



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.03.2025
Kabul Tarihi : 23.12.2025

Received Date : 16.03.2025
Accepted Date : 23.12.2025

RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALİ PLANLAMASINDA CBS VE AHP KULLANIMI: AĞRI İLİ ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

GIS AND AHP UTILIZATION IN WIND ENERGY POWER PLANT PLANNING: AN ASSESSMENT OF AĞRI PROVINCE

Çağrı MERCAN^{1*} (ORCID:0000-0003-1694-0024)

¹Mardin Artuklu Üniversitesi, Savur Meslek Yüksekokulu, Harita ve Kadastro Programı, Mardin, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Çağrı MERCAN, cagrimercan@artuklu.edu.tr

ÖZET

Teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı, çevresel bozulmayı ve iklim değişikliğini hızlandırarak enerji talebini önemli ölçüde artırdı. Bu durum, yenilenebilir enerjiye yönelimi zorunlu kılmaktadır. Rüzgâr enerjisi, düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilirliği ile önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisi potansiyelinin optimal kullanımı için uygun alanların belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Bu çalışma, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile Türkiye'nin Ağrı ilinde rüzgâr enerjisi santrali (RES) için en uygun alanları belirlemeyi amaçlamaktadır. Rüzgâr hızı, arazi örtüsü, enerji iletim hatlarına uzaklık, eğim, yol ağına yakınlık, kentsel alanlara mesafe, trafo merkezlerine uzaklık, korunan alanlara mesafe, fay hatları ve heyelan bölgelerine uzaklık olmak üzere on farklı kriter değerlendirilmiştir. AHP ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda uygunluk haritası oluşturulmuş ve sonuçların güvenilirliğini test etmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Bulgular, çalışma alanının %66,3'ünün RES için uygun olmadığını, %33,7'sinin ise farklı uygunluk seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle Taşlıçay ilçesi en yüksek uygunluk kategorisinde öne çıkmıştır. Mevcut RES alanları ile karşılaştırıldığında, bazı santrallerin jeolojik riskler nedeniyle düşük uygunluk gösteren alanlarda konumlandığı belirlenmiştir. Bu çalışma, CBS-AHP yönteminin sürdürülebilir enerji planlamasındaki etkinliğini vurgulayarak, karar vericilere bilimsel bir çerçeve sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda farklı ÇKKV yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi ve daha detaylı jeoteknik değerlendirmelerin entegrasyonu önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Analitik hiyerarşi süreci, arazi uygunluk değerlendirme, sürdürülebilir enerji planlaması.

ABSTRACT

Technological advancements and population growth have significantly increased energy demand, accelerating environmental degradation and climate change. This necessitates a transition to renewable energy, with wind energy emerging as a key alternative due to its sustainability and low carbon footprint. Identifying optimal locations for wind farms is therefore crucial. This study employs a Geographic Information System (GIS)-based Analytical Hierarchy Process (AHP) to determine suitable wind energy sites in Ağrı, Turkey. Ten criteria were analyzed, including wind speed, land cover, slope, proximity to infrastructure, urban areas, fault lines, and environmentally sensitive zones. A suitability map was generated based on AHP-derived weights, and a sensitivity analysis was conducted to validate the results. Findings indicate that 66.3% of the area is unsuitable, while 33.7% exhibits varying suitability levels, with Taşlıçay district as the most favorable site. A comparison with existing wind farms highlights installations in geologically high-risk zones. The study demonstrates the GIS-AHP approach's effectiveness in sustainable energy planning and provides a scientific basis for decision-making. Future research should focus on integrating alternative multi-criteria decision-making methods and incorporate detailed geotechnical assessments.

Keywords: Analytical hierarchy process, land suitability assessment, sustainable energy planning.

GİRİŞ

İklim değişikliği, küresel ısınmanın artan etkileriyle birlikte, dünya genelinde ciddi çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlara yol açmaktadır (Price vd., 2024). Fosil yakıtların yaygın kullanımı, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğini tetiklemekte ve aşırı hava olaylarının sıklığı ile şiddetini yükseltmektedir (Nasery vd., 2021; Aghaloo vd., 2023; Franke vd., 2024; Wang & Azam, 2024). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, küresel enerji kaynaklı CO₂ emisyonları 1990'da 2,0 GT iken 2023'te 37,2 GT'ye yükselmiştir (IEA, 2024). Bu artış, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin ne denli acil olduğunu ortaya koymaktadır (Benti vd., 2023; Molla vd., 2024). 21. yüzyılda enerji sektöründeki dönüşüm, insanlığın geleceği için kritik önemdedir. Yenilenebilir enerjiye geçiş, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma için vazgeçilmez bir adımdır (Tekdamar, & Tekdamar, 2024; Dinçer, 2025; Öztürk vd., 2025; Yamaçlı, 2025). Düşük karbonlu kalkınmayı destekleyen yenilenebilir enerji; sera gazı emisyonlarını azaltma, enerji güvenliğini sağlama, çevreyi koruma ve istihdamı artırma potansiyeliyle öne çıkmaktadır (Baseer vd., 2017; Zalhaf vd., 2021; Nagababu vd., 2022; Shobande vd., 2025). Bu bağlamda, özellikle rüzgâr enerjisi sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Rüzgâr enerjisi, karbon emisyonu üretmemesi ve çevre dostu yapısıyla öne çıkan bir yenilenebilir enerji türüdür (Pamuçar vd., 2017; Badi vd., 2023; Yaman, 2024). Elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payının 2023'te %30 iken 2030'da %46'ya ulaşması beklenmektedir (IEA, 2024). Küresel rüzgâr enerjisi potansiyeli, büyük ölçekli projeleri destekleyerek fosil yakıt kullanımını azaltmakta ve iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sunmaktadır (Moradi vd., 2020; Ajanaku vd., 2021; Badi vd., 2023). Ancak, rüzgâr santrallerinin kurulacağı alanların doğru seçilmesi, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından kritik önemdedir.

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle Asya ile Avrupa arasında bir enerji köprüsü olup, kıyı bölgeleri ve topografik olarak yüksek arazilerde rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından avantajlıdır. Bu potansiyel, enerji arzını çeşitlendirme ve fosil yakıt bağımlılığını azaltma yönünde önemli bir fırsat sunmaktadır (Yılmaz & Can Öziç, 2018; Koc vd., 2019; Çolak, 2024; Yaman, 2024). Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimini arttırması gerekmektedir (Arslan vd., 2020; TETKB, 2022). Bu çerçevede, rüzgâr enerjisi yatırımlarının planlanmasında mekânsal analiz tekniklerinin etkin biçimde kullanılması gereklidir (Karataş & Bıçakçı, 2025).

Bu çalışma, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemiyle, Türkiye'nin Ağrı ili özelinde optimum rüzgâr enerji santralleri sahalarının belirlenmesini ve mevcut planlama yaklaşımlarının değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Türkiye'nin artan yenilenebilir enerji ihtiyacı, uygun enerji sistemlerin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Literatürdeki mevcut çalışmalar önemli bir temel oluştururken, rüzgâr potansiyeli olan illerde rüzgâr enerjisi üretimine yönelik sistematik analizlerin yetersiz olduğu görülmektedir. Ağrı ili, rüzgâr enerjisi açısından önemli bir potansiyele sahip olmasına rağmen, bu alanda kapsamlı akademik çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışma, CBS tabanlı AHP yöntemiyle bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyelini analiz ederek sistematik ve veri odaklı bir yaklaşım sunarak literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır. Bölgedeki rüzgâr enerjisi potansiyeline ve özel sektör yatırımlarına rağmen bu konuda bilimsel bir araştırma yapılmamış olması, çalışmanın ülkenin enerji altyapısına önemli bir katkı sağlayacağını göstermektedir.

Araştırma, rüzgâr enerjisi yatırımlarının sürdürülebilir kalkınmaya katkısını artırarak Türkiye'nin enerji politikalarına yön verebilecek nitelikte sonuçlar sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden (SDG) "erişilebilir ve temiz enerji" (SDG7) ve "iklim eylemi" (SDG13) hedeflerine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda çalışmanın; Türkiye'de enerji üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının azaltılması ve dolayısıyla küresel sera gazı salınımının düşürülmesi açısından önemli katkılar sunması beklenmektedir.

Literatür İncelemesi

Rüzgâr santralleri için uygun alan seçimi, teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin bütüncül değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir karar problemidir. Bu süreçte, karar destek sistemleri ve mekânsal analiz yöntemleri, bilimsel temellere dayalı doğru kararlar alınmasına olanak tanımaktadır. Uygun yer seçimi yapılmadığında, çevresel tahribatın yanı sıra teknik ve ekonomik zorluklarla karşılaşılabilir. Bu nedenle, CBS ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, rüzgâr santrali planlamasında kritik rol oynamaktadır (Abdullah vd., 2021; Benti vd., 2023; Rekik vd., 2025).

Mevcut literatürde rüzgâr santrali saha seçiminde farklı ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır. En yaygın yöntemler arasında AHP, Bulanık AHP (FAHP), TOPSIS ve DEMATEL gibi yaklaşımlar yer almaktadır (Tablo 1). CBS ile entegre edilen ÇKKV yöntemleri, büyük miktardaki coğrafi bilginin önem ağırlıklarına göre analiz edilmesini ve görselleştirilmesini sağlar (Elkadeem vd., 2021; Sachit vd., 2024).

Tablo 1. Rüzgâr Santrali Sahası Seçimi İçin CBS Tabanlı ÇKKV Yöntemleri

Metod*	Referans
AHP	Koc vd., 2019; Moradi vd., 2020; Ajanaku vd., 2021; Ifkirne vd., 2022; Yousefi vd., 2022; Benti vd., 2023; Yaman, 2024; Yıldız, 2024
FAHP	Abdullah vd., 2021; Eroğlu, 2021; Nasery vd., 2021; Zalhaf vd., 2021; Rekik vd., 2025
AHP-TOPSIS	Amiri vd., 2024
AHP-DEMATEL	Çolak, 2024
ANP-DEMATEL	Azizi vd., 2014
BWM	Elkadeem vd., 2021; Tercan, 2021
BWM - Fuzzy	Aghaloo vd., 2023
BWM-AHP-MARCOS	Badi vd., 2023
BWM-MAIRCA	Pamuçar vd., 2017
FAHP-TOPSIS	Nagababu vd., 2022

*AHP: Analitik Hiyerarşi Süreci; FAHP: Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci; ANP: Analitik Ağ Süreci; DEMATEL: Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı; BWM: En İyi-En Kötü Yöntemi; MAIRCA: Çok Nitelikli İdeal-Gerçek Karşılaştırmalı Analiz; TOPSIS: İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralama Tekniği; MARCOS: Uzlaşma Çözümüne Göre Alternatiflerin Ölçümü ve Sıralaması Yöntemi

Tablo 1, rüzgâr santrali saha seçiminde kullanılan farklı ÇKKV yöntemlerini ve bunların uygulamalarını göstermektedir. Literatürde en sık kullanılan yöntem AHP olup, hibrit yaklaşımlar da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle FAHP, TOPSIS ve DEMATEL yöntemlerinin CBS ile entegrasyonu, farklı kriterlerin ağırlıklandırılmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda en yaygın kullanılan değerlendirme kriteri rüzgâr hızıdır (Ayalke & Şişman, 2022; Yaman, 2024). Bunun haricinde eğim (Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024), yerleşim alanlarına mesafe (Yaman, 2024; Yousefi vd., 2024), ulaşım ağları (Aghaloo vd., 2023), koruma alanları (Ajanaku vd., 2021; Bilgili vd., 2024), enerji iletim hatları (Yıldız, 2024), trafo merkezleri (Yousefi vd., 2024), havaalanları (Ayalke & Şişman, 2022; Hosseini Dehshiri & Hosseini Dehshiri, 2022), su kaynakları (Noorollahi vd., 2016; Aghaloo vd., 2023; Yousefi vd., 2024), ve jeolojik risk (Eroğlu, 2021; Bilgili vd., 2024) gibi birçok kriterin değerlendirme sürecinde dikkate alındığı görülmektedir.

