



Orta ve Küçük Ölçekli Rüzgar Türbinlerinin Yaşam Döngüsü Boyutunda Sürdürülebilirliği: Literatür Taraması

Life Cycle Sustainability of Medium and Small-Sized Wind Turbines: Literature Review

Burçin ATILGAN TÜRKMEN^{1*}

¹ Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, burcin.atilganturkmen@bilecik.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3220-3817>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 6 Ocak 2022
Revizyon 1 Ağustos 2022
Kabul 1 Ağustos 2022
Online 30 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler:

*Yaşam döngüsü analizi,
Rüzgar türbini,
Küçük ölçekli rüzgar türbinleri,
Sürdürülebilirlik,
Çevresel etki*

ÖZ

Son yıllarda yenilenebilir enerji sistemlerine olan ilginin artmasıyla birlikte küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin sürdürülebilirliği konusunda çalışmalar yayınlanmıştır. Bu çalışmada, yaşam döngüsü değerlendirilmesi yöntemiyle orta ve küçük ölçekli rüzgar enerji sistemlerinin çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik yapılan bilimsel çalışmaların derlenmesi amacıyla bir literatür araştırması yapılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirilmesi enerji sistemlerinin çevresel sürdürülebilirliğini değerlendirmek ve bu alandaki kararlar ve politikalar bağlamında giderek daha önemli hale gelen bir yöntemdir. Bu araştırmada öncelikle orta ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkileri konularında 2004 yılından bu yana yapılmış olan çalışmalar taranmıştır. Bu çalışmaların çoğunluğu yalnızca dar bir gösterge aralığı göz önüne alınarak çevresel değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Daha geniş bir çevresel etki yelpazesini dikkate alan az sayıda çalışma vardır. Orta ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliklerini analiz eden çalışmaların derlenerek irdelenmesi küçük ölçekli enerji üretim sistemlerinin gelecek vizyonunun belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 January 2022
Received in revised form 1 August 2022
Accepted 1 August 2022
Available online 30 September 2022

Keywords:

*Life cycle assessment,
Wind turbine,
Small scale energy systems,
Sustainability,
Environmental impact*

ABSTRACT

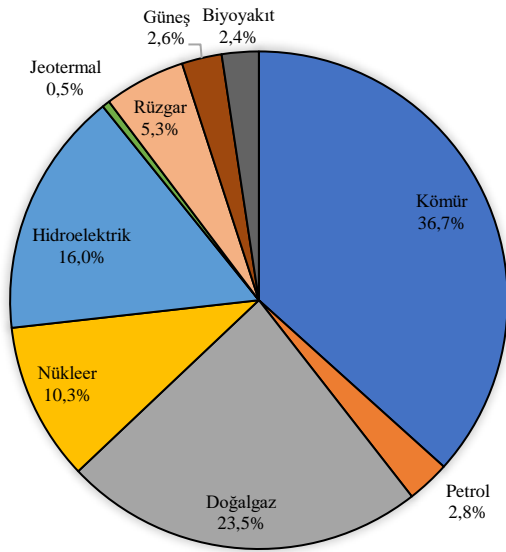
With the growing interest in renewable energy systems, studies on the sustainability of small-scale wind turbines have been published in recent years. A literature review was conducted in this study to compile scientific studies conducted to evaluate the environmental effects of medium and small-sized wind energy systems using the life cycle assessment. Life cycle assessment is a method of evaluating the environmental sustainability of a product, process, or system that is becoming more important in the context of decisions and policies in the energy sector. The environmental effects of medium and small-sized wind turbines on the life cycle size have been investigated in this study, which looked at studies conducted since 2004. The vast majority of these studies conducted environmental sustainability assessments based solely on a few environmental impact indicators such as global warming potential. There are only a few studies that consider a wider range of environmental effects. The collection and analysis of studies examining the life cycle environmental sustainability of medium and small-scale wind turbines are important for determining the future vision of small-scale energy production systems.

Doi: 10.24012/dumf.1054061

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yaşamın ekonomik, sosyal ve teknolojik gelişiminin en temel ihtiyaçlarının başında enerji gelmektedir. Artan nüfus, hızlı sanayileşme ve kentleşmeden dolayı oluşan enerji gereksinimi dünyanın kısıtlı ve tükenmekte olan enerji kaynaklarıyla karşılanamamakta ve buna bağlı olarak enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi 2019 yılında küresel elektrik üretiminin neredeyse üçte ikisi (%63,3) fosil yakıtlardan sağlanırken düşük karbonlu kaynaklardan elde edilen %36,7'lik oranın %26,3'ünü yenilenebilir enerji, %10,4'ünü ise nükleer enerji oluşturmaktadır [1].



Şekil 1. Kaynaklarına göre küresel enerji üretimi, 2019 [1].

Fosil yakıtlara olan yüksek ihtiyaçtan dolayı enerjinin nasıl üretildiği ve kullanıldığı konusundaki zorluklar küresel boyuttaki en büyük sorunlardan biridir. Enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtların karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) gibi sera gazı emisyonlarını yoğun biçimde atmosfere salması küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine sebep olmaktadır [2]. Ayrıca bu kaynakların sınırlı miktarda kalmaları ve gelecekte tükenecek olmaları, insanları tükenmeyen alternatif enerji üretim yollarına yöneltmiştir [3].

Yenilenebilir enerji, günümüzdeki artan enerji ihtiyacının yerli ve doğal kaynaklarla karşılanarak sürdürülebilir enerji kullanımının sağlanması ve enerji tüketimi sonucunda oluşan çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından önemli bir yere sahiptir. Doğal kaynaklardan elde edilebilen ve tükenmeyen yenilenebilir enerji kaynakları başlıca güneş, hidroelektrik, rüzgar, jeotermal, biyokütle, dalga ve hidrojen enerjileri olarak sınıflandırılmaktadır [4]. Bunlar arasında hızlı gelişen ve tükenmekte olan fosil kaynaklarla rekabet edebilen enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri rüzgar enerjisidir.

