

Afyonkarahisar rüzgâr enerji potansiyelinin TR33 kalkınma bölgesi illeriyle karşılaştırmalı analizi ve örnek bir fizibilite

Comparative analysis of Afyonkarahisar wind energy potential with TR33 development region provinces and a sample feasibility

Fatih Serttaş^{1*} 

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
fserttas@aku.edu.tr, serttasf@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.01.2025
Kabul Tarihi/Accepted: 10.04.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 03.03.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.58535
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtların tüketimlerinin artması, küresel ısınma ve karbon salınım değerlerinin yükselmesi nedeniyle tüm dünyada yenilenebilir enerji kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ülkemizde de yenilenebilir enerji yatırımları, geçtiğimiz yıllarda büyük bir ivmeyle artış göstermiştir. Afyonkarahisar ili, günümüzde yalnızca gastronomisiyle değil, artan yenilenebilir enerji tesisleriyle de ön plana çıkmaktadır. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü 350 MW olan ve Türkiye'nin en büyük rüzgâr enerji santrallerinden birini il sınırları içerisinde barındıran Afyonkarahisar'ın rüzgârdan ürettiği güç, yeni kurulan türbinlerle gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu çalışmada Afyonkarahisar'ın rüzgâr enerji potansiyeli analiz edilmiş, TR33 bölgesindeki diğer illerle karşılaştırmalar yapılmış, bölgede yapılması olası enerji yatırımlarının uygulanabilirliği değerlendirilmiş ve uluslararası endüstriyel standartlardaki WASP yazılımıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca rüzgâr enerji santrallerinin bölgenin kalkınmasına etkileri de tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Afyonkarahisar, Enerji, Rüzgâr enerjisi, TR33 bölgesi, WASP.

Abstract

Due to the increasing energy demand, increasing consumption of fossil fuels, global warming, and rising carbon emission values, renewable energy use is becoming widespread worldwide. Renewable energy investments in our country have also increased rapidly in recent years. Afyonkarahisar province stands out not only in its gastronomy but also in its growing renewable energy facilities. Afyonkarahisar, which has an installed wind energy capacity of 350 MW and hosts one of the largest wind energy plants in Turkey within the provincial borders, is increasing the power it produces from wind day by day with newly installed turbines. In this study, the wind energy potential of the Afyonkarahisar is analyzed, comparisons are made with other provinces in the TR33 region, the feasibility of possible energy investments in the area is evaluated, and simulations are carried out with the WASP software at international industrial standards. In addition, the effects of wind energy plants on the region's development are discussed.

Keywords: Afyonkarahisar, Energy, Wind energy, TR33 region, WASP.

1 Giriş

Afyonkarahisar bölgesi, Türkiye'nin rüzgâr enerji potansiyeli açısından önem taşıyan bölgelerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalar, özellikle bölgenin uygun rüzgâr hızlarına sahip olduğunu ve enerji üretimi için elverişli koşullar sunduğunu göstermektedir [1]. Özellikle, rüzgârın sürekliliği ve bölgesel meteorolojik özellikler, Afyonkarahisar'ın enerji üretimi açısından güçlü bir aday olduğunu ortaya koymaktadır [2]. Bununla birlikte, bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, gelecekteki enerji projeleri için kritik bir rol oynayacaktır [3].

Ülkenin enerji stratejisi, sürdürülebilir enerjiye olan talebi karşılamak ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla yenilenebilir kaynaklardan yararlanmaya daha fazla odaklanmaktadır. Türkiye'nin teorik rüzgâr enerjisi kapasitesinin yıllık yaklaşık 160 teravat saat olduğu tahmin edilmekte olup, Marmara, Ege ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri rüzgâr enerjisi geliştirilmesi açısından yüksek uygunluğa sahip bölgeler olarak öne çıkmaktadır [4]. Bu bölgelerdeki rüzgâr hızlarının 3 m/s'nin üzerinde olması, geniş çapta rüzgâr enerjisi üretimi için ideal koşulları sağlamaktadır.

Son çalışmalar, Türkiye'nin toplam rüzgâr enerjisi potansiyelinin yaklaşık 131.756,40 MW'a ulaştığını ve deniz rüzgârı enerjisi kapasitesinin de kayda değer olduğunu göstermektedir [5]. Bu potansiyelin kullanımı, kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesinin 1998 yılında sadece 1,5 MW iken 2010 yılına gelindiğinde 1522,20 MW'a yükselmesiyle önemli bir artış göstermiş, sektördeki yatırımlar ve teknolojik ilerlemeler hız kazanmıştır [5].

Rüzgâr enerjisi fizibilitesi, bir bölgedeki rüzgâr kaynağının belirlenmesi, uygun türbin seçimi, enerji üretiminin tahmin edilmesi ve ekonomik analizlerin yapılmasını içerir. Bu süreçte, meteorolojik veriler, arazi özellikleri, çevresel faktörler ve sosyo-politik etkiler gibi birçok değişken dikkate alınır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesi için gelişmiş modelleme yöntemlerinin ve yazılımların kullanıldığını göstermektedir. Örneğin, Umman'daki bir kıyı bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyeli, WRF modeli ile değerlendirilmiş ve farklı türbin tipleri için enerji üretimini tahmin edilmiştir [25]. Benzer bir fizibilite çalışmasında, Cezayir'deki uzak bir bölge için hibrit bir yenilenebilir enerji sisteminin (rüzgâr, güneş ve dizel) teknik ve ekonomik fizibilitesi araştırılmıştır. HOMER Pro yazılımı kullanılarak sistemin optimizasyonu yapılmış ve maliyet analizi gerçekleştirilmiştir [26]. Başka bir çalışmada ise, Çin'deki Bohai

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Denizi'nde bir açık deniz rüzgâr çiftliği için yüksek çözünürlüklü bir meteoroloji modeli kullanılarak rüzgâr verilerini analiz etmiş ve türbin yerleşimini optimize etmiştir [27]. Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesinde kullanılan gelişmiş teknikleri ve modelleri göstermesi açısından önemlidir.

Rüzgâr enerjisi projelerinin başarısında sadece teknik ve ekonomik faktörler değil, sosyo-politik faktörler de önemli bir rol oynamaktadır. Halkın kabulü, paydaşların katılımı ve çevresel etkiler gibi konular, projelerin ilerleyişini ve başarısını etkileyebilir. Almanya ve Danimarka'daki rüzgâr enerjisine halkın kabulü karşılaştırmalı olarak incelemiş ve algılanan faydalar, riskler, güven ve katılımın kabul üzerindeki etkileri analiz edilmiştir [28]. Bir diğer çalışmada ise Amerika Birleşik Devletleri'ndeki rüzgâr enerjisi projelerinin toplum faydaları ve sosyal kabul arasındaki ilişkisi araştırılmıştır [29]. Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi projelerinin sosyo-politik boyutlarının dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmalara ek olarak, Truong Vietnam'da rüzgâr enerjisi santralının fizibilitesini değerlendirmiş ve bölgedeki rüzgâr potansiyelini belirleyerek uygun türbin seçimi ve enerji üretimi tahminlerini yapmıştır [30]. Ghimire ve diğ. Nepal'in farklı bölgelerinde rüzgâr enerjisi kaynak değerlendirmesi ve fizibilite çalışmaları gerçekleştirmişlerdir [32]. Özellikle Mustang bölgesindeki çalışmalarında, nehir yatağının rüzgâr potansiyelini detaylı olarak incelemişlerdir. Malik Umman'da büyük ölçekli rüzgâr enerjisi entegrasyonunu da içeren bir üretim genişletme planlaması çalışması yaparak, rüzgâr enerjisinin ülke enerji sistemine katkısını araştırmıştır [33]. Himri ve diğ. ise Cezayir'in güneybatı bölgesindeki rüzgâr enerjisi potansiyelini belirleyerek, ekonomik fizibilite analizleri yapmışlardır [38].

Reutter [31] ve Sveinbjornsson [34] ise WAsP programının karmaşık ve ormanlık arazi koşullarında kullanımını inceleyerek, programın bu tür bölgelerdeki doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalar, WAsP'in farklı arazi tiplerinde rüzgâr enerjisi potansiyelini doğru bir şekilde tahmin etmede ne kadar etkili olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

Bu çalışmalar, rüzgâr enerjisi fizibilitesinde kullanılan gelişmiş teknikleri, farklı coğrafi bölgelerdeki uygulamaları ve modelleme yaklaşımlarını göstermesi açısından önemlidir. Farklı ülkelerdeki rüzgâr enerjisi projelerinin fizibilitesi üzerine yapılan bu çalışmalar, rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte ne kadar önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu ve farklı coğrafyalarda nasıl değerlendirilebileceğini göstermektedir.

