



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.08.2024
Kabul Tarihi : 31.12.2024

Received Date : 15.08.2024
Accepted Date : 31.12.2024

KIRŞEHİR'İN RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE İÇ ANADOLU BÖLGESİ KURULU RÜZGAR ENERJİSİ SANTRALLERİNİN GÜÇ ANALİZİ

WIND ENERGY POTENTIAL OF KIRŞEHİR AND POWER ANALYSIS OF WIND ENERGY PLANTS INSTALLED IN CENTRAL ANATOLIA REGION

Müjdat ÖZTÜRK^{1*} (ORCID: 0000-0003-1800-2234)
Ramazan KAYABAŞI² (ORCID: 0000-0001-6195-7445)
Oğuz TAŞDEMİR³ (ORCID: 0000-0003-1782-0024)

¹ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kaman Meslek Yüksekokulu, Kırşehir, Türkiye
² Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, Kayseri, Türkiye
³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kırşehir, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Müjdat ÖZTÜRK, mujdat.ozturk@ahievran.edu.tr

ÖZET

Türkiye'nin zengin ve çeşitlilik içeren yenilenebilir enerji potansiyeli, son yıllarda hızla değerlendirilmeye başlanmıştır. Özellikle rüzgar enerjisi, elektrik üretiminde önemli bir rol oynamakta ve kurulu güç içerisindeki payını sürekli artırmaktadır. Çevre dostu bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisi, kırsal bölgelerde de yüksek üretim kapasitesine sahiptir. Bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesi illerinin rüzgar potansiyeli ve kurulu santral kapasiteleri; nüfus ve gelişmişlik düzeyleriyle ilişkilendirilerek incelenmiştir. Özel olarak Kırşehir bölgesi ele alınmış ve 2024-2028 yılları arasında bölgedeki rüzgar enerjisi üretim kapasitesi Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı bir model ile tahmin edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 2024 yılında rüzgar potansiyelinde yaklaşık %1'lik bir düşüş yaşanması öngörülmüş, ancak 2025-2028 yılları arasında her yıl %1'lik bir artış kaydedilmiştir. 2023 yılındaki üretime kıyasla, 2026 yılında tahmini enerji üretimi %3,5 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde, 2027 ve 2028 yıllarında da enerji üretiminde yükseliş devam etmiştir. Çalışma, İç Anadolu Bölgesi'nin rüzgar enerji potansiyelini detaylı bir şekilde değerlendirirken, Kırşehir ilinde yer alan rüzgar santrali özelinde 2024-2028 yılları arasındaki enerji üretim tahminini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bölgenin mevcut kapasitesi ile potansiyel enerji üretimi ve yıllara göre değişimi kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, rüzgar enerji santrali, rüzgar enerji potansiyeli, YSA, Güç

ABSTRACT

Turkey's rich and diverse renewable energy potential has been rapidly utilized in recent years. Among these resources, wind energy plays a critical role in electricity generation, steadily increasing its share in installed capacity. As an environmentally friendly energy source, wind energy demonstrates high production capacity, particularly in rural areas. This study examines the wind potential and installed power plant capacities of provinces in the Central Anatolia Region, considering parameters such as population and development levels. Specifically, the Kırşehir region was analyzed, and the wind energy production capacity for 2024–2028 was estimated using an Artificial Neural Network (ANN)-based model. The analysis predicted a slight decrease of approximately 1% in wind potential for 2024, followed by an annual increase of 1% from 2025 to 2028. Compared to 2023, energy production in 2026 is projected to rise by 3.5%, with further increases anticipated in 2027 and 2028. This study provides a detailed evaluation of the wind energy potential in the Central Anatolia Region and offers energy production forecasts for the Kırşehir wind farm during 2024–2028 using an ANN-based predictive model. As a result, the study comprehensively analyzes the current capacity, potential energy production, and annual variations in the region.

Keywords: Renewable energy sources, wind power plant, wind energy potential, ANN, power prediction

GİRİŞ

Nüfus artışı, şehirleşme ve sanayileşme ile enerji kullanımını giderek artmaktadır. İnsanoğlu ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılamak için araştırmalarını sürdürmekte ve verimli enerji dönüşümü için çalışmalar yapmaktadır (Yang vd., 2020). Bu araştırma ve geliştirme süreçlerinde insanoğlunun doğaya verdiği zararlar zamanla ortaya çıkmaktadır. Nüfus artışı, sanayileşme ve enerji kaynaklarının geri dönüştürülemez olarak kullanımı atmosferin ortalama sıcaklığını artırmakta ve bu artış birçok canlı türünün yok olmasına, orman yangınlarının artmasına, bitki örtüsünde değişimlere, yeraltı ve yerüstü temiz su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Geri dönülmez bir aşamaya geçmeden insanoğlu bu gidişe çareler aramaktadır. Bu olumsuz etkilerin ortaya çıkmasında ve etkilerin küresel felakete dönüşmesinde CO₂ salınımının artışı yatmaktadır. Bu nedenle CO₂ salınımını artıran fosil yakıtlara alternatif olacak yeni kaynakların keşfi ve var olan kaynakların verimli bir şekilde yaygın olarak kullanılmasının önemi tüm dünya tarafından kabul görmektedir (Wang, 2021). YEK ve teknolojileri kullanılarak fosil yakıt tüketiminin azaltılması hız kazanmasına rağmen henüz yeterli seviyelere ulaşmamıştır.

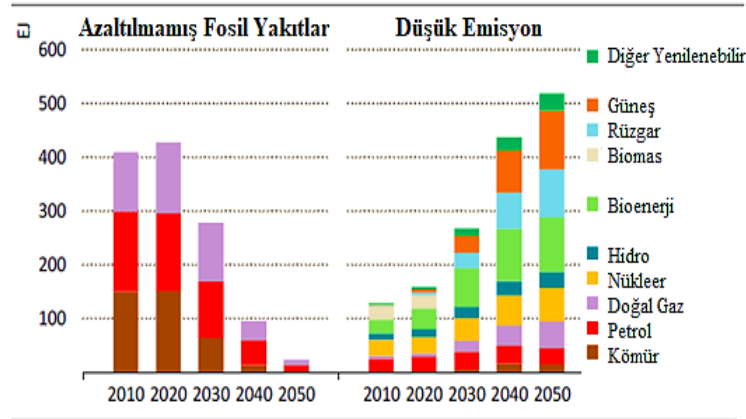
Dünyada hızla artan enerji ihtiyacını karşılamak için akademik araştırmalar ve ticari geliştirmeler devam etmekte ve ülkeler enerji ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik eğilimler ile kalkınma planlarını güncellemektedir. Son yıllarda giderek artan enerji kullanımından dolayı atmosferdeki CO₂ oranı önemli artışlar göstermiştir (IEA, 2024). Uluslararası Enerji Ajansı'na göre CO₂ emisyonlarının %50 azaltılmasını sağlamak amacıyla bir enerji devrimine ihtiyaç bulunmaktadır. Burada enerji verimliliği, enerji depolama, yeni ulaşım teknolojileri, nükleer enerji ve CO₂ yakalama ve depolama çok önemli bir rol oynamaktadır (Bilgili vd., 2015). Nüfus artışına bağlı olarak CO₂ üretimi artmakta bu durum sera etkisine dolayısıyla küresel ısınmaya sebep olmakta ve küresel ısınma sebebiyle de çevre felaketleri sık sık görülmektedir (Arslan vd., 2020). Dünyada enerji üretimi fosil kaynaklar, YEK veya nükleer enerji teknolojisiyle üretilmektedir. Bu kapsamda mevcut yapı ve teknolojilerin kullanılmasıyla var olan fosil yakıtlar kullanılmaya devam ederse dünya geri dönüşü mümkün olmayan çevre felaketlerine sürüklenmesi mümkündür. Bu nedenle çevre dostu ve yenilenebilir kaynakların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması önemlidir. Rüzgar enerjisi karbon salınımı yapmayan, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır (Burton vd., 2001). Rüzgar enerjisinden 1 kWh'lık elektrik enerjisi üretmek 2,114 gr CO₂, 0,9 gr CO, 7,1 gr SO₂, 2,8 gr NOX, ve 0,18 gr külün atmosfere karışması engellenerek küresel ısınma ile mücadele edilmektedir (Uğurel, 2000).