Rüzgar Enerjisi

Rüzgar, güneş enerjisinin dolaylı şeklidir. Bu enerji türü sürekli olarak güneş tarafından yenilenir ve yer yüzeyinin güneş tarafından ısıtılmasından kaynaklanır. Rüzgar enerjisi çevre dostu, enerji güvenliğini sağlayabilecek ve fosil yakıtlara dayanan geleneksel enerjiye bir alternatiftir. Rüzgar enerjisi elektrik üretiminde önemli bir role sahiptir. Rüzgar santralleriyle üretilen elektriğin miktarı da her geçen gün artmaktadır [5].

Rüzgar çevre dostu ve tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlere rüzgar türbinleri denir. Bu sistemler rüzgardaki kinetik enerjiyi ilk önce mekanik enerjiye sonrasında ise elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [6].

Rüzgar türbinleri temel olarak kuruldukları yere, güçlerine, kanat sayılarına, dönme eksenlerine, devirlerine ve dişli özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Rüzgar türbinleri karada ve deniz üstünde kurulabilirler. Karada kurulan rüzgar türbinlerinin kurulumu daha kolay ve maliyeti deniz üstünde kurulan rüzgar türbinlerine kıyasla daha azdır. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre yatay eksenli rüzgar türbinleri, düşey eksenli rüzgar türbinleri, eğik eksenli türbinler olarak üç gruba ayrılırlar. Yatay eksenli rüzgar türbinleri en çok kullanılan türbindir. Bu rüzgar türbinlerinde dönme eksenini rüzgar yönüne paralel olurken kanatlar ise rüzgar yönüne diktir. Düşey eksenli rüzgar türbinleri ise rüzgarı tam tersi yönde yakalayan iki ya da üç kanatlı düşey pervaneden oluşmaktadır [7, 8]. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin avantajları, jeneratörün zemin seviyesinde bulunması ve kuleye ihtiyaç duyulmamasıdır. Düşük rüzgar hızı ve verim ise eksi yönleridir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri ise yüksek rüzgar hızından dolayı daha verimlidir. Düşey eksenli rüzgar türbinleri düşük rotor veriminden ötürü tercih edilmemektedir [8, 9].

Bir rüzgar türbini genel olarak jeneratör, kule, elektrik ekipmanları, dişli kutuları, pervane kanadı ve gövdesi (rotor) ile temelden oluşur. Rüzgarın kinetik enerjisi rotorda mekanik enerjiye dönüştürülürken rotor milinin dönme hareketi ile gövdede bulunan jeneratöre aktarılır. Jeneratör kısmından elde edilen enerji ise akülerle depolanarak veya doğrudan elektrik alıcılarına iletilir [7, 10].

Küçük Ölçekli Rüzgar Türbinleri

Büyükliklerine göre rüzgar türbinlerinin net bir sınıflandırılması yapılmamıştır. Genel olarak kabul edilen sınıflandırmada ise güçleri 10 kW'ın altında olanlar mikro, 10-100 kW arasında olanlar küçük ölçekli, 100-1000 kW arasında olanlar orta ölçekli ve gücü 1000 kW'ın üzerinde olanlar ise büyük ölçekli rüzgar türbinleri olarak kabul edilmektedir [11]. Büyük ölçekli rüzgar türbinleri için üretilen elektriğin şebekeye iletilmesi için gerekli olan altyapının oluşturulması, uzun süren rüzgar ölçümlerinin yapılması, türbinlerin konulacağı alanların belirlenmesi ve yatırım aşamaları için çok detaylı çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca şebeke elektriğinin hiç olmadığı ya da elektriğin götürülmesinin çok büyük maliyetler oluşturduğu yerler için küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin kurulumu elverişli olmaktadır. Bunların yanında bazı bölgeler,

ortalama rüzgar hızları ve elektrik üretim miktarları gibi teknik alanlarda elverişli olmalarına karşın, tarım, sanayi veya yerleşim yerlerinde bulunduğu buralarda büyük ölçekli rüzgar türbinlerinin kurulması uygun olmamaktadır. [12, 13].

Küçük ölçekli rüzgar türbinleri yenilenebilir enerji kullanımını sağlayarak sera gazı emisyonlarını azaltma ve fosil yakıtlardan tasarruf etme potansiyeline sahiptir. Bu tür enerji üretimi yerel enerji temini sağlayarak enerji maliyetlerini düşürür. Ayrıca, enerji tüketim noktasına yakın bir yerde üretilerek, merkezi üretim tesislerinden enerji iletimiyle ilişkili enerji kayıplarını azaltmasını sağlamaktadır [14]. Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin en büyük dezavantajlarından biri sorun yetersiz enerji üretimi nedeniyle enerji talebini tam olarak karşılayamamalarıdır [15].

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) bir ürünün, sürecin ya da hizmetin bütün yaşam döngüsü boyunca “beşikten mezara” çevresel etkilerini detaylı olarak analiz eden sistematik ve kapsamlı bir yöntemdir [16]. Bu yöntem, hammaddesinin çıkarılması, işlenmesi, ambalajlanması, taşınması, üretimi, kullanımı, bakım ve onarımı, ömrünü doldurduğunda atılması, yeniden kullanılması ya da geri dönüştürülmesi basamaklarını yani hammaddenin doğada eldesinden, tüm atıklar tekrar doğaya dönene kadar yaşam döngüsündeki tüm aşamalardaki girdi ve çıktıları içermektedir. Bu yaşam döngü basamaklarındaki enerji, su ve madde girdilerinin ve açığa çıkan emisyon ve atıkların envanterleri oluşturularak bir arada değerlendirilir, ürün, süreç veya hizmetin potansiyel çevresel etkileri hesaplanır ve tüm detayları göz önünde bulundurularak düzenli olarak iyileştirme olanağı sunar [17, 18].

YDD, son yıllarda gittikçe sık kullanılan çevresel etki değerlendirme metodu olarak birçok ürün, sistem veya servis için geniş uygulama alanına sahiptir. Bu analiz yöntemi planlama, kamuda politikalar ve performans göstergeleri oluşturma, üretimde sürdürülebilirlik açısından ürün ve süreçlerin değerlendirilip iyileştirme için alternatiflerin ve olanakların belirlenmesi, ürün geliştirilip planlanması, stratejik karar verme ve eko-tasarım aşamalarında kullanılmaktadır [17, 18].