WAsP yazılımının rüzgâr enerjisi çalışmalarında sıklıkla kullanıldığı, [35],[36],[39],[41] ve [43]'deki çalışmalarda da vurgulanmıştır. Bu çalışmalar, WAsP'in rüzgâr enerjisi projelerinde ne kadar yaygın olarak kullanılan ve güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir. WAsP, rüzgâr atlası oluşturma, rüzgâr akışı simülasyonu, türbin yerleşimi optimizasyonu ve enerji üretimi tahmini gibi birçok farklı amaç için kullanılabilir.

Rüzgâr ve güneş enerjisini bir arada kullanan hibrit yenilenebilir enerji sistemleri, Türkiye'nin artan elektrik talebine güvenilir bir çözüm olarak önerilmektedir [6]. Bu sistemler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltırken çevresel etkileri en aza indirerek sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaktadır [7]. Türkiye, Vision 2023 enerji stratejisinin bir parçası olarak, rüzgâr enerjisi kapasitesini önemli ölçüde

artırmayı hedeflemekte ve 2023 yılı itibarıyla 20 GW kapasiteye ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu hedef, ülkenin hava kirliliğini azaltma ve yenilenebilir enerji kaynakları yoluyla enerji güvenilirliğini artırma taahhüdü ile örtüşmektedir [8].

Bu umut verici gelişmelere rağmen, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi sektörü hala bürokratik engeller ve yatırımları artırmak için daha etkili teşviklere ihtiyaç gibi zorluklarla karşı karşıyadır [9]. Bu sorunların ele alınması, ülkenin rüzgâr enerjisi potansiyelinden tam anlamıyla yararlanmasını ve sürdürülebilir büyümeyi sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu makale, Türkiye'nin yenilenebilir enerji manzarasını detaylı bir şekilde inceleyerek, rüzgâr enerjisi potansiyelini, karşılaşılan zorlukları ve gelecekteki yönelimleri ele almaktadır. Yapılan bir diğer çalışmada ise Türkiye'nin toplam teknik rüzgâr enerjisi potansiyelinin yalnızca %4'ünü kullandığı ve bu potansiyelin yeterince değerlendirilebilmesi için daha fazla araştırma ve uygulama çabasına ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Bu çalışma, Yalova'nın rüzgâr enerjisi özelliklerini bir yıllık saatlik rüzgâr verileri kullanarak istatistiksel formülasyonlarla analiz etmiştir [10].

Başka bir çalışmada, Ankara'nın İncek bölgesinde rüzgâr enerjisi potansiyeli araştırılmış ve maksimum güç yoğunluğunun mart ayında 98 W/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Bu bölge, büyük ölçekli rüzgâr türbin kullanımına uygun olmamakla birlikte, iki küçük ölçekli türbinin Türkiye'deki ortalama bir hanenin yıllık enerji ihtiyacını karşılayabileceği görülmüştür [11].

Türkiye'nin rüzgâr enerjisi potansiyelinin pek çok gelişmiş ülkeden daha yüksek olduğu fakat bu potansiyelin verimliliğinin, ulusal yenilenebilir enerji politikalarının yetersizliği ve teşvik eksikliği nedeniyle düşük kaldığı belirtilmiştir. Enerji planlaması ve yönetimi, Türkiye'de rüzgâr enerjisinin teşvik edilmesi için önem taşımaktadır [12]. Çanakkale ili, Türkiye'nin toplam kurulu rüzgâr gücünün %10'undan fazlasını barındıran ve yıllık ortalama güç yoğunluğu 350 W/m^2 'nin üzerinde olan Bozcaada gibi büyük ölçekli elektrik üretimi için yüksek potansiyele sahip bölgeler arasında yer almaktadır [13].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde Türkiye'nin yüksek bir rüzgâr enerji potansiyeli olduğu, halen yeterince bu potansiyelde yararlanılmadığı görülmekte, ancak Afyonkarahisar ve çevresinin rüzgâr potansiyeli hakkında detaylı bilimsel çalışmalara rastlanılmamaktadır. Bu çalışmanın bölgenin potansiyeli hakkında kaynak niteliğinde olacağı öngörülmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde TR33 bölgesi rüzgâr potansiyel haritaları, ikinci bölümünde kullanılan materyal ve yöntem, üçüncü bölümünde Afyonkarahisar'da kurulabilecek örnek bir RES için fizibilite çalışması, dördüncü bölümünde bu santralin fizibilitesinden elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Beşinci bölümde rüzgâr enerji santrallerinin sosyo-politik etkilerinden bahsedilmiş ve son bölümdeyse tartışma ve sonuca yer verilmiştir.

2 Rüzgâr potansiyel haritaları

Çalışmanın bu bölümünde, Global Wind Atlas (GWA) verileri kullanılarak Türkiye'nin TR33 bölgesi, yani Afyonkarahisar, Kütahya, Uşak ve Manisa illerinin rüzgâr enerjisi potansiyeli karşılaştırılmıştır. GWA'nın sağladığı yüksek çözünürlüklü rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu haritaları, bu illerin rüzgâr enerjisi üretim kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Her bir ilin coğrafi ve meteorolojik özellikleri

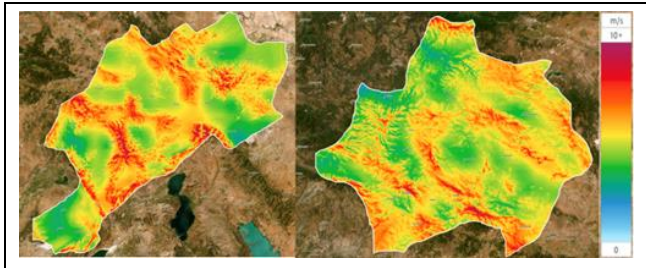
ışığında yapılan bu karşılaştırma, bölgedeki enerji yatırımlarının fizibilitesini değerlendirmeye yardımcı olacak ve yerel enerji politikalarının geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Harita bilgilerini vermeden önce rüzgâr enerjisinin genel özelliklerinden bahsetmek gerekirse, atmosferdeki rüzgâr hareketlerinden elde edilen kinetik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayan bir yenilenebilir enerji türüdür. Rüzgâr türbinleri aracılığıyla elde edilen bu enerji, çevreye zararlı emisyonlar üretmeden sürdürülebilir enerji kaynağı sunmaktadır. Rüzgâr enerjisi, özellikle rüzgâr hızının yüksek olduğu bölgelerde etkin bir şekilde kullanılır ve fosil yakıtların tükenebilirliği karşısında önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Rüzgâr enerjisinden elde edilecek gücü aşağıdaki bağıntıdan hesaplamak mümkündür.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Burada, P [Watt] rüzgâr gücünü, ρ [kg/m³] hava yoğunluğunu, A [m²] rüzgâr türbinindeki rotorun havadaki süpürdüğü alanı, v [m/s] rüzgâr hızını temsil etmektedir [19]. Bağıntıdan da anlaşılacağı üzere, rüzgâr hızı, üretilecek güce çok yüksek oranda etki etmektedir. Hızdaki en ufak bir artış, üretilecek gücü küp oranında artırmaktadır. Bu nedenle rüzgâr santrali kurulmadan önceki dikkat edilmesi gereken en önemli parametre rüzgâr hızlarıdır.

Rüzgâr hız ve güç yoğunluğu analizleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımının sağlanması ve sürdürülebilir enerji üretiminin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. GWA, dünya genelindeki rüzgâr enerji potansiyelini değerlendirmek amacıyla kullanılan kapsamlı bir çevrimiçi platformdur [20]. Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) tarafından geliştirilen bu araç, Dünya Bankası'nın ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program) girişimi ile iş birliği yaparak oluşturulmuştur. Global Wind Atlas, dünya çapında yüksek çözünürlüklü rüzgâr hızları ve rüzgâr güç yoğunluğu haritaları sunarak, rüzgâr enerjisi potansiyelini belirlemek isteyen kullanıcılar için değerli bir kaynak sağlamaktadır. WASP yazılımıyla tam uyumlu halde çalıştığı ve enerji otoritelerince kabul gördüğü için bu çalışmada tercih edilmiştir.

