

RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI VE DESTEK ELEMANLARINDAKİ KOMPOZİT YAPILARIN YERLİLİK, GERİ DÖNÜŞÜM VE DAYANIMLARI AÇISINDAN İNCELENMESİ

Ferhat Özmen¹

¹Dokuz Eylül Üniversitesi

Makine Mühendisliği Mekanik YL

¹ferhatozmen35@gmail.com

Ramazan Karakuzu²

²Dokuz Eylül Üniversitesi

Makine Mühendisliği Bölümü

²ramazan.karakuzu@deu.edu.tr

ÖZET

Bu bildiri, hızla büyüyen rüzgâr sektöründeki rüzgâr türbini kanatlarında ve destek elemanlarındaki kompozit yapıların yerlilik, geri dönüşüm ve dayanımları açısından ele almıştır. Bildirinin birinci kısmında küresel ölçekte ve ülkemizde rüzgâr enerji sektörünün büyümesi ve gelecekteki durumu sayısal verilerle incelenmiştir. İkinci kısımda ise ülkemizin rüzgâr enerjisi sektöründeki yerleşme çalışmaları incelenmiştir. Üçüncü kısımda ise bu sektördeki büyümeyle birlikte ortaya çıkacak olan atık sorunu ve çevre krizi için geliştirilen geri dönüşüm teknolojileri ve çözümleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, rüzgâr enerjisi sektöründeki kompozit atık geri dönüşüm hususunu, geleneksel çevreci yaklaşımın ötesinde endüstriyel ve teknolojik çıktıları vurgulayarak ele almıştır. Sanayi firmaları için geri dönüştürülmüş malzemelerin mukavemet özelliklerini inceleyip literatürde yer almış çalışmaları ve metotları da derleyerek bu malzemelerin tekrar kullanılabilirliğini ve üretilebilirliğini aşikâr bir şekilde ortaya koymuştur. Bu vesileyle, kanat ekipmanlarındaki ithalat bağımlılığı, yerli tedarik, geri dönüşüm ve çevre kirliliği sorunlarına ışık tutacak ve yerli üretimimizin geleceği için izlenmesi gereken yollar hususundaki önerileri tartışmaya açacaktır. Bildiri, ülkemizde rüzgâr enerji sektörünün büyüme ivmesini de göz önüne alarak, kurulacak tesisler ve desteklenecek Ar-Ge çalışmaları ile birlikte kompozit sektöründeki geri dönüşüm meselesini yerleşme politikaları kapsamına alınması gerektiğini önemle vurgulamıştır.

1.GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve 2050 yılına kadar önemli ölçüde gelişeceği tahmin edilmektedir. 2001 yılında, küresel çapta toplamda 24 gigawatt (GW) rüzgâr enerjisi kurulumu yapılmışken 2021 itibarıyla bu rakam 837 GW'a yükselerek neredeyse 35 katına ulaşmıştır [1]. Ayrıca gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan Türkiye gibi ülkelerde rüzgâr enerjisi, artan enerji talebini karşılama sürecinde önemli bir rol oynamıştır. Türkiye'de 2008 yılında sadece 0,4 GW rüzgâr enerjisi kapasitesi bulunurken, bu miktar 10 yılda neredeyse 20 kat artarak 2018'de 7,4 GW'a yükselmiştir [2]. Bu olumlu tabloya rağmen, 2016'dan sonra kurulum hızının yavaşladığı da gözlemlenmektedir. Son dönemde, küresel çapta enerji kaynaklarının arzında oluşan darboğaz ve fiyat artışları sonrası ortaya çıkan enerji krizi, yerli enerji kaynaklarının kıymetini artırırken küresel iklim değişikliği de enerjinin temiz, yenilenebilir olarak üretilmesini gerekli kılmaktadır. Dünyada yenilenebilir enerjiye artan ilgi, rüzgâr türbini kanadı üretiminde üs konumunda olan Türkiye'nin ihracattaki gücünü arttırmıştır. Geçen yıl, 2022 yılında, Avrupa'da kurulan rüzgâr türbinlerindeki kanatların yaklaşık 3'te 1'i Türkiye'de üretilmiştir [3].

Uluslararası Enerji Ajansı, rüzgâr üretiminin 2030 yılına kadar 3317 terawattsaat (TWhs) veya daha fazlasına ulaşacağını tahmin etmektedir [4]. Avrupa'da, 2030 yılına kadar rüzgâr enerjisi üretiminin Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin enerji talebinin yüzde 30'unu karşılması ve bu oranın önümüzdeki on yıllarda daha da artması bekleniyor. Bununla birlikte, yoğun rüzgâr enerjisi kullanımı, ömrünü tamamlamış veya hizmet dışı kalmış rüzgâr türbinlerindeki kanatların atık olarak birikmesine neden olmuş ve bu da büyük çevre sorunlarına yol açmıştır [5-6]. Son yıllarda AB'de her yıl yaklaşık 3800 rüzgâr türbini kanadı sökülmeğe başlandı. ABD'de ise 2021 yılından itibaren her yıl yaklaşık 8000 rüzgâr türbin kanadı kaldırılıyor ve bu eğilimin 2025 yılına kadar devam edeceği öngörülmüyor [7].

Rüzgâr türbinlerinin ömrü genellikle 20 yıl olup bu sürenin sonunda çoğu zaman sökülüp atılırlar. İlk nesil rüzgâr türbinleri ömrünün sonuna yaklaşıyor ve kanatlarının imhası önemli bir atık yönetimi sorunu haline gelecektir. 1 kW'lık rüzgâr enerjisi üretim kapasitesi kurmak için yaklaşık 10 kg kompozit gerekir, dolayısıyla 3 MW'lık bir rüzgâr türbini kanadı yaklaşık 3 ton kompozit gerektirir [8]. Ağustos 2020 itibarıyla, Türkiye'de toplamda 8,29 gigawatt (GW) rüzgâr enerjisi kurulumu gerçekleştirilmiş durumda ve bu kurulumun 8,05 GW'ı 2020 ile 2039 yılları arasında kullanımdan kaldırılacaktır. Türkiye'de 2020 ile 2039 yılları arasında yaklaşık olarak 80.500 ton atık üreteceği tahmin edilen yaklaşık 9.000 rüzgâr türbini kanadının olacağı tespit edilmiştir. Atık içeriği olarak rüzgâr türbini kanatlarından ortalama olarak 52.325 ton cam/karbon malzeme ve bunların dışında 28.175 ton polimer malzeme birikeceği tahmin edilmektedir. Bu kanat atıklarının %74'ü Ege ve Marmara bölgelerinden kaynaklanacak olup, bu atıkların %33'ü 2 MW ve 2,5 MW boyutlarındaki rüzgâr türbini kanatlarından oluşacaktır. Bu tahminler, bu rüzgâr türbinlerinin karbon/cam içeriği toplam ağırlığın %65'i ve polimer içeriği de toplam ağırlığın %35'i olacak şekilde kabul edilip yapılmıştır ve bu tahminler, rüzgâr türbini kanatlarının çoğunun ağırlıkça %75'ine kadar cam içerikli olması kabulüne dayanmaktadır [9].

Kompozitleri ve kompozit malzeme atıklarını geri dönüştürmenin iki ana hedefi vardır: Birincisi, atıkların çöplüklere atılmasını önlemek, ikincisi ve belki de daha önemlisi, bu malzemeleri geri kazanmanın ve yararlı uygulamalarda yeniden kullanmanın yollarını bulmaktır. Rüzgâr türbinlerinin bileşenleri, çoğunlukla kompozit yapıları nedeniyle geri dönüşümü kolay olmayan rüzgâr türbini kanatları hariç, genellikle geri dönüştürülür. Bu nedenle, kullanımdan çıkarılan rüzgâr türbini kanatlarının büyük bir kısmı dünya genelinde düzenli depolama alanlarına yerleştirilmiştir [10]. Bu durum, ülkeler için çevresel ve ekonomik sorunlara neden olabilir ve aynı zamanda rüzgâr enerjisine yönelik olumsuz bir algı oluşturabilir. Buna ek olarak, Avrupa'daki rüzgâr endüstrisi, 2025'ten itibaren düzenli depolama yasağı getirmeyi taahhüt etti, bu vesileyle kanatların geri dönüşüm yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu husus için güçlü mevzuatların olması ve kompozit üreten diğer endüstrilerin aynı şeyi yapması hem endüstri hem de akademik çalışmaları daha da harekete geçirecektir ve daha da güvenilir bir tedarik zinciri sağlayacaktır [11].

Bu bildiri, hem dünyada hem de ülkemizdeki rüzgar enerjisi uygulamalarındaki artışı güncel sayısal verilerle vurgulayarak rüzgâr türbini kanat atığının artma eğilimini ve her geçen yıl daha da büyüyen bir sorun haline geldiğini aşikâr bir şekilde ortaya koymuştur. Doğal olarak şu soru ortaya çıkıyor: "Kullanılmış" kompozit malzemelerle ne yapılmalı? Bu bizi üç ana mevcut seçeneğe götürür: (1) Düzenli Depolama, (2) Yakma veya (3) Geri Dönüşüm. Hangisi daha sürdürülebilir? Bu büyüyen sorunu çözmek için gelişmiş ülkelerin de tercihi olan Geri Dönüşüm seçeneğini bu bildiride ele alacağız. Bu bildiri, rüzgâr sektöründeki geri dönüşüm hususunu, geleneksel çevreci yaklaşımın ötesinde endüstriyel ve yapısal teknik çıktıları vurgulayarak hem küresel açıdan hem de yerlilik perspektifinde ele almıştır.

2.KÜRESEL ÖLÇEKTE YENİLENEBİLİR ENERJİ SEKTÖRÜNÜN DÜNÜ, BUGÜNÜ VE GELECEKTEKİ GELİŞİMİ

Rüzgâr enerjisi, yeşil bir enerji kaynağı ve dünya çapında en hızlı büyüyen enerji sektörü olarak kabul edilir. Çin ve ABD gibi büyük rüzgâr enerjisi piyasaları, dünyada kurulan rüzgâr türbinlerinin büyük bir kısmını inşa ederek rekor bir büyüme yaşamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın yenilenebilir enerji piyasası güncellemesi, yenilenebilir enerjide büyümenin 2024'de devam edeceğini ve dünyanın toplam yenilenebilir elektrik kapasitesinin Çin ve ABD'nin toplam güç üretimine eşit olan 4500 GW'a yükseleceğini ifade ediyor. Çin, yenilenebilir enerjide lider konumunu sağlamlaştırmayı sürdürüyor ve Çin'deki yeni yatırımlar, hem 2023, hem de 2024'te küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin tek başına yaklaşık %55'ini oluşturacağı tahmin ediliyor; bunun yanı sıra diğer ülkelerde ise daha mütevazı bir büyüme görülmüştür. Elektrik Piyasası 2023 Raporu'na göre, geçen yıl küresel enerji krizi ve olağandışı hava koşulları nedeniyle %2'ye gerileyen dünya elektrik talebindeki büyümenin önümüzdeki üç yıl içinde ortalama %3 büyümesi bekleniyor. IEA analizine göre yenilenebilir enerji kaynakları ve nükleer enerji, 2025 yılına kadar küresel elektrik talebindeki büyümenin neredeyse tamamını kapsayacaktır (Tablo 1). Tablolardaki sayısal değerler yaklaşık olarak verilmiştir. IEA'nın Dünya Enerji Görünümü raporuna göre 2019 dünya toplam enerji kurulu gücü 7484 GW ve bunun %36'sı yenilenebilir enerjiden 2707 GW elde ediliyor. Yenilenebilir enerjide, rüzgâr kurulu gücünün payı 623 GW ile %8 olmuştur. 2019 yılında dünyada toplam rüzgârdan üretilen elektrik 1423 TWh olmuştur [12-13] (Tablo 2).

Tablo 1: Dünya çapında küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji

Yıl	Durum - Gelişme	Oran
2022	Küresel enerji üretimindeki payı	%29 [13]
2025	Küresel enerji üretimindeki tahmini payı	%35 [13]
2050	Küresel enerji üretimindeki tahmini payı	%85 [12]

Küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü, geçen yıl itibarıyla ilave edilen 78 GW'la toplam 906 GW'a ulaşmıştır. 2023 içinde bu kapasitenin 1 TW seviyesine ulaşmasını bekleyen tahminler olsa da 2025'e kadar bu değere ulaşamayacağını ifade eden tahminler daha fazladır. İklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliğini artırma çalışmaları kapsamında enerji yoğun sektörlerde fosil yakıtlardan arınmak isteyen ülkelerin katkısıyla küresel rüzgâr enerjisi kurulu kapasitesinin bu yıl 1 TW seviyesine ulaşması bekleniyor. Geçen yıl küresel rüzgâr kapasitesinin önceki yıla göre %9 artmasıyla kapasite 1 TW'a yaklaşırken, kurulu güç artışındaki ivmenin devam etmesiyle 2023-2027 döneminde toplam 680 GW'ın daha küresel enerji sistemine dâhil edileceği öngörülmüyor [14].

Tablo 2: Yıllara göre dünyada toplam rüzgârdan üretilen elektrik miktarı [15]

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar
2019	Toplamda rüzgârdan üretilen elektrik miktarı	1423 TWh
2025	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	2394 TWh
2030	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	3361 TWh
2040	Toplamda rüzgârdan üretilen tahmini elektrik miktarı	5441 TWh

Piyasa koşulları, yatırım ortamı, ülkelerin yenilenebilir enerji politikalarında attığı olumlu adımlarla 2 TW'lık kurulu güce 7 yıl sonra ulaşılabileceği öngörüldürken, her yıl büyüme oranının ise ortalama %10 olacağı tahmin ediliyor [14]. Bu değer bazı tahminlere göre ise 2040'a kadar dahi ulaşılamayacaktır [15] (Tablo 3).

Tablo 3: Dünya çapında rüzgâr enerjisi gücü

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2019	Toplam kurulu güç kapasite durumu	623 GW [15]
2010-2020	Rüzgâr enerjisi sektörünün küresel olarak büyümesi	4 kat artış [16]
2020	CO ₂ emisyonunu dengeleme miktarı	1,1 milyar ton CO ₂ [16]
2020	Küresel elektrik üretimindeki payı	%5 [19]
2020	Toplam kurulu güç kapasite durumu	744 GW [17]
2021	Toplam kurulu güç kapasite durumu	828GW [14]
2022	Toplam kurulu güç kapasite durumu	906 GW [14]
2023	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1TW [18]
2027	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1680GW [18]
2030	Toplam kurulu güç kapasite durumu	2TW [18]
2025	Toplam kurulu güç kapasite durumu	978 GW [15]
2030	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1299 GW [15]
2040	Toplam kurulu güç kapasite durumu	1914 GW [15]
2050	Küresel elektrik üretimindeki tahmini payı	%30 [19]

WindEurope Yıllık İstatistik Raporu, Avrupa'da rüzgâr enerjisi açısından önümüzdeki beş yıllık görünümü de içeren rapor, AB'nin tüm ihtiyaçlarına ve 2030 hedeflerine karşın rüzgâr kurulu gücündeki artışın yeterli olmadığını ortaya koyuyor. Zorlu ekonomik ortam ve tedarik zinciri zorluklarına rağmen 2022 yılı, bir önceki yıla göre %4'lük bir artışla Avrupa'daki kurulumlar için rekor bir yıl oldu. Buna rağmen, kurulum miktarı, 2022 yılı için gerçekçi beklenti senaryosunun %12 altında kaldı ve bu durum, AB'nin iklim ve çevre hedeflerini karşılamak için gereken oranların oldukça altında kaldığını göstermektedir. AB'nin 2023-2027 yılları arasında yılda ortalama 20 GW yeni rüzgâr çiftliği kurmasının beklendiği de hesaba katılırsa (Tablo 4), ortaya çıkan sonuçlara göre AB, 2030 hedeflerine ulaşabilmek için yılda ortalama 30 GW'ın üzerinde yeni rüzgâr santrali inşa etmek zorundadır [18].

Tablo 4: AB'deki rüzgâr enerjisi sektörü

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2021	Yeni rüzgâr kurulumlarının kara oranı	%87 [18]
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı	19,1 GW [18]
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı -Karada	16,7 GW [18]
2022	Yeni rüzgâr kapasitesi miktarı -Denizde	2,5 GW [18]
2022	Toplam rüzgâr kapasitesi	255 GW [18]
2022	Rüzgâr enerjisi üretimi	489 TWh [18]
2022	Elektrik talebi	2830 TWh [18]
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerinin tahmini enerji katkısı	129 GW [18]
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerinin karadaki payı	%75 [18]
2023-2027	Yeni rüzgâr çiftliklerinin tahmini yıllık ortalama enerji katkısı	20 GW [18]
2030	Küresel elektrik üretimindeki tahmini payı	%30 [20]

3.TÜRKİYE'DEKİ YENİLENEBİLİR ENERJİ SEKTÖRÜ VE ENERJİDE YERLİLİK

Türkiye’de 2020 yılından 2035 yılına kadar elektrik enerjisi bilgileri Tablo 5’de verilmiştir. 2020 yılında kurulu güç içinde %52,0 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2035 yılına kadar %64,7’ye ulaşması hedeflenmiştir. 2000-2020 döneminde yıllık ortalama %3,1 oranında artış göstermiş olan birincil enerji tüketimi, 2020-2035 döneminde %2,2 düzeyinde artması beklenmektedir.

Tablo 5: Türkiye elektrik enerjisi [15-21]

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2000-2020	Birincil enerji tüketimi yıllık ortalama artış oranı	%3,1
2020	Elektrik kurulu gücü	95,9 GW
2020	Kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%52,0
2020	Kişi başı birincil enerji tüketimi	2,1 tep/kişi
2020	Birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%16,7
2020	Yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%42,4
2020	Elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%11,7
2022	Bir önceki yıla göre Türkiye elektrik enerjisi tüketimi oranı değişimi	-%1,2
2022	Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	328,9 TWh
2022	Bir önceki yıla göre Türkiye elektrik üretimi oranı değişimi	-%2,5
2022	Türkiye elektrik enerjisi üretim miktarı değişimi	326,2 TWh
Mayıs 2023	Elektrik kurulu gücü	104.672 MW
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı (Lisanssız santraller dâhil)	12.057
2025	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	380,2 TWh
2030	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	455,3 TWh
2035	Tahmini Türkiye elektrik enerjisi tüketim miktarı	510,5 TWh
2035	Tahmini elektrik kurulu gücü	189,7 GW
2035	Tahmini kurulu güç içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%64,7
2035	Tahmini birincil enerji tüketimi yıllık ortalama artış oranı	%2,2
2035	Tahmini elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%34,2-%54,7
2035	Tahmini elektrik kurulu gücünde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%43,5-%64,7
2035	Tahmini birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%23,7
2050	Tahmini birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%50
2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%69,1
2053	Tahmini elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%61,4

Tablodaki değerler, IEA ve Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) gibi kuruluşların öngörülleri ve AB’nin 2050 yılı Referans Senaryo çalışmasındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının payıyla uyum göstermektedir[15-19]. Türkiye ile ilgili değerler Enerji Bakanlığı tarafından belirlenmiştir. Türkiye’nin 2035-2053 yılları arası için ulusal enerji planı Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6: Türkiye ulusal enerji planı 2035 – 2053 dönemi öngörülleri [22]

Yıl	Durum – Gelişme	Oran
2035-2053	Tahmini birincil enerji arzında yerli kaynakların payı	%87
2035-2053	Tahmini birincil enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı	%50
2035-2053	Tahmini birincil enerji tüketiminde fosil kaynakların payı	- %20,8
2035-2053	Tahmini elektrik tüketimi yıllık ortalama değişimi	+ %5,2
2035-2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının payının elektrik kurulu gücü	%83,8
2035-2053	Tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi payı	%69,3
2035-2053	Tahmini nihai enerji tüketiminde elektrik enerjisinin payı	%55,6

Nükleer enerji ise 2035 yılına kadar %5,9'luk ve 2053'te ise %29,3'lük paya ulaşmaktadır. 2020 yılında %83,3 olan fosil kaynakların payı 2035 yılına kadar %70,4 olarak gerçekleşmektedir. Kömürün payı %21,4'e inerken, petrol %26,5, doğalgaz %22,5'e gerilemektedir [15-21].