İlhan ve ark. yaptığı çalışmada Türkiye'nin toplam rüzgar enerjisi potansiyeli 115.329 MW olarak hesaplanmıştır. Toplam potansiyelin sadece %13'ü elektrik üretimine yönelik rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde değerlendirilmektedir (İlhan vd., 2020). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde uygun saha seçimi için Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve farklı kaynaklardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi için kullanılan Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden en çok kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak Rüzgar Enerji Santrali (RES) kurulumu için gerekli alanlar belirlenmektedir (Sedici, 2016; Artun, 2020; Urfalı & Eymen, 2021). Rüzgar santrallerinde güç üretimi, arazinin topografyası, nem seviyesi, rüzgarın hızı ve yönü gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Rüzgar enerjisi tahminlerinin uygulanması, enerji sektöründe sürdürülebilirliği ve verimliliği artırmaya hizmet ederken, aynı zamanda rüzgar santrallerinde enerji üretimiyle ilişkili belirsizlikleri azaltmaktadır (Çelik vd., 2024). Günümüzde yapılan çalışmalarda rüzgar enerjisi tahmini için yapay sinir ağları (YSA) ve bazı yapay zeka tabanlı modeller kullanılmaktadır. Ancak geleneksel yöntemler tahmin yeteneği ve doğruluk için daha sık kullanılmaktadır (Lagos vd., 2022). (Bilal vd., 2023) yapmış oldukları çalışmada Moritanya'nın Nouakchott bölgesindeki 30 MW'lık bir rüzgar santralinin verilerini uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ile hesaplamalı analizde kullanmışlardır. Farklı rüzgar türbinlerinden elde edilen çok az veri kullanılarak yüksek doğrulukta tahminler yapmışlardır.

Özşahin ve Kaymaz yapmış oldukları çalışmada Hatay ilindeki rüzgar santrallerinin yapım yeri seçiminin coğrafi faktörler kapsamında ve CBS metotlarını kullanarak incelemişlerdir. Hatay'ın RES yapımı için orta (% 45,19) ve iyi (25,64) duyarlılık düzeyinde bir yer olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların "Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası (REPA)" ile önemli derecede örtüştüğü ifade edilmiştir (Özşahin & Kaymaz, 2013). (Yıldırım vd., 2016) yapmış oldukları çalışmada Niğde bölgesi rüzgar enerjisi potansiyelini Weibull dağılımı fonksiyonunu kullanarak istatistiksel olarak incelemişlerdir. Bu bağlamda rüzgar hızı ve rüzgar güç yoğunluğu aylık, mevsimsel ve yıllık olarak hesaplanmıştır. Rüzgar gücü yoğunluğunun kış ve ilk bahar aylarında en yüksek değerlere ulaşıldığı belirlenmiştir. (Korkmaz vd., 2024) Kırşehir ilinin RES kurulumu için uygun sahaların tespit edilmesi için 15 kriter belirleyerek inceleme yapmışlardır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemini kullanarak kriterlerin önem derecelerini belirlemişlerdir. Belirlenen önem derecelerine göre ilin RES uygunluk haritasını çıkarmışlardır. Haritaya göre kurulu olan GEYCEK-RES'in kurulumunun "çok uygun" sınıftaki sahada olduğunu ifade etmişlerdir. (Taşkın

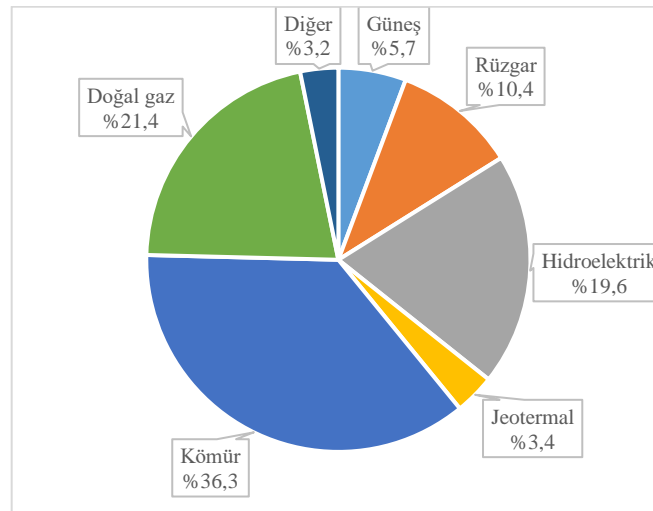
vd., 2020) yapmış oldukları çalışmada Kırşehir ilinde kurul olan GEYCEK RES'in ekonomik faaliyetler ile yerel topluluğun tesisi kabul etme ilişkisini incelemişlerdir. Elde edilen anket ve görüşme sonuçlarına göre santralin ekonomik etkilerinin sınırlı olduğu ve bölge için bir kalkınma enstrümanı olmaktan uzak olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca ekonomik etkinin genişletilebilmesi için Kırşehir ilinde bulunan yüksekokul ve teknik liselerde rüzgar enerjisi teknolojisi ile alakalı bölümlerin kurulması ve kalifiye insanların yetiştirilmesi gerekliliği ifade edilmiştir.

Dünyada enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan geleneksel ve çevreci yakıtların yıllara göre değişim senaryoları Exajoule (EJ) olarak Şekil 1'de verilmiştir. Geleneksel yakıtlar zaman içinde azalırken YEK'lerin kullanımı artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak ve dünyayı yaşanılabilir olarak tutmak için bu durum yüzyılımızda zorunluluk haline dönüşmüştür.



Şekil 1. Dünyada Enerji Kaynakları Senaryoları (Solar Heat Europe, 2021)

Türkiye'nin 2023 yılındaki elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 2'de verilmiştir. YEK kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi üretimi kaynaklara göre değişiklik göstermekte olup YEK kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin yüzdesi fosil yakıtlar kullanılarak üretilen elektrik enerjisi yüzdesinin altında bulunmaktadır.



Şekil 2. Türkiye'de 2023 Yılında Elektrik Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı

Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim hızla artarken birçok bölgede ve şehirde YEK yatırımları yapılmaktadır. Önemli bir rüzgar potansiyeline sahip olan İç Anadolu Bölgesi ve bünyesinde RES bulunan Kırşehir ili bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı İç Anadolu Bölgesinin rüzgar potansiyeli ve kurulu gücünün nüfus ve gelişmişlik bakımından değerlendirilmesi ve özelinde Kırşehir Bölgesi RES'lerin yapay sinir ağları ile ileriye dönük üretim tahmininin yapılmasıdır.