ISO 14040 ve 14044 serisi [19, 20], Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi çalışmaları için gerçekleştirilme ve bildirilmesine yönelik kapsamı, prensipleri ve gereklilikleri belirtmektedir. Şekil 2’de gösterildiği bu standart serisi ile yürütülen YDD yöntemi temel olarak dört basamaktan oluşmaktadır; amaç ve kapsam tanımlama, yaşam döngüsü envanter analizi, yaşam döngüsü etki analizi ve sonuçların yorumlanmasıdır.

Amaç ve Kapsam Tanımı

YDD çalışmasının ilk aşaması çalışmasının amacı, kapsamı, sınırları ve detay düzeyi tanımlanmasıdır. Çalışmanın kapsamı tanımlanırken sistem ve sınırları (enerji, su ve hammadde girdileri, emisyon, yan ürün ya da ürün çıktıları,

üretim, ulaşım, atık yönetimi, yeniden kullanma ya da geri dönüşüm gibi işlemler), veri ihtiyaçları ve tahminler belirtilmektedir. Ayrıca YDD çalışması için çok önemli öge olan fonksiyonel birim bu basamakta tanımlanmaktadır [21].

Envanter Analizi

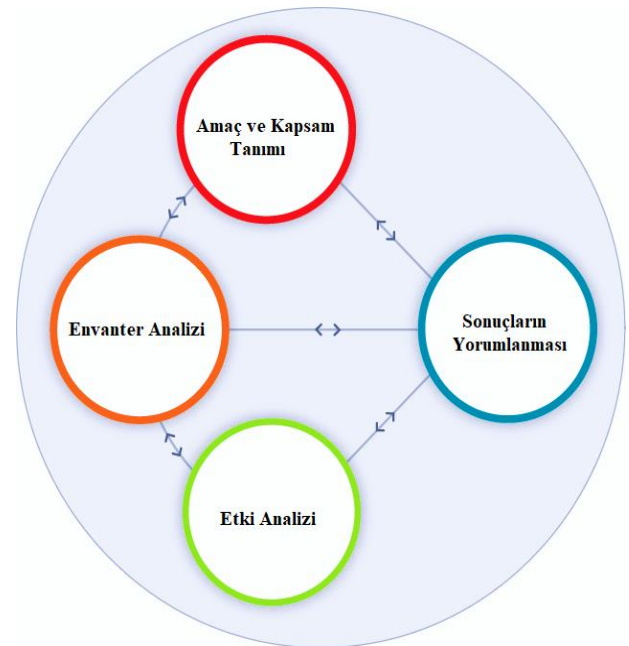
YDD yönteminin ikinci aşamasında çalışılan sistem sınırları için su, enerji ve hammadde gibi girdiler ve açığa çıkan katı, sıvı ve gaz çıktıları tespit edilir. Sisteme ait modellemenin temeli olan proses akış diyagramları bu basamakta oluşturulur. Envanter analizi oluşturabilmek için mümkün olan en güvenilir kaynaktan verilerin derlenip toplanması gerekir. Elde edilen ya da hesaplanan veriler kullanılırken veri kalitesinin de analiz edilmesi gerekebilmektedir [22].

Etki Değerlendirmesi

Bu kısım yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesinin üçüncü basamağını oluşturmaktadır. Bu basamakta yaşam döngüsü boyutunda hazırlanan enerji, su, hammadde kullanımı gibi verilerin potansiyel çevre etkileri değerlendirilir [23].

Sonuçların Yorumlanması

YDD çalışmasının son aşamasıdır. İkinci basamak olan envanter analizi ile üçüncü basamak olan etki değerlendirme aşamaları sonucunda elde edilenler değerlendirilerek tercih edilecek ürün, süreç ya da hizmet belirlenir. Bu aşamada çalışmadaki belirsizlikler yaşam döngüsü analizi kapsamında açıkça yer alır. Hangi basamakta (hammadde eldesi, üretim, atık yönetimi gibi) gerçekleştirilecek iyileştirmeler ve çevresel sürdürülebilirliğin artırılacağı bu aşamada tartışılır [22].



Şekil 2. YDD Metodu [19, 20].

Rüzgar Enerjisi ve Sürdürülebilirlik

İlk kez Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından 1987 yılında hazırlanan Brundtland Raporu ile ortaya atılan sürdürülebilir kalkınma kavramı bugünün gereksinimlerini karşılarken gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılaya yeteneğinden ödün vermeden karşılamayı temel alan kalkınma olarak tanımlanmıştır. Sürdürülebilir kalkınma; birbiri ile ayrılmayan sosyal, ekolojik ve ekonomik olmak üzere üç boyutu olan bir kavramdır. Sürdürülebilir kalkınmanın temelinde çevreyi ve doğal kaynakları korumak, yaşam kalitesini artırmak, temiz ve tükenmeyen enerji kaynaklarını kullanmak gibi ilkeler yer almaktadır [24].

Sürdürülebilir enerji sağlama bugün dünyada çözülmesi gereken en önemli küresel problemlerin başında gelmektedir. Sürdürülebilir kalkınma politikalarının temelinde enerjinin etkin kullanımı, geri dönüşüm, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ile birlikte üretim ve tüketim alışkanlıklarının değiştirilmesi bulunmaktadır. Artan nüfus, hızlı şehirleşme ve sanayileşme ve enerji üretiminde kullanılan kaynakların tükenebilir olması ve fosil kaynakla enerji üretiminin gelecek için sürdürülebilirlik açısından tehlike oluşturması nedeni ile yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi için alternatif enerji kaynakları büyük önem taşımaktadır [25].

Yenilenebilir enerji, devamlı var olan, kendini yenileyebilen ve gelecek için tehlike oluşturmayan bir enerji elde etme çeşididir. Bu enerji kaynakları ile enerji üretimi daha az yakıt ya da hammadde maliyeti gerektirmektedir. Fosil kaynakların kullanımı ile oluşan gazların sera etkisi oluşturması ve atmosfer sıcaklığını yükselttiği için sıcaklıkları değiştirip küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Fosil enerji üretim teknolojilerinin bu olumsuz etkileri ve kaynak olarak her geçen gün tükenmelerinden dolayı kendini yenileyebilen ve çevreye daha az zarar veren enerji teknolojilerinin kullanımını zorunlu hale getirmektedir [25].