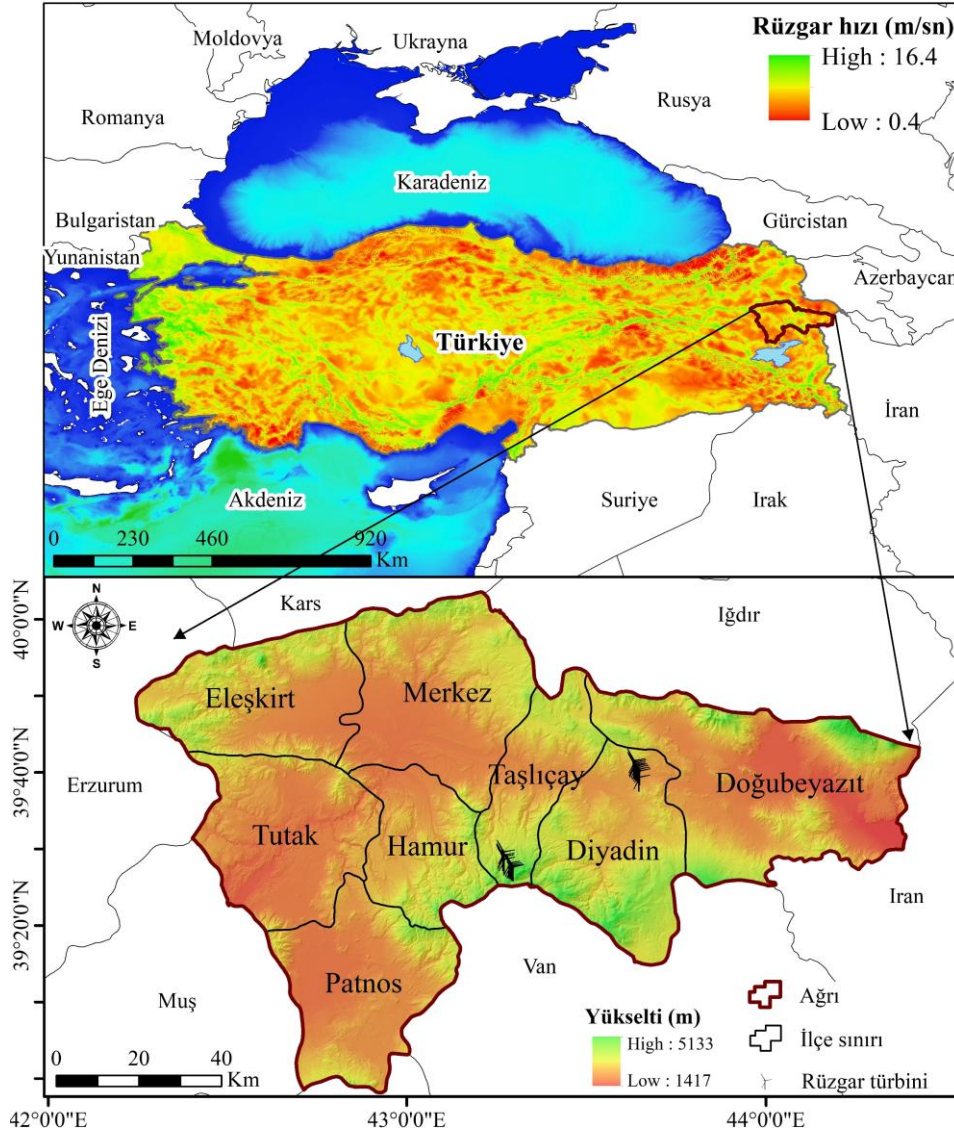
Türkiye’de gerçekleştirilen bir araştırmada GIS-BWM yöntemi kullanılmış ve Balıkesir ilinin %40,90’nun rüzgâr çiftlikleri için uygun olduğu belirlenmiştir (Tercan, 2021). Afganistan’ın Herat bölgesinde GIS-FAHP yaklaşımı ile benzer bir araştırma yürütülmüş ve çalışma alanının %15,3’ünün rüzgâr çiftlikleri için potansiyel taşıdığı belirlenmiştir (Nasery vd., 2021). Fransa’nın güneydoğusunda gerçekleştirilen bir araştırmada ise GIS-AHP yaklaşımı ile inceleme alanının yaklaşık %6,98’inin rüzgâr çiftliği için önemli olabileceği belirtilmiştir (Ifkirne vd., 2022). Tunus’ta gerçekleştirilen başka bir araştırmada ise GIS-FAHP yöntemi kullanılarak 33,138 km² alanın rüzgâr çiftlikleri için uygun olabileceği belirlenmiştir (Rekik vd., 2025).

Mevcut çalışmalar rüzgâr santrali yer seçimi için çeşitli CBS tabanlı MCDM yöntemlerini kullanmıştır. Ancak, Ağrı gibi rüzgâr potansiyeline sahip iç bölgelerde kapsamlı analizlerin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, CBS-AHP yöntemi ile gerçekleştirilecek bu çalışma hem literatüre katkı sağlamayı hem de bölgesel ölçekte rüzgâr santrali yatırımlarına yön verecek bilimsel bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, çalışmanın sonuçlarının sürdürülebilir enerji planlamasına katkı sağlayarak Türkiye’nin yenilenebilir enerji politikalarına yön verebilecek bilimsel bulgular sunması beklenmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanı

Ağrı, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde, 40°1,2' - 38°57,2' kuzey enlemleri ve 42°17,0' - 44°29,1' doğu boylamları arasında konumlanmaktadır (Şekil 1). Ortalama rakımı 2081 metre olan il, volkanik dağlarla çevrili engebeli bir coğrafyaya sahiptir. Türkiye'nin en yüksek noktası olan Ağrı Dağı (5137 m) başta olmak üzere, Tendürek Dağı ve Süphan Dağı gibi önemli volkanik dağlar bölgenin jeolojik yapısını şekillendirmektedir. Ayrıca, Ağrı Ovası, Eleşkirt Ovası, Patnos Ovası, Doğubayazıt Ovası ve Tutak Ovası gibi düzlükler de bölgedeki başlıca jeomorfolojik birimler arasındadır.



Şekil 1. Çalışma Alanının Lokasyon Haritası

Ağrı'da hüküm süren sert karasal iklim, yıllık ortalama sıcaklığın 6,3°C olduğu, kışların uzun ve dondurucu, yazların ise kısa ve sıcak geçtiği bir iklim yapısı sergilemektedir. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 6,2 saat, yağışlı gün sayısı 116,8 gün ve ortalama toplam yağış miktarı 525,5 mm'dir (MGM, 2025). Ortalama rüzgâr hızı ise 4,79 m/sn olarak ölçülmüştür. İldeki rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücü 57,6 MWm, türbin gücü ise 9 MW'dir (TWES, 2024).

Sekiz ilçeden oluşan Ağrı'nın nüfusu 499,801'dir (TUIK, 2025). İlde kişi başına elektrik tüketimi 1026 kWh, istihdam oranı %41,5 ve kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasıla 4706\$ olup, bu değer ülke genelinde en düşük ikinci değerdir (TUIK, 2025). Hayvancılık, Ağrı ekonomisinin temelini oluşturmakta olup, özellikle küçükbaş hayvancılık yaygındır. Sert iklim koşulları ve engebeli arazi yapısı nedeniyle tarım faaliyetleri sınırlı kalmaktadır.

Ağrı'nın engebeli ve volkanik coğrafi yapısı ve aktif tektonik durumu, heyelan, deprem ve taşkın gibi doğal afetlerin sıkça görülmesine neden olmakta, bu durum bölgedeki yerleşim yerleri ve altyapı için sürekli bir tehdit oluşturmaktadır. Özellikle, Doğu Anadolu Fay Hattı'nın etkisiyle deprem riski yüksek bir bölgedir. Bu nedenle,

Ağrı'da planlanan projelerde doğal afet risklerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ve sürdürülebilirlik ilkelerinin gözetilmesi büyük önem taşımaktadır (Toprak & Sunkar, 2022).

Veri Kaynakları

Bu çalışmada kullanılan tüm veriler, Tablo 2'de detaylı olarak sunulan kamuya açık veri kaynaklarından temin edilmiştir. Mekânsal analizlerde birliğin sağlanması amacıyla tüm veri setleri, WGS 84 - UTM 38N koordinat sistemine dönüştürülmüş ve 25 metre mekânsal çözünürlükte yeniden örneklendirilmiştir.

Rüzgâr hızı verileri, Global Wind Atlas (GWA) platformundan raster formatında ve yaklaşık 250 m mekânsal çözünürlükte elde edilmiştir. Bu veri seti, doğrudan bir takvim yılına ait ölçüm verilerini değil; 10 ila 30 yıllık uzun dönemli iklimsel verilerin WRF (Weather Research and Forecasting) gibi modeller aracılığıyla işlenmesi sonucu elde edilen ortalama rüzgâr koşullarını temsil etmektedir. GWA verileri, uluslararası literatürde sıklıkla başvurulan güvenilir bir kaynak olarak kabul edilmektedir (GWA, 2025).

Jeolojik risk alanlarına ilişkin veriler (fay hatları ve heyelan bölgeleri), MTA kaynaklı 1/100,000 ölçekli vektör haritalardan alınmıştır. Koruma alanlarına ilişkin mekânsal veriler ise Ağrı ili Çevre Durum Raporları ve T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü'nün 1/100,000 ölçekli haritaları sayısallaştırılarak elde edilmiştir.

Yol, yerleşim, trafo merkezleri ve enerji iletim hatlarına ait veriler ise OpenStreetMap (OSM) platformu üzerinden vektör formatında edinilmiş ve analizlere uygun biçimde yeniden düzenlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme Kriterlerinin Veri Kaynakları

Kriter	Veri Kaynağı
Rüzgâr hızı (100 m)	Global wind atlas (https://globalwindatlas.info/en/) (Erişim tarihi: 10/02/2025)
Trafo merkezlerine mesafe	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.031/35.252) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Elektrik şebeke hatlarına uzaklık	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.031/35.252) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Arazi örtüsü	ESA Worldcover data (https://esa-worldcover.org/en/data-access) (Erişim tarihi: 10/02/2025)
Eğim	ASF Data (https://search.asf.alaska.edu/#/) (Erişim tarihi: 05/02/2025)
Yola yakınlık	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.031/35.252) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Kentsel alanlara mesafe	Open Street Map (https://www.openstreetmap.org/#map=7/39.031/35.252) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Koruma alanlarına mesafe	Ağrı Çevre Düzeni Planı (https://mpgm.csb.gov.tr/ardahan---kars---igdir---agri-planlama-bolgesi-i-82183) & Milli Parklar Genel Müdürlüğü (https://www.tarimorman.gov.tr/DKMP) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Fay hattına mesafe	MTA (https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx) (Erişim tarihi: 15/02/2025)
Heyelan bölgesinden mesafe	MTA (https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx) (Erişim tarihi: 10/02/2025)

Metodolojik Çerçeve: Rüzgâr Enerjisi Santrali Potansiyel Alanlarının Belirlenmesi İçin Çok Kriterli Mekânsal Analiz

Bu çalışma, rüzgâr enerji santrali (RES) potansiyel konumlarının belirlenmesi amacıyla, CBS tabanlı çok kriterli karar analizi yöntemlerini esas alan dört aşamalı, sistematik bir metodoloji benimsemiştir (Şekil 2). Bu metodoloji, RES yer seçimini etkileyen teknik, çevresel, sosyo-ekonomik ve jeolojik faktörlerin mekânsal analizini bilimsel verilere dayandırarak, karar verme süreçlerini desteklemeyi hedeflemektedir.