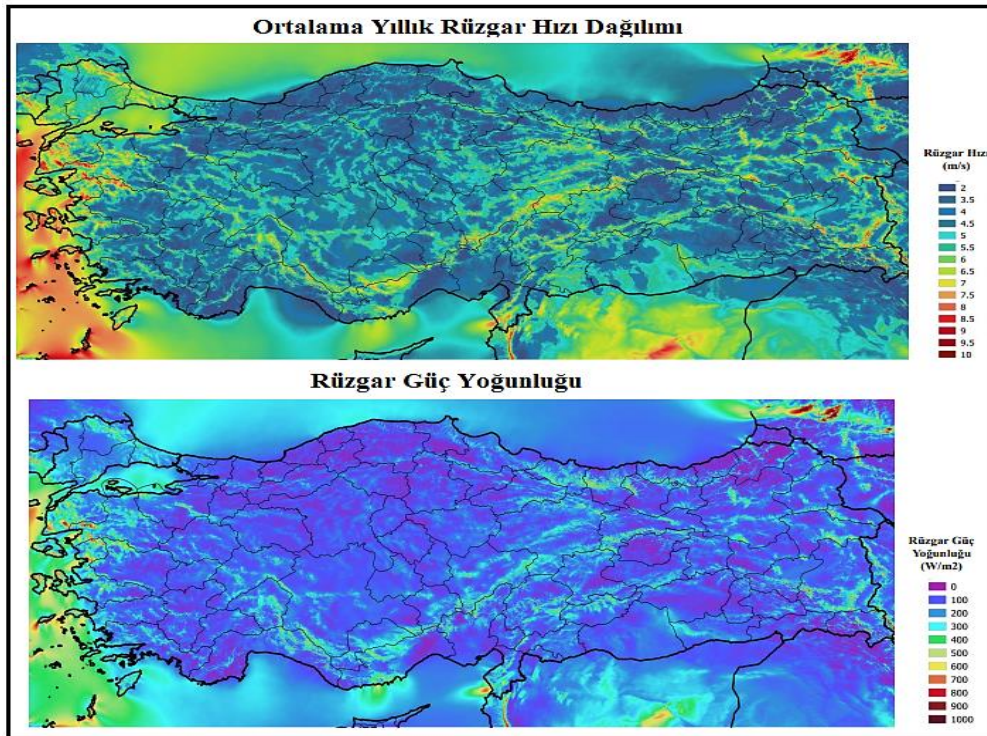
MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada İç Anadolu Bölgesi illeri rüzgar potansiyeli ve kurulu santral güçleri incelenmiştir. İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Kırşehir ilinin rüzgar enerjisi potansiyeli hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Ancak mevcut

kapasitenin, rüzgar enerjisi potansiyeline göre durumunun ileriye yönelik değerlendirilebilmesi için 2024 ve 2028 yılları arasında üretilebilecek rüzgar enerjisi tahmini yapılmıştır. Tahmin çalışmasında YSA tabanlı tahmin modeli kullanılmış olup çalışmada kullanılan veri seti, Kırşehir'deki 168 MW'e kurulu güce sahip RES tesisinin geçmiş çıkış gücü ölçümlerini kapsamaktadır. Tüm deneyler MATLAB 2018a altında 8 GB RAM'e sahip 2.1 GHz Intel (R) Core (TM) kişisel bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

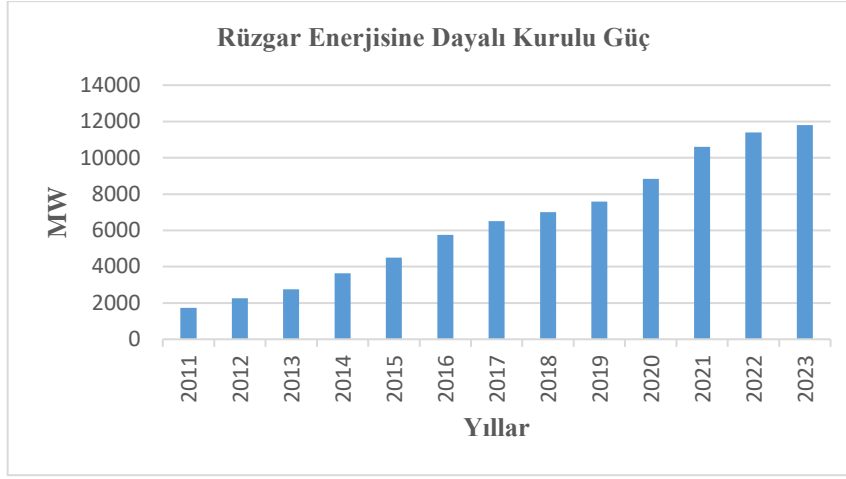
Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Türkiye coğrafi konumu ve topoğrafyası nedeniyle önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye Avrupa ülkeleri ile kıyaslandığında rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından oldukça iyidir ve rüzgar teknik potansiyeli bakımından kurulu gücün üç katı potansiyeli bulunmaktadır (Bayrakçı & Delikanlı, 2007). Türkiye teorik rüzgar enerji potansiyeli denizlerde 17.393,20 MW iken karalarda 131.756,40 MW olarak hesaplanmıştır (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, 2016). Türkiye özellikle batı ve güney kıyı bölgeleri olmak üzere rüzgar enerjisi kaynaklarının yüksek olduğu bir bölgede yer almaktadır. Türkiye'nin coğrafi konumu rüzgar enerjisi potansiyeline katkıda bulunmaktadır. Türkiye stratejik olarak Avrupa ve Asya'nın kavşağında yer almaktadır ve bu da onu Avrupa ve Orta Doğu elektrik şebekeleri arasında bir köprü haline getirmektedir. Türkiye'nin batı ve güney kıyı bölgeleri, rüzgar enerjisi üretimi için ideal olan yüksek ve sürekli rüzgar enerjisine sahiptir. Türkiye'nin özellikle kuzey ve doğu bölgelerindeki dağlık arazisi, rüzgarların vadiler boyunca yönlendirilmesi ve rüzgar koridorlarının oluşturulması da dâhil olmak üzere rüzgar düzenekleri için uygun koşullar oluşturmaktadır. Bu topoğrafik özellikler ülkenin çeşitli yerlerinde rüzgar enerjisi potansiyelini artırmaktadır. Türkiye aynı zamanda Ege ve Akdeniz'de de önemli bir açık deniz rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Açık deniz rüzgar çiftlikleri, daha yüksek ve daha tutarlı rüzgar hızlarının yanı sıra açık deniz rüzgar kaynaklarından faydalanma avantajına da sahiptir. Türkiye rüzgar enerjisi potansiyelleri, rüzgar enerjisi uygulamalarını etkileyen tüm parametrelerin çıkarılmasıyla elde edilmiş değerlerdir Şekil 3. Potansiyel hesaplamaları, Türkiye çapında 200 m çözünürlükte rüzgar verilerinden ve bu verilerden oluşturulmuş haritalar üzerinden yapılmaktadır. Bu kapsamda rüzgar potansiyeli hesaplamaları için kullanılan varsayımlarda hesaba katılmayan alanlar çıkarılarak oluşturulmuş harita Şekil 3'te verilmiştir.



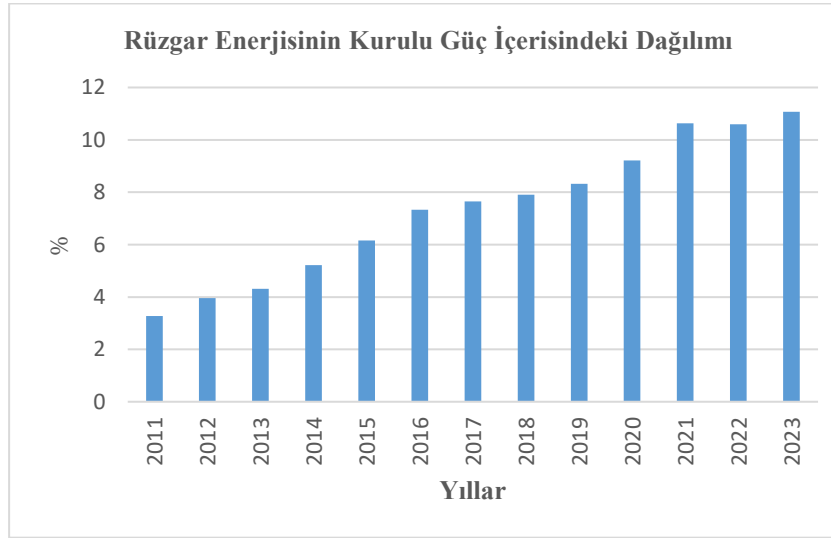
Şekil 3. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Türkiye'nin kurulu gücü 2023 yılı aralık ayı sonu itibarıyla 106.668 MW'a ulaşmıştır. Kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı %29,97 hidroelektrik, %24,13 doğal gaz, %20,08 kömür, %11,07 rüzgar, %10,61 güneş, %1,59 jeotermal ve %2,55 ise diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca 2024 yılı itibarıyla Türkiye genelinde kurulu olan elektrik enerjisi üretim santrali sayısı toplamda 25.948 adet olup bunların 369 adeti rüzgar santrallerinden oluşmaktadır. Rüzgar enerjisine dayalı kurulu güç değişimi Şekil 4'te verilmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).