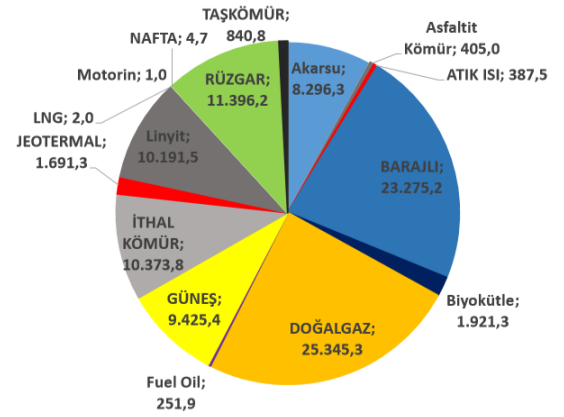
2035 yılında elektrik kurulu gücü için beklenen değerler [18];

- Rüzgar enerjisinde 29,6 GW'a,
- Güneş enerjisinde 52,9 GW'a,
- Nükleer enerjide 7,2 GW'a
- Toplamda 189,7 GW'a,

Kaynaklara göre kurulu güç-2022 ve oranları Tablo 7 ve Şekil 1 de verilmiştir.

Tablo 7: Birincil kaynaklara göre santral adetleri ve kurulu güç [21]

Birincil kaynak	Santral adedi	Kurulu güç (MW)
Rüzgâr	358	11.396,2
Jeotermal	63	1.691,3
Güneş	9.353	9.425,4
Biyokütle	384	1.921,3
Barajlı	141	23.275,2
Akarsu	610	8.296,3
Atık ısı	94	387,5
Doğalgaz	345	25.345,3
Taş kömür	4	840,8
...		
TOPLAM	11.427	103.809,3



Şekil 1: Kaynak oranları [12]

2022 yılında elektrik üretimimizin, %34,6'sı kömürden, %22,2'si doğal gazdan, %20,6'sı hidrolik enerjiden, %10,8'i rüzgârdan, %4,7'si güneşten, %3,3'ü jeotermal enerjiden ve %3,7'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 104.672 MW'a ulaşmıştır [12]. 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %30,2'si hidrolik enerji, %24,2'ü doğal gaz, %20,8'i kömür, %11'i rüzgâr, %9,6'i güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,5'i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, 2023 yılı mayıs ayı sonu itibarıyla 12.057'e (lisanssız santraller dâhil) yükselmiştir (Tablo 5). Mevcut santrallerin 751 adedi hidroelektrik, 67 adedi kömür, 361 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 346 adedi doğal gaz, 9.979 adedi güneş, 490 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir [22].

Rüzgar ve güneş gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam elektrik üretimi içindeki paylarının yükseltilmesi planlanmıştır (Tablo 8-11). Bu doğrultuda 2035 yılında kurulu güç, rüzgar enerjisinde 29,6 GW (24,6 GW kara, 5 GW deniz) düzeyine geleceği tahmin edilmektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları için kurulu güç hidroelektrik santrallerde 35,1 GW, jeotermal ve biyokütle enerji santrallerinde toplam 5,1 GW seviyesine yükselmektedir. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü 29,6 GW'a ulaşmaktadır. Söz konusu kurulu güç artışının, büyük çoğunluğu güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere, %74,3'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi için yıllık yeni kapasite gereksinimi sırasıyla ortalama 3,1 ve 1,4 GW'tır [21] (Tablo 6).

Tablo 8: Elektrik Kurulu Gücü (GW)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	13,1	18,1	29,6
Kömür	21,1	22,8	24,3
Gaz	24,2	30,3	35,5
Nükleer	2,4	4,8	7,2
Hidrolik	33,0	35,1	35,1
Güneş	17,9	32,9	52,9
Diğer	4,5	5,1	5,1
Toplam	116,2	149,1	189,7

Tablo 9: Devreye Alınan Yeni Kapasite (GW)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	4,3	5,0	11,6
Güneş	11,0	15,0	20,0
Diğerleri	2,4	2,7	0,0
Nükleer	2,4	2,4	2,4
Termik	1,5	9,2	7,0
Toplam	21,6	34,3	41,0

Tablo 10: Elektrik Üretiminde Kaynaklar (TWh)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	38,3	53,7	90,1
Termik	196,4	201,2	173,7
Nükleer	18,6	37,2	55,8
Hidrolik	81,9	87,9	87,9
Güneş	28,3	52,2	84,0
Diğer	16,7	20,5	16,2
Toplam	380,2	452,7	507,7

Tablo 11: Elektrik Üretiminde Kaynakların Payı (%)

Kaynak/Yıl	2025	2030	2035
Rüzgar	10,1	11,9	17,7
Termik	51,7	44,5	34,2
Nükleer	4,9	8,2	11,1
Hidrolik	21,5	19,4	17,3
Güneş	7,4	11,5	16,5
Diğer	4,4	4,5	3,2
Toplam	100,0	100,0	100,0

3.1. TÜRKİYE'DEKİ RÜZGÂR ENERJİSİ SEKTÖRÜ VE YERLİLİK

Türkiye, son yıllarda yapılan yatırımlarla rüzgâr enerjisi sektöründe büyük ilerleme kaydetmiştir. 2020 yılında, Avrupa'da beşinci sırada yer almıştır. Sektör hızlı bir büyüme trendi göstermektedir ve 41 inşa halindeki santral bulunmaktadır, bu santrallerin kurulu gücü 1.872 MW'ı bulmaktadır [12]. Ege ve Marmara bölgeleri, mevcut kurulu güç ve yıllık elektrik üretimi açısından öne çıkan bölgelerdir. İzmir, Balıkesir, Çanakkale ve Manisa gibi iller, toplam kurulu gücün %47,9'unu oluşturmaktadır [21]. 2022'de kurulan rüzgâr türbini sayısı 227'dir ve bu türbinlerin ortalama güçleri 3,8MW'dır. Türkiye'nin 2023 ile 2027 yılları arasında tamamı karada olmak üzere 8,15 GW kurması bekleniyor [18] (Tablo 12).

Tablo 12: Ülke başına beklenen yeni kurulumlar 2023-2027 – WindEurope'un Merkezi Senaryosu [18]

Konum/Yıl	2023		2024		2025		2026		2027	
	Kara	Deniz	Kara	Deniz	Kara	Deniz	Kara	Deniz	Kara	Deniz
Türkiye	1,000	-	1,350	-	1,600	-	1,900	-	2,300	-
Tüm Avrupa	14,500	4,960	17,750	4,370	18,920	4,710	20,950	8,430	23,290	11,560

Türkiye, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Bölgesi YEKA ihale programı kapsamında 20 projeye yayılmış 850 MW'lık rüzgâr enerjisi kapasitesi için destek aldı. Türkiye'de gerçekleştirilen YEKA RES-3 Rüzgâr Enerjisi Santrali projesi, 850 megavat (MW) kapasiteli bir rüzgâr enerjisi santrali inşa etmek ve elektrik enerjisi üretimini artırmaktır [18] (Tablo 13). YEKA RES-3 projesi, ihale tipi olarak belirli bir teknoloji olan rüzgâr enerjisi kullanımına dayalıdır. Proje, "Tarife Garantisi" adı verilen bir destek mekanizmasıyla rüzgâr enerjisi santrali işletmecilerine, ürettikleri enerji birimleri başına belirli bir tarife üzerinden uzun bir süre boyunca enerji satma garantisi sunar. YEKA RES-3 projesinde belirtilen fiyat aralığı 24 ila 45 Euro/MWh olarak belirlenmiştir ki bu projeden elde edilecek enerjinin birim fiyatını ifade eder [21] (Tablo 14).

Tablo 13: Türkiye'deki rüzgâr enerjisi sektörü [12-21]

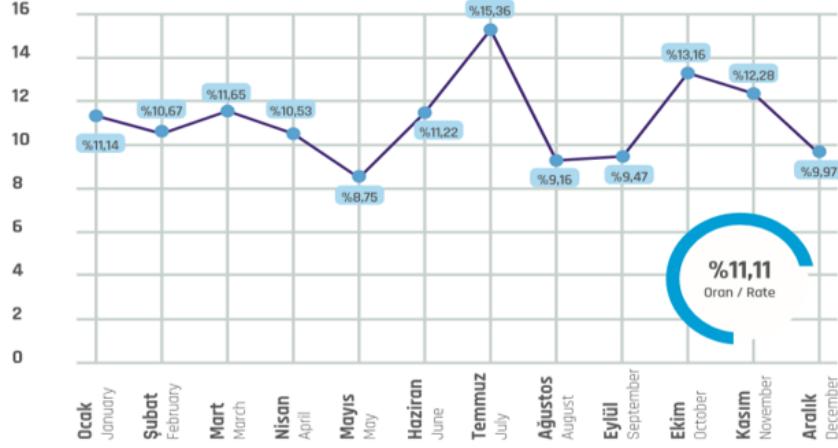
Yıl	Durum - Gelişme	Miktar- Oran
2020	Toplam enerji kurulu gücü	95891 MW
2020	Yerli kaynaklı toplam enerji kurulu gücü	69170 MW
2020	Yenilenebilir enerji kaynaklı enerji kurulu gücü	49582 MW
2020	Rüzgar toplam kurulu gücü	8832 MW
2020	Küresel elektrik üretimindeki payı	%8
2020	Yatırım miktarı	1.6 milyar avro
Mayıs 2021	Rüzgar toplam kurulu gücü	9305 MW
Mayıs 2021	Rüzgâr tesisi miktarı	239 santral
Mayıs 2021	Rüzgar türbini sayısı	3,591 türbin
Mayıs 2021	Rüzgâr türbini kanadı sayısı	10,773 kanat
Kasım 2022'e	Toplam kurulu güç	103541,20 MW
Kasım 2022	Toplam kurulu güç artışı	58,80 MW
Kasım 2022'den	Artış sonrası toplam kurulu güç	11.365,60 MW
Kasım 2022'den	Toplam gücün payı	%10,98
2022	Elektrik üretimimiz rüzgâr enerjisinin payı	%10,8
2022	Kurulan türbin sayısı	227
Mart 2022	Toplam kurulu güç	10.851,84 MW
Mart 2023	Toplam kurulu güç	11.426,32MW
Mart 2022	Toplam kurulu güç oranı	%10,82
Mart 2023	Toplam kurulu güç oranı	%10,95
Mart 2022	Toplam üretim miktarı	9068868 MWh
Mart 2023	Toplam üretim miktarı	8700844 MWh
Mart 2022	Toplam üretim oranı	%10,95
Mart 2023	Toplam üretim oranı	%11,20
Mayıs 2023	Elektrik üretimimiz rüzgâr enerjisinin payı	%11
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı (Lisanssız santraller dâhil)	12.057
Mayıs 2023	Elektrik enerjisi üretim santrali sayısı rüzgâr tesisi	361

Tablo 14: Türkiye'nin rüzgâr enerjisine dayalı kurulu güç gelişimi ve yerlilik oranları [22]

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2017-2022	Elektrik üretiminde yerli kaynakların payı	%45'ten %58'e
2017-2022	Elektrik kurulu gücünde rüzgar kurulu gücü	8,8 GW → 29,6 GW
2017-2022	Elektrik kurulu gücünde deniz üstü rüzgar kurulu gücü	0'dan 5 GW
2017-2022	Enerji kaynaklarında yenilenebilir kaynakların payı	%42,4 → %54,8
2017-2022	Yenilenebilir kurulu gücünün payı	%52,0 → %64,7
2017-2022	Yenilenebilir kaynaklarda yerli kaynakların payı*	%56,9 → %65,0
2020	Elektrik kurulu gücünü	95.891 MW
2020	Rüzgar enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz	8.832 MW
2020	Devreye alınan kurulu gücün yerlilik oranı	%63,5 (6917 MW'lık)
2020	Devreye alınan kurulu gücün yenilenebilir kaynaklar oranı	%51,7 (49582 MW'ı)
2022	Elektrik kurulu gücünü	187.000 MW
2022	Rüzgar enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz	10.976 MW
2022	Rüzgâr enerjisinin toplam kurulu güç içerisindeki oranı	% 10,81
2022	Devreye alınan kurulu gücün yerlilik oranı	86%
2022	Devreye alınan kurulu gücün yenilenebilir kaynaklar oranı	81%
2022	Mevcut rüzgar ve güneş kurulu gücünün devreye alınma oranı	52%
2022	Rüzgarın ve güneşin günlük elektrik üretimdeki payı	95.891 MW
2022	Elektrik kurulu gücünün(187GW) yenilenebilir kurulu gücünün payı	8.832 MW
2022	Birincil enerji tüketimi; yenilenebilir kaynakların payı	%63,5 (6917 MW'lık)

*Yerli Doğal Gaz Üretimi Hariç

Türkiye’de 2023’ün ilk 3 ayında yalnızca 55 MW’lık, son iki ayda ise 150 MW’lık yeni kurulum yapılması ve ayrıca küçük çaplı projelere göre finansman bulmakta daha fazla zorluk yaşayan YEKA’ların yavaş yavaş bu sorunu çözmeleriyle birlikte ülkemizde rüzgâr santrallerinin elektrik üretimindeki payının daha da artması bekleniyor [2] (Şekil 2).

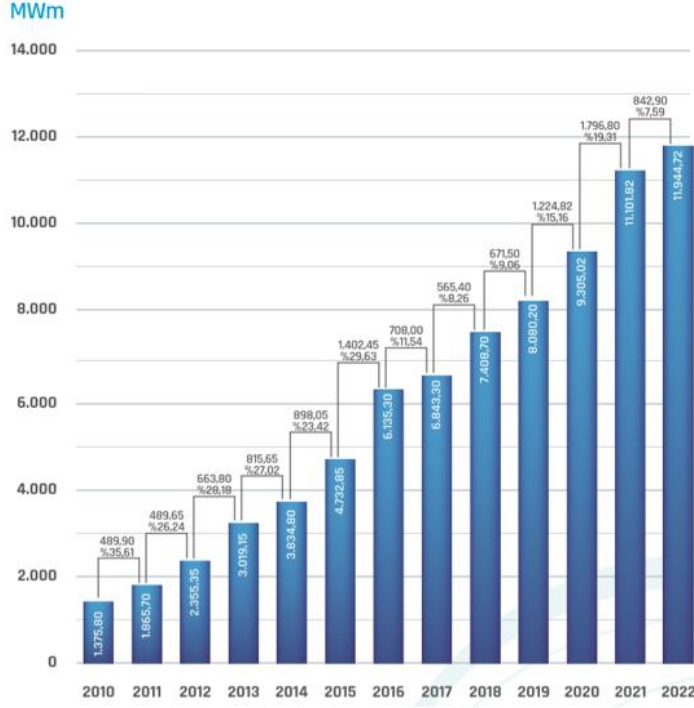


Şekil 2: Türkiye’de 2022 yılında Rüzgar Santrallerinin Elektrikli Üretimindeki Payı [2]

Türkiye’nin rüzgâr gücü Covid-19’un başlangıcından beri 3.274 MW, 2021 yılında ise 1.774 MW artış ile 11000 MW seviyesine ulaştı (Şekil 3). İnşa halinde ise 2000 MW’lık bölümü YEKA projelerinden olmak üzere, toplamda 5000 MW’lık proje bulunuyor. Bunlara ilave olarak da 2000 MW düzeyinde hibrit projenin çalışmaları yürütülüyor. TÜREB öngörüsüne göre bu proje stokunun yaklaşık 3000 MW’lık bölümü gelecek iki yıl içinde devreye girebilecek ve 4-5 yıl içinde devreye girecek projelerin toplam yatırım tutarı ise 3 milyar dolara ulaşacaktır [23].

Türkiye’de şu anda ön lisansı alınmış ve önümüzdeki aylarda ön lisansını almayı bekleyen yaklaşık 25 bin MW’lık yeni rüzgar kapasitesi mevcuttur ve bu kapasitenin 3 yıl içerisinde proje geliştirme süreçlerini tamamlayarak önümüzdeki yıllarda devreye girmeye başlayacağı öngörülmektedir. Türkiye, kapasite artışlarıyla 2026 sonrası için de ciddi bir sıçrama yaşayabilir [24]. Türkiye, 2030 yılına kadar 18,1 GW ve 2035 yılına kadar da 29,6 GW rüzgar enerjisi hedefi belirlemiştir. Karada ve denizde olmak üzere bir ayırım yoktur, ancak 2030 yılına kadar kurulacak rüzgâr santrali kapasitesinin tamamının karada olması bekleniyor. 18,1 GW hedefi, Türkiye’yi 2030 rüzgâr enerjisi hedefleri için Avrupa’nın ilk 10 ülkesi arasına sokmaktadır [18].

2023’te ilk dört aydaki artış 658 MW oldu. Türkiye’nin birincil kaynaklara dayalı elektrik üretim kapasitesi Nisan ayı sonu itibarıyla 104,524 MW’a yükseldi. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verilerine göre bu gücün 658 MW’lık bölümü 2023’ün ilk dört aylık döneminde devreye girdi (Tablo 14). Güneş enerjisi yatırımları 445 MW ile bu dönemde devreye giren güç içinde en büyük paya sahip olurken, ikinci sırada 74 MW ile biyokütle yatırımları, üçüncü sırada ise 60 MW ile rüzgâr enerjisi yatırımları geldi. Nisan ayı sonu itibarıyla hidroelektrik santrallerinin kurulu gücü 31.588 MW’a, rüzgâr enerjisi santrallerinin gücü 11.456 MW’a, güneş enerjisi santrallerinin gücü ise 9.931 MW’a yükseldi [2] (Tablo 15). Şubat 2023 kurulu güç verilerine göre toplam kurulu gücümüz 104.140,43 MW oldu ve rüzgâr kurulu gücü 11.404,96 MW ile toplam gücün %10,95’ini oluşturmaktadır [22].

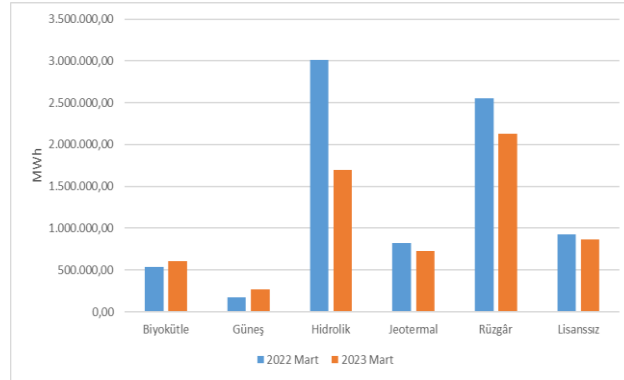


Şekil 3: Türkiye'deki Rüzgâr Enerjisi Santralleri için Kümülatif Kurulum [2]

2023 Nisan Ayı Kurulu Güç Raporunda Öne Çıkan Bazı Bilgiler: EPIAŞ tarafından yayınlanan Nisan 2023 Elektrik Piyasaları Aylık Raporu'na göre, Türkiye'nin elektrikte kurulu gücü 104.487 MW'a ulaştı ve elektrik üretimi Mart ayına göre 2.412 MWh azalarak 23.562 MWh olarak gerçekleşti (Şekil 4). Elektrik üretim santrallerinin kurulu güçleri kaynak bazında incelendiğinde, ilk sırada 50.729 MW ile doğal gaz yer aldı. Ardından 46.560 MW ile hidroelektrik, 22.878 MW ile rüzgâr yer aldı.

