



Rüzgar ve biyogaz enerji santrallerinin çevresel ve tekno-ekonomik performanslarının karşılaştırmalı analizi: Bursa örneği

A comparative analysis of the environmental and techno-economic performance of wind and biogas power plants: the case of Bursa city

Tuba Arıdil Ayten^{1*} , Ayşe Büşra Gerçek¹ , Samet Öztürk¹

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
tuba.aridil@btu.edu.tr, aysebusragercek@gmail.com, samet.ozturk@btu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.09.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 24.12.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 23.12.2025

doi: 10.65206/pajes.32875
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Sanayi faaliyetleri ve insan popülasyonunun artmasıyla enerji talebinin karşılanması küresel bir problem haline gelmiştir. Fosil yakıtların tükenebilirliği, çevre ve insan sağlığına zarar vermesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, Bursa ili Yıldırım ilçesinde kurulabilecek rüzgar enerji santrali ve organik atık potansiyeli yüksek olan Nilüfer ilçesi için biyogaz enerji santrali projelerinin çevresel ve tekno-ekonomik performansları RETScreen yazılımıyla değerlendirilmiştir. Her iki enerji santralinin de ömrü 25 yıl olarak belirlenmiştir. Rüzgar enerji santralinin yıllık enerji üretimi 40.408 MWh olup indirgenmiş birim elektrik maliyeti 27.8 \$/MWh ve geri ödeme süresi 8.3 yıl olarak hesaplanmıştır. Nilüfer ilçesindeki biyogaz enerji santralinin ise yıllık elektrik üretimi 47.304 MWh, indirgenmiş birim elektrik maliyeti 38.1 \$/MWh ve geri ödeme süresi 5.3 yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki santralin de faaliyete geçmesiyle sırasıyla yıllık 12,892 tCO₂ ve 15,092 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı emisyonu önlenecek, böylece baz duruma kıyasla %95 oranında sera gazı emisyonu azaltılacaktır. Her iki tesisin de bölgenin enerji ihtiyacına katkı sağlayacağı ve çevresel açıdan olumlu etkiler yaratacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte, rüzgar enerji santrali daha düşük birim elektrik maliyetiyle ekonomik açıdan avantaj sunarken, biyogaz enerji santrali daha kısa geri ödeme süresi ve yüksek üretim kapasitesiyle yatırım geri dönüşü açısından öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, her iki teknoloji de farklı yönleriyle bölgesel enerji planlamasında değerlendirilebilir seçenekler olarak kabul edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, Rüzgar, RETScreen, Tekno-ekonomik analiz, Duyarlılık analizi.

Abstract

The growing industrial activities and increasing human population have made meeting energy demands a major global concern. The limited of fossil fuels, along with their adverse impacts on environmental and human health, has intensified the importance of renewable energy sources. In this research, the environmental and techno-economic performances of a wind power plant in the Yıldırım district and a biogas power plant in the Nilüfer district of Bursa were evaluated using RETScreen software. The operational lifespan of both plants was assumed to be 25 years. The wind power plant is projected to generate 40.408 MWh of electricity per year, corresponding to a levelized cost of electricity of 27.8 \$/MWh and a payback period of 8.3 years. The biogas power plant, conversely, is expected to produce 47.304 MWh of electricity annually, with a lower LCOE of 38.1 \$/MWh and a shorter payback period of 5.3 years. The operation of both plants is expected to result in annual reductions of 12,892 tCO₂ and 15,092 tCO₂ equivalents in greenhouse gas emissions, leading to a 95% reduction compared to the baseline scenario. These findings highlight the environmental and financial sustainability of both projects. Nevertheless, the comparison indicates that while the wind power plant benefits from a lower unit electricity cost, the biogas power plant offers advantages in terms of higher annual energy generation and a shorter payback period. Overall, both technologies present viable alternatives for regional energy planning, each with distinct strengths.

Keywords: Biogas, Wind, RETScreen, Techno-economic analysis, Sensitivity analysis.

1 Giriş

Teknolojinin gelişmesi, endüstriyel faaliyetlerin artması ve insan popülasyonunun yükselmesiyle birlikte enerji talebinin karşılanması küresel bir problem haline gelmiştir [1],[2]. Fosil kaynaklı yakıtların kullanılmasıyla enerji ihtiyacının büyük bir çoğunluğu karşılanabilmesine rağmen küresel ısınma ve iklim değişikliğine karşı önlem alabilmek için ekolojik dengeye daha az zarar veren yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmektedir [3],[4]. Fosil yakıtların yerine alternatif olarak güneş, rüzgar, jeotermal, hidrolik ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı küresel çapta giderek artış göstermektedir [5],[6]. Rüzgar ve biyogaz enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmakta olup, rüzgar enerjisi, yüksek rüzgar hızlarının

bulunduğu bölgelerde verimli bir enerji kaynağı sunarken [7], biyogaz enerjisi, organik atıkların değerlendirilmesiyle enerji üretimi sağlayarak çevresel faydalar sunar [8].

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları ve potansiyeli bakımından verimli bir ülkedir ve var olan potansiyelin kullanılması için çalışmalar devam etmektedir [9]. Güney Marmara Bölgesinin en büyük ili olan Bursa'nın elektrik enerjisi kurulu gücü 3183 MW olup, ilde toplam 45 (1MW üzeri) adet santral bulunmaktadır [10]. Bu santrallerin en büyük payını 2284 MW güç ile %71.7 oranında doğalgaz santralleri oluşturmaktadır. Buna ek olarak; kömür, hidrolik, rüzgar, biyogaz, atık ısı ve güneş enerjisinden elektrik üretimi yapılmakta olup, rüzgar enerji santralleri %11.7, biyogaz enerji santralleri ise %0.8 oranında katkı sağlamaktadır [10].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Türkiye'nin rüzgar enerji potansiyeli 48 GW olmasına rağmen kurulu rüzgar enerji gücü 11.3 GW civarındadır [11]. Türkiye'de 50 m yükseklik için yıllık ortalama rüzgar hızı 3.29 m/s ve ortalama rüzgar yoğunluğu 51.91 W/m² ile Marmara Bölgesi, rüzgar enerji potansiyelinin en yüksek olduğu bölgelerden biridir [12].

Rüzgar enerji santrali projelendirmelerinde bölgenin ortalama rüzgar hızı, rüzgar gücü, arazi yapısı, mevcut elektrik kurulu gücü, santral için uygun alanların varlığı gibi faktörler enerji potansiyelinin ve projenin yapılabilirliğinin belirlenebilmesi için önemli parametrelerdendir. Bursa ili için 100 m yükseklikteki ortalama rüzgar hızı verileri incelendiğinde minimum 1.9 m/s ve maksimum 8.9 m/s rüzgar hızı ölçülmüştür. Bursa ili için ortalama güç yoğunluğu 145.5 m/s², ortalama kapasite faktörü ise %18 olarak tespit edilmiş olmakla beraber bazı bölgelerde yüksek kapasite faktörleri gözlemlenmektedir [13]. Yüksek rüzgar hız ve güç yoğunluğuna sahip olan ve sanayi faaliyetlerince gelişmiş bir il olan Bursa ilinin elektrik enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının teşvik edilmesi ve var olan potansiyelin değerlendirilebilmesi için rüzgar enerji santrali projesinin iyi bir yatırım olduğu düşünülmüştür.

Diğer taraftan, Türkiye'deki atıkların toplam enerji değeri yıllık 34,002,549 TEP olarak hesaplanmış olup oldukça yüksek olan biyogaz potansiyelinin büyük bir kısmı henüz yeterince değerlendirilememektedir [14]. Bu sebeple, biyogaz tesislerinin sayısının ve kapasitelerinin artırılması enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir adım olarak nitelendirilmektedir. Ülkemizdeki biyogaz tesislerinin sayısı giderek artmaktadır ve bu tesisler arasında 34 MW ile en yüksek kapasiteye sahip olan Odayeri Biyogaz Tesisi'dir. Bursa'da ise hayvansal ve bitkisel atıkların hammadde olarak kullanıldığı 6.4 MW kapasiteye sahip bir tesis bulunmaktadır [14].

Bir biyogaz tesisi için yatırım yapılmadan önce belirlenmesi gereken en önemli faktör, tesisin kapasitesidir. Bu kapasite, kullanılacak hammadde miktarı ve türüne bağlıdır. Bursa'da büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanlarından elde edilen hayvansal atıklar, bahçe atıkları ve bitki kalıntılarından elde edilen bitkisel atıklar, evsel katı atıkların biyobozunur kısmı ve endüstriyel atıklar gibi organik maddeler, biyogaz üretimi için uygun hammaddeler sunmaktadır [15].