Rüzgar enerjisi kaynağının temelini güneşin oluşturduğu temiz ve tükenmeyen bir enerji çeşididir. Güneşin yeryüzünü farklı ısıtmasıyla oluşan basınç ve hava akımının yer değiştirmesiyle birlikte rüzgar oluşmaktadır. Yakıt gerektirmeyen rüzgar enerjisi ile elde edilen enerji güvenliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir [26].

Rüzgar türbinlerinin bakım ve işletme aşamalarının ekonomik yükü diğer enerji teknolojilerine göre düşüktür ve bu durum rüzgar enerjisini önemli hale getirmektedir. Rüzgar ile enerji üretimi sırasında atmosfere zararlı gaz salınımı olmamaktadır [27]. Kurulumu diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinden kolay olan bu enerji türü diğer enerji üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlardan en önemlisi türbinlerin dönmesi ile oluşan gürültü kirliliği yani çevreye yayılan ses ve titreşimdir. Oluşan gürültü kirliliğinden dolayı rüzgar türbinleri yerleşim yerinin olmadığı ya da yükselti farklılıklarından dolayı gürültünün daha az hissedildiği yerlere kurulmaktadır. Diğer bir dezavantaj ise rüzgar türbinleri çok geniş yer kaplamaktadır ve çok fazla metal, plastik ve beton kullanılarak inşa edilmektedir. Bu yüzden

günümüzde kullanılan rüzgar türbinlerinin geri dönüştürülebilir malzeme ile üretilmesi sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda bu enerji üretim yönteminin çalışması esnasında kuş ölümleri meydana gelmektedir. Bütün bunlar sürdürülebilirlik açısından büyük sorun yaratmaktadır [8, 27].

Küçük Ölçekli Rüzgar Türbinlerinin Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirliği Çalışmaları

Rüzgar enerjisinin sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi amacıyla orta ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin enerji, su ve hammadde kullanımı ile birlikte üretim sonunda oluşan emisyon ve atıkları ve bunların çevreye etkileri ile ilgili çalışmalar literatürde bulunmaktadır. YDD bu girdi ve çıktılarını detaylı olarak değerlendirilip sistematik olarak ortaya konulduğu bir yöntem olarak bu çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle orta ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkileri konularında 2004 yılından bu yana yapılmış olan çalışmalar ve yayınlanan makaleler taranmıştır.

Tablo 1’de belirtildiği gibi yayınlanan çalışmalarda farklı ülkelerde bulunan değişik kurulu güce sahip olan rüzgar türbinleri araştırılmıştır. Bu çalışmalarda değişen yaşam döngüsü sınırları içerisinde farklı varsayımlar ve metodolojiler kullanılmıştır. Çalışmanın amacı ve kapsamına uygun olarak farklı çevresel etki kategorileri değerlendirilmiştir.

Lenzen and Wachsmann [28] rüzgar türbine göre 500 ya da 600 kW büyüklükteki rüzgar türbininin farklı ülkelerde üretilip kurulmasını modelleyip incelemişlerdir. İlk senaryoda rüzgar türbininin Almanya’da üretilmesi ve kurulması, ikinci senaryoda Almanya’da üretilmesi ve Brezilya’da kurulması, sonraki senaryoda jeneratör ve nasel parçalarının Almanya’da üretilmesi, diğer parçaların Brezilya’da üretilmesi ve türbinin Brezilya’da kurulması, dördüncü senaryoda türbininin Brezilya’da üretilmesi ve kurulması ve son senaryoda ise rüzgar türbininin Brezilya’da yüksek geri dönüşüm oranına sahip çelik kullanılarak üretilip kurulması incelenmiştir. Rüzgar türbin elemanlarının enerji tüketimlerinin %30-40 oranında kule, %25-30 oranında ise jeneratör tarafından olduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde naselde kullanılan bakırın da çevreye olan olumsuz etkilerinin fazla olduğunun altı çizilmiş fakat bu malzemenin geri dönüşümünün sağlanabilmesinden dolayı çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, seçilen rüzgar türbini sisteminin aynı miktarda enerji üreten konvansiyonel güç santrallerine oranla çevresel etkilerde etki kategorisine göre %89 ile %99 arasında azalma sağladığı hesaplanmıştır.

Tablo 1: Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü analizi çalışmaları

Çalışma	Ülke	Türbin Boyutları	Sistem Sınırları	Çevresel Etki Kategorileri
Lenzen and Wachsmann [28]	Almanya ve Brezilya	0.5 MW ve 0.6 MW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve elektrik üretimi	Kümülatif enerji talebi, karbondioksit emisyonu
White [29]	Amerika	0,345 MW, 0,75 MW ve 0,60 MW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Geri ödeme süresi, karbondioksit emisyonu
Peacock, et al. [30]	Birleşik Krallık	0,4 kW, 0,6 kW, 1,5 kW ve 2,5 kW	-	Karbondioksit emisyonu, ekonomik göstergeler
Ardente, et al. [31]	İtalya	660 kW rüzgar tarlası	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Kümülatif enerji talebi, katı atıklar, hava ve su emisyonları
Tremeac and Meunier [32]	Fransa	250 kW ve 4,5 MW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Geri ödeme süresi, yoğunluk endeksi
Crawford [33]	Avusturalya	850 kW ve 3 MW	Türbin üretimi, kurulumu, bakımı ve elektrik üretimi	Gömülü enerji, yıllık enerji üretimi, sera gazı emisyonları
Fleck and Huot [34]	Kanada	400 W	Hammadde eldesi ve prosesleri, türbin üretimi ve kurulumu, elektrik üretimi	Sera gazı emisyonları
Kabir, et al. [35]	Kanada	5 kW, 20 kW ve 100 kW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Geri ödeme süresi, küresel ısınma, asidifikasyon ve ozon tabakası tükenmesi