Tablo 15: 2023 Rüzgâr Enerjisi [21]

Ay	Rüzgâr	Toplam (MWh)
Ocak	2,694,713	26,832,115
Şubat	2,874,773	24,135,320
Mart	3,033,850	25,937,221
Nisan	2,364,822	24,001,889



Şekil 4: Mart 2023 Döneminde YEKDEM Kapsamındaki Üretimin Kaynaklara Göre Dağılımı ve 2022 Yılı Mart Ayı Değeriyle Karşılaştırılması (MWh) [21]

3.2. RÜZGÂR TÜRBİNİ KANATLARININ ÜRETİMİ VE YERLİLİĞİ

Rüzgâr türbini kanatları; kalıp, cam veya karbon elyaf iplikleri ile dokunmuş çok eksenli kumaşlar (yüzey kaplama malzemesi), dolgu malzemesi (köpük, balsa ağacı vb.) , reçine (epoksi veya polyester esaslı), sertleştirici kimyasal maddeler, paratoner sistemi, rotor göbek bloğu bağlantı elemanları vb. birçok girdiden oluşur. 2000’li yıllardan sonra Türkiye’de rüzgâr enerjisi sektörünün başlangıç yıllarında genel olarak hammadde tedariki ithal girdiydi. 2010’dan sonra ciddi enerji ve sanayi politikaları desteğiyle 10 sene içerisinde önemli yatırımlar gerçekleştirildi (Tablo 16). Rüzgâr enerjisi, Türkiye’de elektrik üretim kapasitesinin yaklaşık yüzde 11’ine ulaşarak önemli bir paya sahip hale geldi. Ülkede toplamda 11.400 megavatı aşan rüzgar enerjisi kapasitesi, 47 farklı ilde bulunan santrallerden oluşmaktadır. Rüzgar enerjisi sektöründe, 1754,9 megavat ile en büyük kurulu güce sahip il olan İzmir, aynı zamanda ekipman üretimi alanında da öne çıkmaktadır. İzmir, 3 farklı firmaya ait 4 kanat üretim tesisi ile bu alanda öncü konumdadır. Kentte yaklaşık 22 yıldır devam eden kanat üretimi, 6.000’in üzerinde doğrudan istihdam yaratmaktadır. Bu üretim faaliyeti, 700 milyon doların üzerinde ciro ve 500 milyon doları aşan ihracat geliri sağlamaktadır. İzmir’de yılda yaklaşık 4.000 kanat üretilmektedir ve üretimin yüzde 75’ten fazlası yurtdışına ihraç edilmektedir [25].

Hem dünyada hem ülkemizde, verilerle de ifade edilmiş olan artan enerji ihtiyacının karşılanması noktasında, ülkemizde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum derecede faydalanmak için devlet politikalarıyla önemli girişimlerde bulunmaktadır. Öngörülebilir bir piyasa yapısının sağlanması ve enerjimizin milli ve yerli teknolojilerle üretilmesi için Milli Enerji ve Maden politikası çerçevesinde yatırımlar tüm hızıyla devam etmektedir. Bununla ilgili olarak; 10/05/2005 tarihinde 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin bir kanun yayımlanarak tüm yenilenebilir kaynaklar için üst sınır bedel üzerinden alım garantisi getirilmiştir. 2011 yerli aksam yönetmeliği; ‘Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Enerjisi Üreten Tesislerde Kullanılan Yerli Aksamın Desteklenmesi Hakkında Yönetmelik’ başlığıyla yayımlanmıştır [22].

Tablo 16: Ülkemizde yerlilik durumu [22]

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
2020	Rüzgârdan elde edilen enerjiye devlet desteği	7,3 USD-cent/kWh
2020	Yerli aksamlı rüzgâr tesislerinden elde edilen enerjiye devlet desteği	9,40 USD cent /kWh
2022	RES kurulumunda yerlilik oranı	%60
2022	Rüzgar enerjisi ekipman üreticisi	16 üretici firma

Ülkemizin enerji üretiminde yerli kaynak kullanımını artırmak, enerjide dışa bağımlılığını azaltmak, cari açığın azaltılmasına yardımcı olmak ve yerli üretim kabiliyeti geliştirilerek kullanılan ekipmanları da ülke içerisinde üretmek amaçlanmıştır. Bu desteklerle birlikte jeneratörü, kanadı, kuleyi ve bağlantı elemanlarını üretir duruma gelinmiştir. 2013’ten 2020 yılına kadar 16 üretici firma rüzgar ekipman üreticisi olarak hizmet vermekte ve ihracat gerçekleştirmektedir. YEKDEM ödemelerin de çoğu, rüzgar enerjisi kapsamındadır ve türbinler için bakanlık tarafından belirlenmiş asgari puanlar bulunmaktadır. Asgari puan şartıyla elde edilen bu yerleşme oranında yaşanabilecek düşüşlerin önüne geçilmesi ve asgari kazanımların korunması istendi. RES asgari puan şartı toplamda 35’tir (Tablo 17). Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından Resmî Gazete’de yayımlanan tebliğ ile projelere destek sağlanması için rüzgâr enerjisinde ise lisanssız yatırımlarda kullanılacak kanat, jeneratör ve türbinlerin yerli üretim olması şartı getirildi. Tebliğ ile ilgili kararın “Teşvik belgesi kapsamında değerlendirilmeyen harcamalar” başlıklı 8’inci maddesi şu şekildedir; f) Lisanssız faaliyet kapsamında ve bağlantı anlaşmasındaki sözleşme gücü ile sınırlı olmak kaydıyla rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretimi yatırımları kapsamında yurt dışından temin edilecek kanat, jeneratör ve türbinler [22].

Tablo 17: Yerli rüzgâr enerji sektörümüzle ilgili bazı sayısal veriler durumu [22]

Yıl	Durum- Gelişme	Miktar - Oran	
2020	Rüzgâr Türbini kanat üretici firma sayısı	4 adet	
2020	Firmaların kanat üretim kapasitesileri	3500 üzeri adet/yıl	
2020	Kanatlarda yasal yerli katkı oranını	%65 (yerli malı belgesi kapsamında)	
2020	Kanatlarda yerlilik	%52 - % 80	RES asgari puan şartı
2020	Kanatların maliyet içerisindeki payları	% 22	10
2020	Kulenin maliyet içerisindeki payları	%26	10
2020	Bağlantı Elemanları maliyet içerisindeki payları	%1	
2020	Jeneratör maliyet içerisindeki payları	%3,5	15
2020	4 ekipmanın maliyet içerisindeki toplam payları	%53	
2020	%53'lük 4 ekipmanın yerli üretilebilirlik oranı	%50	

Yerli olarak cam ve karbon elyaf üretimiyle beraber 2020'de kanatların üretiminde yerli girdi şartı konulmuştur. 2021 yılında rüzgâr enerjisi sektörünün yalnızca elektrik üretimi alanında değil, türbin ve ekipman üretimi gibi alanlarda da Türkiye ekonomisine önemli katkı sağlamamış ve halihazırda sektörün sağladığı toplam istihdam 25 bin çalışana ulaşmıştır. Bununla birlikte sektör doğurduğu üretimin %80'lik bölümünü ihraç ederek Türkiye ekonomisine yıllık 1,5 milyar Avroluk önemli bir katkı sağlamıştır [26]. Sektörün üretimi 1GW üzerinde olup ihracat payı da büyüktür ve gittikçe üretim kapasitesi daha da büyümektedir.

Türkiye'deki kompozit sektörü, orta ve büyük ölçekli 180 şirket ile kısmen kompozit işi yapan 700-800 şirketin yanı sıra yaklaşık 12.500 çalışanıyla katma değeri yüksek ürünler üreten bir sektör konumundadır. Türkiye'deki kompozit malzeme pazarı 1,5 milyar Avro değerinde ve 280.000 tonluk bir hacme ulaşmış durumdadır. Sektör, Türkiye'de Avrupa ve dünya genelindeki büyüme oranının üzerinde, yaklaşık %8-12 aralığında büyümeye devam etmektedir. Türkiye'nin kompozit sektöründe kişi başına düşen tüketim miktarı, dünya ortalamasının altında olduğunu göstermektedir. Dünyada kişi başına düşen tüketim miktarı 4-10 kg arasında değişirken, Türkiye'de bu miktar 3,0 kg'dır. Türkiye'deki kompozit malzeme fiyatları, dünya ortalamasının altında yer almaktadır. Dünya genelinde ortalama fiyat seviyesi 6,9 €/kg iken, Türkiye'de bu seviye 5,3 €/kg'dır (11. Kalkınma Planı Kimya Sanayii Çalışma Grubu Raporu, 2018) [27].

Kompozit endüstrisinde en sık kullanılan takviye malzemeleri cam elyafı (% 87) ve karbon elyafı (% 11) olup, bu malzemelerin üretimi ülkemizde gerçekleştirilmektedir. Türkiye'de üretilen cam elyaf miktarı ülkenin ihtiyacını karşılamamaktadır. 2019 yılında kullanılan cam elyaf miktarı 90.000 ton iken yerli üretim bu miktarın yarısını karşılamaktadır. Kalan ihtiyaç ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Talepteki artışlar nedeniyle yerli üretimin artması gerekmektedir. Karbon Elyaf Üretiminde ise pandemi döneminde uzay ve havacılık sektöründeki talep azalırken rüzgâr santrallerine olan talep artmıştır. Bu durum karbon elyaf tedarikinde sıkıntıya neden olmuştur [27].

Reçine türleri arasında ise doymamış polyester reçinesi ve vinil ester reçine üretimi yerli kaynaklarımız tarafından karşılanırken, epoksi reçineler ve termoplastik reçineler ithal edilmektedir. Kompozit üreticilerinin ihtiyaç duyduğu kimyasal hammaddelerin tamamı ithal edilmesine rağmen, ülkemizde üretilen takviye malzemeleri ve reçinelerin ihracatı teknik tekstiller ve bitmiş ürünlerle dış ticarete denge sağlanmaktadır. Türkiye'de reçine üretimi için kurulu kapasite 310.000 ton, 2019 yılında ise toplam üretim 150.000 tondur. Firmaların %80'i yurtiçine, %20'si yurtdışına satış yapmaktadır. Bu kapasite Avrupa Birliği'nin tüm reçine ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir [27].

4. RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI MALZEMELERİNİN GERİ DÖNÜŞÜM AÇISINDAN İNCELENMESİ

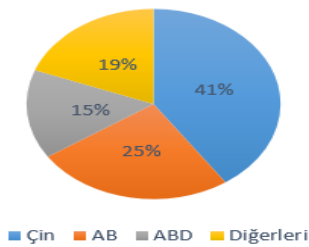
Kompozit malzemelerin büyük rüzgâr türbinlerinde kullanılması, enerji üretim maliyetini düşürmüştür [28]. Rüzgâr türbinlerinin kurulumundaki artış nedeniyle türbin kanadı kaynaklı kompozit atık miktarının gelecekte önemli ölçüde artması beklenmektedir çünkü türbinin metal parçaları kolayca geri dönüştürülebilirse de elyaf takviyeli polimer kompozit esaslı parçaları ise geri dönüşüm zorlukları oluşturup kompozit atık miktarını artırır. Ayrıca türbin kanadı atıkları genellikle atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değer kazandırılmamaktadır [19]. Avrupa’da 34.000’den fazla türbin 15 yaşından daha eski durumdadır. ABD’de ise her yıl yaklaşık 8.000 rüzgâr türbini kanadı kaldırılıyor ve bu eğilimin 2025’e kadar devam etmesi bekleniyor; AB’de ise yılda yaklaşık 3.800 kanat kaldırılıyor [20]. Türkiye’de ise 239 santralde 3.591 rüzgâr türbini bulunmaktadır ve her bir türbinde 3 kanat olduğu düşünülürse toplamda 10.773 kanat mevcuttur. Rüzgâr türbini kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12-15 ton arasında değişmektedir [12] (Tablo 18). Avrupa’da yıllık toplam cam elyaf takviyeli termoset kompozit atık miktarının 2025 yılında 683 kton’a ulaşması bekleniyor ve bu toplamın yaklaşık %10’unu (66 kton), rüzgar türbini atığı oluşturacağı düşünülüyor [28].

Tablo 18: Rüzgâr türbini kanatları

Yıl	Ülke-Topluluk	Durum - Gelişme	Miktar– Oran
2018’den itibaren	ABD	Yıllık kaldırılan rüzgâr türbini kanadı sayısı	8.000 [20]
2018’den itibaren	AB	Yıllık kaldırılan rüzgâr türbini kanadı sayısı	3.800 [20]
2019	Küresel ölçek	Kompozit atık miktarı	185.000 ton [12]
2025	AB	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	66.000 ton [29]
2033’den itibaren	Küresel ölçek	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	200.000 ton [30]
2039 yılında	Küresel ölçek	Tahmini kompozit atık miktarı	8,8 milyon ton [12]
2050 yılına kadar	Küresel ölçek	Tahmini toplam kompozit atık miktarı	43,4 milyon ton [10]
2050’den itibaren	Küresel ölçek	Tahmini yıllık kompozit atık miktarı	2 milyon ton [10]
2050 yılında	AB	Tahmini kompozit atık miktarı	325 kton [10]
2050 yılında	AB	Tahmini kompozit atık miktarı	495 kton [31]
2050 yılına kadar	ABD	Tahmini birikmiş kompozit atık miktarı	2,2 milyon ton [10]
2050 yılına kadar	ABD	Tahmini toplam kompozit atık miktarı	3,3 milyon ton [10]
2050 yılına kadar	Kanada	Tahmini toplam kompozit atık miktarı	275 kton [32]

Amerika Birleşik Devletleri’nde, 2050 yılına kadar birikmiş atık miktarının 2,2 Mt olacağı (Şekil 6) ve üretimden kaynaklanan atıklar, arıza nedeniyle kanat değiştirme ve yeniden çalıştırma dikkate alındığında artan maliyetlerle bunun 3,3 Mt’a çıkacağı tahmin ediliyor (Tablo 19). Teksas’ın en fazla atığı (450 ktonun üzerinde) biriktireceği tahmin ediliyor, ardından New York, California ve Iowa geliyor [32- 33]. Kanada’da ise 2050 yılına kadar kümülatif atık miktarının 275 kton olduğu tahmin edilirken, Ontario (111 kton) ve Quebec’in (80 kton) en fazla atığı biriktireceği tahmin ediliyor [32] (Tablo 20).

Kompozit Atık Oranları



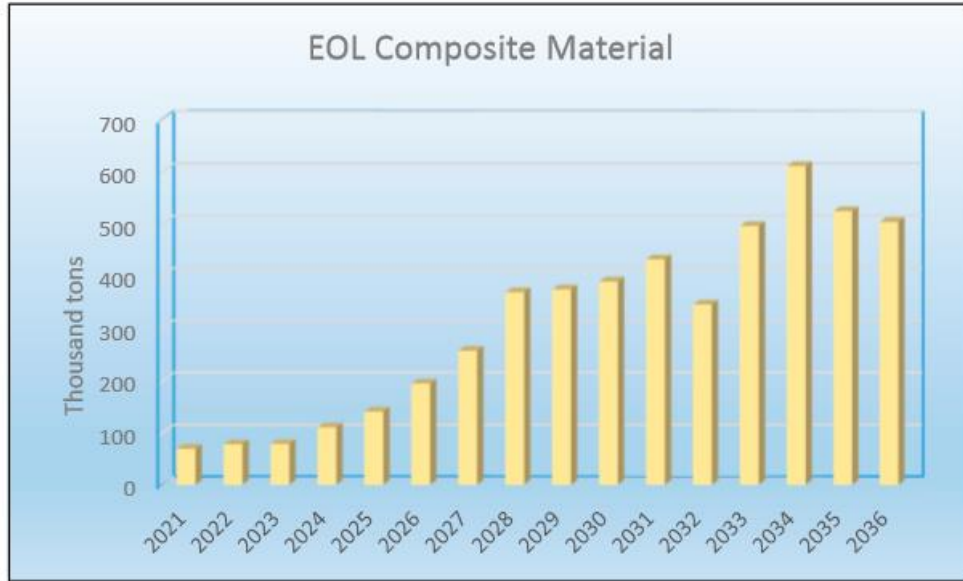
Tablo 19: ABD’ de yıllara göre enerji maliyeti [16]

Yıl	kWh maliyet değeri
1980 - 2000	40 ABD sent
2000 - 2010	3,5-4 ABD sent
2020 -	2,25 ABD sent

Şekil 6: 2050’de ülkelere göre beklenen türbin kanadı atığı oranları [31]

Kompozit atık birikimi, yılda biriken yaklaşık 62.000 ton kullanılmamış ömür sonu (EoL) ve karbon fiber takviyeli polimerlerin üretim atığı ile yeni kompozitlere olan talebi aşıyor. Havacılık ve rüzgar enerjisi sektörleri bu israfa önemli ölçüde katkıda bulunuyor. Yalnızca havacılık sektöründe, geri dönüştürülmediği takdirde 23.360 ton EoL karbon fiber takviyeli kompozitlerin 2035 yılına kadar birikeceği tahmin edilmektedir ve rüzgar enerjisi sektörü de özellikle cam elyaf hususunda önemli bir ivmeyle onu takip etmektedir (Şekil 7). 2050 yılına kadar ise her iki sektörden Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'dan önemli miktarlarda birikmiş karbon fiber takviyeli kompozit atığı bekleniyor [33].

Kompozitlerin kullanımı yaygınlaştıkça, çeşitli uygulamalardan her yıl karbon ve cam elyafları içeren büyük miktarlarda kompozit atık birikmektedir. Çevreye zarar vermeyen, uygun maliyetli geri dönüşüm yöntemleri bulmak çok önemlidir [34]. Türbin kanadı atıkları genellikle atık depolama sahalarına gönderilmekte ve ekonomik değer kazandırılmamaktadır. Rüzgâr türbinlerinin hızlı kurulumu nedeniyle türbin kanadı kaynaklı kompozit atık miktarının gelecekte önemli ölçüde artması beklenmektedir. 2000'li yıllarda kurulan birçok rüzgar türbini, 2020 ile 2030 yılları arasında kullanım ömürlerinin sonuna ulaşacak ve bu da çok sayıda türbinin hizmet dışı bırakılmasına neden olacaktır [35].



Şekil 7: Rüzgâr enerjisi endüstrisinden 2036 yılına kadar beklenen kompozit malzeme atığı hacmi [4]

2030 yılına kadar yenilenebilir enerji sektöründen yaklaşık 500.000 ton karbon ve cam elyaf kompozit atığın var olacağı tahmin ediliyor. Son on yılda, karbon ve cam elyaf termoset kompozitlerin geri dönüşüm yöntemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Tablo 20). Bu çalışmalar mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm tekniklerine odaklanmış ve her yöntemin ekonomik ve çevresel etkilerini değerlendirmiştir. Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozit malzemelerin atık yönetimi ve Kullanım Ömrü Sonu (EoL) ile ilgili ciddi sorunlar olduğu tespit edilmiştir. Bu malzemelerin biyolojik olarak parçalanamaz olması, çevresel etkileri ve toplum üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle birçok ülkede endişe yaratmaktadır.

Cam fiber takviyeli kompozitler (GFRC), rüzgâr türbini kanatlarında birincil malzeme olarak tanımlanmaktadır [7]. Bu nedenle, Fiber Takviyeli Polimer atıklarını yönetmek için tercih edilen yöntem, döngüsel ekonomi bağlamında onları yeniden kullanmaktır. Cam fiber takviyeli kompozitler, rüzgâr türbini kanatlarında birincil malzeme olarak

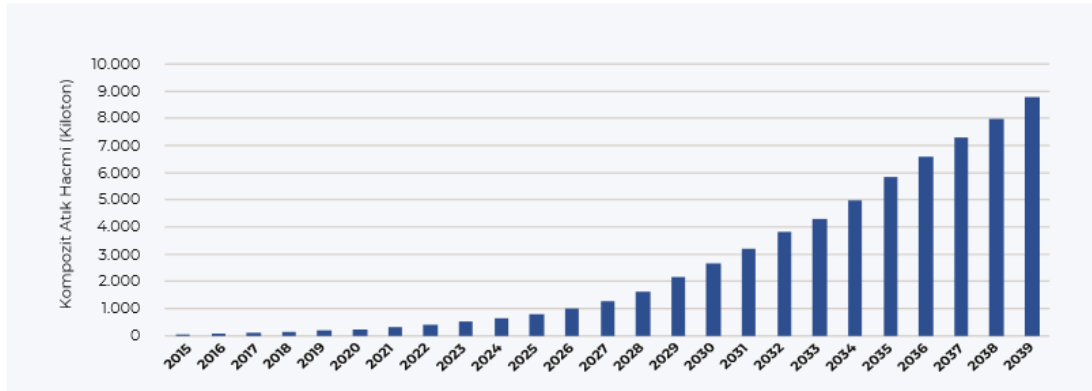
tanımlanmaktadır. 2000 yılındaki kurulu kapasiteye göre, cam fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı 50.000 ton idi. 2010 yılında, keskin bir artışla 130.000 tona çıktı ve miktar giderek artıyor. Bugün rüzgâr enerjisi kanatlarında GFRC kullanımı 150.000 ton civarındadır [36] (Tablo 20).