Şekil 4. Rüzgar Enerjisine Dayalı 2011-2023 Yılları Kurulu Güç Değişimi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Mevcut kurulu güç içerisinde, rüzgar enerjisinin oranı da yıllara göre artış göstermektedir. Rüzgar enerjisinin kurulu güç içerisindeki dağılımını gösteren değişim Şekil 5'te verilmiştir. 2011 yılından itibaren her yıl rüzgar enerjisi kurulu gücün kurulu güç içerisindeki istikrarlı olarak %4 ile %11 arasında artış göstermiştir.



Şekil 5. Kurulu Güç İçerisindeki Rüzgar Enerjisi Dağılımı (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de rüzgar enerjisine dayalı elektrik enerjisi üretimi her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla bu artışın nerelere kadar ulaşabileceğini tahmin etmek için Türkiye genelinde rüzgar enerjisi potansiyelinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) verilerine göre 50 m yer seviyesinden yükseklikte ve yıllık ortalama 7,5 m/s rüzgar hızına sahip kullanılabilir alanlarda km² başına 5 MW gücünde RES kurulabileceği tahmin edilmektedir. Bu bağlamda Türkiye'de toplam 47.849,44 MW gücünde RES kurulabileceği belirlenmiştir. Bu potansiyel için gerekli olan toplam alan ise Türkiye yüz ölçümünün yaklaşık %1,30'una eşittir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Rüzgar enerjisi potansiyeli kurulu güç bulunan Kırşehir Mucur gibi küçük yerleşim yerlerinde sanayi kollarını geliştirme potansiyeli olmasına rağmen bölgede rüzgar enerjisi teknolojileri teknik bilgi potansiyelinin sınırlı olması sektörün gelişimini yavaşlatmaktadır (Taşkın vd., 2020).

Türkiye'nin enerji talebi istikrarlı bir şekilde artmaktadır ve rüzgar enerjisi, ülkenin fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltırken ve sera gazı emisyonlarını düşürürken bu talebin karşılanmasında çok önemli bir rol oynayabilir. Türkiye, rüzgar türbini imalat ve kurulumunda atılımlar yaparak rüzgar enerjisi sektörünün büyümesine katkıda bulunmaktadır. Yerli rüzgar türbini imalat sanayi gelişmektedir. Türkiye, enerji karışımında yenilenebilir enerjinin payını artırmayı amaçlayan iddialı yenilenebilir enerji hedefleri belirlemiştir. Rüzgar enerjisinin bu hedeflere ulaşmada önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Türkiye, önemli rüzgar enerjisi potansiyeline rağmen, bu

potansiyelin tam olarak hayata geçirilmesinde düzenleme ve finansman engelleri, şebeke altyapısı sınırlamaları ve çevresel kaygılar dahil olmak üzere zorluklarla karşı karşıyadır. Ancak ülkenin yenilenebilir enerjiye olan bağlılığı ve sektörde devam eden gelişmeler, rüzgar enerjisinin Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamada hayati bir rol oynamaya devam edeceğini göstermektedir.

İç Anadolu Bölgesi'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

İç Anadolu Bölgesi'ndeki mevsimsel şartlar dikkate alınarak yıllık bazda rüzgar enerjisi potansiyelini etkileyen rüzgar hızı, rüzgar güç yoğunluğu ve kapasite faktörü değişimleri Tablo 1'de verilmiştir. Minimum rüzgar hızı 1,96 m/s iken maksimum rüzgar hızı 9,80 m/s'dir. Minimum kapasite faktörü %1,7 iken maksimum kapasite faktörü %60,1'dir. İç Anadolu Bölgesi'nin arazi çeşitliliği nedeniyle rüzgar enerjisi potansiyelinin farklılık gösterebileceğini unutmamak gerekir. Bazı alanlar diğerlerinden daha uygun koşullara sahip olabilir ve rüzgar enerjisi projeleri için en uygun yerlerin belirlenmesi için kapsamlı bir rüzgar kaynağı değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. İç Anadolu Bölgesi önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeli sunarken, aynı zamanda şebeke altyapısının geliştirilmesi, çevresel hususlar ve arazi kullanım planlaması gibi zorluklarla da karşı karşıyadır. Dikkatli yer seçimi, çevresel etki değerlendirmeleri ve topluluk katılımı, bölgedeki sürdürülebilir rüzgar enerjisi gelişiminin temel bileşenleridir.

Tablo 1. İç Anadolu Bölgesi Yıllık Rüzgar Hızı, Güç Yoğunluğu ve Kapasite Faktörü (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Minimum rüzgar hızı (m/s)	1,96
Maksimum rüzgar hızı (m/s)	9,80
Ortalama rüzgar hızı (m/s)	4,53
Varyans	0,55
Standart sapma	0,74
Minimum güç yoğunluğu (W/m ²)	13,55
Maksimum güç yoğunluğu (W/m ²)	860,019
Ortalama güç yoğunluğu (W/m ²)	128,537
Varyans	3602,881
Standart sapma	60,024
Minimum kapasite faktörü (%)	1,7
Maksimum kapasite faktörü (%)	60,1
Ortalama kapasite faktörü (%)	17,3
Varyans	32,490
Standart sapma	5,7

İç Anadolu Bölgesi, Türkiye'nin önemli rüzgar enerjisi potansiyeline sahip bölgelerinden biridir ve burada aktif olarak rüzgar enerjisi projeleri geliştirilmektedir. Türkiye'nin merkezinde yer alan bu bölge, farklı rüzgar modellerine maruz kalan benzersiz bir coğrafi konuma sahiptir. İç Anadolu'da karasal ve Akdeniz ikliminin etkileri görülmekte, bu da rüzgar hızları ve yönlerinde dalgalanmalara yol açmaktadır. Bölge, platolar, vadiler ve dağlar gibi çeşitli topografik özelliklere sahip olup, bu değişiklikler rüzgar hızlarını artırarak enerjinin verimli bir şekilde üretilebileceği koşullar yaratmaktadır. Özellikle tepeler ve vadiler, rüzgarı yönlendirip yoğunlaştırarak türbinlerin kurulumu için uygun alanlar oluşturur. Ayrıca, bazı bölgelerde doğal rüzgar koridorları bulunmakta, bu koridorlar rüzgar hızlarını artırarak rüzgar türbinlerinin kurulumu için ideal koşullar sağlamaktadır.

İç Anadolu Bölgesi'nin zengin arazi çeşitliliği, rüzgar enerjisi potansiyelinin farklılık göstermesine neden olmaktadır. Bu nedenle, bölgedeki en uygun alanların belirlenmesi için kapsamlı bir rüzgar kaynağı değerlendirmesi yapılması önemlidir. Ancak, bu yüksek potansiyeli değerlendirirken bazı zorluklarla karşılaşmaktadır; örneğin, şebeke altyapısının güçlendirilmesi, çevresel etkiler ve arazi kullanım planlaması gibi unsurlar dikkatle ele alınmalıdır. Sürdürülebilir rüzgar enerjisi gelişimi için yer seçimi, çevresel etki değerlendirmeleri ve topluluk katılımı gibi faktörler büyük önem taşımaktadır.