Greening and Azapagic [36]	Birleşik Krallık	6 kW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Abiyotik kaynakların tükenmesi fosil / fosil olmayan, asidifikasyon, ötrofikasyon, tatlı su ekotoksitesitesi, küresel ısınma, insan toksitesitesi, deniz suyu ekotoksitesitesi, ozon tabakası tükenmesi, fotokimyasal ozon oluşturma, kara ekotoksitesitesi
Brandoni, et al. [37]	İtalya	Enerji Planı	Türbin üretimi, kurulumu, elektrik üretimi	Birincil enerji tüketimi, karbondioksit emisyonu
Glassbrook, et al. [38]	Tayland	400 W, 2,5 kW, 5 kW, 20 kW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Yıllık enerji üretimi,
Wang and Teah [39]	Tayvan	600 W	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Gömülü enerji, geri ödeme süresi, yıllık enerji üretimi
Troullaki, et al. [40]	Yunanistan	900 W	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Kümülatif enerji talebi, abiyotik kaynakların tükenmesi, asidifikasyon, ötrofikasyon, küresel ısınma
Kouloumpis, et al. [41]	Polonya	5 kW	Hammadde eldesi ve prosesleri, ulaşım, türbin üretimi, kurulumu ve bakımı, elektrik üretimi, sökümü ve atık yönetimi	Abiyotik kaynakların tükenmesi fosil / fosil olmayan, asidifikasyon, ötrofikasyon, tatlı su ekotoksitesitesi, küresel ısınma, insan toksitesitesi, deniz suyu ekotoksitesitesi, ozon tabakası tükenmesi, fotokimyasal ozon oluşturma, kara ekotoksitesitesi

White [29] çalışmasında Amerika'da bulunan 0.345 MW, 0.75 MW ve 0.60 MW boyutlarındaki üç rüzgar türbininin yaşam döngüsü net enerji ve karbondioksit (CO₂) emisyonunu analiz etmiştir. Analiz edilen bu üç rüzgar santralinin rüzgar kaynağı ve kapasite faktörü, ekonomi ölçekleri ve malzeme kullanımı gibi faktörlere bağlı olarak geniş ölçüde değişen enerji geri ödeme oranlarına sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca rüzgar santrallerinin yaşam döngüsünde CO₂ emisyonlarının en çok malzeme üretiminden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler enerji geri ödeme oranı ve CO₂ emisyonu analiz sonuçları, verimli ve düşük karbonlu enerji karışımıyla ilgili politikalar için yararlı veriler sağlamıştır.

Peacock, et al. [30] yaptıkları çalışmada küçük ölçekli rüzgar türbinlerini CO₂ emisyonlarını azaltmanın alternatif bir metodu olarak enerji verimliliği bağlamında incelemişlerdir. Belirli kabul ve parametreler doğrultusunda türbinin kurulum maliyetini ve amorti etme süresini hesaplayarak bu konuda ilk kurulum aşamasında belirli bir ekonomik teşvik sağlamanın gerekli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin CO₂ salımını azalttığını sonucuna varmışlardır.

Ardente, et al. [31] Sicilya'da kurulu 660 kW kapasiteli 11 adet türbin içeren bir rüzgar tarlasının enerji performansını ve çevresel etkilerini incelemiştir. Ele alınan bu rüzgar tarlasından bir yılda üretilen elektrik 10,5 ile 16.400 GWh olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimil kWh elektrik üretimi ve sonrasında müşterilere dağıtımınıdır. Elde edilen sonuçlar türbin imalatının, kurulum işlemlerinin ve nakliye gereksinimlerinin sırası ile yaklaşık %61, %33 ve %7 oranlarında enerji gereksinimlerinin olduğu hesaplanmıştır. Bu çalışma bir rüzgar çiftliğinin neden olduğu en büyük çevresel etkilerin esas olarak rüzgar türbinlerinin üretimi ve inşaat işlerinden kaynaklandığını göstererek bu etkilerin teme olarak havaya olan emisyonlar, katı atıklar ve az miktarda oluşan atık yağlardan kaynaklandığı vurgulanmıştır. Ayrıca CO₂ emisyonlarının 8,8-18,5 g/kWh değer aralığına sahip olduğu bulunmuştur.

Tremeac and Meunier [32] araştırmalarında 4,5 MW ve 250 kW boyutlarındaki iki rüzgar türbini için yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi yapmışlardır. Türbinlerin Fransa'nın güneyinde yer aldığı düşünülmüştür. Yaşam döngüsü değerlendirmesi için sistem sınırlarını üretim, nakliye, kurulum, bakım, söküm ve bertaraf olarak belirlemişlerdir. Çalışmada etki değerlendirme yöntemi olarak Impact 2002+ seçilmiştir. Çalışmanın sonuçları 4,5 MW rüzgar türbini, yaşam döngüsünde yaklaşık 70 TJ birincil enerji tüketirken toplamda 11,7 GWh elektrik üretmektedir. Bu veri 250 kW rüzgar türbini için 2.8 GJ toplam tüketim ve 2 MWh elektrik üretimi şeklindedir. Küresel ısınma potansiyeli sonuçları 4,5 W ve 250 kW rüzgar türbinleri için sırasıyla 15,8 g CO₂/kWh ve 46,4 g CO₂/kWh olarak bulunmuştur. Bu çalışma, rüzgar enerjisinin iklim değişikliğini azaltmanın ve şebekeye bağlı olmayan kırsal bölgelerde

elektrik sağlamanın en iyi yollarından biri olduğunu vurgulamaktadır.

Crawford [33] çalışmasında 850 kW ve 3 MW kapasiteli iki rüzgar türbinini sera gazı emisyonları, enerji gereksinimleri ve enerji verimleri yönünden karşılaştırmıştır. Türbinlerin güneybatı Avustralya kıyılarında kurulduğu varsayılmıştır. Rüzgar türbinlerinin ömrü kabul edilen 20 yıl boyunca çalışmaları sonucu atmosfere verilmesi önlenecek emisyonlar 850 kW kapasiteli türbin için 35.265 ton CO₂-eşdeğer (eşd.), 3 MW kapasiteli türbin için 122.961 ton CO₂-eşd. olarak belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar türbin büyüklüğünün yaşam döngüsü enerji performanslarını optimize etmek için önemli bir faktör olmadığı bulunmuştur.