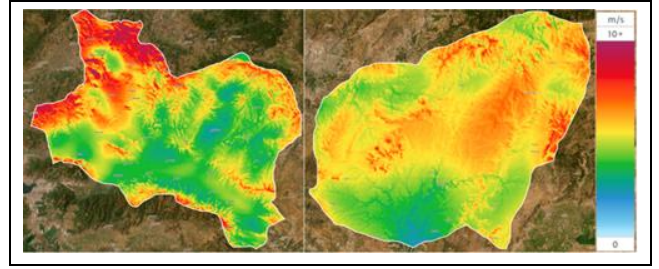
GWA ile, 50 metreden 200 m'ye kadar değişen yüksekliklerde rüzgâr hızları ve rüzgâr gücü potansiyeli hesaplanıp, analiz edilmektedir. Rüzgâr hızı, yüksekliğe bağlı olarak artış göstermektedir. Bu nedenle yüksek noktalarda üretim yoğunluğu artmaktadır. Veriler, meteorolojik modeller ve uydu gözlemleriyle desteklenerek, oldukça hassas tahminler sağlamaktadır. Afyonkarahisar ve Kütahya illerine ait 100 metreden ölçülmüş rüzgâr hızı verilerine göre oluşturulmuş haritalar Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Afyonkarahisar ve Kütahya illeri rüzgâr hızı haritaları.

Figure 1. Wind speed maps for Afyonkarahisar and Kütahya province.

Afyonkarahisar ilinin özellikle Sandıklı ve Dinar bölgelerinde yüksek rüzgâr hızı seviyelerine çıktığı görülmekte, halihazırda mevcut yatırımların da özellikle o bölgeler olması konum belirlenmesinde doğru bir noktanın seçildiğine işaret etmektedir. Kütahya ilinin Dumlupınar, Gökler ve Yenikent mevkiilerinde yüksek rüzgâr hızı seviyelerine çıktığı görülmektedir. Ancak il genelinde baktığımızda, kırmızı bölgelerin az olması daha çok yeşil bölgelerin bulunması nedeniyle, rüzgâr enerji potansiyeli daha düşük görülmektedir. TR33 bölgesindeki diğer iller olan Manisa ve Uşak illerine ait rüzgâr hızı haritaları Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Manisa ve Uşak illeri rüzgâr hızı haritaları.

Figure 2. Wind speed maps for Manisa and Uşak province.

Manisa ilinin kuzeybatı bölgesinde, Soma ve Kırkağaç civarında Türkiye ortalamasının oldukça üzerinde, çok yüksek rüzgâr hızlarına ulaşan değerler gözlenmektedir. Uşak ilinde ise genel olarak ortalama rüzgâr hızı değerleri hakimdir. Göze çarpan önemli bir rüzgâr potansiyel noktası izlenmemiştir. GWA uygulaması üzerinden Tablo 1'de verilen TR33 illerinin 100 metre yükseklikten ortalama güç yoğunluğu ve ortalama rüzgâr hızı değerleri elde edilmiştir. Enerji atlası ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın ÇED raporlarından illerde kurulu ve yapım aşamasındaki rüzgâr enerji santralleri toplam güçleri elde edilip Tablo 1'e eklenmiştir.

Tablo 1. TR33 Bölgesi illeri rüzgâr potansiyel karşılaştırması
Table 1. Wind potential comparison of the provinces of the TR33 region.

Şehir	Ort. Güç Yoğunluğu (W/m ²)	Ort. Rüzgâr Hızı (m/s)	Mevcut Kurulu Güç (MW)	Kurulum Aşaması Güç (MW)
Afyonkarahisar	495	7.19	350	281
Kütahya	389	6.74	-	222
Uşak	355	6.55	128	3.05
Manisa	680	8.08	712	236.8

Rüzgâr ölçümleri 100 metre yükseklikten yapılmıştır.

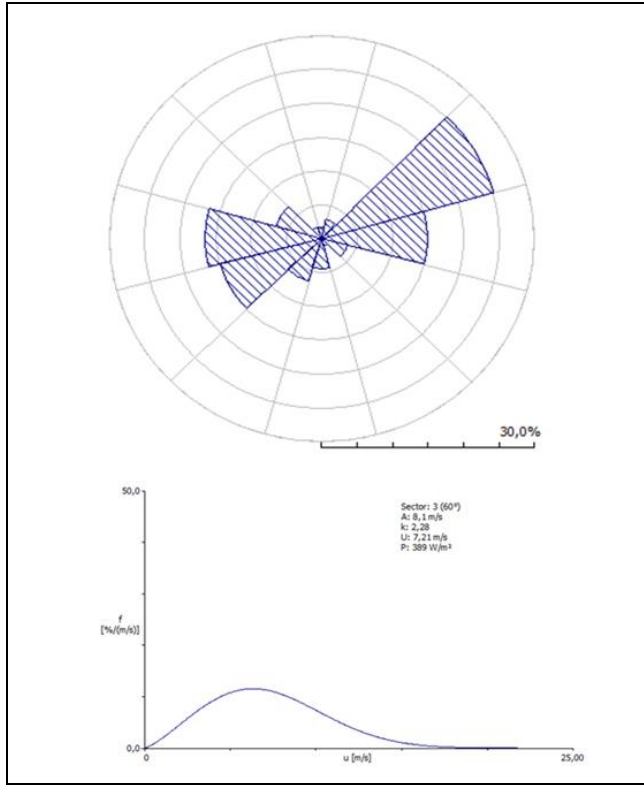
Birim alana düşen rüzgâr güç yoğunluğu incelendiğinde, TR33 bölgesindeki en yüksek rüzgâr potansiyelinin Manisa, ardından sırasıyla Afyonkarahisar, Kütahya ve Uşak illeri olduğu görülmektedir. Rüzgâr hızları da bu duruma benzerlik göstermektedir. Ancak kurulu RES güçleri incelendiğinde Kütahya'nın RES yatırımları için geciktiği görülmekte, kurulum aşamasındaki RES'ler tamamlandığındaysa, diğer illerdeki orana benzer bir ölçekte RES sahibi olacağı görülmektedir. Manisa ilinin özellikle Soma ilçesi bölgesinde rüzgâr güç yoğunluğu çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yapılan RES yatırımlarının çoğunluğu da bu bölgededir.

3 Materyal ve metod

Rüzgâr enerjisi; harita, makina, elektrik ve enerji sistemleri mühendisliği gibi pek çok disiplinin ortak bir çalışma alanıdır. Ürün olarak yüksek güçte elektrik enerjisi kazanılan sistemlerin maliyetleri de oldukça yüksektir. Bu nedenle kurulum öncesi iyi hazırlanmış bir fizibilite çalışması, planlama aşamasının en önemli bileşenidir.

Rüzgâr enerjisi fizibilitelerinin endüstriyel standartlarda yapılmasında ve bilimsel çalışmaların gerçekleştirilmesinde Danimarka Teknik Üniversitesi'nin WASP yazılımı dünya genelinde yaygın olarak kabul görmektedir. Bu çalışmada da WASP programı ile rüzgâr potansiyel haritaları kullanılarak, potansiyel bir RES için üretim değerleri, kaplanacak alan boyutları simülasyonu (benzetimi) gerçekleştirilmiştir. WASP yazılımı, RES kurulacak arazinin haritasına ve meteorolojik ölçümlerine ihtiyaç duymakta, bu veriler ile güncel rüzgâr türbini verileri üzerinden üretilecek rüzgâr enerjisi değerlerini yüksek doğrulukla hesaplamaktadır.

Bu çalışmada, GWA üzerinden indirilen harita ve rüzgâr hız-yön verileri, WASP programıyla işlenmiş ve Şekil 3'teki rüzgâr yönü ve hızının dağılımını gösteren rüzgâr gülü ve yüksek hızların yoğun olduğu yöndeki hız-frekans grafiği oluşturulmuştur.