Metodolojinin ilk aşamasında, literatür ve uzman görüşleri doğrultusunda RES yer seçimini etkileyen kriterler belirlenmiştir (Tablo 3). Bunlar; teknik, çevresel, sosyoekonomik ve jeolojik faktörleri içermektedir. Kriterlerin seçilme nedenleri ilerleyen bölümlerde detaylandırılmıştır. Veriler, ArcGIS (v.10.8) ile CBS veri tabanına işlenmiş ve tematik haritalar oluşturulmuştur. Elde edilen veriler, ArcGIS yazılımı kullanılarak CBS veri tabanında yapılandırılmış ve her bir kriteri temsil eden tematik harita katmanları yeniden sınıflandırılarak oluşturulmuştur.

(Şekil 3). Belirlenen değerlendirme kriterlerinin alt-kriterleri ise rüzgâr çiftliği için uygunluk durumuna göre 0-5 arasında değişen puanlarla skorlandı (Şekil 2). 0 uygunsuz, sınırlandırılmış alanları, 1 en düşük, 5 ise en yüksek uygunluk düzeyini temsil etmektedir. Ayrıca, RES kurulumunu kısıtlayan teknik, çevresel, sosyoekonomik ve hukuki faktörler de bu aşamada tanımlanarak veri tabanına entegre edilmiştir.

Tablo 3. Değerlendirme Kriterleri ve Referanslar

Kriter	Referans
Rüzgâr hızı	Ayalke & Şişman, 2022; Yaman, 2024
Trafo merkezlerine mesafe	Yousefi vd., 2024; Yıldız, 2024
Elektrik şebeke hatlarına uzaklık	Noorollahi vd., 2016; Flora vd., 2021; Rediske vd., 2021; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024; Yousefi vd., 2024; Yıldız, 2024
Arazi örtüsü	Tegou vd., 2010; Tercan, 2021
Eğim	Yıldız, 2024
Yola yakınlık	Aghaloo vd., 2023
Kentsel alanlara mesafe	Noorollahi vd., 2016; Rediske vd., 2021; Dehshiri vd., 2022; Ekiz vd., 2022; Yaman, 2023; Yousefi vd., 2024
Koruma alanlarına mesafe	Tercan, 2021; Ajanaku vd., 2022; Bilgili vd., 2024
Fay hattına mesafe	Barzehkar vd., 2020; Bilgili vd., 2024; Yıldız, 2024
Heyelan bölgesinden mesafe	Eroğlu, 2021; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024; Köse, 2024

Çalışmanın ikinci aşamasında, RES yer seçim kriterlerinin göreceli önemini belirlemek amacıyla AHP metodu kullanılmıştır. AHP yönteminin uygulama aşamaları ilerleyen bölümlerde detaylandırılacaktır. Bu aşamada, literatür ve uzman görüşleri doğrultusunda kriterlerin önem ilişkileri belirlenmiş ve AHP ile her bir kriterin ağırlık değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4).

Üçüncü aşamada, ağırlıklandırılmış kriterler ArcGIS yazılımı ile mekânsal olarak birleştirilmiştir. Hücre tabanlı (raster) matematiksel işlemler (weighted overlay) uygulanarak, her hücre için RES kurulum uygunluk skoru hesaplanmış ve uygunluk haritası oluşturulmuştur. Bu harita, her hücrenin RES kurulumu için uygunluk skorunu göstermektedir.

Son aşamada, elde edilen uygunluk haritası üzerinde kısıtlayıcı faktörler (koruma alanları, yerleşim yerleri, askeri yasak bölgeler vb.) doğrultusunda dışlama analizi gerçekleştirilmiştir. Kısıtlayıcı faktörlere ilişkin ayrıntılar ilerleyen bölümlerde detaylandırılacaktır. Bu analizde, kısıtlayıcı faktörlerin bulunduğu alanlar uygunluk haritasından çıkarılarak, RES kurulumu için en uygun potansiyel alanlar belirlenmiştir (Şekil 4). Belirlenen alanlar, arazi eğimi, rüzgâr hızı ve diğer kriterler açısından detaylı olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar, karar vericiler için öneriler sunacak şekilde raporlanmıştır.

Metodolojinin güvenilirliğini artırmak amacıyla, duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Duyarlılık analizi, ağırlıklandırma sürecinin sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, belirlenen potansiyel alanların gerçek dünyadaki uygunluğunu doğrulamak için, mevcut RES alanlarıyla karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Değerlendirme Kriterlerinin Belirlenmesi ve Yeniden Sınıflandırılması

Bu çalışmada, RES kurulumu için en uygun potansiyel alanların belirlenmesi amacıyla, literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda on adet değerlendirme kriteri tanımlanmıştır. Belirlenen kriterler ve ilgili literatür referansları Tablo 3'de detaylı olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada, kriterlerin belirlenmesi ve ağırlıklandırma süreci çok disiplinli bir uzman grubu tarafından yürütülmüştür. Uzman grubu; 2 yenilenebilir enerji uzmanı, 1 harita mühendisi, 2 şehir ve bölge plancısı, 1 çevre mühendisi, 2 elektrik-elektronik mühendisi, 1 makine mühendisi ve 2 jeoloji mühendisinden oluşmaktadır. Uzmanların tamamı, Ağrı ilini saha düzeyinde tanıyan ve enerji planlaması konusunda deneyimli kişilerden seçilmiştir. Uzmanlara çalışmanın amacı, kapsamı ve yöntemi hakkında bilgilendirme yapılmış; ardından literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan kriterler derlenerek uzman grubuyla paylaşılmıştır. Uzmanlar, bu kriterleri il özelinde değerlendirerek Tablo 3'te sunulan on temel kriteri uzlaşılı yoluyla belirlemiştir. Ayrıca,

çalışmada dikkate alınmaması gereken kısıtlayıcı unsurlar (örneğin, nehirlere 500 m, havaalanlarına 3 km mesafe sınırı) da yine bu grup tarafından tanımlanmıştır (ayrıntılar “Dışlama Kriterleri” bölümünde verilmiştir). Kriterlerin alt-kriter aralıkları ve 0–5 skorlaması, uzman görüşleri ile birlikte RES kurulum gereksinimleri (örneğin, minimum 3 m/sn işletme hızı, maksimum %30 eğim sınırı) ve literatürdeki benzer çalışmalar (örneğin; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024; Yaman, 2024) esas alınarak oluşturulmuştur. Ağırlıklandırma aşamasında, uzmanlara AHP yöntemi hakkında bilgi verilmiş; ikili karşılaştırmalar, her kriter çifti için toplu tartışma yöntemiyle yapılmıştır. Bu yaklaşımda, her uzman bireysel olarak puanlama yapmak yerine, ortak uzlaşa ile karşılaştırma değerleri belirlemiş ve bu değerler kullanılarak nihai ağırlıklar hesaplanmıştır. Bu yöntem, AHP analizinde tutarlılığı ve karar birliğini güçlendirmiştir.

Belirlenen kriterlere ait alt kriterlerin, RES kurulum gereksinimleri ile ilişkileri doğrultusunda standartlaştırılması ve arazi uygunluk analizine uygun bir şekilde yeniden sınıflandırılması gerekmektedir. Arazi uygunluğu, beş ayrı kategoride değerlendirilmiştir: 'çok yüksek uygunluk' (5), 'yüksek uygunluk' (4), 'orta uygunluk' (3), 'düşük uygunluk' (2) ve 'çok düşük uygunluk' (1). Teknik, hukuki, ekonomik veya sosyoekonomik nedenlerle RES kurulumu için uygun olmayan alanlar, 'kısıtlı alan' (0) olarak sınıflandırılmış ve uygunluk analizine dahil edilmemiştir (Şekil 2).

Yeniden sınıflandırma sürecinin ardından, çalışmada kullanılan kriterlere ait tematik haritalar oluşturulmuştur (Şekil 3). Haritalarda, uygunluk seviyelerini görsel olarak temsil etmek amacıyla renk kodlaması kullanılmıştır: koyu yeşil 'çok yüksek uygunluk', yeşil 'yüksek uygunluk', sarı 'orta uygunluk', turuncu 'düşük uygunluk', kırmızı 'çok düşük uygunluk' ve siyah 'kısıtlı alan' olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu görselleştirme, potansiyel RES alanlarının mekânsal dağılımını ve uygunluk derecelerini kolaylıkla değerlendirmeyi sağlamaktadır.

Aşağıdaki bölümde değerlendirme kriterlerinin seçilme nedenlerinin ayrıntıları bulunmaktadır.

