2.11'de görülmektedir.

#### ŞEKİL 2.11. CTP Atıkları



Kaynak: Neocomp GmbH <https://www.neocomp.eu/de/Leistungen>

#### Danimarka

Dünyanın en büyük rüzgâr enerjisi ekipmanı tedarikçilerinden biri olan Danimarkalı Vestas firması, 2040 yılına kadar "sıfır atık" rüzgâr türbinleri üreteceğini duyurmuştur. Firma, kanatları tutan ve onları rüzgâr türbininin naseline bağlayan göbek bileşeninin ve kanatların toplamda %44 oranında geri dönüştürülebildiğini ifade etmektedir. Ancak geri dönüştürülemeyen malzemenin çoğunluğu kanatlardır ve tüm rüzgâr türbin bileşenlerinin geri dönüştürülebilirliğini sağlama amaçlanmaktadır. Vestas, türbin göbek ve kanat bileşenlerinin geri dönüştürülebilirlik oranını 2025 yılına kadar %44'ten %50'ye, 2030 yılına kadar ise %55'e çıkarmayı hedeflediğini belirtmiştir (Vestas, 2020).

Danimarka'daki Miljoskarm firması ise rüzgâr türbin kanatlarından elde ettiği cam elyafını yeni ürünlerde kullanarak bu malzemeye yeni bir değer katmaktadır. Geri dönüştürülmüş cam elyafı gürültü bariyeri ve ısı yalıtım malzemelerinin üretiminde kullanan firma, aynı zamanda karbondioksit emisyonunun azalmasını da sağlamaktadır (Miljoskarm, 2021). Firmanın geri dönüştürülmüş cam elyafı kullanarak ürettiği bir gürültü bariyeri Şekil 2.12'de görülmektedir.



**ŞEKİL 2.12.** Thisted, Danimarka'da Cam Elyafından Üretilmiş Gürültü Bariyeri

Kaynak: Miljoskarm <https://miljoskarm.dk/en/>

Öte yandan yine Danimarkalı bir şirket olan Refiber ApS, ReFiber olarak adlandırılan bir proses geliştirmiştir. Bu süreçte, kullanım dışı türbin kanatlarından elde edilen plastik parçalar, döner bir fırında (piroliz odası) oksijensiz ve yüksek basınçlı ortamda gazlaştırılmaktadır. Bu proses sonucu elde edilen geri kazanılmış lifler ayrılarak temizlenmektedir. Ortaya çıkan lifler %50 oranda daha düşük mukavemete sahiptir fakat liflerin sertliği ısı işleminden etkilenmemektedir. Ortaya çıkan ürünün, izolasyon malzemesi veya elyaf takviyesi olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020). Rüzgâr türbini kanadının geri dönüşümünden elde edilen elyaf malzemesi Şekil 2.13'te görülmektedir.

**ŞEKİL 2.13.** Rüzgâr Türbin Kanadından Elde Edilen Yalıtım Ürünü

Kaynak: ReFiber ApS <http://www.refiber.com/technology.html>

BÖLÜM 3.

# Türkiye'de Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşüm Olanakları

---

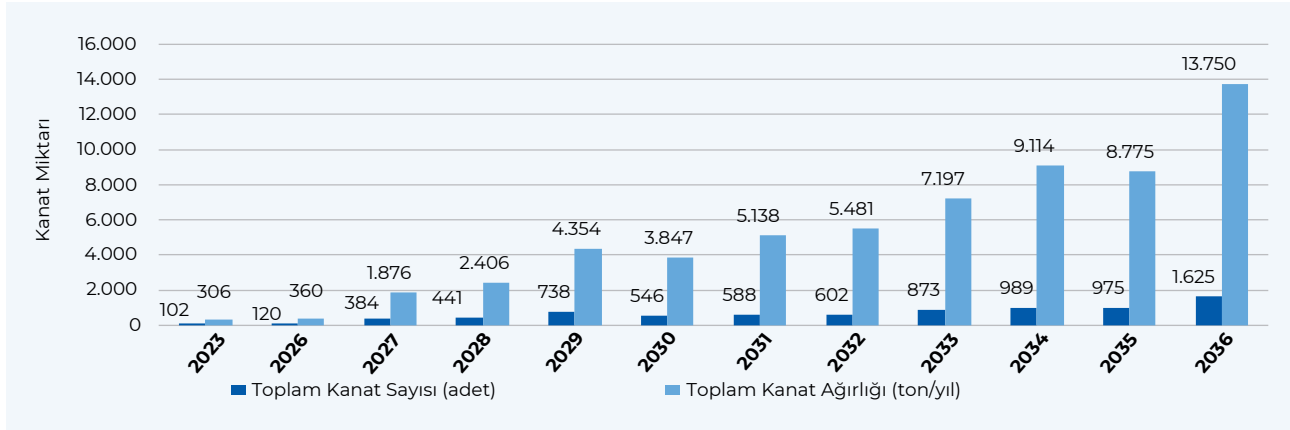


## Rüzgâr Türbin Atıklarının Mevcut Durumu

Ülkemizde ilk rüzgâr türbini 1998 yılında İzmir, Alaçatı'ya 7 km uzaklıkta yer alan Germiyan köyünde devreye girmiştir. Bu tarihten itibaren 2000'li yılların başına kadar yaklaşık 7-8 yıllık süre içerisinde oldukça sınırlı sayıda yatırım gerçekleşmiş ve toplam kurulu güç 2006 yılına kadar 20 MW seviyelerinde kalmıştır. 2006 yılı itibariyle ülkemizde yenilenebilir enerji teşvik sisteminin devreye girmesiyle birlikte rüzgâr türbin yatırımları artmıştır. Ülkemizin rüzgâr

türbini santralleri son 15 yılda artmaya başlamıştır ve önümüzdeki 5 yılın tamamlanmasını takiben pek çok santral 20 yaşını doldurmaya başlayacaktır. 10 yıl içinde ömrünü tamamlamış türbin kanadı miktarının yıllık 5 bin ton, takip eden 5 sene içinde (2036 yılında) ise yıllık 13.750 ton mertebelerine ulaşması beklenmektedir. 2023 ve 2036 yılları arasında ömrünü tamamlaması beklenen türbin kanat sayıları ve ağırlıkları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

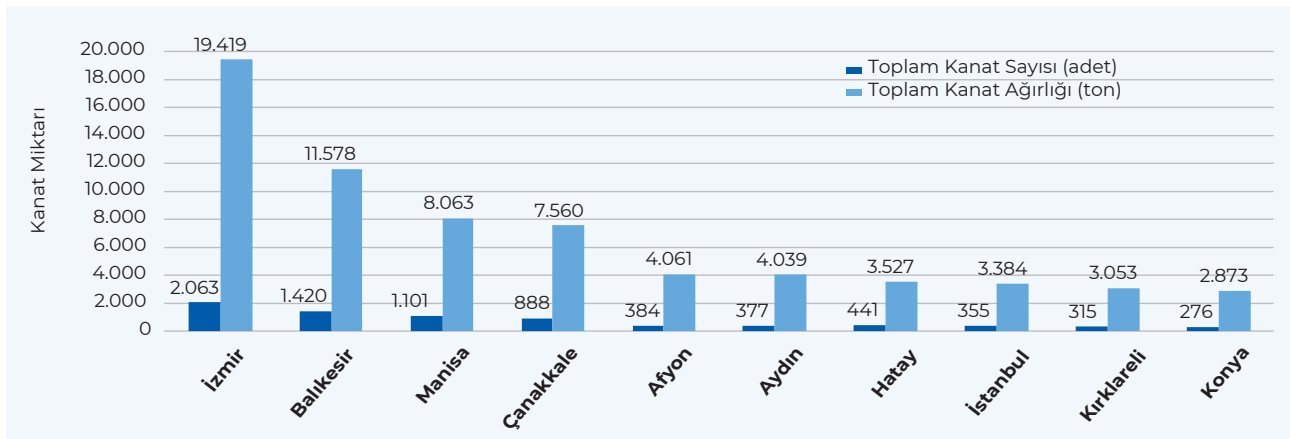
**ŞEKİL 3.1. 2023-2036 Yılları Arasında Türkiye'de Ömrünü Tamamlaması Beklenen Türbin Kanat Sayıları**

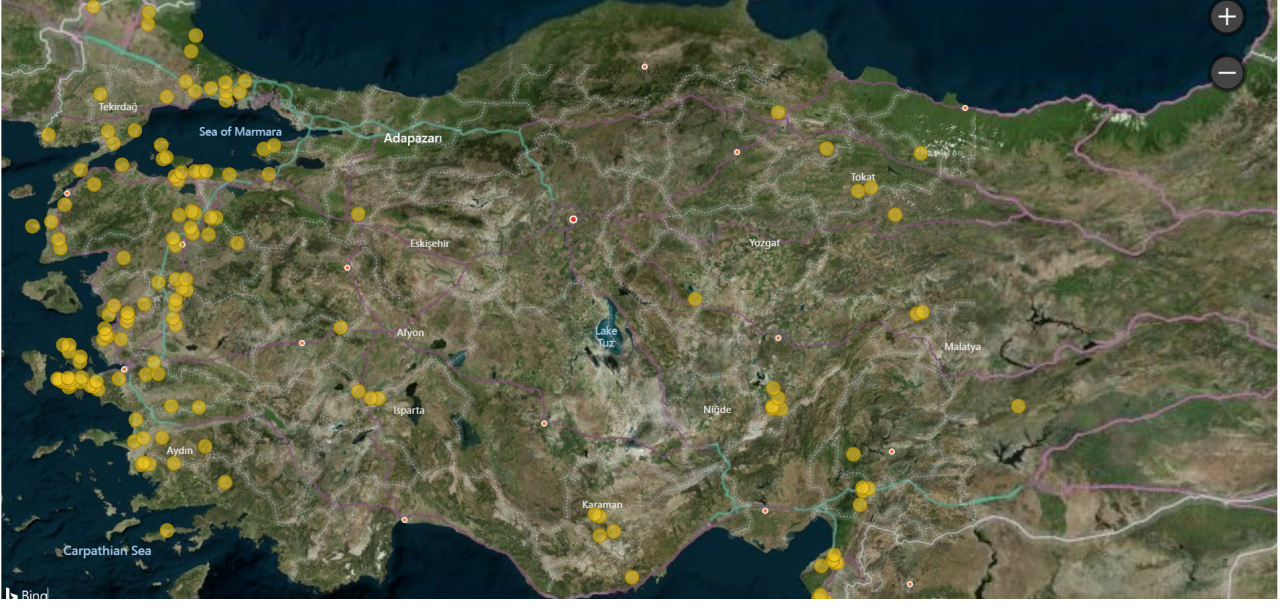


TÜREB (2021) rüzgâr enerji santrali (RES) veri tabanından elde edilen bilgiler ile çıkarılan envantere göre, 2022 ve 2036 yılları arasında ömrünü tamamlayacak türbin kanatlarının illere göre dağılımı Şekil 3.2'de, harita üzerinde gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.

Önümüzdeki 15 yılda Türkiye'de ortaya çıkması beklenen yaklaşık 8.000 türbin kanadının 2.063 adedi İzmir (%27,1), 1.420 adedi Balıkesir (%18,6), 1.101 adedi Manisa (%14,5), 888 adedi Çanakkale (%11,7), 384 adedi Afyon (%5,0) ve 377 adedi (%4,9) Aydın'da olacaktır.

**ŞEKİL 3.2. 2022-2036 Yılları Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının İllere Dağılımı**

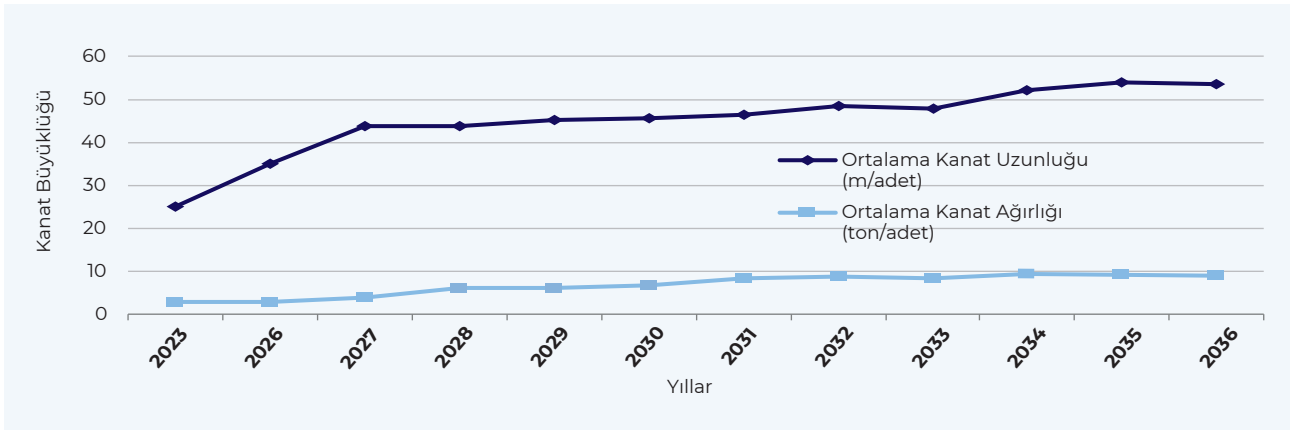


**ŞEKİL 3.3.** Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının Harita Üzerinde Dağılımı

Yukarıdaki verilere göre, rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümüne olan talebin en fazla rüzgâr türbinlerinin en yoğun bulunduğu, dolayısıyla en fazla atığın çıkacağı İzmir ilinde ve çevresinde olacağı öngörülmektedir.

Önümüzdeki 15 yılda kullanım ömrünü dolduracak türbin kanatlarının markalarına bakıldığında sırasıyla Nordex, Enercon, Vestas, GE ve Siemens'in öne çıktığı görülmektedir. Halen ülkemizde mevcut kurulu güç ve yıllık üretim açısından da öne çıkan bu markalar rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümü için atılacak adımlarda kritik öneme sahip olacaktır.

Rüzgâr türbinleri ülkemizde ilk kurulduğu 1998 yılından bugüne yapısal olarak büyük bir değişim yaşamıştır. İlk kurulduğu yıllarda 20-25 m uzunluğunda ve 4 ton mertebelerindeki türbin kanatları günümüzde yerini genellikle 70 m uzunlukta ve ağırlıkları 20 tona yaklaşan çok daha büyük yapılara bırakmıştır. Önümüzdeki 15 yılda ortaya çıkması beklenen türbin kanatlarının da bu trendi takip etmesi ve 2036 yıllarında yönetilmesi gereken kanatların ortalama 55 m uzunluğunda ve 10 ton ağırlığında daha büyük yapılarda olması beklenmektedir (Şekil 3.4).

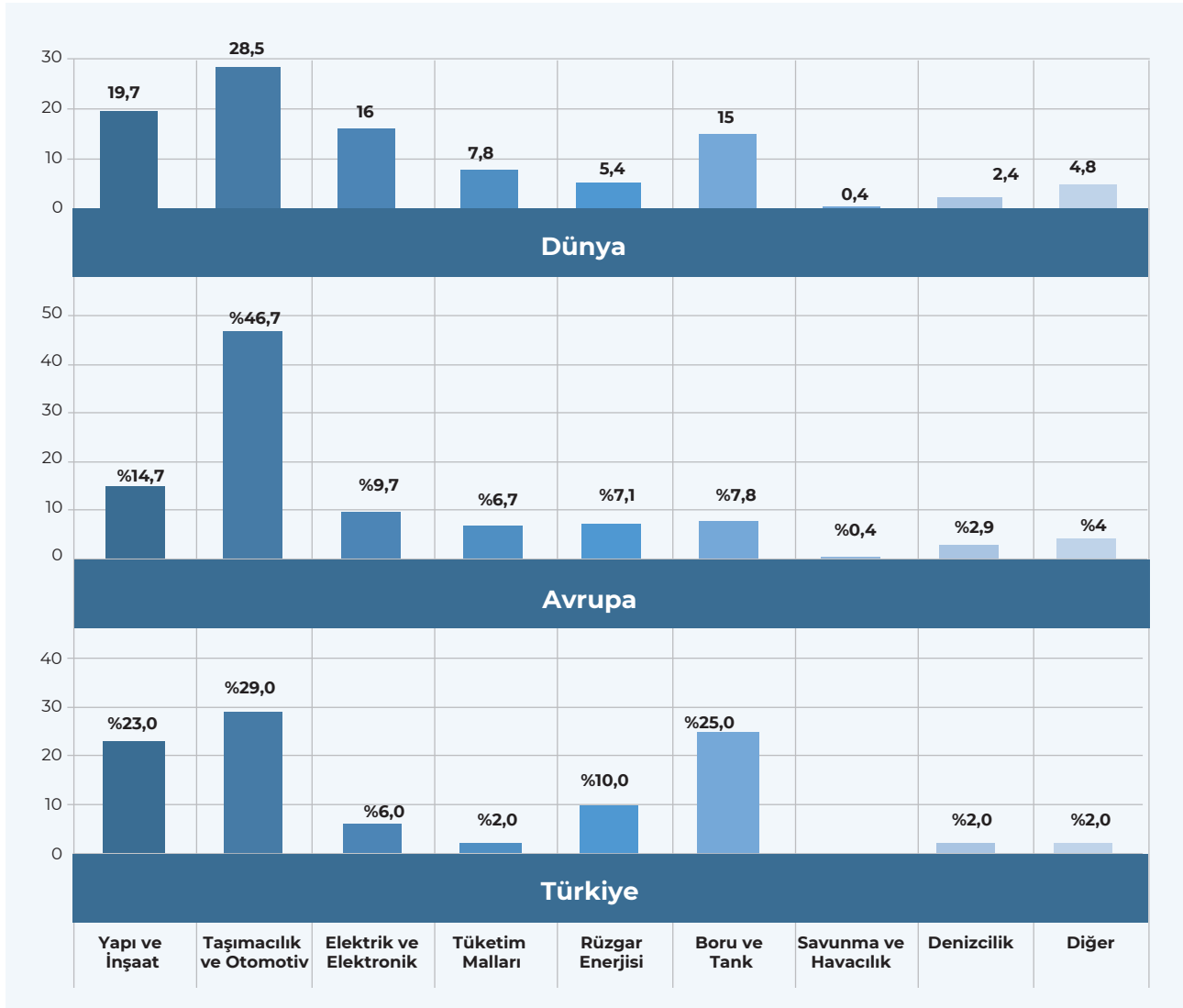
**ŞEKİL 3.4.** 2023 -2036 Yılları Arasında Ömrünü Tamamlayacak Türbin Kanatlarının Boyutları

## Kompozit Atıkların Mevcut Durumu

Yukarıdaki bölümlerde ifade edildiği üzere, rüzgâr türbin kanatları kompozit malzemelerden üretildiği için diğer sektörlerden atık olarak çıkan kompozit malzemeler de rüzgâr türbinleri ile birlikte geri dönüştürülmek üzere değerlendirilebilecektir. Kompozit sektöründeki büyümenin, kompozit atıkların artmasına sebep olacağı ve geri dönüşüme olan ihtiyacı artıracığı değerlendirilmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, kompozit malzemelerden üretilen ürünler havacılık ve uzay sanayi, enerji, otomotiv, inşaat ve daha birçok sektörde kullanılmaktadır.

Türkiye'de en çok kompozit malzeme kullanan sektörler ise taşımacılık-otomotiv,yapı-inşaat ve boru ve altyapı sektörüdür. Sektörlerin dünyada, Avrupa'da ve Türkiye'de kompozit malzeme kullanım dağılımları da aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. 2019 yılında 11,1 milyon ton hacme ve 84 milyar Avro değere sahip olan dünya kompozit pazarının 2023 senesinde 13,1 milyon ton hacme ve 96 milyar Avro değere ulaşması beklenmektedir. Ayrıca, 2010-2017 yılları arasında işlenmiş kompozit ürün pazarı hacmen %4, değer olarak ise %5 büyüme göstermiştir.

**ŞEKİL 3.5.** Dünya, Avrupa ve Türkiye'de Kompozit Malzemenin Sektörler Arasında Dağılımı (%)



Türkiye'de kompozit malzemelerin %23 payla en çok kullanıldığı ikinci sektör inşaat ve yapı malzemele-ri sektörüdür. İnşaat sektöründe yer alan kompozit malzeme üreticilerinin ürünlerinin çevresel perfor- manslarıyla ilgili çalışmalar yaptırdığı ve ilgili belge- leri aldıkları görülmektedir. Yapı malzemeleri, kimya, tekstil ve mobilya gibi 18 farklı sektörden birçok firma 117 kompozit ürün için Çevresel Ürün Beyanı (EPD) belgesini almıştır. Bu bilgiler ışığında, kompozit mal- zemelerin sürdürülebilirliği farkındalığının her geçen gün arttığı anlaşılabilmektedir (EPD Turkey, 2018).

Kompozit sektörünün Türkiye'deki büyüme durumu incelendiğinde, Avrupa ve dünya büyüme hızının üze- rinde olduğu görülmektedir. Yüksek teknoloji ürün- lerin üretiminin hızlanmasının, rüzgâr enerjisi, havacı- lık ve elektrik-elektronik eşya sektörlerinde kullanılan kompozit malzeme miktarını artırması beklenmek- tedir. Ayrıca, yüksek büyüme potansiyeli oluşturan diğer kompozit uygulamalar arasında karbon fiber uygulamaları, boru uygulamaları, otomotiv ve ulaşım, güneş panelleri, inşaat takviyeleri, polipropilen ran- dom co-polimer (PPRC) ısıtma boruları (kombi), mü- hendislik plastikleri ve denizcilik uygulamaları bulun- maktadır. Özellikle yakın coğrafyalardaki ülkelerden gelen talepler üzerine ülkemizde %36'lara varan CTP boru üretimi kompozit sektöre yön vermektedir. Bu borulara talep, nüfus artışı ve kentleşme sebebiyle artan altyapı (kanalizasyon, su temini, atıksu arıtma ve sulama sistemleri vb.) ihtiyacına orantılı olarak ar- tacaktır. Benzer şekilde Türkiye'nin yapı-inşaat sektö- rü yakın coğrafyalarda aktif olarak faaliyet gösterdiği için, bu sektördeki kompozit malzeme talebinin de artış göstermesi beklenmektedir.

Kompozit ürünlerinin kullanıldığı pultrüzyon, sac ka- lıplama bileşimi (SMC) ve termoplastik enjeksiyon proseslerinin önümüzdeki dönemde pazar payla- rını artıracığı öngörülmektedir. İnfüzyon ve reçine transfer kalıplama, özellikle rüzgâr enerjisi, denizcilik, otomotiv ve ulaşım ile su kaydıracağı endüstrilerinde büyümesini sürdürecektir (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2019).

Ülkemizde uygulanan politikalarla kompozit malze- me üretimi girişimlerinin artırılması hedeflenmek- te, rüzgâr enerjisi yenilenebilir enerji kaynak alanları

(YEKA) ihaleleri, savunma sanayinde yerleştirme ve milli teknoloji hamleleri gibi faaliyetler sonucunda bu malzemelerin ülkemizde kullanımının artma- sı beklenmektedir (Kimya Sanayii Çalışma Grubu, 2018). Kişi başına düşen kompozit tüketim miktarla- rına bakıldığında, dünyada 4-10 kg arasında olan bu miktar, Türkiye'de 3,5 kg civarındadır. Ek olarak, kom- pozit malzemelerin ortalama fiyatlarına bakıldığında dünyada 6,9 Avro/kg iken, Türkiye'de 5,3 Avro/kg dü- zeyindedir. Bu durum Türkiye'yi avantajlı konuma getirmektedir (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2018).

Türkiye'de kompozit sektörde yer alan kuruluş- ların bölgesel dağılımı Şekil 3.6'da sunulmaktadır. Kompozit sektörde faaliyet gösteren kuruluşların önemli bir kısmının Marmara Bölgesi'nde yer aldığı görülmekle birlikte savunma sanayi kuruluşlarının başı çektiği kompozit üreticileri Ankara ilinde yoğun- laşmıştır. İzmir ilinde ise rüzgâr türbini komponent üreticilerine ek olarak Ar-Ge firmaları, endüstriyel ip- lik, teknik tekstil ve elyaf imalatçıları yer almaktadır. Ülkemizde kompozit malzeme üreticilerinin çoğunlu- ğu otomotiv, denizcilik, rüzgâr enerjisi ve inşaat sek- törlerinde faaliyet gösterirken; savunma, havacılık ve uzay sektörlerine yönelik üretim daha azdır (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2020).

Kompozit sektörü doğrudan ürettiği hammaddeleri, sanayi ara mallarını ve son ürünleri ihraç etmekte, öte yandan bu ürünleri ihraç edilen her otomobil, otobüs, tekne, küvet vb. ürünlerin içerisinde de dolaylı olarak ihraç etmektedir. Cam elyaf ve karbon elyaf kompo- zit sanayiinde en yaygın kullanılan malzemelerdir ve sırasıyla %87 ve %11 oranlarında ülkemizde üretilmek- tedir. İhraç edilen cam ve karbon elyaf, doymamış polyester reçinesi, vinil ester reçine ve teknik tekstil- lerin yanı sıra, ihtiyaç duyulan epoksi ve termoplastik reçineler gibi bazı kimyasal hammaddeler ithal edil- mektedir. Bu malzemelerin gerçekleştirilen ihracat ve ithalat değerleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir ve top- lam ithalat ve ihracat arasında bir denge mevcuttur. 2017 yılında kompozit sektörü yaklaşık olarak 270 mil- yon Avro değerinde ihracat ve ithalat gerçekleştirmiştir. Kompozit ürünlerin kullanımının Türkiye'de yay- gınlaşmasıyla, sektör büyüyerek ihracat potansiyeli de artacaktır (Kompozit Sanayicileri Derneği, 2019).