Rüzgardan Enerjinin Elde Edilmesi

Havanın kütlesi olduğu gibi bir de ağırlığı bulunmaktadır. Atmosferi oluşturan havanın %78'i azot, %21'i oksijen ve kalan %1'i hidrojen, argon, metan ve helyum gibi gazlardır. Metreküp kuru havanın kütlesi 1 bar 20°C sıcaklıkta 1.204 kg iken 1 litre hava yaklaşık 1.2 gram gelmektedir (Smith, 2024).

Havanın ağırlığı nedeniyle hız kazandırılması ile kinetik enerjiye sahip olur. Bu durum kinetik enerji eşitliği ile Eşitlik 1 ile hesaplanır (İstanbul Teknik Üniversitesi, 2024).

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Rüzgar düşey bileşeni yatay bileşenine nispetle küçüktür ve ihmal edilirse Eşitlik 2 halini alır. Kütle (m) ve yatay rüzgar şiddeti (u) kullanılmaktadır.

$$E = \frac{1}{2}mu^2 \quad (2)$$

Eşitlik 3'te ise kütle (m) ve ρ havanın özgül kütleini ve H ise hacmini göstermektedir.

$$m = \rho \times H \quad (3)$$

Rüzgarın yönüne dik gelen alan (A), rüzgar yönündeki uzunlukta (L) olur ve hacim Eşitlik 4 ile elde edilir.

$$H = A \times L \quad (4)$$

Ayrıca L mesafesini rüzgar şiddetine ve zamana göre düzenlenirse Eşitlik 5 ve L yerine konarak kütle Eşitlik 6 halini alır.

$$L = u \times t \quad (5)$$

$$m = \rho \times A \times u \times t \quad (6)$$

Enerji eşitliğinde ifadeler yerine konulduğunda Eşitlik 7 elde edilir.

$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times t \times u^3 \quad (7)$$

Birim alandan birim zamanda ne kadar rüzgar enerjisi elde edilebileceği Eşitlik 7 ile hesaplanır. Eşitlik 7'de (ρ) değeri $1,223 \text{ kg/m}^3$ standart atmosfer şartlarında deniz seviyesindeki yoğunluk kabul değeridir. Yatay rüzgar şiddeti ise 10 metre yükseklikte ölçülen (U) değeridir.

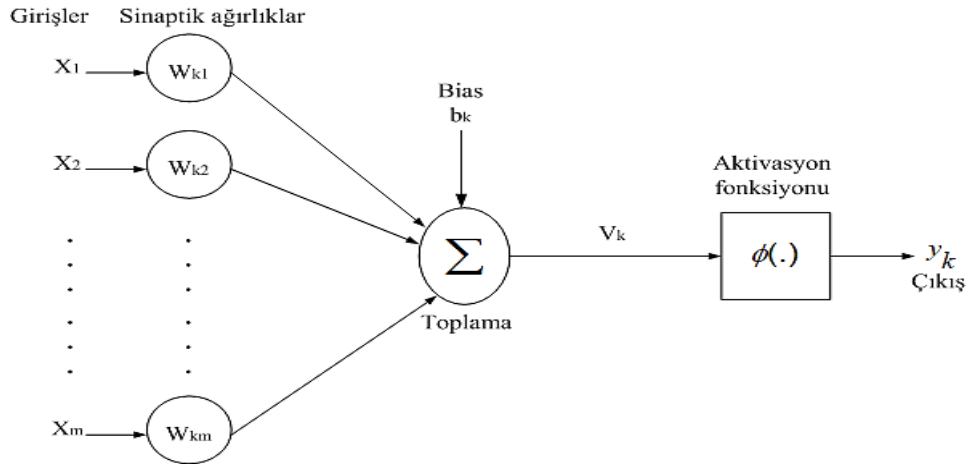
Yapay Sinir Ağları ile Rüzgar Güç Tahmin Uygulaması

YSA, yaygın olarak paralel dağıtılmış ve nöron adı verilen basit işlem birimlerinden oluşan bir işlemcidir. Deneysel bilgiyi kullanım için geçerli olacak şekilde depolamak ve anlamak için doğal bir yeteneğe sahiptir. YSA, yüksek hızlı bilgi işleme, eşleme yetenekleri, hata toleransı, genelleme ve sağlamlık gibi mükemmel özellikler sergiler. Bu özellikler YSA'yı farklı mühendislik sistemlerinin performansının modellenmesi, tahmini ve optimizasyonu için güçlü ve akıllı bir araç haline getirmektedir. Bu nedenle, farklı uygulamalarındaki karmaşık, doğrusal olmayan mühendislik problemlerinde çok fazla kullanılmaktadır (Jani vd., 2017; Siami-Irdemoosa & Dindarloo, 2015).

Genel olarak, birçok YSA modelinin tasarımında kullanılan nöron modeli, sinaps adı verilen ve her birinin kendi ağırlığı w_{kj} olan bir grup bağlantıdan oluşur. Bu ağırlık, tüm ağırlıklı girdileri toplamadan önce kendi girdisi x_j ile çarpılır ve toplamın çıktısı v_k 'yi düşürmekten veya artırmaktan sorumlu olan harici bir önyargı b_k ile toplanır. Daha sonra, çıkış sinyali y_k 'nin genlik aralığını sonlu bir değere düşürmek için bu çıkışa bir aktivasyon fonksiyonu $\phi(\cdot)$ uygulanır. Şekil 6'da doğrusal olmayan nöron modeli verilmiştir.

Çıkış ifadesinin matematiksel ifadesi ise Eşitlik 8'de verilmiş olup, eşitlikteki k ve j sırasıyla nöron ve sinaps sayılarını ifade etmektedir.

$$y_k = \phi\left(\sum_{j=1}^m (w_{kj}) + b_k\right) \quad (8)$$



Şekil 6. Doğrusal Olmayan Nöron Modeli

Yapılan çalışmada, YSA kullanılarak rüzgar gücü tahmini yapılmıştır. Tahmin çalışması yapılırken aşağıdaki adımlar kullanılmıştır.

- Veri toplama

Rüzgar gücü tahmininde, giriş verisi olarak geçmiş rüzgar gücü, rüzgar hızı, sıcaklık ve bağıl nem parametreleri kullanılarak veriler gruplandırılmıştır.

- Sinir ağı modeli tasarımı

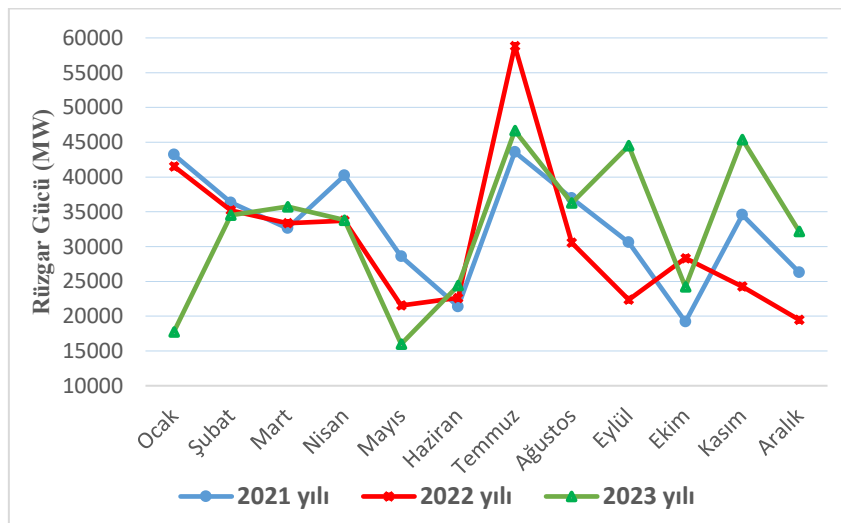
Tahmin modeli için çok katmanlı YSA modeli kullanılmış ve girdi verileri kullanılarak çıkış verileri elde edilmiştir.