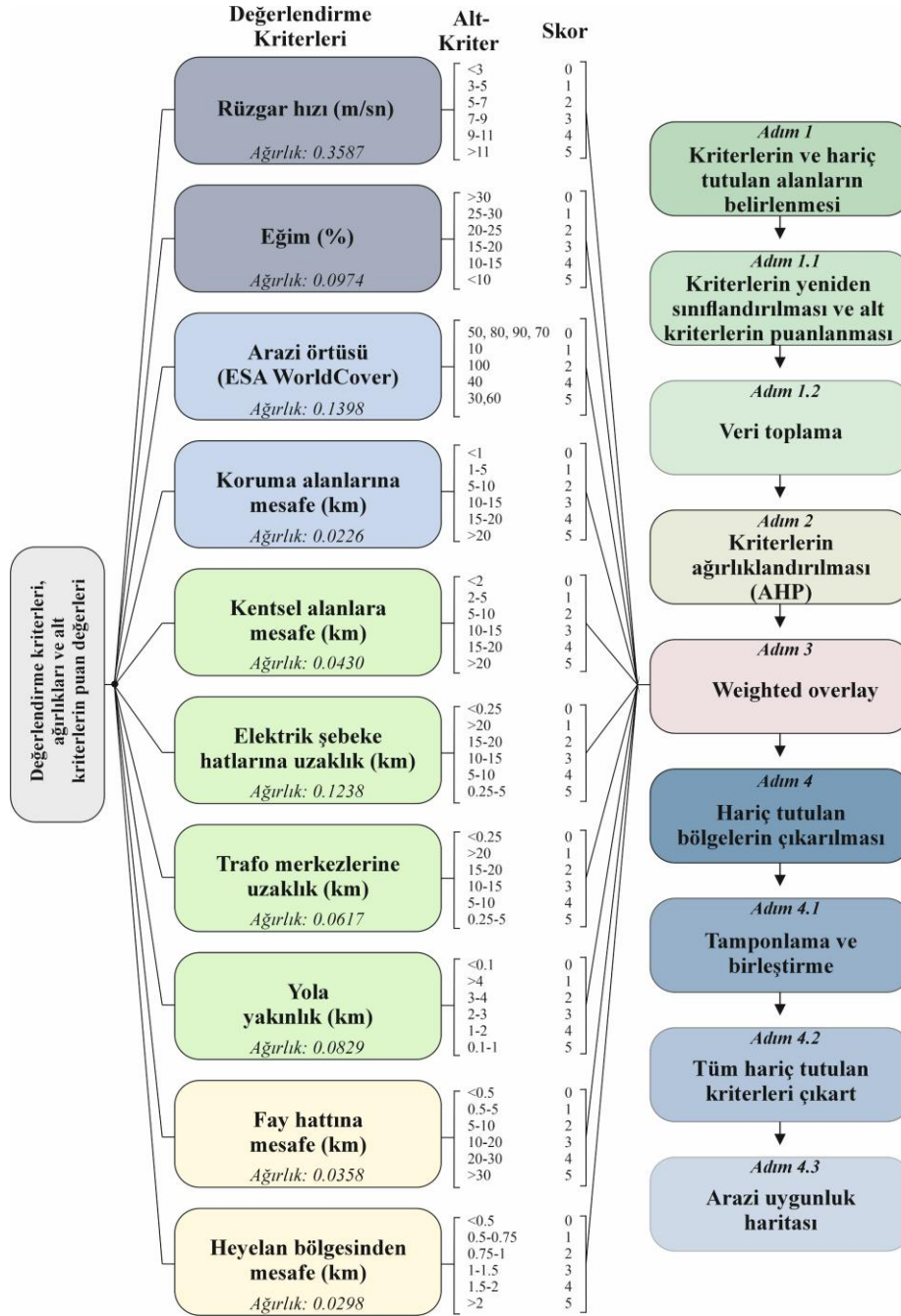
Rüzgâr hızı: Rüzgâr hızı, rüzgâr türbinlerinin kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesinde temel bir faktör olduğundan, bu çalışmada kritik bir kriter olarak değerlendirilmiştir (Rediske vd., 2021). Şekil 3-a'da sunulan rüzgâr hızı haritası, altı farklı hız aralığına göre sınıflandırılmıştır. Rüzgâr türbinlerinin minimum çalışma eşik değerinin altında kalan 3 m/sn'den düşük hızdaki alanlar, literatürdeki benzer çalışmalarda da belirtildiği üzere (Ayalke & Şişman, 2022; Benti vd., 2023; Yaman, 2024), analiz sürecinden çıkarılmıştır. Buna göre, rüzgâr hızları şu şekilde kategorize edilmiştir: 3-5 m/sn aralığı 'çok düşük uygunluk', 5-7 m/sn aralığı 'düşük uygunluk', 7-9 m/sn aralığı 'orta uygunluk', 9-11 m/sn aralığı 'yüksek uygunluk' ve 11 m/sn üzeri 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesinde ve rüzgâr türbini yerleşimlerinin optimizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır.

Arazi örtüsü: RES kurulumu için potansiyel arazilerin değerlendirilmesinde kullanılan arazi örtüsü kriteri, literatürdeki mevcut çalışmalarla tutarlılık göstermektedir (Benti vd., 2023; Tercan, 2021). Şekil 3-b'de sunulan arazi örtüsü haritası, beş farklı sınıfa ayrılarak değerlendirilmiştir. Yapılaşmış alanlar, su kütleleri, bataklıklar ve buzullar/kar örtüsü gibi araziler, RES kurulumu için uygunsuz olarak değerlendirilmiş ve analiz sürecinden çıkarılmıştır. Ağaçlık alanlar 'düşük uygunluk', yosunlu alanlar 'orta uygunluk', tarla 'yüksek uygunluk' ve otlak/seyrekle bitki örtüsü alanları 'çok yüksek uygunluk' olarak kategorize edilmiştir. Bu sınıflandırma, RES kurulumunun çevresel etkilerini minimize etme ve arazi kullanımını optimize etme amacını taşımaktadır.

Elektrik şebeke hatlarına uzaklık: Enerji iletim hatlarına coğrafi yakınlık, iletim kayıplarını minimize ederek kablolama maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır (Noorollahi vd., 2016; Flora vd., 2021; Rediske vd., 2021; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024; Yıldız, 2024; Yousefi vd., 2024). Bununla birlikte, RES ile elektrik iletim hatları arasında belirlenmiş güvenlik standartlarına uygun bir mesafenin korunması elzemdir (Flora vd., 2021). Şekil 3-c'de sunulan iletim hatlarına uzaklık haritasında, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak elektrik hatlarından olan mesafe hesaplanmış ve bu mesafe, altı ayrı uygunluk sınıfına ayrılmıştır. Güvenlik protokolleri gereği, elektrik hatlarına 0,25 km'den daha yakın olan alanlar analiz dışı bırakılmıştır. Elektrik hatlarından 20 km'den uzak alanlar 'çok düşük uygunluk', 15-20 km arası 'düşük uygunluk', 10-15 km arası 'orta uygunluk', 5-10 km arası 'yüksek uygunluk' ve 0.25-5 km arası 'çok yüksek uygunluk' olarak sınıflandırılmıştır.

Eğim: Arazi eğimi, RES kurulumunda inşaat, nakliye ve bakım maliyetlerini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Yüksek eğimli arazilerde, düşük eğimli arazilere kıyasla bu maliyetlerde önemli artışlar gözlemlenmektedir (Latinopoulos & Kechagia, 2015; Rediske vd., 2021; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024). Bu nedenle, eğim kriteri RES yer seçimi analizinde temel bir girdi olarak kabul edilmiştir. Şekil 3-d'de sunulan eğim

haritası, 12,5 metre mekânsal çözünürlüğe sahip ALOS PALSAR sayısal yükseklik modeli (SYM) verilerinden üretilmiştir. Harita üzerinde, %30'dan fazla eğime sahip alanlar, rüzgâr türbini kurulumu için teknik ve ekonomik olarak uygunsuz kabul edilerek analiz dışı bırakılmıştır. Eğim değerleri şu şekilde sınıflandırılmıştır: %25-30 aralığı 'çok düşük uygunluk', %20-25 aralığı 'düşük uygunluk', %15-20 aralığı 'orta uygunluk', %10-15 aralığı 'yüksek uygunluk' ve %10'dan düşük eğime sahip alanlar 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, RES kurulumunun fizibilitesini değerlendirmede ve arazi kullanımını optimize etmede önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 2. Araştırmanın Metodolojik İş Akışı

Yola yakınlık: RES alanlarının karayollarına yakınlığı, nakliye, inşaat ve bakım maliyetlerinde ekonomik avantajlar sağlarken (Hosseini Dehshiri & Hosseini Dehshiri, 2022), karayolu genişletme projeleri, görsel etki ve gürültü emisyonu gibi faktörler nedeniyle santralin karayoluna aşırı yakınlığı arzu edilmemektedir (Tercan, 2021; Yıldız, 2024). Bu çalışmada, Şekil 3-e'de sunulan karayoluna yakınlık haritası, altı farklı mesafe aralığına göre sınıflandırılmıştır. Karayoluna olan mesafelerin hesaplanmasında Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılmıştır. Güvenlik ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak, karayoluna 0,1 km'den daha yakın olan alanlar, RES kurulumu için uygunsuz kabul edilmiş ve analiz dışı bırakılmıştır. Haritadan da görülebileceği üzere, karayoluna 4

km'den daha uzak olan alanlar 'çok düşük uygunluk', 3-4 km mesafedeki alanlar 'düşük uygunluk', 2-3 km mesafedeki alanlar 'orta uygunluk', 1-2 km mesafedeki alanlar 'yüksek uygunluk' ve 0,1-1 km arasındaki mesafeler 'çok yüksek uygunluk' olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, RES kurulumunun ekonomik ve çevresel etkilerini dengeli bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Trafo merkezlerine mesafe: RES üretilen elektrik enerjisinin şebekeye entegrasyonu için trafo merkezlerine coğrafi yakınlık, önemli bir kriter olup, proje yatırım maliyetlerini doğrudan etkilemektedir (Yıldız, 2024). Literatürde, RES ile trafo merkezleri arasında güvenlik ve teknik gereklilikler doğrultusunda 0,25 km'lik bir minimum mesafe korunması gerektiği belirtilmektedir (Yıldız, 2024; Yousefi vd., 2024). Bu çalışmada, Şekil 3-f'de sunulan trafo merkezlerine uzaklık haritası, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Haritadaki mesafeler, altı farklı aralığa ayrılarak analiz edilmiştir. Güvenlik protokolleri gereği, trafo merkezine 0,25 km'den daha yakın olan araziler, analiz dışı bırakılmıştır. Trafo merkezine olan mesafeler şu şekilde sınıflandırılmıştır: 20 km'den uzak alanlar 'çok düşük uygunluk', 15-20 km arası 'düşük uygunluk', 10-15 km arası 'orta uygunluk', 5-10 km arası 'yüksek uygunluk' ve 0,25-5 km arası 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, RES'in şebeke bağlantı maliyetlerini optimize etme ve teknik gereklilikleri karşılama amacını taşımaktadır.

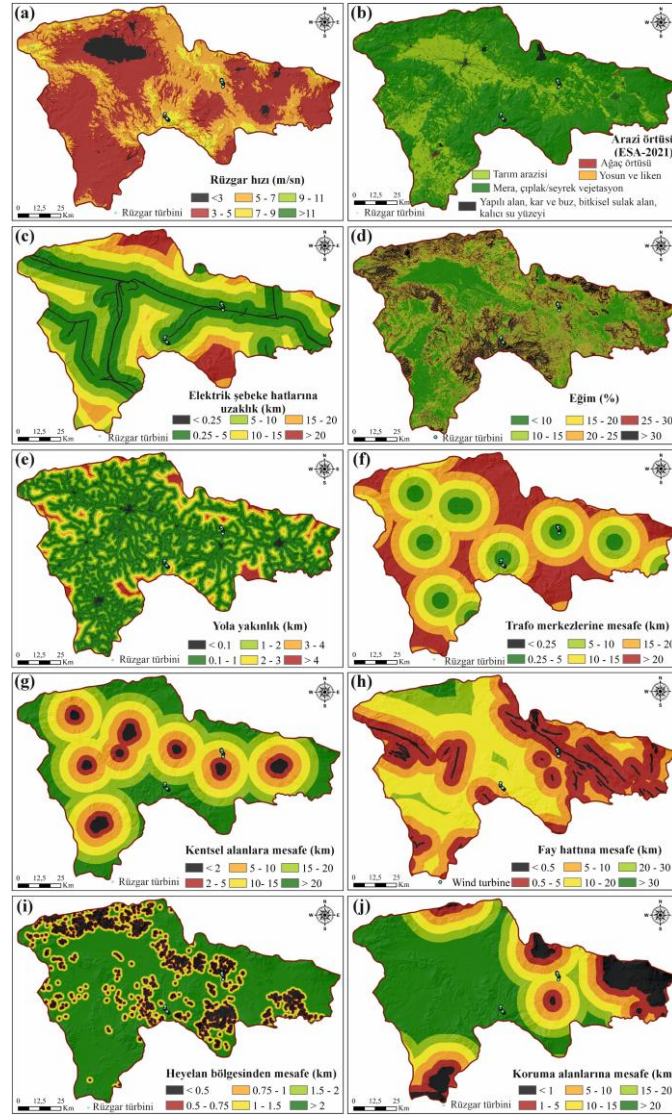
Kentsel alanlara mesafe: RES kentsel alanlara coğrafi yakınlığı, gürültü emisyonu, yerel halkın direnci ve görsel kirlilik gibi sosyoekonomik ve çevresel sorunlara neden olabilmektedir (Tercan, 2021; Yaman, 2024). Bu olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla, RES'lerin kentsel alanlardan belirli bir asgari mesafede konumlandırılması gerekmektedir (Tercan, 2021). Literatürde, kentsel alanlara 2 km'den daha yakın arazilerin RES kurulumu için sınırlandırıldığı ve analiz dışı bırakıldığı görülmektedir (Noorollahi vd., 2016; Ekiz vd., 2021; Rediske vd., 2021; Hosseini Dehshiri & Hosseini Dehshiri, 2022; Yousefi vd., 2024). Ağrı ili için kentsel alanlara uzaklık haritası, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak Şekil 3-g'de sunulduğu gibi oluşturulmuştur. Harita üzerinde, kentsel alanlara 2 km'den daha yakın olan alanlar, güvenlik ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak analiz dışı bırakılmıştır. Kentsel alanlara olan mesafeler şu şekilde sınıflandırılmıştır: 2-5 km arası 'çok düşük uygunluk', 5-10 km arası 'düşük uygunluk', 10-15 km arası 'orta uygunluk', 15-20 km arası 'yüksek uygunluk' ve 20 km'den daha uzak alanlar 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, RES'in sosyoekonomik ve çevresel etkilerini dengelemeyi ve kentsel alanların yaşam kalitesini korumayı amaçlamaktadır.