2017 yılında ve sonrasında, özellikle rüzgâr enerjisinde kısa ömürlü uygulamalar için endüstriyel üretim hurdası ve ömrünü tamamlamış (EoL) karbon elyafı kompozitler dramatik bir şekilde arttı. Uygun geri dönüşüm yöntemleri benimsenmezse, yalnızca uçak ve rüzgar türbini endüstrilerinden kaynaklanan yıllık CFRP (Karbon fiber takviyeli kompozit) atık birikiminin 2050 yılına kadar 840.300 tona ulaşacağı tahmin edilmektedir - bu, 34 tam stadyuma eşdeğerdir [37].

Tablo 20: IEA'nın göre Dünya Enerji Görünümü raporuna 2019 Dünya toplam enerji kurulu gücü

Yıl	Durum - Gelişme	Miktar
2017	Plastik atık üretimi	348 milyon ton [10]
2050		1,4 milyar ton [10]
2024 - 2034	Kompozit atık miktarı	200.000 ton [5]
2019	Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan kompozit atık miktarı	185 bin ton [12]
2039		8,8 milyon ton [12]
2000	Cam fiber takviyeli kompozitlerin rüzgâr türbini kanatlarındaki kullanım miktarı	50.000 ton [38]
2010		130.000 ton [38]
2020		150.000 ton [38]

Kanat malzemesi atıklarının kullanımı 2020'de 1.000.000 tondan 2030'da 2.000.000 tona çıkması, bir başka deyişle, son on yıl içinde iki katına kadar çıkması bekleniyor. Bu EoL atıklarının dörtte birinin Avrupa'da olacağı tahmin edilmektedir ve küresel çapta geri dönüşüm daha da acil bir mesele haline gelmiştir [6-10]. Günümüzde rüzgar türbinlerinin toplam ağırlığının yaklaşık %85 ila 90'ı geri dönüştürülebilir. Şu anda küresel çapta rüzgar enerjisi sektöründe yaklaşık olarak 2,5 milyon ton kompozit malzeme kullanılmaktadır. WindEurope'a göre, 2025 yılına kadar hizmetten çıkarılması planlanan yaklaşık 14.000 kanat (yaklaşık 40.000–60.000 ton) olacaktır. Bu eski kanatların geri dönüştürülmesi rüzgâr endüstrisi için en önemli önceliktir [34] (Şekil 8).

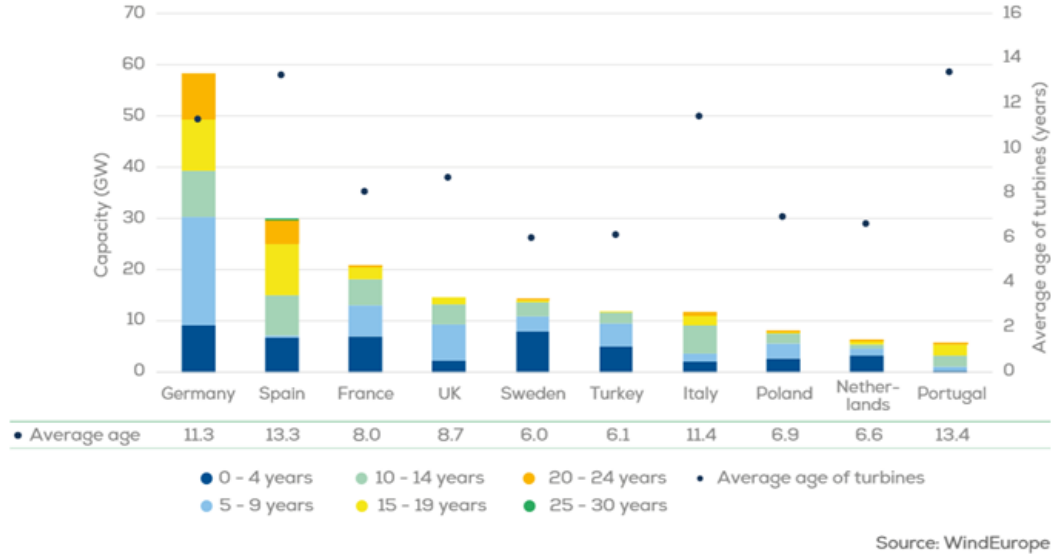


Kaynak: FutureBridge, 2020

Şekil 8: Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanacağı tahmin edilen küresel kompozit atık hacmi [34]

Bunun yanı sıra, pandemiden sonra da uçakların parçalanması sayısındaki artış atık kompozit miktarı daha da artmıştır. Karbon ayak izini büyüten atık oluşumunu ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için geri dönüşüm ve CE (döngüsel ekonomi) modellerine olan ihtiyaç daha da artmıştır. Sonuç olarak, AB'nin 2025'ten itibaren atık

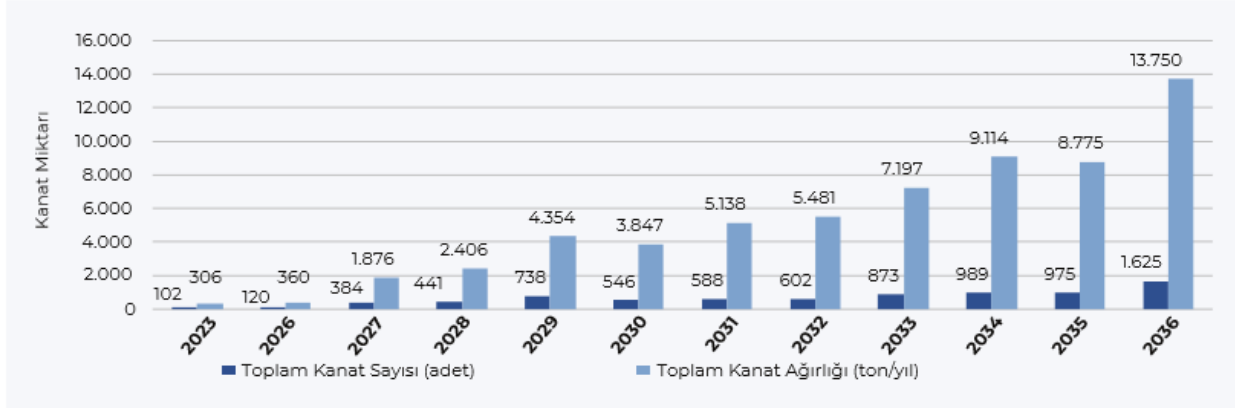
depolama yasağını yürürlüğe sokmaya karar vermiştir [39]. Avrupa'nın önce rüzgâr türbini kanadı atığı sorunuyla yüzleşmesi bekleniyor. Toplanma bölgesi açısından Avrupa'daki atıkların çoğu Almanya'da, diğer önemli miktarları ise İspanya, Finlandiya, İsveç, Fransa, Birleşik Krallık, İtalya ve Romanya bölgelerinde toplanması beklenmektedir [31]. Avrupa'nın karadaki rüzgâr çiftliklerinin çoğu planlanan işletim ömürlerinin sonuna yaklaşıyor. Şu anda, Avrupa'nın mevcut rüzgâr santrallerinin 14 GW'lık kapasitesi 20 yılı aşkın bir süredir çalışıyor ve 2030 yılına gelindiğinde ise 78 GW'lık bir kapasite 20 yıldan daha uzun bir süre çalışmış olacaktır. Ortalama olarak, Danimarka, İspanya ve Portekiz en eski rüzgâr filolarına sahiptir. Almanya, 15 yıldan daha eski, 17 GW ile potansiyel olarak yeniden güçlendirilebilecek en büyük kurulu güce sahiptir [18] (Şekil 9).



Şekil 9: Türbin yaşları ve kapasiteleri [7]

Türkiye'de 3.591 rüzgâr türbini ve toplamda yaklaşık 10.773 kanat mevcut bulunmaktadır. Rüzgâr kanadında kullanılan kompozit malzeme miktarı MW başına 12-15 ton arasında değişmektedir. Türkiye'de ömrünü tamamlayacak rüzgâr türbini kanatlarının özellikleri hakkında bilgi eksikliği bulunmasından kesin bir ağırlık tahmininde bulunmak zordur. Türkiye'de 0,5 MW ile 4,5 MW arasında 29 farklı kapasitede rüzgâr türbini bulunmakta ve 2020 ile 2039 yılları arasında kullanımdan kaldırılacak olan 11 farklı rüzgâr türbini üreticisinin ürünleri bulunmaktadır. 2020 ile 2039 arasında kullanımdan kaldırılacak türbin kanatlarının %79'unun 3,1 MW'den daha düşük kapasiteli olduğunu tespit edilmiştir. Bu durum, gelecekte 5 MW'lık tipik bir rüzgâr türbini boyutunun benimsendiği bir dönemde, tek bir türbinden daha fazla rüzgâr türbini kanadı israfı olabileceğini de belirtmektedir. Ayrıca tüm kullanımdan kaldırılacak kanatların %33'ünün 2 MW ile 2,5 MW büyüklüğündeki rüzgâr türbinlerinden kaynaklanacağı anlaşılmaktadır [9].

Türkiye'deki rüzgâr enerji santralleri son 15 yılda artış göstermiştir ve önümüzdeki 5 yıl içinde pek çok santral 20 yaşını dolduracaktır (Şekil 10). Bu durum, rüzgâr türbin kanadı atıklarının miktarının önemli ölçüde artmasına neden olacaktır. Bu atıkların çoğunluğu İzmir, Balıkesir, Manisa, Çanakkale, Afyon ve Aydın gibi illerde yoğunlaşacaktır. Rüzgâr türbinlerinin geri dönüşüm talebi, İzmir ve çevresinde en yüksek olacaktır. Rüzgâr türbin kanatları kompozit malzemelerden yapıldığı için, diğer sektörlerden çıkan kompozit atıklar da rüzgâr türbinleriyle birlikte geri dönüştürülebilir. İzmir ve çevresindeki cam takviyeli polimer atıkları, Türkiye'deki toplam cam takviyeli polimer atıklarının yaklaşık %15'ini oluşturmaktadır ve bu atıkların da işleme gireceği öngörülmektedir. Türkiye'de toplam 12.500 ton atığın %50'si İzmir ve çevresinde depolanmaktadır ve bu atıkların olası bir tesiste işlenebileceği düşünülmektedir [12] (Tablo 21).



Şekil 10: 2023-2036 yılları arasında Türkiye’de ömrünü tamamlaması beklenen türbin kanat sayıları [12]

Tablo 21: Atık miktarı [12]

Ülke - Şehir	Yıl	Durum - Gelişme	Miktar - Oran
Türkiye	2020 - 2030	Ömrünü tamamlamış türbin kanadının yıllık miktarı	5.000 ton
Türkiye	2030 - 2035	Ömrünü tamamlamış türbin kanadının yıllık miktarı	13.750 ton
İzmir	2020	Üretim atığı depolama miktarı	4.000 ton
İzmir	2020 - 2035	Tahmini üretim atığı depolama miktarının artışı	% 10

2023 yılında gerçekleştirilen bir yerli akademik çalışmanın sonuçlarına göre, rüzgar türbini kanadı atığı yönetiminde ülkemiz için en etkili alternatiflerin belirlenmesine dair önemli bulgular elde edilmiştir. Bu çalışma, rüzgar türbini kanadı atık parçalarının farklı kullanım seçeneklerine göre önceliklerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, atık parçalarının beton malzemelerde kullanılmasının ortalama olarak en yüksek öncelikli ağırlığa sahip olduğunu ve bunu düzenli depolamanın takip ettiğini göstermektedir. Atık malzemenin enerjiye dönüştürülmesi ise en az tercih edilen seçenek olarak öne çıkmıştır. Düzenli depolamanın düşük yatırım harcaması ve teknik uygulanabilirlik açısından daha üstün olduğunu, dolgu malzemesi olarak kullanımın ise karlılık, sera gazı emisyonları, arazi gereksinimi ve erişilebilirlik kriterlerini daha ağırlıklı olarak etkilediğini ifade etmiştir. Ayrıca atıktan enerji üretimi alternatifinin yeni istihdam yaratma kapasitesi açısından diğer alternatiflere göre daha büyük bir ağırlığa sahip olduğu, geri dönüşüm seçeneğinin ise sera gazı emisyonları, su/toprak kirliliği ve sosyal kabul kriterleri açısından en olumlu şekilde değerlendirildiği belirtilmiştir [9].

Şu anda rüzgar türbini kanatlarının yapımında kullanılan üç ana malzeme olarak polimer köpük malzemesi, cam elyaf ve karbon elyaf esaslı kompozitlerdir. Köpük malzemesi (polyester, PET vb) yakılarak imha edilebilirken, diğer iki elyaf esaslı kompozit genellikle atık sahasında depolanarak veya parçalanarak bertaraf edilir. Kanatların yakılması ise birçok dezavantajı olan bir enerji geri kazanım yöntemidir. Doğası gereği cam elyafları yanıcı değildir, baca gazı temizleme sistemleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir ve yanma sürecinden kaynaklanan büyük miktardaki kalıntının işlem sonunda da ayrıca bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden yakılma işlemi yapılacaksa kanatlar kesilip parçalandıktan sonra çimento fırınlarında da yakılabilir. Mekanik olarak geri dönüştürülmüş elyafları betona dâhil edilmesi de betonun yapısal bütünlüğünü artırır [9].

Rüzgâr türbini kanadı atıkları, küresel ölçekte de genellikle düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Ancak çevreye verilen zarar ve düzenli depolama maliyetinin sürekli artması nedeniyle atık depolama, bunları bertaraf etmenin iyi bir yolu değildir. Ayrıca uzunluğu 80 m’yi aşan kırma ve depolama kanatları büyük miktarda arazi gerektirir. Atık geri dönüşüm sektörü, rüzgâr türbin kanadı atıklarının yönetimi için önemli bir çözüm olabilir. Türkiye’de geri dönüşüm tesisleri kağıt, plastik ve cam gibi atıkları geri dönüştürmektedir; fakat kanat atıkları için

henüz bir geri dönüşüm tesisi bulunmamaktadır. Avrupa'da ise rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknolojiler bulunmaktadır; ancak bu teknolojiler ticari ölçekte mevcut değildir ve fiyat-performans açısından halen uygun bir çözüm de sunmamaktadır. Bazı ülkelerde rüzgâr türbini kanatları çimento tesislerinde hammadde veya yakıt olarak kullanılmakta veya cam elyafı geri kazanmak için çalışmalar yapılmaktadır. Diğer uygulamalar arasında ise türbin kanatlarının farklı ürünlere dönüştürülmesi veya yapısal amaçlarla kullanılması yer almaktadır [12]. Özellikle rüzgar kanatlarından elde edilen cam elyaflar, mevcut mekanik veya ısıl işlem teknolojileri kullanılarak potansiyel olarak geri dönüştürülebilir ancak buna engelleyici olan bazı faktörler vardır.

Geri dönüşümü yönlendiren önemli faktörlerden biri de yönetmelikler ve standartlardır ve son dönemde bu konuda değiştirilmesi gereken hususlar üzerine tartışılmaktadır. Geri dönüşümün yaygınlaşması için esas engelin, ömrünü tamamlamış kanatların epoksi bileşenlerinin atık sahalarına konulmasına hâlâ izin verilmesi olduğu düşünülüyor. Yapılan araştırmalara göre, çok ucuz bir yöntem olması sebebiyle düzenli depolama, sürdürülebilirliği önceliğine alamayan şirketler için bu hususta ilk tercihleri olmaya devam etmektedir; bu rağmen, en basit şekilde ifade edilecek olursa bir kanadı çimento fırınında kullanmak, atık sahasına koymaktan çok daha iyidir. Bu sebeple Avrupa'daki rüzgar endüstrisi, 2025'ten itibaren düzenli depolama yasağı getirmeyi taahhüt etmiştir. Bununla birlikte, bazı ülkelerde kompozitlerin atık depolaması için oldukça yüksek vergiler getirilmiştir. Örneğin Birleşik Krallık'ta atık depolamanın 2018-2019 yılı fiyatı ton başına yaklaşık 90 avro gibi nispeten yüksek bir maliyeti vardır veya Almanya gibi diğer ülkelerde rüzgar türbini kanatlarının çöpe atılması tamamen yasaklanmıştır. Avrupa ülkeleri arasında, ekonomik koşullar, endüstriyel yapılar ve çevresel düzenlemelerdeki farklılıkları yansıtan çok çeşitli atık depolama maliyetleri ve politikalarının bulunduğunu belirtmek gerekir [40].

Bir diğer zorluk ise atıkların ayrıştırılmasıdır. Bu husus geri dönüşüm endüstrisini yönlendirecek olan yolun temelidir ve güvenilir bir tedarik zincirine ihtiyaç duyar. Bunun için güçlü mevzuatların ve kompozit üretimi yapan diğer endüstrilerin de düzenli depolama yasağı taahhüt etmeleri önemlidir. Tutarlı bir atık malzeme tedariki için yapılan bileşik atık kodu çalışmalarının sayısı daha da artırılmalıdır. Gelecek yıllarda takip edilecek yön, rüzgar kanatlarının atık malzemelerini işlemek için uygun teknolojileri ve döngüsel ekonomi yollarını araştırmak ve maliyeti en aza indirmeye odaklanarak gerekli tedarik zinciri ağlarını tasarlamak olacaktır [40].

Yerleşme ve Millileşme açısından ithalata dayalı hammaddelerle zorluk yaşayan kimya, plastik ve kompozit sektörlerinin bu zorlukları azaltmak için yeni petrokimya tesislerinin veya kimya ihtisas bölgelerinin devreye girmesi gerekmektedir. Tedarik zorluğu yaşanan cam elyaf takviye malzemesinin yerli kaynaklardan temini için gereken çabalar gösterilmeli ve kompozit sektörünün takviye malzemeleri konusunda sıkıntı yaşamaması sağlanmalıdır. Yerlilik oranı, Türkiye'deki kompozit sektörü için de önemli bir gösterge olarak kullanılabilir. Kompozit sektöründe, küresel açıdan hammadde arzında daralma, malzeme fiyatlarının yükselmesine ve girdi maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Hammadde fiyatları özellikle epoksi reçine fiyatlarında Euro bazında %40'a varan artışlar, sertleştirici fiyatlarında ise %30'a varan artışlar yaşanmıştır. Petrol Fiyatları 2020'nin Aralık ayından bu yana iki katına çıkmıştır ve ithal edilen ham maddenin maliyetini artırmaktadır. Petrokimya ürünlerine bağımlılık nedeniyle bu sektör, petrokimya ürünlerine yapılan zamlardan etkilenmektedir. Yerli kompozit sektörünün ihtiyaçlarına en uygun, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir geri dönüşüm yöntemi geliştirilmesi, sektörün büyümesine ve rekabet gücünün artmasına katkı sağlayacaktır [12].

4.1. GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİN YAPISAL AÇIDAN İNCELENMESİ

Geri Dönüşüm Teknolojileri olarak geri dönüşüm, yeniden kullanım, hizmetten çıkarma veya depolama gibi farklı EoL işlemlerine yol açar. En son Avrupa Birliği (AB) direktiflerine göre, rüzgar türbini kanatlarından elde edilen kompozit atığın geri dönüştürülmesi veya yeniden kullanılması çevresel olarak en çok tercih edilen seçeneken, düzenli depolama en az tercih edilen seçenek olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin kullanım ömürlerini ele almak için sürdürülebilir geri dönüşüm yaklaşımlarına veya alternatif rüzgar türbini kanatları

malzemelerine ihtiyaç vardır [41-42]. Kompozit atıklar için çeşitli sürdürülebilir geri dönüşüm teknikleri: mekanik geri dönüşüm (örn. kırma, öğütme, parçalama ve öğütme), kimyasal geri dönüşüm (örn. solvoliz, glikoliz ve hidroliz), termal geri dönüşüm (örn. termoliz, piroliz ve akışkan yataklı işlemler) ve hibrit geri dönüşüm teknikleri (mikrodalga destekli kimyasal geri dönüşüm gibi) yer alır. Bununla birlikte, geri dönüşüm teknolojilerinin çoğu, karbon fiberin geri dönüşümüne ve yeniden kullanımına odaklanmıştır; fiber esaslı kompozitler için en yaygın geri dönüşüm yöntemi, mekanik olarak geri dönüştürmedir [43].