Fleck and Huot [34] araştırmalarında küçük rüzgar türbinleri ve geleneksel içten yanmalı sistemlerin çevresel etkilerini, net enerji girdilerini ve yaşam döngüsü maliyetini karşılaştırmak için yaşam döngüsü yaklaşımını kullanmışlardır. Çalışmada CO₂, CH₄ ve N₂O dahil sera gazı emisyonlarını şebekeden bağımsız küçük bir eve aynı miktarda enerji sağlayan iki sistemin yaşam döngüsü boyunca hesaplanmıştır. Fonksiyonel birim olarak yirmi yıllık bir süre boyunca her ay 162 kWh elektrik enerjisinin şebekeden bağımsız olarak bir eve elektrik sağlması olarak seçilmiştir. Sonuçlar, küçük ölçekli rüzgar enerjisi için önemli bir çevresel fayda gösterdiğinin altını çizmiştir. Rüzgar sistemi, dizel sisteme kıyasla sera gazı emisyonlarında %93 azalma sağlamıştır. Ekonomik olarak ise rüzgar türbini sisteminin net maliyeti dizel sistemden %14 daha fazla olduğu bulunmuştur.

Kabir, et al. [35] 100 kW'lık elektrik üretimini üç farklı boyutta rüzgar türbin ile sağlayarak bunların yaşam döngü sürdürülebilirliğini incelemişlerdir. Oluşturulan senaryolarda 5 kW kapasiteli 20 adet, 20 kW kapasiteli 5 adet ve 100 kW kapasiteli 1 adet türbinin kurulumu şeklinde oluşturulmuştur. Bu çalışmada fonksiyonel birim olarak 1 kWh elektrik üretimi kullanılmıştır ve karşılaştırma bu şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar üçüncü senaryoda ele alınan sistemin enerji gereksinimlerinin sırası ile birinci ve ikinci senaryodaki sistemlerin enerji gereksinimlerinden %69 ve %41 oranlarında daha az olduğu, üçüncü senaryodaki sistemin küresel ısınma potansiyelinin üretilen 1 kWh elektrik için 17,8 g CO₂-eşd. olduğu ve birinci ve ikinci senaryodaki sistemlere oranla sırası ile %58 ve %29 daha az olduğu bulunmuştur. Seçilen türbinler ayrıca ekonomik yönüyle de karşılaştırılmıştır.

Greening and Azapagic [36] yaptıkları çalışmada İngiltere'deki küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliğini şebeke elektriği ve fotovoltaik güneş sistemleri ile karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Yapılan çevresel etki değerlendirmesinde CML 2 Baseline 2001 [42] etki değerlendirme yöntemi kullanılmış olup küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü boyutunda verimlilik, toksiklik analizi, ötrofikasyon, asidifikasyon ve küresel ısınma potansiyelleri gibi etkileri hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar küçük

ölçekli rüzgar türbinlerinden kaynaklanan çevresel etkilerin küresel ısınma potansiyeli gibi birçok çevresel etki için şebeke elektriğinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, abiyotik elementlerin tükenmesi potansiyeli, tatlı su ve insan toksisite potansiyellerinin şebeke elektriğinden daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Şebeke elektriğinin yanında fotovoltaikler ile yapılan karşılaştırma sonucunda küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin ötrofikasyon ve ozon tabakası incilmesi potansiyelleri gibi çevresel etkiler için daha çevreci olduğu bulunurken fosil kaynaklarının tükenmesi, tatlı su, insan ve karasal toksisite potansiyellerinin rüzgar türbini için fotovoltaiklere göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Brandoni, et al. [37] yaptıkları çalışmada karbon emisyonu azalımı konusundaki hedeflere ulaşmak için düşük karbon politikalarının uygulamaya konulmasında yerel enerji planlamasının rolünü ele almıştır. Bu çalışma düşük karbonlu politikaların sonuçlarının daha iyi anlaşılması için enerji talebini küçük ölçekli enerji teknolojileri ile karşılamının çevresel etkisine odaklanmaktadır. Küçük ölçekli güneş, rüzgar ve kombine ısı ve güç sistemlerinin iklim değişikliği hedefleri doğrultusunda CO₂ salınımını incelemişlerdir. Düşük karbon politikalarının birincil enerji tüketimi ve emisyonlar açısından etkisini niceliksel olarak değerlendirmek amacıyla, çalışma Danimarka'daki Aalborg Üniversitesi tarafından geliştirilen bir yazılım aracı olan Enerji Planı kullanılmıştır. Model, saatlik enerji talebi ve arzuna dayalı olarak ulusal ve bölgesel enerji planlama stratejilerini analiz etmek ve şebeke istikrarından kaynaklanan kısıtlamaları göz önünde bulundurmak için tasarlanmış entegre bir enerji sistemi modelidir. Sonuçlar, küçük ölçekli enerji teknolojilerinin kullanılmasının CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olabileceğini ve büyük ölçekli yenilenebilir üretimde bir artışı sağlayabileceğini, ancak başarılı bir yerel enerji üretim planıyla enerji üretiminin talebi karşılayabileceğini göstermektedir.

Glassbrook, et al. [38] Tayland için yaptıkları araştırmada küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesini ve fizibilite çalışmasını analiz etmişlerdir. 20 yıl boyunca ayda 50 kWh elektrik üretimi fonksiyonel birim olarak kullanarak, küresel ısınma potansiyeli, tüketilen enerji, enerji geri ödeme süresi ve elektrik üretim maliyeti hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin dizel motor enerji üretim sisteminden ve Tayland şebeke elektriğinden daha çevre dostu olduğunu göstermiştir.

Wang and Teah [39] çalışmalarında Tayvan'da üretilen 600 W'lık bir türbin için sera gazı emisyonun ve enerji tüketimi yaşam döngüsü boyutunda hesaplanmışlardır. Sistem sınırları malzeme üretimi, türbin üretimi, nakliye, atık yönetimi ve geri dönüşüm basamaklarından oluşmaktadır. IPCC tarafından oluşturulan yöntemlere dayanarak sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Yapılan analizler, türbinin enerji anlamında üretim enerjisini amorti etmesinin 161 yıl süreceği sonucuna varılmıştır. Toplam enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları kaynak kullanımı (%70), nakliye (%04), bertaraf ve geri

dönüşüm (%09) basamaklarından oluşmaktadır. En fazla sera gazı emisyonları, üretim aşamasından kaynaklanmaktadır. Seçilen türbin türü için hesaplanan değerler şebeke elektriği ile karşılaştırıldığında ekonomik ya da çevreci sonuçlar vermemiştir.