Fay hattına mesafe: Fay hatlarına coğrafi yakınlık, yapıların sismik aktiviteye maruz kalma riskini ve dolayısıyla hasar görme olasılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, mühendislik projelerinin fay hatlarından mümkün olduğunca uzak konumlandırılması, sismik risk yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir (Barzehkar vd., 2020; Yıldız, 2024). Şekil 3-h'da sunulan Ağrı ili fay hatlarına uzaklık haritası, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Harita üzerinde, fay hatlarına 0,5 km'den daha yakın olan araziler, sismik risk değerlendirmesi sonucunda uygunsuz kabul edilmiş ve analiz dışı bırakılmıştır. Fay hatlarına olan mesafeler şu şekilde sınıflandırılmıştır: 0,5-5 km arası 'çok düşük uygunluk', 5-10 km arası 'düşük uygunluk', 10-20 km arası 'orta uygunluk', 20-30 km arası 'yüksek uygunluk' ve 30 km'den daha uzak alanlar 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, rüzgâr santralının sismik risklere karşı güvenliğini arttırmayı ve proje sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır.

Heyelan bölgesinden mesafe: Heyelan bölgelerine yapılaşma, mühendislik projelerinin yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini ciddi şekilde tehlikeye atarak hasar riskini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu nedenle, projelerin heyelan riski taşıyan arazilerden uzak konumlandırılması, jeolojik risk yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir (Eroğlu, 2021; Bilgili vd., 2024). Şekil 3-i'de sunulan Ağrı ili heyelan uzaklık haritası, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Harita üzerinde, heyelan alanlarına 0,5 km'den daha yakın olan araziler, jeolojik risk değerlendirmesi sonucunda uygunsuz kabul edilerek analiz dışı bırakılmıştır. Heyelan alanlarına olan mesafeler şu şekilde sınıflandırılmıştır: 0,5-0,75 km arası 'çok düşük uygunluk', 0,75-1 km arası 'düşük uygunluk', 1-1,5 km arası 'orta uygunluk', 1,5-2 km arası 'yüksek uygunluk' ve 2 km'den daha uzak alanlar 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, rüzgâr santrali kurulumunun jeolojik risklere karşı güvenliğini en üst düzeye çıkarmayı ve proje sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır.

Koruma alanlarına mesafe: Milli parklar ve diğer koruma altındaki alanlar, RES kurulumu için çevresel ve yasal kısıtlamalar nedeniyle uygun olmayan bölgelerdir (Ajanaku vd., 2021; Tercan, 2021; Bilgili vd., 2024). Çalışma alanında, Ağrı Dağı Milli Parkı, Sarısu Ovası Sulak Alanı ve Doğubeyazıt Sazlık Alanı gibi çeşitli koruma bölgeleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, milli parklar, sulak alanlar, yaban hayatı geliştirme bölgeleri ve Ramsar alanları gibi koruma statüsündeki alanlar, RES kurulumu için uygunsuz kabul edilerek analiz kapsamı dışına çıkarılmıştır. Şekil

3-j'de sunulan koruma alanlarına uzaklık haritası, Öklid mesafe analizi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Haritada görülebileceği üzere, koruma alanlarına 1 km'den daha yakın olan araziler, çevresel hassasiyet ve yasal düzenlemeler gereği analiz dışı bırakılmıştır. Koruma alanlarına olan mesafeler şu şekilde sınıflandırılmıştır: 1-5 km arası 'çok düşük uygunluk', 5-10 km arası 'düşük uygunluk', 10-15 km arası 'orta uygunluk', 15-20 km arası 'yüksek uygunluk' ve 20 km'den daha uzak alanlar 'çok yüksek uygunluk'. Bu sınıflandırma, RES kurulumunun biyoçeşitlilik üzerindeki potansiyel etkilerini en aza indirmeyi ve koruma altındaki alanların ekolojik bütünlüğünü korumayı amaçlamaktadır.



Şekil 3. Değerlendirme Kriterlerinin Tematik Haritalar: (a) Rüzgâr Hızı, (b) Arazi Örtüsü, (c) Elektrik Şebeke Hatlarına Uzaklık, (d) Eğim, (e) Yola Yakınlık, (f) Trafo Merkezlerine Mesafe, (g) Kentsel Alanlara Mesafe, (h) Fay Hattına Mesafe, (i) Heyelan Bölgesinden Mesafe, (j) Koruma Alanlarına Mesafe. Renkler Beş Uygunluk Düzeyini; Siyah Alanlar Sınırlanmış Bölgeleri Temsil Etmektedir (bkz. lejant)

Dışlama Kriterleri

Çalışma alanında RES kurulumu için değerlendirme kriterlerine ek olarak, bir dizi kısıtlayıcı kriter de uygulanmıştır. Bu kısıtlayıcı kriterlerin temel amacı, teknik, yasal veya sosyoekonomik nedenlerle RES kurulumu için uygun olmayan alanları analiz dışı bırakmaktır. Her bir kısıtlayıcı veri için öncelikle tampon bölgeler oluşturulmuş ve bu bölgeler mekânsal olarak birleştirilerek tek bir kısıtlayıcı katman elde edilmiştir. Elde edilen bu kısıtlayıcı katman, arazi uygunluk haritasından dışlama analizi yöntemiyle çıkarılmıştır. Uygulanan kısıtlayıcı kriterler şunlardır:

- Nehirler ve iç su kütlelerine 500 metreden daha yakın araziler,
- Doğalgaz boru hatlarına 500 metre mesafedeki alanlar,

- Havaalanlarına 3 kilometreden daha yakın araziler,
- Askeri tesislere 500 metreden daha yakın alanlar,
- Kırsal yerleşim yerlerine 500 metreden daha yakın araziler,
- Yaban hayatı koruma alanlarına 2,5 kilometreden daha yakın alanlar,
- Turizm koruma alanlarına 500 metreden daha yakın alanlar.

Belirtilen kısıtlayıcı kriterleri karşılayan araziler, RES kurulumu için uygunsuz olarak değerlendirilmiş ve analiz sürecinden çıkarılmıştır. Bu yaklaşım, RES projelerinin güvenliğini, çevresel uyumluluğunu ve sosyoekonomik kabul edilebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır

Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklandırılması: AHP Yöntemi

Thomas L. Saaty tarafından 1977 yılında geliştirilen AHP, karmaşık ÇKKV problemlerinin çözümünde yapılandırılmış bir analitik çerçeve sunan köklü bir metodolojidir (Saaty, 1977). AHP, karar vericilerin çok sayıda ve genellikle çelişen kriterleri dikkate alarak rasyonel kararlar almasına olanak tanır (Saaty, 1980). Bu nedenle, RES yer seçimi gibi karmaşık karar verme süreçlerini içeren çeşitli sektörlerde yaygın olarak uygulanmaktadır (Koc vd., 2019; Moradi vd., 2020; Ajanaku vd., 2021; Ifkirne vd., 2022; Yousefi vd., 2022; Benti vd., 2023; Yaman, 2024; Yıldız, 2024). Yöntemin literatürde yaygın bir şekilde kullanılması ve etkin sonuçlar üretmesinden ötürü bu araştırmada da AHP metodu kullanılmıştır.

AHP, karar verme problemini hiyerarşik bir yapıda organize ederek, karar vericilerin problem üzerinde daha sistematik bir şekilde düşüncelerini sağlar (Mercan & Acibuca 2023; Moslem, 2024). Hiyerarşinin en üst seviyesinde genel hedef, orta seviyede ana kriterler ve en alt seviyede ise alt kriterler yer alır. Karar vericiler, her bir hiyerarşik seviyedeki elemanları ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendirirler (Mercan, 2025). Bu karşılaştırmalar, karar vericilerin kriterlerin göreceli önemine ilişkin yargılarını sayısal değerlere dönüştürmelerini sağlar. İkili karşılaştırmalar, her bir kriter çifti için bir karşılaştırma matrisi oluşturulmasını sağlar. Bir karşılaştırma matrisinde n eleman için $n(n-1)/2$ adet ikili karşılaştırma yapılması gerekmektedir. AHP yöntemi temelde altı aşamadan oluşmaktadır (Saaty, 1977; Saaty, 1980):

Adım 1. Kriterlerin ve alternatiflerin değerlendirilmesinde, uzman görüşleri ve kapsamlı literatür taramalarıyla desteklenen ikili karşılaştırmalar (Formül 1) kullanılmaktadır. Thomas L. Saaty'nin 1977 tarihli çerçevesine dayanan bu karşılaştırmalar, kriterlerin veya alternatiflerin göreceli önemini sayısal bir ölçekte ifade etmek amacıyla 1 (eşit önem) ile 9 (aşırı derecede önemli) arasında değerler atamaktadır (Saaty, 1977; Saaty, 1980). Bu ölçek, karar vericilerin kriterler arasındaki öncelik farklarını sistematik ve tutarlı bir şekilde değerlendirmelerine olanak tanımaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. İkinci adımda, her bir karşılaştırma matrisinin elemanları, sütun toplamalarına bölünerek normalleştirilir (Formül 2). Bu normalleştirme işlemi, her bir sütunun toplamının 1'e eşitlenmesini sağlayarak, matrisin tutarlılığını ve karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır. Bu süreç, kriterlerin veya alternatiflerin göreceli ağırlıklarının daha doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak tanır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Adım 3. Üçüncü adımda, her bir kriterin önem ağırlıkları, normalleştirilmiş matrisin her bir satır toplamının matris boyutuna bölünmesiyle elde edilir (Formül 3). Bu işlem, öncelik vektörünü oluşturarak her bir kriterin göreceli önemini sayısal olarak ifade eder. Elde edilen öncelik vektörü, karar verme sürecinde kriterlerin ağırlıklandırılmasında temel bir girdi olarak kullanılır.