4.1.1. MEKANİK GERİ DÖNÜŞÜM

Mekanik geri dönüşümü, ince malzemeler halinde öğütülen küçük parçalar elde etmek için rüzgar türbini kanatlarının ezilmesini veya parçalanmasını içerir. Bu işlem, kompozit atığı ezme, parçalama ve öğütme yoluyla tipik olarak birkaç santimetre büyüklüğünde lifli malzemeleri ve ince tozları, özellikle reçine içeriği bakımından zengin olanları küçük parçalara ayırmak için kullanılır. Ortaya çıkan malzeme, yeni plastik ürünler veya çimento üretimi için dolgu maddesi, takviye veya hammadde olarak kullanılabilir [44]. Bu geri dönüşüm tekniği uygun maliyetlidir, diğer geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla minimum enerji gerektirir ve kanat atıklarıyla ilişkili çevresel riskleri etkili bir şekilde azaltır [45] (Tablo 22).

Tablo 22: Mekanik geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	Yıl	Malzeme/Metot	Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları
<i>Mamanpush ve ark.</i> [46]	2018	Cam elyaf /farklı elek boyutlarına sahip bir çekiçli öğütücüyle	Maks. elastiklik modülü: 5,254 GPa
Sonuç: Elek boyutlarının optimize edilmesiyle mekanik geri dönüşümün uygunluğu ve sonucunda yüksek elastik modüllü cam elyaf elde etme			
<i>Rahimizadeh ve ark.</i> [47]	2020	Cam elyaf	Elastik modül=3,35GPa
Sonuç: Elastik modül: %16'lık bir iyileşme; Nihai mukavemet: %10'luk bir iyileşme, yeniden kullanım imkanı			
<i>Haider ve ark.</i> [48]	2021	Cam fiber takviyeli laminat/elekli bir çekiçli öğütücüyle	Maks. eğilme tokluğu: 1,12 J Mukavemet: 4,8 MPa
Sonuç: Geleneksel kum esaslı bileşenlere bir alternatif olarak inşaat malzemelerinde kullanım imkânı			
<i>Moslehi ve ark.</i> [49]	2021	Cam elyaf / polilaktik asit matrisle	Maks. elastiklik modülü: 4,7 GPa Dayanım: 75 MPa
Sonuç: Kanatlardaki cam elyafın mekanik geri dönüşüm parçalanması ve kimyasal işlemlerle iyileştirme			
<i>Tahir ve ark.</i> [50]	2021	Cam elyaf	Maks. çekme dayanımı: 1132,2 MPa Elastik modül: 81,2 GPa
Sonuç: 3D baskılı numunelerin modülünü önemli ölçüde iyileştirme ve olumsuz çevresel etkiyi azaltma			

İlk çalışmalar arasında yer alan Palmer ve ark. (2009)'nın geri dönüştürülmüş cam elyafı ve termosetlerin birleştirilmesi konusunda yaptıkları çalışmada %10 konsantrasyondaki kalın elyafların özenli bir şekilde ayrılmasıyla, hamur kalıplama bileşiği (DMC) darbe dayanımını arttırdığını ancak eğilme dayanımını orijinal malzemenin %3-8 kadar azaldığını görmüşlerdir [51]. Ayrıca Ribero ve ark.(2015)'in yaptıkları çalışmada GFRP'nin, özellikle ortalama 950 µm çapında ve ortalama 8 mm uzunluğunda kaba atık liflerin kullanılmasıyla polimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği kanıtlanmıştır. Sonuç olarak, %8'lik kum ikamesinin optimal konsantrasyonu üzerine, basınç dayanımında %15,3'lük bir artışa ve eğilme dayanımında %5'lik bir artışa neden olduğu bulunmuştur [52]. Son çalışmalarla beraber, çimento fırınlarında mekanik olarak öğütülmüş CTP kullanılarak organik maddeler enerji kaynağı olarak, inorganik kısımlar ise dolgu malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Çimento üretimi 1450°C sıcaklığa ihtiyaç duyar ve cam elyaf termoset reaksiyonun gerçekleştiği yerde ek enerji sağlayarak diğer yakıtlara olan ihtiyacı azaltır [53].

4.1.2 TERMAL GERİ DÖNÜŞÜM

Termal geri dönüşüm yöntemleri, kompozit atığın katı ve gaz ürünlere ayrışmasına yol açan epoksi reçinelerin yakılmasını içerir, bir başka deyişle, polimer matrisi parçalamak ve lifleri geri kazanmak için atık malzemenin yüksek sıcaklıklara ısıtılmasını içerir [54-55]. Karbon fiberler yüksek sıcaklık dirençleri nedeniyle termal geri dönüşüm için daha uygundur, cam fiberler ise termal işlemler sırasında önemli bir mukavemet kaybı (%50-%90) yaşama eğilimindedir [56]. Geri kazanılan cam elyaflar, şimdilik, işlenmemiş elyaflara kıyasla daha pahalı ve daha düşük kalitededir, bu durum termal geri dönüştürülmüş cam elyafların tekrar kullanımını genel olarak imalat sektöründe dolgu malzemesi olarak sınırlandırır [57]. Buna ek olarak, termal geri dönüşüm sırasında çatlak oluşumu ve ilerlemesi gibi cam elyaf yüzeyindeki oluşan hasarın, elyaf mukavemetinin bozulmasında önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu hasarlı tabakanın hidroflorik asit kullanılarak termal olarak zayıflamış cam elyafların gerilme mukavemetini önemli ölçüde artırabileceği görülmüştür [58]. Benzer şekilde Thomason ve ark. (2016) termal olarak geri dönüştürülmüş cam elyaflarının mukavemetinin %75'inin sıcak NaOH çözeltisi ile işlenerek geri kazanılabileceğini tespit etmiştir [59].

Genel olarak, termal geri dönüşüm prosesleri, elyafların karbon fiber ve cam fiber takviyeli kompozitlerden geri kazanılması için potansiyel çözümler sunar; ancak yüksek mekanik özelliklere sahip sürekli fiberler elde etme ve fiber yüzeyinde kömür oluşumunun etkilerini en aza indirme konusunda zorluklar devam etmektedir. Bu süreçlerin sürekli araştırılması ve optimizasyonu, kompozit malzemelerin geri dönüşümünü ilerletmek için çok önemlidir.

4.1.2.1. PİROLİZ

Piroliz bir katalizör varlığında 300 °C ila 700 °C arasında değişen sıcaklıklarda oksijen yokluğunda malzemenin ısıtılmasını içeren bir termal bozunma işlemidir ve kompozitlerde polimer matrisinin elyaflardan ayrılmasına izin verir. Bu işlem, piroliz ve oksidasyonu içeren iki aşamalı bir yöntemle liflerin geri kazanılmasına olanak tanır. Bu geri kazanılmış liflerden elde edilen kısa lifli kompozitler, işlenmemiş lifli kompozitlerle rekabet edebilir [44]. Piroliz tesisleri, "Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik" kapsamında yakma tesisleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tesisler belirlenen kurallara uymakla yükümlüdür; ancak piroliz ve diğer kimyasal geri dönüşüm teknolojilerinin iklim değişikliğine etkisi, yakma işleminden önemli ölçüde daha düşüktür [12]. Buna rağmen düzenli depolamanın daha ucuz bir seçenek olması bu teknolojinin yaygınlaşmasını zorlaştırabilir [38][60].

4.1.2.2. AKIŞKAN YATAKLI GERİ DÖNÜŞÜM

Rüzgâr türbini kanat kompozit atıklarını 450°C ila 550°C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda ve hava ısı akışı yoluyla kompozit matrisi ayrıştırmak için akışkanlaştırıcı gaz olarak havayı kullanan başka bir termal işlemdir [61]. Geri dönüştürülmüş elyafların mukavemeti, genellikle geri kazanılmış cam fiberlerin/ karbon fiberlerin mukavemetinin yalnızca %60-70'ini sergileyen, işlenmemiş elyaflara kıyasla genellikle daha düşüktür. Bu geri dönüştürülmüş ürünler, üst düzey uygulamalar için kompozitlerin geliştirilmesinde hala yeniden kullanılabilir [62]. Bu yöntem kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve 450 °C'de geri dönüştürülmüş cam elyaflarının mukavemet kaybının yaklaşık %25 olduğu, geri dönüştürülmüş karbon fiberin 550 °C'de ise mukavemet kaybının yaklaşık %50 olduğu bulunmuştur [63]. Ayrıca Pickering ve ark. (2000)'nin yaptıkları bir çalışma 22 lifli (609 g) 2770 g SMC hurdasını işleyen akışkan yataklı bir yataktan geri kazanılan ürünlerin %24'ü dolgu maddesi ve %10'u organik madde sonuç olarak 66 lif saflığına sahip 411 g lif ürünü (6,7 mm'den küçük) verdiğini gösterdi [64]. Dahası, Kennerley ve ark. (1998), atık polyester SMC üzerinde akışkan yatak etkisi üzerinde yaptıkları bir çalışma, yüksek sıcaklıkların liflerin mukavemetini %50'ye kadar azaltmasına rağmen, geri kazanılan temiz lifin, mekanik özellikler üzerinde önemli bir etki olmaksızın DMC'deki işlenmemiş liflerin %50'sinin yerini alabileceğini göstermiştir [65].

4.1.2.3. MİKRODALGA PİROLİZ

Karbon fiberi veya cam fiberi, reçine matrisinden ayırmada kompoziti 300-600 °C'ye kadar ısıtarak mikrodalga radyasyonunu kullanan bir termal geri dönüşüm işlemidir. Diğer termal yöntemlere göre liflerdeki hasarı nispeten azaltır ve nispeten düşük enerji tüketimi ile daha kısa işlem süreleri sunar [66]. Araştırmacılar, karbon elyaf takviyeli polimeri çok modlu mikrodalga rezonans boşluklar kullanarak başarılı bir şekilde ayrıştırdılar ve artırılmış O/C oranı ve mükemmel mekanik özelliklere sahip temiz ve pürüzsüz yüzeyli geri dönüştürülmüş karbon fiberler elde ettiler [67] (Tablo 23).

Tablo 23: Termal geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	Yıl	Malzeme/Metot	Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları
<i>Pender ve Yang</i> [68]	2020	Cam fiber/ akışkan yataklı geri dönüşüm	Maksimum ara yüzey kayma mukavemeti: 15 MPa
Sonuç: Sodyum hidroksit (NaOH) ile işlemenin, geri dönüştürülmüş cam fiberlerin dayanım özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmesi			
<i>Baturkin ve ark.</i> [69]	2021	Cam fiber/ piroliz: 600 °C	Bası mukavemeti: 29 MPa Eğilme mukavemeti: 6,5 MPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin beton üretimine katkı sağlaması ve kullanım potansiyelini gösterme			
<i>Smolen ve ark.</i> [70]	2022	Karbon fiber/ piroliz: 500-600 °C	Eğilme mukavemeti: 274 MPa (%35 daha yüksek)
Sonuç: Pirolizin, karbon fiberlerin mekanik özelliklerini koruması ve kompozit panellerde gelişmiş performans sergilemesi			

4.1.3. KİMYASAL GERİ DÖNÜŞÜM

Kompozit malzemelerden lifleri geri kazanmak için kimyasal depolimerizasyon veya çözündürme maddelerinin kullanımını içeren bir süreçtir. Hem liflerin hem de matrislerin geri kazanılmasına izin verir. Kimyasal geri dönüşüm işlemi, süper kritik sıvı arıtma ve solvoliz gibi teknikleri kullanır. Yine de diğer geri dönüşüm işlemlerine kıyasla yüksek enerji gereksinimleri nedeniyle kimyasal geri dönüşüm, endüstriyel ölçekte yaygın olarak uygulanmaz [71].

Solvoliz işlemleri, termal geri dönüşüm işlemlerine kıyasla daha düşük işlem sıcaklıklarına sahiptir ve lifler üzerinde kömür oluşumunu önleyebilir. Bununla birlikte, solvoliz işlemleri, özellikle yüksek sıcaklık ve basınçlarda maliyetli olabilir. Ömrünü tamamlamış rüzgar türbini kanatları için solvoliz işlemlerinin ticari uygulamaları belirlenmemiştir ve elyaf takviyeli polimer kompozitler için işlemin endüstriyel ölçekte kullanımı henüz gerçekleştirilmemiştir [44]. Solvoliz geri dönüşüm yöntemleri, geri kazanılan liflerin mekanik mukavemeti ve termal kararlılığı gibi özelliklerini etkileyebilir.

Son çalışmalarda solvent olarak süperkritik su ile solvoliz kullanarak cam ve hidrokarbonun ömür sonu (EoL) ele alınarak rüzgar türbini kanatlarının geri dönüştürülmesi incelendi. İşlem, 250 °C ile 370 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 100 ile 170 bar arasındaki basınçlarda ve ayrıca katalizör ve katkı maddelerinin kullanılmasını içerir [71]. Kritik koşullar kullanılarak solvoliz, karbon fiber takviyeli kompozit atıklarından karbon liflerinin geri kazanılması için alternatif bir yöntem olarak önerilmiştir ve polimer matrisi parçalamak ve lifleri geri kazanmak için yüksek sıcaklık ve basınçta bir solvent kullanmayı içerir [72] (Tablo 24).

Tablo 24: Kimyasal geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	Yıl	Malzeme/Metot	Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları
<i>Mattsson ve ark.</i> [73]	2020	Cam fiber/Solviliz	—
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin hammadde olarak kullanılabilme imkânı ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunabilme			
<i>Ma ve ark.</i> [74]	2021	Karbon fiber/ kimyasal geri dönüşüm	Maksimum gerilme mukavemeti:330 MPa Elastiklik modülü: 34 GPa
Sonuç: Yüksek performanslı kompozitlerin üretimi, kapalı döngü geri dönüşüm sürecinin yüksek verimliliğini inceleme, geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin mekanik özelliklerini koruması ve yeniden kullanımı			
<i>Nie ve ark.</i> [75]	2015	Karbon fiber/ erimiş potasyum hidroksitle	Çekme dayanımı:1,2 GPa Elastik modül: 70 GPa
Sonuç: Bu yöntemle elde edilen liflerin mekanik özelliklerin işlenmemiş karbon liflerinden daha düşük olduğu			
<i>Wang ve ark.</i> [76]	2015	Cam fiber/ kimyasal geri dönüşüm	—
Sonuç: Mukavemet ve elastik modülünün, işlenmemiş cam elyaflarına kıyasla yaklaşık %20 oranında azalması			

Son dönemdeki kritik çalışmalardan biri de Dr Hadigheh ve ark. (2022), malzemelerin belirli bir basınç ve sıcaklık altında bir solvent uygulamasıyla parçalanabildiği bir yöntem olan solvolizin, yüksek net kâr sağlarken karbon fiberi geri kazanabileceğini bulmasıdır. Bu çalışmada, solvoliz ve elektrokimyasal yöntemlerin de, düzenli depolama ve yakmaya göre atmosfere önemli ölçüde daha düşük CO₂ emisyonlarına yol açtığı gösterildi. Kinetik analiz çalışmaları önceden işlenmiş karbon fiber takviyeli kompozitin ek bir reaksiyon aşamasından geçtiğini ve işlenmemiş karbon fiber takviyeli kompozite kıyasla daha düşük sıcaklıklarda daha etkili bir parçalanma sağladığını ortaya koyuldu. Solvoliz ön işleminin sadece daha fazla parçalanmayı kolaylaştırmakla kalmayıp aynı zamanda geri dönüşüm esnasındaki ısı tüketimini azaltarak liflerin mekanik özelliklerini koruduğu da ortaya koymuştur. Ön işlem görmüş karbon fiber takviyeli kompozitten elde edilen geri dönüştürülmüş lifler, orijinal güçlerinin yüzde 90'ını muhafaza ederek, sadece termal bozunma yoluyla elde edilen liflerin dayanımını yüzde 10 oranında aştığı bulunmuştur. Bu yöntemi, hibrit yaklaşımlar ile bisiklet çerçevesinden ve uçak hurdasından elde edilmiş karbon fiber takviyeli kompoziti başarıyla geri dönüştürerek ispatladılar. Bu sonuçlar yalnızca kimyasal ön işlemin etkinliğini teyit etmekle kalmıyor, aynı zamanda geri dönüştürülmüş karbon fiberlerin gelişmiş mekanik özelliklerini koruduğunu ortaya koyuyor. Buna ek olarak, oksidasyonla birleştirilmiş katalitik piroliz ve piroliz gibi termal geri dönüşüm yöntemleri de yüksek ekonomik getiri sağladığı görülmüştür [77].

4.1.4. HİBRİT GERİ DÖNÜŞÜM

Modern geri dönüşüm teknolojileri, ömrünü tamamlamış kompozit atıkların etkin kullanımı için uygulanabilir ve sürdürülebilir seçenekler sunar. Bununla birlikte, rüzgar türbini kanadı kompozit bileşimine göre yüzey kusurları, fiber uzunluğu, ekipman maliyetleri ve proses uygunluğu gibi zorluklar hala mevcuttur [78] (Tablo 25).

Tablo 25: Hibrit geri dönüşüm literatürü

Çalışmaların Yazarları	Yıl	Malzeme/Metot	Geri Dönüştürülmüş Fiberlerin Test Sonuçları
<i>Cousins ve ark.</i> [79]	2019	Cam elyaf /mekanik ve termal geri dönüşüm: enjeksiyonla kalıplama	Maks. elastik modülü: 12 GPa Çekme dayanımı: 150 MPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam fiberlerin %50'sinin ve geri kazanılmış reçinenin %90'ının sırasıyla 0,28 \$/kg ve 2,50 \$/kg fiyatlardan süreçlerin potansiyel ekonomik uygulanabilirliği gösterimi			
<i>Rani ve ark.</i> [80]	2022	Cam elyaf/mikrodalga destekli bir kimyasal geri dönüşüm	Maks. çekme mukavemeti: 3025 MPa Elastiklik modülü:77.86 GPa
Sonuç: Geri dönüştürülmüş cam elyafların mekanik özelliklerini iyileşmesi ve rüzgar türbini kanadı atıklarının kullanım ömrü sonu (EoL) geri dönüşümü için uygun bulunması			

Son dönemin en dikkat çekici çalışmalarından biri de Busschen ve ark. (2021), karbon elyaflarda sıklıkla kullanılan pultrüzyon ve işleme yöntemini cam elyaf üzerinde deneyerek termoset kompozit atıkların yeni uygulamalar için yeniden değerlendirilmesine yönelik yeni bir metodoloji geliştirmeleridir. Metodları, geleneksel bir pultrüzyon prosesine dayanıyor, işlenmemiş cam elyaf fitiller bir reçine banyosundan ve belirli bir parça halinde kalıplanmak üzere bir kalıptan çekiliyor. Araştırmacılara göre bu yöntem, orijinal, geri dönüştürülmüş malzemelerin mekanik mukavemetini, direngenliğini ve suya dayanıklılığını yeni parçaya aktarmıştır. Sonuçta ortaya çıkan parçaların yeterince yüksek bir L/D oranına [uzunluk-çap oranı] sahip takviye görevi görebilen yeni bir ürün elde edilmiştir. Araştırmacılar, ekstrüzyon-pultrüzyon tekniği için ağırlıkça %70'e kadar geri dönüştürülmüş kompozitin, %30'u işlenmemiş malzeme ile kullanılabileceğini belirtiyor [81].

4.2 GERİ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİ DEĞERLENDİRME

Rüzgâr türbini kanatları ve naseller genellikle kompozit malzemelerden yapılı ve rüzgâr türbini kanatlarının yaklaşık %85 ila %90'ı geri dönüştürülebilir. Bununla birlikte, rüzgâr türbini kanatların %100 geri dönüştürülmesini sağlamak, özellikle epoksi gibi termoset reçinelerin yeniden eritilmesi ve yeniden kalıplanmasıyla ilgili olarak çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu reçineler, erimeye ve yeniden kalıplanmaya karşı dirençleri nedeniyle zorluklar yaratır [82-83]. Ayrıca elyaf üretimi, kumaş oluşturma ve reçine üretimi dâhil olmak üzere 1 kg kompozit malzeme üretmek için gereken enerjinin 111,88 MJ/kg olduğu tahmin edilmektedir. Bununla beraber geri dönüştürülmüş kompozit malzemelerin kullanımı düşünüldüğünde, dolgu malzemesinin yerini aldığı bileşenlerden 19 MJ/kg tasarruf sağladığı tahmin edilmektedir [84].