- Modelin eğitimi ve test edilmesi

Modelin eğitiminde, geçmiş rüzgar gücü verileri ve meteorolojik veriler kullanılmıştır. Eğitim süreci boyunca, modelin tahminleri ile gerçek veriler arasındaki hata oranı minimize edilmeye çalışılmıştır. Model eğitildikten sonra, doğruluğunun değerlendirilmesi için ortalama mutlak yüzdesel hata fonksiyonu kullanılmıştır.

BULGULAR

Bu çalışma ile İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 ilin rüzgar enerji potansiyeli ve devrede olan elektrik santral güç dağılımı incelenmiştir. Kırşehir Bölgesi'nin 2021 ve 2023 yılları arasında üretmiş olduğu rüzgar gücü değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Kurulu rüzgar gücü artışı ile birlikte yıllara bağlı rüzgar potansiyelinde büyük bir değişim olmasa bile üretimde artış gözlemlenmektedir.



Şekil 7. Gerçekleşen Rüzgar Gücü Üretimi

Bölgenin gelecek 5 yıl için rüzgar enerjisi potansiyeline göre potansiyel değişimini hesaplayabilmek için yıllık bazda günlük geçmiş rüzgar güç verileri kullanılarak ileriye dönük güç tahmini yapılmıştır. Ancak ileriye yönelik yapılan

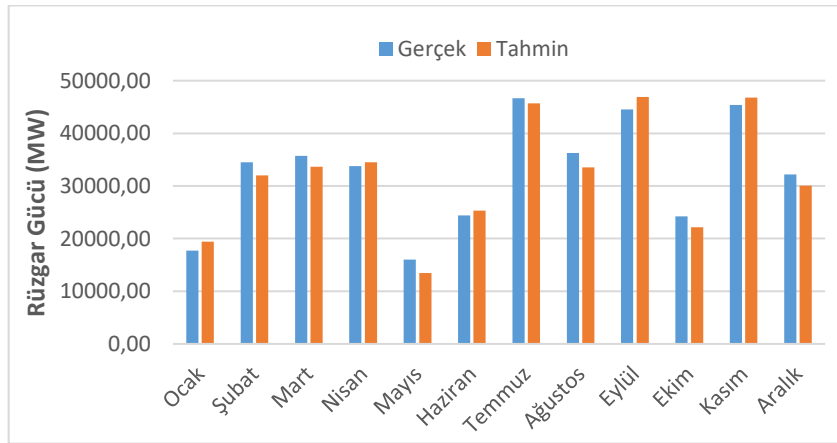
güç tahmininin başarılı bir performans göstermesi için kullanılan YSA tahmin modeli performansının önceden değerlendirilmesi gerekir. Bunun için 2023 yılında gerçekleşen rüzgar gücü üretimi YSA modeliyle tahmin edilmiştir. Tahmin modelinin performansını değerlendirmek için ise ortalama mutlak yüzdesel hata (OMYH) fonksiyonu kullanılmıştır (Irmak vd., 2024). OMYH fonksiyonunun ifadesi Eşitlik 9'da verilmiş olup, eşitlikteki p_i , t_i , n sırasıyla tahmin edilen değer, ölçülen gerçek değer ve toplam veri noktası sayısını temsil etmektedir. Ayrıca tahminde kullanılan veri seti Tablo 2'de verilmiştir.

$$OMYH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - p_i}{t_i} \right) \times 100 \quad (9)$$

Tablo 2. Tahminde Kullanılan Veri Seti

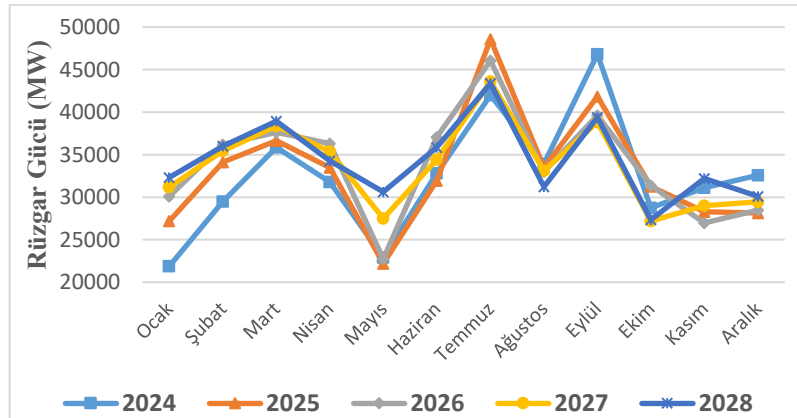
Girişler	Çıkış
Geçmiş rüzgar gücü	Rüzgar çıkış gücü
Rüzgar hızı	
Sıcaklık	
Bağıl nem	

Önerilen tahmin model performansının değerlendirilmesi için 2023 yılı için yapılan rüzgar gücü tahmininde OMYH değeri %6,46 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca veri setinin tamamı için gerçekleşen ve tahmin edilen rüzgar gücü değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. 2023 Yılı Verileri İçin Tahmin Sonuçları

Tahmin modeli 2023 yılı için yapılan tahminde başarılı sonuçlar vermiştir. Tahmin modelinin başarısı gözlemlendikten sonra geçmiş güç verileri kullanılarak 2024, 2025, 2026, 2027 ve 2028 yılları için rüzgar gücü tahmini yapılmıştır. Şekil 9'da tahmin sonuçlarına göre tahmin edilen rüzgar gücü üretim tahmin sonuçlarının değişimi verilmiştir. Tahmin edilen rüzgar gücü potansiyeli bazı yıllarda artış gösterdiği gibi bazı yıllarda azalma göstermektedir.

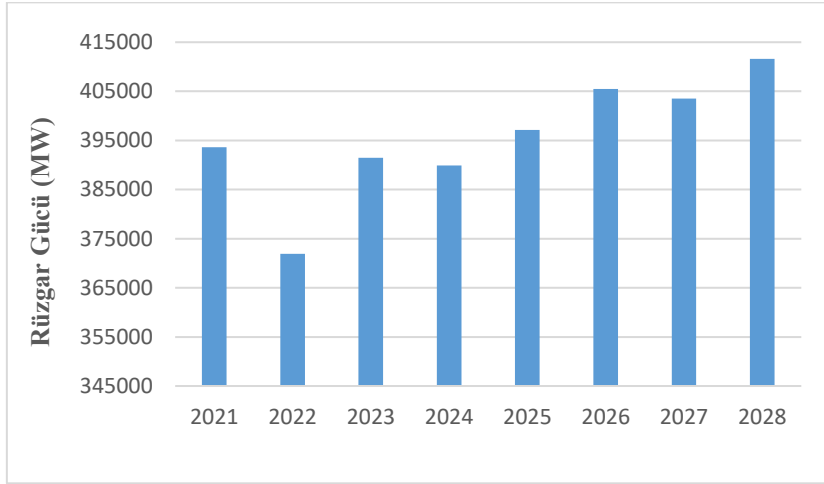


Şekil 9. Tahmin Edilen Rüzgar Gücü Üretimi

2021-2023 yılları arasında gerçekleşen rüzgar gücü ve 2024-2028 yılları arasında üretilmesi tahmin edilen rüzgar gücü değerleri Tablo 3'te verilmiş olup, 2021-2028 yılları arasındaki rüzgar gücü değişimi ise Şekil 10'da gösterilmiştir. 2023 yılında gerçekleşen enerji üretimine oranla 2026 yılında tahmin edilen enerji üretimi %3,5 artmıştır. 2027 ve 2028 yıllarında tahmin edilen enerji üretimi sürekli artış göstermiştir.