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Adım 4. Dördüncü adımda, A matrisi ile W sütun matrisinin çarpımı gerçekleştirilerek C matrisinin değerleri elde edilir (Formül 4). Bu matris çarpımı, kriterlerin ağırlıklandırılmış değerlerini hesaplayarak, karar verme sürecinde tutarlılık ve bütünlük sağlar. C matrisi, kriterlerin göreceli önemini ve alternatiflerin performansını bir arada değerlendirmek için kullanılır.

$$C = A \times W \quad (4)$$

Adım 5. Beşinci adımda, A matrisindeki ikili karşılaştırmaların tutarlılığını değerlendirmek amacıyla, kriter sayısını ve λ_{max} (en büyük özdeğer) değerini kullanarak Tutarlılık İndeksi (CI) hesaplanması kritik öneme sahiptir (Formül 5). CI, karar vericinin ikili karşılaştırmalardaki tutarlılık düzeyini sayısal olarak ifade eder ve karar verme sürecinin güvenilirliğini değerlendirmek için temel bir ölçüttür.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Adım 6. Son adımda, ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılığını değerlendirmek için, literatürde n boyutlu karşılaştırma matrisleri için tanımlanmış olan Rastgele İndeks (RI) değerinin bilinmesi gerekmektedir (Saaty, 1980). Ardından, Formül 6 kullanılarak Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanır. CR değeri 0,10'dan küçük olduğunda, karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu kabul edilir. Bu tutarlılık kontrolü, karar vericinin yargularının mantıksal bütünlüğünü ve AHP analizinin güvenilirliğini sağlamak için gereken kritik bir adımdır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Tablo 4, bu çalışmada RES yer seçimi için değerlendirilen kriterlerin ikili karşılaştırma matrisini, tutarlılık analizine ilişkin Tutarlılık İndeksi (CI), en büyük özdeğer (λ_{max}) ve Tutarlılık Oranı (CR) değerlerini, ayrıca her bir kriterin göreceli önemini yansıtan ağırlıklarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Bu tablo, AHP analizinin temel çıktılarını özetleyerek, karar verme sürecinde kullanılan kriterlerin tutarlılığını ve önem derecelerini değerlendirme imkanı sunmaktadır.

Uygunluk Haritasının Oluşturulması

AHP ile ağırlıklandırılmış kriterlerin ArcGIS yazılımının ağırlıklı örtüşüm (weighted overlay) modülü (Formül 7) aracılığıyla entegrasyonu, RES kurulumu için uygunluk haritasının oluşturulmasını sağlamıştır. Bu harita, kısıtlayıcı faktörlerin dışlama analizi ile değerlendirilmesinin ardından nihai haritalara dönüştürülmüştür (Şekil 4). Bu süreç, çok kriterli karar analizinin mekânsal sonuçlarını, kısıtlayıcı faktörlerin etkisini de dikkate alarak optimize etmeyi amaçlamaktadır.

$$RUI_i = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad (7)$$

Denklemden, RUI_i , i pikseli için RES uygunluk indeksini temsil ederken, n, değerlendirme kriterlerinin sayısını ifade etmektedir. W_j , j kriterinin göreceli önem ağırlığını, X_{ij} ise i hücrenin j kriteri için standartlaştırılmış puanını göstermektedir (Malczewski, 1999). Bu denklem, yapılan arazi uygunluk değerlendirmesindeki, her bir pikselin RES kurulumu için uygunluk düzeyini, kriterlerin ağırlıklandırılmış puanlarına göre hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Değerlendirme Kriterleri

Bu çalışmada, RES kurulumu için gerekli görülen değerlendirme kriterinin RES kurulumu açısından uygunluklarının ilçelere göre dağılımı aşağıdaki gibidir:

- **Rüzgâr Hızı:** Ağrı ilinin ilçeleri arasında ortalama rüzgâr hızı, yüksekten alçağa doğru şu şekilde sıralanmaktadır: Taşlıçay (6,11 m/sn), Diyadin (5,53 m/sn), Hamur (5,18 m/sn), Eleşkirt (4,94 m/sn), Doğubayazıt (4,78 m/sn), Tutak (4,58 m/sn), Merkez (4,46 m/sn) ve Patnos (3,97 m/sn). İl genelinde rüzgâr hızı 2,31 m/sn ile 13,46 m/sn arasında değişim göstermektedir.

- **Elektrik Şebeke Hatlarına Uzaklık:** Çalışma alanında elektrik şebeke hatlarına uzaklık kriteri açısından en elverişli ilçe Taşlıçay iken, bunu sırasıyla Tutak, Doğubayazıt, Eleşkirt, Patnos, Hamur, Merkez ve Diyardin ilçeleri takip etmektedir.
- **Eğim:** Ağrı ilindeki ortalama eğim değeri %18,86'dır. RES kurulumu için eğim açısından en elverişli ilçe Patnos (%14,93) iken, bunu sırasıyla Merkez (%15,83), Tutak (%15,93), Doğubayazıt (%19,08), Taşlıçay (%20,41), Diyardin (%21,59), Eleşkirt (%22,57) ve Hamur (%23,93) ilçeleri izlemektedir.
- **Yola Yakınlık:** Ağrı ilinde RES kurulumu için yola yakınlık kriteri açısından en elverişli ilçe Hamur iken, bunu sırasıyla Diyardin, Patnos, Merkez, Taşlıçay, Tutak, Eleşkirt ve Doğubayazıt ilçeleri takip etmektedir.
- **Trafo Merkezlerine Mesafe:** Trafo merkezlerine mesafe açısından Ağrı ilindeki en elverişli ilçe Eleşkirt iken, bunu sırasıyla Patnos, Tutak, Doğubayazıt, Taşlıçay, Hamur, Diyardin ve Merkez ilçeleri takip etmektedir.
- **Kentsel Alanlara Mesafe:** Kentsel alanlara mesafe kriteri açısından RES kurulumuna en elverişli ilçe Hamur iken, bunu sırasıyla Diyardin, Doğubayazıt, Merkez, Eleşkirt, Tutak, Taşlıçay ve Patnos ilçeleri takip etmektedir.
- **Fay Hattına Mesafe:** Fay hattına mesafe açısından RES kurulumu için en elverişli ilçe Eleşkirt iken, bunu sırasıyla Merkez, Patnos, Taşlıçay, Tutak, Diyardin, Hamur ve Doğubayazıt ilçeleri takip etmektedir.
- **Heyelan Bölgesinden Mesafe:** Heyelan bölgesinden mesafe açısından RES kurulumu için en elverişli ilçe Patnos iken, bunu sırasıyla Doğubayazıt, Tutak, Merkez, Eleşkirt, Hamur, Taşlıçay ve Diyardin ilçeleri takip etmektedir.
- **Koruma Alanlarına Mesafe:** Koruma alanlarına mesafe açısından RES kurulumu için en elverişli ilçe Tutak iken bunu sırasıyla Hamur, Eleşkirt, Merkez, Taşlıçay, Diyardin, Patnos ve Doğubayazıt ilçeleri takip etmektedir.

Tablo 4. AHP Çiftler Arası Karşılaştırma Matrisi

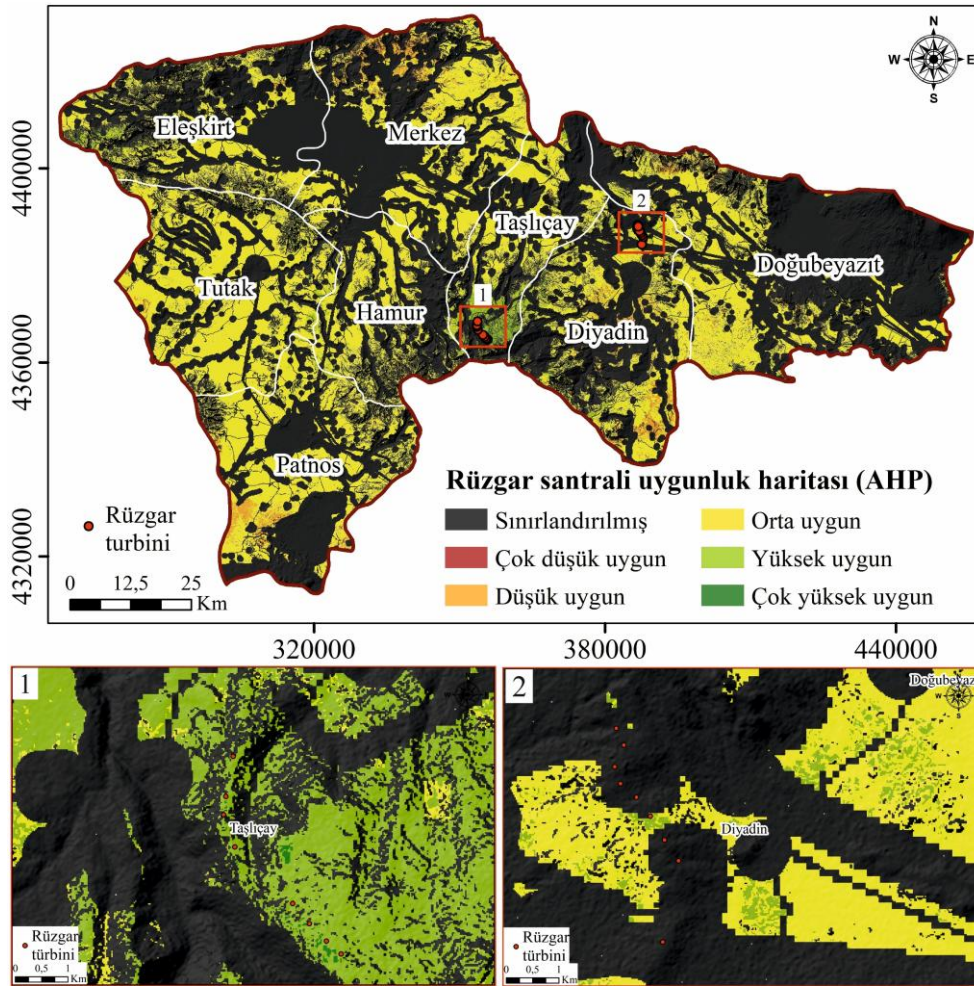
Kriter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ağırlık
Rüzgâr hızı (1)	1	3	4	4	5	7	8	9	9	9	0,3587
Arazi örtüsü (2)	1/3	1	1	2	2	2	3	4	5	6	0,1398
Elekt. hattına uzaklık. (3)	1/4	1	1	1	2	3	3	4	4	5	0,1283
Eğim (4)	1/4	1/2	1	1	1	2	2	3	4	4	0,0974
Yola yakınlık (5)	1/5	1/2	1/2	1	1	2	2	2	3	4	0,0829
Trafo mesafe (6)	1/7	1/2	1/3	1/2	1/2	1	2	2	3	3	0,0617
Kentsel alan. mesafe (7)	1/8	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	2	2	0,0430
Fay hattına mesafe (8)	1/9	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	0,0358
Heyelan böl. mesafe (9)	1/9	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1	1	2	0,0298
Koruma al. mesafe (10)	1/9	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1/2	1	0,0226