Farklı geri dönüşüm tekniklerinin değişen enerji gereksinimleri vardır ve bazı yöntemler, belirli fiber malzeme türleri için diğerlerinden daha uygundur. Diğer yapısal malzemelerle karşılaştırıldığında, karbon elyaf yüksek bir gömülü enerjiye sahiptir, yani üretim için önemli miktarda enerji gerektirir. Karbon fiberinin üretim enerjisi 183-286 MJ/kg olarak hesaplanırken, cam elyafı ve paslanmaz çelik için sırasıyla 13-32 MJ/kg ve 110-210 MJ/kg arasında değişmektedir [85-86]. Buradan yola çıkarak örnek verilirse, solvoliz, işlenmemiş cam fiber üretim enerji talebine (13-32 MJ/kg) kıyasla daha yüksek bir işleme enerji gereksinimine (21-91 MJ/kg) sahiptir, bu da solvolizi cam fiber geri dönüşümü için daha az uygun hale getirir. Piroliz ise daha düşük bir enerji gereksinimine (2,8 MJ/kg) sahiptir ve net enerji geri kazanımıyla sonuçlanabilir [84]. Cam elyafın öğütülmesi, karbon elyaf için gereken enerjinin yaklaşık %50'sini gerektirir. Çoğu türbin rotorunun, boyutları 12 m'den 80 m uzunluğa kadar değişen ve bugün bazıları daha da büyük olan üç kanadı vardır. Bu rotor kanatlarının birçoğu yakında EoL ögelerine dönüşecektir [87]. Kompozit geri dönüşüm yöntemlerinde yer alan enerji talebi, en yüksekte en düşüğe sıralanarak aşağıdaki gibidir: Kimyasal geri dönüşüm (21-91 MJ/kg); Piroliz (24-30 MJ/kg); Mikrodalga Piroliz (5-10 MJ/kg); Mekanik geri dönüşüm (0,1-4,8 MJ/kg) [88]. Çekme mukavemetini %50'nin üzerinde tutmak için en iyi yöntem piroliz gibi görünmektedir, E-modülü %100'dür ve uzun lifler sunar (Tablo 26). Bununla birlikte solvoliz en iyi yöntem olabilir, ancak çok fazla veri mevcut değildir. Akışkan yatak ve piroliz, oksidasyon ve temizleme işlemlerinin bir sonucu olarak bu hususta daha geride kalır [85].

Tablo 26: Geri kazanılan malzemenin işlenmemiş malzemeyle karşılaştırıldığında mekanik özellikleri

Çalışmaların Yazarları	Metot	Çekme Dayanımı (Yüzdeler)	E- Modülü (Yüzdeler)	Uzunluk (mm)
Palmer ve ark. [57]	Mekanik	%70	%90	0,1-6
Pickering ve ark. [64]	Akışkan Yataklı	%50	%100	5-10
Cunliffe ve ark. [89]	Piroliz	%52	%100	10-15
Oliveux ve ark. [90]	Solvoliz	%75	-	-

Teknoloji Hazırlık Düzeyleri (TRL'ler), farklı teknolojilerin olgunluğunu değerlendirmek ve aralarında tutarlı karşılaştırmalar yapmak için kullanılan sistematik bir ölçüm sistemidir. Teknolojilerin ilerlemesine ilişkin öngörüler sağlar ve ilk fikir üretiminden ticarileştirmeye kadar teknolojinin olgunluğunu değerlendirmek için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ayrıca teknoloji geliştirmenin farklı aşamalarında gerekli olan yetenekleri ve kaynakları anlamak için de uyarlanabilir [91-92]. Kompozit geri dönüşüm yöntemleri bu açıdan değerlendirildiğinde mekanik geri dönüşüm en yüksek notu alır (Tablo 27).

Tablo 27: Kullanılan farklı geri dönüşüm teknolojilerinin TRL ve atık yönetimi puanları [8]

Geri Dönüşüm Metodu	TRL	Atık Yönetim Puanları
Mekanik	9	Düşük
Piroliz	7	Düşük/ Orta
Mikrodalga Pirolizi	4	Yüksek
Akışkan Yataklı İşlemler	4 / 5	Orta
Solvöliz	5 / 6	Düşük
TRL	1- 4	Laboratuvar Ölçeği
Teknolojiye Hazırlık Seviyesi	5-7	Pilot Ölçek
NASA tarafından tanımlanmış	8-9	Ticari/Endüstriyel Ölçek

Malzeme maliyeti açısından değerlendirirsek karbon fiberin (~20 \$/kg) nominal fiyatına karşın E-cam elyafının (~2 \$/kg) nominal fiyatıyla basit bir fiyat karşılaştırması yapmak hangi malzemenin geri dönüşümünün daha değerli olduğu sorusuna tam olarak cevap veremez; çünkü cam elyafı, modern fiber pazarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır ve bu durumu çözmek için de farklı teknolojilere ihtiyaç duyulduğu açıktır. Türkiye için ise hangi yöntemin daha uygun olduğu konusu, yerli sanayinin ve talebinin özelliklerini göz önünde bulundurmaya gerektirir. Özel sektörün mevcut odak noktası, potansiyel olarak süreç maliyetinin diğer geri dönüşüm yöntemlerine göre 3-4 kat daha düşük olması gerçeğiyle bağlantılı olarak öğütme üzerinedir. Geri dönüşüm sürecini sürdürmek için beklenen minimum değer, mekanik öğütme için ton başına 90 €, akışkan yatak için ton başına 610 € ve piroliz için ton başına 540 €'dur. Piroliz ve akışkan yatağın aksine öğütme çok daha basit bir işlemdir. Çekme mukavemetini %30 oranında azaltmasına rağmen geleneksel üretimde ve çimento yapımında fayda sağlayabilir. Özel şirketler geri kazanılan malzemeyi hâlihazırda mobilya, ses bariyerleri, çatı kaplamaları ve çimento yapımında kullanıyor. Proses maliyetini karşılayacak minimum değer ton başına 90 € olup, özellikle çimento fırınlarında kullanım göz önüne alındığında, atık depolamayla rekabet edilebilir hale gelmektedir [59].

4.2. MUKAVEMET AÇISINDAN RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN ELYAFLARIN VE GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ELYAFLARIN İNCELENMESİ

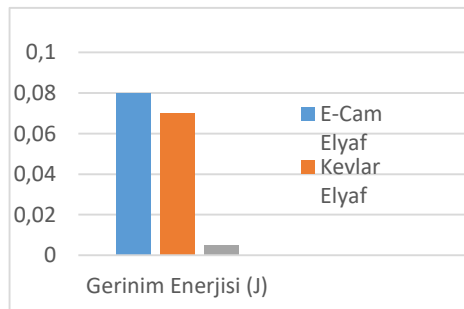
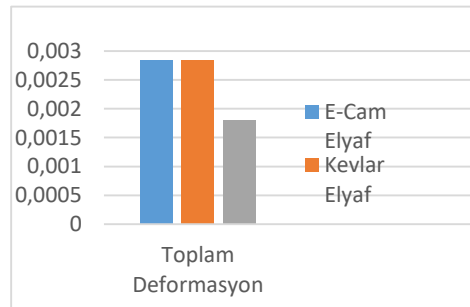
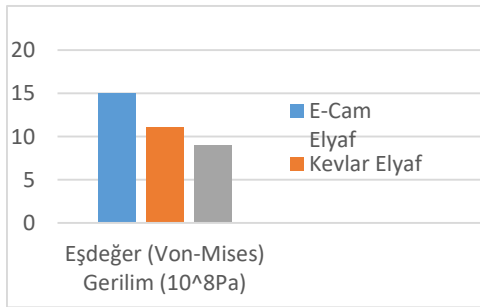
Rüzgâr türbinlerinde kullanılan geri dönüştürülmüş elyaflar, çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşır. Bu elyaflar, cam veya karbon elyafından elde edilen atık malzemelerin geri kazanılmasıyla üretilir. Geri dönüştürülmüş elyafların kullanımı, doğal kaynakların korunmasına yardımcı olur ve atık miktarını azaltır. Elyaf malzemelerin ve geri dönüştürülmüş elyafların incelenmesi, mukavemet, esneklik, dayanıklılık ve diğer önemli fiziksel özelliklerin belirlenmesini içerir. Bu incelemeler, rüzgâr türbinlerinin tasarımı ve performansı için önemli veriler sağlar. Gukendran ve ark. [93] yaptığı çalışmada klasik işlenmemiş elyaflar üzerinden E -Cam elyaf, UTS değeriyle en yüksek mukavemet gösterir, Kevlar elyaf ve Karbon Epoksi elyaf ise daha düşük mukavemete sahiptir. E-cam elyaf daha yüksek akma dayanımına ve en düşük Poisson oranına sahiptir (Tablo 28). E-cam elyaf en yüksek kırılma uzamasına sahiptir, ardından Epoksi Karbon elyaf ve Kevlar elyaf gelir. Yük altında toplam deformasyon miktarları Kevlar elyaf ve E-Cam elyaf benzerken, Karbon Epoksi elyaf ise daha düşüktür. E-cam elyaf, en yüksek maksimum kesme gerilmesine en yüksek gerinim enerjisine sahiptir, ardından Kevlar elyaf ve Karbon Epoksi elyaf gelir (Şekil 11-12-13). Sonuç olarak enerji emilimi önemli olan yüksek mukavemet gerektiren bir uygulama için E-Cam elyaf

tercih edilebilirken, hafiflik ön planda olan tokluk ve darbe dayanımı gerektiren bir uygulama için Kevlar elyaf tercih edilebilir (Tablo 29).

Tablo 28-29: Elyafların Karşılaştırılması [101]

Malzeme	E-Cam Fiber	Kevlar Elyaf	Karbon Epoksi
Özkütle (kg/mm ³)	2,57E-6	1,4E-6	1,6E-6
UTS (MPa)	3448	3000	600
Akma Dayanımı (MPa)	2050	-	94,78
Elastik Modül (GPa)	72	112	70
Poisson Oranı	0,2	0,36	0,3
% Kopma Uzaması	4,8	2,4	4,6

Malzeme	E-Cam Elyaf		Kevlar Elyaf		Karbon Epoksi	
	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min
Toplam deformasyon(m)	0,002843	0	0,002831	0	0,001807	0
Eşdeğer (Von-Mises) Gerilim (Pa)	1,5131e8	1324,7	10,9737e8	17,273	9,6602e8	21,267
Maksimum Kesme Gerilmesi (Pa)	8,7139e8	756,84	6,7563e8	9792,7	5,576e8	11,722
Gerinim Enerjisi (J)	0,087977	2,1517e-12	0,073113	2,9614e-9	0,05568	2,6767e-9



Şekil 11-12-13: Elyafların Karşılaştırılması [101]

Kevlar ve cam elyaf kanat teknolojileri için yapısal açıdan uygundur yine de kevların maliyetli oluşu fiyat/performansı düşürmektedir (Tablo 30).

Tablo 30: Elyaf tipine göre takviye karşılaştırması, yani cam, karbon, bazalt, aramid ve bunların pazar payı, maliyet aralığı ve mekanik özellikleri [45]

Elyaf Tip*	Pazar Payı [%]	Maliyet Aralığı [\$ /kg]	Çekme Dayanımı [GPa]	Elastik Modülü [GPa]
E-Cam	~%70	1,3–2,6	3,45–3,5	72,5–73,5
E-CR-Cam		1,2–3	2–3,625	72,5–83
AR-Cam		2,5–3	1,7–3,5	72–175
C-Cam		1–2,5	3,3	69
A-Cam		2–3	3,3	72
S/S-2-Cam		16–26	4,6–4,9	86–89
R-Cam		16–26	4,4	86
PAN Tipi Karbon	~%12	15–120	1,8–7,0	230–540
HS Karbon		20–120	3,31–5	228–248
IM Karbon		25–120	4,1–6	265–320
HM Karbon		25–120	1,52–2,41	393–483
UHM Karbon		30–120	2,24	724
Bazalt	~%11	5	4,84	89
Aramid/Kevlar	~%7	15–30	2,6–3,4	55–127

*Fiber türü kısaltmaları genişletildi: E-Cam [Elektrik], E-CR-Cam [Elektrik/Korozyona Dayanıklı], AR-Cam [Alkali Dirençli], C-Cam [Kimyasal], A-Cam [Alkali], S/S- 2-Cam [Mukavemet], R-Cam [Güçlendirme], HS Karbon [Yüksek Mukavemet], IM [Orta Modüllü], HM Karbon [Yüksek Modüllü], UHM Karbon [Ultra Yüksek Modüllü].

Kevlar, rüzgar kanadı sektöründe çok az çalışmada şimdilik yer edinse de Aramid ve Technora elyaf ile ilgili çalışmalara da başlanmıştır (Tablo 31).

Tablo 31: Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri [94]

Özellikler	Aramid	Technora	E-Cam	S-Cam	Yapısal Çelik	Alüminyum Alaşım 6061
Özkütle (kg/m ³)	1470	1390	2540	2540	7850	2700
Elastik Modülüs, E _x (GPa)	72,2	28,6	31	35,8	200	69
Elastik Modülüs, E _y (GPa)	72,2	28,6	31	35,8		
Elastik Modülüs, E _z (GPa)	3,35	3,35	3,35	3,35		
Poisson oranı, ν _{xy}	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,32
Poisson oranı, ν _{yz}	0,4	0,4	0,4	0,4		
Poisson oranı, ν _{zx}	0,32	0,32	0,32	0,32		

Geri dönüşüm metotları da piyasaya hâkim olan cam elyaflar üzerinden daha çok geliştirilmekte ve mekanik ve termal yöntemlerden fiyat/ performans açısından daha başarılı sonuçlar alınmaktadır (Tablo 32).

Tablo 32: Geri dönüştürülmüş GF, işlenmemiş GF' ye kıyasla korunan gerilme mukavemeti [45]

YoL Seçeneklerine göre Korunan Çekme Dayanımı	İşlenmemiş Elyafa Göre Geri Dönüştürülmüş Elyaf [%]
Mekanik	~%78
Akışkan yataklı proses	~%50
Piroliz	~%52
Kimyasal	~%58

Bir başka cam elyaf çalışmasında ise geri dönüşüm oranlarının etkisi incelenmiş ve mekanik geri dönüşüm miktarlarının da belli bir seviyeden (%50) sonra malzeme özelliklerini önemli ölçüde değiştirmeye başladığı görülmüştür (Tablo 33).

Tablo 33: İşlenmemiş ve yeniden işlenmiş PA66 GF 35'in farklı karışımlarının elastik modülleri ve dayanımları [95]

Malzeme durumu	Elastik modül (MPa)	Dayanım (MPa)	Gerinim (%)
İşlenmemiş	10.840	187,4	2,87
%25 yeniden öğütme	10.750	185,3	2,85
%50 yeniden öğütme	10.730	180,5	3,00
%100 yeniden öğütme	10.270	165,5	3,04

PA66 GF 35: poliamid 66 ağırlıkça %35 oranında E-cam elyafı içeriyordu.

Pirolizin geri kazanılan lifleri önemli ölçüde bozabilmesine rağmen, ortalama uzunluğu 20 mm olan öğütülmüş liflerin, işlenmemiş liflerinkine karşılaştırılabilecek karakteristik mukavemete sahip olduğu gösterilmiştir. Elyaf yüzey kaplamasının ILSS (arayüzey kayma mukavemeti) üzerindeki etkisi, öğütülmüş elyaflar ve PLA (polilaktik asit) arasında sırasıyla pirolize edilmiş ve işlenmemiş elyaflardan %14 ve %26 daha güçlü olan bir arayüz gösteren sonuçlarla incelenmiştir [61] (Tablo 34).

Tablo 34: Pirolize edilmiş ve işlenmemiş lifler mekanik özellikleri [61]

Özellik	Ortalama Dayanım (MPa)			Ortalama Direngenlik (GPa)		
	20	40	60	20	40	60
Ölçü uzunluğu (mm)						
Öğütülmüş lifler	1990 ± 568	1678 ± 580	876 ± 377	76 ± 13	74 ± 12	74 ± 11
Pirolize edilmiş lifler	976 ± 260	806 ± 217	679 ± 122	84 ± 12	89 ± 10	91 ± 22
İşlenmemiş lifler	2485 ± 508	2073 ± 251	1965 ± 353	71 ± 7	74 ± 9	77 ± 8

Geri dönüştürülmüş fiberlerde elde edilen sonuçlar, karşılık gelen uzunluklarda kesilmiş orijinal karbon elyaflarla karşılaştırıldı. Karbon fiberler üzerinde yapılan testler, kullanılan piroliz işleminin fiber yüzeyinde matrisin yaklaşık %2'sini bıraktığını ve fiberlerin gerilme direncinin yeni karbon fiberlere kıyasla yaklaşık %20 oranında düştüğünü göstermektedir. Araştırma sonuçları, düz kompozit plakaların üretiminde geri dönüştürülmüş karbon liflerinin kullanımının güvenilir olduğunu ve bunların mekanik özelliklerinin, karşılık gelen orijinal karbon liflerinden yapılmış plakalardan önemli ölçüde farklı olmadığını göstermektedir [70] (Tablo 35).

Tablo 35: Karbon liflerinin çekme dayanımı (MPa)

Malzeme Türü	Çekme dayanımı (MPa)									
Orijinal karbon fiber	2274	2317	2069	2088	2391	2353	2357	2147	2419	2268
Pirolize karbon fiber	2039	2044	2164	1898	1711	1829	1090	1881	1924	1842

Pirolitik fiberlere (274 MPa) sahip kompozit paneller, orijinal yeni karbon fiberlere (203 MPa) sahip benzer şekilde üretilen panellere göre %35'e kadar daha yüksek eğilme mukavemeti gösterir; bu, panellerin yaya köprüleri için elemanların üretiminde kullanılabilmesi anlamına gelir. Orijinal karbon liflerinin çekme dayanımı 2268 +/-133 MPa iken, pirolitik karbon liflerinin çekme dayanımı 1842 +/-312 MPa'dır [70]. Bu çalışmada, rüzgâr türbini kanatları ve otomotiv levha kalıplama bileşiği (SMC) iki sıcaklık adımında pirolize tabi tutuldu. Bu çok adımlı süreç, tek bir yüksek sıcaklık adımında pirolizde, geri kazanılan E-cam elyafının gerilme mukavemetinde %19'a varan oranlarda ve kırılmaya kadar uzamada %43'e varan iyileştirmeler sağladı. Bu kazanımlara rağmen, piroliz öncesi elyaf ölçümleri, önceden var olan hasarın, herhangi bir son işlem olmaksızın pirolizden geri kazanılabilen cam elyafının kalitesini doğası gereği sınırlayabileceğini göstermektedir (Tablo 36) [96].

Geri dönüşüm metodlarının yanı sıra kanatlarda en çok kullanılan cam (GF) ve karbon elyafların (CF) malzeme özelliklerinden kaynaklanan etkilerde vardır ve karşılaştırmaları önemlidir. Piroliz metodu üzerinden her iki malzeme türünü kıyaslırsak bu daha net bir şekilde görülebilir (Tablo 36).

Tablo 36: CFRC'nin pirolizinden geri kazanılan tek lifin mekanik özellikleri [38]

Referans	Elyaf	Piroliz sürecinden geri kazanılan tek lifin özellikleri					
		Çekme Dayanımı (MPa)	Direngenlik	Elastik Modül (MPa)	Kopmada uzama (%)	Lif uzunluğu (mm)	Çap (mm)
Nahil and Williams (2011)	CF	2340- 3270	—	230– 233	2.34– 3.27	—	—
	CF	910–1250	—	182– 233	0.91– 1.25	—	—
Greco ve ark.(2013)	CF	—	% 14 azalış	% 8 azalış	—	—	6.2
Stoeffler ve ark. (2013)	CF	% 680–720 artış	—	% 680 artış	% 20–35 artış	5.6	6.5
Lopez ark. (2013)	CF	2537–2544	—	210–220	—	—	6.70-7.00

Geri dönüşümü en elverişli olan cam elyafları kırılmaya karşı dayanım açısından çekme testi ile incelemek işlevsel çıktılar verir (Tablo 37). İşlenmemiş elyaf daha yüksek çekme mukavemeti ve elastik modülüne sahipken, geri dönüştürülmüş elyaf bu özelliklerde daha düşüktür. Ancak, uzunluk arttıkça her iki elyafta da çekme mukavemeti ve elastik modülünde artış meydana gelmektedir.