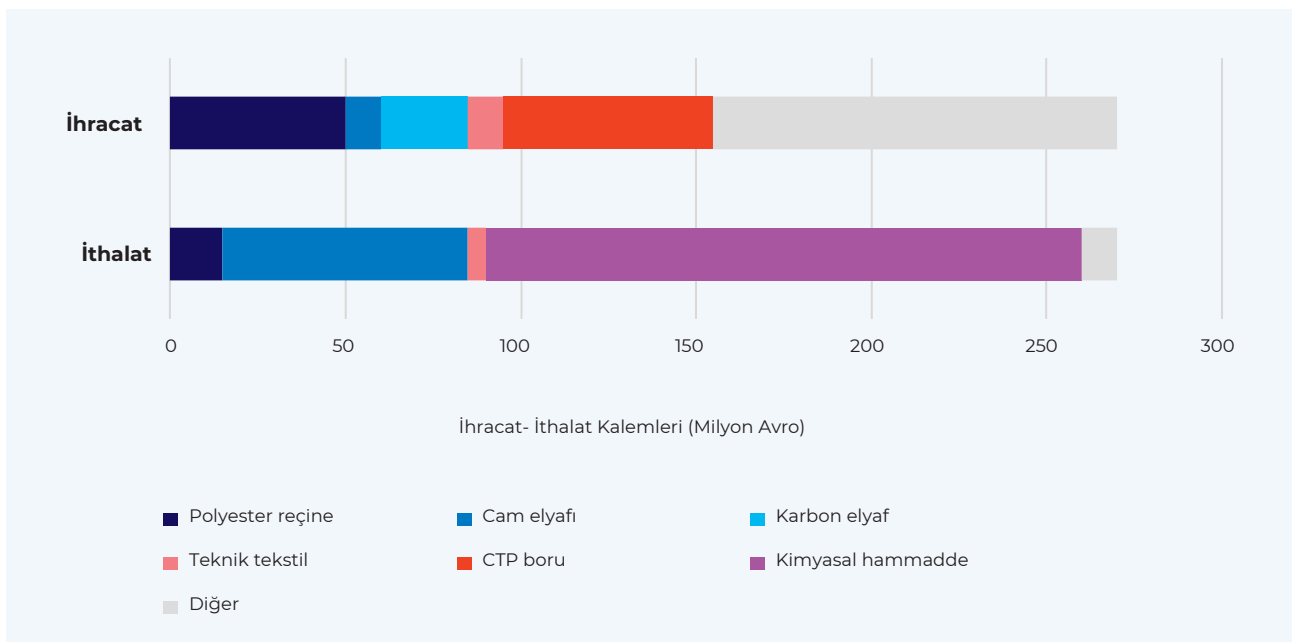


**ŞEKİL 3.6.** Türkiye’de Kompozit Sektöründe Yer Alan Firmaların Bölgesel Dağılımı, 2020



Kaynak: Composites Turkey Dergisi 27, 2020

**ŞEKİL 3.7.** Kompozit Sektörü İhracat-İthalat Kalemleri (Milyon Avro), 2017



Kaynak: Composites Turkey Dergisi 19, 2018

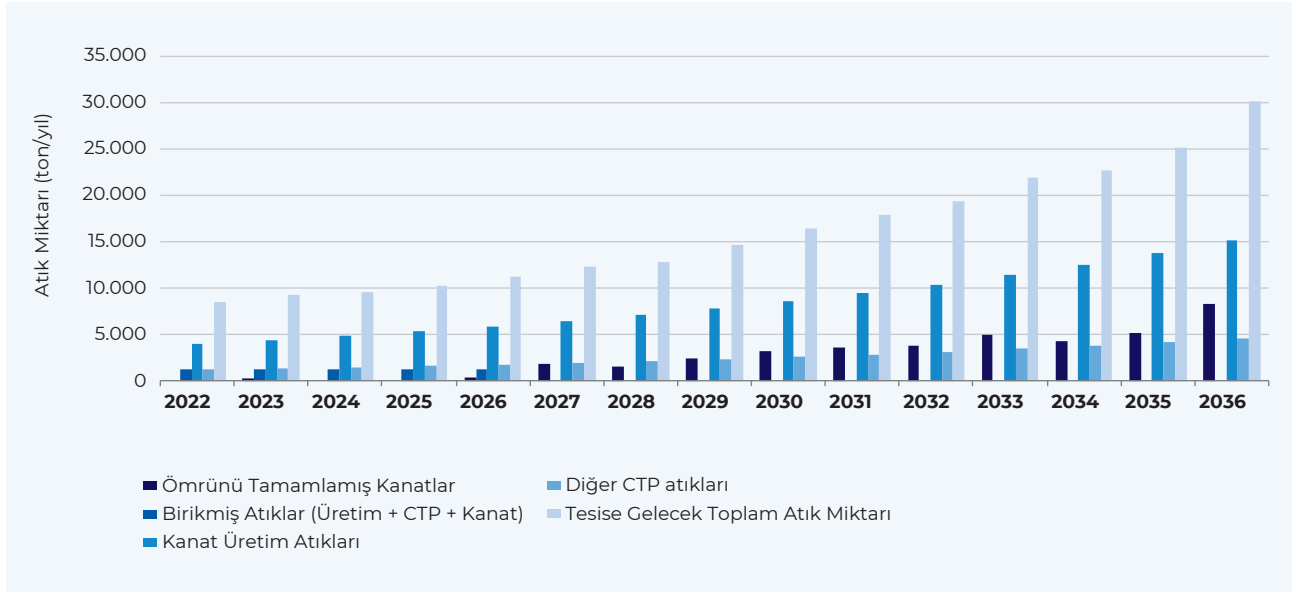


## Rüzgâr Türbini ve Kompozit Atıklarının Birlikte Değerlendirilmesi

Yukarıda yer alan veriler, kompozit sektörü geliştikçe kompozit atıkların gelecekte daha çok çıkacağına ve rüzgâr türbin kanatlarının geri dönüşümü için olan ihtiyaç ile bir sinerji yaratılmasının mümkün olduğuna işaret eder. Dolayısıyla, bu çalışmada rüzgâr türbin kanat atıkları ile CTP atıkları birlikte ele alınmıştır.

Aşağıda listelenen bilgiler ve varsayımlar çerçevesinde söz konusu atıkların çeşidi, miktarı ve yıllara göre dağılımı Şekil 3.8'de sunulmuştur:

- ▶ İzmir'de 2021 yılı itibariyle çıkan ve depo sahalarına gönderilen üretim atıkları yaklaşık 4.000 ton/yıl seviyesindedir.
- ▶ Bu çalışma kapsamında Türkiye rüzgâr enerjisi sektöründe son 10 yılda devreye alınan kanatların envanteri çıkartılmış ve ağırlıkları hesaplanmıştır. Söz konusu hesaplamalara göre 2011-2021 yılları arasında toplam devreye alınmış kanat ağırlığı, yıllık ortalama %10 seviyesinde artış göstermektedir. Bu artışın Türkiye kanat üretim kapasitesine ve aynı zamanda kanat üretim atıklarının yıllık artışına aynı şekilde yansıtacağı, önümüzdeki 15 yıl içerisinde kanat üretim atıklarının da her yıl %10 oranında artacağı beklenmektedir.
- ▶ Rüzgâr türbini geri dönüşümü için bir tesis kurulması durumunda, İzmir ve çevre illerde ömrünü tamamlamış kanatlar bu tesiste işlem görebilecektir. Bu nedenle İzmir, Çanakkale, Manisa, Balıkesir, Bursa, Afyon, Denizli, Muğla, Aydın illerinden çıkacak olan ömrünü tamamlamış kanatlar hesaplanarak talebe dair girdi teşkil etmiştir.
- ▶ Kanat ve kanat komponentlerinin üretiminin mevcut durumda kümelenildiği İzmir ve çevresinin ilerleyen yıllarda da üretimde önde gelen bölge olacağı düşünülmektedir.
- ▶ İzmir ve çevre illerde üretilen CTP atıklarının Türkiye'deki toplam CTP atıklarının yaklaşık %15'ini kapladığı varsayımıyla bu miktarda atığın da işleme gireceği beklenmektedir.
- ▶ Türkiye'de ağırlıklı olarak kanat üretiminden kaynaklanan CTP içerikli birikmiş toplam 12.500 ton atığın %50'sinin İzmir ve çevre illerde depolanmakta olduğu ve ilk 5 yıl içinde aşamalı olarak bu atıkların buldukları depo alanlarından alınarak olası tesiste işlem görmek üzere temin edilebileceği öngörülmektedir.
- ▶ Öte yandan, Türkiye'de yaygın bir atık ithalatı süreci yürüdüğü görülmektedir. Atık ithalatına ilişkin 2020/3 Sayılı Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği (Ürün Güvenliği ve Denetimi) 27.12.2019 tarih ve 30991 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Tebliğ hükümleri ile 2872 sayılı Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler doğrultusunda 2019/18 sayılı Atık İthalatı Uygulama Genelgesi hazırlanmış ve 01.01.2020 tarihinde uygulamaya konmuştur. Atıkların ithalatı Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nca belirlenecek usul ve esaslar çerçevesinde, Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği EK-1 Listesi'nde yer alan atıkların geri kazanımını yapmak üzere Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı veya ilgili Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nden Geçici Faaliyet Belgesi veya Çevre İzin ve Lisans Belgesi almış olan sanayiciler tarafından yapılabilmektedir. İlgili Tebliğin EK-2/A ve EK-2/B listelerinde yer alan atıkların, serbest bölgeler dâhil, Türkiye gümrük bölgesine girişi ve ithalatı yasaklanmıştır. 2021 yılı başında plastik atıkların ithalatına da kısıtlamalar getirilmiştir. Rüzgâr türbini kanat atıklarının dahil olduğu 17 02 03 atık kodu, 2021 yılı düzenlemesiyle Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği EK-2/A'ya göre ithali yasak atıklardandır. Olası bir geri dönüşüm tesisi için yurtdışından bu atıkların ithalatı gerçekleştirilemeyecektir. Bu nedenle, miktar konusunda yapılan öngörülere dahil edilmemiştir.

**ŞEKİL 3.8.** 2022 -2036 Yılları Arasında Tesiste İşlem Görecek Atıkların Çeşit ve Miktar Dağılımı

## Gemi Geri Dönüşüm Sektörü ile Sinerji Olanakları

Gemi adedi açısından karşılaştırıldığında İzmir Aliğa 2020 yılı toplam gemi sayısında 5321 ile Kocaeli'nden sonra ikinci sıradadır. Akdeniz çanağında gemi geri dönüşüm endüstrisine sahip tek ülke Türkiye'dir ve bu endüstri Aliğa ilçesinde faaliyet göstermektedir. Toplamda 28 parselde 22 gemi söküm firması bulunmaktadır (Tuncer, 2020). 2020 yılı için Aliğa'ya geri dönüştürülmek üzere gelen malzeme miktarı yaklaşık 800 bin tondur. Gemi geri dönüşümü dünyada istenilen kapasitede değildir ve hurdanın geri dönüştürülmesi ve yeniden kazanılması faaliyetinin önemli bir bileşenidir. Gemi geri dönüşümünde binlerce ton çelik ortaya çıkmaktadır.

Öte yandan, gemilerde ağırlık merkezini sağlayabilmek ve su üzerindeki üst yapıların hafif olması için kompozit malzeme kullanılabilir ancak kullanımı %1 civarındadır. Buradan yola çıkarak, gemi geri dönüşüm sektörü ile rüzgâr türbin geri dönüşüm sektörü arasında sinerji olanakları incelenmiştir. Her ne kadar gemi sektörünün geri dönüşümü de birlikte değerlendirilmek istense de gemi sektörü ile bu alanda ilişki kurmanın pek mümkün olmadığı sonucuna varılmıştır. Gemilerin 20 yıllık ömrü dolsa bile uygulamada 50 yıla kadar kullanım mevcut olup, geri dönüşümde ağırlık verilen ve büyük atık oranına sahip malzemeler demir ve çeliktir.

## Alternatif Geri Dönüşüm Senaryoları

Türkiye'de rüzgâr türbin atıklarının ve diğer CTP atıklarının birlikte düşünüldüğü sektörün geri dönüşümü ihtiyacına olan talebi göz önüne sererek bu veriler değerlendirildiğinde ve özellikle rüzgâr türbin geri dönüşümü üzerine yoğun çalışan Avrupa'daki çalışmalar incelendiğinde, Türkiye için değerlendirilen alternatif geri dönüşüm olanakları iki senaryo altında ele alınmıştır:

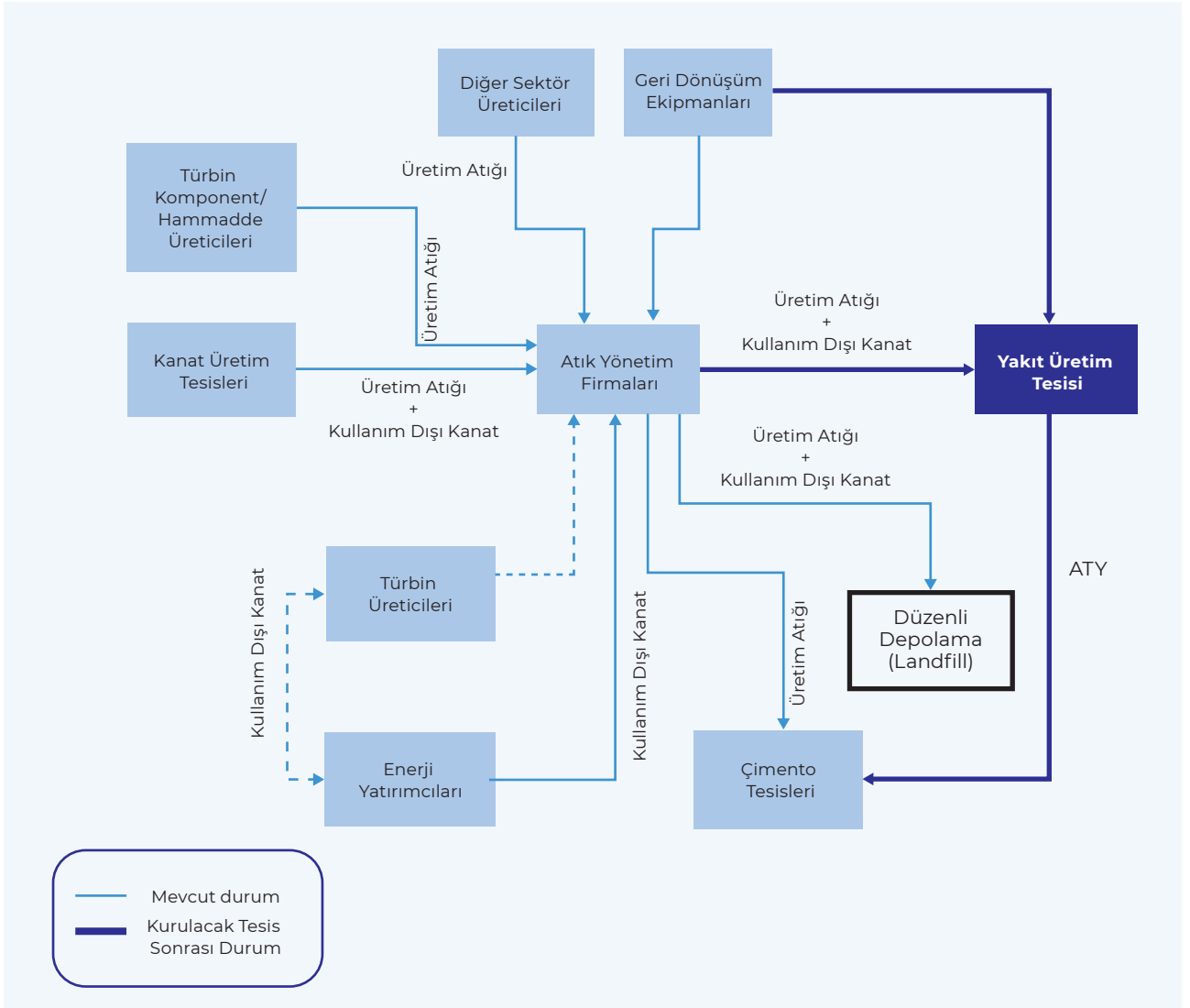
1. Rüzgâr türbin kanadı geri dönüşüm (yakıt üretim) tesisi kurularak atıkların geri dönüşümünün sağlanması
2. Rüzgâr türbin kanadı geri dönüşümü için piroliz teknolojisinin kullanılması ile değerli ürün eldesi

### 3.1. Senaryo 1: Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm (Yakıt Üretim) Tesisi

İzmir ili rüzgâr türbini geri dönüşümü sektörünün gelişimine katkı sağlamak amacı ile hazırlanan bu raporda; ilk olarak bir geri dönüşüm tesisi kurularak, özellikle kompozit malzemelerden oluşan rüzgâr türbini kanat atıklarının parçalanıp, çimento ve/veya yakma tesislerinde kullanımı mümkün yakıt haline getirilmesi senaryosu ele alınmıştır (Şekil 3.9). Bu çerçevede, ekonomik ve teknik kriterler ile çevre ve mevzuat açılarından ön değerlendirme yapılmıştır.

Bu senaryoda ele alınan rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm (yakıt üretim) tesisinin ilgili olduğu sektörler; (i) bu atıkları üreten rüzgâr sanayii ve kompozit üreten ve kompozit malzeme kullanan sektörler, (ii) atığın geri dönüştürülmesi için yatırım yapabilecek geri dönüşüm sektörü (ör: ATY tesisleri) ve (iii) bu atıklardan üretilmiş ürünleri (ör: ATY) değerlendirme potansiyeli bulunan yakma ve çimento tesisleridir.

**ŞEKİL 3.9.** Rüzgâr Türbini Kanat Atıklarının Yönetimi: Mevcut Durum ve Yatırıma Konu Yakıt Üretim Tesisi Genel Süreç Akım Şeması



### 3.1.1. Teknik Değerlendirme

Rüzgâr türbini kanatları işlevleri gereği şiddetli hava olaylarına (fırtına, yıldırım vb.) karşı dayanıklı yapıda üretilmektedirler. Yüksek kalitede cam elyaflar, reçineler ve diğer katkı malzemeleri türbin kanatları içerisinde kullanılan yapısal ürünlerdir ve bu malzemeler türbin kanatlarına yüksek mukavemet ve esneklik gibi özellikler sağlamaktadır. Tüm bu malzemelerin bir bileşimi olarak kompozit yapıda üretilen ve ileri üretim teknolojilerinin ürünü olan rüzgâr türbin kanatları kullanım ömürlerini tamamladıklarında, ilk olarak lojistiğini sağlayabilmek için daha küçük parçalara dönüştürmek üzere yerinde kesilmektedir. Rüzgâr türbini kanatlarının atık olarak oluştuğu noktadan itibaren farklı sektörlerde enerji veya alternatif ham madde olarak kullanılabilmesi için ilgili sektörlerin kullanabileceği boyutlara getirilmesi gerekmektedir.

Böyle bir tesisin halihazırda mevcut bir geri dönüşüm tesisine entegre olarak çalışmasının daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi mevcut durumda görece genç rüzgâr santrallerine sahip olan ülkemizde ömrünü tamamlamış ve kullanım dışı kalmış türbin kanatları oldukça sınırlı sayıdadır. Bu senaryodaki tesisin, kompozit atıklar dışındaki farklı atıkları da işleyebilecek özellikte başka bir tesis bünyesinde kurulması, gerektiğinde atıkların harmanlanarak piyasanın ihtiyaç duyacağı farklı özelliklerdeki yakıtların üretilmesine olanak tanıyacaktır. İzmir'de halihazırda faaliyet gösteren 3 ATY tesisi ve Türkçimento'ya kayıtlı 2 çimento fabrikası bulunmaktadır. Söz konusu tesisin, rüzgâr türbin atıkları dışında değerlendirebileceği diğer kompozit atık üreten sektörler; yapı ve inşaat, elektrik ve elektronik, ulaşım, denizcilik, havacılık, tank, boru ve su kaydıracağı sektörleridir. Ayrıştırılmış kimi atıklar yönetmelik çerçevesinde izin verildiği takdirde ithal edilebilmektedir. İzmir'in bir liman kenti olması sayesinde, ithal edilebilen atıklar da İzmir'de yer alacak bu tesiste lojistik problemler olmadan değerlendirilebilecektir.

Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının ve cam elyaf takviyeli diğer kompozit atıkların (ör: türbin kanadı üretim atıkları, borular, su kaydırakları) kırılarak başta çimento tesisleri ve diğer elektrik üretim amaçlı yakma tesislerinde kullanılmasını

sağlayabilecek kırma/parçalama tesisi için önerilen sistemin özellikleri aşağıdaki şekil ve tablolarda ortaya koyulmaktadır (Şekil 3.10, Tablo 3.1, Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4).

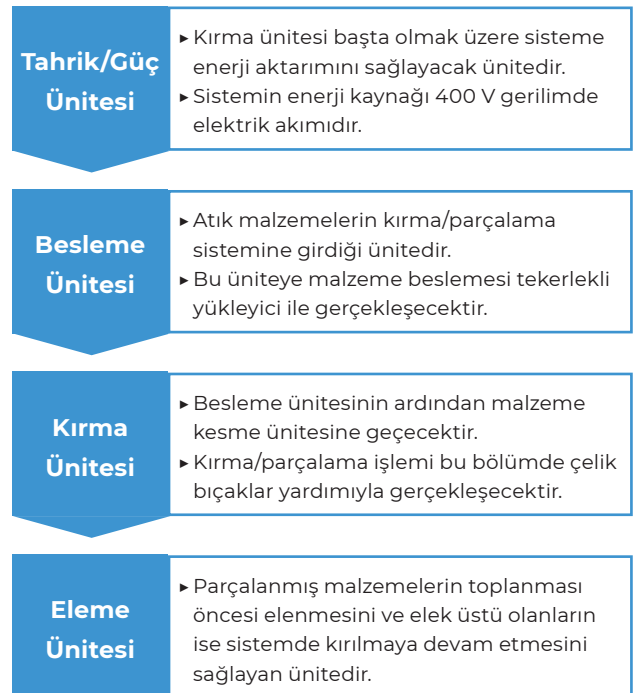
Kırma/parçalama sistemi için kritik öneme sahip malzeme fiziksel özellikleri ve temel işletme parametreleri aşağıda Tablo 3.1'de verilmektedir.

**TABLO 3.1. Malzeme Fiziksel Özellikleri ve Sistem Temel İşletme Parametreleri**

Parametre	Değer
Malzeme Besleme Şekli	Tekerlekli yükleyici
Giriş Malzeme Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	500
Nem	<%10
Giriş Malzeme Büyüklüğü (mm)	En fazla 1.500
Çıktı Kapasitesi (t/saat)	3
Çıkış Malzeme Büyüklüğü (mm)	%90'ı <50
Malzeme Besleme Şekli	Bant konveyör

Kırma/parçalama tesisi 4 ana üniteden oluşmaktadır:

**ŞEKİL 3.10. Kırma/Parçalama Sistemi Genel Proses Akışı**



132 kW gücünde iki motorun güç besleyeceği sistemde 7,5 kW gücünde hidrolik itici sistem görev yapacaktır. Dişli kutusu ile rotora (otomatik makinelerin döner bölümü) güç aktarımı yapılacak olup rotor hızı 105 rpm olarak belirlenmiştir.

**TABLO 3.2. Tahrik/Güç Ünitesi Teknik Bilgileri**

Tahrik/Güç Ünitesi	Birim	Değer
Tahrik Türü	-	Dişli kutusu
Tahrik Gücü	kW	2 x 132
Rotor Hızı (Devir Sayısı)	rpm	105
Voltaaj	V/Hz	400/50
Hidrolik İtici Sistem	kW	7,5

Önerilen sistemin toplam ağırlığı yaklaşık 27 ton seviyelerinde olup boyutları 7m x 2,9m x 4m büyüklüğünde olacaktır. 1,5m çapında parçaların beslenmesine imkan verecek şekilde 1,5m x 2,8m besleme açıklığına sahip olacak sistemin kesme haznesi 5 m<sup>3</sup> büyüklüğünde tasarlanacaktır.

**TABLO 3.3. Sistemin Genel Boyutları ve Besleme Ünitesi Teknik Bilgileri**

Boyut/Ağırlık	Birim	Değer
Genel Ölçüler	mm	7.000 x 2.900 x 3.950
Toplam Ağırlık	kg	27.200
Besleme Ünite Genişliği	mm	4.675 x 1.600
Besleme Açıklığı	mm	2.825 x 1.525
Kesme Haznesi Hacmi	m <sup>3</sup>	5

Tek rotordan oluşacak sistemin rotor uzunluğu yaklaşık 2,8 m uzunluğuna olup 38 adet bıçaktan oluşacaktır. Kesme işleminin gerçekleşeceği bu rotorun çapı ise 74 cm olarak planlanmıştır. Kırılmış/parçalanmış malzemenin istenen boyutlara geldiğinde sistemi

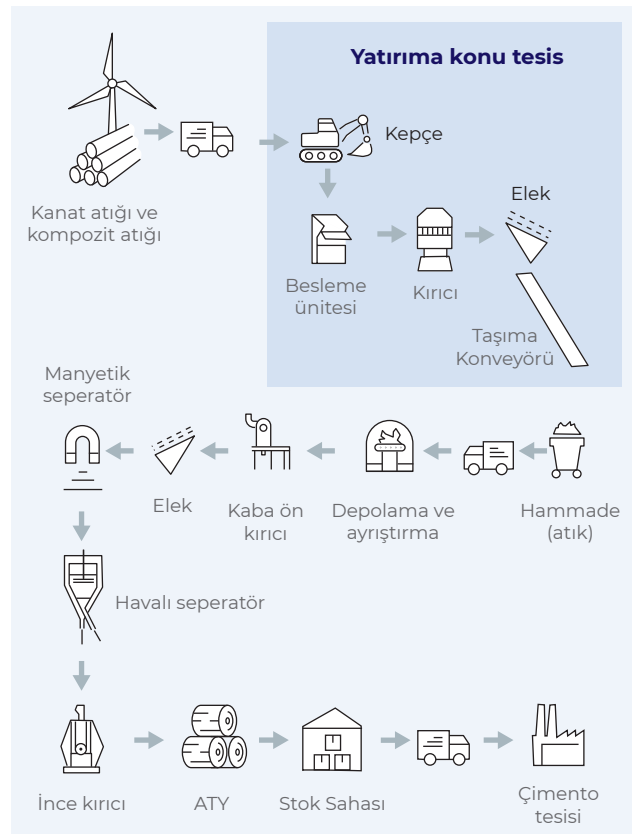
terk etmesini sağlayacak elek ünitesi ise 50mm aralıklara sahip olacaktır.

**TABLO 3.4. Kesme ve Eleme Üniteleri Teknik Bilgileri**

Kesme Sistemi	Birim	Değer
Rotor Uzunluğu	mm	2.805
Rotor Bıçakları	adet	38
Bıçak Boyutu	mm	P43 (43 x 43 x 19,5)
Rotor Çapı	mm	740
Elek Aralığı	mm	50mm

Yerinde kesilerek en fazla 1,5 m boyutlarına getirilen atık malzemelerin yukarıda bahsi geçen kırma/parçalama sistemi vasıtasıyla en fazla 50 mmx50 mm boyutlara getirilmesi sağlanacaktır. Yatırıma konu tesisin süreç akış şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.