Skala: 1-Eşit önem, 3-Orta önem, 5-Güçlü önem, 7-Çok güçlü önem, 9-Aşırı önem, 2,4,6 ve 8-Orta önem (Saaty, 1977; 1980). Maksimum özdeğer (λ_{max}) = 10,217, n=10, Tutarlılık İndeksi (CI) = $(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ = 0,0242572, Rastgele İndeks (RI) = 1,49, Tutarlılık oranı (CR) = (CI/RI) = 0,01628

Bu dağılımlar, her bir ilçenin RES kurulumu için farklı kriterler açısından potansiyelini ortaya koymaktadır. Literatürde RES kurulumu için arazi uygunluk değerlendirmesi yapan araştırmalarda, bu çalışmada kullanılanlara benzer kriterlerin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. İran'ın İsfahan kentinde gerçekleştirilen bir çalışmada, AHP yöntemi kullanılarak güneş ve rüzgâr santralleri için hibrit bir arazi uygunluk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu, nehirlerle uzaklık, sel riski, fay hatlarına uzaklık, jeolojik formasyonlar, sulak alanlara ve koruma alanlarına uzaklık, nüfus merkezlerine uzaklık, yollara uzaklık, enerji iletim hatlarına uzaklık ve arazi kullanım/örtüsü kriterleri değerlendirilmiştir (Barzehkar vd., 2020). Suudi Arabistan'da yürütülen benzer bir araştırmada, RES kurulumu için arazi uygunluğunun değerlendirilmesinde AHP yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada ana kriter olarak rüzgâr hızı, karayollarına, otoyollara ve ulusal şebekeye olan mesafe, havaalanlarına yakınlık ve yerleşim bölgelerinden uzaklık ele alınmıştır (Baseer vd., 2017). Türkiye'de gerçekleştirilen bir çalışmada ise, makine öğrenmesi yaklaşımlarıyla RES için yer seçimi yapılmış ve rüzgâr hızı, yükselti, eğim, fay hatlarına uzaklık, heyelan bölgelerine uzaklık, kuş göç yollarına uzaklık, iletim hatlarına uzaklık, ana yollara uzaklık, koruma

bölgelerine uzaklık, su kütlelerine uzaklık, yerleşim yerlerine uzaklık ve havaalanlarına uzaklık kriterleri değerlendirilmiştir (Bilgili vd., 2024).

Bu çalışmada, literatürde dikkate alınan kuş göç yolları kriteri, bölgenin kuş göç rotasında yer almaması nedeniyle (Birdmap, 2025) göz önünde bulundurulmamıştır. Yerel kuş türleri ve diğer canlıların mekânsal dağılımına ilişkin veri yetersizliği, çalışmada bu verilerin değerlendirilememesine ve dolayısıyla çalışmanın temel kısıtlarından birini teşkil etmiştir. Havaalanlarına mesafe ise bazı çalışmalarda değerlendirme kriteri olarak kullanılırken (Yaman, 2024), bu çalışmada 3000 metre mesafe sınırlandırılarak kısıtlayıcı bir faktör olarak ele alınmıştır. Literatürde, özellikle İran bölgesindeki bazı araştırmalarda, rüzgâr enerjisi santrallerinin kentsel alanlara yakın olmasının önemi vurgulanırken (Moradi vd., 2020; Hosseini Dehshiri & Hosseini Dehshiri, 2022), bu çalışmada, rüzgâr enerjisi santrallerinin yerleşim alanlarından uzak konumlandırılmasının çevresel etkileri azaltacağı ve yerel halkın direncini azaltabileceği düşünülerek (Tercan, 2021; Yaman, 2024) araştırma bu yönde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. AHP ile Oluşturulan Rüzgâr Santrali Arazi Uygunluk Haritası ve Mevcut Santrallerin Konumu. Renkler Beş Uygunluk Düzeyini; Siyah Alanlar Sınırlandırılmış Bölgeleri Temsil Etmektedir (bkz. lejant)

AHP

Bu çalışmada, RES kurulumu için kullanılan kriterlerin göreceli önem ağırlıkları, AHP yöntemiyle hesaplanmıştır (Tablo 4). AHP yönteminin, çok sayıda ikili karşılaştırma içermesi nedeniyle, değerlendirmenin tutarlılığının kontrol edilmesi gerekir (Saaty, 1980). Bu çalışmada, tutarlılık oranı (CR) 0,01628 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Elde edilen CR değerinin 0,1'den küçük olması, ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğunu ve güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Mercan, 2023).

İkili karşılaştırmalar sonucunda hesaplanan kriterlerin ağırlıkları, yüksekte düşüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır: rüzgâr hızı (%36), arazi örtüsü (%14), enerji şebeke hatlarına uzaklık (%13), eğim (%10), yola yakınlık (%8), trafo merkezlerine mesafe (%6), kentsel alanlara mesafe (%4), fay hatlarına mesafe (%4), heyelan bölgesinden mesafe (%3) ve koruma alanlarına mesafe (%2). Bu ağırlık değerleri arasında en yüksek ağırlığa sahip olan rüzgâr hızı kriteri,

literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da en yüksek önceliği almıştır. Örneğin, Adana ve Balıkesir şehirlerinde (Türkiye) yapılan iki ayrı araştırmada, RES için arazi uygunluk analizleri AHP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve rüzgâr hızı her iki çalışmada da en yüksek ağırlığı almıştır (sırasıyla %27,2 ve %40,8) (Yaman, 2024; Yıldız, 2024). Bu sonuçlar, rüzgâr enerjisi santrali yer seçiminde rüzgâr hızının kritik bir faktör olduğunu göstermektedir.

Uygunluk Haritası ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Ağrı ilinin rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen arazi uygunluk analizleri, il genelinde RES kurulumu için uygun alanların dağılımını ortaya koymaktadır. Tablo 5'de sunulan veriler, ilçelere göre sınırlandırılmış ve uygunluk sınıflarına ayrılmış arazilerin dağılımını göstermektedir.

Ağrı ilinin %66,3'ü, teknik, hukuki veya sosyal kısıtlamalar nedeniyle RES kurulumu için uygun olmayan sınırlandırılmış arazilerden oluşmaktadır. Kalan %33,7'lik alan ise farklı uygunluk sınıflarına sahip arazilerden meydana gelmektedir. İlçe bazlı uygunluk sınıfları ise şu şekildedir:

- **Tutak:** İlçenin %48,53'ü sınırlandırılmış arazilerden oluşurken, %0,39'u düşük, %50,40'ı orta ve %0,68'i yüksek uygunluk sınıfına girmektedir.
- **Patnos:** İlçede sınırlandırılmış arazilerin oranı %57,15'tir. Düşük uygunluk %3,43, orta uygunluk %39,20 ve yüksek uygunluk %0,22 olarak belirlenmiştir.
- **Eleşkirt:** İlçenin %75,75'i sınırlandırılmış arazilerden oluşmaktadır. Heyelan alanlarının fazla oluşu ve rüzgâr hızının düşük olduğu yerlerin varlığından ötürü sınırlandırılmış alanların miktarı yüksektir. Düşük uygunluk %0,32, orta uygunluk %22,69 ve yüksek uygunluk oranı ise %1,24'tür.
- **Merkez:** İlçenin %68,96'sı sınırlandırılmış, %2,94'ü düşük, %28,06'sı orta ve %0,05'i yüksek uygunluk sınıfındadır.
- **Hamur:** İlçede sınırlandırılmış arazilerin oranı %67,56'dır. Düşük uygunluk %0,36, orta uygunluk %30,94 ve yüksek uygunluk %1,14 olarak belirlenmiştir.
- **Taşlıçay:** İlçenin %66,17'si sınırlandırılmış arazilerden oluşurken, %0,07'si düşük, %25,29'u orta, %8,45'i yüksek ve %0,02'si çok yüksek uygunluk sınıfındadır. Ağrı ilinde çok yüksek uygunluk sınıfına sahip araziler yalnızca bu ilçede bulunmaktadır.
- **Diyadin:** İlçenin %66,71'i sınırlandırılmış, %4,52'si düşük, %27,34'ü orta ve %1,43'ü yüksek uygunluk sınıfındadır.
- **Doğubayazıt:** İlçenin %75,06'sı sınırlandırılmış arazilerden oluşmaktadır. Düşük uygunluk %0,81, orta uygunluk %23,92 ve yüksek uygunluk %0,21'dir. İlçede sınırlandırılmış arazilerin yüksek oranda olması, Ağrı Dağı Milli Parkı ve Doğubayazıt Sazlık Alanı gibi önemli koruma alanlarının varlığına bağlanmaktadır.

Ağrı ilinde RES kurulumu için uygun alanların dağılımı, ilçeler arasında farklılık göstermektedir. Sınırlandırılmış arazilerin yüksek oranda olması, RES potansiyelinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Özellikle koruma alanlarının yoğunlaştığı ilçelerde, RES projelerinin geliştirilmesi sürecinde çevresel hassasiyetin ön planda tutulması gerekmektedir. Taşlıçay ilçesinde çok yüksek uygunluk sınıfına sahip arazilerin bulunması, bu ilçenin RES yatırımları için öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ağrı ilinde, Taşlıçay ilçesinin güney kesimi ile Diyadin ilçesinin kuzey kesiminde iki ayrı rüzgâr enerjisi santrali (RES) bulunmaktadır. Bu santrallerin mekânsal konumları, oluşturulan arazi uygunluk haritası ile karşılaştırılarak uyumlulukları analiz edilmiştir (Şekil 4).

Taşlıçay RES: Taşlıçay ilçesindeki RES, sekiz rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Arazi uygunluk haritasına göre, bu türbinlerin dört tanesi "çok yüksek uygun" olarak tanımlanan arazi sınıfında, diğer dört tanesi ise "yüksek uygun" sınıfında konumlanmıştır. Bu durum, Taşlıçay bölgesindeki rüzgâr türbinlerinin mekânsal konumunun, oluşturulan arazi uygunluk haritası ile yüksek düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir.

Diyadin RES: Diyadin ilçesinde bulunan RES, dokuz adet rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Ancak, bu türbinlerin arazi uygunluk analizleri incelendiğinde, yalnızca bir tanesinin "yüksek uygun" olarak sınıflandırılan arazi uygunluk kategorisinde yer aldığı, diğer türbinlerin ise "sınırlandırılmış" arazilerde konumlandığı tespit edilmiştir. Sınırlandırılmış arazilerin temel nedeni, bölgenin jeolojik açıdan yüksek heyelan riski taşıması ve aktif fay hatlarına yakınlığıdır.