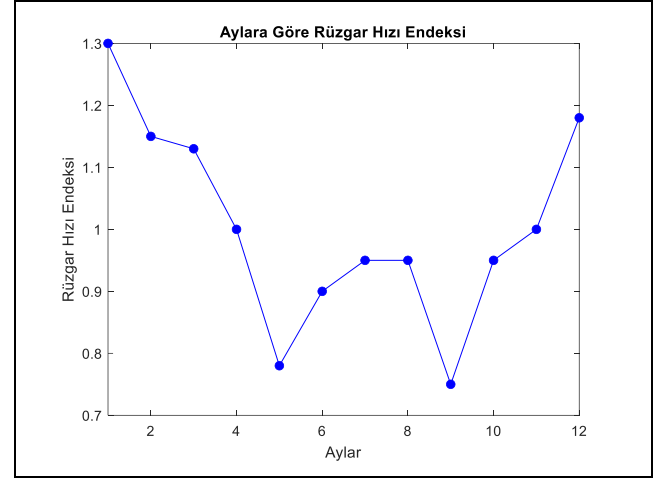


Şekil 3. Rüzgâr yön-hız bilgisi ve rüzgâr hız frekansı grafikleri.

Figure 3. Wind rose and wind frequency graphs.

Şekil 3'ten hareketle, GWA'dan alınan verilere göre, Afyonkarahisar'ın en yüksek rüzgâr güç yoğunluğu noktasında rüzgâr yönünün kuzey doğu tarafında olduğu görülmekte, rüzgâr hızı frekansının ise yaklaşık 8-10 m/s hızları aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Yazılım ve veriler ışığında gerçekleştirilen örnek bir fizibilite çalışması, üçüncü bölümde detaylarıyla açıklanmıştır. Seçilen bölge için rüzgâr hızı endeksi grafiği, Şekil 4'te sunulmuştur. Rüzgâr hızı endeksi, rüzgâr hızının ortalama rüzgâr hızına oranıyla elde edilen bir

endekstir. Yıl içerisinde artış gösterdiği aylar Ocak ve Aralık, düşüş gösterdiği aylar ise Mayıs ve Eylül aylarıdır. Kış aylarında rüzgâr hızlarının yükseldiğini açıkça yorumlanabilmektedir.



Şekil 4. Rüzgâr hızı endeksi.

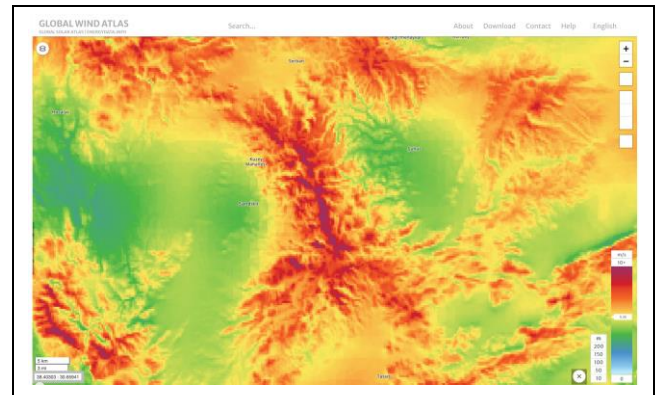
Figure 4. Wind speed index.

4 Bölgede kurulabilecek bir RES fizibilitesi

Çalışmanın TR33 bölgesindeki illere ait rüzgâr potansiyeli karşılaştırmalarının ardından, ikinci kısmında Afyonkarahisar ilinde örnek bir RES senaryosu tasarlayarak fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızının yıllık ortalama değerlerinin en yüksek olduğu konumda, Sandıklı ilçesi yakınlarında, örnek bir rüzgâr enerji santrali fizibilitesi, WASP 11 yazılımıyla gerçekleştirilmiş ve güç üretim değerleri elde edilmiştir. Fizibilite çalışması gerçekleştirilirken öncelikle RES için konum belirlenmiş, ardından türbin çeşidi ve sayısı planlanmış ve üretilecek güç değerleri hesaplanmıştır.

4.1 Konum belirleme

Çalışmada WASP yazılımı kullanılarak Afyonkarahisar'ın en yüksek rüzgâr potansiyeline sahip olan Sandıklı ilçesi yakınlarında bir bölgede kurulacak örnek bir rüzgâr enerji santrali (RES) senaryosu oluşturulmuş ve bu senaryo üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Konum, GWA verileri incelenerek, kırmızı alanlardan seçilmiştir. Şekil 5'te rüzgâr enerji santralinin kurulacağı alan görülmektedir.



Şekil 5. Senaryoya göre RES kurulacak alan.

Figure 5. The area where RES will be installed according to the scenario.

Analizler, bölgedeki rüzgâr enerjisinin verimliliğini belirlemeye yönelik önemli veriler sunmakta olup, potansiyel enerji üretim miktarlarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Sandıklı ilçesi, coğrafi yapısı ve uygun rüzgâr hızları sayesinde yatırımcılar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu nedenle, yapılan çalışmanın, bölgedeki enerji projelerinin fizibilitesini değerlendirmede yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması, rüzgâr enerji santrallerinin verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Türbinler arasındaki mesafe ve konumlandırma stratejileri, özellikle rüzgâr türbini wake etkisini (arkadan gelen hava akımı etkisi) minimize etmek için dikkatlice planlanmalıdır. Wake etkisi, türbinlerin birbirleri üzerindeki negatif etkileşimlerini artırabilir ve bu durum hem enerji üretiminde azalmaya hem de türbin üzerindeki yüklerin artmasına neden olabilir.

Son çalışmalara göre, wake yönlendirme (wake steering) stratejileri, türbinlerin hem enerji üretimini hem de yorulma yüklerini optimize etmek amacıyla kullanılabilir. Bu stratejiler, türbinlerin ömrünü uzatırken kısa vadede enerji kazançlarını artırmayı hedeflemektedir [14]. Ayrıca, rüzgâr çiftliklerinde türbinlerin birbirlerine olan yan mesafesinin azaltılmasının türbinlerin enerji üretimini %4-9 oranında artırdığı ve bu durumun türbülans yapılarının anlaşılmasıyla daha iyi kontrol stratejileri geliştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür [15].

Rüzgâr türbinlerinin wake etkisi, özellikle türbinlerin güç ve itme kuvvetinde azalmaya yol açmakta ve wake asimetrisine neden olmaktadır. Bu da, türbinlerin verimliliğini optimize edebilmek adına yeni güç azaltma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır [16]. Ayrıca, wake etkilerinin yüksek türbülans yoğunluğuna ve rüzgâr makaslamasına yol açarak yıllık enerji üretiminde %7'ye varan bir azalmaya ve yorulma yüklerinde %30-50 oranında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bu da, türbinlerin konumlandırılmasında wake etkisinin dikkate alınmasının önemini göstermektedir [17].

Wake etkisinin azaltılması amacıyla upstream (önceki) türbinlerin optimum ayarların dışında çalıştırılması veya yönlendirilmesi, downstream (sonraki) türbinlerin enerji üretiminde %12'ye varan artışlar sağlayabilmektedir. Bu durum, rüzgâr çiftliklerinin performansını maksimize etmek için upstream türbinlerin ayarlarının stratejik olarak değiştirilmesinin önemine işaret etmektedir [18].

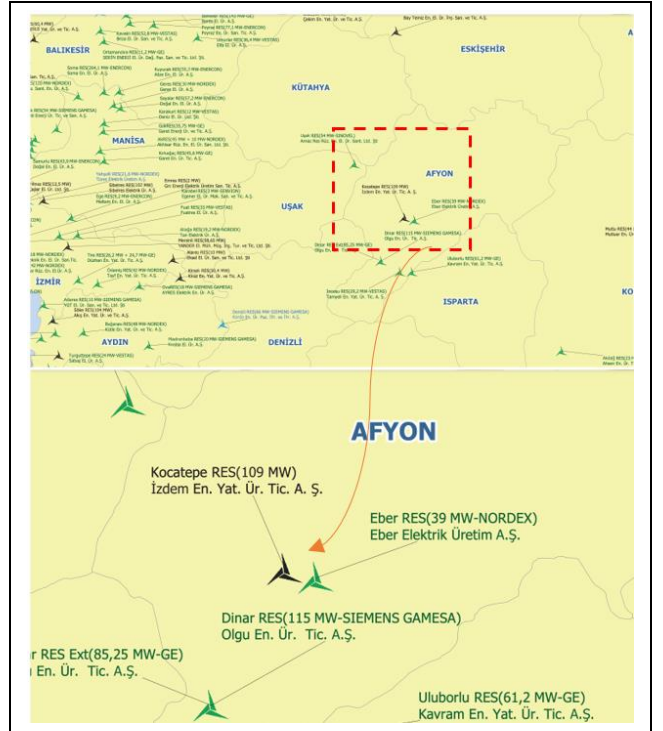
4.2 Mevcut RES konumlarının değerlendirilmesi

Afyonkarahisar ili, rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam 350 MW kurulu gücünün büyük bir yüzdesi Sandıklı-Dinar hattı üzerinde konuşlandırılmış durumdadır. Bu çalışmada seçilen alanda ise halihazırda kurulu RES bulunmaktadır. Şekil 6'da, saha üzerindeki rüzgâr türbinlerinin uydu görüntüleri sunulmuştur. GWA ve WAsP kullanılarak Afyonkarahisar üzerindeki en yüksek rüzgâr güç yoğunluğu tespit edilen noktalara ait koordinatlar, Google Earth kullanılarak incelendiğinde, Şekil 6'da görülen RES'ler gözlenmiş ve bu durum da halihazırda kurulu RES'lerin rüzgâr potansiyeli bakımından konumlarının doğru belirlendiğini göstermiştir.