Tablo 37: İşlenmemiş ve geri dönüştürülmüş cam elyafların çekme testi [74]

	Ölçü uzunluğu (mm)		
	5	10	15
<i>İşlenmemiş elyaf</i>			
Çekme mukavemeti (GPa)	2,08+/-0,59	2,09+/-0,56	2,1+/-0,61
Elastik modülü (GPa)	69,2+/-13,5	70,35+/-9,89	71,1+/-13,5
<i>Geri dönüştürülmüş elyaf</i>			
Çekme mukavemeti (GPa)	1,72+/-0,59	1,64+/-0,48	1,48+/-0,46
Elastik modülü (GPa)	66,6+/-14,1	64,9+/-11,8	65,2+/-10,3

Karbon elyafın geri dönüşümünde fiyat/performans açısından ve malzeme özelliklerinin korunması hususunda Aramid elyaflara göre daha elverişli bir durumdadır. Geri dönüştürülmüş karbon fiber, çekme mukavemeti, elastik modül ve kopma gerinimi açısından işlenmemiş karbon fiber ile benzer özelliklere sahiptir. Korunmuş özellik oranları da %96-97 aralığında yüksek bir koruma sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş CF, çevresel sürdürülebilirlik açısından daha tercih edilebilir bir seçenek olabilir (Tablo 38).

Tablo 38: Karbon fiber/epoksi reçine kompozitlerinin kimyasal geri dönüşümünden önce ve sonra mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [75]

Özellik	İşlenmemiş CF	Geri Dönüştürülmüş CF	Korunmuş Özellik oranı [%]
Çekme mukavemeti (GPa)	4,07 ± 0,73	3,89 ± 0,75	96
Elastik modül (GPa)	179,27 ± 12,5	173,79 ± 15	97
Kopma gerinimi (%)	2,36 ± 0,45	2,28 ± 0,45	97

Geri dönüşüm yöntemlerine bağlı olarak elde edilen karbon fiber özellikleri biraz farklılık göstermektedir. Akışkan yatak yöntemiyle geri dönüştürülmüş CF, diğer yöntemlere göre daha düşük dayanıma sahipken, kimyasal yöntemle geri dönüştürülmüş CF, işlenmemiş CF ile aynı dayanıma sahiptir. Piroliz yöntemi ise minimal farklarla geri dönüştürülmüş CF'yi işlenmemiş CF'ye yaklaştırmaktadır (Tablo 39).

Tablo 39: RCF'lerin ve işlenmemiş karbon fiberlerin dayanımı [76]

Geri Dönüşüm Metotları	Çekme Dayanımı (GPa)	
	İşlenmemiş karbon fiber	Geri dönüştürülmüş karbon fiber
Piroliz	3,6	3,7
Akışkan yatak	4,8	3,2
Kimyasal	5,2	5,2

RCF: geri dönüştürülmüş karbon fiber.

İşlenmemiş karbon fiber genellikle diğer geri kazanım prosesleri altında elde edilen CF' lere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve Weibull şekil parametresine sahiptir. Ancak, geri kazanım prosesleriyle elde edilen CF'lerin mekanik özellikleri hala önemli bir seviyede olup, belirli uygulamalarda kullanılabilirliklerini sürdürebilirler (Tablo 40). Buna ek olarak, Akışkan yataklı süreç ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri daha yüksek koruma oranlarına sahipken, diğer yöntemlerde koruma oranları daha değişken olabilmektedir (Tablo 41).

Tablo 40: İşlenmemiş ve üç CF geri kazanım prosesinin mekanik özellikleri [77]

Özellikler	İşlenmemiş	Akışkan yatak	Mikrodalga	Kimyasal (scPrOH)
Çekme mukavemeti (MPa)	4090	3050	3260	3900
Weibull şekil parametresi	8,4	5,4	7,6	8,6
Çekme modülü (GPa)	242	243	210	230

scPrOH: süperkritik propanol.

Tablo 41: Geri dönüştürülmüş karbon elyaf, esas olarak işlenmemiş karbon elyafa kıyasla gerilme mukavemetini koruma yöntemleri ve oranları [78]

Geri Dönüşüm Metotları	Korunan Çekme Dayanımı İşlenmemiş Elyafa Göre Geri Dönüştürülmüş Elyaf [%]
Mekanik	~%50
Akışkan yataklı süreç	~%75
Piroliz	%36–93; tipik olarak, ~%80 veya daha az
Mikrodalga Destekli Piroliz	~%80
Kimyasal	%90–98; tipik olarak, ~%95 veya daha az

Piroliz ve mikrodalga piroliz yöntemleri, cam elyafın mekanik özelliklerini daha yüksek oranda koruyabilirken, akışkan yataklı ve solvoliz yöntemleri biraz daha düşük koruma sağlar. Mikrodalga piroliz ve akışkan yataklı yöntemler, karbon elyafın mekanik özelliklerini daha yüksek oranda koruyabilirken, piroliz ve solvoliz yöntemleri biraz daha düşük koruma sağlar. Genel olarak, mikrodalga piroliz yöntemi her iki elyafda da en iyi mekanik özellik korumasını sağlamaktadır (Tablo 42).

Tablo 42: Yeni elyaflara kıyasla farklı EoL seçeneklerinden elde edilen gerilme mukavemeti [78]

Yöntem	Mekanik	Piroliz	Mikrodalga piroliz	Akışkan yataklı	Solvoliz
Cam Elyaf	%78	%52	%52	%50	%58
Karbon Elyaf	%50	%78	%80	%75	%95

İşlenmemiş elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin genellikle daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 43).

Tablo 43: Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin çekme dayanımı [79]

	Çekme mukavemeti (MPa)	
	Geri dönüştürülmüş	İşlenmemiş
PP/cam	25	24
İyonomer/aramid	14	12,5
İyonomer/karbon	13	20,5

PP: polipropilen

Geri kazanılmış CFRP'nin mekanik özellikleri, işlenmemiş GFRP'nin seri üretimi ile karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu gösterir. Çekme modülü benzer seviyelerde olup, çekme uzaması geri dönüştürülmüş CFRP lehine bir avantaj sağlar (Tablo 44).

Tablo 44: Geri kazanılmış GFRP ve CFRP'nin mekanik özellikleri [80]

	Geri dönüştürülmüş CFRP	İşlenmemiş GFRP'nin seri üretimi
Çekme mukavemeti (MPa)	89,7	63,8
Çekme modülü (GPa)	5,5	5,7
Çekme uzaması	4,0	3,7

CFRP: karbon fiberle güçlendirilmiş plastik; GFRP: cam elyaf takviyeli plastik.

Geri dönüştürülmüş GF ve CF üretimi, işlenmemişlere göre daha düşük enerji tüketir. Genel olarak, geri dönüştürülmüş GF ve CF, işlenmemişlere kıyasla daha düşük maliyetlere sahiptir (Tablo 45).

Tablo 45: GF ve CF'lerin maliyeti için tahmini değerler [81]

Elyaf türü	Üretim enerjisi (MJ/kg)	Fiyat (\$/kg)
İşlenmemiş cam fiber	20–40	3,3-11
Geri dönüştürülmüş cam fiber	10–30	2,2-6,6
İşlenmemiş karbon fiber	198–594	31–63
Geri dönüştürülmüş karbon fiber	10,8–36	17–25

Yukarıdaki tablolardan da görülebileceği gibi, geri kazanım prosesleriyle elde edilen mekanik özelliklerin hala önemli bir seviyede korunmuş olması, geri dönüşüm yöntemlerinin elyafların mekanik özellikleri korunması hususunda yüksek bir koruma sağladığını göstermektedir ve bu koruma geri dönüştürülmüş elyafların çeşitli uygulamalarda kullanılabilme potansiyellerini yükseltir. Seçim yaparken, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve önceliklerine dayanan faktörlerin dikkate alınması önemlidir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş elyaflar, çevresel sürdürülebilirlik açısından daha tercih edilebilir bir seçenek olabilir. Öte yandan, GFRP ve CFRP için en uygun geri dönüşüm ve geri kazanım seçimi, yatırım, proses maliyetleri, teknolojilerin getirileri ve dönüştürülen malzemelerin karakteristik özellikleri gibi birçok hususa bağlı olduğu için bu seçimin standardize edilmesi oldukça zordur. Maliyetler ile sonuç arasında her zaman bir denge olmalı; ekonomik ve ekolojik olarak mantıklı olmak zorundadır. Geri dönüşüm sürecine çok daha fazla enerji koyarsanız, ekolojik açıdan da hiçbir anlamı yoktur. Bu nedenle, politik düzenlemelere ve ikincil pazar gelişimine bağlı olarak geri dönüşüm ve geri kazanım altyapılarını ve teknolojilerini değerlendirmek için hem küresel hem de ülkemize özgü yapılandırılmış bir analiz gereklidir [82].

4.3. ÖRNEK ALINABİLECEK ULUSLARARASI AR-GE PROJELERİ

ZEBRA projesi, Fransa merkezlidir ve rüzgâr türbini kanatları için hem kimyasal hem de mekanik geri dönüşüm yöntemlerini içerir. ZEBRA projesinin kilit yönlerinden biri, geri dönüştürülebilir bir malzeme olan termoplastik reçinesinin kullanılmasıdır. Rüzgâr türbini kanatların yapımında termoplastik reçine kullanılarak, %100 geri dönüşüm oranına ulaşma potansiyeli artırılır. ZEBRA projesinin bir parçası olarak termoplastik reçinesinden yapılmış 6,2 metrelik bir kanat geliştirildi. Bu kanat tamamen geri dönüştürülebilir ve yüksek performanslı cam elyafları içerir [97].

AIMPLAS (Plastik Teknoloji Enstitüsü) ve EROS grubu, İspanya merkezlidir ve hem mekanik hem de kimyasal geri dönüşüm operasyonlarını optimize etmek için çalışıyor. Proje hangi yöntemin uçucu organik bileşiklerden arındırılmış en saf elyafı üretebileceğini belirlemek için mevcut geri dönüşüm yöntemlerini değerlendirmeyi amaçlıyor ve atık malzemelerin verimli kullanımını destekleyen ve çevresel etkiyi azaltmayı amaçlayan döngüsel ekonomi modeliyle uyumludur [98].

Danimarka merkezli CETEC projesi, rüzgar türbini kanatlarından epoksi reçinelerin solvoliz ile ıslahına odaklanmıştır. Projenin ana hedefi, malzemeyi yalnızca yeniden kullanım için geri kazanmak değil, aynı zamanda yeni rüzgar kanatlarının üretimi için rüzgar endüstrisine yeniden entegre etmektir. CETEC projesi, solvolizi kullanarak, rüzgar türbini kanatlarında bulunan epoksi reçinelerini etkili bir şekilde parçalayabilen ve kullanılabilir bir biçimde geri kazanabilen bir çözüm geliştirmeyi hedefleyen projelerini, 2022 baharı itibariyle konsept kanıtlama aşamasına ulaştırdı ve ticarileştirilmeye hazır durumdadır. Solvoliz çözümleri, termoset kompozitlere dayanan diğer sektörler üzerinde de önemli bir potansiyele sahiptir [99].

Birleşik Krallık'taki Ulusal Kompozit Merkezi liderliğindeki SUSWIND projesi, alternatif malzemelerin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerini değerlendirmeye yönelik modeller geliştirmenin yanı sıra rüzgar türbini kanatları için yeni döngüsel tasarım yöntemlerini keşfetmeyi içeriyor. Döngüsel tasarım ilkelerini uygulayarak amaç, rüzgar türbini kanatlarının ve malzemelerinin yeniden tasarlanması, yeniden kullanılmasını ve geri dönüştürülmesini en üst düzeye çıkarmaktır [100].

Almanya merkezli bir şirket projelerinde, rüzgar türbin kanatları için kimyasal geri dönüşüm yöntemleri üzerinde çalışıyor. Amaçları, ömürlerinin sonunda rüzgar türbini kanatlarının tüm bileşenlerinin tamamen geri kazanılmasını sağlamaktır. Geri dönüşüm süreci için potansiyel çözümler olarak umut vadeden drop-in yedek reçinelerin kullanımını araştırıyor. Bu reçineler, rüzgar türbini kanatlarda kullanılan orijinal reçinenin yerine geçebilir ve kanat bileşenlerinin geri dönüşümünü ve ıslahını kolaylaştırabilir [101-102].

Güney Kore merkezli CATAACK-H projesi, karbon fiber takviyeli polimer parçalardaki epoksi bazlı reçineleri parçalamak için solventler kullanarak rüzgar türbini kanatlarının kimyasal geri dönüşümü ile ilgilenmektedir. Bu işlem, kıyılmış veya öğütülmüş lif ürünleri olarak yeniden kullanılabilen liflerin geri kazanılmasına izin verir. Firma, kürlenmiş prepreg'ler ve kullanım ömrü sona ermiş karbon fiber takviyeli kompozit parçaları gibi "daha direngen" malzemeler için toplu işlem yapabilen ikinci bir hattın kurulmasıyla geri dönüşüm operasyonlarını hızla büyütmeyi planlıyor [103].

ABD merkezli bir firmanın projesinde, rüzgar türbini kanatları dahil olmak üzere yılda 50.000 ton geri dönüşüm kapasitesine sahiptir. Piroliz süreci sayesinde, rüzgar türbini kanatları da dahil olmak üzere farklı EoL atık akışlarından %99,9 gibi etkileyici bir geri dönüştürülmüş cam elyafı (GF) saflığı elde etti. Bu yüksek saflık seviyesi, geri dönüştürülmüş cam elyafların yeniden eritilmesi için fırsatlar yaratarak, bunların işlenmemiş cam fiberlere dahil edilmesine izin verir. Malzeme döngüsünün bu şekilde kapanması, yeni cam fiber üretimine olan ihtiyacı azaltarak ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımını en üst düzeye çıkararak döngüsel bir ekonomiyi teşvik eder [104- 105].

ABD'deki IACMI (Gelişmiş Kompozit İmalatı ve İnovasyonu Enstitüsü) grubu, termoplastik epoksilerin geri dönüşümü üzerine çalışır. Geleneksel termoset reçinelerin aksine, geri dönüşüm, ısı ve asetik asit gibi hafif bir asit çözeltilisinin uygulanması yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu kimyasal geri dönüşüm yöntemi, fiber takviye ve reçine matrisleri gibi kompozitlerdeki bileşenlerin ayrılmasına izin verir. Termoplastik epoksi reçinenin çözülmesiyle, lifler geri kazanılabilir ve çeşitli uygulamalarda yeniden kullanılabilir. Bu işlem, liflerin mekanik özelliklerinin bozulmasını içerebilen geleneksel mekanik geri dönüşüm yöntemlerine bir alternatif sunar ve kompozit endüstrisinde döngüsel ekonomi ilkelerini destekler [106].

5. SONUÇ

İzmir Kalkınma Ajansı'nın yayımlanmış olduğu Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası 2023 çalışması geri dönüşüm konusunda önemli hedefler belirleyen bir rapordur [12]. Bu rapor kısaca rüzgâr türbini kanadı geri dönüşüm tesisi kurulması, yenilikçi fikirlerin hayata geçirilmesi, Ar-Ge çalışmalarının geliştirilmesi hedeflerini içerir. Bu bildiri, bu raporda konulan hedefleri, güncel mühendislik çalışmaları ve akademik literatür verileri ışığında ele alarak, hem yerli sanayimiz hem de yerli teknik bilgi birikimimiz için tutarlı ve önemli olduğuna ışık tutmuştur. Geri dönüşüm teknolojilerine sahip tesislerin kurulmasının doğuracağı istihdamın, döviz tasarrufunun ve teknik bilginin ülkemiz için faydalı olacağı aşikârdır. Buna ek olarak, bu bildiri de incelenen çalışmalar, epoksi bazlı kompozit malzemeleri, potansiyel olarak rüzgâr enerjisi ve diğer endüstrileri de kapsayan daha geniş bir döngüsel ekonomi için bir hammadde kaynağı haline gelebilme durumunu da ortaya koymaktadır.

Türkiye'de 2020 yılı sonunda kurulu rüzgâr santrallerinin gücü toplamda 9,3 GW'a ulaşmıştır. Önümüzdeki 5 yıl içinde bu rakamın 1,5 katına çıkması beklenmektedir. 2020 yılında Türkiye'de yaklaşık 40 bin ton rüzgâr türbin kanadı üretilmiştir. Bu alanda faaliyet gösteren 4 firmada 5.300 kişi doğrudan istihdam edilmektedir. Paylaşılan ve incelenen veriler sayesinde hem küresel hem de yerli rüzgâr enerjisi sektörünün büyümesinin büyük bir ivme kazandığını görebiliyoruz. Türkiye'de kullanım ömürleri bitmek üzere olan kanat sayısı fazlalığı ileride kompozit kaynaklı bir çevre kirliliğine sebep olacaktır. Son yıllardaki kompozit birikimindeki artış bize yaşanması çok muhtemel büyük bir çevre krizinin adımlarını göstermektedir. Enerji konusunun milliliği gibi kompozit üretimi ve geri dönüşümü de milli bir mesele olarak görülüp yerlileşme içine alınmalıdır. Dünya çapında yaşanacak olan büyük çevre krizi için hazırlıklar yapılmalı ve yerli çözümler geliştirilmelidir. Yerlilik oranı, Türkiye'deki kompozit sektörü için de önemli bir gösterge olarak kullanılabilir. Şu anda rüzgâr türbin kanatlarında yerlilik oranı ülkemizde %50 seviyesindedir; ancak, bu oranı daha da zorlayıcı bir şekilde %65'e çıkarmak mümkündür. Göz ardı edilemeyecek husus, yerli üretimin her zaman ucuz olmayacağı gerçeğidir; ama yerli üretimi artırarak ve yerli pazarı destekleyerek Türk sanayisinin rekabet gücünü artırılabilir.

Bu bildiri de, hem sayısal veriler hem de akademik çalışmalarla kompozit sektöründeki geri dönüşüm meselesinin yerlileşme politikalarının bir parçası olarak ele alınması gerektiği önemle vurgulanmaktadır. Türk sanayisi için ihracat kapasitesini artırmak önemli bir hedef olduğundan, bu konu da beraberinde büyük bir önem taşımaktadır. Sadece yerli pazarın ve talebin ötesine geçmek değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir yapı oluşturmak için kompozit atıkların geri dönüşümü, milli sanayi politikasının bir parçası haline getirilmelidir. Bu kapsamda, planlı bir politika oluşturulması gerekmektedir. Net hedefler belirlenmeli ve bu hedefler hem kısa hem de uzun vadeli olarak gerçekçi ve zorlayıcı olmalıdır. Bu hedeflerin belgelendirilmesi ve dökümantasyonu da önemlidir. Ayrıca uluslararası standartlara uyum sağlamak ve küresel hedefleri göz önünde bulundurmak da önemli bir adımdır.

Geri dönüşüm yöntemleri ve geri dönüştürülen malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi, ciddi bir Ar-Ge konusu haline gelmiştir. Bu alandaki Ar-Ge çalışmaları, çevresel sürdürülebilirliği artırmayı ve atık miktarını azaltarak kaynakları verimli bir şekilde kullanmayı hedeflemektedir. Son zamanlarda, yerli girdi şartının oluşturulması fikri ortaya atılmıştır ve bu kapsamda, belirlenen parçaların yurt içinde imal edilmesine zorunluluk getirilebilir. Bu önlem, yerli üretimi teşvik ederek yerel ekonomiyi güçlendirmeyi ve iş imkânlarını artırmayı amaçlamaktadır.