**ŞEKİL 3.11. Senaryo 1'de Yatırıma Konu Tesisin Süreç Akış Şeması**





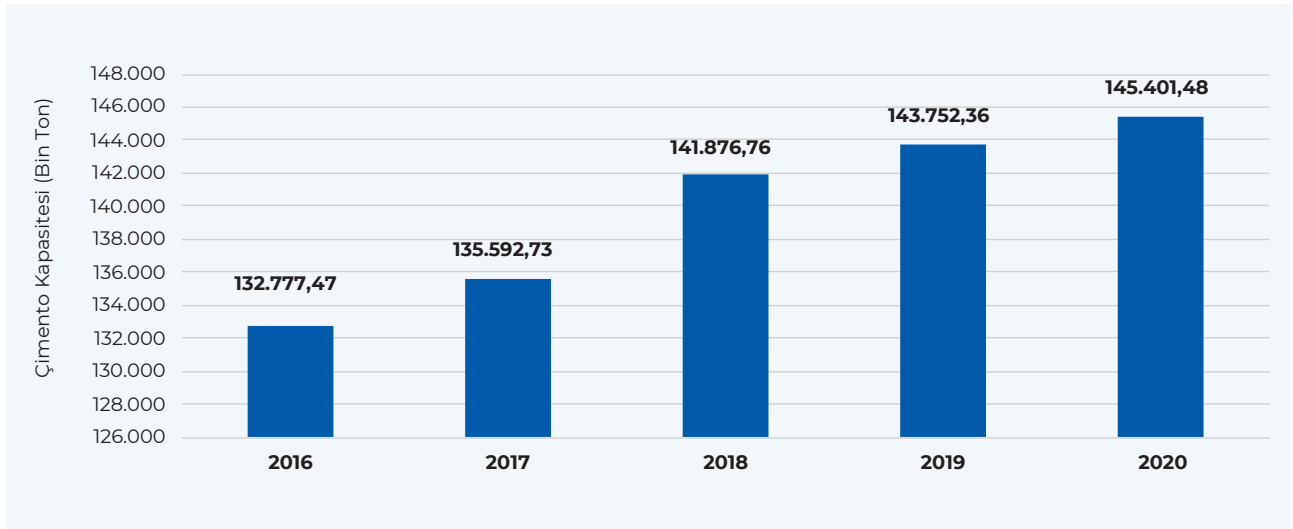
## 3.1.2. Ekonomik Değerlendirme

### 3.1.2.1. Pazar potansiyeli

Senaryo 1 doğrultusunda, hazırlanacak ATY'yi kullanacak olan Türkiye'deki çimento tesisleri incelendiğinde, özellikle 2017-2018 yılları arasında olmak üzere üretim kapasitelerinde sürekli bir artış olduğu görülmektedir. Ülkemizde çimento tesislerinin kapasitesi Şekil 3.12'de verilmiştir.

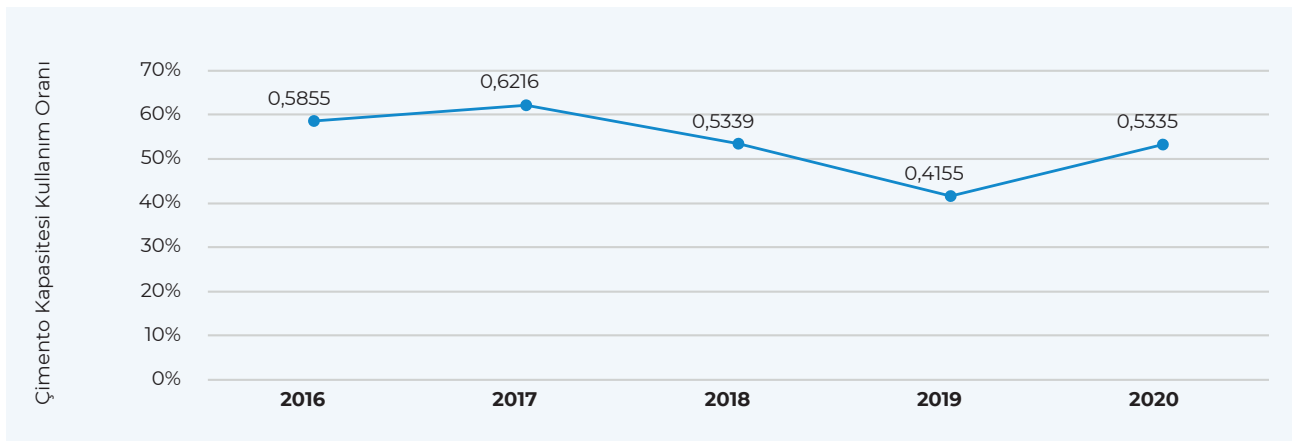
Şekil 3.13'te, çimento fabrikalarında kapasite kullanım oranlarına bakıldığında 2017-2019 aralığında düşüş olmasına karşın 2020 senesiyle beraber kapasite kullanım oranında yeniden artış trendi gözlenmiştir.

**ŞEKİL 3.12.** 2016-2020 Yılları Arasında Türkçimento'ya Kayıtlı ve Kayıtlı Olmayan Türkiye'deki Tüm Çimento Fabrikalarının Kapasite Miktarları (Bin Ton)



Kaynak: Türkçimento, Kapasite İstatistikleri, 2020

**ŞEKİL 3.13.** 2016-2020 Yılları Arasında Türkçimento'ya Kayıtlı Çimento Fabrikalarının Kapasite Kullanım Oranları



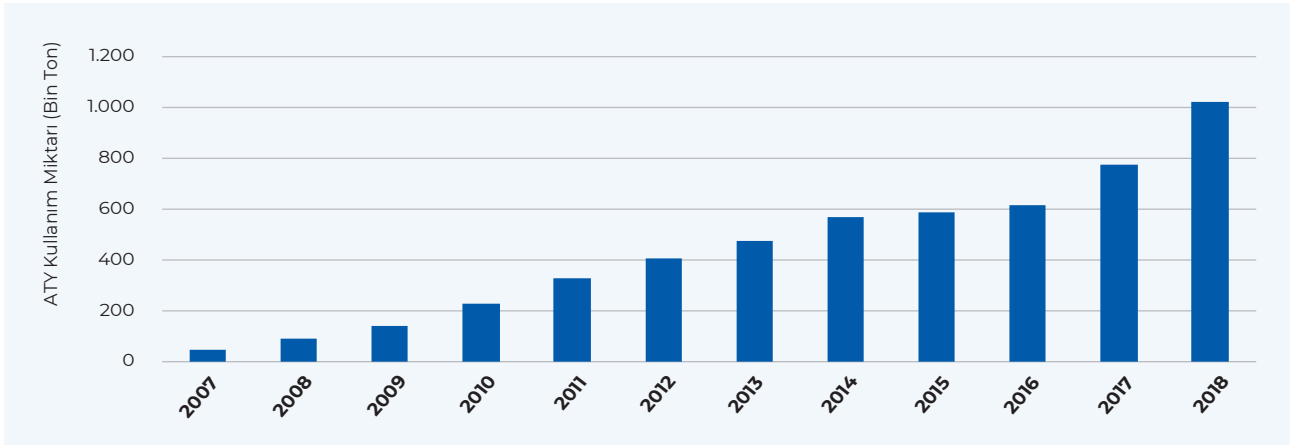
Kaynak: Türkçimento, Kapasite İstatistikleri, 2020

Çimento sektöründe toplam maliyetin %65'i enerji maliyetidir ve bu maliyeti düşürmek için alternatif enerji kaynaklarına yönelik bir eğilim söz konusudur. 2017 yılında çimento sektöründe yaklaşık 758.111 ton ATY kullanılmıştır. Bu sayede yaklaşık olarak 300.000 ton fosil yakıt tasarrufu yapılmış ve %4,7'lik ısıl yer değiştirme sağlanmıştır (Oyak Çimento, 2019). Avrupa Birliği'nde ise yapılan ısıl yer değiştirme %41'dir ve çimento üretiminde Avrupa'da birinci olan Türkiye'nin bu konuda gelişme potansiyeli yüksektir. Örneğin, Türkiye'de yaklaşık 32 milyon ton/yıl belediye atığı üretilmektedir ve bu atıkların 7 milyon ton ATY

potansiyeli bulunmaktadır. Bu miktarda ek yakıtın çimento sektöründe kullanımı sayesinde 3 milyon tona yakın kömürün ithalatının ve 1,7 milyon ton sera gazı emisyonunun önüne geçilebilir.

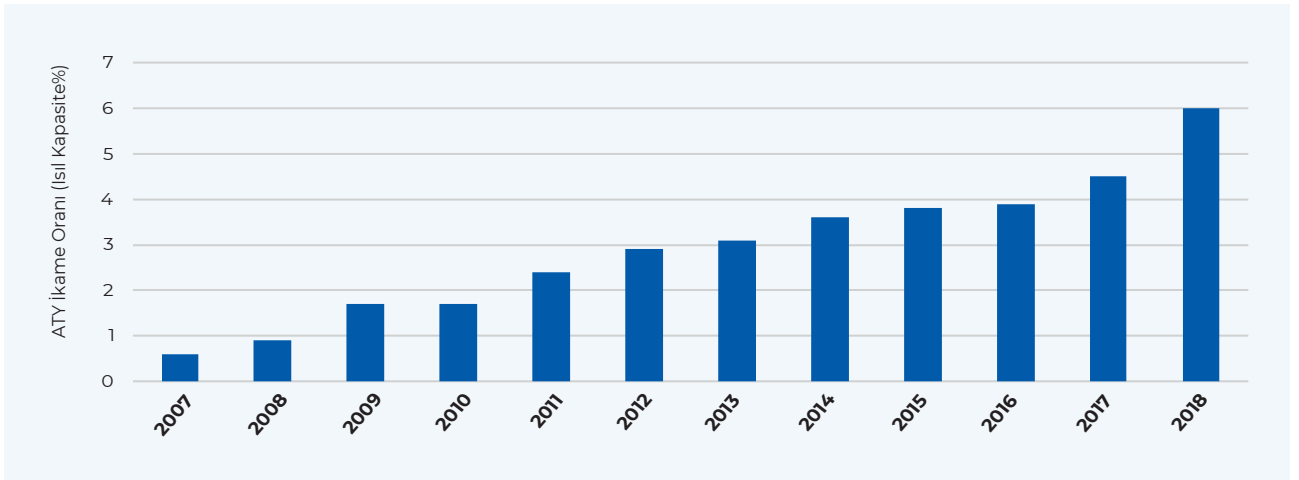
Aynı zamanda katı atık depolama alanlarına gidecek atık miktarı azalarak belediye depolama tesisi işletme maliyetleri azaltılabilir (Türk Çimento, 2021). Türk Çimento verilerine göre, 2007-2018 yılları arasındaki ATY kullanım miktarları ve yakıt ikame oranları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre çimento sektöründe ATY talebinde ve kullanımında sürekli bir artış gözlenmektedir.

**ŞEKİL 3.14.** 2007-2018 Yılları Türkiye'de Çimento Sektöründe ATY Kullanım Miktarı (Bin Ton)



Kaynak: Türkçimento, Alternatif Yakıt ve Hammadde

**ŞEKİL 3.15.** 2007-2018 Yılları Türkiye'de Çimento Sektöründe ATY İkame Oranı



Kaynak: Türkçimento, Alternatif Yakıt ve Hammadde

### 3.1.2.2. Finansal analiz

Bu çalışma kapsamında önerilen geri dönüşüm tesisinin finansal analizine temel teşkil eden, ilk yatırım maliyeti, gelir/gider hesaplamaları ve diğer yatırım/işletme parametreleri açısından bazı varsayımlar yapılmıştır. Genel varsayımlar aşağıda listelenmekle birlikte üçüncü bölümde yer alan spesifik varsayımlara yer verilmiştir.

Tesisin genel işleyişi ve iş modeli açısından geliştirilen varsayımlar:

- ▶ Kanat ve kanat komponentlerinin üretiminin mevcut durumda kümelendiği İzmir ve çevresinin ilerleyen yıllarda da üretimde önde gelen bölge olacağı varsayılmıştır.
- ▶ Coğrafi koşullar, karayolu mesafesi ve rüzgâr potansiyeli düşünüldüğünde hayata geçirilecek geri dönüşüm tesisinin 10 yıllık ekonomik ömrü boyunca toplam 9 ilden atık temin etmesi beklenmektedir. Bu iller İzmir, Çanakkale, Manisa, Balıkesir, Bursa, Afyon, Denizli, Muğla ve Aydın'dır.
- ▶ Bu raporun üçüncü bölümünde detayları aktarıldığı gibi kurulumundan sonraki ilk 5 yıl içerisinde yıllık ortalama 10.000 ton atık tesise kabul edilebilecektir.
- ▶ Yukarıda bahsedilen 10.000 ton/yıllık atık içerisinde aşağıdaki bileşenler yer almaktadır:
  - ▶ Bugüne kadar bu illerde 12.500 ton birikmiş atık bulunmaktadır ve bu atıkların %50'si 5 yıl içinde tesise getirilebilecektir. (1.250 ton/yıl)
  - ▶ Son 10 yılda (2011-2021) yaşanan %10 yıllık kanat miktarı (ton/yıl) artışının önümüzdeki yıllarda da aynı şekilde devam edeceği ve ilk yıl 4.000 ton/yıl olacak üretim atıklarının yıllar içinde aynı şekilde artacağı düşünülmektedir.
  - ▶ Türkiye'de üretilen CTP atıklarının %20'si tesiste işlem görecektir.
- ▶ Yukarıdaki bilgiler ışığında kurulacak tesis kapasitesi ilk 5 yılı kapsayacak şekilde 10.000 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Talepte beklenen hızlı artış ile birlikte ilerleyen yıllar için tesis kapasitesinin artırılması gerekebilecektir. Bu çalışmada yalnızca ilk 5 yılı kapsayan finansal değerlendirilmelere yer verilmiştir.
- ▶ Önerilen geri dönüşüm sistemi hali hazırda kurulu veya zaten kurulması planlanan bir endüstriyel/evsel katı atık geri dönüşüm ve/veya ATY hazırlama tesisi içerisinde ayrı bir bileşen olarak kurulacaktır.

#### Sabit Yatırım Tutarı

Geri dönüşüm tesisinin sabit yatırım tutarı belirlenirken aşağıda sunulan varsayımlar geliştirilmiştir.

- ▶ Halihazırda kurulu veya zaten kurulması planlanan

bir endüstriyel/evsel katı atık geri dönüşüm ve/veya ATY hazırlama tesisi içerisinde hayata geçirileceği için, önerilen geri dönüşüm sisteminin mevcut tesisteki bazı yardımcı ekipmanlardan (ör: manyetik separatör, balistik separatör) faydalanması mümkün olacaktır.

- ▶ Mevcut veya planlanan tesise ek olarak 3.000 m<sup>2</sup>'lik arazi üzerinde 500 m<sup>2</sup>'lik alanda kısmi alt ve üst yapı işleri yeterli olacaktır. Geri kalan 2500 m<sup>2</sup>'lik alanın büyük bir bölümü ise atıkların geçici depolanması için kullanılacaktır. Kapsamlı bir bina/yapım ihtiyacı olmayacaktır.
- ▶ Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi malzeme mukavemetinin yüksek olması nedeniyle oldukça güçlü bir kırıcıya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu varsayımlar doğrultusunda, tesis sabit yatırım maliyet kalemleri Tablo 3.5'te verilmektedir.

**TABLO 3.5. Tesis Sabit Yatırım Maliyet Kalemleri**

Yatırım Kalemi	Maliyet (ABD Doları)
Arazi	
Sanayi imarlı 3.000 m <sup>2</sup> arsa bedeli	360.000
İnşaat/Yapım İşleri	
Kısmi alt ve üst yapı işleri (500m <sup>2</sup> alanda kazı, temel vb.)	120.000
Makine/Teçhizat	
Tek silindirli kırıcı	351.600
Dolum ikaz sensörü	4.200
Frekans konvertörlü güç kontrol ünitesi	42.000
Besleme hunisi	16.800
Aşınma önleyici malzemeler	4.200
Rotor soğutma sistemi	21.600
Kontrol odası (15 m <sup>2</sup> konteyner)	2.400
Basınçlı hava kompresörü	1.200
Toz emiş fanları	6.000
Çıkış konveyörü	20.400
Tekerlekli yükleyici	120.000
Kablolama	
Kontrol odası ve sistem elemanları arası kablolar	6.600
Montaj ve Devreye alma	
Mekanik ve elektrik montaj, devreye alma ve personel eğitimi dahil	8.400
Nakliye	
Vinç kirası dahil lojistik maliyetler	15.600
Diğer	
Öngörülemeyen maliyetler	60.000
<b>Toplam</b>	<b>1.161.000</b>

### Yatırımın Geri Dönüş Süresi

Yatırımın geri dönüş süresi hesaplanırken sabit yatırıma ek olarak yıllık gider ve gelirler dikkate alınmıştır. Yıllık giderlere ilişkin geliştirilen varsayımlar aşağıda listelenmiştir:

- Tesisin 2 vardiya çalışması ve tatil, yıllık bakım vb. de düşünülerek toplam yıllık 4.000 saat faaliyet göstermesi beklenmektedir.
- Hali hazırda kurulu veya zaten kurulması planlanan bir endüstriyel/evsel katı atık geri dönüşüm ve/veya ATY hazırlama tesisi içerisinde hayata geçirileceği için vardiyalı çalışacak 2 adet kepçe operatörü ve 2 bakım elemanı yeterli bulunmuştur. Her bir iş grubu için sırasıyla 600 ve 420 ABD Doları brüt aylık ücret öngörüsü ile yıllık işçi maliyeti hesaplanmıştır.

- Elektrik giderleri için Gediz Elektrik sanayi tarifi dikkate alınmış ve 0,083 ABD Doları/kWh değeri hesaplamalarda kullanılmıştır.
- Tesise atık yüklemesinin iş makinesi ile gerçekleştirileceği planlaması çerçevesinde motorun maliyetinin 0,84 ABD Doları/L seviyesinde seyredeceği düşünülmüştür.
- Tesis ekipmanları amortisman bedeli hesaplanırken arazi maliyeti dışındaki tüm maliyetlerin 10 yıllık ekonomik ömür çerçevesinde, ekonomik ömür sonrası yenilenme gereksinimi dikkate alınmıştır.

Tablo 3.6.'da tesis yıllık gider maliyet kalemleri açıklamalarıyla birlikte verilmektedir.

**TABLO 3.6. Tesis Yıllık Gider Maliyet Kalemleri**

Gider Kalemi	Açıklama	Yıllık Maliyet (ABD Doları)
<b>İşçilik</b>		
4 işçi	2 Kepçe operatörü ve 2 bakım elemanı 8'er saatlik 2 vardiya ile çalışacaktır	24.480
<b>Elektrik</b>		
Kırıcı motor gücü	132 kW gücünde 2 adet motor yılda 4.000 saat çalışacaktır	87.437
Hidrolik sistem	7.5 kW gücünde hidrolik sistem yılda 4.000 saat çalışacaktır.	2.484
Diğer ekipmanların elektrik tüketimi	Konveyörler, yardımcı ekipmanlar, klima sistemi, soğutma sistemi vb. diğer tüm ekipmanların toplam gücü 50 kW olacaktır.	16.560
<b>Bakım ve Yedek Parça</b>		
Kırıcı ekipmanın bıçak ve yardımcı malzeme değişimi	Kırıcı ekipmanın bıçak ve yardımcı malzeme değişimi 2.000 saatte bir gerçekleştirileceği için yılda 2 set yedek parça gereksinimi bulunmaktadır.	72.766
<b>Yakıt</b>		
İş makinesi yakıt gideri	Saatte 10 L tüketim varsayımı ile pasif süre dahil yıllık toplam 4.000 saat operasyon	33.600
<b>Amortisman</b>		
Tesis ekipmanları amortisman bedeli	Tesisi ekipmanlarının 10 yıllık ekonomik ömrü olacağı varsayımı ile toplam yatırım bedelinin %10'u yıllık maliyet kabul edilmiştir	72.900
<b>Toplam</b>		<b>310.226</b>

Özet halinde Tablo 3.7'de de görülebileceği üzere, tesisin 2 temel gelir kalemi olacağı düşünülmektedir:

**Atık Bertaraf Getirisi:** İlk gelir kalemi geri dönüş- türülecek atıkların yönetimi için atık üreticilerinden alınacak atık bertaraf bedelidir. Mevcut durumda atık düzenli depolama sahalarına gönderilen, üretim tesislerinin depo sahalarında bekletilen veya rüzgâr santrallerinin arazilerinde geçici olarak tutulan bu atıkların buldukları şehirlere göre farklı bertaraf maliyetleri bulunmaktadır. Atıkların buldukları bölgedeki atık düzenli depolama sahasına gönderileceği varsayımı ile atık üreticilerinin piyasa koşullarında yaklaşık 24 ABD Doları/ton maliyetle bertaraf bedeli ödedikleri belirlenmiştir. Bu çerçevede piyasa koşulları ile atık kabulü yapılacağı varsayıldığında kurulacak tesisin yıllık 10.000 ton atık bertarafı karşılığı yaklaşık 240.000 ABD Doları/yıl bertaraf kazancı elde etmesi beklenmektedir.

**Yakıt Satış Getirisi:** İkinci gelir kalemi ise üretilen yakıtın çimento veya atık yakma tesisi gibi sektörlerde satışı karşılığı elde edilen yakıt satış bedelidir. Çimento tesisleri örnek olarak alındığında, mevcut durumda petrokok veya linyit gibi farklı enerji kaynaklarını kullanan sektörün ilgili kaynaklara ödediği bedeller baz alınmıştır. Örneğin mevcut durumda kalorifik değeri 7.000-8.000 kcal/kg olan petrokok kullanan pek çok çimento firması hali hazırda 84 ABD Doları/ton bedel ile bu enerji kaynağını kullanmaktadır. Öte yandan çimento gibi ATY kullanan atık yakma tesisleri ise 3.000-4.000 kcal/kg ısı değere sahip ATY için 18-30 ABD Doları/ton bedeller ödemektedir. Üretilecek olan yakıtın kalorifik değerinin 6.000 kcal ve neminin de oldukça düşük olacağı varsayımı ile piyasada 36 ABD Doları/ton ile değer görebileceği öngörülmüştür. Bu çerçevede yıllık 9.000 ton atık üretimi yapacak tesisin 324.000 ABD Doları/yıl yakıt satış getirisi elde etmesi mümkün görünmektedir.

**TABLO 3.7. Tesis Maliyet ve Gelir Kalemleri**

Gelir Kalemi	Miktar (ton)	Birim Fiyat (ABD Doları)	Yıllık Gelir (ABD Doları)
Atık Bertaraf Bedeli	10.000	24	240.000
Yakıt Satış Bedeli	9.000	36	324.000
<b>Toplam</b>			<b>564.000</b>
<b>İlk Yatırım Maliyeti</b>			1.161.000 ABD Doları
<b>Yıllık İşletme Maliyeti</b>			310.226 ABD Doları
<b>Yıllık Net Gelir</b>			253.774 ABD Doları
<b>Geri Ödeme Süresi</b>			4,6 yıl

Yukarıdaki bu değerlendirmeler ışığında özet olarak ilk yatırım maliyeti 1.161.000 ABD Doları, yıllık işletme maliyeti ise 310.226 ABD Doları olarak hesaplanmıştır. Tesisin yıllık geliri ise 564.000 ABD Doları

seviyelerinde olacaktır. Bu hesaplamalar doğrultusunda tesisin yıllık net getirisi 253.774 ABD Doları, geri ödeme süresi ise 4,6 yıl olarak bulunmuştur.



### 3.1.3. Çevresel Değerlendirme

Rüzgâr enerjisi sektörü büyüdükçe kullanım ömrünü dolduran rüzgâr türbini kanadı sayısı artmakta ve atık depolama sahası kapasitesi ve çevresel etki sorunları ortaya çıkmaktadır. Rüzgâr kanadındaki inorganik bir bileşen olan cam elyafı, biyobozunur olmadığı için doğada kolaylıkla yok olmamaktadır. Bu nedenle, çöp sahasında depolanan inorganik bileşenli türbin kanadı atıkları kapasite sorunlarına neden olmaktadır. Reçine ise, bir organik madde olarak atık sahalarında mikroorganizmalar tarafından parçalanır ve gaz ve sızıntı suyu emisyonlarına yol açabilmektedir (Fox, 2016) (El-Fadel, Findikakis, & Leckie, 1997). Bu nedenlerle, ömrünü dolduran rüzgâr türbinlerini çöp sahasında depolamak yerine alternatif çözümler uygulanmalıdır.

Rüzgâr türbini geri dönüşümü ile malzeme döngüsünün kapatılması; doğal kaynakların kullanımı, emisyonlar ve enerji kullanımı üzerinde olumlu bir etki göstermektedir. Malzeme döngüsünün kapatılması, sıfırdan üretilen malzeme ile üretilen rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümüyle başka bir ürünün hammadmesine dönüştürülmesi olarak açıklanabilir. İşlenmiş ve geri dönüştürülecek malzemeler için enerji gereksinimleri genel olarak işlenmemiş malzemelere göre daha düşüktür. Fakat bununla birlikte, kanat gibi bazı malzemelerin veya yapıların geri dönüşümden sonra kalite kaybı olabilmektedir (Jensen, 2019). Rüzgâr enerjisi kullanımının çevreye olan etkisinin yaklaşık %70'i türbinlerin üretiminde kullanılan malzemelerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle hizmet ömrü sonunda optimum geri dönüşümün sağlanması ekonomik ve çevresel açıdan önem taşımaktadır.

Bir çalışmaya göre, 60 MW'lık bir rüzgâr santrali malzemelerinin enerji kaynağı olarak geri dönüştürülmesi sayesinde, Danimarka'da bir yılda yaklaşık 14.400 kişinin enerji tüketimine eşdeğer olan yaklaşık 81 TJ seviyesinde enerji üretmek mümkündür (kişi başı 1.568 kWh-1). Ayrıca, yaklaşık olarak 7.351 ton CO<sub>2</sub> emisyonunun engellenebileceğini göstermektedir ki bu da yaklaşık 52,5 milyon km otomobil sürüşüne eşittir (ortalama 0,17 kg CO<sub>2</sub>/km) (Jensen, 2019). Ayrıca, türbin kanadından elde edilen geri dönüşüm ürünlerinin çimentoda hammadde kaynağı olarak kullanılabilirdiği bilinmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020). Türbin kanatlarından geri dönüştürülen malzemenin çimento hammaddesi olarak kullanılması sonucunda kireçtaşı agregası yerine kompozit agrega kullanılması ile, üretilen bir ton

kompozit agrega başına 0,13 ton kalker agregasından tasarruf sağlanır. Böylece üretilen kompozit agrega tonu başına CO<sub>2</sub> emisyonlarında 1,81 kg ile 3,07 kg arasında azalma elde edilir (Fox, 2016).