Belirlenen konumlardaki rüzgâr türbinleri araştırılmış ve Şekil 7'de görülen isim ve lokasyonlara sahip enerji santralleri oldukları anlaşılmıştır. Santrallerin yıllık üretim değerleri 5. Bölüm'de sunulmuş ve makalenin deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 6. Mevcut RES uydu görüntüsü (38°31'28"N 30°21'55"E)
Figure 6. Current wind farms satellite image (38°31'28"N 30°21'55"E).



Şekil 7. Mevcut RES isim ve lokasyon bilgileri.

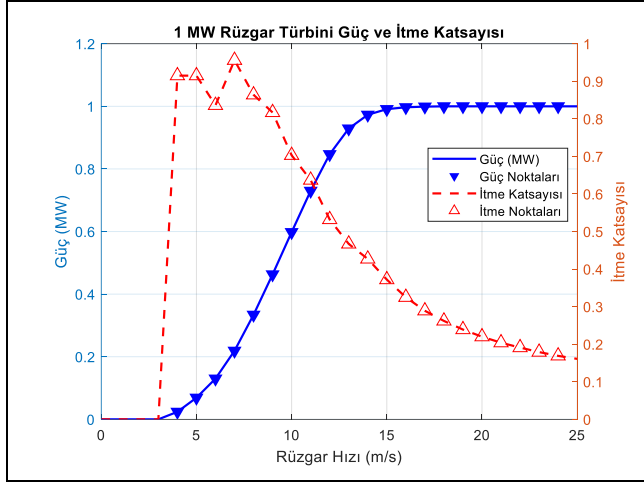
Figure 7. Current wind farm name and location information.

4.3 Rüzgâr türbin sayısı ve kurulu güç hesabı

Rüzgâr türbinlerinde, hava akışı performansını değerlendirmek için, boyutsuz bir katsayı olan C_t (thrust coefficient-itme katsayısı) kullanılmaktadır. Denklem (2)'de itme katsayısı gösterilmektedir. Bu çalışmada 1 MW gücünde piyasada sık tercih edilen bir markaya ait rüzgâr türbini modeli seçilmiştir. Rüzgâr türbinine ait güç eğrisi ve itme katsayısı Şekil 8'de sunulmuştur. Çizdirilen güç eğrisi, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılabilir [23]. Seçilen rüzgâr türbini için, 4 m/s hızlarında altında üretim olmamakta, 18 m/s ve üzerindeyse sabit 1 MW güç üretimi yapılabilmektedir.

$$C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (2)$$

Burada, F_t , türbine etki eden Newton cinsinden itme kuvvetidir. Diğer bileşenler Denklem (1)'in açıklamalarında mevcuttur.



Şekil 8. Seçilen 1 MW rüzgâr türbini için güç–itme eğrisi.

Figure 8. Power-thrust curve for selected 1 MW wind turbine.

Yüksek C_t değerleri mekanik yorgunluk ve hasar riskini artırırken, çok düşük değerler, türbinin rüzgâr enerjisinden yeterince faydalanamadığını gösterebilmektedir.

5 Deneysel çalışma sonuçları

WASP programının seçilen araziye göre çeşitli yüksekliklerden alınan ölçümlerden ürettiği güçlere ait sonuçlar, Tablo 1'de ekte sunulmuştur. Burada R sınıfı, pürüzlülük sınıfını ifade etmektedir. Sırasıyla 10 metreden, 50, 100, 150 ve 200 m yükseklikler için 5 pürüzlülük sınıfı için güç değerleri listelenmektedir. Ölçülmüş rüzgâr hızı verileri kullanarak Weibull ve Rayleigh istatistiksel dağılım fonksiyonları ile

belirlenen bir bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli analiz edilmektedir [24]. Weibull dağılımı literatürde mevcut çalışmalarda sıklıkla tercih edilen olasılıksal dağılım fonksiyonudur. Buna dayanarak, rüzgâr hızının farklı yüksekliklerdeki parametrelerini ve enerji yoğunluğunu analiz eden bir veri seti ise Tablo 2'de sunulmaktadır. Weibull parametresi olan A, rüzgâr hızının karakteristik değerini ifade etmektedir. Yükseklik arttıkça A değeri de artış göstermektedir. Örneğin Tablo 2'de görüleceği üzere, 10 metrede 7.20 m/s olan Weibull A, 200 metrede 9.89 m/s'ye ulaşmıştır. Weibull k ise rüzgâr hızının dağılımını ifade eden bir şekil parametresidir. Daha yüksek k değerleri, rüzgâr hızının daha dar bir aralıkta yoğunlaştığını ifade eder. Yüksekliğe bağlı olarak k değeri artış göstermektedir. Bu da hız dağılımının daha tutarlı hale geldiğini gösterir. Güç yoğunluğu, rüzgâr hızının küpü ile orantılı olduğu için, yükseklikle birlikte dramatik şekilde artış göstermektedir. Tablo 2'den görüleceği üzere, 10 m'de 482 W/m² iken, 200 m'de 1119 W/m²'ye çıkmıştır. Bu artış, türbin göbük yüksekliklerinin daha yüksek olduğu kuleler inşa edilmesi gerekliliğini göstermektedir. Ancak buradaki sınırlayıcı, yüksek ve engebeli arazilerde montaj zorlukları ve ekonomik kısıtlardır.

5.1 Fizibilite amortisman hesabı

Programda seçilen 1 MW gücündeki Bonus üreticisine ait rüzgâr türbini ile bölgeden alınan rüzgâr ve yükselti verileri ışığında beklenen yıllık güç üretimi WASP programı tarafından 2.484 GWh olarak (gigawatt-saat) olarak hesaplanmıştır.

Karasal rüzgâr enerjisi projeleri için YEKDEM tarafından belirlenen 2030'a kadar alım için birim fiyatı 106 TL-kuruş / kWh (1.06TL/kWh) olarak belirlenmiştir [21]. Bu durumda, Afyonkarahisar Sandıklı civarında kurulmuş, %30 kapasite faktörüne sahip 1 MW'lık ortalama bir rüzgâr türbini için yıllık beklenen kazanç değeri yaklaşık 2.7 milyon TL olarak hesaplanmaktadır. Yeni alınacak bir 1MW'lık rüzgâr türbininin ortalama güncel maliyeti 1.3 milyon \$ olarak karşımıza çıkmaktadır [21]. Bu değer alınacak sayıya ve güce bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Tablo 1. WASP ile üretilen, yüksekliğe bağlı birim güç değerleri.

Table 1. Height-dependent unit power ratings generated by WASP.

Yükseklik	Birim	R-Sınıf 0 (0 m)	R-Sınıf 1 (0.03 m)	R-Sınıf 2 (0.10 m)	R-Sınıf 3 (0.4 m)	R-Sınıf 4 (1.5 m)
Yükseklik 1 (z = 10 m)	m/s	6.52	4.6	4.04	3.19	2.16
	Wm ²	482	206	133	64	18
Yükseklik 2 (z = 50 m)	m/s	7.68	6.31	5.81	5.05	4.18
	Wm ²	734	436	333	218	117
Yükseklik 3 (z = 100 m)	m/s	8.32	7.42	6.87	6.08	5.24
	Wm ²	873	593	472	332	204
Yükseklik 4 (z = 150 m)	m/s	8.76	8.31	7.64	6.88	5.89
	Wm ²	1031	780	604	455	294
Yükseklik 5 (z = 200 m)	m/s	8.9	8.94	8.25	7.43	6.43
	Wm ²	1119	957	745	569	377

Tablo 2. Afyonkarahisar’da seçilen bölge için lokal rüzgâr iklim özeti.