Troullaki, et al. [40] yerel olarak üretilen küçük rüzgar türbinleri ve piko-hidroelektrik santrallerinin çevresel etkilerini şebeke dışı bir bağlamda değerlendirmek için bir yaşam döngüsü modeli ve envanteri uygulanmıştır. Modellemede, küçük rüzgar türbinlerinde meydana gelen arıza sayısı gibi bu sistemlerin performansını ve etkisini etkileyen parametrelerdeki değişimler de dikkate alınmıştır. Sonuçlar daha sonra küçük bir jeneratör setinin etkileriyle karşılaştırılmıştır. Modellemede SimaPro yazılımı kullanılmıştır. Yenilenemeyen birincil enerji gereksinimleri Kümülatif Enerji Talebi (CED) V1.09 yöntemine göre hesaplanırken, abiyotik tükenme, asitlenme, ötrofikasyon ve küresel ısınma CML 2 Baseline 2001 [42] yöntemine göre hesaplanmıştır. Genel olarak, çalışma, her iki yenilenebilir enerji sisteminin de küçük jeneratör setinden önemli ölçüde daha düşük etkiye sahip olduğu sonucunu elde etmiştir.

Kouloumpis, et al. [41] iklim değişikliğini azaltmaya yönelik bir çözüm olarak daha küçük ölçekli düşey eksenli rüzgar türbinlerinin sürdürülebilirliğini araştırmışlardır. Polonya'daki bir rüzgar türbininin gerçek üretim verileri kullanılarak yaşam döngüsü çevresel etkileri analiz edilmiştir. Çalışmada yaşam döngüsü boyutundaki çevresel etkiler GaBi yazılımı ile modellenmiştir. Toplam 11 adet çevresel etki CML 2 Baseline 2001 [42] etki değerlendirme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışma çevresel etkilerin çoğunluğunun, türbinin kendisinden ziyade destekleyici altyapıya, özellikle direk ve temellerden kaynaklandığını göstermektedir. Sonuçlar ayrıca incelenen rüzgar türbininin çevresel sürdürülebilirlik performansının kapasite faktörünün dalgalanmalarına karşı çok hassas olduğu ve uygun yerleşim, metallerin geri dönüşümü ve türbinin mevcut bina yapısına entegrasyonu için çevresel etkilerin azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Sonuç ve Tartışma

Son zamanlarda sürdürülebilirlik anlayışının ön plana çıkması ile birlikte sürdürülebilir kalkınma için kritik bir sektör olan enerji sektörünün sürdürülebilirliğinin önemi her geçen gün artmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve çevreye verdikleri olumsuz etkiden dolayı enerji ihtiyacının yenilenebilir ve temiz bir teknoloji kullanılarak elde edilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin giderek önem kazanmasıyla birlikte küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin çevresel etkisini ve sürdürülebilirlik performansını ölçüldüğü çalışmalar yayınlanmıştır. Bu çalışmada, orta ve küçük ölçekli rüzgar enerji sistemlerinin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik yapılan bilimsel çalışmaların derlenmesi amacıyla bir literatür çalışması yapılmıştır.

Çalışmalarda değişik farklı kurulu güce sahip olan rüzgar türbinleri araştırılmıştır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi için belirlenen sistem sınırları çalışmalarda farklılık göstermiştir. Ayrıca çalışmanın amacı ve kapsamına uygun olarak farklı çevresel etki kategorileri de değerlendirilmiştir. Çalışmalarda genel olarak dar bir gösterge aralığı göz önüne alınarak çevresel değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Daha geniş bir çevresel etki yelpazesini dikkate alan az sayıda çalışma vardır. Bazı çalışmalarda çevresel göstergelerin yanında ekonomik göstergeler de hesaplanırken seçilen enerji teknolojisi için sosyal göstergelerin değerlendirildiği çalışma literatürde bulunmamaktadır.

Orta ve küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirliklerini analiz eden çalışmaların derlenerek irdelenmesi küçük ölçekli enerji üretim sistemlerinin yaygınlaştırılması, mevcut potansiyelinin kullanılması ve gelecek vizyonun belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden yapılacak olan çalışmalarda daha geniş çevresel etki kategorilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca çevresel sürdürülebilirlikle birlikte yaşam döngüsü ekonomik ve sosyal sürdürülebilirliğin de analiz edilmesi tavsiye edilmektedir. Yapılacak olan bu analizlerden elde edilen sonuçların beraber değerlendirilmesinin enerji sektörünün sürdürülebilirliğine büyük katkısı olacağı öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje: 2020-02.BŞEÜ.03-06) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] IEA, "Key World Energy Statistics" Energy Information Administration, Paris, 2021.
- [2] IPCC, "Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" Geneva, Switzerland, 2007.
- [3] IEA, "Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System" International Energy Agency, Paris, 2012.
- [4] E. T. Karagöl and İ. Kavaz, "Dünyada ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji," SETA - Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı, İstanbul, 2017.
- [5] TÜBA, "Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Raporu", Türkiye Bilimler Akademisi Ankara, 2019.
- [6] N. Nurbay and A. Çınar, "Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması" *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, pp. 19-21, 2005.
- [7] U. Elibüyük and İ. Üçgül, "Rüzgâr Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgâr Enerjisi Depolama Yöntemleri," *SDÜ Yekarum e-Dergi*, vol. 2, no. 3, 2014.
- [8] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. Wiley Online Library, John Wiley & Sons, England, 2001.
- [9] M. Saad, "Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines" *IOSR Journal of Engineering*, vol. 4, pp. 27-30, 2014.
- [10] H.-J. Wagner, "Introduction to Wind Energy Systems" in *EPJ Web of Conferences*, vol. 189, p. 00005: EDP Sciences, 2018.
- [11] NREL, "The U.S. Small Wind Turbine Industry, A 20 Year Industry Plan for Small Wind Turbine Technology," in *"Roadmap"* American Wind Energy Association (AWEA) Small Wind Turbine Committee, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2002.
- [12] J. Leary *et al.*, "Finding the Niche: A Review of Market Assessment Methodologies for Rural Electrification with Small Scale Wind Power" *Renewable Sustainable Energy Reviews*, vol. 133, p. 110240, 2020.
- [13] J. L. Acosta, K. Combe, S. Ž. Djokic, and I. Hernando-Gil, "Performance Assessment of Micro and Small-Scale Wind Turbines in Urban Areas" *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 152-163, 2012.
- [14] N. Bergman, Hawkes, A., Brett, D., Baker, P., Barton, J., Blanchard, R., Brandon, N., Infield, D., Jardine, C., Kelly, N., Leach, M., Matian, M., Peacock, A. D., Staffell, I., Sudtharalingam, S. & Woodman, B., "UK Microgeneration. Part I: Policy and Behavioural Aspects" *Energy*, vol. 162, pp. 23-36, 2009.
- [15] S. R. Allen, G. P. Hammond, and M. C. McManus, "Prospects for and Barriers to Domestic Micro-Generation: A United Kingdom Perspective" *Applied Energy*, vol. 85, no. 6, pp. 528-544, 2008.