Biyogaz, biyokütlenin işlenmesi sonucunda oluşan yanıcı bir gaz olup, biyogaz tesislerinde elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve katı/sıvı organik gübre gibi nihai ürünler üretilebilir. Biyogaz tesisleri kapasiteye bağlı olarak küçük çaplı (100 kW-300 kW), orta çaplı (300 kW-1000 kW) ve büyük çaplı (1000 kW ve üzeri) olarak sınıflandırılabilir [15]. Bu çeşitlilik, Bursa'nın farklı ölçeklerde biyogaz tesisleri kurarak atık yönetimini iyileştirme ve enerji üretimini artırma potansiyelini göstermektedir. Biyogaz tesisinin kapasitesi belirlenirken yukarıdaki kriterlerin dikkate alınması ve yatırımın karı için olabilecek en uygun kapasitenin seçilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda yenilenebilir enerji santrallerinin çevresel ve ekonomik uygulanabilirliğini değerlendiren çok sayıda araştırma yürütülmüştür [16]-[20]. Türkiye'de bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, genellikle rüzgar ve güneş enerjisi gibi yaygın yenilenebilir kaynaklara odaklanmakta ve bu sistemlerin enerji verimliliği, yatırım maliyeti ve çevresel etkileri bakımından performansını incelemektedir [7],[11],[21]-[23]. Ancak literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı, tekil enerji türleri veya kısıtlı performans göstergeleri

üzerinden değerlendirme yapmakta; bu nedenle yenilenebilir enerji sistemlerinin karşılaştırmalı ve bütüncül analizine sınırlı katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, biyogaz tesislerinin belirli bölgeler özelinde tekno-ekonomik ve çevresel analizlerini içeren araştırmalar görece sınırlı sayıdadır [8],[15],[24]. Ek olarak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin çevreyle etkileşiminin doğru değerlendirilebilmesi için bu sistemlerin olası çevresel etkilerinin de ekonomik göstergelerle birlikte ele alınması önemlidir. Bu bağlamda, rüzgar ve biyogaz enerji santralleri fosil yakıtlara kıyasla düşük sera gazı emisyon değerlerine sahip olmakla birlikte; türbin kurulumu sırasında arazi kullanımı, biyogaz tesislerinde ise atık depolama ve koku oluşumu gibi bazı sınırlı çevresel etkiler oluşturabilmektedir [25],[26]. Bu bilgiler doğrultusunda, çalışmanın rüzgar ve biyogaz sistemlerini çevresel, ekonomik ve belirsizlik temelli göstergeler ışığında birlikte ele alan kapsamlı yaklaşımı, literatürdeki sınırlı karşılaştırmalı analizlere önemli bir katkı sunmakta ve yerel yenilenebilir enerji yatırımlarının çok boyutlu değerlendirilmesine yönelik önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışma kapsamında, 100 m yükseklikteki rüzgar hızı ortalama 8.3 m/s olan Bursa ilinin Yıldırım ilçesindeki uygun bir lokasyonda kurulabilecek her biri 2.3 MW güce sahip 5 adet NORDEX N90 türbini kullanılarak toplam kurulu gücü 11.5 MW olan rüzgar enerji santrali projesinin fizibilite değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, önemli bir biyogaz potansiyeline sahip olan Bursa ilinin Nilüfer ilçesinde yer alacak her biri 2.7 MW güce sahip 2 adet Caterpillar MaK M 25 pistonlu motoru kullanılarak toplam kurulu gücü 5.4 MW olan biyogaz enerji santrali projesinin de finansal ve çevresel uygulanabilirliği ele alınmıştır. Her iki projenin de değerlendirilmesi RETScreen yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 RETScreen programı

CANMET Enerji ve Çeşitlendirme Araştırma Laboratuvarı (CEDEL) ve Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığı tarafından geliştirilen RETScreen temiz enerji simülasyonu kullanılarak rüzgar enerji santrali, biyogaz tesisleri, fotovoltaiik sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının projelendirilme aşamasında hızlı ve detaylı fizibilite değerlendirilmesi yapılabilmektedir [23]. RETScreen analiz programı, projelendirilecek sistem ve teknolojinin seçilmesi, yer seçimi, enerji, maliyet, emisyon ve finansman analiz arayüzleriyle tasarlanan projenin hem çevresel hem de ekonomik açıdan uygulanabilirliğini değerlendirir [22]. RETScreen rüzgar hızı, bağıl nem, güneş radyasyonu, atmosferik basınç gibi iklim verileri, birim mali değerler ve finansal oranlar gibi değerleri seçilen bölge için veri bankasından alabildiği gibi kullanıcı girişine de imkân vererek Microsoft Excel altyapısıyla nihai bulguları sunmaktadır [27].

2.2 Yer seçimi

RETScreen programının ilk ara yüzü olan proje yer seçimi için enerji santralinin kurulmasının planlandığı lokasyon enlem ve boylam olarak net olarak belirtilebilmektedir. Bu çalışmada, Bursa'nın enerji ihtiyacını karşılamak ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla rüzgar ve biyogaz enerji santralleri için en uygun lokasyonlar belirlenmiştir. Yıldırım ilçesi, yüksek rüzgar hızları ve yoğunluğu nedeniyle rüzgar enerjisi üretimi için ideal bir bölge olarak seçilmiştir. Nilüfer ilçesi ise tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu ve organik atıkların

kolaylıkla temin edilebilmesi için biyogazdan enerji üretimi için en uygun lokasyon olarak belirlenmiştir.

Rüzgar hızının 7 m/s'den, rüzgar güç yoğunluğunun ise 400 W/m²'den yüksek olduğu bölgelerde rüzgar enerji santrali yatırımlarının ekonomik olarak sürdürülebilir olduğu bilinmektedir [22]. Bursa ili Yıldırım ilçesinde kurulabilecek rüzgar enerji santrali için 100 m yükseklik için 7 m/s üzerinde rüzgar hızına sahip bir bölge tercih edilmiştir. Yer seçimi ortalama rüzgar hızı esas alınarak Global Wind Atlas aracılığıyla yapılmış olup aynı zamanda bölgedeki turizm tesislerine yakın olmamasına da dikkat edilmiştir [28]. Rüzgar enerji santrali için seçilen bölgenin rüzgar hızı haritası Şekil 1'de gösterilmiştir.

Yıldırım ilçesinde kurulabilecek rüzgar enerji santrali 40.152112 ve 29.168358 koordinatlarındadır. Seçilen bölge için 100 m'de yıllık ortalama rüzgar hızı 8.3 m/s olarak belirlenmiş ve RETScreen programında belirtilmiştir [28]. RETScreen veri tabanına göre ortalama hava sıcaklığı 14.7°C, bağıl nem %72, atmosferik basınç 100 kPa olarak kabul edilmiştir.

Biyogaz tesisi için ise yer seçimi yapılırken tarımsal alanların durumu, yerleşim yerlerine ve çiftliklere yakınlık, hammadde temini, elektrik şebekesi bağlantı noktaları ve yol ağına uzaklık gibi faktörler dikkate alınmıştır. Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan çiftliklerinin yoğun olduğu bölgeler, hammadde temininin hem kolay hem de düşük maliyetli olması sebebiyle tercih edilmektedir. Bu bağlamda, organik atıkların yoğun olduğu bölgeler biyogaz enerji tesislerinin yer seçiminde öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken lokasyonlardır [29].

Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz enerji santrali 40.195597 ve 28.888187 koordinatlarında yer almaktadır. RETScreen veri tabanına göre, bölgenin ortalama hava sıcaklığı

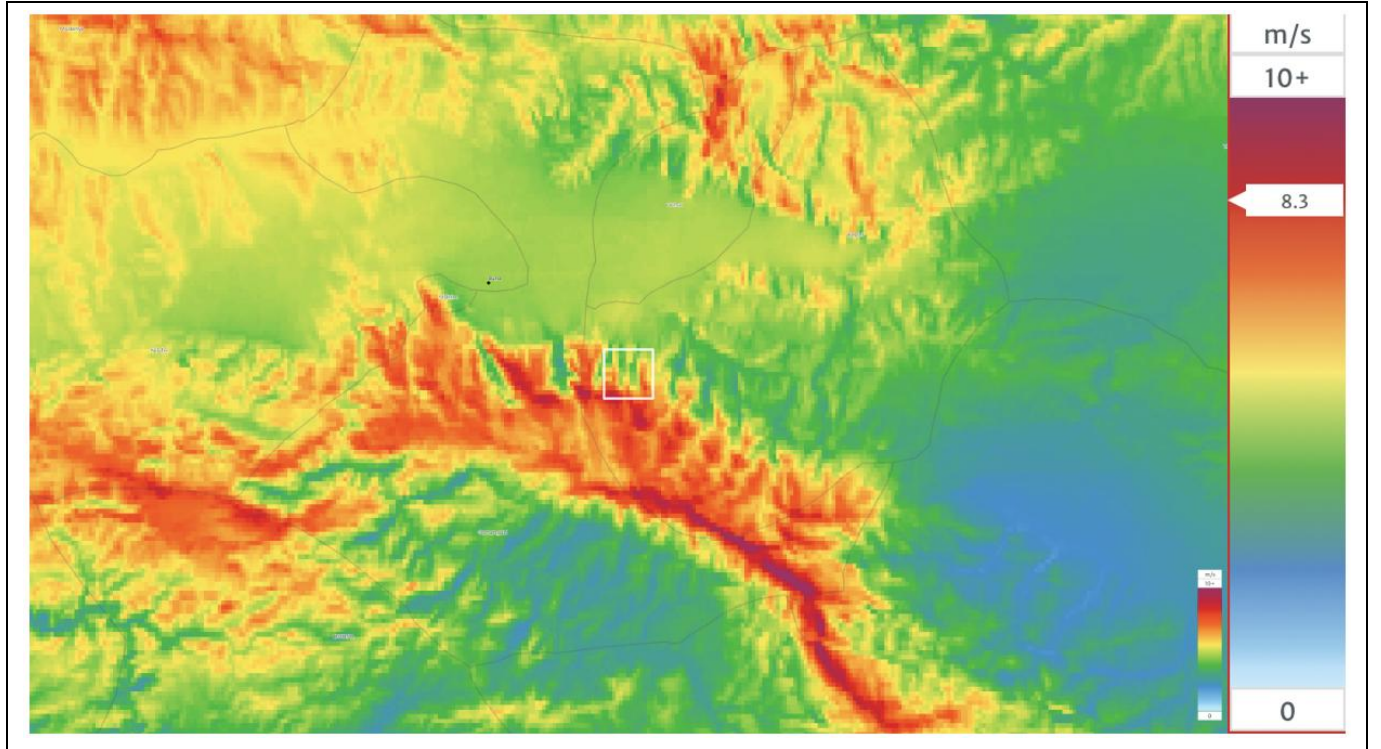
14.7 °C, bağıl nem oranı %72, atmosferik basınç ise 95.4 kPa olarak kabul edilmiştir. Biyogaz üretiminin hava ve iklim şartlarından büyük ölçüde bağımsız olması nedeniyle, ılıman iklimiyle bilinen bu bölge ideal bir konum sunmaktadır. Biyogaz enerji santrali için seçilen bölgenin konumu Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.3 Rüzgar ve biyogaz enerji potansiyellerinin hesaplanması ve tesis kapasitelerinin bulunması