Çimento tesislerinin çevresel etkilerine bakıldığında, çimentonun üretim sürecinde, sera gazı emisyonlarıyla beraber döner fırınlarında toz ve gaz emisyonları oluşmaktadır. Tesisler, ilgili yönetmelikler kapsamında belirlenen periyotlarda toz ve gaz emisyonları ölçerek, yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin altında kalarak yasal mevzuata uyum sağlamakla yükümlüdür. Halihazırda, hava kirliliği kontrolü kapsamında; çimento tesisleri çevre mevzuatından kaynaklanan yasal yükümlülüklerin sağlandığına dair akredite kuruluşlara periyodik teyit ölçümleri yaptırmakta ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'na raporlamaktadır. Genel olarak atıkların yakıt olarak kullanılmasıyla, birincil yakıt olarak doğal kaynaklar ve madenler kullanılmamış olmakta; fosil yakıt yerine ikame edilmesiyle sera gazı emisyonlarında azalma gerçekleşmektedir.

Düzenli depolama sahaları çok çeşitli çevre ve insan sağlığı sorunlarına neden olabilmektedir, bu nedenle yalnızca atık malzemeler yeniden kullanılamıyorsa, geri dönüştürülemiyorsa veya geri kazanılamıyorsa başvurulmalıdır. Düzenli depolama sahalarında depolanan toksik ve/veya çürüyen organik maddelerin kombinasyonu, toprak kalitesine zarar verebilmekte, toprak verimliliğini ve aktivitesini bozabilmekte ve bitki yaşamını etkileyebilmektedir. Düzenli depolama sahalarında biriktirilen atık malzemelerin çoğunun ayrışması çok uzun yıllar aldığından, etkili uzun vadeli stratejilere ve tesislere ihtiyaç vardır. Bu genellikle yüksek maliyetli bir yatırım gerektirir. Ek olarak, geri dönüştürülebilir atıklar depolandığı için, bu malzemeler kullanılamamakta ve geri dönüştürülüp katma değer yaratılabilecek iken ülke ekonomisine kazandırılmamaktadır (SL Recycling, 2020). Sonuç olarak, kullanım ömrünü dolduran rüzgâr türbini kanatlarının depolama sahasında depolanması yerine geri dönüştürülmesi, yukarıda bahsedilen olumsuzlukların önlenmesini sağlamaktadır.

Düzenli depolama alanlarına ilişkin düzenlemeler daha katı hale geldikçe, Almanya gibi bazı gelişmiş ülkeler katı atıklara bir depolama yasağı getirmiş ve rüzgâr türbini kanatları için alternatif bir atık yönetimi yöntemi bulunmasına neden olmuştur. Almanya'da yürürlükte bulunan benzer düzenlemelerin ABD'de ve

tüm dünyada kabul görmesi beklenmektedir. Avrupa mevzuatı, sürdürülebilirlik, atık oluşumunu önleme ve yaşam döngüsü kavramını uygulayarak doğal kaynakların verimli kullanımının artırılması üzerine odaklanmıştır. Ayrıca, mevcut mevzuat, bir geri dönüşüm ekonomisi sağlamak için yeniden kullanımı ve geri dönüşümü teşvik etmektedir (Cherrington vd., 2012). Rüzgâr türbini malzeme döngüsü tamamlanarak, bu mevzuata uyulması da sağlanacaktır. Bunların yanında, sürdürülebilir bir üretici olmak, yalnızca üretim sürecini ve ürünü değil, aynı zamanda ürünün yaşam döngüsü boyunca faaliyetlerini de dikkate almaya kadar uzanmaktadır (World Wind Energy Association, 2015). Çeşitli araştırmalar, çevre dostu ürünler ve operasyonlar hedefleyen şirketlerin rekabet avantajı sağlayacağını ve daha düşük atık maliyetleriyle karşılaşacağını göstermektedir (IEA, 2015) (U.S. Department of Energy, 2015).

### 3.1.4. Mevzuat Açısından Değerlendirme

Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği EK-1 ve EK-2'de Çevresel Etki Değerlendirmesi Uygulanacak Projeler Listesi ve Seçme-Elemente Kriterleri Uygulanacak Projeler Listesi yer almaktadır. Ancak, projeye konu 17 02 03 plastik atık koduna sahip atıkların fiziksel olarak kırılması işlemini gerçekleştirecek olan yakıt üretim tesisi, bahsedilen proje listeleri arasında yer almamaktadır. EK-2 listesinde tehlikeli, tehlikesiz ve/veya özel işleme tabi atıkların fiziksel yöntemlerle geri kazanıldığı tesisler yer almaktadır ancak yine de ömrünü tamamlamış lastiklerin, kabloların kırma ve parçalama işlemleri, tehlikesiz atık niteliğinde olan metal, kağıt, plastik atıkları toplama, ayırma, kesme, parçalama, öğütme ve granül elde etme işlemleri ile solar kurutma işlemleri bu listenin dışında bırakılmıştır.

ÇED Yönetmeliği kapsamı dışında yer alan projeler ile ilgili olarak ÇED muafiyetine ilişkin başvurular ilgili Valiliklere (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü) yapılmaktadır. Öte yandan, tesisler, Çevre Mevzuatı kapsamında yer alan diğer yönetmeliklere tabidir.

Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği kapsamında Çevre İznine veya Çevre İzin ve Lisansına tabi işletmeler, çevresel etkilerine göre yönetmeliğin EK-1 (Çevreye kirlenici etkisi yüksek düzeyde olan işletmeler) ve EK-2 (Çevreye kirlenici etkisi olan işletmeler) listelerinde sınıflandırılmıştır. EK-1 ve EK-2 listelerinde yer alan işletmeler, faaliyette bulunabilmeleri için, öncelikle Geçici Faaliyet

Belgesi almak zorundadır. Geçici Faaliyet Belgesi alan işletmeler belge tarihinden itibaren 1 yıl içerisinde Çevre İzni veya Çevre İzin ve Lisans Belgesi almak zorundadır. EK-2'de "8.2 Ambalaj atıkları dışındaki, tehlikesiz atık niteliğinde olan plastik türevli ve/veya tekstil türevli atıkların geri kazanıldığı tesisler" yer almaktadır ve projede söz konusu olan atık tehlikesiz atık sınıfına girmektedir.

Aynı yönetmeliğin EK-3B'sinde geçici faaliyet belgesi için istenilen başvuru belgeleri bulunmaktadır. Bu belgeler ortak belgeler ve özel belgeleri (geri kazanım ve ATY hazırlama için) kapsayacak şekilde aşağıda verilmektedir ve bu maddeler için özel koşullar ilgili yönetmelikte yer almaktadır.

1. ÇED "Olumlu" ya da "Gerekli Değildir." kararı (ÇED'e tabi tesisler için) veya ÇED'e tabi olmayan tesisler için kapsam dışı olduğunu gösterir yazı
2. Sicil Gazetesi
3. Kapasite Raporu, kapasite raporu yerine geçebilecek yetkili makamlardan alınmış diğer belgeler veya kapasite raporundan muaf olduğuna dair yetkili makamlardan alınmış belge
4. İş Akım Şeması ve Proses Özeti (Hammadde kabulünden başlayarak her bir üniteye uygulanacak işlemlerin ayrıntılı açıklaması, gerekli şema, vaziyet planı, formül ve şekiller, atık kodları, emisyon kaynakları)
5. İl Müdürlüğü Uygunluk Yazısı
6. Sanayi Sicil Belgesi
7. Tehlikeli Madde ve Tehlikeli Atık Mali Sorumluluk Sigortası Poliçesi

Çevre izin veya çevre izin ve lisans sürecinin tamamlanması aşamasında ise teknik uygunluk raporu istenmektedir.

Atık Yönetimi Yönetmeliği'nde de (Resmi Gazete Tarihi: 02.04.2015 Sayısı: 29314) "Serbest bölgelerde kurulu bulunanlar da dahil olmak üzere, EK-2/A'da ve EK-2/B'de belirtilen faaliyetleri yapan gerçek ve/veya tüzel kişiler Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği doğrultusunda Bakanlık/İl Müdürlüğü'nden geçici faaliyet belgesi/çevre izin ve lisansı belgesi almakla, tehlikesiz atık toplama-ayırma tesisi için ise İl Müdürlüğü'nden izin almakla yükümlüdürler" ifadesi yer almaktadır. EK-2/B'de yer alan geri kazanım işlemleri aşağıdaki tabloda belirtilmektedir. Buna göre, bu çalışmaya konu tesis, R12 kodunda yer alan işlemleri gerçekleştirecektir.

**TABLO 3.8. Geri Kazanım İşlemleri**

Kod	İşlem Açıklaması
R1	Enerji üretimi amacıyla başlıca yakıt olarak veya başka şekillerde kullanma
R2	Solvent (çözücü) ıslahı/yeniden üretimi
R3	Solvent olarak kullanılmayan organik maddelerin ıslahı/geri dönüşümü (kompost ve diğer biyolojik dönüşüm prosesleri dahil)
R4	Metallerin ve metal bileşiklerinin ıslahı/geri dönüşümü
R5	Diğer inorganik malzemelerin ıslahı/geri dönüşümü
R6	Asitlerin veya bazların yeniden üretimi
R7	Kirliliğin azaltılması için kullanılan parçaların (bileşenlerin) geri kazanımı
R8	Katalizör parçalarının (bileşenlerinin) geri kazanımı
R9	Yağların yeniden rafine edilmesi veya diğer yeniden kullanımları
R10	Ekolojik iyileştirme veya tarımcılık yararına sonuç verecek arazi ıslahı
R11	R1 ile R10 arasındaki işlemlerden elde edilecek atıkların kullanımı
R12	Atıkların R1 ile R11 arasındaki işlemlerden herhangi birine tabi tutulmak üzere değişimi (1)
R13	R1 ile R12 arasında belirtilen işlemlerden herhangi birine tabi tutuluncaya kadar atıkların ara depolanması (atığın üretildiği alan içinde geçici depolama, toplama hariç)

(1) R12: Uygun bir R kodu yoksa R1'den R11'e kadar numaralandırılmış işlemler öncesinde yapılacak sökülme, tasnif etme, kırma, sıkıştırma, peletleme, kurutma, parçalama, şartlandırma, yeniden ambalajlama, ayırma, harmanlama ya da karıştırma gibi ön işlem faaliyetlerini kapsayan işlemleri içerebilir.

Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği'nde (Resmi Gazete Tarihi: 20.06.2014, Sayı: 29036), atıkların alternatif hammadde olarak kullanılması, atıktan türetilmiş yakıt hazırlanması ve bu hazırlama tesislerinde bulunması gereken şartlar ile atıktan türetilmiş yakıt kullanımı ve beraber yakma tesislerinde ek yakıt olarak kullanılacak atıklara ilişkin esaslar belirlenmiştir. Ayrıca, Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'e göre çimento tesisleri gibi atıkları ek yakıt olarak kullanacak olan beraber yakma tesislerinin atığın çimento fırınına doğrudan beslenmesi öncesi bir ön parçalama ve karıştırma işlemiyle daha homojen bir yapıya kavuşturması gerekmektedir. ATY bu işlemlerden elde edilen alternatif yakıt türüdür. Atıkların çimento fabrikalarında değerlendirilmesi ile atıkların depolama sahalarında birikmesi yerine daha faydalı şekilde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. ATY

sayesinde birincil yakıt olarak doğal kaynaklar ve madenler kullanılmamış olmaktadır ve fosil yakıt yerine ikame edilmesiyle sera gazı emisyonlarında azalma gerçekleşmektedir. Çimento fabrikaları için ek yakıtın homojen ve sürekli olarak sağlanması gerektiğinden ATY tesisleri önemli bir rol oynamaktadır.

Çimento tesisleri özellikle silis içeriği yüksek atıkları alternatif hammadde olarak değerlendirebilmektedir. Ancak 17 02 03 atık kodlu (inşaat ve yıkım kaynaklı plastik atıklar) rüzgâr türbin atıkları EK-1'de verilen alternatif hammadde olarak kullanılmasına onay verilmiş atık kodları arasında bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu atıkların mevzuat gereği alternatif hammadde olarak kullanılabilmesi için prosesin alternatif hammadde kullanımına uygun olduğunu gösterir kurumsal akademik rapor gerekmektedir. Bu akademik raporla birlikte, 20.06.2014 tarih ve 29036 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak

yürürlüğe giren “Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği” kapsamında atıkların alternatif hammadde olarak kullanılması talepleri için alternatif hammadde kullanımı başvuru formuyla alternatif hammadde kullanacak tesislerin Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’na başvurması gerekmektedir.

Genellikle kalorifik değeri rüzgâr türbin atıkları gibi yüksek olan atıklar ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği’nin EK-3 Tablo 4’ünde ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri Tablo 3.9’da gösterilmektedir.

**TABLO 3.9. ATY Hazırlama Tesislerinde Hazırlanacak Yakıtın Özellikleri**

Parametre	Sınır Değer
Kalorifik değer, kcal/kg	>2500
Tane boyutu, mm	<50 (1)
Nem oranı, %	<35
Klor içeriği, %	<1 (2)
Hg, µg/MJ	<330
Ağır metal toplamı, mg/MJ	<2500
PCB, ppm	<50
Solvent içeriği, %	<15

(1) Tane boyutu parametresi ATY kullanacak tesislerde kullanılan teknolojilerin Bakanlıkça uygun bulunması halinde artırılabilir.

(2) Klor by-pass hattı bulunan tesisler için parametre üç katına kadar Bakanlıkça uygun bulunması halinde artırılabilir.

Rüzgâr türbini kanat atıklarının kalorifik değerinin 6.000 kcal civarında, yoğunluğun 500 kg/m<sup>3</sup>, neminin yaklaşık %1-1,5, klor içeriğinin <%0,5 olduğu belirtilmektedir. Buna göre bakıldığında türbin kanat atıkları çimentoda ek yakıt olarak kullanılabilir. Yatırıma konu yakıt üretim tesisinde atıklar yukarıdaki tablodaki kriterlere göre 50 mm’den daha küçük tane boyutuna getirilecektir.

Tebliğin EK 4’ünde ise ek yakıt kullanacak tesislerin kabul edebileceği atıkların listesi verilmektedir ve türbin kanat atıklarının dahil olduğu 17 02 03 atık kodu bu listede yer almaktadır. Dolayısıyla, bu atıkların çimento tesislerinde ek yakıt olarak kullanılmasının önünde yasal bir engel bulunmamaktadır.

Atıkların ATY tesislerine hazırlanarak çimento endüstrisinde geri kazanılmasına yönelik yatırımı planlanan tesis “38.32-Tasnif edilmiş materyallerin geri kazanımı” faaliyet alanında yer almaktadır. Bu sınıf kapsamında NACE kodu “38.32.02 - Tasnif edilmiş metal dışı atıklar,

hurdalar ve diğer parçaların genellikle mekanik veya kimyasal değişim işlemleri ile geri kazanılması” olarak belirlenmiştir.

Yaklaşık 20 senelik kullanım ömrünü dolduran veya doğa olayları sebebiyle hasara uğrayarak işlevini kaybeden rüzgâr türbini kanatları atık depolama sahalarında depolanmaktadır. Yakıt üretim tesisinde, rüzgâr türbinlerinin ve kompozit malzemelerin kullanım ömrü dolduğunda atık depolama sahalarında depolamak yerine fiziksel geri dönüşüm işlemlerine tabi tutularak geri kazanılması planlanmaktadır. Atık plastikler 3915 GTİP başlığı altında yer almaktadır. Ancak, rüzgâr kanat atıklarının dahil olduğu 17 02 03 atık kodu tehlikesiz atık olan plastik atıkları içermektedir ve 2021 yılı düzenlemesiyle Çevrenin Korunması Yönünden Kontrol Altında Tutulan Atıkların İthalat Denetimi Tebliği EK-2/A’ya göre ithali yasak atıklardandır.

## 3.2. Senaryo 2: Rüzgâr Türbini Kanatlarından Piroliz Yöntemiyle Değerli Ürün Eldesi

Rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için dünyada araştırmaları süren geri dönüşüm teknolojilerinden biri piroliz işlemidir. Bu teknolojinin olgunluk seviyesi TRL 9 düzeyindedir. TRL 9 seviyesi, prototipin gerçek imalat şartlarında geçerliliğinin kanıtlandığını göstermektedir. İzmir ili rüzgâr türbini geri dönüşümü sektörünün gelişimine katkı sağlamak amacı ile hazırlanan bu raporda; ikinci olarak rüzgâr türbin atıklarına piroliz teknolojisinin uygulanması senaryosu ele alınmıştır. Bu çerçevede, ekonomik ve teknik kriterler ile çevre ve mevzuat açılarından ön değerlendirme yapılmıştır.

### 3.2.1. Teknik Değerlendirme

Piroliz, herhangi bir organik (karbon bazlı) ürüne uygulanabilen termokimyasal bir işlemdir. Saf ürünler üzerinde yapılabileceği gibi karışımlar üzerinde de yapılabilmektedir. Bileşeninde bulunan reçine sayesinde türbin kanatları da organik madde sınıfındadır ve piroliz işlemine tabi tutulabilmektedir. Bu işlemde malzeme yüksek sıcaklığa maruz bırakılır ve oksijenin yokluğunda kimyasal ve fiziksel olarak farklı moleküllere ayrılır. Ayrışma, malzemelerin kimyasal bağlarının sınırlı termal kararlılığı sayesinde gerçekleşir ve bu sayede ısı kullanılarak malzemeler parçalanır. Bu termal ayrışma yeni moleküllerin oluşumuna yol açar ve bu yeni moleküller orijinal kalıntıdan farklı, genellikle daha üstün karaktere sahip ürünlerdir. Bu özellik sayesinde, piroliz, ortak malzemelere ve atıklara çok daha fazla değer katması sebebi ile günümüz endüstrisi için giderek daha önemli bir süreç haline gelmektedir.

Piroliz sıklıkla ısıl işlemle (550oC) ilişkilendirilir. Ancak, malzemenin tamamen veya kısmen oksidasyonunu içeren yanma ve gazlaştırma işlemlerinin aksine, piroliz, havanın yokluğunda ısıtmaya dayanır. Piroliz sonucunda katı (karbon siyahı), sıvı ve yoğuşmasız gazlar (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, CO, CO<sub>2</sub> ve N) üretilir. Pirolitik

yağ, pirolitik gazdan yalnızca soğuma sırasında çıkarıldığından, bazı uygulamalarda sıvı ve gaz faz birlikte doğrudan brülöre veya oksidasyon odasına sıcak sentez gazı sağlamak için kullanılmaktadır. Piroliz sırasında, bir malzeme parçacığı ortamda tanımlanan sıcaklığa kadar ısıtılır. Malzeme piroliz ünitesi içerisinde kalır ve proses tamamlanana kadar vidalı konveyör ile belirlenen hızda taşınır. Seçilen piroliz sıcaklığı, ürünlerin (pirolitik yağ, sentez gazı ve karbon siyahı) bileşimini ve verimini tanımlar.

Atık lastik/plastik/kauçuk piroliz tesisleri teknolojileri dünyada geliştirilmekte olup, yapılan Ar-Ge çalışmalarında görüldüğü üzere cam elyaf takviyeli plastikler de piroliz işlemiyle geri dönüştürülebilmektedir. Elde edilecek pirolitik yağ oranının %40-50 arasında olacağı öngörülmekte olup, bu pirolitik yağın kalitesinin endüstriyel ısıtma/yakma için idealdir. Genellikle rüzgâr türbini kanat atıkları çok büyük boyutta olduklarından makineye beslenebilmesi için çapı 1,4 m'den ve uzunluğu 6 m'den küçük olacak şekilde kesilmelidir (Huayin, 2021).

Rüzgâr türbin kanatlarının piroliz işleminden üretilecek ürünlerin öngörülen verim değer aralıkları Tablo 3.10'da verilmektedir (Huayin, 2021).

**TABLO 3.10. Piroliz İşlemi Sonucunda Üretilecek Ürünlerin Ortalama Verimleri**

Ürün Tipi	Verim
Karbon Siyahı	%30-35
Pirolitik Yağ	%40-50
Pirolitik Gaz	%8-10

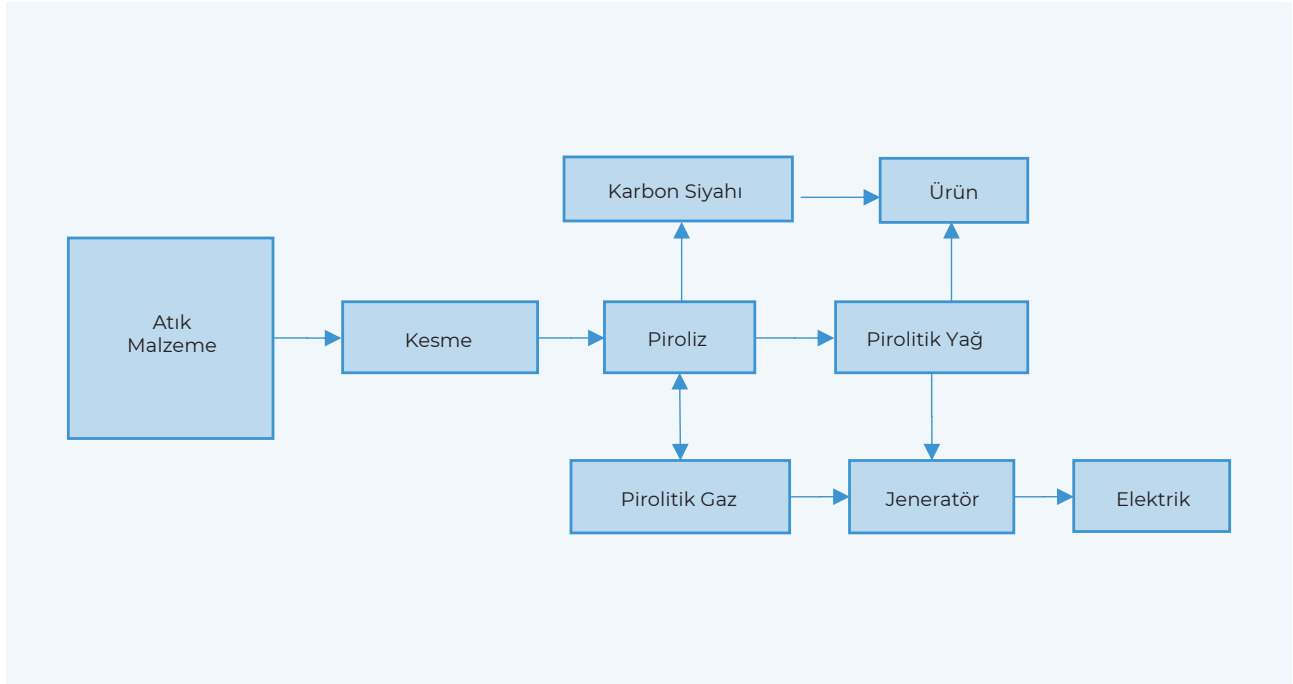


Piroliz işlemini gerçekleştirecek tesis dört ana fonksiyon içermektedir:

- ▶ atık hazırlama,
- ▶ pirolitik yağ üretimi,
- ▶ distilasyon,
- ▶ karbon işleme.

Bu ana ünitelerin dışında prosesten çıkan yağ ve gazı sistemde kullanmak için depolamak üzere yağ ve gaz depolama sistemini de içermektedir (Viollas, 2021). Piroliz işleminin akışşeması Şekil 3.16'da görülmektedir.

**ŞEKİL 3.16. Piroliz Sistemi Genel Proses Akışı**



Piroliz işleminin süreci aşağıdaki maddelerle özetlenebilmektedir (Huayin, 2021). Piroliz tesisinin örnek gösterim şeması Şekil 3.17'de verilmektedir.

- ▶ Kaynak malzeme, birincil reaktif olmayan bir ortamda ısıtılarak ayrıştığı piroliz reaktörüne beslenir.
- ▶ Katı atıklar, reaktöre oksijen girme olasılığını ortadan kaldırarak, güvenli sürekli beslemeyi kontrol eden seviye vericisi ile donatılmış huniden spiral konveyör ile beslenir.
- ▶ Piroliz reaktörü, fırına yerleştirilmiş karma yakıt brülörü tarafından çalışma sıcaklığına ısıtılır.
- ▶ Eşanjör sıcaklığı ayarlanan değere yükseldiğinde bozunma süreci başlar.
- ▶ Çalışma süreci stabil hale geldikten sonra ana brülör kapasitesi düşürülür ve piroliz gazı ile çalışan

gaz brülörü ile ısıtma yapılır.

- ▶ Piroliz reaktöründen petrol gazı yoğunlaştırıcılara gider. Daha sonra eşanjör ile soğutulur. Soğutma maddesi olarak kapalı devrede su kullanılmaktadır.
- ▶ Su, hava soğutucusunda veya soğutucuda soğutulur. Yoğuşturulan su geri dönüştürülebilir.
- ▶ Petrol gazı yoğuşturucuya girer, soğutularak suya dönüştürülür ve yoğuşmamış gaz, ısıtma işlemini sürdürmek için yakıt olarak kullanılarak işlemin performansı artırılır. Bu, işletim maliyetini önemli ölçüde azaltır.

Katı kalıntı, reaktörün alt kısmındaki spiral konveyör ile boşaltılır, burada soğutulur ve oksijen erişimi olmadan alıcı haznelere kaydırılır.

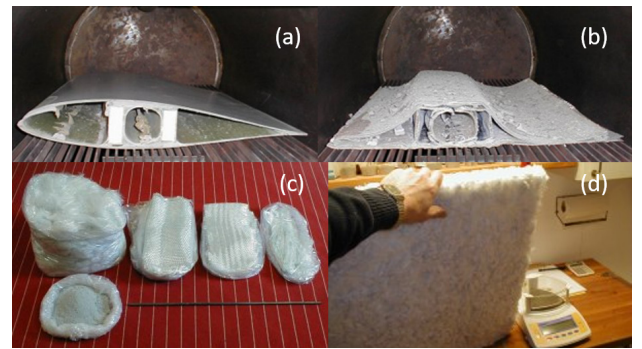
**ŞEKİL 3.17.** Piroлиз Tesisi Örnek Gösterim Şeması

Kaynak: Henan Doing, 2021

Ek olarak, piroliz yöntemi için çeşitli teknolojiler bulunmaktadır. Sistem kesikli (batch) ve sürekli (continuous) prensipte olabilmektedir. Kesikli sistemlerin sürekli sistemlere göre ürün işleme kapasitesi daha düşük olmaktadır. Çalışma kapsamında halihazırda piroliz tesisi olarak faaliyet gösteren firmalarla da iletişime geçilmiştir. Endüstriyel ölçekte faaliyet gösteren tesisler genel olarak ömrünü tamamlamış lastiklerin piroliz yoluyla geri dönüşümü üzerine çalışmaktadır. Öte yandan, görüşmelerde rüzgâr türbini kanadının da piroliz işlemi için uygun olabileceği ancak kesikli reaktör tipinin kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu sayede içeriğindeki elyaflar geri kazanılabilecektir (Era Çevre Teknolojileri, 2021).