Table 2. Local wind climate summary for the selected region in Afyonkarahisar.

Yükseklik	Parametre	0.00 m	0.03 m	0.10 m	0.40 m	1.50 m
10 m	Weibull A [m/s]	7.20	4.97	4.39	3.48	2.38
	Weibull k	1.46	1.29	1.33	1.35	1.42
	Ortalama Hız U [m/s]	6.52	4.60	4.04	3.19	2.16
	Güç Yoğunluğu E [W/m ²]	482	206	133	64	18
50 m	Weibull A [m/s]	8.53	6.97	6.42	5.58	4.65
	Weibull k	1.53	1.46	1.48	1.48	1.54
	Ortalama Hız U [m/s]	7.68	6.31	5.81	5.05	4.18
	Güç Yoğunluğu E [W/m ²]	734	436	333	218	117
100 m	Weibull A [m/s]	9.28	8.3	7.68	6.79	5.87
	Weibull k	1.6	1.65	1.65	1.63	1.68
	Ortalama Hız U [m/s]	8.32	7.42	6.87	6.08	5.24
	Güç Yoğunluğu E [W/m ²]	873	593	472	332	204
150 m	Weibull A [m/s]	9.76	9.32	8.58	7.72	6.6
	Weibull k	1.59	1.74	1.75	1.71	1.67
	Ortalama Hız U [m/s]	8.76	8.31	7.64	6.88	5.89
	Güç Yoğunluğu E [W/m ²]	1031	780	604	455	294
200 m	Weibull A [m/s]	9.89	10.05	9.27	8.33	7.2
	Weibull k	1.55	1.77	1.78	1.72	1.68
	Ortalama Hız U [m/s]	8.9	8.94	8.25	7.43	6.43
	Güç Yoğunluğu E [W/m ²]	1119	957	745	569	377

Bölgenin rüzgâr rejimindeki olası değişiklikler, satın alınacak rüzgâr türbininin kapasite faktörü (bu değer yükselirse, kayıplar azalacak ve amortisman süresi kısılacaktır) ve bakım maliyetleri ihmal edildiğinde Afyonkarahisar için 1 MW rüzgâr güç santrali için amortisman süresi döviz kuruna bağlı olarak yaklaşık 15 yıl olarak hesaplanmaktadır. Bu değer alınacak yenilenebilir enerji teşvikleriyle ve teknolojik gelişmelerle kısılacaktır. Önceki yıllarda, döviz kuruna ve teşviklere bağlı olarak bu değer çok daha düşük seviyelerdeyken, günümüzde amortisman süresinin uzadığı görülmektedir.

5.2 Üretim karşılaştırması

WASP programı tarafından 1MW rüzgâr türbini için 2.484 GWh olarak (gigawatt-saat) olarak hesaplanan değer mevcut RES'lerin yıllık üretim değerleri ve literatürdeki benzer çalışmalarda WASP ile üretilen değerlerle karşılaştırıldığı çizelge, Tablo 3'te sunulmuştur. Halihazırda aktif olarak çalışan santral değerleriyle karşılaştırıldığında, oldukça yakın değerler elde edildiği görülmektedir.

Tablo 3. WASP ile üretilen değerlerin karşılaştırılması.

Table 3. Comparison of values produced by WASP.

Çalışma	Türbin Üreticisi	Kurulu Güç (MW)	Yıllık Toplam Üretim (GWh)	1 MW Başına Düşen Üretim
Afyon, Türkiye - WasP	Bonus	1	2.484	2.484
Kocatepe RES	Siemens	88	205	2.33
Eber RES	Nordex	39	132	2.13
Dehmas et. al. [45], Cezayir- WASP	Bonus	2	4.56	2.28
Oner et. al [46], Çanakkale, Türkiye - WASP	Bonus	4.8	12.84	2.68

6 Rüzgâr enerji santrallerinin sosyopolitik etkileri

Enerji sistemleri, yalnızca ekonomik ve teknik açıdan değil, aynı zamanda toplumla etkileşimi, doğaya etkileri açısından da

değerlendirilmelidir. Bu noktada, yenilenebilir enerji konusunda yerel toplumun bilgi ve farkındalığının artırılması gerekmektedir. Eğitim programları ve bilgilendirme faaliyetleri, yenilenebilir enerjiye olan destek ve kabulü artırabilir görülmektedir. Bu yatırımların, bölgedeki ekonomik kalkınmayı teşvik edeceği konusunda bilgilendirmeler yapmak gerekmektedir. Enerji santrallerinde yerel halkın istihdam edilmesi ve yerel tedarikçi ağlarının oluşturulması bölgesel ekonomik büyümeye katkı sağlamaktadır. Afyonkarahisar özelinde düşünüldüğünde, özellikle Sandıklı, Emirdağ ve Bolvadin gibi açık alanların yoğun olduğu ilçelerde, rüzgâr enerjisi potansiyelinin artan çalışmalarla birlikte daha fazla kullanılabilir hale gelmesi beklenmekte, bölgede istihdamı artırmaktadır.

Her ne kadar “Temiz Enerji” olarak isimlendirilseler de, yenilenebilir enerji sistemleri dahil hiçbir enerji kaynağı %100 temiz ve doğaya tamamen zararsız değildir. Çalışması esnasında karbon salınımı yapmıyor olmaları, rüzgâr türbinlerinin doğaya tamamen zararsız olduğunu göstermemektedir. Kuşların göç yollarına zarar vermekte, özellikle yarasa ve arı popülasyonlarını etkilemekte, hareketlerinin titreşim, gürültü ve gölgeleriyle bazı hayvanlarda (özellikle meralarda otlatılan sürü hayvanlarında) strese neden olmaktadır. Bu durum dolayısıyla insanı da etkilemektedir. Yenilenebilir enerji projelerinin doğru planlanması ve yönetilmesi, çevresel etkilerin en aza indirilmesini sağlayabilir. Doğru politika ve yönetim ile, sürdürülebilir kalkınma hedefleri desteklenmelidir.

Yenilenebilir enerji projelerinin yerel toplum tarafından kabul edilmesi önemlidir. Toplumun projelerde aktif rol alması ve yerel ihtiyaçların dikkate alınması, sosyal uyum ve projenin uzun vadeli başarısı için kritik öneme sahiptir.

6.1 İstihdam ve ekonomik gelişme

Afyonkarahisar'daki rüzgâr enerji santrali projeleri, özellikle inşaat ve kurulum aşamalarında büyük bir iş gücü ihtiyacı oluşturmaktadır. İnşaat sektörüne bağlı olarak çalışan yerel işgücü, proje sürecinde etkin rol oynarken, santrallerin işletme

aşamasında teknik uzmanlar, enerji mühendisleri ve bakım personeli için uzun vadeli istihdam olanakları oluşmaktadır.

Rüzgâr enerji santrali yatırımları, sadece enerji üretimi ile sınırlı kalmayarak, yerel işletmelere ve esnafa da önemli bir katkı sağlamaktadır. İnşaat ve işletme süreçlerinde kullanılan malzemeler, lojistik ve nakliye gibi hizmetlerin bölge içinden sağlanması yerel ekonomiyi desteklemekte, bölge esnafı ve ticaret hacmi canlanmaktadır. Aynı zamanda, bölgede oluşan iş imkanları sayesinde hane halkının gelirinde artış meydana gelmekte, böylece ekonomik büyüme hızlanmaktadır.

6.2 Çevresel etkiler

Fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğine karşı sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Rüzgâr enerji santralleri, karbon salınımı yapmadan enerji üretimi sağladığı için bölgedeki toplam karbon ayak izini ciddi oranda düşürmekte, hava kalitesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum, bölge genelinde daha sağlıklı bir çevre yaratırken, aynı zamanda uzun vadede iklim krizinin etkilerini azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji projelerinin görünürlüğü, bölgedeki bireyler arasında çevre bilincini artırmakta, sürdürülebilirlik kavramının toplumda daha geniş bir yer bulmasını sağlamaktadır. Özellikle genç nesil arasında çevre dostu enerji kaynaklarının tercih edilmesi, bölge halkının da bu konuda farkındalığını yükselterek, çevresel sürdürülebilirliğe yönelik toplumsal destek sağlamaktadır.