Bu çalışma Bursa ili için yürütülmüş olup, rüzgar ve biyogaz enerjileri için kapasitelerinin hesaplanması da yine Bursa ili içinde olacak şekilde belirlenmiştir. Rüzgar enerjisi için en yüksek kapasite faktörünün elde edilmesi gözetilmiş olup bunun için Global Wind Atlas verileri dikkate alınmıştır [28], [29]. Rüzgar enerjisinden yola çıkarak üretilecek elektrik enerji potansiyeli için Denklem 1 kullanılmıştır. Rüzgar türbinlerinden elde edilebilecek yıllık elektrik üretimi Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{yillik}} = CF \times P_{\text{türbin}} \times 24 \times 365 \quad (1)$$

Bu eşitlikte, E_{yillik} yıllık elektrik üretimini (kWh/yıl), CF kapasite faktörünü (birimsiz), $P_{\text{türbin}}$ rüzgar türbininin kurulu kapasitesini (kW), 24 günlük saat sayısını ve 365 yıl içerisindeki gün sayısını ifade etmektedir. Rüzgar enerji santrallerden çoğunlukla birden fazla türbin kullanılarak hem elektrik üretim kapasitesi arttırılmakta hem de bir elektrik üretim başına düşen maliyet azaltılmaktadır. Fakat, aynı zamanda bölgenin coğrafi ve altyapı koşulları da göz önünde bulundurularak tesis kapasitesi belirlenmektedir. Buna göre 1 rüzgar türbininin kapasitesi 2.3 MW olacak şekilde 5 adet türbinin belirlenen bölgede bir santral teşkil etmesi uygun bulunmuştur. Böylelikle santralin kapasitesi 11.5 MW olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Yıldırım ilçesinde kurulabilecek olan rüzgar enerji santrali için Global Wind Atlas rüzgar hızı haritası (100 m).

Figure 1. Global Wind Atlas wind speed map (100 m) for the potential wind power plant in Yıldırım district.



Şekil 2. Nilüfer ilçesinde kurulabilecek olan biyogaz enerji santrali haritaları. (a): Google Maps tesis konumu. (b): Google Earth tesis konumu.

Figure 2. Maps of the potential biogas power plant in Nilüfer district. (a): Google Maps facility location. (b): Google Earth facility location.

Biyogaz enerji santrali için ise hammadde olarak hayvansal atıkların karışımı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Hayvansal atıklar birlikte kullanıldığında aralarında oluşan sinerji biyogaz üretim verimini arttırdığından; büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanı atıkları birlikte ele alınmıştır. Biyogaz kapasitesinin belirlenmesi için öncelikle Bursa ili hayvan sayısı verilerine ulaşılmıştır [30]. Böylelikle analizi yapılacak biyogaz tesisinin hammaddelerinin Bursa ili içerisinde karşılanabilirliği tespit edilmiştir. Toplama esnasında hayvan dışkılarına karışabilecek taş, toprak gibi yabancı maddeler ile küçük üreticilerin giriş kalite kontrol kriterlerini sağlamakta yaşadığı zorluklar dikkate alınarak, toplama verimi literatürde de önerildiği şekilde 0.25 olarak kabul edilmiştir [31]. Bursa ilinde hayvanlardan toplanabilecek atık ve potansiyel biyogaz miktarları Denklem 2 ve 3'te verilmiştir

$$M_{atık} = N_{hayvan} \times R_{toplama} \times F_{yaş\ atık} \quad (2)$$

$$V_{biyogaz} = M_{atık} \times F_{biyogaz} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde, $M_{atık}$ toplanan atık miktarını (ton/yıl), N_{hayvan} hayvan sayısını (adet), $R_{toplama}$ toplama oranını (birimsiz), $F_{yaş\ atık}$ yaş atık faktörünü (ton/yıl), $V_{biyogaz}$ biyogaz miktarını ($m^3/yıl$) ve $F_{biyogaz}$ biyogaz üretim faktörünü (m^3/ton) ifade etmektedir.

TÜİK'ten elde edilen hayvan sayıları kullanılarak bu hayvanlardan elde edilecek gübre miktarları hesaplanmıştır. Büyükbaş, küçükbaş ve kümes hayvanları için yaş atık

miktarları sırasıyla hayvan sayısı başına 3.6 ton/yıl, 0.7 ton/yıl ve 0.022 ton/yıl olarak kabul edilmiştir. Yaş miktarlarının elde edilmesiyle birlikte, biyogaz üretim faktörleri kullanılarak her bir ton yaş gübre için üretilecek olan biyogaz miktarı hayvan türleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Büyükbaş hayvan gübresinden 33 $m^3/yıl$, küçükbaş hayvan gübresinden 58 $m^3/yıl$ ve kümes hayvanları gübresinden 78 $m^3/yıl$ biyogaz üretileceği sonucuna ulaşılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Biyogaz üretim verileri.

Table 1. Biogas production data.

Parametre	Birim	Hayvan Türü		
		Büyükbaş	Küçükbaş	Kümes
Hayvan Sayısı (N_{hayvan})	adet	265,312	592,090	14,629,201
Toplanan Atık Miktarı ($M_{atık}$)	ton/yıl	238,781	103,616	80,461
Biyogaz Miktarı ($V_{biyogaz}$)	$m^3/yıl$	7,879,767	6,009,714	6,275,927

Bu veriler doğrultusunda, tesiste yılda üretilebilecek toplam biyogaz miktarı 20,165,407 m^3 olarak bulunmuştur. Biyogazın kojenerasyon sistemlerinde elektriksel verimin %35-40 aralığında olduğu varsayımıyla, 1 m^3 biyogazın elektriksel eşdeğeri 2.61 kWh olarak kabul edilmiştir [8]. Bu kabule göre, üretilebilecek yıllık net elektrik miktarı 52,631,712 kWh olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, biyogaz tesisinin

yılda 8760 saat çalıştığı düşünüldüğünde, tesisin teorik maksimum elektrik üretim kapasitesi 6.0 MW kurulu güce karşılık gelmektedir. Ancak teknik ve ekonomik kısıtlar ile modüler motor seçeneklerinin sınırlılığı nedeniyle, tesis için uygulanabilir kurulu güç 5.4 MW olarak belirlenmiştir.

2.4 Enerji analizi

RETSscreen enerji modülünde kurulacak olan rüzgar ve biyogaz enerji santralleri için tesisin kurulu gücüne dayalı olarak yıllık üretilen enerji miktarı hesaplanmaktadır. Rüzgar enerji santrali için türbin seçimi ve biyogaz enerji santrali için gaz motoru seçimi, RETSscreen ürün veri tabanı kullanılarak seçilmiştir ve daha detaylı hesaplamaların yapılabilmesi için Seviye 2 analiz türü kullanılmıştır.

Enerji modülü elektrik ve yakıtlar, teknoloji ve özet olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Elektrik ve yakıtlar aşamasında yakıt türü olarak doğal gaz seçilmiş ve yakıt birim fiyatı 0.16 \$/m³ olarak belirlenmiştir. Elektrik ihracat fiyatı ise Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu'nun (EPDK) yayınladığı ortalama YEKDEM fiyatı ve dolar kuru baz alınarak rüzgar enerji santrali için yıllık 68 \$/MWh, biyogaz enerji santrali için ise yıllık 103 \$/MWh olarak kabul edilmiştir [32].

Enerji modülünün teknoloji aşamasında ise belirlenen bölge için türbin, gaz motoru ve bu ekipmanların sayısı seçilmiştir. Yıldırım ilçesinde kurulacak tesis için her birinin kapasitesi 2.3 MW olan Nordex marka N90 model rüzgar türbininden 5 adet tercih edilmiştir. Kurulacak olan tesisin toplam kapasitesi 11.5 MW olacaktır. Tesis kapasite faktörü %40.1 olarak hesaplanmıştır. Nordex N90 türbininin bağlantı noktası yüksekliği 100 m, türbin başına rotor çapı 90 m ve türbin başına taranan alan ise yaklaşık 6360 m²'dir. Nordex N90 türbin için dizilim kayıpları %2, kanat kayıpları %3 ve çeşitli kayıplar ise %2 olarak seçilmiş olup kullanılabilirlik oranı ise %98 olarak belirlenmiştir. Nilüfer ilçesinde kurulacak biyogaz tesisi için ise her birinin kapasitesi 2.7 MW olan Caterpillar marka MaK M 25 model pistonlu motordan 2 adet tercih edilmiş olup tesis kapasitesi 5.4 MW olarak belirlenmiştir.

2.5 Maliyet analizi

RETSscreen maliyet analizi ara yüzünde, farklı maliyet kalemlerinin girilmesine izin vererek daha detaylı bir değerlendirme yapılmasına imkân sağlayan Seviye 2 analiz türü tercih edilmiştir.

Detaylı maliyet analizleri yapılırken son yıllarda yapılmış çeşitli rüzgar ve biyogaz enerji santrali fizibilite çalışmaları, yüksek lisans çalışmaları ve yayınlar dikkate alınmıştır [12],[23],[31],[33]-[39]. Kurulması planlanan her iki tesis için gerçekleştirilen maliyet analizinde, RETSscreen yazılımının sağladığı analiz yapısına uygun olarak, her iki tesis için maliyetler; ilk yatırım maliyetleri ve işletme-bakım maliyetleri olmak üzere iki ana kategoride ele alınmıştır. İlk yatırım maliyetleri hesaplanırken fizibilite etüdü, geliştirme ve mühendislik kalemleri dikkate alınmıştır. Elektrik sisteminde ise en büyük maliyet kalemine sahip olan Nordex N90 türbin kurulumu, Caterpillar MaK M 25 gaz motoru kurulumu, yol ve iletim hattı yapımları mevcuttur. Yedek parçalar, nakliye, inşaat dönemi faizleri ve eğitim giderleri dikkate alınarak toplam ilk yatırım maliyeti hesaplanmıştır.

İlk yatırım maliyetlerinin yanı sıra, işletme ve bakım maliyetleri, elektrik sistemi, sigorta primleri, işgücü ve öngörülemez giderler dikkate alınarak toplam maliyet hesaplanmıştır. Buna karşın, rüzgar ve biyogaz enerji

santrallerinde elektrik satışından elde edilecek gelirler yıllık gelir olarak hesaplanmıştır.