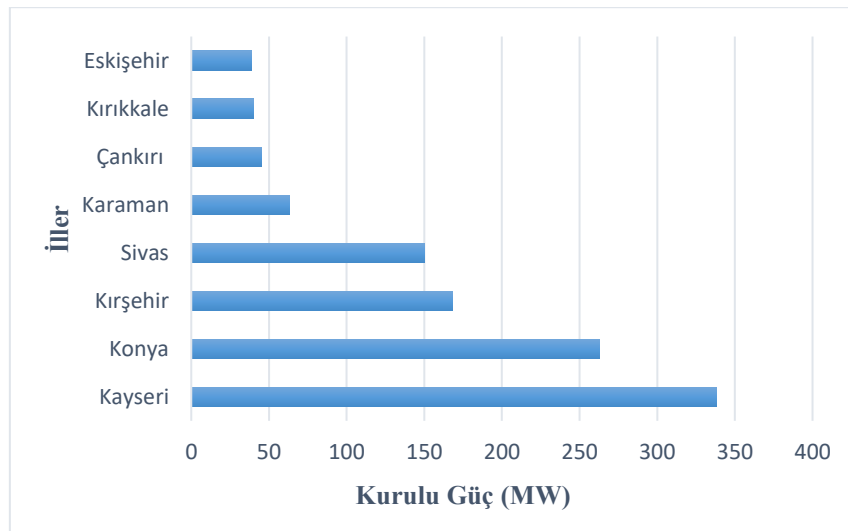
Tablo 3. Yıllara Göre Rüzgar Gücü (MW)

Yıllar	Rüzgar gücü (MW)
2021	393650,92
2022	371894,02
2023	391477,18
2024 (tahmin)	389881,35
2025 (tahmin)	397169,23
2026 (tahmin)	405501,40
2027 (tahmin)	403515,15
2028 (tahmin)	411632,42



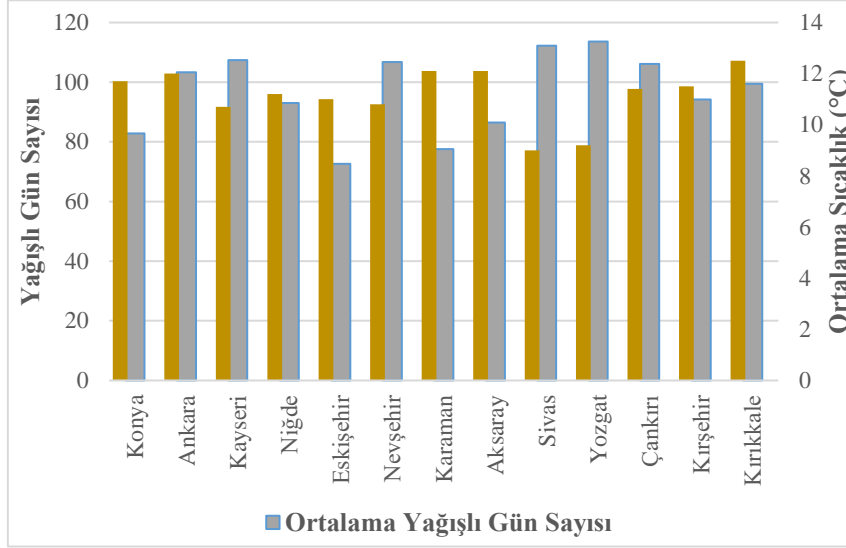
Şekil 10. Rüzgar Gücünün Yıllara Göre Değişimi

İç Anadolu Bölgesinde bulunan 13 il içerisinde rüzgar enerjisinden elektrik üretimi yapan 8 il bulunmaktadır. Bu sekiz il içerisinde kurulu güç 338 MW ile Kayseri birinci sıradadır Şekil 11. Kurulu güç bakımından ilk üç il içinde yüksekten aza doğru Kayseri, Konya ve Kırşehir bulunmaktadır.



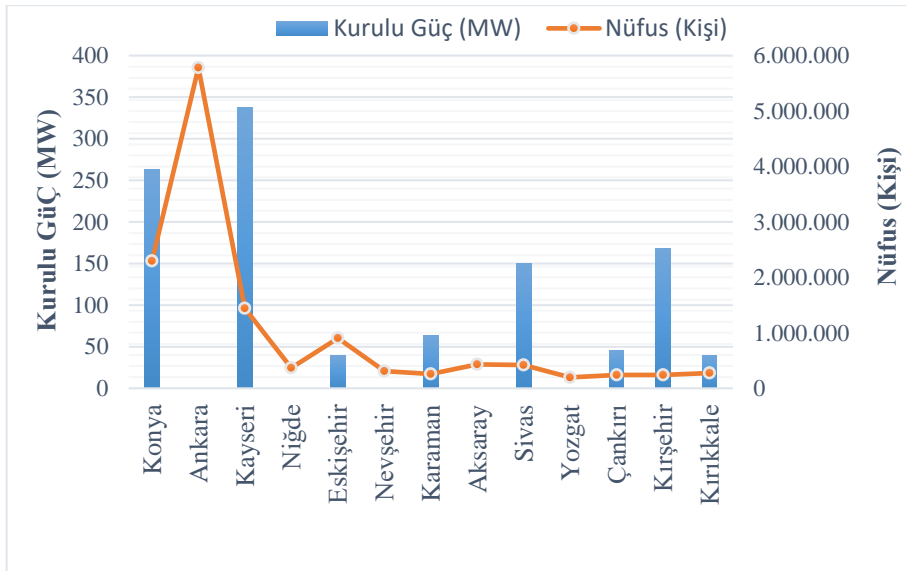
Şekil 11. İç Anadolu Bölgesinde Devredeki Rüzgar Santralleri (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

İç Anadolu Bölgesinde bulunan illerde ortalama sıcaklık ve ortalama yağışlı gün sayıları dağılımı Şekil 12’de verilmiştir. İç Anadolu Bölgesinde Sivas ve Yozgat yağışlı gün bakımında yüksek yıllık ortalama sıcaklık bakımından düşüktür. Kırıkkale, Aksaray ve Karaman ise yıllık ortalama sıcaklık bakımından yüksek değerlere sahiptir. Atmosferik koşullar rüzgar enerjisinin potansiyelini ve üretim sürecini doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. Bu nedenle kurulum yapılacak alanın meteorolojik koşullarının ve rüzgar potansiyelinin incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 12. İç Anadolu İllerinin Yıllık Ortalama Sıcaklık ve Yağışlı Gün Dağılımı (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024)

İç Anadolu Bölgesin ’de kurulu güç ile nüfus dağılımı incelendiğinde Ankara ilinin nüfus yoğunluğu yüksek olmasına rağmen rüzgar enerjisi kurulu gücünün henüz bulunmadığı Konya’nın nüfus yoğunluğu bakımından bölgenin ikinci ili iken kurulu güç olarak yine ikinci sırada olduğu görülmektedir. Kırşehir ise nüfus yoğunluğu bakımından düşük olmasına rağmen kurulu rüzgar gücü bakımından 13 il içerisinde üçüncü sırada yer almaktadır. Şekil 13 incelendiğinde illerin nüfusu ile kurulu güç oranlarının orantılı olmadığı görülmektedir.