- [16] B. Sørensen, "From life cycle analysis to life cycle assessment" in *Life-Cycle Analysis of Energy Systems: from Methodology to Applications*: The Royal Society of Chemistry, 2011, pp. 67-78.
- [17] A. Azapagic, "Life cycle assessment as a tool for sustainable management of ecosystem services," in *Ecosystem Services*, vol. 30: The Royal Society of Chemistry, 2010, pp. 140-168.
- [18] H. Baumann and A. M. Tillman, "LCA methodology" in *The Hitch Hiker's Guide to LCA - An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Lund Studentlitteratur AB, pp. 73-202, 2004.
- [19] ISO, "Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines" International Standard Organization, Geneva, Switzerland, vol. BS EN ISO 14040:2006, 2006.
- [20] ISO, "Life Cycle Assessment - Principles and Framework," International Standard Organization, Geneva, Switzerland, vol. BS EN ISO 14040:2006, 2006.
- [21] H. Baumann and A.-M. Tillman, "Introduction to LCA," in *The Hitch Hiker's Guide to LCA : An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*, Lund: Studentlitteratur AB, pp. 19-69, 2004.
- [22] G. Rebitzer *et al.*, "Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications" *Environment International*, vol. 30, no. 5, pp. 701-720, 2004.
- [23] J. B. Guinée *et al.*, *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards (Eco-Efficiency in Industry and Science)*, 7. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [24] S. Perdan, "The Concept of Sustainable Development and its Practical Implications. Chapter 1" in *Sustainable Development in Practice* vol. Chapter 1, A. Azapagic and S. Perdan, Eds. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [25] S. Chu and A. J. n. Majumdar, "Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future" vol. 488, no. 7411, pp. 294-303, 2012.
- [26] D. Y. C. Leung and Y. Yang, "Wind Energy Development And its Environmental Impact: A Review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 1031-1039, 2012.
- [27] B. Atilgan and A. Azapagic, "Renewable Electricity in Turkey: Life Cycle Environmental Impacts" *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 649-657, 2016.
- [28] M. Lenzen and U. Wachsmann, "Wind turbines in Brazil and Germany: An Example of Geographical Variability in Life-Cycle Assessment" *Applied Energy*, vol. 77, no. 2, pp. 119-130, 2, 2004.
- [29] S. W. White, "Net Energy Payback and CO₂ Emissions from Three Midwestern Wind Farms: An Update" *Natural Resources Research*, vol. 15, pp. 271-281, 2006.
- [30] A. D. Peacock, D. Jenkins, M. Ahadzi, A. Berry, and S. Turan, "Micro Wind Turbines in the UK Domestic Sector" *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 7, pp. 1324-1333, 2008.
- [31] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, and V. Lo Brano, "Energy Performances And Life Cycle Assessment of an Italian Wind Farm" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 200-217, 2008.
- [32] B. Tremeac and F. Meunier, "Life cycle Analysis of 4.5 MW and 250 W Wind Turbines" *Renewable & Sustainable Energy Reviews* vol. 13, pp. 2104-2110, 2009.
- [33] R. H. Crawford, "Life Cycle Energy and Greenhouse Emissions Analysis of Wind Turbines and the Effect of Size on Energy Yield" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2653-2660, 2009.
- [34] B. Fleck and M. Huot, "Comparative Life Cycle Assessment of a Small Wind Turbine for Residential Off-Grid Use" *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2688-2696, 2009.
- [35] M. R. Kabir, B. Rooke, G. D. M. Dassanayake, and B. A. Fleck, "Comparative Life Cycle Energy, Emission, and Economic Analysis of 100 kW Nameplate Wind Power Generation" *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 133-141, 2012.
- [36] B. Greening and A. Azapagic, "Environmental Impacts of Micro-Wind Turbines and their Potential to Contribute to UK Climate Change Targets" *Energy*, vol. 59, pp. 454-466, 2013.
- [37] C. Brandoni, A. Arteconi, G. Ciriachi, and F. Polonara, "Assessing the Impact of Micro-Generation Technologies on Local Sustainability" *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 1281-1290, 2014.

- [38] K. A. Glassbrook, A. H. Carr, M. L. Drosnes, T. R. Oakley, R. M. Kamens, and S. H. Gheewala, "Life Cycle Assessment and Feasibility Study of Small Wind Power in Thailand" *Energy for Sustainable Development*, vol. 22, pp. 66-73, 2014.
- [39] W.-C. Wang and H.-Y. Teah, "Life Cycle Assessment of Small-Scale Horizontal Axis Wind Turbines in Taiwan" *Journal of Cleaner Production*, vol. 141, pp. 492-501, 2017.
- [40] A. Troullaki, K. Latoufis, P. Marques, F. Freire, and N. Hatziargyriou, "Life Cycle Assessment of Locally Manufactured Small Wind Turbines and Pico-Hydro Plants" in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6, 2019.
- [41] V. Kouloumpis, R. A. Sobolewski, and X. Yan, "Performance and Life Cycle Assessment of a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine" *Journal of Cleaner Production*, vol. 247, p. 119520, 2020.
- [42] G. M. Guinée JB, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A. (2001). *Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards; Part 2a. Leiden*. Available: <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutchlca-guide.html>; 2001.