2.6 Emisyon analizi

RETSscreen emisyon analizi arayüzünde Seviye 2 analiz türü tercih edilmiştir. Baz durum elektrik sistemi için ülkemizde kullanılan karışık yakıt türleri dikkate alınmıştır [24]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynakları Bakanlığı verilerine göre baz durum elektrik sistemindeki yakıt dağılımı, doğalgaz %23.9, fuel oil %0.2, kömür %20.5, güneş %10.6, rüzgar %11, jeotermal %1.6, hidroelektrik %29.8 ve biyokütle %2.4 olarak belirtilmiştir [24]. Ek olarak, sera gazı azaltma kredi oranı 15 \$/tCO₂ olarak kabul edilmiştir [40].

Hem rüzgar hem de biyogaz enerji santrali için elektrik üretim verimliliği için RETSscreen veri tabanında belirtilen doğalgaz için %40.8 değeri, fuel oil için %28.6, kömür için %33.8, güneş, rüzgar ve hidroelektrik için %100, jeotermal için %30 ve biyokütle için %23.3 oranları dikkate alınırken I&D kayıpları için ise %7 değeri varsayılmıştır. Emisyon faktörleri ise CO₂ için 49.4 kg/GJ, CH₄ için 0.0036 kg/GJ ve N₂O 0.0009 kg/GJ olarak kabul edilmiştir. Emisyon analizi sonunda baz durum ve kurulabilecek olan rüzgar enerji santralinin sebep olacağı sera gazı emisyonları ayrı ayrı hesaplanıp bu iki enerji santralinin faaliyete geçmesiyle birlikte oluşacak yıllık sera gazı emisyonundaki öngörülen düşüş hesaplanmıştır.

2.7 Finansman analizi

RETSscreen finansman analizi ara yüzünde Seviye 2 analiz türü tercih edilmiştir. Finansal analiz ara yüzü kullanılarak temel finansal parametreleri belirtildikten sonra kurulması planlanan rüzgar ve biyogaz enerji santrallerinin finansal sürdürülebilirliği; fayda maliyet oranı, vergi öncesi yıllık nakit akışı ve vergi sonrası yıllık nakit akışı gibi projenin ekonomik olarak yapılabilirliğinin değerlendirilmesine olanak sağlayan parametreler hesaplanmıştır. Kurulması planlanan her iki enerji santrali için proje ömrü 25 sene olarak belirtmiştir ve projenin öz sermaye ile yapılacağı varsayılmıştır. Ekonomik parametreler, Türkiye koşulları ve güncel literatür dikkate alınarak belirlenmiştir. Enflasyon oranı %10 [40]; yakıt maliyeti eskalasyon oranı %11, iskonto oranı %12.85, yeniden yatırım oranı %9, gelir vergisi oranı %35, amortisman vergi matrahı %100 ve amortisman oranı %4 olacak şekilde kabul edilmiştir [33], [41]. Elektrik ihracatı eskalasyon oranı ise 11% olarak belirtilmiştir [33]. Yatırımın finansal sürdürülebilirliği amorti süresi, fayda maliyet oranı, yıllık ve kümülatif nakit akış bulgularıyla değerlendirilmiştir. Ek olarak, farklı enerji üretim teknolojilerinin finansal fizibilitesinin değerlendirilmesine olanak sağlayan indirgenmiş elektrik maliyeti (LCOE), kurulması planlanan her iki tesis için de santralin ömrü boyunca toplam maliyetinin üretilen toplam enerji miktarına bölünmesiyle hesaplanmıştır [42].

2.8 Duyarlılık ve risk analizi

Tesisin ekonomik ve teknik parametrelerindeki belirsizliklerin proje performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla RETSscreen yazılımının Duyarlılık ve Risk Analiz modülleri kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji projelerinde yatırım maliyetleri, elektrik satış fiyatları, işletme-bakım giderleri ve karbon kredisi gelirleri zaman içinde değişkenlik gösterebildiğinden, fizibilitenin tek bir deterministik senaryoya dayanması çoğu durumda yeterli olmamaktadır. Bu doğrultuda çalışmada, temel parametrelerdeki olası değişimlerin ekonomik sonuçlara etkisini nicel olarak inceleyen duyarlılık temelli bir yaklaşım uygulanmıştır.

Duyarlılık analizinde, her bir ana parametre için $\pm 25\%$ 'lik bir varyasyon aralığı tanımlanmış, diğer değişkenler sabit tutularak geri ödeme süresindeki değişim hesaplanmıştır. Böylece elektrik satış fiyatı, ilk yatırım maliyeti, işletme-bakım giderleri ve karbon kredisi birim fiyatının proje fizibilitesi üzerindeki göreceli etkisi ortaya konmuştur. Ek olarak, belirsizliklerin proje ekonomisine yansımalarını daha kapsamlı değerlendirebilmek için RETScreen'in Monte Carlo tabanlı risk analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tüm temel parametreler için $\pm 25\%$ 'lik bir dağılım aralığı tanımlanmış, 1000 rastgele senaryo üretilerek geri ödeme süresinin olası dağılımı elde edilmiştir. Böylece proje performansının belirsizlik koşulları altındaki davranışı istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Enerji analizi

Bursa Yıldırım ilçesinde kurulacak olan toplam kurulu gücü 11.5 MW olan rüzgar enerji santrali için her birinin kapasitesi 2.3 MW olan Nordex marka N90 model rüzgar türbinini için rüzgar güç eğrisi dikkate alınarak bir adet Nordex N90 türbini için maksimum üretililecek enerji miktarının 14000 MWh civarında olacağı belirlenmiştir. Tesis kapasite faktörü $\%40.1$ olarak hesaplanmış ve bu kapasite faktörü dikkate alınarak yıllık üretililecek enerji miktarı hesaplanmıştır. Enerji analizi arayüzü kullanılarak ise 5 adet Nordex N90 türbininden oluşacak rüzgar enerji santralinin yıllık 40,408 MWh elektrik üreteceği hesaplanmıştır.

Bursa Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz tesisinin kurulu gücü ise 11.5 MW olarak belirlenmiştir. RETScreen yazılımında, pistonlu motor kullanılabilirliği $\%90$ olarak kabul edilmiştir ve 2 adet 2.7 MW Caterpillar MaK M 25 model gaz motorundan yıllık 47,304 MWh elektrik üreteceği hesaplanmıştır.

3.2 Maliyet analizi

Bursa ili Yıldırım ilçesinde kurulması planlanan rüzgar enerji santrali ve Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz enerji santrali için ilk yatırım ve işletme bakım maliyet kalemleri Tablo 2'de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Her iki tesis için ortak olarak ele alınan ilk yatırım maliyet kalemleri; fizibilite etüdü, geliştirme, mühendislik, elektrik sistemi, sistem dengesi ve diğer giderler şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu kapsamda, fizibilite etüdü saha incelemeleri, teknik uygunluk analizleri ve ön raporlama çalışmalarını; geliştirme kalemi lisanslama, çevresel etki değerlendirme (ÇED) süreçleri ve proje planlama faaliyetlerini; mühendislik giderleri ise teknik projelendirme, uygulama öncesi hazırlıklar ve danışmanlık hizmetlerini kapsamaktadır.

Tablo 2. Rüzgar ve biyogaz enerji santralleri için maliyet analizleri.

Table 2. Cost analyses for wind and biogas power plants.

Maliyet Adı	Rüzgar Enerji Santrali	Biyogaz Enerji Santrali
İlk Maliyetler	1,500,000 \$	2,000,000 \$
Elektrik Sistemi	16,950,000 \$	16,100,000 \$
Sistem Dengesi ve Diğer	2,600,000 \$	2,300,000 \$
Toplam İlk Maliyetler	21,050,000 \$	20,040,000 \$
İşletme Bakım Maliyetleri	7,016,670 \$	25,045,200 \$

Elektrik sistemi giderleri, tesisin ana enerji üretim ekipmanlarının (örneğin türbin veya biyogaz motoru) temini ile birlikte bağlantı hatları, trafo merkezi ve enerji iletim altyapısına ilişkin harcamaları içermektedir. Sistem dengesi ve diğer giderler ise nakliye, yedek parça, eğitim, sigorta, işletmeye alma ve öngörülme giderleri kapsamaktadır.

Yıldırım ilçesinde kurulması planlanan rüzgar enerji santrali için gerçekleştirilen analiz sonucunda toplam ilk yatırım maliyeti 21,050,000 \$, toplam işletme ve bakım maliyeti ise 7,016,670 \$ olarak hesaplanmıştır. Elektrik sistemi maliyetleri, toplam yatırımın $\%81$ 'ini oluşturarak en büyük kalemi teşkil etmektedir. Bu gider kalemi içerisinde Nordex N90 model türbinin yaklaşık 1,300,000 \$/MW birim fiyatla tedarik edileceği varsayılmıştır [23]. Elektrik sistemini $\%12$ ile sistem dengesi ve diğer kalemler, $\%4$ ile mühendislik ve geliştirme faaliyetleri, $\%7$ ile fizibilite etüdü takip etmektedir. Yıllık işletme ve bakım giderlerinin $\%38$ 'i türbin bakım faaliyetlerinden, $\%49$ 'u yedek parça, işgücü ve sigorta priminden, $\%13$ 'ü ise öngörülme giderlerinden oluşmaktadır. Bu maliyetler, literatürde sunulan veriler dikkate alınarak bu çalışma özelinde uyarlanmıştır [12],[33]-[36],[43].