6.3 Toplumsal kabul ve direnç

Çevre dostu enerji kaynaklarının bölgeye kazandırılması, toplum genelinde olumlu bir algı yaratmakta ve bölgenin modern enerji politikalarına entegrasyonunu desteklemektedir. Çevreye duyarlı bireyler, yenilenebilir enerji projelerinin uzun vadede çevreyi koruyan ve doğal kaynakları sürdürülebilir bir şekilde kullanmayı hedefleyen bir yaklaşım olduğunun farkında olup, bu projelere pozitif yaklaşmaktadır.

Ancak bazı durumlarda, rüzgâr enerji santrallerinin planlanması ve kurulumu yerel halk arasında dirençle karşılaşmaktadır. Özellikle santrallerin yerleşim yerlerine yakın konumlandırılması veya doğal yaşam alanlarını etkilemesi, projelere karşı olumsuz bir tepki oluşturabilir.

Özellikle, Emirdağ ve Bayat gibi hayvancılığın yoğun olduğu ilçelerde, rüzgâr türbinlerinin hayvan davranışları üzerindeki etkileri konusunda çekinceler dile getirilmektedir.

Bölge halkı, biyolojik çeşitliliğin korunması ve yaşam kalitesinin devamı için santrallerin daha dikkatli planlanmasını talep etmekte, projelerin çevreye olumsuz etkilerini azaltacak önlemlerin alınmasını istemektedir. Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sürecinde yaşanan problemler ise projelerin gecikmesine ya da iptal edilmesine neden olabilmektedir.

Afyonkarahisar, Türkiye'nin iç bölgelerinde yer almakta olup, belirli kuş göç yolları üzerinde bulunmaktadır. Bölgedeki rüzgâr enerjisi projelerinin planlanması sırasında, kuş göç yolları ve arıcılık faaliyetleri dikkate alınmalıdır. Özellikle, türbinlerin konumlandırılması ve yüksekliği, kuşların ve arıların doğal hareketlerini en az etkileyecek şekilde tasarlanmalıdır.

7 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada, Afyonkarahisar ilinin rüzgâr enerji potansiyeli, TR33 bölgesindeki diğer iller olan Kütahya, Uşak ve Manisa ile karşılaştırılmış ve bölgesel yenilenebilir enerji yatırımlarının uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Afyonkarahisar'ın coğrafi ve meteorolojik koşullarının rüzgâr enerjisi üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Özellikle, kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesinin sürekli artması, bölgenin Türkiye'nin enerji hedeflerine ulaşma sürecinde önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır.

Rüzgâr güç yoğunluğu ve rüzgâr hızlarına dayalı yapılan simülasyonlar, Afyonkarahisar'ın TR33 bölgesindeki diğer illerle karşılaştırıldığında oldukça rekabetçi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Kütahya, Uşak ve Manisa da rüzgâr enerjisi açısından uygun koşullara sahip olmakla birlikte, Afyonkarahisar'ın Kütahya ve Uşak'tan daha fazla yatırım çekmesi, bölgesel kalkınmayı hızlandırma açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. TR33 bölgesi içerisinde en yüksek potansiyelin Manisa'da olduğu görülmektedir. Çalışmanın bulguları, TR33 bölgesinde enerji yatırımlarının daha dengeli ve stratejik bir şekilde planlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bununla birlikte, rüzgâr enerji santrallerinin bölgenin çevresel ve ekonomik yapısına olan etkileri de tartışılmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel sürdürülebilirlik açısından olumlu sonuçlar doğurmasına rağmen, yerel ekosistemler ve biyoçeşitlilik üzerindeki potansiyel olumsuz etkiler göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, bölgedeki enerji yatırımlarının çevreyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirilmesi için stratejiler geliştirilmelidir.

Ayrıca, çalışmanın literatüre katkıları değerlendirildiğinde, rüzgâr enerjisinin Türkiye'nin enerji politikalarında ne kadar stratejik bir konumda olduğunun altı çizilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artmasıyla birlikte, rüzgâr enerjisinin önemi daha da belirgin hale gelmektedir. Çalışma, yerel enerji politikalarının planlanması ve enerji yatırımlarının optimize edilmesi konularında literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışma, Afyonkarahisar'ın rüzgâr enerji potansiyelini analiz ederek WASP yazılımıyla örnek bir fizibilite çalışması perspektifi sunmuştur. Yapılan simülasyonlar ve analizler, bölgenin rüzgâr enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu doğrulamıştır. 1 MW gücündeki ortalama bir rüzgâr türbininin, halihazırdaki politikalar ile yaklaşık 15 yıl gibi bir geri dönüş (amortisman) süresi olduğu hesaplanmıştır. Afyonkarahisar, Türkiye'nin gelecek enerji hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol üstlenebilir ve yenilenebilir enerji alanında yapılan yatırımların artırılması bölgesel kalkınmaya katkı sağlayabilir bir konumdur. Ayrıca, çalışma, rüzgâr enerjisi yatırımlarının sadece enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda bölgesel kalkınma, ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, politika yapımcıların ve yatırımcıların enerji yatırımlarını planlarken çevresel faktörleri göz önünde bulundurması büyük önem taşımaktadır.

Gelecekteki araştırmalar, Afyonkarahisar gibi bölgelerde yenilenebilir enerji yatırımlarının daha detaylı çevresel analizlerle desteklenmesi ve enerji üretim sistemlerinin daha verimli hale getirilmesine odaklanabilir. Ayrıca, hibrit enerji sistemlerinin kullanımı ve enerji depolama çözümleri gibi yenilikçi yaklaşımlar da değerlendirilebilir.

8 Discussion and conclusion

In this study, the wind energy potential of Afyonkarahisar province was compared with other provinces in the TR33 region, namely Kütahya, Uşak, and Manisa, and the feasibility of regional renewable energy investments was evaluated. The findings show that Afyonkarahisar's geographical and meteorological conditions are suitable for wind energy production. In particular, the continuous increase in the installed wind energy capacity reveals that the region can play an essential role in achieving Turkey's energy goals. Simulations based on wind Güç yoğunluğu and wind speeds show that Afyonkarahisar has a highly competitive potential compared to other provinces in the TR33 region. Kütahya, Uşak, and Manisa also have suitable conditions in terms of wind energy, and the fact that Afyonkarahisar attracts more investments than Kütahya and Uşak offers an essential opportunity in terms of accelerating regional development. It is observed that the highest potential in the TR33 region is in Manisa. The study's findings emphasize that energy investments in the TR33 region should be planned more balanced and strategically. However, the effects of wind power plants on the environmental and economic structure of the region should also be discussed. Although renewable energy sources have positive results in terms of environmental sustainability, their potential adverse effects on local ecosystems and biodiversity should not be ignored. Therefore, strategies should be developed to ensure that energy investments in the region are carried out in an environmentally compatible manner.

In addition, when the study's contributions to the literature are evaluated, it is emphasized how strategic wind energy is in Turkey's energy policies. With the increase in investments in renewable energy sources, the importance of wind energy becomes even more evident. The study contributes to the literature on planning local energy policies and optimizing energy investments.

The study analyzed the wind energy potential of Afyonkarahisar and presented a sample feasibility study perspective with the WASP software. The simulations and analyses confirmed that the region has significant potential in terms of wind energy. It was calculated that an average wind turbine with a power of 1 MW has a payback period of approximately 15 years with current policies. Afyonkarahisar can play an important role in Turkey's future energy goals and is in a position to contribute to regional development by increasing investments in renewable energy.

In addition, the study emphasizes that wind energy investments should be considered in terms of energy production and regional development, economic growth, and environmental sustainability. In this context, policymakers and investors must consider environmental factors when planning energy investments.

Future research can focus on supporting renewable energy investments in regions such as Afyonkarahisar with more detailed environmental analyses and making energy production systems more efficient. In addition, innovative approaches, such as using hybrid energy systems and energy storage solutions, can be evaluated.

9 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Fatih Serttaş, tek yazar olarak fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve literatür taramasının

gerçekleştirilmesi, WASP programıyla simülasyonların yapılması, sonuçların elde edilerek değerlendirilmesi aşamalarının tamamını kendisi yürütmüştür.