Enerji bağımsızlığı, rekabetçi sürdürülebilir piyasa ve küresel başarı için uzun vadeli kamu teşvikleri, iş birlikçi ekosistem ve uluslararası standartlarda fiyat/performans faktörleri büyük önem taşımaktadır. Ar-Ge teşvikleri sayesinde rekabetçi bir sektörde esneklik sağlanabilir, zamandan kazanç elde edilebilir ve israf kayda değer oranda azaltılabilir. Bu da küresel düzeyde başarı sağlamak isteyen firmalar için büyük bir avantaj sağlayabilir. Yerli kompozit sektörünün ihtiyaçlarına en uygun, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir geri dönüşüm yöntemi geliştirilmesi, sektörün büyümesine ve rekabet gücünün artmasına katkı sağlayacaktır. Türkiye için ise hangi yöntemin daha uygun olduğu konusu, yerli sanayinin ve talebinin özelliklerini göz önünde bulundurmaya gerektirir. Sektördeki tedarik zinciri, teknolojik altyapı ve geri dönüşüm tesislerinin durumu gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca çevresel etkiler, ekonomik sürdürülebilirlik ve yerli üretim potansiyeli gibi faktörler de değerlendirilmelidir. Bu nedenle, Türkiye için en uygun geri dönüşüm yönteminin belirlenmesi için daha fazla araştırma, teknolojik inovasyon ve sektörel iş birlikleri gerekmektedir.

Geri dönüşüm ile ilgili bu bildiriye incelenen hususların yerleşme politikasının bir parçası olması ve beraber gelişmesi elzemdir. Yapısal açıdan incelendiğinde geri dönüştürülmüş malzemelerin dayanımının güvenilir olacağını ve çok yönlü fayda getirecek olan geri dönüşüm tesislerinin istihdam sağlayacağını bilmek gerekir. Ekonomik tasarruf açısından ithal ürünlerin dahi geri dönüşümü ve ülkemizdeki yerli üretimleri, bu sektörün sürdürülebilirliğini sağlayacaktır ve sağlıklı bir çevre ve enerji bağımsızlığı hususlarında sektörü dışa bağımlılıktan kurtaracaktır. Sonuç olarak, kompozit sektöründeki geri dönüşüm meselesi yerleşme ve iktisadi hürriyet politikaları kapsamında ele alınmalıdır. Planlı bir politika, teşvik mekanizmaları ve net hedefler belirlenmesi bu süreçte önemli rol oynamaktadır. Dahası, uluslararası standartlara uyumlu yerli üretimin artırılması ile Türk sanayisi ihracat kapasitesini artırabilir ve küresel düzeyde daha da rekabet edebilir hale getirilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Global Wind Energy Council, 2022. Global wind report 2022. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022-screen-final-April.pdf>.
- [2] <https://tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporlari/5> (accessed June 12, 2023).
- [3] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/gecen-yil-avrupaya-gonderilen-3-ruzgar-turbini-kanadindan-biri-izmirden/2938262#>
- [4] Psomopoulos, C. S., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. C., & Pachos, P. (2019). A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials. *Recycling*, 4(1), 7.
- [5] J. Joustra, B. Flipsen, R. Balkenende, Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades, *Resour. Conserv. Recycl.* 167 (Apr. 2023).
- [6] Amaechi, C.V.; Agbomerie, C.O.; Sotayo, A.; Wang, F.; Hou, X.; Ye, J.; Job, S. Recycling of Renewable Composite Materials in the Offshore Industry. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*; Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 583–613.
- [7] Rathore, N., & Panwar, N. L. (2023). Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview. *Waste Management & Research*, 41(4), 744-759.
- [8] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Hossain, M., & Umer, R. (2023). Recycling of wind turbine blade through modern recycling technologies: Road to zero waste. *Renewable Energy Focus*.
- [9] Ozturk, S., & Karipoglu, F. (2023). Investigation of the best possible methods for wind turbine blade waste management by using GIS and FAHP: Turkey case. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(6), 15020-15033.
- [10] Liu P, Barlow CY. Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Manag* 2017 Apr 1; 62:229–40.
- [11] C. Li, J.M. Mogollón, A. Tukker, B. Steubing, Environmental Impacts of Global Offshore Wind Energy Development until 2040, *Environ. Sci. Technol.* 56 (16) (Aug. 2022) 11567–11577.
- [12] İzmir Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşümü Yol Haritası 2023, (accessed May 03, 2023).
- [13] Electricity Market Report 2023, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf>, (accessed May 03, 2023).
- [14] <https://temizenerji.org/2023/06/01/kuresel-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucunun-1-tw-seviyesine-ulasmasi-bekleniyor/>, (accessed May 03, 2023).
- [15] IEA'nın göre Dünya Enerji Görünümü raporu 2019 (accessed May 03, 2023).
- [16] P. Murdy, S. Hughes, D. Barnes, Characterization and repair of core gap manufacturing defects for wind turbine blades, *J. Sandw. Struct. Mater.* 24 (7) (Aug. 2022) 2083–2100.

- [17] Garcia, D. A., Lamagna, L., Gsänger, S., Martone, S., Rae, P., Reggiani, R., & Togni, S. (2022, September). 20th World Wind Energy Conference & Exhibition (WEEC 2022). In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1073, No. 1, p. 011001). IOP Publishing.
- [18] <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2022-statistics-and-the-outlook-for-2023-2027/>. (accessed May 03, 2023).
- [19] A. Amantayeva, E. Shehab, A. Meirbekov, A. Suleimen, S. Tokbolat, S. Sarfraz, Challenges and Opportunities of Implementing Industry 4.0 in Recycling Carbon Fiber Reinforced Composites, *Adv. Sci. Technol.* 116 (2022)
- [20] J.P. Jensen, K. Skelton, Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 97 (2018) 165–176.
- [21] https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf (accessed June 12, 2023).
- [22] Türkiye Ulusal Enerji Planı.pdf, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf
- [23] <https://yesilekonomi.com/tedarik-krizini-ruzgarda-firsata-cevirebiliriz/>. (accessed June 12, 2023).
- [24] <https://www.enerji-dunyasi.com/yayin/324/-2023-ruzgari-en-ust-seviyede-vurguladigimiz-yil-olacak-32027.html> (accessed June 12, 2023).
- [25] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/ruzgar-turbinleri-izmir-den-kanatlaniliyor/2936526#>
- [26] <https://yesilekonomi.com/ruzgar-ilk-defa-turkiyede-birincil-kaynak-oldu/> (accessed June 12, 2023).
- [27] https://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2021/06/Hammadde_Raporu_1_Mayis_2021.pdf (accessed June 12, 2023).
- [28] Uysal, A. (2008). Rüzgâr türbini kanat malzemelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi
- [29] ETIPWind. How wind is going circular - blade recycling [Internet]. ETIPWind; 2019 [accessed 2023 May 5]. Available from: <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-How-wind-is-going-circular-blade-recycling.pdf>.
- [30] K. Larsen, Recycling wind turbine blades, *Renew. Energy Focus* 9 (7) (2009) 70–73.
- [31] Lichtenegger G, Rentizelas AA, Trivyza N, Siegl S. Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste Manag* 2020 Apr 1;106:120–31.
- [32] Heng H, Meng F, McKechnie J. Wind turbine blade wastes and the environmental impacts in Canada. *Waste Manag* [Internet] 2021;133(July):59–70
- [33] Cooperman A, Eberle A, Lantz E. Wind turbine blade material in the United States: quantities, costs, and end-of-life options. *Resour Conserv Recycl* 2021 May 1:168
- [34] Lefeuvre A, Garnier S, Jacquemin L et al (2017) Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050. *Resour Conserv Recycl* 125:264–272
- [35] Sankar Karuppanan Gopalraj and Timo Kärki. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. *SN Applied Sciences*, 2(3):433, February 2020.
- [36] WindEurope–Cefic–EuCIA. Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. White Paper. May 2020. Available online: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf> (accessed on 11 November 2022).
- [37] Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. *Composites part B: engineering*, 215, 108768.
- [38] Naqvi SR, Prabhakara HM, Bramer EA et al (2018) A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resour Conserv Recycl* 136:118–129
- [39] Liang J., Li Y., Zhang J., Wang X., & Wang H. (2017). Solvolysis of carbon fiber reinforced epoxy resin waste for recovery of carbon fibers. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4225-4232.
- [40] <https://www.jeccomposites.com/news/the-intrinsic-value-of-composite-materials-at-the-end-of-their-first-life-is-so-high-we-have-to-reuse-them-says-volker-mathes-of-avk/>
- [41] J. Beauson, A. Laurent, D.P. Rudolph, J. Pagh Jensen, “The complex end-of-life of wind turbine blades: a review of the European context,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 155, p. 111847, Mar. 2022.
- [42] D. Martinez-Marquez, N. Florin, W. Hall, P. Majewski, H. Wang, R.A. Stewart, State-of-the-art review of product stewardship strategies for large composite wind turbine blades, *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* 15 (2022).
- [43] Y. Wang, A. Li, S. Zhang, B. Guo, D. Niu, A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry, *Constr. Build. Mater.* 367 (2023)
- [44] Oliveux G, Dandy LO, Leeke GA. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. *Prog Mater Sci* 2015 Jul 1;72:61–99.
- [45] A.E. Krauklis, C.W. Karl, A.I. Gagani, J.K. Jørgensen, “Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s”, *Journal of Composites, Science* 5 (1) (2021).
- [46] S.H. Mamanpush, H. Li, K. Englund, A.T. Tabatabaei, Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites, *Waste Manag.* 76 (2018) 708–714

- [47] A. Rahimizadeh, J. Kalman, K. Fayazbakhsh, L. Lessard, Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing, *Compos. Part B Eng.* 175 (Oct. 2022),
- [48] M.M. Haider, S. Nassiri, K. Englund, H. Li, Z. Chen, Exploratory Study of Flexural Performance of Mechanically Recycled Glass Fiber Reinforced Polymer Shreds as Reinforcement in Cement Mortar, *Transp. Res. Rec.* 2675 (10) (2021) 1254–1267
- [49] A. Moslehi, A. Ajji, M.-C. Heuzey, A. Rahimizadeh, L. Lessard, Polylactic acid/ recycled wind turbine glass fiber composites with enhanced mechanical properties and toughness, *J. Appl. Polym. Sci.* vol. n/a, no. n/a (Nov. 2021) 51934,
- [50] M. Tahir, A. Rahimizadeh, J. Kalman, K. Fayazbakhsh, L. Lessard, Experimental and analytical investigation of 3D printed specimens reinforced by different forms of recyclates from wind turbine waste, *Polym. Compos.* 42 (9) (2021) 4533–4548
- [51] Palmer, J.A., 2009. Mechanical Recycling of Automotive Composite for Use as Reinforcement in Thermoset Composite. University of Exeter, Ann Arbor.
- [52] Ribero, M., Meira-Castro, A., Silva, F., Santos, J., Meixedo, J.P., Fiuza, A., Alvim, M.R., 2015. Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete polymer composite materials: a case study regarding GFRP pultrusion wastes. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 417–426
- [53] Fonte, R., & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of environmental management*, 287, 112269.
- [54] Zhang J., Li Y., Chen Y., Wang X., & Wang H. (2017). Thermal recycling of carbon fiber reinforced epoxy resin waste by pyrolysis in a fluidized bed reactor: Effect of temperature and residence time on product yields and properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 1-10.
- [55] Wang X., Li Y., Zhang J., Chen Y., & Wang H. (2019). Thermal recycling of carbon fiber reinforced epoxy resin waste by fluidized bed pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1022-1030.
- [56] V. Sommer, T. Becker, G. Walther, Steering Sustainable End-of-Life Treatment of Glass and Carbon Fiber Reinforced Plastics Waste from Rotor Blades of Wind Power Plants, *Resour. Conserv. Recycl.* 181 (2022).
- [57] Thomason J, Jenkins P, Yang L. Glass fibre strength—a review with relation to composite recycling. *Fibers* [Internet] 2016 May 26;4(4):18 [accessed 2023 May 5],
- [58] Yang L, Saez ER, Nagel U, Thomason JL. Can thermally degraded glass fibre be regenerated for closed-loop recycling of thermosetting composites? *Compos Appl Sci Manuf* 2015;72:167–74.
- [59] Thomason JL, Nagel U, Yang L, Saez E. Regenerating the strength of thermally recycled glass fibres using hot sodium hydroxide. *Compos Appl Sci Manuf* 2016;87: 220–7.
- [60] M.B.A. Bashir, Principle Parameters and Environmental Impacts that Affect the Performance of Wind Turbine: An Overview, *Arab. J. Sci. Eng.* 47 (7) (2022) 7891–7909.
- [61] A. Rahimizadeh, M. Tahir, K. Fayazbakhsh, L. Lessard, Tensile properties and interfacial shear strength of recycled fibers from wind turbine waste, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 131 (Apr. 2020).
- [62] D. Åkesson, Z. Foltynowicz, J. Christeen, M. Skrifvars, Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines, *J. Reinf. Plast. Compos.* 31 (17) (2012) 1136–1142.
- [63] Yip HLH, Pickering SJ and Rudd CD (2002) Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process. *Plastics, Rubber and Composites* 31: 278–282.
- [64] Pickering, S.J., Kelly, R.M., Kennerley, J.R., Rudd, C.D., Fenwick, N.J., 2000. A fluidised- bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composite. *Compos. Sci. Technol.* 60 (4), 509–523
- [65] Kennerley, J., Kelly, R., Fenwick, N., Pickering, S., Rudd, C., 1998. The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composite by the action of fluidised bed process. *Composites Part A* 29 (7), 839–845.
- [66] Chen J, Wang J and Ni A (2019) Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 38: 567–577.
- [67] Lester E, Kingman S, Wong KH, et al. (2004) Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: a technical feasibility study. *Materials Research Bulletin* 39: 1549–1556.
- [68] K. Pender, L. Yang, Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade, *Compos. Part B Eng.* 198 (Oct. 2022).
- [69] D. Baturkin, O.A. Hisseine, R. Masmoudi, A. Tagnit-Hamou, L. Massicotte, Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 174 (Nov. 2021).
- [70] Smoleń, J., Olesik, P., Jała, J., Adamcio, A., Kurtyka, K., Godzierz, M., ... & Boczkowska, A. (2022). The Use of Carbon Fibers Recovered by Pyrolysis from End-of-Life Wind Turbine Blades in Epoxy-Based Composite Panels. *Polymers*, 14(14), 2925.
- [71] C. Mattsson, A. André, M. Juntikka, T. Tränkle, R. Sott, Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 942 (2020) 12013,
- [72] Sokoli HU, Simonsen ME, Søgaaard EG. Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites. *J Reinf Plast Compos*

- [73] Zhang C., Wu G., & Guo S. (2015). Solvolysis of carbon fiber reinforced epoxy resin waste for recovery of carbon fibers: Effect of solvents and reaction conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(6), 41367.
- [74] Ma, X., Xu, H., Xu, Z., Jiang, Y., Chen, S., Cheng, J., ... & Zhang, D. (2021). Closed-loop recycling of both resin and fiber from high-performance thermoset epoxy/carbon fiber composites. *ACS Macro Letters*, 10(9), 1113-1118.
- [75] Nie W., Liu J., Liu W., et al. (2015). Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*, 111, 247-256.
- [76] Wang Y., Cui X., Yang Q., et al. (2015). Chemical recycling of unsaturated polyester resin and its composites via selective cleavage of the ester bond. *Green Chemistry*, 17, 4527-4532.
- [77] <https://www.jecomposites.com/news/university-of-sydney-develops-recycling-method-to-address-carbon-and-glass-fibre-composites-waste/>
- [78] E. Abbate, M. Mirpourian, C. Brondi, A. Ballarino, G. Copani, Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective, *Materials* 15 (9) (2022).
- [79] D.S. Cousins, Y. Suzuki, R.E. Murray, J.R. Samaniuk, A.P. Stebner, Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades, *J. Clean. Prod.* 209 (Feb. 2019) 1252–1263,
- [80] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, S. Zafar, Development of sustainable microwave-based approach to recover glass fibers for wind turbine blades composite waste, *Resour. Conserv. Recycl.* 179 (Apr. 2022),
- [81] <https://www.compositesworld.com/articles/recycling-end-of-life-composite-parts-new-methods-markets>
- [82] L. Wang, X. Liu, A. Kolios, State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64 (2016) 195– 210.
- [83] Y. Du, S. Zhou, X. Jing, Y. Peng, H. Wu, N. Kwok, Damage detection techniques for wind turbine blades: A review, *Mech. Syst. Signal Process.* 141 (2020).
- [84] Song YS, Youn JR and Gutowski TG (2009) Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40: 1257–1265.
- [85] Pimenta S and Pinho S. Recycling carbon fiber-reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste Manage* 2011; 31: 378–392.
- [86] Shuaib, N.A., Mativenga, P.T., 2016. Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composite. *Journal of Cleaner Production* 120, 198–206.
- [87] Liu, P.; Meng, F.; Barlow, C.Y. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. *J. Clean. Prod.* 2019, 212, 1268–1281.
- [88] Kouparitsas CE, Kartalis CN, Varelidis PC, et al. Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites. *Polym Compos* 2002; 23: 682–689.
- [89] Cunliffe, A.M., Jones, N., Williams, P.T., 2003. Pyrolysis of composite plastic waste. *Environ. Technol.* 24 (5), 653–663.
- [90] Oliveux, G., Bailleul, J.-L., La Salle, E.L., 2012. Chemical recycling of glass fibre reinforced composite using subcritical water. *Composites Part A* 43, 1809–1818.
- [91] Rybicka, J., Tiwari, A., & Leeke, G. A. (2016). Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1001-1012.
- [92] Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels. White Paper, April, 6(1995), 1995.
- [93] Gukendran, R., Sambathkumar, M., Sabari, C., Raj, C. R., & Kumar, V. R. (2022). Structural analysis of composite wind turbine blade using ANSYS. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1011-1016.
- [94] Fantin Irudaya Raj, E., Appadurai, M., Lurthu Pushparaj, T., & Chithambara Thanu, M. (2023). Wind turbines with aramid fiber composite wind blades for smart cities like urban environments: Numerical simulation study. *MRS Energy & Sustainability*, 1-18.
- [95] Bernasconi A, Rossin D and Armanni C. Analysis of the effect of mechanical recycling upon tensile strength of a short glass fibre reinforced polyamide 6, 6. *Eng Fract Mech* 2007; 74: 627–641.
- [96] Ginder, R. S., & Ozcan, S. (2019). Recycling of commercial E-glass reinforced thermoset composites via two temperature step pyrolysis to improve recovered fiber tensile strength and failure strain. *Recycling*, 4(2), 24.
- [97] ‘ZEBRA project achieves key milestone with production of the first prototype of its recyclable wind turbine blade - JEC Group,’ [https:// www.jecomposites.com/](https://www.jecomposites.com/), Accessed: May. 01, 2023.
- [98] ‘AIMPLAS - Technological Institute of Plastics.’ <https://www.aimplas.net/> (accessed March. 28, 2023).
- [99] ‘CETEC initiative established to commercialize technology for full composite wind turbine blade recyclability | CompositesWorld.’ [https:// www.compositesworld.com/news/cetec-initiative-established-to-commercialize-technology-for-full-composite-wind-turbine-bladerecyclability](https://www.compositesworld.com/news/cetec-initiative-established-to-commercialize-technology-for-full-composite-wind-turbine-bladerecyclability) (accessed May. 11, 2023).
- [100] ‘SusWIND partners and supporters | National Composites Centre.’ [https:// www.nccuk.com/what-we-do/sustainability/suswind/partners/](https://www.nccuk.com/what-we-do/sustainability/suswind/partners/) (accessed May. 12, 2023).

- [101] “Siemens Gamesa Producing First Recyclable Blades for Offshore Deployment | Offshore Wind.” <https://www.offshorewind.biz/2022/05/27/siemensgamesa-producing-first-recyclable-blades-for-offshore-deployment/> (accessed May 03, 2023).
- [102] “Revolutionary Recyclable Blades: Siemens Gamesa technology goes full circle at RWE’s Kaskasi offshore wind power project.” <https://www.siemensgamesa.com/en-int/newsroom/2022/07/080122-siemens-gamesa-press-release-recycle-wind-blade-offshore-kaskasi-germany> (accessed May 12, 2023).
- [103] “CATAACK-H Showroom | CompositesWorld.” <https://www.compositesworld.com/suppliers/cataack-h> (accessed May 11, 2023)
- [104] “Carbon Rivers Makes Wind Turbine Blade Recycling and Upcycling a Reality With Support from DOE Department of Energy.” <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/carbon-rivers-makes-wind-turbine-blade-recycling-andupcycling-reality-support> (accessed May 11, 2023).
- [105] “Renewable Recycling and Composite Manufacturing | Carbon Rivers | Knoxville.” <https://www.carbonrivers.com/> (accessed May 11, 2023).
- [106] “IACMI - The Composites Institute.” <https://iacmi.org/> (accessed May 15, 2023).