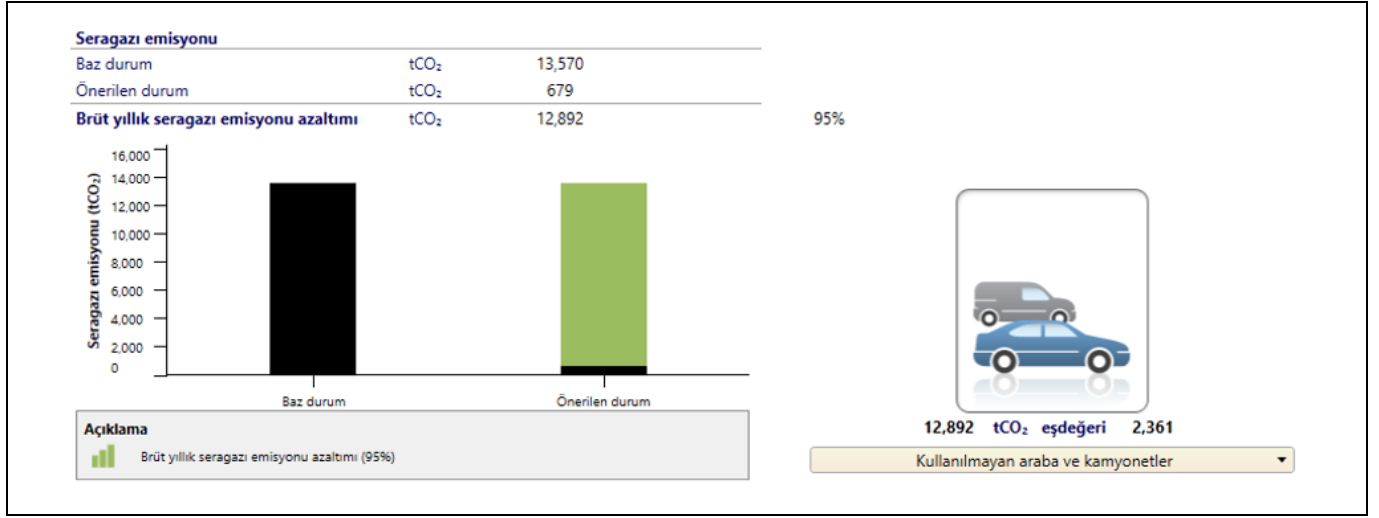
Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz enerji santrali için ise toplam ilk yatırım maliyeti 20,040,000 \$, toplam işletme ve bakım maliyeti ise 25,045,200 \$ olarak hesaplanmıştır. Elektrik sistemi bu maliyetin $\%79$ 'unu oluşturmakta olup, toplam 5.4 MW kurulu güç için kullanılacak olan Caterpillar MaK M 25 pistonlu motorların birim maliyeti 1,300,000 \$/MW olarak kabul edilmiştir [44]. Elektrik sistemini, $\%11$ oranla sistem dengesi ve diğer giderler izlemektedir. Yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin yaklaşık $\%87$ 'si motor bakım ve onarımları, parça değişimi, işçilik ve sigorta priminden oluşurken, kalan $\%13$ 'lük kısım öngörülme giderlere ayrılmıştır. Maliyet kalemleri, literatürde sunulan veriler esas alınarak bu çalışma özelinde modifiye edilmiştir [31],[37]-[39],[45].

Finansman bulguları, her iki tesiste de toplam yatırım maliyetinin en büyük kaleminin elektrik sistemi olduğunu göstermektedir. Rüzgar santralinde bu maliyet, türbin ekipmanının yüksek birim fiyatından; biyogaz santralinde ise motor grubunun benzer şekilde yüksek birim maliyetinden kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak, işletme ve bakım maliyetlerinin biyogaz tesisinde rüzgar santraline kıyasla belirgin biçimde daha yüksek olduğu görülmüştür. Söz konusu farkın, biyogaz motorlarının çalışma yapısı, bakım döngüleri ve parça değişim ihtiyacının daha yoğun olmasından ileri geldiği düşünülmektedir.

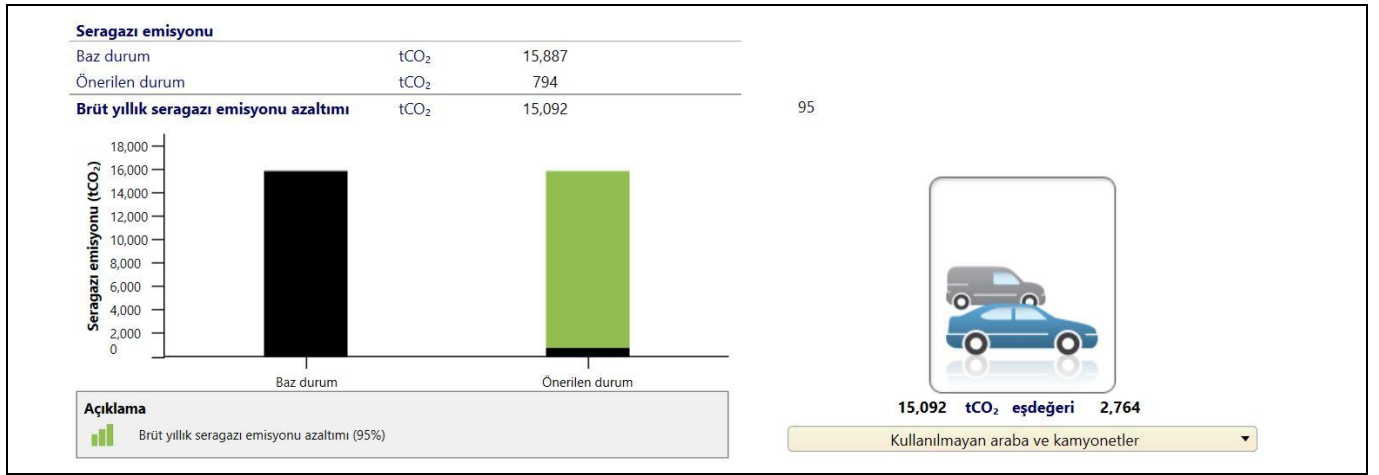
3.3 Emisyon analizi

Bursa Yıldırım ilçesinde kurulması planlanan rüzgar enerji santrali ve Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz enerji santralinin faaliyete geçmesiyle birlikte sırasıyla 679 tCO₂ ve 794 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı emisyonu salınımı öngörülmüştür. RETScreen emisyon analizi ara yüzünden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir.

Rüzgar enerji santrali için karışık yakıtların kullanıldığı baz durum elektrik santralindeki sera gazı emisyonu sırasıyla 13,570 tCO₂ ve 40,270 tCO₂ olarak hesaplanmıştır. Rüzgar enerji santralinin faaliyete geçmesiyle 12,892 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı emisyonunun salınımı önlenmiş olacaktır. Bir başka deyişle, baz duruma kıyasla sera gazı emisyonu salınımı $\%95$ oranında azalacaktır.



(a)



(b)

Şekil 3. Sera gazı emisyonu azaltma özeti, (a): Yıldırım RES. (b): Nilüfer BES.

Figure 3. Summary of greenhouse gas emission reduction. (a): Yıldırım wind power plant. (b): Nilüfer biogas power plant.

Biyogaz enerji santralının faaliyete geçmesiyle ise 15,092 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı salınımı önlenmiş olacaktır. Baz duruma kıyasla, rüzgar enerji santralinde elde edilen sonuca benzer olarak, sera gazı salınımı %95 oranında azalacaktır. Ek olarak, rüzgar enerji ve biyogaz enerji santrallerinin faaliyeti sırasıyla 2361 ve 2764 adet otomobilin trafikten çekilmesi yani sera gazı emisyonuna sebep olmaması olarak da ifade edilebilmektedir.

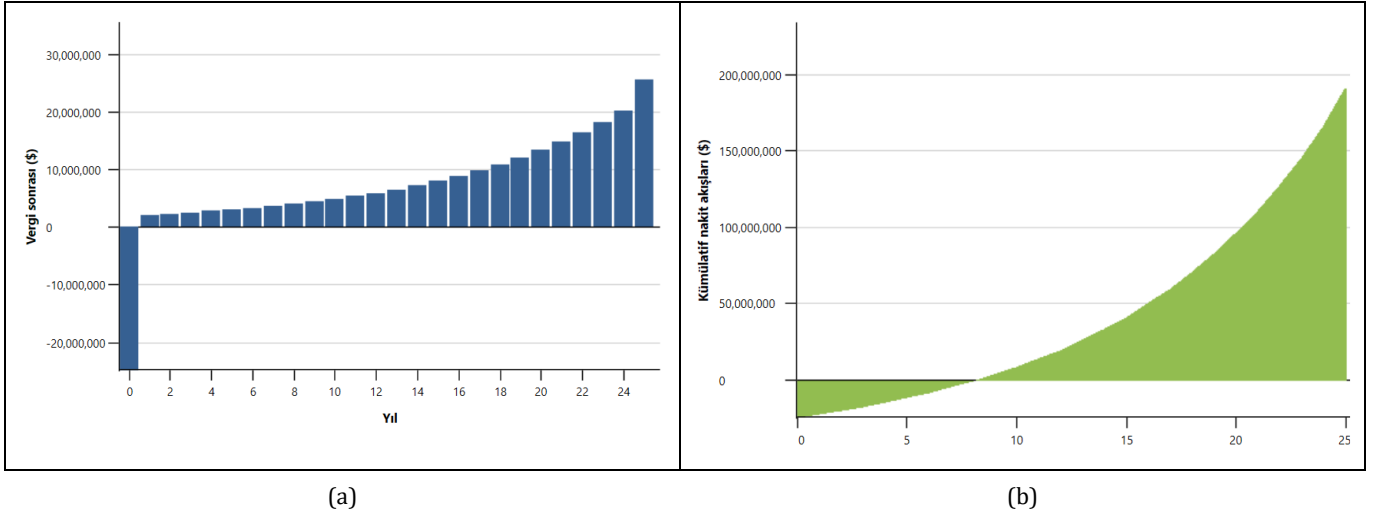
3.4 Finansman analizi

Bursa Yıldırım ilçesinde kurulması planlanan rüzgar enerji santralının finansal sürdürülebilirliği, finansman analizi ara yüzüyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 25 yıl proje ömrüne sahip olan bu yatırımın net yıllık akışı 2,660,430 \$ olarak hesaplanmış ve geri ödeme süresi 8.3 yıl olarak bulunmuştur. Net şimdiki değer (NPV) 10,368,866 \$ olarak hesaplanmıştır. Yıldırım RES için yıllık ve kümülatif nakit akış grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.