Şekil 13. İç Anadolu Bölgesi İlleri Rüzgar Enerjisi Santralleri Kurulu Güç Ve Nüfus Dağılımı

SONUÇ

Yapılan bu çalışmada İç Anadolu Bölgesi illeri rüzgar potansiyeli ve kurulu santral güçleri incelenmiştir. İç Anadolu Bölgesi Kırşehir bölgesinde 2024 ve 2028 yılları arasında üretilebilecek rüzgar enerjisi tahmini yapılmıştır. Tahmin çalışmasında ise literatürde rüzgar gücü tahmini için yaygın olarak kullanılan YSA modeli kullanılmıştır.

Çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Tahmin edilen rüzgar potansiyeli 2024 yılında % 1'e yakın düşmüş 2025-2028 yılları arasında her yıl bir önceki yıla göre %1 artış göstermiştir. Potansiyel değişimi ve kurulu güç artışına bağlı olarak elektrik enerjisi üretimi artacaktır.
- 2023 yılında gerçekleşen enerji üretimine oranla 2026 yılında tahmin edilen enerji üretimi %3,5 artmıştır. 2027 ve 2028 yıllarında tahmin edilen enerji üretimi sürekli artış göstermiştir.
- Rüzgar enerjisi potansiyeli İç Anadolu Bölgesinde yüksek olmasına rağmen henüz yeterli kurulu güç oranına ulaşmamıştır.
- Kurulu rüzgar gücü nüfus ile bağlantısı bulunamamış olup kurulu güç rüzgar potansiyeli ile bağlantılı olarak illerde artmaktadır.
- Kurulacak rüzgar santrallerinin rüzgar potansiyelinin yanı sıra bölgesel tüketim ihtiyacının da göz önünde bulundurularak değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Kurulu rüzgar santrallerinin bölgesel kalkınmaya hizmet etmesi için il ve ilçelerde bulunan teknik programların yenilenebilir enerji alanlarına uygun alanlarda yoğunlaşması önem arz etmektedir.

Rüzgar enerjisi potansiyeli bulunan illerin lokasyonlarında kurulacak santraller ülke genelinde enterkonnekte sistemin yükünü azaltacak böylece enerji nakil maliyetlerinin artmasına engel olacaktır ve enerji nakil hatları kapasite artımı ihtiyacını erteleyecektir. Enerji kaynağı çeşitliliği sağlayacak olup yerinde üret ve yerinde tüket ile elektrik enerjisinin uzun mesafelerden tedarikine gerek duymadan daha küçük dağıtım hatlarıyla enterkonnekte sisteme bağlanarak dağıtımını sağlayacaktır. Ayrıca bölgenin rüzgar potansiyelini kullanmamıza fırsat verecek olup bölge insanının çevre duyarlılığı kazanmasına fırsat sunacaktır.

KAYNAKLAR

Arslan, H., Baltacı, H., Akkoyunlu, B.O., Karanfil, S., & Tayanc, M. (2020). Wind speed variability and wind power potential over Turkey: Case studies for Çanakkale and İstanbul. *Renewable Energy*, 145, 1020-1032. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.128>.

Artun, O. (2020). Determination of the suitable areas for the investment of the wind energy plants (WEP) in Osmaniye using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information Systems (GIS). *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 196-205. <https://doi.org/10.31590/ejosat.763866>

Bayrakçı, C.H., & Delikanlı, K. (2007). Türkiye'de rüzgar enerjisi ve potansiyel belirleme çalışmaları. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 48(569), 78-80.

Bilal, B., Adjallah, K. H., Sava, A., Yetilmezsoy, K., & Ouassaid, M. (2023). Wind turbine output power prediction and optimization based on a novel adaptive neuro-fuzzy inference system with the moving window. *Energy*, 263, 126159.

Bilgili, M., Özbek, A., Şahin, B., & Kahraman, A. (2015). An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.148>

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001) *Wind energy handbook*. Baffins Lane, Chichester West Sussex PO19 1UD: John Wiley & Sons Ltd.

Çelik, E., Bal, G., Öztürk, N., Bekiroglu, E., Houssein, E. H., Ocak, C., & Sharma, G. (2024). Improving speed control characteristics of PMDC motor drives using nonlinear PI control. *Neural Computing and Applications*, 1-12.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, www.enerji.gov.tr, Son Erişim: 15.01.2024

International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris: IEA Publications.

Irmak, E., Yeşilbudak, M., & Taşdemir, O. (2024). Enhanced PV power prediction considering PM10 parameter by hybrid JAYA-ANN Model. *Electric Power Components and Systems*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/15325008.2024.2322668>

İlhan, A., Bilgili, M., & Şahin, B. (2020). Analyses of current wind energy status of Turkey and its future prospect. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35 (4), 1059-1072. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.869175>

İstanbul Teknik Üniversitesi, <https://web.itu.edu.tr/~kaymak/images/windpower.html>, Son Erişim: 20.01.2024

- Jani, D.B., Mishra, M., & Sahoo, P.K. (2017). Application of artificial neural network for predicting performance of solid desiccant cooling systems—a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 80, 352–366. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.169>
- Korkmaz, M., Öztürk, N., & Harnuboğlu, S. (2024). Kırşehir il sınırları içerisinde Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 463-495. <https://doi.org/10.29130/dubited.1181883>
- Lagos, A., Caicedo, J. E., Coria, G., Quete, A. R., Martínez, M., Suvire, G., & Riquelme, J. (2022). State-of-the-Art using bibliometric analysis of Wind-Speed and-Power forecasting methods applied in power systems. *Energies*, 15(18), 6545.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/>, Son Erişim: 20.01.2024
- Özşahin, E., & Kaymaz, Ç.K. (2013). Rüzgar enerji santrallerinin yapım yeri seçimi üzerine bir CBS analizi: Hatay Örneği. *Türk Bilim Dergisi*, 6(2), 1-18.
- Siami-Irdemoosa, E., & Dindarloo, S.R. (2015). Prediction of fuel consumption of mining dump trucks: a neural networks approach. *Appl. Energy*, 151, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.064>
- Smith, J. (2024). Chemical composition of air and its applications in energy engineering. *Journal of Energy Engineering*, 150(3), 34-45.
- Sediqi, K.J. (2016). Gis-based multi-criteria approach for land-use suitability analysis of wind farms: the case study of Karaburun Peninsula, Izmir,-Turkey. MSc, Izmir Institute of Technology, İzmir.
- Solar Heat Europe, <https://solarheateurope.eu/2021/06/18/ieas-net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-sector/iea-2050-pic-3/>, Son Erişim: 20.02.2024
- Uğurel, A. (2000). Rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik üretimi ve türkiye için önemi, III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2000, İstanbul.
- Urfali, T., & Eymen, A. (2021). CBS ve AHP yöntemi yardımıyla Kayseri ili örneğinde rüzgâr enerji santrallerinin yer seçimi. *Geomatik*, 6(3), 227-237. <https://doi.org/10.29128/geomatik.772453>
- Taşkın, E., Yılmaz, M., & Kılıç, Ç. (2020). Rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik etkileri ve sosyal kabul: Mucur örneği. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 18(2), 296-319.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, www.tureb.com.tr, Türkiye’de rüzgar enerji santralleri illere göre kurulu gücü, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Son Erişim: 10.02.2024
- Yang, J., Cai, W., Ma, M., Li, L., Liu, C., Ma, X., & Chen, X. (2020). Driving forces of China’s CO2 emissions from energy consumption based on Kaya-LMDI methods. *Science of the Total Environment*, 711, 134569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134569>
- Yıldırım, U., Gazibey, Y., & Güngör, A. (2016). Niğde ili rüzgar enerjisi potansiyeli. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1(1), 37-47. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239392>
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., ... & Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *The Innovation*, 2(4), 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>