Cam elyaf takviyeli kompozitlerin piroliz işlemiyle termo-kimyasal geri dönüşümü gerçekleştirilerek elyaf geri kazanımı sağlanabildiği çeşitli çalışmalarda gösterilmektedir (Naqvi vd., 2018). Bu işlemde, malzeme, 350-750°C arasında değişen sıcaklıkta inert ortam altında, oksijen/hava olmadan ısıtılmaktadır ve kompozit matristen, gaz, biyo-yağ ve katı ürünler (elyaf, dolgu malzemesi ve karbon siyahı) üretilmektedir. Ancak elyaf yüzeyleri karbon ile kontamine olacağından, temiz elyaflar ve dolgu malzemeleri elde edebilmek için piroliz sonrasında bir işlem

yapılması (hava kullanarak oksidasyon) gerekebilmektedir. Rüzgâr türbini kanatlarının piroliz öncesi ve sonrası görünümü ile birlikte elde edilen ürünler aşağıdaki şekilde örnek olarak gösterilmektedir.

**ŞEKİL 3.18.** Rüzgâr Türbini Kanatlarının Piroлиз Öncesi (a) ve Piroлиз Sonrası (b) Görünümü ile Kısa Elyaf/Dolgu Ürünleri (c) ve Yalıtım Malzemesi Ürünü (d) Örnekleri

Kaynak: ReFiber ApS <http://www.refiber.com/technology.html>

Piroлиз işleminin sonucunda yukarıda bahsedildiği gibi pirolitik yağ, karbon siyahı ve pirolitik gaz elde

edilmektedir (Şekil 3.19) (Huayin, 2021) (Joeman, 2019). Bu elde edilen ürünlerin uygulama alanları Tablo 3.11'de verilmektedir.

**TABLO 3.11. Piroлиз İşlemi Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Uygulama Alanları**

Ürün	Uygulama Alanı
Pirolitik Yağ	Elektrik üretmek için ağır petrol jeneratörlerine eklenebilir. Çimento, seramik, cam fabrikalarında, enerji santrallerinde, çelik üretim fabrikasında, kazan fabrikasında vb. yerlerde ısıtma malzemesi olarak kullanılabilir. Daha fazla işlem için yağ arıtma fabrikasına satılabilir.
Karbon Siyahı	Doğrudan kömür briket fabrikasına satılabilir. Yakmak için yakıt olarak karbon siyahı peletleri veya briketler haline getirilebilir. Daha fazla işlenerek boru, kablo kılıfı vb. yapmak için temel malzeme olarak plastik fabrikasına satılabilir. İnşaat sektörüne cüruf olarak satılabilir.
Pirolitik Gaz	Kömür / odun / petrol / doğal gaz yerine reaktör ısıtmak için yakıt olarak fırına geri beslenebilir.

**ŞEKİL 3.19. Piroлиз İşlemi Sonucunda Elde Edilen Ürünler: Pirolitik Yağ ve Karbon Siyahı**



Pyrolysis Oil



Carbon Black

Kaynak: Huayin, 2021

## 3.2.2. Ekonomik Değerlendirme

### 3.2.2.1. Pazar potansiyeli

Piroлиз geri dönüşüm teknolojisinin karbon elyafları için ekonomik olarak uygun olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilse de, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin piyasada kullanım miktarları düşük olduğu için şu anda bu teknoloji büyük ölçekte uygulanmamaktadır. Projeye söz konusu olan büyük boyutlu rüzgâr türbinleri ile, gerekli atık hacmi ve mekanik özelliklere ulaşılarak kompozitlerin kullanımı artacak ve pazar hacmi buna göre büyüyebilecektir. Ayrıca, piroliz işlemi sonucunda üretilen sentez gazı ve pirolitik yağın enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi, piroliz teknolojisinin ölçeğinin kolayca büyütülebilmesi ve karbon fiber kompozitlerin geri dönüştürülmesi için halihazırda çalışmalar bulunması bu teknolojinin avantajları olarak belirtilmektedir (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020).

Cam elyaf takviyeli kompozit pirolizinin büyük ölçekli uygulamasına yönelik girişimlerden biri Danimarkalı ReFiber şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. ReFiber, birçok çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit geri dönüşüm projeleri arasından en gelişmiş proje olarak bahsedilmektedir. Projede, cam elyaf takviyeli kompozit yapılı ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanadı geri dönüştürülerek cam yünü yalıtım malzemesi elde edilmiştir ancak proje mali nedenlerden dolayı 2007'de sona ermiştir. Bunun nedeni, müşterilerinin büyük bir kısmı için düzenli depolama alternatifinin daha ucuz bir seçenek olmasıdır (Larsen, 2009) (Beason & Brøndsted, 2016). Bununla birlikte, değişen politikalar sebebiyle, başta Almanya olmak üzere Avusturya, Hollanda ve Finlandiya cam elyaf takviyeli kompozit gibi malzemelerin depolama sahalarına atılmasını yasaklamıştır. Diğer Avrupa ülkelerinin de hızla benzer kararlar almaları beklenmektedir (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2017) (WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020). Bu politikalar, ömrünü tamamlamış malzemelerin geri dönüşümü için sürdürülebilir bir çözüm geliştirilmesi konusunda itici güç oluşturmaktadır. Piroлиз süreci, cam elyaf takviyeli kompozitin ötesinde, karbon elyaf takviyeli kompoziti geri dönüştürmek için geliştirilmiştir, çünkü cam

elyaf, yüksek sıcaklıklardan ve aşındırıcı kimyasallardan, karbon elyaf takviyeli kompozite göre daha fazla zarar görmektedir. Bu nedenle piroliz yoluyla endüstride karbon elyaf takviyeli kompozit geri dönüşümü için daha fazla sayıda örnek mevcuttur (Oliveux vd., 2015). Bu durum, geçtiğimiz yıllarda artan cam elyaf takviyeli kompozit talebi nedeniyle cam elyaf takviyeli kompozit geri dönüşümü pazarında boşluk bırakmaktadır (Koelega, 2019) ve Ar-Ge çalışmalarının artması gerektiğini göstermektedir.

Pazar talebinin gelişmesi ve süreçten elde edilen ürünlerin artan uygulamaları, pirolizden elde edilen ürünler için olgunlaşmış ve bağımsız bir pazar oluşturma potansiyeline sahiptir.

### 3.2.2.2. Finansal analiz

Piroliz tesisi büyük ölçekli bir atık geri dönüşüm tesisi olarak tasarlanacağı için, maliyetler birçok kalemi içerecektir. Genel olarak maliyeti etkileyen dört temel unsur aşağıdaki gibidir (Beston (Henan) Machinery Co., Ltd., 2021):

- ▶ Yakıt maliyeti: Hemen hemen tüm piroliz tesislerinin yüksek yakıt gereksinimi vardır. Bu nedenle bu tesise yatırım yaparken yakıt maliyetini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Genellikle iyi bir piroliz tesisi enerji tasarrufu sağlamak üzere kurgulanmaktadır. Bunun için üretilen gaz, reaktöre ısı sağlamak için yeniden kullanılarak yakıt maliyetinden tasarruf edilebilmektedir.
- ▶ Temel maliyetler: Elektrik, su, arazi ve işçilik maliyetlerini kapsamaktadır.
- ▶ Diğer maliyetler: Kurulum, onarım ve bakım maliyetleridir. Tesisin büyük ölçekli olması sebebiyle bakımını yapmak için büyük miktarda bütçeye ihtiyaç olabilmektedir. Bu 5-8 yıl arası ömrü olan bu ekipmanların değişimi ve bakım işçi giderlerini kapsayacaktır.

Atık rüzgâr türbin kanatlarının piroliz yöntemiyle geri dönüşümü için aşağıdaki ekonomik değerlendirmeler yapılmıştır:

- ▶ Hollanda'da yürütülen bir çalışmaya göre (Joeman, 2019), piroliz yöntemi ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüştürülmesinde

teknik olarak uygun bir seçenek olarak değerlendirilmesine rağmen, pahalı ve enerji ihtiyacı olan bir prodestir.

- ▶ Kanatların depolama sahalarına atılmasını önleyen, devlet ve özel sektörden gelen finansal teşvik ile uygulanabilir hale gelebilecek bir çözümdür.
- ▶ İlk maliyetler yüksektir. Hollanda'daki bu çalışmada, piroliz işleminin uygulanabilir olması için yaklaşık 350.000 ABD Doları reaktör maliyeti ile 5.000 ton ömrünü tamamlamış kanat gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmaya konu tesiste ise ilk 5 yıl içerisinde yıllık ortalama 10.000 ton atık kabul edilebileceği varsayımı 3.1.2.2 Finansal Analiz bölümünde ifade edilmiştir. Bu durumda, daha büyük kapasiteli piroliz tesisinin yatırımı, tesisin diğer ekipmanları da (kondensör, baca gazı giderici, boşaltma, ısıtma sistemi, hidrolik besleyici ekipmanları vb.) düşünüldüğünde çok daha fazla olacaktır.
- ▶ Teknik değerlendirmede ifade edildiği üzere, kesikli sistemlerin sürekli sistemlere göre maliyeti daha düşük iken, ürün işleme kapasitesi de daha düşük olmaktadır. Rüzgâr türbin kanadı için kesikli reaktörlerin kullanılması durumunda, kapasiteye göre çok sayıda kesikli reaktör ihtiyacı doğabilecektir. Bu da yine maliyeti artıracak bir unsur olacaktır.
- ▶ Son olarak, piroliz tesis için 400 m<sup>2</sup>'lik bir alana ve 3-4 işçi işgücüne ihtiyaç bulunmaktadır (Huayin, 2021).

Öte yandan, piroliz işleminde karbon siyahı, pirolitik yağ ve gaz ürünleri elde edilebilecektir. Pirolitik yağ ve karbon siyahı için büyüyen bir pazar mevcuttur. Pirolitik yağ ve karbon siyahına yönelik artan talebe ve uygulama ürünleri/süreçlerinin artan eğilimine bağlı olarak yatırımın gelecekte karlı olabileceği öngörülmektedir. Tesisten elde edilebilecek gelirlerin değerlendirilmesi ise aşağıda verilmektedir.

- ▶ Türkiye'deki bir tesisin ömrünü tamamlamış lastikleri piroliz işlemine tabi tuttukten sonra açığa çıkan ürünlerin yaklaşık birim satış fiyatları karbon siyahı ve pirolitik yağ için sırasıyla yaklaşık 75 ve 145 ABD Doları/tondur (Demirci, Dere, & Gönüllü, 2014).
- ▶ Rüzgâr türbin kanadının piroliz işleminden elde edilecek ürünlerin yüzde verimleri de teknik değerlendirme bölümünde bahsedildiği üzere kar-

bon siyahı için ortalama %32,5, pirolitik yağ için ortalama %45'tir (Huayin, 2021).

- Buna göre 1 ton türbin kanadı için toplam gelir yaklaşık 105 ABD Doları olarak hesaplanmıştır. 1 adet rüzgâr türbin kanadının ağırlığı ortalama 10 ton olarak düşünülürse, kanat başına gelir 1050 ABD Doları olacaktır. Ancak ömrünü tamamlamış lastik piroliz tesisi ile atık rüzgâr türbin kanadı piroliz tesisinden elde edilecek ürünlerin kalitesi aynı olmayacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda, ürün kalitesinin düşmesi ile birim satış fiyatı da düşebilecektir.

### 3.2.3. Çevresel Değerlendirme

Rüzgâr türbini kanat atıklarının doğrudan çöplüklere ve depolama sahalarına atılmasının önlenmesiyle, atıkların ayrışması sırasında oluşan kimyasal kirleticilerin emisyonu nedeniyle toprağın, suyun ve havanın kirlenmesi engellenebilecektir. Ayrıca piroliz tesisinde yakıt ve karbon siyahı üretimi gerçekleştirildiği için bu malzemeler hammadde olarak kullanılabilir. Yöntem, atıktan yakıt elde edilmesine de olanak sağladığı için petrol yan ürünlerine kıyasla çevreye daha faydalı olduğu düşünülmektedir. Böylece, çevre kirliliğinin önüne geçilmesine, enerji tasarrufuna ve atık miktarının azalmasına katkı sağlanmış olur (Viollas, 2021).

Rüzgâr türbini kanatlarının yakıt üretimi için geri dönüştürülmesi, yeni petrol sahaları arayışını azaltabilecektir. Bunun yanında, hava, biyotik veya abiyotik malzeme tüketiminin olmaması ve suyun sadece soğutmada kullanılmasından dolayı su tüketiminin ihmal edilebilir düzeyde olması çevresel açıdan faydalar arasında sayılabilmektedir. Tesis kendi ürettiği enerji ile beslenmektedir ve bu sayede tesisin enerji ihtiyacını karşılamak için fosil kaynakların tüketimi olmayacaktır. Tüm gazlar, sıvılar ve katılar çevreye yayılmadığı için kısa vadede çevre kirliliği oluşturmayacaktır (Neto & Chaves, 2019).

Birleşik Krallık'ta (Gear v.d., 2018), Hollanda'da (CE Delft, 2020) ve Avrupa'da (Somoza-Tornos v.d., 2020) kimyasal geri dönüşümü değerlendiren çalışmalara göre, piroliz ve diğer kimyasal geri dönüşüm

teknolojilerinin iklim değişikliğine etkisi yakma işleminden (insinerasyon) önemli ölçüde daha düşüktür. Atıkların pirolizinin çevresel etkilerinin, işlem sonucunda açığa çıkan malzemenin değiştirildiği ürüne bağlı olduğu da belirtilmektedir (Gear vd., 2018). Örneğin, Plaxx (plastik atıkların pirolizinden üretilen mumsu hidrokarbon ürünü) mumun yerini alırsa, plastik atıkların pirolizi en düşük iklim değişikliği etkisine, hafif yakıtın yerini alıyorsa en düşük miktarda fosil yakıt tüketilmesine ve ağır yakıt olarak kullanıldığında ise en düşük asitlenme miktarına sahip olduğu görülmüştür.

Piroliz işlemi, ortak ürün olarak çimento fırınlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilen karbon siyahı üretmektedir (BASF, 2019). Çimento endüstrisinde kullanılan ana yakıt linyit, karbon siyahına benzer bir kalorifik değere sahiptir (9,9 MJ/kg) ve bu nedenle üretilen karbon siyahının eşdeğer linyit kütlesinin yerini alacağı varsayılmaktadır (IEA, 2018).

Piroliz işlemi kimyasal geri dönüşüm yöntemlerinden biridir. Kimyasal geri dönüşümün net iklim değişikliğine etkisi, yaklaşık olarak 739 kg CO<sub>2</sub> eq./t değeri ile enerji geri kazanım seçeneklerinden %57-61 daha düşüktür. Diğer sistem katkıları olmadan, kimyasal geri dönüşümün iklim değişikliğine etkisi 1.162 kg CO<sub>2</sub> eq./t'dir. Toplam etkinin üçte ikisi (sistem katkıları dahil olmadan) piroliz işleminden kaynaklanmaktadır; %26'sı atık toplama ve ayırma ile ilgiliyken, kalan %8'i ise pirolitik yağın saflaştırılmasından ortaya çıkmaktadır. Piroliz işlemi sonucunda üretilen pirolitik yağının nafta yerine kullanılması ile sera gazı emisyonu yaklaşık olarak 423 kg CO<sub>2</sub> eq./t azalmaktadır (Harish, Christian, & Manfred, 2021).

Piroliz yoluyla kimyasal geri dönüşümün, türbin kanatlarından enerji geri kazanımına göre yaklaşık %50 daha düşük iklim değişikliği etkisine sahip olduğu belirtilmektedir. Ancak asitlenme ve ötrofikasyon gibi diğer etki kategorilerinin çoğu için enerji geri kazanımı pirolizden daha iyi performans göstermektedir. Benzer şekilde, kimyasal geri dönüşüm ile 1 ton düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) üretiminin iklim değişikliğine etkisinin, işlenmemiş polimer üretiminden %124 daha düşük olduğunu görülmektedir. Geri dönüştürülmüş plastik aynı zamanda daha



düşük bir yaşam döngüsü enerjisi kullanımına, insan sağlığına ve tatlı su ekotoksosite etkilerine sahiptir. Asidifikasyon, ötrofikasyon, fotokimyasal ve ozon oluşumu dahil olmak üzere dikkate alınan diğer etkilerin çoğu, piroliz ve saflaştırma proseslerindeki nispeten yüksek enerji talebi nedeniyle, mekanik geri dönüşümden önemli ölçüde daha yüksektir (Harish, Christian, & Manfred, 2021).

Çeşitli çalışmalardan elde edilen bilgilere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilmektedir (Mehta, 2017; Kulkarni & Shastri, 2019):

- ▶ Piroliz işleminin iklim değişikliği ve tatlı su ekotoksitesi üzerindeki etkileri türbin kanadının depolama sahasına bırakılmasına kıyasla çok daha azdır.
- ▶ Piroliz işlemi sonucu oluşan hammaddeler konvansiyonel yöntemlerle üretildiğinde daha fazla karbon emisyonuna neden olur. Piroliz işlemi bu sebeple de dolaylı olarak iklim değişikliğini önleme konusunda katkı sağlar.

Bu sonuçlar, piroliz işleminin depolama sahası kullanılmasına göre daha az çevresel etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

### 3.2.4. Mevzuat Açısından Değerlendirme

06/10/2010 tarih ve 27721 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik'e göre "yakma tesisi":

- ▶ atık kabul birimi, geçici depolama birimi, ön işlem birimi, atık besleme ve hava besleme sistemleri, kazan, baca gazı arıtım sistemleri, yakma sonucu oluşan kalıntıların düzenli depolanması ve atıkların arıtılması için tesis içinde yer alan birimler, baca, yakma işlemlerini kontrol etmek ve yakma şartlarını izlemek ve kaydetmek için kullanılan ölçüm cihazları ve sistemler de dahil olmak üzere tesiste yer alan bütün birimleri kapsayan,
- ▶ ortaya çıkan yanma ısını geri kazanabilen veya kazanamayan, atıkların oksitlenme yoluyla yakılması, piroliz, gazlaştırma veya plazma işlemleri gibi diğer termal bertaraf işlemleri de dahil olmak üzere termal yolla bertarafına yönelik her türlü sistemi ifade etmektedir.

Aynı Yönetmelik'in 4. maddesinde, piroliz tesisleri yakma tesisi olarak tanımlanmış ve 5. maddede atıkların yakılmasına ilişkin genel kurallar düzenlenmiştir.

- ▶ Yakma veya beraber yakma işlemi uygulanmadan önce atığın tehlikeli atık olup olmadığı, atık içerisinde radyoaktif madde bulunup bulunmadığı kontrol edilir. Tehlikeli ve tehlikesiz atıkların yakılmasına veya beraber yakılmasına dair emisyon limit değerleri uygulanır.
- ▶ Yakma ve beraber yakma işlemi uygulanırken açığa çıkan ısının, elektrik enerjisine dönüştürme, üretim sürecinde kullanma ya da bölgesel ısıtmada kullanma gibi yöntemlerle geri kazanılması gereklidir.
- ▶ Yakma ve beraber yakma tesisleri, atık kabul ünitesi, laboratuvar, geçici depolama alanları ve atık besleme sistemine sahip olmak zorundadır.
- ▶ Kazalara karşı acil durum ve müdahale planları hazırlanması, yeterli sayıda ve nitelikte eğitilmiş personel ve ekipman bulundurulması gereklidir.
- ▶ Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik'in 10. maddesine göre atığın taşınması, bu iş için lisans almış kişi ve kuruluşlarca atığın özelliğine uygun araçlarla yapılması ve taşıma sırasında ulusal atık taşıma formlarının kullanılması zorunludur.
- ▶ Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik'in 9. maddesine göre tesislerden kaynaklanan cüruf ve baca gazı parçacıklarının ayrı ayrı toplanması ve bertarafının lisans almış tesislerde çevreye duyarlı bir şekilde sağlanması zorunludur.
- ▶ Başvuruda ölçüm teknikleri baca gazı emisyonları için Ek-3'e, su kirlleticileri için Ek-3'ün birinci ve ikinci paragrafına uygun olmalıdır.
- ▶ Bir yakma veya beraber yakma tesisine lisans alınabilmesi için, 31/12/2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 3/7/2009 tarihli ve 27277 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, 8/6/2010 tarihli ve 27605 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik ve 26/11/2005 tarihli ve 26005 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği (76/464/AB) içerisinde

belirtilen ve aşağıda verilen kurallara uyulması zorunludur.

- a. Tesis yetkilisi tarafından yakma işlemi uygulanacak atıkların kategorileri ve yakıldıklarında ortama verilecek emisyon parametreleri açık bir biçimde listelenir ve bu liste Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmeliğin Ek II-A'sında bulunan atık kategorileri ve kodları ile atığın miktarına ilişkin bilgileri de içermektedir.
- b. Tesisin toplam atık yakma veya beraber yakma kapasitesi belirtilmelidir.
- c. Hava ve su kirletici parametrelerin periyodik ölçümleri yapılmalı, bunun için kullanılan örnekleme ve ölçüm teknikleri belirtilmeli ve her parametre için teorik hesaplamalar yapılmalıdır.
- d. Atıkların yakılması veya beraber yakılması işleminde asgari ve azami kütle akışı, en düşük ve en yüksek kalorifik değerleri ile birlikte, bu atıklardaki PCB, PCP, klor, flor, kükürt, ağır metaller gibi kirleticilerin, azami miktarı belirtilmelidir.

## BÖLÜM 4.

# Yenilikçi Fikirler ve İleriye Dönük Ar-Ge İhtiyaçları

Rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümünün sağlanmasına yönelik kısa vadede en uygulanabilir çözüm olarak bu atıkların bir yakıt üretim tesisinde işlenerek çimentoda ek yakıt olarak kullanılması alternatifi öne çıkmıştır. Ek olarak, rüzgâr türbinleri için en yaygın araştırılan teknolojinin piroliz yöntemi olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, çalışmada bu iki senaryo ele alınarak, teknik, ekonomik, çevresel ve mevzuatsal açıdan incelenmiştir.

Öte yandan, bu senaryoların ötesinde de gerçekleştirilebilecek faaliyetler bulunduğu düşünülmektedir. Bu doğrultuda 2 odak grup toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu toplantılar, bugüne kadar yapılan araştırma ve görüşmelerden yola çıkarak tespit edilen mevcut ihtiyaçlara göre odaklandırılmıştır.

- Yenilikçi fikirler geliştirilmesine olan ihtiyaç
- Ar-Ge çalışmalarına olan ihtiyaç

## 4.1. Yenilikçi Fikirler

Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümü uygulamalarından bir tanesi de kanatların şehir mobilyası veya şehirde görsel tasarım unsurları olarak kullanımı olduğu daha önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Bu gibi yenilikçi fikirler bölgesel ölçekte bir geri dönüşüm çözümü olmasa da, uygulamaların İzmir'in "Rüzgârın Başkenti" kimliğini güçlendireceği ve kentin yaratıcı endüstriler alanındaki gelişim eğilimi ile bütünleşeceği düşünülmektedir. Çalışma kapsamında, İzmir Kalkınma Ajansı, rüzgâr türbin üreticileri, enerji yatırımcıları, İzmir Büyükşehir Belediyesi yetkilileri ve tasarımcılardan oluşan katılımcılarla rüzgâr türbini

kanatlarının parklarda ve kamusal alanlarda şehir mobilyaları olarak kullanımının, konuyla ilgili fırsatlar ve işbirliği olasılıklarının tartışıldığı ülkemizdeki ilk odak grup toplantılarından birisi gerçekleştirilmiştir. Yapılan görüşmeler ve toplantılar tüm paydaşların yenilikçi fikirlere istekliliğini ortaya koymuştur. Amaç, kullanım dışı kanatların yenilikçi fikirlerle tasarım unsurlarına ya da bank, aydınlatma direği, oyun parkı gibi şehir mobilyalarına dönüştürülebilmesidir. Bu uygulamalara örnekler aşağıda gösterilmektedir (Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.). Bu odak grup toplantısı görüşlerinden çıkarılan fırsat ve engeller aşağıda ifade edilmektedir.

### ŞEKİL 4.1. Cam Elyaf Malzemeden Yapılmış Tasarım Örnekleri



Kaynak: Serpentine Galleries, 2020.

### ŞEKİL 4.2. Atık Rüzgâr Türbin Kanatlarından Yapılan Fonksiyonel Şehir Mobilyaları Örnekleri



Kaynak: WindEurope; Cefic; EuCIA, 2020 ve Superuse Studios, 2021.

## Fırsatlar:

- ▶ İnşa edilecek yapının tasarımı için bir yarışma düzenlenebileceği veya İzmir'deki mimarlar odası gibi kurumların da katkılarıyla uygulanabilirlik konusunda fikir alınabileceği düşünülmüştür.
- ▶ Şehrin gözde yerlerinde yerel yönetimler öncülüğünde tasarımlar yapılabileceği ifade edilmektedir.
- ▶ Sokak mobilyası olarak parkta, bahçede kullanılması dışında anıtlar, heykeller vb. yapıların inşasında da kullanılabilirliği tartışılmıştır. Sosyal içerikli, engelli vatandaşlara yönelik farklı tasarımlar da ortaya çıkarılabileceği düşünülmüştür.
- ▶ Aynı zamanda bütün bir yapının sadece kanadı içermesi yerine ara eleman olarak kullanılabilme potansiyeli de vardır. Ara eleman olarak kullanımı sürdürülebilirliği de sağladığı için daha iyi bir tercih olarak görülmektedir.
- ▶ Ek olarak, kanatların büyük kütleler halinde kullanılmasının yanı sıra, granül haline getirilerek tekne gibi küçük ebatlı araçların üretiminde kullanılabilmesi fikri tartışılmıştır. Işıklı pano yapımında CTP malzeme kullanıldığı düşünüldüğünde, türbin kanadının da şehirde ışıklı pano olarak kullanılması uygun olabileceği ifade edilmektedir.
- ▶ Yurtdışında da örnekleri olan pavyon olarak kullanımlar gibi farklı tasarım fikirleri bulunmaktadır. Deneyim tasarımı yoluyla, yani deneme-yanılma çalışmalarıyla, çok farklı tasarım yapılar elde edilebileceği ifade edilmektedir. Rüzgâr türbin kanadı işlenmesi zor bir malzeme olduğu için çalışma aşamalarının kayıt altına alınması, ileride bu malzeme ile gerçekleştirilebilecek tasarımlar için kılavuz oluşturulması ihtiyacı bulunmaktadır. Örnekleri verilen yenilikçi fikirlerin hayata geçirilebilmesi için tasarımcılar, mühendisler, kesme/şekil verme işlemleri için operatörler gibi farklı alanlardan ekiplerin birlikte çalışması gerekmektedir.
- ▶ Şehir mobilyalarında fonksiyonel tasarımlar dikkat çekmektedir. Bu nedenle, yapılacak tasarım ile kullanım dışı rüzgâr türbin kanadına bir fonksiyon yüklenmesi faydalı olacaktır.
- ▶ Türbin kanat atıklarının karayollarında yol kenarlarında bulunan, plastik malzemedен yapılan rüzgâr, gürültü veya kar perdesi olarak kullanılması da bir seçenektir. Şekil vermeden sadece keserek işlem yapılacağı için pratik bir uygulama olacaktır.