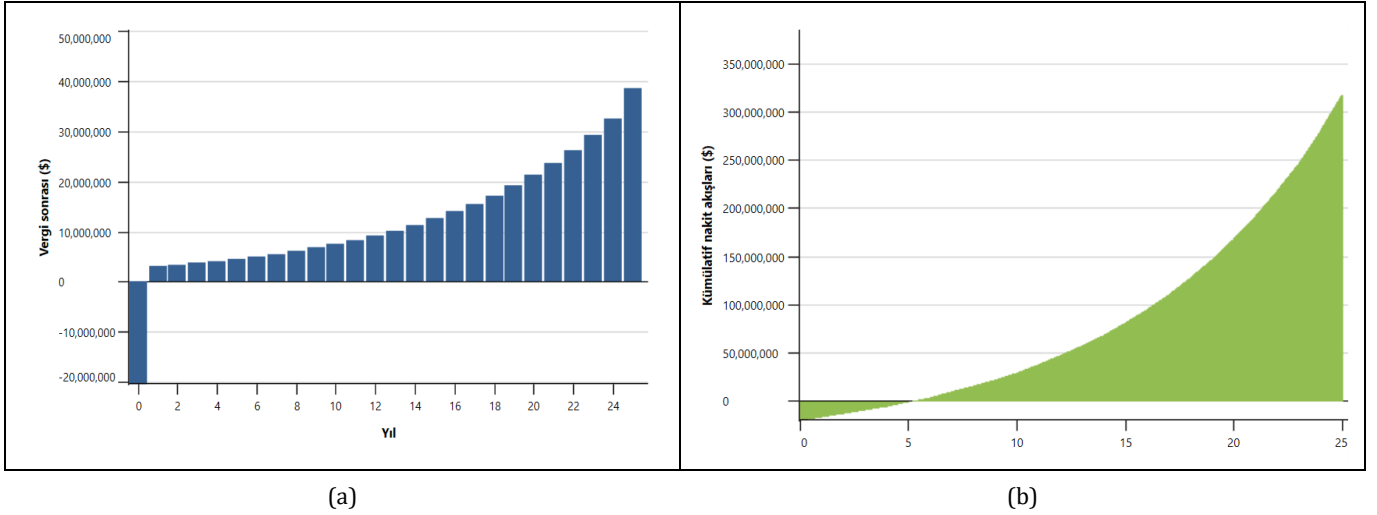
Nilüfer ilçesinde kurulması planlanan biyogaz enerji santralının finansal sürdürülebilirliği, finansman analizi ara yüzüyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 25 yıl proje ömrüne sahip olan bu yatırımın net yıllık akışı

4,096,887 \$ olarak hesaplanmış ve geri ödeme süresi 4 yıl olarak bulunmuştur. Net şimdiki değer (NPV) 33,837,050 \$ olarak hesaplanmıştır. Nilüfer Biyogaz Enerji Santrali için yıllık ve kümülatif nakit akış grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.

Ek olarak, farklı enerji üretim teknolojilerinin finansal fizibilitesinin değerlendirilmesine olanak sağlayan indirgenmiş birim elektrik maliyeti değeri rüzgar enerji santrali ve biyogaz enerji santrali için sırasıyla 27.8 \$/MWh ve 38.1 \$/MWh olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bölgesel maliyet farklılıklarına yönelik genel eğilimlerle uyumludur [46]. Biyogaz enerji santralının finansal analizde daha avantajlı görünmesinin temelinde, daha yüksek yıllık enerji üretimi ve satış fiyatı ile desteklenen gelir potansiyeli yatmaktadır. Biyogaz kaynaklı elektriğin daha yüksek birim fiyatla satılabilmesi, yatırımın geri dönüşünü hızlandırmakta ve net bugünkü değerini artırmaktadır. Bu faktörler bir araya geldiğinde, biyogaz santrali başlangıçta daha yüksek yatırım maliyetine sahip olsa dahi, finansal fizibilite açısından öne çıkmaktadır.



Şekil 4. Yıldırım rüzgar enerji santrali nakit akış grafikleri. (a): Yıllık nakit akış grafiği. (b): Kümülatif nakit akış grafiği.
Figure 4. Cash flow charts of Yıldırım wind power plant. (a): Annual cash flow chart. (b): Cumulative cash flow chart.



Şekil 5. Nilüfer biyogaz enerji santrali nakit akış grafikleri. (a): Yıllık nakit akış grafiği. (b): Kümülatif nakit akış grafiği.
Figure 5. Cash flow charts of Nilüfer biogas power plant. (a): Annual cash flow chart. (b): Cumulative cash flow chart.

3.5 Duyarlılık ve risk analizi

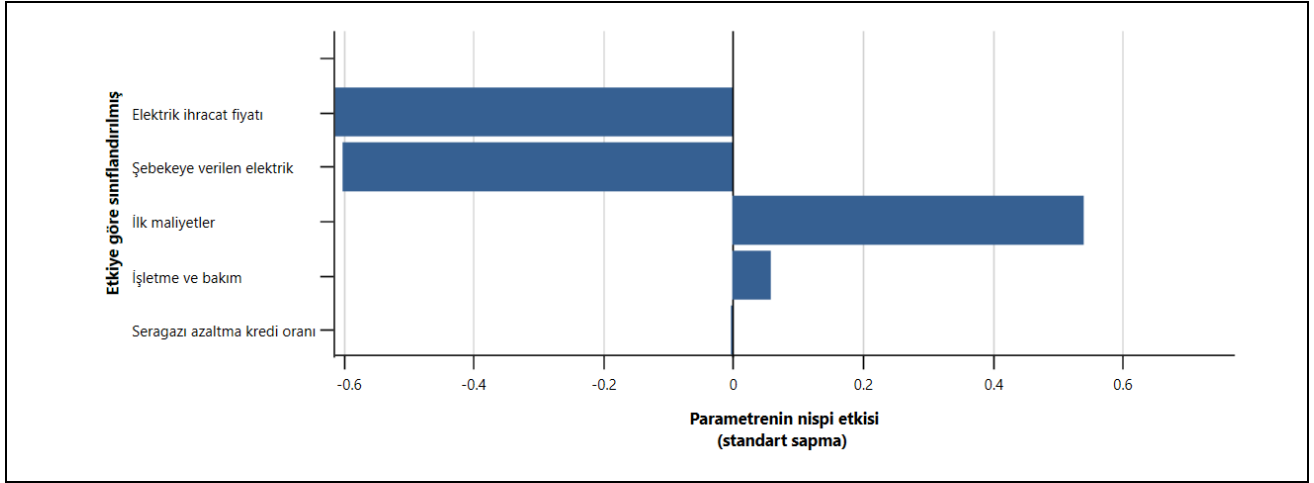
Rüzgar ve biyogaz enerji santrallerinin fizibilite analizlerinde, temel ekonomik ve teknik parametrelerdeki belirsizlikleri dikkate almak amacıyla $\pm 25\%$ 'lik değişim aralığı kullanılarak duyarlılık ve risk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda her iki tesis için ilk yatırım maliyeti, işletme-bakım giderleri, yıllık elektrik üretimi, elektrik satış fiyatı ve karbon kredisi birim değeri değişkenleri aynı belirsizlik yapısı içinde modellenmiştir.

Duyarlılık analizleri (Şekil 6), her iki enerji santrali için de geri ödeme süresinin özellikle gelir bileşenlerine duyarlı olduğunu göstermektedir. Elektrik ihracat fiyatı, normalize edilmiş yaklaşık -0.60 değerindeki katsayısı ile hem rüzgar hem de biyogaz santrallerinde en kritik değişken olarak öne çıkmaktadır. Benzer şekilde, şebekeye verilen yıllık elektrik miktarı da negatif yönlü ve yüksek etki düzeyi sergilemektedir. İlk yatırım maliyetinin geri ödeme süresini artırdığı, ancak bu etkinin gelir parametrelerine kıyasla daha sınırlı olduğu

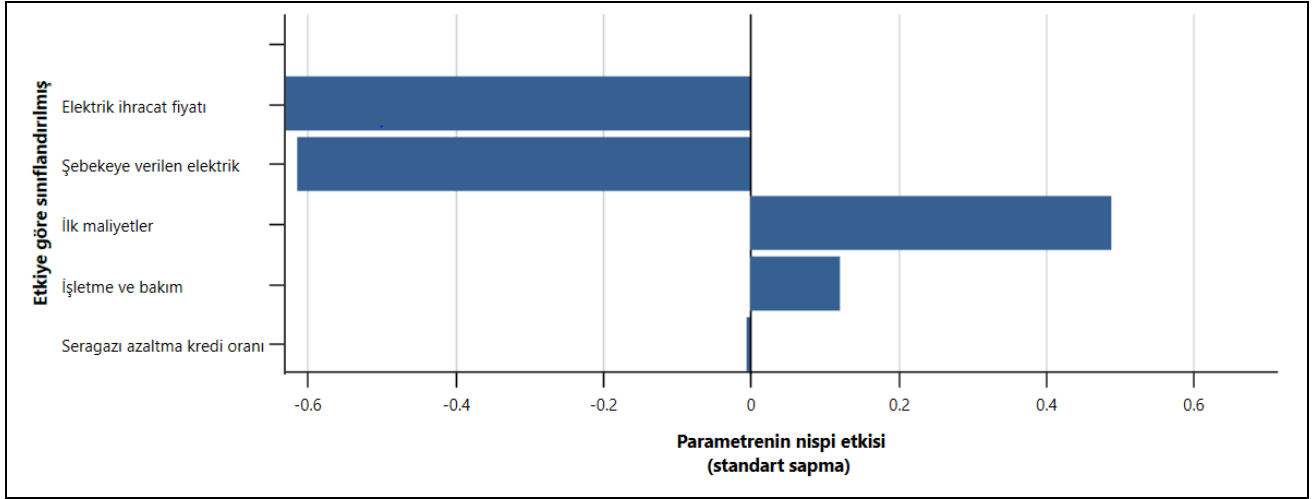
görülmektedir. İşletme bakım giderleri orta düzeyde duyarlılığa sahipken karbon kredisi gelirinin her iki durumda da düşük düzeyde etkili olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, ekonomik performansın temel olarak elektrik fiyatı ve üretim miktarı üzerinden şekillendiğini ve gelir tarafının her iki tesis için de belirleyici olduğunu göstermektedir.