10 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".

11 Kaynaklar

- [1] Ayar B, Yalçın ZG, Dağ M. "Rüzgârı hasat etmek: Türkiye'de rüzgâr enerjisinin fizibilitesi ve gelişmeleri üzerine bir araştırma". *European Journal of Science and Technology*, 49,43-49, 2023.
- [2] Ata R. "Akhisar bölgesi için ortalama rüzgâr hızlarına bağlı rüzgâr esme sürelerinin yapay sinir ağları ile tahmini". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20, 162-165, 2014.
- [3] Güngör A. "Batı Anadolu rüzgâr karakteristikleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi". *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2), 41-49, 2016.
- [4] Demirbaş A. "Competition Potential of Wind Power Plants". *Energy Sources*, 27(7), 605-612, 2005.
- [5] İlkılıç C. "Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1165-1173, 2012.
- [6] Arıkan O, İşen E, Kekezoğlu B. "Performance analysis of stand-alone hybrid (wind-photovoltaic) energy system". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(5), 571-576, 2019.
- [7] Dawood K. "Hybrid wind-solar reliable solution for Turkey to meet electric demand". *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 4(2), 62-66, 2016.
- [8] Başoğlu ME, Çakır B. "Wind Energy Status in Turkey". *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(1), 19-24, 2015.
- [9] Şenel B, Şenel M, Bilir L. "Role of wind power in the energy policy of Turkey". *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 9(1), 69-75, 2014.
- [10] Gökçöl C, Uğurlu A. "Current situation of wind energy in Turkey and assessment of Yalova's wind energy potential". *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 6(3), 49-59, 2016.
- [11] Bilir L, İmir M, Devrim Y, Albostan A. "An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at İncek region-Ankara, Turkey". *Energy Conversion and Management*, 103, 910-923, 2015.
- [12] Kaplan Y. "Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 562-568, 2015.
- [13] Çelik A. "Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2743-2749, 2011.
- [14] Navalkar S, Dell T, Burillo N. "Wake steering for wind turbine fatigue load optimisation". *American Control Conference (ACC)*, San Diego, CA, USA, 31 May-2 June 2023.
- [15] Maus J, Peinke J, Hölling M. "Experimental investigation on the effect of lateral turbine spacing on interactions of wakes". *Journal of Physics: Conference Series*, 2263, 012031, 2022.

- [16] Dou B, Guala M, Lei L, Zeng P. "Experimental investigation of the performance and wake effect of a small-scale wind turbine in a wind tunnel". *Energy*, 167, 25–35, 2019.
- [17] Kim S, Shin H, Joo YC, Kim K. "A study of the wake effects on the wind characteristics and fatigue loads for the turbines in a wind farm". *Renewable Energy*, 76, 219–230, 2015.
- [18] Adaramola MS, Krogstad PÅ. "Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance". *Renewable Energy*, 36(9), 2450–2458, 2011.
- [19] Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2005.
- [20] Global Wind Atlas. "Global Wind Atlas". globalwindatlas.info, (23.09.2025).
- [21] Resmî Gazete. "01.05.2023 Tarihli Resmî Gazete". <https://www.resmigazete.gov.tr> (23.09.2025).
- [22] Dayı F, Yücel M, Demirkol Z, Cilesiz A. "Management of sustainable investments: A comprehensive financial evaluation of wind energy facilities in Kastamonu". *Energy for Sustainable Development*, 81(1), 101501, 2024.
- [23] Yıldız C, Şekkelî M. "Çekirdek yoğunluk kestirimi yönteminin rüzgâr türbini performans testinde kullanılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 899–907, 2020.
- [24] Kurban M, Hocoğlu FO, Kantar YM. "Rüzgâr enerjisi potansiyelinin tahmininde kullanılan iki farklı istatistiksel dağılımın karşılaştırmalı analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 103–109, 2007.
- [25] Al-Busaidi A, Al-Mawali A, Kazem HA. "Wind energy potential assessment and feasibility study for a coastal site in Oman". *Energy Conversion and Management*, 243, 114421, 2021.
- [26] Hamidat A, Benatallah S, Boualıt M. "Techno-economic feasibility study of a hybrid renewable energy system for a remote area in Algeria". *Renewable Energy*, 150, 794–806, 2020.
- [27] Liu Y, Wang X, Li C. "Wind resource assessment and feasibility study of offshore wind farm in the Bohai Sea, China". *Ocean Engineering*, 246, 110548, 2022.
- [28] Wolske KS, Markard J, Wüstenhagen R. "Social acceptance of wind energy: A comparative study between Germany and Denmark". *Energy Policy*, 154, 112304, 2021.
- [29] Camacho A, Baker E, O'Leary M. "Community benefits and social acceptance of wind energy projects: Evidence from the United States". *Journal of Environmental Management*, 270, 110884, 2020.
- [30] Truong NTA. "Feasibility analysis of wind power plant in South East Region, Vietnam". *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 15779–15783, 2024.
- [31] Reutter K, Flay RGJ, McIntosh EM. "An application of the wasp program in complex, forested terrain as part of a wind farm feasibility study". *Wind Engineering*, 29(6), 491–502, 2005.
- [32] Ghimire M, Shrestha R, Karki R, Sharma S. "Wind energy resource assessment and feasibility study of wind farm in Mustang". *Journal of the Institute of Engineering*, 8(1-2), 93–106, 2011.
- [33] Malik A, Kuba C. "Power generation expansion planning including large scale wind integration: A case study of Oman". *Journal of Wind Energy*, 1, 1-7, 2013.
- [34] Sveinbjörnsson S. Analysis of WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) in Complex Topographical Conditions Using Measured Production from a Large Scale Wind Farm. Master's Thesis, University of Washington, Seattle, USA, 2013.
- [35] Shanu S, Mahshid N, Putti S, Rao C. "Wind resource assessment and techno-economic analysis using WASP software-a case study". *IEEE Technology & Engineering Management Conference – Asia Pacific (TEMSCON-ASPAC)*, Bengaluru, India, 14–16 December 2023.
- [36] Yılmaz U, Balo F, Sua LS. "Simulation framework for wind energy attributes with WASP". *Procedia Computer Science*, 158, 458–465, 2019.
- [37] Hadi FA, Ibrahim N, Musa S, Abdulkadir M, Alhassan A. "Pre-feasibility study of hypothetical wind energy project using simulated and measured data". *2nd International Conference for Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab (ICETS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 04-06 December 2018.
- [38] Himri Y, Haddadi A, Ferchichi H, Besbes R. "Potential and economic feasibility of wind energy in south-west region of Algeria". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100643, 2020.
- [39] Khan T, Taweekun J, Theppaya T. "Determination of feasible sites for wind farm using WASP in Uttaradit, Thailand". *International Conference on Engineering and Technology (ICET 2021), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1163, 012008, 2021.
- [40] Schenk K, Gelanoure J, Davies M, Thomas P. "Incorporation and impact of a wind energy conversion system in generation expansion planning". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(3), 1189–1196, 1981.
- [41] Meziane F, Halimi N, Boukli Hacène F, Kasbadji Merzouk N, Merzouk M, Mahmoudi H. "Wind flow simulation and characteristics prediction using WASP software for energy planning over the region of Hassi R'Mel". *International Journal of Green Energy*, 18(1), 1-11, 2021.
- [42] Hadi FA, Rana A, Emmanuel-Otto J, Ivan D. "An economic study of a wind energy project using different sources of wind data". *International Journal of Renewable Energy Research*, 61(2), 322-332, 2020.
- [43] Kamdar I, Singh P, Singh R. "Wind farm site selection using WASP tool for application in the tropical region". *Sustainability*, 13(5), 2713, 2021.
- [44] Bagočius V, Zavadskas EK, Turskis Z. "Multi-person selection of the best wind turbine based on the multi-criteria integrated additive-multiplicative utility function". *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(4), 590-599, 2014.
- [45] Abdeslame Dehmas D, Kherba N, Boukli Hacene F, Kasbadji Merzouk N, Merzouk M, Mahmoudi H, Goosen MFA. "On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria)". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 956–963, 2011.
- [46] Öner Y, Özçira S, Bekiroğlu N, Şenol İ. "A comparative analysis of wind power density prediction methods for Çanakkale, Intepe region, Turkey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 491–502, 2013.