## Engeller:

- ▶ Ağırlığı 10-15 ton, uzunluğu 20 ila 80 metre arasında değişen boyutları nedeniyle kanatların daha küçük boyutlara indirgenmesi veya inşa edilecek şehir mobilyasına göre birden fazla kanadın kullanılması gerekebilmektedir, bu işlemler de maliyeti artıracaktır.
- ▶ Şehir mobilyası olarak kullanım sadece kısıtlı sayıda türbin kanadı için yapılabilecektir. Sürdürülebilir olarak görülmemektedir ancak farkındalık ve bilinç yaratma amaçlanmaktadır.
- ▶ Ayrıca, üretici firmaların kendi ürettikleri kanatları firma içi gizlilik suretiyle sokakta sergilemek isteyip istemedikleri tartışma konusu olabilecektir.
- ▶ Uygulamanın tasarımı ve işlevi dışındaki bir diğer önemli konu ise kanadın içeriğidir. Şehir mobilyası olarak kullanımında bu materyalle halk birebir temas geçtiği için yanıcı olmayan, insan sağlığına zarar vermeyen, darbeye karşı dirençli bir malzeme olması gerekmektedir. Türbin kanadının içeriğinde bulunan cam elyafa uzun süre temas edildiğinde bu malzemenin insan derisine etki edebildiği ifade edilmektedir, bu yüzden kanadın boyanması veya kaplanması gerekebilmektedir.
- ▶ Toplum güvenliği açısından üretici firmaların rol üstlenmesi daha yararlı olacaktır. Kanadın malzeme kompozisyonunu bilmek bu yüzden fonksiyondan daha önemli bir mevzudur. Şehir mobilyası olarak kullanımında kanadın sürdürülebilir bir şekilde yapı ve malzeme döngüsüne katılabilmesi için fonksiyon seçimi malzeme kompozisyonuna göre belirlenmelidir.



## 4.2. Ar-Ge Çalışmaları

Dünyada ve özellikle Avrupa'da türbin kanatlarının ekonomiye kazandırılması konusunda süren Ar-Ge faaliyetlerini iki ana başlık altında özetlemek mümkündür: Bunlar (i) mevcut kanat atıklarının geri dönüştürülerek farklı endüstrilerde kullanımı ve (ii) geri dönüştürülebilir kanat üretimidir. Pek çok paydaş tarafından da dile getirildiği gibi, konunun Ar-Ge boyutu ile ele alınması gerekliliği doğmuş ve bu nedenle Türkiye'deki Ar-Ge altyapısının, yöntemlerinin, konuyla ilgili fırsatlar ve işbirliği olasılıklarının tartışıldığı, araştırma kurumları ve geri dönüşüm sektörünün bir araya getirildiği ikinci bir odak grup toplantısı gerçekleştirilmiştir. Hem mevcut türbin kanat atıklarının farklı endüstrilerde kullanım olanakları hem de yeni nesil geri dönüştürülebilir malzemelerden üretilme potansiyeli bulunan türbin kanatlarına yönelik Ar-Ge konularının mercek altına alındığı bu odak grup toplantısında tartışılan fırsat ve engeller aşağıda liste halinde verilmektedir.

### Fırsatlar:

- ▶ Termoset olarak ifade edilen rüzgâr türbin kanatlarının belirli parçaları için yakın gelecekte termoplastik malzemelere ve bunların geri dönüşümü üzerine yönelineceği ve atığın minimum seviyede tutulmasının ön planda olacağı ifade edilmektedir. Üretilen malzeme tekrar rüzgâr sektöründe kullanılamasa bile otomotiv gibi diğer sektörlerdeki uygulamalarda kullanılabileceği düşünülmektedir. Kısa elyafların kullanıldığı, mukavemetin çok yüksek olmadığı lastik sektörü bu uygulamalara örnek olarak verilebilmektedir.
- ▶ Yurtdışında, havacılık sektöründe karbon elyaf geri dönüştürülüp istenilen boyutlara getirilerek satışı yapılmaktadır, bu işlemin maliyeti uygundur ve bu yöntemin ülkemizde de uygulanabileceği belirtilmektedir. Kanat geri dönüşümünde cam elyaf, havacılık sektöründe geri dönüşümde ise karbon elyaf açığa çıkmaktadır. Bu nedenle havacılık sektörüyle ortaklık kurulabileceği düşünülmektedir.
- ▶ İlk çözüm yolu olarak kanadın küçük boyutlara indirgenmesi gereklidir. Su jeti gibi yöntemler kullanılarak kanadın boyutu indirgenip, kanat dolgu malzemesi olarak kullanılabilecektir. Paydaşlardan biri büyük hacimli atıkların yeni ürünlerde kullanımını çalışmıştır. Mukavemet ve boyut sebebiyle normal parçalama prosesiyle bunun mümkün olmadığı anlaşılmış, su jeti yöntemiyle 1 cm'den daha küçük boyutlara, toz haline getirilebildiği görülmüştür. İspanyol bir firmanın kurduğu su jeti teknolojisinin termoset malzemelere de uygulanabileceği düşünülmektedir. Firmanın uyguladığı su jeti teknolojisi traktör lastikleri dahil bir çok malzemeyi parçalayabilmektedir.
- ▶ İçeriğinde yüksek miktarda cam elyaf malzeme olduğu için cam elyafın ayrıştırılıp kullanılması düşünülebilir fakat ayrıştırılmadan dolgu malzemesi olarak kullanılması daha uygulanabilir gözükmektedir.
- ▶ Rüzgâr türbin kanat atık malzemelerinin inşaat sektöründe de kullanılabileceği ifade edilmektedir. Burada önemli olan faktör, indirgenen parça boyutudur. İnşaat malzemesi olarak kullanımında kısa lifler tercih edilmektedir. Cam elyaf malzemesinin maliyeti yüksek olduğu için asfalt malzemesi olarak tercih edilmese de üretilen asfaltın performansını geliştirme potansiyeli bulunmaktadır.
- ▶ Atığın beton içerisinde, geogrid, geomembran denilen boşluklu bir yapının uygulandığı istinat duvarlarında kullanımı potansiyeli olabileceği, geoteknik açıdan bakıldığında kullanımının uygun görüldüğü ifade edilmektedir.
- ▶ Rüzgâr türbin kanatlarının lazerle kesim işlemleri gerçekleştirilerek araba tamponu gibi fonksiyonlarda kullanılması da bir diğer seçenektir. Araçlar için tampon olarak kullanılabilmesi için malzemenin basınç ve sıcaklıkta şekil değiştirilebilirliğine bakılmalıdır.

- ▶ Türkiye’de bu konu yaygınlaşmaya başladığı için, TÜBİTAK çağrı eksenlerinden bir tanesinin rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü üzerine odaklanabileceği düşünülmektedir.
- ▶ Avrupa’da da güncel bir konu olduğu için rüzgâr sektöründe geri dönüşüme yönelmek ve politikaları bu yönde geliştirmek önemli olarak görülmektedir. Bu konuda ajansların da katkıda bulunabileceği, Ar-Ge çözümlerini gündeme getirebilecekleri düşünülmektedir.
- ▶ Markalar yeni üretilecek kanatların %50’sinin geri dönüştürülmesi için çalışmalar yapmaktadır ve markaların Türkiye’deki tesisleri bu konuda bilgi altyapısına sahiptir. Avrupa’da kanat atıklarının artık gömülememesi sebebiyle markaların merkez tesisleri Ar-Ge faaliyetlerine öncelik vermektedir. Öncül çalışmaların Türkiye’de de yapılması gerektiği vurgulanmaktadır.
- ▶ Döngüsel ekonomi yaklaşımına göre en iyi çözüm, ürünün geri dönüşümünün mümkün olacağı şekilde üretilmesidir. Siemens Gamesa 2021 yılı Eylül ayında basına duyurduğu “RecycleableBlade” teknolojisi ile dünyanın açık denizde ticari kullanıma hazır ilk geri dönüştürülebilir rüzgâr türbini kanatlarını ürettiğini duyurmuştur. EDF Renewables ile yaptıkları işbirliği ile geliştirilen bu teknoloji sayesinde kullanım ömrünün sonunda kanatlarda kullanılan malzemelerin reçinelerden ayrıştırılması mümkün olmaktadır. Siemens Gamesa bu haber ile 2040 yılında tamamen geri dönüştürülebilir kanat üretme hedefini de açıklamıştır. (Siemens Gamesa 2021).

#### ŞEKİL 4.3. Siemens Gamesa tarafından üretilen RecycleableBlades



Kaynak: Renew Economy (2021)

- ▶ Farklı sektörlerdeki Ar-Ge çalışmalarını örnek olarak, ahşap atıklarını kullanarak ahşap temelli plastik kompozit ürünler üretilmiştir ve mobilyalarda kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Poliüretan yataklar vb. büyük hacimli atıklar da toplanıp geri dönüştürülebilmektedir.
- ▶ Termosetlerin geri dönüşümü konusunda ilgili dernekler, sanayi kuruluşları, kanat üreticileri, bakanlık ve üniversitelerle bir araya gelip tartışma ortamı oluşturulması gerektiği düşünülmektedir.
- ▶ Aynı zamanda güneş panelleri de kompozit malzemedir ve atık olarak çıkan güneş panellerinin yönetimi de sorun oluşturmaya başlamıştır. Bu açıdan bakıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarında geri dönüşüm konulu Horizon Europe gibi destek çağrılarına yönelik bir proje yapılabileceği ifade edilmektedir.

#### Engeller:

- ▶ Kanat içeriğinde bulunan termoset malzemeler kolaylıkla geri dönüştürülemez. Termosetlerin geri dönüştürülmesi üzerine araştırmalar mevcuttur ancak teknik ve ekonomik uygulanabilirliği tartışmalıdır.
- ▶ Atığın aşındırıcı olabileceği göz önüne alınarak, geri dönüşüm teknolojilerinden piroliz işleminin uygulanabilirliğinin araştırılması ihtiyacı bulunmaktadır. Kontrollü piroliz işlemi kullanılarak ön çalışma gerçekleştirilmesi gerekmektedir, burada uçucu maddeler serbest bırakılıp katılar sabitleştirilmektedir.
- ▶ Kanat atıklarından cam elyafların elde edilmesi hedeflendiğinde, liflerin reçineden ayrılmasının ciddi bir problem olması engel teşkil etmektedir.
- ▶ Atığın asfaltın performansını geliştirme potansiyeli bulunduğu için asfaltta kullanımı bir fırsat olarak değerlendirilmektedir ancak asfalt üretimi için 1x1 cm boyutlarına indirgenmiş agregalar gerekmektedir.
- ▶ Gerçekleştirilen bir çalışmada, maliyetli olduğu için atığın kendisine geri dönüştürülemediği, aynı zamanda kanat kırılıp küçük boyutlara indirgenmiş ise geri birleştirirken tekrar kullanılan reçinenin fazla maliyet oluşturduğu ifade edilmektedir. Palet yapılmaya çalışılan bir çalışmada ise kanadın

içeriğinden dolayı paletin çok ağır olduğu belirtilmektedir. Bu nedenlerle, geri dönüşümünden ziyade yeniden kullanımının değerlendirilmesinin kısa vadede çözüm olacağı da ifade edilen fikirler arasındadır.

- ▶ Araştırma kurumlarında atıklarla yapılan çalışmalarda atık bulmanın zor olduğu, farklı ülkelerden atık malzemeler getirildiği ancak bu durumda da zorluklarla karşılaşıldığı ifade edilmektedir.
- ▶ Türkiye’de geri dönüşüm politikası geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Türkiye termoplastik sektöründe Dünya’da 7., Avrupa’da 2. sırada olmasına rağmen üretimin çevre dostu şartlarda yapılmadığı söylenmektedir. Avrupa’da belli bir miktarda geri dönüşüm zorunluluğu olduğu için kuruluşlar ek firmalar kurup bu işlemi gerçekleştirmektedir. Maliyet yüksektir fakat çevre söz konusu olduğu için bu şekilde politikaları bulunmaktadır.
- ▶ Türkiye’de termoplastik ve termoset üretiminde geri dönüştürülmüş malzeme kullanma zorunluluğu yoktur ve hatta geri dönüştürülmüş malzeme kullanılması tercih edilmemektedir. Yapıcı politikalarla firmalar yönlendirilirse yurtdışından hammadde getirmeye ihtiyaç kalmayacaktır. Ayrıca, plastik poşet ve lastik sektörlerinde geri dönüşümde üretici sorumluluğu vardır ve kanat üreticilerinin de bu sorumluluğu alması gerektiği düşünülmektedir. Kalkınma ajansları, TÜBİTAK gibi kurumların Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile bu konuda işbirliği gerçekleştirmesi gerektiği ifade edilmektedir.
- ▶ Termoset yerine termoplastik kullanımı için uzun süreli Ar-Ge çalışmaları gerekmektedir ancak bu Ar-Ge faaliyetleri için de büyük bütçeler gereklidir. Dolayısıyla, belediyeler, geri dönüşüm sektörü, sanayi kuruluşları ve üniversitelerin birlikte hareket etmesi gerektiği ifade edilmektedir.
- ▶ Ar-Ge konusunda fiziksel altyapının yeterli olup olmadığı araştırılmalıdır. Örneğin, karayolları sektöründe laboratuvar altyapısının yeterli olmadığı belirtilmektedir. Ar-Ge projeleri yapılması, laboratuvar altyapıları geliştirilmesi ve gerekirse bu konuda kamu ortaklığı tercih edilmesi gerektiği belirtilmektedir.
- ▶ Geri dönüşüm üzerine üretim tarafında da Ar-Ge çalışması ihtiyacı bulunmaktadır ve tamamı geri dönüştürülebilir rüzgâr kanadı üretimi üzerine çalışılması gerekmektedir.
- ▶ Rüzgâr türbin kanadı üreticileri uzun vadede problemin temelini inebilecek şekilde “geri dönüştürülemeyen” türbin kanatlarının üretimini sınırlandırarak “geri dönüştürülebilir” kanatlara yönelik Ar-Ge çalışmalarına hız vermiştir. Bu çerçevede araştırılan ve test edilen teknolojiler kompozit sektörünün geldiği en son nokta olarak ifade edilmektedir. Siemens Gamesa, Vestas, LM Wind Power, Nordex, Enercon gibi küresel firmalar geri dönüşebilir kanat üretimi, kanatların geri dönüşümü ve cam elyaf takviyeli plastik malzemelerin geri dönüşümü konusunda Ar-Ge yatırımları/çalışmaları ile dünyada bu alanda önemli bir know-how geliştirmişlerdir. Firmalar bu alanda dünya’nın önde gelen araştırma kurumları ile ortaklıklar kurmakta ve pek çok yeni proje üzerinde çalışmaktadır.
- ▶ Bu çalışmalara paralel olarak, temiz enerji alanında ülkemizin ve İzmir’in küresel ölçekte bir merkez haline gelebilmesi ve Türkiye’deki üniversite ve araştırma kurumlarının türbin kanadı üreticilerine bu konularda uzmanlık desteği sağlayabilmeleri için ulusal bazda bir Ar-Ge kapasitesinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- ▶ Ar-Ge çalışmaları ve ilgili yatırımlar uzun vadede geri dönüşü olacak yatırımlardır. Geri dönüştürülebilir cam elyaf takviyeli plastiklerin üretimi konusunda ihtiyaç duyulan Ar-Ge yatırımlarını ekonomik gücü yüksek küresel ölçekli firmalar dışında yerli ve daha küçük ölçekli firmaların yapması çok olağan değildir. Bu nedenle türbin kanadı geri dönüşümü konusunda yerli teknik/teknolojilere ulaşmak oldukça güçtür.
- ▶ Yukarıda sunulan durumlar ile de bağlantılı olarak geri dönüştürülebilir cam elyaf takviyeli plastik malzemelerin üretimi konusunda uluslararası gelişmeleri yakalayabilmek için Türkiye araştırma kurumlarının çok uluslu Ar-Ge programlarında (Ör: Ufuk Avrupa) yer alması gerekmektedir.

BÖLÜM 5.

# Rüzgar Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası

---

## 5.1. Paydaşlar ve Olası Roller

Rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümüne etkin bir çözüm bulmak için rüzgâr enerjisi değer zinciri ile ilgili diğer sektörler arasında bir sinerji geliştirilmelidir. Ülkemizde rüzgâr sanayii ve geri dönüşüm için sinerji yaratılabilecek diğer sektörlerden önemli aktörler faaliyet alanlarına göre aşağıdaki kategorilerde listelenmiştir:

- ▶ Kanat Üretim Tesisleri
- ▶ Türbin Komponent/Hammadde Üreticileri
- ▶ Türbin Üreticileri
- ▶ Diğer Sektör Üreticileri
- ▶ Atık Yönetim Firmaları/Kurumları
- ▶ Çimento Tesisleri
- ▶ Kırıcı Ekipman Firmaları
- ▶ Ar-Ge/Tasarım Kuruluşları
- ▶ Teşvik Kurumları

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen paydaş gruplarından 41 kurum/kuruluş ile yapılandırılmış görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Bu görüşmeler çerçevesinde ilgili paydaş gruplarının uzmanlık alanlarını, ihtiyaçlarını, işbirliği potansiyellerini ortaya koymak ve sektörel bilgi/veri edinmek amacıyla değerlendirmeler yapılmıştır. Görüşmelerden elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

### Kanat Üretim Tesisleri

- ▶ Kanat üretim tesislerinin satıştan sonra kanatların atık olarak çıkmasıyla ilgili sorumlulukları bulunmamaktadır ancak üretim esnasında oluşan atıklar (kontamine olmuş cam elyaf atıkları vb.) ve üretim firesi olarak nitelenen standart dışı kanatlar bulunmaktadır. Kompozit üretim aşamasına gelene kadar hammadde olarak kaybedilen atıklar toplamın yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Bu atıkların miktarı yılda 1.500 tona ulaşabilmektedir.
- ▶ Kalorifik değeri düşük cam ve karbon elyaf atıklarının toplam atık miktarına oranının %25'ten az olduğu görülmektedir. Atıkların %80'ine yakınının ise kalorifik değeri yüksek reçineler ile kontamine

olmuş malzemeler olduğu belirtilmektedir. Üretim firesi olarak da ifade edilen standart dışı kanatlar ise toplam atık içerisinde %1-2 seviyelerindedir.

- ▶ Kanat üretim tesisleri sorumluluklarında olan atıkları (üretim atıkları ve üretim firesi) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nca belirlenmiş ilgili atık kodu üzerinden atık yönetim şirketleri aracılığıyla bertaraf ettirmektedir. Atıklar genellikle düzenli depolama sahalarına gönderilmektedir. Kanat üretim tesisleri, bu atıkların bertarafı için gerekli maliyetleri üstlenmektedir.
- ▶ Ülkemizde kanat üretim tesisleri reçine ile kontamine olmuş cam elyafı ayırıştırarak ve katma değerli ürün elde edebilmek için Ar-Ge çalışmaları yapsa da, ticari boyutta hayata geçirilebilen bir uygulama bulunmamaktadır.

### Türbin Komponent/Hammadde Üreticileri

- ▶ Türbin komponent üreticilerinden de yapısal elemanlar vb. reçine ile kontamine olmuş kompozit cam elyaf atıkları çıkmaktadır. Üretilen ürün gruplarına bağlı olarak değişmekle birlikte kimi zaman bu atıkların toplam hammaddeye oranla %20 seviyelerinde ortaya çıktığı hesaplanmıştır.
- ▶ Bu atıklar anlaşmalı atık yönetim firmaları aracılığı ile bertaraf edilmektedir. Daha sonra nihai olarak düzenli depolama sahalarına veya çimento fabrika fırınlarına gönderilmektedir.

### Türbin Üreticileri

- ▶ Yıldırım vb. sebeplerle hasar görmüş bir kanat tespit edildiğinde kanatlar yere indirilip, anlaşmalı firma ile bu kanatların kesim işlemi gerçekleştirilmekte ve bertaraf tesislerine gönderilmektedir. Bu kesim işlemi dilimleme veya kaba parçalama olarak tanımlanmaktadır.
- ▶ Nihai olarak çimento tesislerinde yakıldığı belirtilmekle beraber atık olarak sahalarda bekleyen kanatlar olduğu bilinmektedir. Türbin üreticisi ile



enerji yatırımcısının arasındaki antlaşmaya bağlı olarak iki taraftan biri üretim kaynaklı oluşan kanat atıklarının bertarafı için maliyet üstlenmektedir. Bu maliyet kanat başına yaklaşık bertaraf ve nakliye dahil 15 bin TL'yi bulabilmektedir.

- ▶ Türbin atıklarının geri dönüşümü için çeşitli Ar-Ge faaliyetleri yürütülmekte olup, bu atıkları küçük boyutlara indirgeyebilen yeterince güçlü kırıcı ekipmanların bulunmaması ve geri dönüşüm tesisi yatırımlarının yüksek maliyetli olması sebebiyle, Türkiye'de ticari boyutta hayata geçirilebilen bir uygulama bulunmamaktadır.

### Enerji Yatırımcıları

- ▶ Rüzgâr türbinleri üreticilerden satın alındıktan sonra, çıkan kanat atıklarının sorumluluğu genelde enerji yatırımcılarına ait olmaktadır.
- ▶ Yatırımcılar genellikle türbin atıkları için üreticilerle veya atık yönetim firmalarıyla anlaşma sağlamak ve bertarafı için gerekli maliyeti üstlenmektedir.
- ▶ Ülkemizde mevcut durumda rüzgâr santrallerinde yılda yaklaşık 10-12 adet kanat doğa olayları veya diğer teknik sorunlar sebebiyle hasar görerek atık haline gelmektedir.

### Diğer Sektör Üreticileri

- ▶ Diğer sektör üreticileri kategorisinde, kompozit hammadde üreticileri, boru üreticileri, su kaydıracağı üreticileri vb. farklı sektörlerden kuruluşlar yer almaktadır.
- ▶ Bu sektörlerde de, üretim atıkları ve firelerden kaynaklanan reçineli elyaf atıklarının geri dönüşümü yapılamamaktadır.
- ▶ Yalnızca su kaydıracağı üretimi süreçlerinden yıllık yaklaşık 7.000 ton CTP atığı oluşmaktadır. Genel olarak ise Türkiye'de yılda yaklaşık 12.500 ton CTP atığının oluştuğu düşünülmektedir. Kalorifik değerlerinin yüksek olduğu bilinmekle birlikte, parçalanmasının zorluğu sebebiyle, CTP kompozit atıkları genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir.

### Atık Yönetim Firmaları/Kurumları

- ▶ Atık yönetimi firmaları kompozit atıklarının kırılmalarının ve parçalanmalarının zorluğu sebebiyle geri dönüşüm uygulaması gerçekleştirememektedir.
- ▶ Daha önce yapılan denemelerde tesislerin kırıcılarının bu atıkları kırmakta zorlandığı ve türbin atıklarının kırıcılarda hasara neden olduğu görülmüştür.
- ▶ Bu atığı üretenler atık yönetimi için maliyet üstlenmektedir. Atık yönetim tesisleri de düzenli depolama ve çimento tesislerinde bertaraf etme yöntemlerine başvurmaktadır.

### Çimento Tesisleri

- ▶ Atık yönetim firmaları, çalıştıkları üreticilerden aldıkları türbin üretim atıklarını çimento tesislerine ve düzenli depolama sahalarına gönderebilmektedir.
- ▶ Atıklar silis oranı yüksek olduğu durumlarda çimento tesislerinde alternatif hammadde olarak değerlendirilebilmekte, ancak genellikle kalorifik değeri türbin atıkları gibi yüksek olan (>2500 kcal) atıklar ek yakıt olarak kullanılmaktadır.
- ▶ Çimento tesisleri, ısı kapasitesi yüksek (en az 2.500 kcal/kg), nemi %5'ten az ve klor miktarı düşük (%1'den az) atıkları ek yakıt olarak değerlendirebilmektedir. Türbin atıklarının kalorifik değerinin 6.000 kcal/kg civarında, neminin yaklaşık %1-1,5, klor içeriğinin ise <%0,5 olduğu belirtilmektedir. Türbin atıklarının içeriğindeki reçine sebebiyle kalorifik değerinin yüksek olduğu bilinmektedir.
- ▶ Çimento tesisleri türbin atıkları ile denemeler yapmaktadır, ancak atıklar kırma zorluğu sebebiyle sürdürülebilir olarak değerlendirilememektedir. Proses kapasite kaybına ve kırıcı bıçaklarının yenilenme ihtiyacı gibi önemli işletme maliyetlerine neden olmaktadır. Zaman zaman bu işlemlerde kırıcı kapasitesi yarıya düşmekte ve kırma maliyeti 2 katından daha fazlasına çıkmaktadır.

## Kırıcı Ekipman Firmaları

- ▶ Kırıcı firmaları, türbin kanatları gibi esnekliği ve mukavemeti yüksek malzemelerin kırılmasının zor olduğunu belirtmektedir.
- ▶ Öte yandan, kanatları çimento tesislerinde istenen boyutlara (<50 mm) getirebilen kırıcı ekipmanları piyasada bulunmaktadır. Kırıcının bıçaklarının değişim süreleri bulunmakta ve bu işletim maliyetlerine eklenmektedir.

## Ar-Ge/Tasarım Kuruluşları

- ▶ Kompozit malzemenin geri dönüşümünde teknik sıkıntılar ve ciddi bir maliyet bulunmaktadır.
- ▶ Türbin kanatlarının çimento sektöründe değerlendirilmeleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin çeşitli kullanımlarına yönelik Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır fakat ticari kullanım için kırıcıların iyi teknolojiye sahip olması gerekmektedir. Bu durum ekonomik olarak uygulanabilirliğin önündeki önemli sorunlardan bir tanesidir.
- ▶ Geri dönüşüm, birden çok akademik disiplini ve sektörü ilgilendiren bir konudur. Öte yandan, yeteri kadar akademik bir çalışma yoktur.
- ▶ Üniversitelerin Ar-Ge projeleri geliştirmesi ihtiyacı bulunmaktadır. Bunun için de düzenleyici kurumların destek programları sunması, destek programlarına bu konu özelinde çağrı açması gerekmektedir.