Monte Carlo risk analizleri (Şekil 7), rüzgar ve biyogaz tesislerinin belirsizlik koşullarındaki finansal dayanıklılıklarını ortaya koymaktadır. Rüzgar enerji santralinde geri ödeme süresi 7.1–9.7 yıl aralığında gerçekleşmiş ve dağılım medyanı 8.3 yıl olarak belirlenmiştir.

Dağılım hafif sağa çarpık olup olumsuz piyasa koşullarında geri ödemenin uzayabileceğini işaret etmektedir. Biyogaz tesisinde ise dağılım daha dar bir bantta yoğunlaşmış; geri ödeme süresi 4.4–6.5 yıl arasında değişmiş ve medyan değer 5.3 yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki projede de risk seviyesi 10% olarak belirlenmiş olup, geri ödeme performansının belirsizlik altında dahi nispeten istikrarlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.



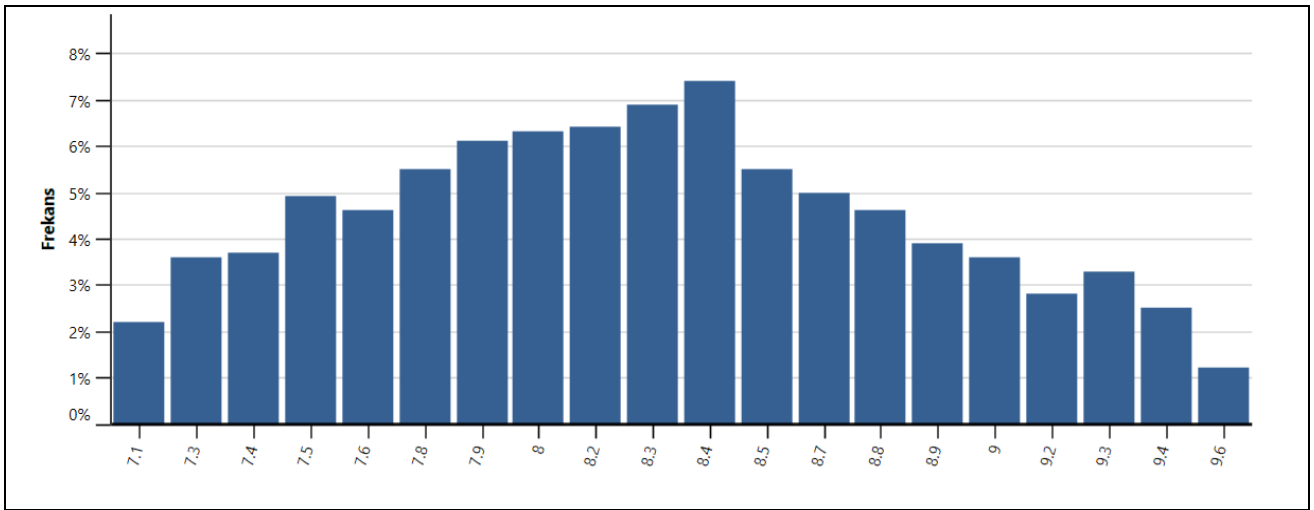
(a)



(b)

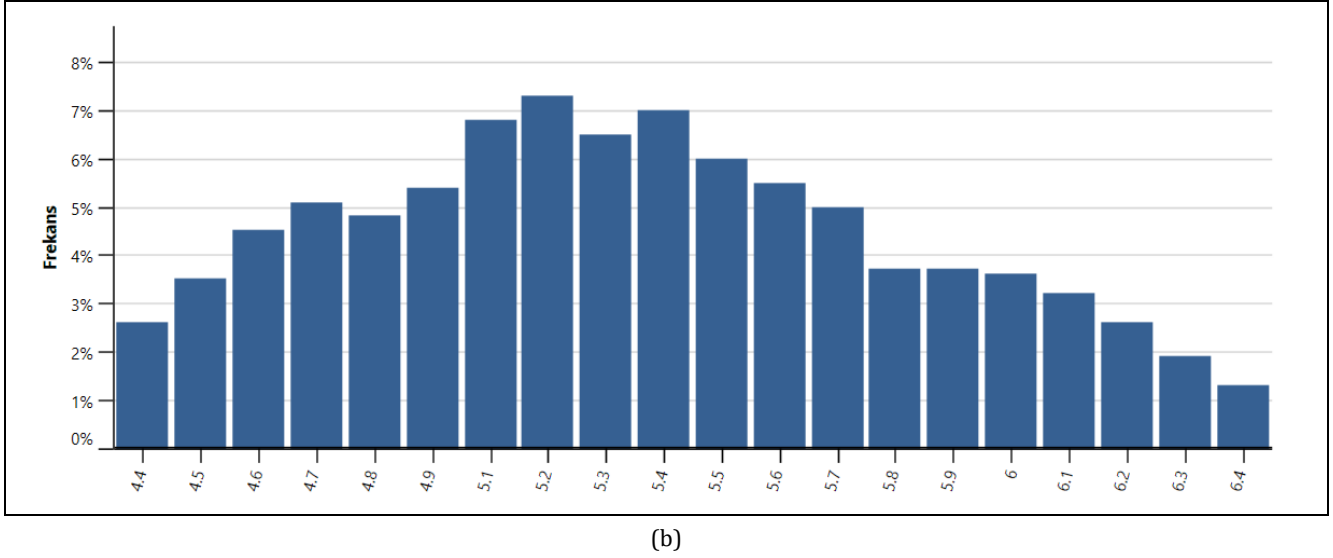
Şekil 6. Duyarlılık analizinde parametrelerin geri ödeme süresi üzerindeki normalize etkileri. (a): Rüzgar enerji santrali. (b): Biyogaz enerji santrali.

Figure 6. Normalized effects of parameters on the payback period in the sensitivity analysis. (a): Yıldırım wind power plant. (b): Nilüfer biogas power plant.



(a)

Şekil 7. Devamı.
Figure 7. Continued.



Şekil 7. Monte Carlo tabanlı geri ödeme süresi olasılık dağılımı. (a): Rüzgar enerji santrali. (b):Biyogaz enerji santrali.

Figure 7. Monte Carlo-based probability distribution of the payback period. (a): Yıldırım wind power plant. (b): Nilüfer Biogas Power Plant.

Genel olarak sonuçlar, her iki teknolojinin de ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu, ancak biyogaz enerji santralinin hem daha kısa geri ödeme süresi hem de daha düşük dağılım genişliği ile belirsizliklere karşı daha dayanıklı bir finansal performans sunduğunu göstermektedir. Buna rağmen rüzgar enerji santrali de geniş parametre aralıklarında sürdürülebilir bir fizibilite profili sergilemekte olup özellikle yatırım maliyetinin daha düşük oynaklığa sahip olması durumunda rekabetçi bir seçenek haline gelmektedir. Bu bütüncül değerlendirme, her iki yatırımın da bölgesel koşullar altında ekonomik olarak yapılabilir olduğunu; ancak biyogaz tesisinin finansal risklere karşı daha güçlü bir direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışma, Bursa ili Yıldırım ve Nilüfer ilçelerinde kurulması planlanan rüzgar ve biyogaz enerji santrallerinin fizibilite değerlendirmelerini kapsamaktadır. Yapılan analizler, her iki enerji santralinin de hem çevresel hem de finansal açıdan sürdürülebilirliğini değerlendirmiştir.

Yıldırım ilçesinde kurulacak olan 2.3 MW kapasiteye sahip 5 adet Nordex N90 türbininden oluşan 11.5 MW kurulu güce sahip olan tesisin yıllık enerji üretimi 40,408 MWh olarak hesaplanmıştır. İndirgenmiş birim elektrik maliyeti 27.8 \$/MWh olup, 25 yıllık proje ömrü dikkate alındığında tesisin geri ödeme süresi 8.3 yıl olarak belirlenmiştir. Projenin finansal sürdürülebilirliğinin yanı sıra, tesisin faaliyete geçmesiyle ve 12,892 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı emisyonunun salınımı önlenerek baz duruma kıyasla 95% oranında seragazı emisyonu salınımı azaltılacaktır.

Nilüfer ilçesinde ise, her biri 2.7 MW 2 adet Caterpillar MaK M 25 pistonlu motor kullanılarak 5.4 MW kurulu güce sahip bir biyogaz enerji santrali kurulacaktır ve bu tesis yıllık 47,304 MWh elektrik üretimi sağlayacaktır. Tesisin indirgenmiş birim elektrik maliyeti 38.1 \$/MWh olup, projenin geri ödeme

süresinin 5.3 yıl olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tesisin faaliyete geçmesiyle 15,092 tCO₂ eşdeğerinde sera gazı emisyonunun salınımı önlenecek ve %95 iyileşme sağlanacaktır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular her iki teknolojinin de ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu ve belirsizlik koşullarında istikrarlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, biyogaz enerji santralinin daha kısa geri ödeme süresi ve daha dar dağılım aralığı sunması, finansal sonuçlarının değişkenlik altında dahi nispeten daha öngörülebilir olduğunu göstermektedir. Öte yandan, rüzgar enerji santrali geniş parametre aralıklarında sürdürülebilir bir fizibilite profili ortaya koymakta ve özellikle yatırım maliyetindeki belirsizliğin sınırlı olduğu koşullarda rekabetçi bir seçenek olarak değerlendirilebilmektedir. Bu bütüncül değerlendirme, iki yatırımın da bölgesel koşullar altında uygulanabilir olduğunu ve farklı güçlü yönleriyle enerji planlamasında dikkate alınabilecek alternatifler sunduğunu ortaya koymaktadır.