## Teşvik Kurumları

- ▶ Yenilenebilir enerji sektöründe hız kazanmış ülkelerde bu atıkların yönetimi problem olmaya başlayacaktır. Bu nedenle teşvik kurumları açısından ilginç alanlardan bir tanesi olduğu değerlendirilmektedir.
- ▶ Gelişen bu sektöre teşvikler sağlanması söz konusu olabilecektir.

Rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü için gerçekleştirilecek faaliyetlerde, başta İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) olmak üzere kanat üretim tesisleri, türbin üreticileri, enerji yatırımcıları, atık yönetim firmaları, çimento tesisleri ve Ar-Ge/tasarım kuruluşlarının önemli role sahip olduğu görülmektedir. Rüzgâr türbinlerinin geri kazanılması için yapılacak çalışmalarda bahsi geçen her bir tarafın sürece dahil olması gerektiği düşünülmektedir.

Öte yandan, benzer malzeme kullanan sektörlerin de geliştirilecek işbirlikleri içerisinde olması ile sektörler arası sinerji yaratılabilecek ve adımların daha kolay atılması ve etkili olması sağlanabilecektir. Bunun nedeni, yatırımcıların daha fazla miktar atığın ele alınmasıyla olası bir tesis yatırımında maliyet etkin çözümler elde edebilecek olmasıdır.

Bakanlık, belediye ve kalkınma ajansları gibi ilgili kamu kurumlarının sağlayacağı destek ve finansal teşviklerin rüzgâr sanayiinde geri dönüşüm sektörünün yaratılmasına büyük etkisi olacaktır. Ek olarak, geri dönüşümü teşvik eden politikaların varlığı, süreci hızlandıracak, tarafların sorumluluğunu artırarak çevreye olumlu katkılar sağlayacaktır.

## 5.2. Koşullar, Gereksinimler ve Fırsatlar

Mevcutta çeşitli doğa olayları veya üretim hataları vb. sebeplerle sökülen ve sahalarda bekleyen türbin kanat atıklarının olduğu bilinmekle beraber, ilk nesil rüzgâr türbinleri kullanım ömürlerinin sonuna gelmeye başlamaktadır. İlk nesil rüzgâr türbinleri arasında İzmir-Alaçatı yakınındaki Germiyan'da 1998 yılında kurulan, 3 adet rüzgâr türbinine sahip 1,5 MW kurulu güce sahip Alize Germiyan santrali ve 2000 yılında kurulan 10,2 MW kurulu güce sahip Bozcaada santrali yer almaktadır. Ülkemiz için ilk olarak nitelendirilebilecek bu santrallerin kurulumunu takiben 2000'li yılların ikinci yarısı itibariyle rüzgâr türbinleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Görece genç sayılabilecek rüzgâr türbinlerine sahip ülkemizde henüz kullanım dışı türbin kanatları yoktur ancak önümüzdeki yıllarda ömrünü tamamlamış kanatların miktarında önemli bir artış beklenmektedir. Ek olarak, daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, ülkemizde önümüzdeki 15 yıla kadar ömrünü doldurmuş türbin kanatlarının en fazla İzmir, Balıkesir, Manisa, Çanakkale, Afyon ve Aydın olmak üzere Ege ve Marmara Bölgeleri'nde oluşması beklenmektedir. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü için atılacak adımların İzmir ve çevresinde odaklanması bir fırsat olarak görülmektedir.

Atıklar, 26.03.2010 tarihli ve 27533 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik'e göre bertaraf edilmektedir. Bu mevzuatta atıkların düzenli depolama yöntemi ile bertarafı sürecinde teknik ve idari hususlar ile uyulması gereken kurallar belirlenmiştir. Atıkların düzenli depolama sahalарında bertaraf edilmesi, atık yönetimi hiyerarşisinde en son seçenektir. Buna karşın Türkiye'de mevcut bu atıkların ticari bir geri dönüşüm alternatifi bulunmamakta ve bu nedenle özellikle rüzgâr türbin kanat atıkları ülkemizde düzenli depolama sahalарında depolanmaktadır. Mevcut ulusal düzenlemelerde buna engel teşkil eden bir durum bulunmamaktadır. Atık üreticileri olası geri dönüşüm alternatiflerine açık olsa da, düzenli depolama ile bertarafın maliyetinin geri dönüşüm alternatiflerinden daha düşük olması

tarafları bu yönetime itmektedir. Bu atıkların düzenli depolama sahalарına gömülmeleri yerine, geri dönüşüm alternatifleri her sektörde olduğu gibi rüzgâr sektöründe de araştırma konusudur. Olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek için, atık olarak ortaya çıkan ve ömrünü dolduran rüzgâr türbinlerinin çöp sahalарında depolanması yerine, özellikle ABD ve Avrupa ülkelerinde uygulamaları görüldüğü üzere Türkiye'de de alternatif çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu durum, rüzgâr türbin sektörünün geri dönüşümü için önemli gereksinimlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Öte yandan, Türkiye'de Ar-Ge faaliyetlerinin geliştirilmesi ve hızlandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Hizmet ömrü sonunda rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü, önemli çevresel faydaların yanı sıra doğal kaynak kullanımını azaltarak kaynakların gelecekte kullanımını güvence altına almaktadır. Çelik, bakır, nadir toprak miktatısları ve cam elyafı gibi kritik malzemelerin geri dönüşümü, yeniden kullanılması ve yeniden işlenmesi, toplam küresel kaynak tüketimini azaltacaktır ve arz kıtlığı gibi beklenmedik piyasa değişikliklerini giderecektir (Ortegon, Nies, & Sutherland, 2013). Örnek olarak, dünyada devam eden Ar-Ge faaliyetleri göstermektedir ki, türbin kanatlarından geri kazanılan cam elyaf ve reçine materyalinin, elektronik ve otomotiv endüstrisinde kullanılan sac ve kütle kaplama bileşenleri (SMC ve BMC) olarak değerlendirilmesi mümkündür (Dr Witten, Mathes, & Kühnel, 2018). Bahsi geçen atık cam elyafı da içeren kompozit malzemelerin mobilya endüstrisinde ve yalıtım malzemesi olarak değerlendirilme potansiyeli mevcuttur (European Environmental Bureau - EEB, 2017).

Genel olarak, Türkiye'de sektördeki mevcut durum ve geri dönüşüm süreçlerinin değerlendirilmesi aşağıda özetlenmektedir:

- ▶ Rüzgâr kanatları ve kompozit atıkları genellikle düzenli depolama sahalарında bertaraf edilmektedir.
- ▶ Tüm paydaş kategorileri bu atıkların bertarafı ile

ilgili sıkıntı yaşamakta olup, olası geri dönüşüm alternatiflerine açıktır.

- ▶ Rüzgâr türbini kanatlarının ve kompozit atıkların geri dönüşümü amacıyla çeşitli Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. Ancak bu çözümlerin hiçbiri endüstriyel ölçekte mevcut değildir.
- ▶ Türbin kanatlarının yapısını oluşturan kompozit malzemelerin atıklarının temel geri dönüşüm alternatifi olarak çimento endüstrisi öne çıkmaktadır. Ayrıca, ülkemizde kompozit atık miktarı artmaya devam etmektedir. Kısa vadede en uygun kullanım alanının çimento ve atık yakma tesisleri olduğu düşünülmektedir.
- ▶ Türbin kanatlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önüne alındığında, bu atıkların geri dönüşümünde, en büyük ortak problem uygun kırıcıların olmaması ve bu konuda yatırımların bulunmamasıdır. Kompozit geri dönüşümü sektörler arası bir sorundur. Uygun maliyetli çözümler ve sektörler arası işbirliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- ▶ Türkiye’de bilindiği üzere belediye atıkları dahil pek çok atık gerektiği gibi düzenli olarak toplanamamakta ve ayrıştırılamamaktadır. Bununla birlikte ancak çok az sayıda belediye evsel niteliğe sahip atıklar dışındaki büyük hacimli atıkları toplayabilmektedir.
- ▶ Bazı paydaşlar tarafından geri dönüşümün teşvik edilmesi adına, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın kompozit malzemelerin düzenli depolamaya gönderilmesine kısıtlama getirmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Bu raporun önceki bölümlerinde de ifade edildiği üzere ilk olarak uygulanabilir görünen alternatif, birinci senaryoda ele alınan rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm (yakıt üretim) tesisidir. Bu yakıt üretim tesisinde işlenerek boyutları küçültülen atıklar ATY olarak hazırlanarak çimento endüstrisinde ve atık yakma tesislerinde ek yakıt olarak kullanılabilir. Türkiye’de rüzgâr türbin atıkları önümüzdeki zamanlarda büyük hacimlerde çıkmaya başlayacaktır ve Türkiye’nin türbin geri dönüşümü konusunda araştırma altyapısı henüz gelişme aşamasındadır. Bu nedenle, kısa vadede olabilecek en uygun çözüm, diğer ülkelerde de ticari şekilde uygulanabilir ana teknoloji

olarak kabul edilen, bu atıkların çimento sektöründe ve atık yakma tesislerinde değerlendirilmesidir. Çimento sektörü dışında, rüzgâr türbin atıklarının kırıldıktan sonra betonda ve asfaltta kullanılabilirliği, dolgu malzemesi olarak değerlendirilebildiği bilinmektedir. Ancak bu denemeler genellikle Ar-Ge aşamalarında kalmış, ticari olarak sürdürülebilir bir yöntem olarak henüz gelişmemiştir. Mevcut atıklarla başa çıkılabilmesi için geri dönüşüm Ar-Ge altyapısı gelişene kadar çimento sektöründe ek yakıt olarak kullanımı gibi mevcut yollar daha kapsamlı şekilde ele alınmalıdır. Ek olarak, dünyada Ar-Ge aşamasında olsa da en çok incelenen teknoloji pirolizdir. Bu nedenle, ikinci senaryoda piroliz teknolojisi ele alınmış olup, bu konudaki araştırma faaliyetlerinin Türkiye’de de öne çıkacağı düşünülmektedir. Bunun sebebi, eski türbin kanatlarının geri dönüştürülmesinin rüzgâr sanayii için yakın gelecekte öncelikli konulardan birisi haline gelecek olmasıdır.

Kompozit geri dönüşümü sektörler arası bir sorundur. Uygun maliyetli çözümler ve güçlü değer zincirleri geliştirmek için tüm kompozit kullanan sektörlerin aktif katılımı gerekmektedir. Rüzgâr türbin atıklarının değerlendirilebilmesi için ihtiyaç duyulan geri dönüşüm yol haritasının, diğer kompozit kullanan sektörlerin ihtiyaçlarına da karşılık vereceği öngörülmektedir. Diğer kompozit atık üreten sektörler; yapı ve inşaat, elektrik ve elektronik, ulaşım, denizcilik, havacılık, tank, boru ve su kaydırağı sektörleridir.

Yapılan tüm görüşme ve değerlendirmeler doğrultusunda, rüzgâr türbini sektörü değer zinciri paydaşları ve diğer sektör üreticileri için rüzgâr türbin kanatlarının geri dönüşümü konusunda tespit edilen fırsatlar ve sorunlar/engeller Tablo 5.1.’de verilmektedir.

**TABLO 5.1. Rüzgâr Türbini Kanatlarının Geri Dönüşümü Konusunda Tespit Edilen Fırsatlar ve Sorunlar/Engeller Matrisi**

	Fırsatlar	Sorunlar/Engeller
<b>Kanat Üretim Tesisleri</b>	<p>Bu atıkların yönetimi küresel bir sorun olduğu için ortak hareket edilebileceği düşünülmektedir.</p> <p>Ar-Ge faaliyeti yürüten kanat üretim tesisleri atıkların cam takviyeli beton veya cam takviyeli asfalta dönüştürülmesi amacıyla dolgu malzemesi olarak kullanılması için işbirlikleri geliştirilebileceğini belirtmektedir.</p> <p>Üretim sonucu oluşan toplam atık içinde bütün kanat oranı %1-2 olsa da, üretim atıklarının %80'i kalorisiz yüksek atıklar olduğu için üretim fiyesi olarak çıkan kanatlarla birlikte diğer üretim atıklarının da önemli yere sahip olduğu ifade edilmektedir.</p>	<p>Kompozit atıkları için mevcutta Türkiye'de sürdürülebilir bir çözüm bulunmamaktadır.</p> <p>Atıkların bertarafı için yüksek ücretler ödemektedir.</p> <p>Kanat üretimi esnasında çıkan elyaflar değerlendirilme potansiyeline sahip iken, işbirlikleri yaratılmadığı için yakma veya depolama alanlarında depolanma yoluyla bertaraf edilmektedir.</p> <p>Her rüzgâr türbin kanadı üreticisinin kendisine ait reçetesi bulunmaktadır. Örneğin, biri %60 reçine koyarken bir diğeri başka bir reçine ile çalışmaktadır. Bu nedenle eldeki envanterin ne olduğu bilinmemektedir.</p>
<b>Türbin Komponent/Hammadde Üreticileri</b>	<p>Söz konusu atıkların geri dönüşümü için çözüm bulunursa komponent/ hammadde üreticileri de bu süreçten faydalanabilecektir.</p>	<p>Cam elyaf epoksi reçine ile kontamine olduğu için mevcut teknolojilerle geri dönüştürülüp kullanılamamaktadır.</p>
<b>Türbin Üreticileri</b>	<p>Türbin üreticileri, türbinin belirli parçalarının otobüs durak çatısı, otopark çatıları, çocuk parkı, küçük sürdürülebilir evler, ofis binaları, bank vb. sosyal sorumluluk kapsamında kullanılacak şekilde bir çalışma yapılmasına sıcak bakmaktadır.</p> <p>Türbin atıklarının küçük parçalar haline getirilebilmesi durumunda, ana malzemesi elyaf olduğu için otomotiv vb. birçok sektörde kullanılabileceği belirtilmektedir.</p>	<p>Üretim hatalı türbinler değerlendirilemediği için santral sahasında yerde durmaktadır.</p> <p>Türbin üretici firmalardan sürdürülebilir atık miktarı sağlama konusunda geri dönüşüm firmaları ve çimento tesisleri tarafından taahhüt beklenmektedir.</p> <p>Türkiye'de bu atıkları geri dönüşüme uygun boyutlara indirebilen kırıcılara sahip firma bulunmamaktadır.</p>
<b>Enerji Yatırımcıları</b>	<p>Rüzgâr santrallerinde yılda ortalama 10-12 kanat çeşitli nedenlerle arızalanmakta, ancak yatırımcılar bu duruma çözüm bulamamaktadır. Geri dönüşüm alternatifleri enerji yatırımcılarının da ilgisini çekmektedir.</p> <p>Sosyal boyutlu projeler ile kanat parçalarının santral yerinde otopark vb. olarak kullanılması sağlanırsa, enerji yatırımcıları için de fırsat yaratılmış olacaktır.</p>	<p>Türbin kanatlarının bütün haldeki atıklarının sorumluluğu enerji yatırımcılarına aittir. Yatırımcıların bu atıkların yönetimi konusunda bilgi sahibi olmadığı ifade edilmektedir.</p>



	Fırsatlar	Sorunlar/Engeller
<b>Diğer Sektör Üreticileri</b>	<p>Diğer sektörlerin üretimlerinde de kompozit malzeme fireleri çıkmaktadır. Rüzgâr sanayi için geri dönüşüm imkanı sağlayacak tesis kurulursa, diğer sektörlerin de bu tesisten faydalanabilmeleri söz konusu olacaktır.</p> <p>Kompozit atıkların istenen boyutlarda parçalanması sağlandığı takdirde, elyaf kökenli olduğu için yol yapımında dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi öngörülmektedir.</p>	<p>İçinde cam elyaf ve reçine bulunan kompozit malzeme atıklarının yönetimi ve geri dönüşümü konusunda sektörler problem yaşamaktadır.</p> <p>Yapılan geri dönüşüm Ar-Ge faaliyetlerinden olumlu sonuç alınamamaktadır. Bu atıklar parçalanmak istendiğinde, kırıcı ekipmanları zorlanmakta, makine bıçakları körelmektedir. Dolayısıyla ekonomik olmadığı belirtilmektedir.</p> <p>Farklı kullanım alanları için sektörler arası bağlantıların kurulması gerekmektedir. İşbirliklerinin yaratılması konusunda sıkıntı yaşandığı ifade edilmektedir.</p>
<b>Atık Yönetim Firmaları</b>	<p>Atık yönetim firmaları, kanat üretim tesisleri, türbin komponent üreticileri ve türbin üreticilerinin yanı sıra, diğer kompozit sektörlerinin atıkları için de ortak çözüm sunabilecektir.</p> <p>Hem fabrikalar hem santraller bulunduğu için, İzmir atık geri kazanım potansiyeli en yüksek olan bölgedir. Söz konusu tesisin kurulmasının bölgedeki atık yönetim firmalarına fırsat yaratılabileceği öngörülmektedir.</p>	<p>Atık yönetiminin sürdürülebilir olması için atık yönetim firmaları düzenli atık oluşmasını ve atığı üreten tesislerden miktar garantisi ile yıllık taahhüt beklemektedir.</p> <p>Cam elyaf epoksi reçine ile kontamine olduğu için mevcut teknolojilerle ayırmanın mümkün olmadığı ve geri dönüştürülemediği ifade edilmektedir.</p> <p>Kanadın kırılma, öğütülme, lojistik süreçlerinin yönetilmesinin operasyonel zorluğu olduğu belirtilmektedir. Geri dönüşüm için fabrika kurulumu yatırımının çok maliyetli olduğu öngörülmektedir.</p> <p>Geri dönüşüm tesisleri için yer bulma problemi bulunmaktadır.</p>
<b>Çimento Tesisleri</b>	<p>Çimento tesisleri, yüksek kalorifik değeri sayesinde atığı ek yakıt olarak kullanabileceğini belirtmektedir.</p>	<p>Çimento tesisleri mevcut kırıcılarıyla malzemeyi kırılmamaktadır. Malzemenin kırılma zorluğu, kırıcı ekipmanlarının sarf maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır.</p> <p>Tesisler atığın düzenli olarak gelmesini beklemektedir. Düzenli miktar sağlanmadığı takdirde çimento sektöründe bu atığın değerlendirilmesinin sürdürülebilir olmayacağı belirtilmektedir.</p> <p>Kanadın içeriği önemlidir. Kanattaki inorganik silis içeriğinin, çimentoda istenen karakterizasyonla uyumlayabileceği, ayrıca, inorganik maddelerin içerisinde ağır metallerle de karşılaşılabilmesi ifade edilmektedir.</p>
<b>Kırıcı Firmaları</b>	<p>Kırıcı ekipman firmaları spesifik kırma ekipmanlarını pazarlayabileceği yeni bir müşteri portföyü yaratabilecektir.</p>	<p>Müşteriler kırıcı ekipmanlar için garanti beklentisi içerisinde olmaktadır. Müşterilerin bakım ve sarf malzeme maliyetlerini göz önünde bulundurması gerektiği ifade edilmektedir.</p>

### 5.3. Eylem Planı

Yapılan paydaş görüşmeleri ve odak grup toplantılarından elde edilen görüşler doğrultusunda İzmir’de rüzgâr türbini geri dönüşüm sektörünün oluşturulması için paydaşlar ve olası rolleri ile, belirlenen koşullar, gereksinimler ve fırsatlar önceki bölümlerde ifade edilmiştir.

Bu doğrultuda, rekabetçi ve sürdürülebilir rüzgâr türbini geri dönüşümü sektörünün yaratılması ve iş birliklerinin hayata geçirilebilmesi için aşağıda gösterilen üç hedef belirlenmiş ve buna göre eylem planı hazırlanmıştır.

<b>Genel Amaç</b>	“İzmir Kalkınma Ajansı Yeşil Büyüme Vizyonu ile uyumlu olarak, temiz enerji ve çevre teknolojileri konularında katma değer artırılması”
<b>Özel Amaç</b>	“TR31 bölgesinin mevcut altyapısını, coğrafi avantajını ve yetkinliklerini kullanarak rüzgâr türbini geri dönüşümü sektörünün yaratılması ve bu sektörün rekabetçi / sürdürülebilir gelişimini sağlayacak işbirliklerinin hayata geçirilebilmesi”

**Hedef 1:** Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması

**Hedef 2:** Yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi

**Hedef 3:** Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi

EYLEMLER

Bu hedefler doğrultusunda her bir hedef için belirlenen eylemler aşağıda verilmektedir. Akabinde verilen eylem planı, bu üç hedefin gerçekleştirilebilmesi için gerekli eylemlerle birlikte, eylemlerin hangi kurumlar tarafından, hangi kurumlarla işbirliği içerisinde, hangi takvim yılı içerisinde gerçekleştirileceğini ve bu eylemlerin açıklamalarını göstermektedir.

**1. Hedef:** Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması

- 1.1. Rüzgâr enerjisi sektörü ve diğer ilişkili sektörler arası işbirliğinin sağlanması
- 1.2. Atık envanterinin hazırlanması
- 1.3. Pilot deneme çalışmalarının yapılması
- 1.4. Detaylı fizibilite çalışmasının yapılması
- 1.5. Sektörler arası atık sürdürülebilirliğinin sağlanması
- 1.6. Teşvik mekanizmalarının oluşturulması
- 1.7. Mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması

**2. Hedef:** Yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi

- 2.1. Türbin ve kanat üreticilerinin gizlilik koşullarının belirlenmesi
- 2.2. Malzeme analizlerinin yapılması
- 2.3. Yapısal ihtiyaçların belirlenmesi
- 2.4. Tasarım yarışması düzenlenmesi

- 2.5. Üniversitelerde mimarlık bölümlerinde bitirme projeleri hazırlanması
- 2.6. Fonksiyon seçiminin yapılması
- 2.7. Kullanılmayan veya atık olarak çıkan rüzgâr türbin kanatlarının tasarım unsurlarına ya da şehir mobilyalarına dönüştürülmesi

**3. Hedef:** Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi

- 3.1. Sektörler arası bağlantıların kurulması
- 3.2. Rüzgâr enerjisi sektörüne yönelik Ar-Ge desteklerinin oluşturulması
- 3.3. Çalışma gruplarının oluşturulması
- 3.4. Ar-Ge projelerinin hazırlanması ve yaygınlaştırma çalışmaları yürütülmesi
- 3.5. Geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılmasının araştırılması
- 3.6. Üretimde mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması
- 3.7. Atıkta mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması

Hedef 1: Rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması					
No.	Eylem Adı	Sorumlu Kurum	İlgili Kurum ve Paydaşlar	Takvim	Açıklama
1.1.	Rüzgâr enerjisi sektörü ve diğer ilişkili sektörler arası işbirliğinin sağlanması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>► Türbin Komponent/ Hammadde Üreticileri</li> <li>► Türbin Üreticileri</li> <li>► Diğer Sektör Üreticileri (kompozit atık üreten sektörler)</li> <li>► STK'lar</li> </ul>	2022	Kurulacak tesis, atık yönetim firmaları, kanat üretim tesisleri, türbin komponent üreticileri ve türbin üreticilerinin yanı sıra, diğer kompozit sektörlerinin atıkları için de ortak çözüm sunabilecektir. Bu nedenle, sektörler arası işbirliğinin sağlanması gerekmektedir. Kurulacak tesis ancak bu şekilde ekonomik olarak anlamlı olabilecektir. Bunun için yol haritası hazırlanması aşamasında kurulan iletişimlerin ikili ve grup diyalogları halinde devam ettirilmesi gerekmektedir.
1.2.	Atık envanterinin hazırlanması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>► Türbin Komponent/ Hammadde Üreticileri</li> <li>► Türbin Üreticileri</li> <li>► Diğer Sektör Üreticileri (kompozit atık üreten sektörler)</li> <li>► Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Çevre İl Müdürlüğü</li> </ul>	2022	Özellikle rüzgâr sektörü değer zincirinde çıkan atık miktarı, boyutu, kompozisyonu bilgilerinin derlenerek atık envanteri hazırlanmalıdır.
1.3.	Pilot deneme çalışmalarının yapılması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>► Enerji Yatırımcıları</li> <li>► Türbin Üreticileri</li> <li>► Atık Yönetim Firmaları</li> <li>► Çimento Tesisleri</li> <li>► Piroлиз Tesisleri</li> </ul>	2022	Ön değerlendirmelerde teknik olarak mümkün görünen geri dönüşüm yöntemlerinin (çimento tesislerinde ek yakıt olarak kullanım ve piroliz yöntemiyle değerli ürün eldesi) deneme çalışmalarıyla gerçek uygunluklarının değerlendirilmesi gerekmektedir.
1.4.	Detaylı fizibilite çalışmasının yapılması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Atık Yönetim Firmaları</li> <li>► Kırıcı Ekipman Firmaları</li> </ul>	2023	Yatırımı gerçekleştirebilecek olan firmalarla işbirliği içerisinde detaylı fizibilite çalışması yapılması ile ilgili firma içi yatırım kararının onaylanması gerekmektedir.
1.5.	Sektörler arası atık sürdürülebilirliğinin sağlanması	Atık Yönetim Firmaları	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>► Türbin Üreticileri</li> <li>► Çimento Tesisleri</li> <li>► Piroлиз Tesisleri</li> </ul>	2023	Atığı üreten taraf ile geri dönüşümü sağlayacak taraflar arasında düzenli atık alışverişinin sağlanması için anlaşma çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Bunun amacı, kurulacak tesisin teknolojisinin yaygın olmaması sebebiyle geri dönüşümü teşvik etmektir.
1.6.	Teşvik mekanizmalarının oluşturulması	Teşvik Kurumları (İZKA, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD) vb.)		2023	İlgili yatırımın yapılabilmesi için teşvik mekanizmalarının varlığı gereklidir. Olası bir mekanizmadan sağlanacak kaynaklar ile sektörün karşılaşacağı yüksek maliyetlerin desteklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
1.7.	Mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	<ul style="list-style-type: none"> <li>► İZKA</li> <li>► Çevre Mühendisleri Odası</li> <li>► STK'lar</li> </ul>	2024	Rüzgâr sektörü dahil olmak üzere kompozit sektörüne yönelik geri dönüşüm faaliyetlerini teşvik eden mevzuat düzenlemeleri gerekmektedir. Buna, atık yönetiminde en son tercih edilmesi gereken düzenli depolama sahalarına ilişkin yasaklar ve/veya atık bertaraf ücretlerine ilişkin düzenlemeler dahil edilmelidir.

**Hedef 2: Yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi**

No.	Eylem Adı	Sorumlu Kurum	İlgili Kurum ve Paydaşlar	Takvim	Açıklama
2.1.	Türbin ve kanat üreticilerinin gizlilik koşullarının belirlenmesi	İZKA İzmir Büyükşehir Belediyesi	► Türbin Üreticileri ► Kanat Üretim Tesisleri	2022	Üretici firmaların kendi ürettikleri kanatları firma içi gizlilik suretiyle şehirde sergileme sorunu olup olmayacağı netleştirilmelidir.
2.2.	Malzeme analizlerinin yapılması	İzmir Büyükşehir Belediyesi	► Türbin Üreticileri ► Kanat Üretim Tesisleri	2022	Şehirde sergilenecek olan bu materyalle halk birebir temasa geçeceği için yanıcı olmayan, insan sağlığına zarar vermeyen, darbeye karşı dirençli bir malzeme olması gerekmektedir. Bu nedenle, kullanılacak malzeme karakterizasyonunun bilinmesi gerekmektedir.
2.3.	Yapısal ihtiyaçların belirlenmesi	Türbin Üreticileri Kanat Üretim Tesisleri	► İzmir Büyükşehir Belediyesi ► Yapı (boya, kaplama vb.) firmaları	2022	Malzemenin karakterizasyonu tespit edildikten sonra kanadın boyanması veya kaplanması vb. yapısal ihtiyaçlar ortaya konmalıdır.
2.4.	Rüzgâr türbinlerinin kent mobilyası olarak geri dönüşümünü sağlayacak tasarım etkinlikleri düzenlenmesi	İZKA	► İzmir Büyükşehir Belediyesi ► Tasarımcılar ► İzmir Mimarlar Odası ► Enerji Yatırımcıları	2023	Bir tasarım yarışması düzenlenerek, inşa edilecek yapının tasarımı için yenilikçi fikirler elde edilebilecektir. Vega Enerji'ye ait, halihazırda kullanılmamakta olan türbin kanadının kent mobilyasına dönüştürülerek ABK RES sahasında gerçekleştirilecek sektörel etkinlik ve faaliyetlerde kullanılmasının sağlanması planlanmaktadır. Bu çerçevede etkinlik sahasının tasarlanarak söz konusu kanadın en etkin bir şekilde nasıl kullanılacağı belirlenmesi ve buna yönelik olarak uygulamanın gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.
2.5.	Üniversitelerde mimarlık bölümlerinde bitirme projeleri hazırlanması	Üniversiteler	► İZKA ► İzmir Büyükşehir Belediyesi ► Tasarımcılar	2023	Öğrencilere bitirme proje konusu olarak rüzgâr türbin kanatlarının değerlendirilmesinin çalıştırılması ile yenilikçi fikirler elde edilebilecektir.
2.6.	Fonksiyon seçiminin yapılması	İZKA İzmir Büyükşehir Belediyesi	► Tasarımcılar ► Türbin Üreticileri ► Kanat Üretim Tesisleri	2023	Kanadın sürdürülebilir bir şekilde yapı ve malzeme döngüsüne katılabilmesi için malzeme kompozisyonuna ve tasarım etkinliklerinden elde edilecek çıktılarına göre, bank, otobüs durak çatısı, otopark çatıları, çocuk parkı, küçük sürdürülebilir evler, sokak mobilyası olarak parkta, bahçede kullanılması, anıtlar, heykeller vb. yapıların inşası, yapı malzemesi gibi fonksiyonu belirlenmelidir.
2.7.	Kullanılmayan veya atık olarak çıkan rüzgâr türbin kanatlarının tasarım unsurlarına ya da şehir mobilyalarına dönüştürülmesi	İzmir Büyükşehir Belediyesi	► İZKA ► Enerji Yatırımcıları ► Türbin Üreticileri ► Kanat Üretim Tesisleri	2024	Şehrin gözde yerlerinde, gösterim amaçlı, farkındalık yaratacak bir çalışma ile yapılan tasarımın inşası yapılmalıdır. Bunun için gerekli yapı çalışmaları yürütülmelidir. Ülkemizde ve İzmir'de söküm işlemi yapılacak ilk rüzgâr türbini santrali olan Alaçatı RES'deki türbinlerin bu stratejide belirtilen kapsamda değerlendirilebilmesi için örnek çalışmalar planlanmaktadır.



Hedef 3: Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi					
No.	Eylem Adı	Sorumlu Kurum	İlgili Kurum ve Paydaşlar	Takvim	Açıklama
3.1.	Sektörler arası bağlantıların kurulması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>▶ Türbin Üreticileri</li> <li>▶ Diğer Sektör üreticileri (kompozit atık üreten)</li> <li>▶ İlgili Sektörler</li> <li>▶ Üniversiteler</li> <li>▶ STK'lar</li> </ul>	2022	Ar-Ge çalışmalarına girdi teşkil edecek atıkların elde edilmesi ve Ar-Ge çalışmalarından elde edilecek çıktıların kullanım alanı bulabilmesi açısından farklı sektörlerle işbirliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. İlgili sektörler örnek olarak, havacılık, otomotiv, gemi, boru, asfalt, beton, inşaat sektörleri verilebilmektedir.
3.2.	Rüzgâr enerjisi sektörüne yönelik Ar-Ge desteklerinin oluşturulması	TÜBİTAK İZKA		2022	TÜBİTAK çağrı eksenlerinde veya Kalkınma Ajansı desteklerinde rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümüne veya geri dönüştürülebilir malzeme üretimine yönelik çağrı açılarak destekler sağlanması üzerine çalışmalar yapılmalıdır.
3.3.	Çalışma gruplarının oluşturulması	İZKA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Üniversiteler</li> <li>▶ Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı</li> <li>▶ TÜBİTAK</li> <li>▶ Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>▶ Türbin Komponent/ Hammadde Üreticileri</li> <li>▶ Türbin Üreticileri</li> <li>▶ Diğer Sektör Üreticileri</li> <li>▶ Atık yönetim firmaları</li> <li>▶ STK'lar</li> </ul>	2022	Ar-Ge olanaklarını ortaya koymak, teknolojik ihtiyaç analizi yapmak, teknolojik gelişmeleri takip etmek ve bu teknolojilerin transferi ve yaygınlaştırılmasına yönelik çalışma yapmak ve işbirlikleri geliştirmek üzere tartışma ve çalışma grupları oluşturularak toplantı/çalıştaylar yapılmalıdır.
3.4.	Ar-Ge projelerinin hazırlanması ve yaygınlaştırma çalışmaları yürütülmesi	Üniversiteler	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ İZKA</li> <li>▶ İlgili Sektörler</li> <li>▶ Atık Yönetim Firmaları</li> <li>▶ Potansiyel uluslararası proje ortakları</li> </ul>	2023	Ulusal ve uluslararası destek çağrılarına başvurarak rüzgâr türbinlerinin geri dönüşümü üzerine Ar-Ge projeleri geliştirilmelidir. Geliştirilecek projelerde uluslararası ortaklıkların kurulması teknoloji ve bilgi transferi açısından önem teşkil etmektedir. Ar-Ge projeleri kapsamında tespit edilen olanakların laboratuvar ölçekli denemeleri yapılarak, çıktıların yaygınlaştırılması çalışmaları (bilimsel yayınlar) gerçekleştirilmelidir.
3.5.	Geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılımasının araştırılması	Üniversiteler	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Kanat Üretim Tesisleri</li> <li>▶ Türbin Komponent/ Hammadde Üreticileri</li> <li>▶ Türbin Üreticileri</li> </ul>	2024	Geri dönüştürülmesi zor termoset malzemeler yerine termoplastik malzemelerin üretimde kullanılması araştırma konuları arasında olmalıdır.
3.6.	Üretimde mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması	Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ İZKA</li> <li>▶ STK'lar</li> </ul>	2024	Ar-Ge çalışmalarının karşılık bulabilmesi ve ticarileştirilebilmesi için, çıktıların pazarının oluşması gerekmektedir. Bu nedenle, geri dönüştürülen malzeme kullanımını teşvik etmeye yönelik mevzuat çalışmaları yapılmalıdır.
3.7.	Atıkta mevzuat düzenleme çalışmalarının yapılması	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ TÜBİTAK</li> <li>▶ İZKA</li> <li>▶ STK'lar</li> </ul>	2024	Geri dönüşümde üreticinin sorumluluğu alması konusunda çalışmalar yapılmalıdır.

## KAYNAKÇA

- BASF, 2019. Technical Information from BASF Experts.
- Beauson, J.; Brøndsted, P. (2016) Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. In MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology. Switzerland, pp. 421–432. Glass to Glass® Reclamation Technology. Glass Fiber Recycling. <https://carbonrivers.com/custom-page/glass-fiber-recycling/>.
- Beston (Henan) Machinery Co., Ltd. Pyrolysis Plant Cost. <https://www.bestongroup.com/pyrolysis-plant-cost/> Erişim tarihi: Ağustos 2021
- Delft, C.E., 2020. Exploration Chemical Recycling– Extended Summary- What Is the Po-tential Contribution of Chemical Recycling to Dutch Climate Policy? Delft, CE
- Cherrington, R., V. Goodship, J. Meredith, B.m. Wood, S.r. Coles, A. Vuillaume, A. Feito-Boirac, F. Spee, and K. Kirwan. "Producer Responsibility: Defining the Incentive for Recycling Composite Wind Turbine Blades in Europe." *Energy Policy* 47 (2012): 13-21
- Demirci, Y., Dere, T., & Gönüllü, M. T. (2014). Adıyaman İlinde Piroliz Teknolojisini Kullanarak Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden Aktif Karbon Üretimi: Fizibilite Çalışması. Adıyaman: Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü.
- Dr Witten, E., Mathes, V., Sauer, M., Kühnel, M. (2018). Composites Market Report 2018: Market Developments, Trends, Outlooks and Challenges. AVK & Carbon Composites, Frankfurt. [https://eucia.eu/user-files/files/20181115\\_avk\\_ccev\\_market\\_report\\_2018\\_final.pdf](https://eucia.eu/user-files/files/20181115_avk_ccev_market_report_2018_final.pdf).
- Eilers, H. (2020). Wind turbine wing gets new life at the Port of Aalborg. Energy Supply DK. <https://www.energy-supply.dk/article/view/699757/>.
- El-Fadel, Mutasem, Angelos N. Findikakis, and James O. Leckie. "Environmental impacts of solid waste landfilling." *Journal of environmental management* 50.1 (1997): 1- 25.
- EPD Turkey. (2018). EPD Çevresel Ürün Beyanları.
- European Environmental Bureau - EEB. (2017). Circular Economy Opportunities in The Furniture Sector. Brussels.
- Fox, T. R. (2016). Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete. Iowa: Iowa State University. Graduate Theses and Dissertations, 57.
- FutureBridge. (2020, Eylül 25). The Future of Wind Blade Recycling: Driving Circularity to Composites Industry. FutureBridge. <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/the-future-of-wind-blade-recycling-driving-circularity-to-composites-industry/>.
- Gear, M., Sadhukhan, J., Thorpe, R., Clift, R., Seville, J., Keast, M. (2018). A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes—a case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste. *J. Clean. Prod.* 180, 735–747.
- Gignac, J. (2021). Wind Turbine Blades Don't Have To End Up In Landfills. Union of Concerned Scientists. <https://blog.ucsusa.org/james-gignac/wind-turbine-blades-recycling>.
- Geocycle&Holcim Ltd. Processing of Rotor Blades by Geocycle - LafargeHolcim Ltd. Processing of Rotor Blades. <https://www.energy-xprt.com/services/processing-of-rotor-blades-178781>.
- GFS. Fiberglass Recycling: Global Fiberglass Solutions. GLOBAL FIBERGLASS SOLUTIONS. <https://www.global-fiberglassinc.com/>.
- Global Wind Energy Council (GWEC). (2021, Nisan 30). Global Wind Report 2021. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>.
- Harish, J., Christian, K., & Manfred, R. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. Elsevier.
- Henan Doing. (2021). What is the difference between batch and continuous pyrolysis plant? [http://www.wasteplasticpyrolysisplant.com/Pyrolysis\\_technology/difference\\_between\\_batch\\_and\\_continuous\\_pyrolysis\\_plant\\_228.html](http://www.wasteplasticpyrolysisplant.com/Pyrolysis_technology/difference_between_batch_and_continuous_pyrolysis_plant_228.html)
- Huayin. (2021). Huayin Catalog. Xinxiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd.
- IEA. (2015). Technology Roadmap Wind Energy. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264238831-en>.
- IRENA. (2021). Renewable Capacity Statistics. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

- İZKA. (2020). İzmir'de Kaynak Kullanımı ve Atık Üretiminde Öne Çıkan Sektörler Analizi. İzmir: İzmir Kalkınma Ajansı.
- Jensen, J. P. (2019). Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*, 22(2), 316–326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>
- Joeman, I. (2019). Alternatives on afterlife use of amortized wind turbine blades in the Netherlands. University of Twente, Master Environmental and Energy Management (MEEM) 2019.
- Karidis, A. (2021). Veolia and GE Renewable Energy Recycle Wind Turbine Blades for Cement Industry Applications. <https://www.waste360.com/energy/veolia-and-ge-renewable-energy-recycle-wind-turbine-blades-cement-industry-applications>.
- Kimya Sanayii Çalışma Grubu. (2018). On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023). Ankara: T.C. Kalkınma Bakanlığı.
- Koelega, J. (2019). Recycling Wind Turbine Blades. TU Delft.
- Kompozit Sanayicileri Derneği. (2018). Türkiye Kompozit İhracatı. *Composites Turkey*(19), 30. [www.kompozit.org.tr](http://www.kompozit.org.tr)
- Kompozit Sanayicileri Derneği. (2019, Mart). Turkish Composites Industry. *Composites Turkey* (21), 32. [www.kompozit.org.tr](http://www.kompozit.org.tr)
- Kompozit Sanayicileri Derneği. (2019, Aralık). Türkiye CTP Boru, Tank Ve Altyapı Sektörü. *Composites Turkey* (24), 30.
- Kompozit Sanayicileri Derneği. (2020). 2020 Faaliyet Raporu. Türkiye'de Kompozit Sektörü.
- Kompozit Sanayicileri Derneği. (2020, Eylül). Savunma, Havacılık Ve Uzay Endüstrilerinde İleri Kompozitler: "Türkiye Analizi". *Composites Turkey*(27), 31. [www.kompozit.org.tr](http://www.kompozit.org.tr)
- Kulkarni, S. V., & Shastri, Y. (2019). Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Pyrolysis of Plastic Waste in Mumbai, India. *Sustainable Waste Management: Policies and Case Studies*.
- Larsen, K., 2009. Recycling wind turbine blades. *Renew. Energy Focus* 9 (7), 70–73. [https://doi.org/10.1016/S1755-0084\(09\)70045-6](https://doi.org/10.1016/S1755-0084(09)70045-6).
- Martin, C. (2020). Wind Turbine Blades Can't Be Recycled, So They're Piling Up in Landfills. *Bloomberg Green*. <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>
- McEntee, A., & Cappadona, B. (2020, Aralık 10). United States: Veolia makes cement and gives a second life to GE Renewable Energy's wind turbine blades. Veolia. <https://www.veolia.com/en/news/united-states-veolia-makes-cement-and-gives-second-life-ge-renewable-energys-wind-turbine>.
- Mehta, Y. (2017). Economic analysis and life cycle assessment of municipal solid waste, landfilling: A case study of Mumbai, India. India: Indian Institute of Technology Bombay.
- Miljoskarm. (2021). Unique Recycling of Fiberglass. <https://miljoskarm.dk/en/>.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2017). Sectorplan 11 Kunststof en rubber, 3(20150116).
- Naqvi, S.R., Mysore Prabhakara, H., Bramer, E.A., Dierkes, W., Akkerman, R. & Brem, G. (2018). A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, Conservation & Recycling* 136, 118-129
- Neowa GmbH. Project support. Environmentally friendly and economical GRP processing. <https://www.neowa.de/en/content#we>.
- Neocomp GmbH. Unsere Leistungen Processing and recycling. Neocomp GmbH - Leistungen. <https://www.neocomp.eu/de/Leistungen>.
- Neto, G., & Chaves, L. (2019). Economic, Environmental and Social Benefits of Adoption of Pyrolysis Process of Tires: A Feasible and Ecofriendly Mode to Reduce the Impacts of Scrap Tires in Brazil. *MDPI*.
- Oliveux, G., Dandy, L. O., & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72, 61–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- Ortegon, Katherine, Loring F. Nies, and John W. Sutherland. "Preparing for end of service life of wind turbines." *Journal of Cleaner Production* 39 (2013): 191-199.
- Oyak Çimento. (2019). Atığa Değer Katılmalı. <http://www.oyakcimento.com/>
- Renew Economy. (2021). "World's first "fully recyclable" wind turbine blades roll off production line." <https://reneweconomy.com.au/worlds-first-fully-recyclable-wind-turbine-blades-roll-off-production-line/>
- Serpentine Galleries. (2020, Temmuz 1). Serpentine

- Pavilion and summer houses 2016. <https://www.serpentinegalleries.org/whats-on/serpentine-pavilion-and-summer-houses-2016/#images>.
- Serpentine Galleries. (2020, Kasım 3). Serpentine pavilion 2019 by Junya Ishigami. <https://www.serpentinegalleries.org/whats-on/serpentine-pavilion-2019-designed-junya-ishigami/>.
- SiemensGamesa (2021), <https://www.siemens-gamesa.com/en-int/newsroom/2021/09/launch-world-first-recyclable-wind-turbine-blade>
- SL Recycling. (2020, Kasım 30). What are the Negative Effects of Landfill? <https://www.slrecyclingltd.co.uk/what-are-the-negative-effects-of-landfill/#:~:text=Releases%20Methane%20Gas,and%20contributes%20to%20climate%20change>.
- Somoza-Tornos, A., Gonzalez-Garay, A., Pozo, C., Graells, M., Espuña, A., Guillén-Gosálbez, G., 2020. Realizing the potential high benefits of circular economy in the chemical industry: ethylene monomer recovery via polyethylene pyrolysis. ACS Sustain. Chem. Eng. 8, 3561–3572.
- Superuse Studios. (2021, Ağustos 30). Blade made. [https://www.superuse-studios.com/nl/projectplus/blade\\_made/](https://www.superuse-studios.com/nl/projectplus/blade_made/).
- Tekiner, G. (2021). Oyak Çimento Beton Kağıt Grubu
- Tuncer, A.O. (2020). Aliağa Bölgesi Genel Bilgilendirme Sunumu. İMEAK Deniz Ticaret Odası Aliağa Şubesi
- TÜREB. (2021, Mayıs). Rüzgâr Enerji Santrali (RES) Veritabanı. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNmFmYWY0MTYtNjUyNS00NzQ1LWlwMTMtOTI5ZTNk-M2FjYWxliwidCI6ImU5YzY0NjU4LWwFkMWQtNDUwOS-1hODkOLTE2NWZhYjU2NjEyMyIsImMiOjI9>
- Türk Çimento. (2021). Alternatif Yakıt ve Hammadde. [https://www.turkcimento.org.tr/tr/alternatif\\_yakit\\_ve\\_hammaddeler](https://www.turkcimento.org.tr/tr/alternatif_yakit_ve_hammaddeler)
- U.S. Department of Energy. (2015). Wind Vision: A New Era for Wind Power in the United States. Technical report, Washington, DC.
- Vestas. (2020). Zero-waste turbines by 2040. [https://www.vestas.com/en/media/blog/sustainability/20200511\\_zero-waste-turbines#!](https://www.vestas.com/en/media/blog/sustainability/20200511_zero-waste-turbines#!)
- Viollas. (2021). Piroiliz Tabanlı ÖTL Geri Kazanım ve Enerji. <https://www.viollas.com/geri-donusum/omrunu-tamamlamis-lastik>
- WindEurope. (2020, Kasım 20). Decommissioning of Onshore Wind Turbines. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/>.
- WindEurope; Cefic; EuCIA. (2020). Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Thematic Reports, May, 11–13. <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/accelerating-wind-turbine-blade-circularity/>
- World Wind Energy Association (WWEA). (2021, Mart 24). Worldwide Wind Capacity Reaches 744 Gigawatts – An Unprecedented 93 Gigawatts added in 2020. World Wind Energy Association. <https://wwindea.org/worldwide-wind-capacity-reaches-744-gigawatts/>.
- World Wind Energy Association (WWEA). (2015, Şubat 5). New Record In Worldwide Wind Installations. "Research Note Outline on Recycling Wind Turbines Blades". <https://wwindea.org/new-record-in-worldwide-wind-installations/>

## EK-1: Çimento Sektöründe Alternatif Hammadde Olarak Kullanılmasına Onay Verilmiş Atık Kodları

1	01 04 08	01 04 07 dışındaki atık kaya ve çakıl taşı atıkları
2	01 04 09	Atık kum ve killer
3	01 04 10	01 04 07 dışındaki tozumsu ve pudramsı atıklar
4	01 04 12	01 04 07 ve 01 04 11 dışındaki minerallerin yıkanması ve temizlenmesinden kaynaklanan ince taneli atıklar ve diğer atıklar
5	01 04 13	01 04 07 dışındaki taş yontma ve kesme işlemlerinden kaynaklanan atıklar
6	01 05 04	Tatlı su sondaj çamurları ve atıkları
7	01 05 05	Yağ içeren sondaj çamurları ve atıkları
8	01 05 06	Tehlikeli maddeler içeren sondaj çamurları ve diğer sondaj atıkları
9	01 05 07	01 05 05 ve 01 05 06 dışındaki barit içeren sondaj çamurları ve atıkları
10	02 03 04	Tüketime ya da işlenmeye uygun olmayan maddeler
11	02 03 05	İşletme sahası içerisindeki atıksu arıtımından kaynaklanan atıklar
12	02 04 01	Şeker pancarının temizlenmesinden ve yıkanmasından kaynaklanan toprak
13	02 04 02	Standart dışı kalsiyum karbonat
14	02 05 02	İşletme sahası içerisindeki atıksu arıtımından kaynaklanan çamurlar
15	02 07 05	İşletme sahası içerisindeki atıksu arıtımından kaynaklanan çamurlar
16	03 03 05	Kâğıt geri kazanım işleminden kaynaklanan mürekkep giderme çamurları
17	04 02 20	04 02 19 dışındaki saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan çamurlar
18	06 09 04	06 09 03 dışındaki kalsiyum bazlı reaksiyon atıkları
19	07 02 12	07 02 11 dışındaki saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan çamurlar
20	07 06 12	07 06 11 dışındaki saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan çamurlar
21	08 01 17	Organik çözücüler ya da diğer tehlikeli maddeler içeren boya ve verniğin sökülmesinden kaynaklanan atıklar
22	10 01 01	(10 01 04'ün altındaki kazan tozu hariç) dip külü, cüruf ve kazan tozu
23	10 01 02	Uçucu kömür külü
24	10 01 05	Baca gazı kükürt giderme işleminden (desülfürizasyon) çıkan kalsiyum bazlı katı atıklar
25	10 02 01	Cüruf işleme atıkları
26	10 02 02	İşlenmemiş cüruf
27	10 02 10	Haddehane tufalı
28	10 02 14	10 02 13 dışındaki gaz arıtımı sonucu oluşan çamurlar ve filtre kekleri
29	10 05 01	Birincil ve ikincil üretim cürufları
30	10 06 02	Birincil ve ikincil üretimden kaynaklanan cüruf ve köpükler
31	10 08 09	Diğer cüruflar
32	10 09 03	Ocak cürufları
33	10 09 07	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları
34	10 09 08	10 09 07 dışında döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları



35	10 09 09	Tehlikeli maddeler içeren baca gazı tozu
36	10 09 10	10 09 09 dışındaki baca gazı tozu
37	10 10 07	Döküm yapılmış tehlikeli madde içeren maça ve kum döküm kalıpları
38	10 10 08	10 10 07 dışındaki döküm yapılmış maça ve kum döküm kalıpları
39	10 12 01	Isıl işlem öncesi karışım hazırlama atıkları
40	10 12 03	Partiküller ve toz
41	10 12 06	Iskarta kalıplar
42	10 12 08	Atık seramikler, tuğlalar, fayanslar ve inşaat malzemeleri (Isıl işlem sonrası)
43	10 12 12	10 12 11 dışındaki sırlama atıkları
44	10 12 13	Saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan çamur
45	10 13 06	Partiküller ve Toz (10 13 12 ve 10 13 13 hariç)
46	10 13 11	10 13 09 ve 10 13 10 dışındaki çimento bazlı kompozit malzeme üretim atıkları
47	10 13 14	Atık beton ve beton çamurları
48	11 01 10	11 01 09 dışındaki çamurlar ve filtre kekleri
49	12 01 02	Demir metal toz ve parçacıklar
50	12 01 16	Tehlikeli maddeler içeren kumlama maddeleri atıkları
51	12 01 17	12 01 16 dışındaki kumlama maddeleri atıkları
52	16 11 03	Metalürjik proseslerden kaynaklanan, tehlikeli maddeler içeren diğer astarlar ve refraktörler
53	16 11 05	Metalürjik olmayan proseslerden kaynaklanan, tehlikeli maddeler içeren astarlar ve refraktörler
54	17 01 01	Beton
55	17 05 03	Tehlikeli maddeler içeren toprak ve taşlar
56	17 05 04	17 05 03 dışındaki toprak ve taşlar
57	17 05 06	17 05 05 dışındaki dip tarama çamuru
58	19 02 05	Fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar
59	19 02 06	19 02 05 dışındaki fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan çamurlar
60	19 08 05	Kentsel atıksuyun arıtılmasından kaynaklanan çamurlar
61	19 08 13	Endüstriyel atıksuyun diğer yöntemlerle arıtılmasından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar
62	19 08 14	19 08 13 dışındaki endüstriyel atıksuyun diğer yöntemlerle arıtılmasından kaynaklanan çamurlar
63	19 09 01	İlk filtreleme ve süzme işlemlerinden kaynaklanan katı atıklar
64	19 09 02	Su berraklaştırılmasından kaynaklanan çamurlar
65	19 09 03	Karbonat gidermeden kaynaklanan çamurlar
66	19 12 05	Cam
67	19 12 09	Mineraller (örneğin kum, taşlar)
68	19 13 01	Toprak ıslahından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren atıklar
69	19 13 03	Toprak ıslahından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar



**İZMİR KALKINMA AJANSI**

Megapol Çarşı Kule, Halkapınar Mahallesi,  
1203/11. Sk. No: 5-7, Kat: 19, 35170 Konak/İzmir

T. +90 232 489 81 81 F. +90 232 489 85 05

[www.izka.org.tr](http://www.izka.org.tr)