5 Conclusions

This study evaluates the feasibility of wind and biogas power plants planned to be established in the Yıldırım and Nilüfer districts of Bursa. The analyses considered both the environmental and financial sustainability of the proposed facilities. In Yıldırım, a wind power plant comprising five Nordex N90 turbines with a total installed capacity of 11.5 MW (2.3 MW each) is projected to generate 40,408 MWh of electricity annually. The levelized cost of electricity was calculated as 27.8 \$/MWh, and with a lifetime of 25 years, the project is expected to achieve payback within 8.3 years. In addition to financial sustainability, the operation of the facility will prevent 12,892 tCO₂-eq emissions, resulting in a 95% reduction compared to the baseline scenario. In Nilüfer, a biogas power plant with two Caterpillar MaK M 25 engines (2.7 MW each) and a total capacity of 5.4 MW will be established. The facility is expected to produce 47,304 MWh of electricity

per year. The levelized cost of electricity was estimated as 38.1 \$/MWh, with a payback period of only 5.3 year. Moreover, the operation of the plant will prevent 15,092 tCO₂-eq emissions, achieving a 95% reduction compared to the baseline.

In conclusion, the findings indicate that both technologies offer economically feasible options for regional renewable energy development and maintain stable performance under the examined uncertainty conditions. The biogas power plant exhibits shorter payback periods and a more concentrated distribution of financial results, pointing to relatively higher predictability across the simulated scenarios. The wind power plant, in contrast, maintains a consistent feasibility profile across a more extensive range of scenario conditions and remains a competitive option, particularly when variations in capital expenditure are limited. Overall, the results suggest that both systems can be integrated into regional energy planning efforts, each contributing distinct advantages that may support broader environmental and sustainability objectives.

6 Yazar katkı beyanı

Tuba Arıdil Ayten ve Ayşe Büşra Gerçek, çalışmanın fikrinin geliştirilmesi, tasarımın yapılması, literatür taramasının gerçekleştirilmesi, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımına katkı sağlamıştır. Samet Öztürk çalışmanın fikrinin geliştirilmesi, makalenin yazımının denetimi ve içerik açısından kontrolüne katkıda bulunmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Altınkaya M. Bir Rüzgar Enerji Santralinin Kuruluş Yerinin Tespiti, Optimum Turbin Seçimi Ve Fizibilite Analizinin Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [2] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524, 2011.
- [3] Ağbulut Ü. "A novel stochastic model for very short-term wind speed forecasting in the determination of wind energy potential of a region: A case study from Turkey". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101853, 2022.
- [4] Holechek JL, Geli HME, Sawalhah MN, Valdez R. "A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050?". *Sustainability*, 14(8), 4792, 2022.
- [5] Öztürk HH. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları*. İstanbul, Türkiye, Birsan Yayınevi, 2013.
- [6] Yılmaz M. "Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi". *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54, 2012.
- [7] Özkan A, Uslu Y, Gedikli E. "Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinde rüzgar gücü ve Danimarka örneği". *Akdeniz Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 26-35, 2022.
- [8] Tırınk S. "Hayvansal atıkların biyogaz üretim potansiyelinin hesaplanması: Iğdır ili örneği", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 152-163, 2022.
- [9] Koç E, Kaya K. "Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu". *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36-47, 2015.
- [10] Şenlik İ, "Cumhuriyetin 100. Yılında Güney Marmara Elektrik Enerjisi Raporu". Bursa, Türkiye, 2024.
- [11] Çelikdemir S, Özdemir MT. "Türkiye karasal rüzgar enerji santrallerin maliyet analizi: Adilcevaz bölgesi vaka çalışması". *Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(75), 539-550, 2023.
- [12] Yakşı B. Bursa İli Kıyı Şeridi Rüzgar Enerjisi Potansiyel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2018.
- [13] REPA. "Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımı-100 metre". <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/BURSA-REPA.pdf> (27.07.2024).
- [14] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Biyokütle enerjisi potansiyeli atlası". <https://bepa.enerji.gov.tr/> (27.08.2024)
- [15] Özcan M, Öztürk S, Yıldırım M. "Türkiye'nin farklı kaynak tiplerine göre biyogaz potansiyellerinin belirlenmesi". 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 12 Mayıs 2011.
- [16] Dalabeeh ASK. "Techno-economic analysis of wind power generation for selected locations in Jordan". *Renewable Energy*, 101, 1369-1378, 2017.
- [17] Ayed Y, Al Afif R, Fortes P, Pfeifer C. "Optimal design and techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems: A case study of Thala city, Tunisia". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 19(1), 2308843, 2024.
- [18] Bakır C, Yılandı A. "Türkiye'deki farklı iller için şebekeye bağlı arazi ve çatı tipi lisanssız fotovoltaik güç santrallerinin tekno-ekonomik analizi". *Mühendis ve Makina*, 63(709), 560-584, 2022.
- [19] Bor A, Üçtuğ FG. "Environmental and economic life cycle assessment of a run-of-the-river type hydroelectricity power plant in Turkey". *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(1), e13716, 2022.
- [20] Ersan Y, Ülgen K, Bilgili M. "Techno-economic optimization of stand alone hybrid renewable energy systems". *Veri Bilimi*, 8(1), 66-76, 2025.
- [21] Kestane Ö, Ülgen K. "Techno-economic analysis of wind power plants: A case study of Milas-Turkey". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 12(12), 1088-1100, 2017.
- [22] Doğan BT, Çolakoglu A, Kincay O. "RETScreen analiz programı ile Hatay'da rüzgar enerji santrali fizibilite analizi". *Tesisat Mühendisliği*, 131, 22-27, 2012.
- [23] Şanlı B, Günöz A. "Mersin ilinin farklı ilçelerinde kurulabilecek rüzgar enerjisi santrallerinin retscreen programı ile fizibilite analizleri ve karşılaştırılmaları". *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 478-487, 2018.
- [24] Korkmaz B, Hacısalihoğlu S. "Fotovoltaik ve biyogaz enerji sistemlerinin enerji ve çevresel potansiyellerinin incelenmesi: Süt sığırcı çiftliği örneği". *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 29(1), 245-262, 2024.
- [25] Paolini V, Petracchini F, Segreto M, Tomassetti L, Naja N, Cecinato A. "Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge". *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 53(10), 899-906, 2018.

- [26] Leung DY, Yang Y. "Wind energy development and its environmental impact: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1031-1039, 2012.
- [27] Sulukan E. "Techno-economic and environmental analysis of a photovoltaic system in İstanbul". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 127-132, 2020.
- [28] World Bank Group. "Global Wind Atlas". <https://globalwindatlas.info/en> (27.08.2024).
- [29] Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı. "Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi Tesisi Fizibilite Çalışması". Bursa, Türkiye, Fizibilite Raporu, 2015.
- [30] Türkiye İstatistik Kurumu. "Merkezi Dağıtım Sistemi (MEDAS)". <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr> (27.08.2024).
- [31] Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. "Kahramanmaraş İlinde Biyogaz Tesisleri Kurulmasına Yönelik Fizibilite Raporu". Kahramanmaraş, Türkiye, Fizibilite Raporu, 2020.
- [32] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)". <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-122/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-destekleme-mekanizmasi-yekdem> (08.08.2025).
- [33] Karataş O. Eskişehir ilinde kurulabilecek rüzgar enerji santralinin ekonomik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 2020.
- [34] Güney Marmara Kalkınma Ajansı. "Balıkesir ili rüzgar türbini-generatör ve nacelle üretim tesisi ön fizibilite raporu". Balıkesir, Türkiye, Ön Fizibilite Raporu, 2022.
- [35] Kuzey Anadolu Kalkınma Ajansı. "Sinop İli Rüzgar Enerji Santrali Ön Fizibilite Raporu". Sinop, Türkiye, Ön Fizibilite Raporu, 2021.
- [36] Uzunlar FB. Rüzgar Santrali Bileşenlerinin Analitik Ağ Süreci Kullanarak Yeni Bir Yaklaşımla Çok Ölçütlü Seçimi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. 2020.
- [37] Fırat Kalkınma Ajansı. "Elazığ İli Biyogaz Üretim Tesisi Ön Fizibilite Raporu". Elazığ, Türkiye, Ön Fizibilite Raporu, 2021.
- [38] Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı. "Bursa İli Biyogaz Tesisi Yatırımı Ön Fizibilite Raporu". Bursa, Türkiye, Ön Fizibilite Raporu, 2021.
- [39] Salihoğlu NK, Teksoy A, Altan K. "Büyükbaş ve küçükbaş hayvan atıklarından biyogaz üretim potansiyelinin belirlenmesi: Balıkesir ili örneği". *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 31-47, 2019.
- [40] Diken B, Kayışoğlu B. "RetScreen programı kullanılarak tekindağ namık kemal üniversitesi ziraatbiyotek binasına uygulanabilecek fotovoltaiik tasarımın fizibilite analizi", *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(3), 656-667, 2022.
- [41] T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı. "Ekonomik Göstergeler". <https://www.hmb.gov.tr/bumko-ekonomik-gostergeler> (08.08.2025).
- [42] Saray E. Yenilenebilir enerji üretim ve yatırım maliyetleri karşılaştırması: Ege bölgesi örneği. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, Türkiye, 2019.
- [43] Stehly T, Duffy P, Mulas Hernando D. "Cost of Wind Energy Review: 2024 Edition". National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, Technical Report, NREL/PR-5000-91775, 2024.
- [44] USP&E Global. "Caterpillar Natural Gas Generator Set". <https://uspeglobal.com/inventory> (08.08.2025).
- [45] Jarrar L, Ayadi O, Al Asfar J. "Techno-economic aspects of electricity generation from a farm based biogas plant". *Journal of Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems*, 8(3), 476-492, 2020.
- [46] Badouard T, Moreira de Oliveira D, Yearwood J, Torres P. "Cost of Energy (LCOE): Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments". Trinomics B.V, Rotterdam, The Netherlands, Final Report, TEC1204EU, 2020.