Tablo 5. AHP Yöntemi Kullanılarak İlçe Başına Uygunluk Sınıfı Alanları (Hektar)

AHP	Sınırlandırılmış	Çok düşük uygun	Düşük uygun	Orta uygun	Yüksek uygun	Çok yüksek uygun	Σ
Tutak	68192,69		554,81	70822,25	954,06		140523,81
Patnos	79543,50		4768,69	54552,63	309,50		139174,31
Eleşkirt	98569,13		414,81	29520,94	1612,56		130117,44
Merkez	116664,06	0,13	4967,38	47471,19	85,38		169188,13
Hamur	59022,00		313,75	27032,75	995,50		87364,00
Taşlıçay	54430,63		61,56	20801,13	6948,19	16,63	82258,13
Diyadin	90020,69		6101,69	36887,50	1926,25		134936,13
Doğubeyazıt	168282,13		1823,56	53630,31	468,88		224204,88
Σ	734724,81	0,13	19006,25	340718,69	13300,31	16,63	1107766,81

Jeolojik risk alt kriterleri (fay hattına mesafe, heyelan bölgesinden mesafe) temelinde yapılan tematik analiz sonucunda, Diyadin RES sahasındaki dokuz türbinin tamamının fay hattına mesafe kriterinde 1 puan (0,5–5 km aralığı – çok düşük uygunluk) sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. Heyelan bölgelerine mesafe kriterine göre ise sekiz türbin 0 puan (sınırlandırılmış alan), bir türbin ise 1 puan (çok düşük uygunluk) değerindedir. Bu bulgular, Şekil 3-h ve Şekil 3-i’de sunulan tematik haritalardaki uygunluk dağılımıyla birebir örtüşmekte olup, Diyadin bölgesinin jeolojik risk açısından çok düşük uygunluk (1) ve sınırlandırılmış alanlar (0) düzeyinde bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, sahadaki mevcut türbin konumlarının jeoteknik açıdan riskli alanlarda yer aldığını ve uygunluk analizinde tespit edilen kısıtlamalarla örtüştüğünü doğrulamaktadır.

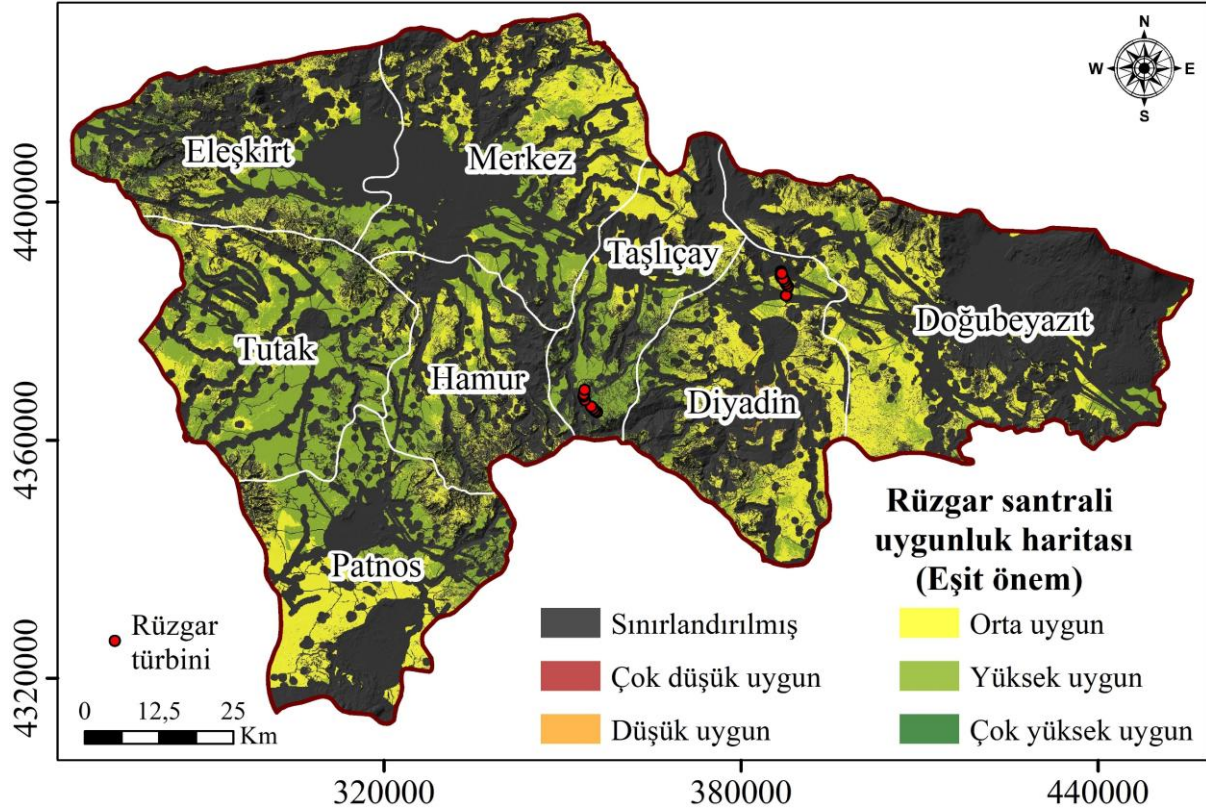
Diyadin RES’in yakınında bulunan ana fay zonu, Balık Gölü fay zonu olarak adlandırılmaktadır. Bu fay zonunun Yeniçadır Segmenti üzerinde yapılan jeolojik ölçümler, kayma hızlarının $0,9 \pm 0,04$ mm/yıl ile $3,22 \pm 0,16$ mm/yıl arasında değiştiğini göstermektedir (Mutlu, 2022). Bu veriler, bölgenin aktif tektonik hareketlere maruz kaldığını ve dolayısıyla yüksek sismik risk taşıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, yapılan jeolojik araştırmalar, bu fay segmentinde tarihsel süreçte M.S. 363 Arshakavan depremi ve M.S. 1679 Ararat depremi gibi önemli depremlerin meydana geldiğini belgelemektedir (Mutlu, 2022). Bu bulgular, bölgenin geçmişte depremlere maruz kaldığını ve gelecekte de benzer sismik olayların yaşanma olasılığının yüksek olduğunu doğrulamaktadır (Mutlu, 2025). Mutlu (2022), tarafından gerçekleştirilen çalışma, Diyadin RES bölgesindeki jeolojik riskin belirgin bir şekilde yüksek olduğunu ve bu durumun santralin güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından bir tehdit oluşturabileceğini vurgulamaktadır. Aktif fay zonu, yüksek sismik aktivite ve heyelan riski, bu bölgede enerji yatırımlarının planlanması sırasında dikkate alınması gereken kritik faktörlerdir.

Öte yandan, Taşlıçay RES’in arazi uygunluk haritası ile yüksek düzeyde uyumlu olması ve bu ilçedeki uygun arazilerin varlığı, bu bölgenin rüzgâr enerjisi yatırımları için daha elverişli olduğunu göstermektedir. Ancak, Diyadin RES’in jeolojik riskler nedeniyle uyumsuz bir konumda bulunması, rüzgâr enerjisi santrallerinin yer seçimi sürecinde jeolojik faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yenilenebilir enerji yatırımlarının sürdürülebilirliği ve güvenliği açısından jeolojik risk analizlerinin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

Duyarlılık Analizi

ÇKKV yöntemleri kullanılarak belirlenen kriter ağırlıklarının duyarlılığını değerlendirmek ve elde edilen sonuçların geçerliliğini test etmek amacıyla, bu çalışmada duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde, kriter ağırlıklarının duyarlılığını incelemek için çeşitli yaklaşımlar benimsenmiştir. Birçok çalışmada tüm kriterlere eşit ağırlıklar atanarak duyarlılık analizi yapılmıştır (Nekhay vd., 2009; Tegou vd., 2010; Moradi vd., 2020; Yıldız, 2024). Bu çalışmada da kriter ağırlıklarının modele etkisini anlamak amacıyla tüm kriterlere eşit ağırlık (%10) atanarak duyarlılık analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları, Tablo 6’da AHP yöntemi ile elde edilen ağırlıklar ve eşit ağırlıklandırma sonucu ortaya çıkan sonuçların karşılaştırılması şeklinde sunulmuştur. Ayrıca, duyarlılık analizi sonucunda üretilen arazi uygunluk haritası Şekil 5’de gösterilmektedir.

Eşit ağırlıklandırma yaklaşımına dayalı olarak yapılan analizler, modelin kriter ağırlıklarındaki değişimlere karşı oldukça duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Duyarlılık analizi sonuçları, AHP yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, özellikle "çok düşük uygunluk", "düşük uygunluk" ve "orta uygunluk" sınıflarında belirgin azalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, "yüksek uygunluk" ve "çok yüksek uygunluk" sınıflarına ait arazilerin miktarında önemli ölçüde artış tespit edilmiştir. Bu bulgular, kriter ağırlıklarının eşit olarak atanması durumunda, RES projeleri için uygun olarak sınıflandırılabilir arazi alanlarının genişlediğini, ancak düşük uygunluk seviyesindeki arazilerin miktarının azaldığını göstermektedir (Tablo 6). Lesvos adasında (Yunanistan), rüzgâr santralleri için arazi uygunluğu üzerine yapılan bir araştırmada, çalışmanın bulguları duyarlılık analizi ile değerlendirilmiş ve benzer şekilde oluşturulan modelin kriterlerin ağırlıklarındaki değişimlere karşı hassas olduğu belirlenmiştir (Tegou vd., 2010).



Şekil 5. Eşit Kriter Ağırlıkları ile Oluşturulan Rüzgâr Santrali Arazi Uygunluk Haritası. Renkler Beş Uygunluk Düzeyini; Siyah Alanlar Sınırlandırılmış Bölgeleri Temsil Etmektedir (bkz. lejant)

Sonuç olarak, bu analizler, kriter ağırlıklarının belirlenmesinin arazi uygunluk değerlendirmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve modelin bu tür değişikliklere karşı hassas olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, RES projeleri için arazi seçimi sürecinde kriter ağırlıklarının dikkatlice belirlenmesi gerektiğini ve farklı ağırlıklandırma stratejilerinin sonuçlar üzerinde önemli farklılıklar yaratabileceğini vurgulamaktadır. Duyarlılık analizi, bu tür karar destek sistemlerinin güvenilirliğini artırmak ve sonuçların tutarlılığını sağlamak açısından kritik bir adım olarak değerlendirilebilir.

Tablo 6. AHP ve Eşit Ağırlık Değerlerine Göre Oluşturulan Duyarlılık Analizinde Uygunluk Sınıflarının Alanları (Hektar)

Uygunluk sınıfları	Eşit Ağırlık	%	AHP ağırlığı	%
Sınırlandırılmış	734724,81	66,32	734724,81	66,32
Çok düşük uygun	-	0,00	0,13	0,00
Düşük uygun	1556,96	0,14	19006,25	1,72
Orta uygun	208915,45	18,86	340718,69	30,76
Yüksek uygun	162363,08	14,66	13300,31	1,20
Çok yüksek uygun	206,51	0,02	16,63	0,00

Karar Vericilere Yönelik Öneriler ve Çalışmanın Sınırlamaları

Bu çalışma kapsamında üretilen arazi uygunluk haritası, Ağrı ilindeki rüzgâr enerjisi potansiyelinin en verimli şekilde değerlendirilebileceği bölgeleri sistematik olarak ortaya koymaktadır (Şekil 4). Analizler, özellikle Taşlıçay ve Tutak ilçelerinin yüksek enerji üretim kapasitesi ve teknik uygunluk açısından öne çıktığını göstermektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, EPDK gibi kamu kurumları ile özel sektör yatırımcılarının, bu bölgelerde detaylı jeoteknik etütler, mikrobölgeleme çalışmaları, detaylı jeolojik etütler ve ekonomik fizibilite çalışmaları yaparak yatırım süreçlerini hızlandırmaları önerilmektedir. Yapılan bu araştırmaya, mikrobölgeleme verileri ve zemin sınıfları gibi ayrıntılı jeoteknik bilgilerin dâhil edilememiş olması önemli bir sınırlılıktır.

Bu çalışmada dikkat çeken bulgulardan biri mevcut rüzgâr enerjisi santrallerinin bazılarının deprem riski taşıyan ya da erozyon eğilimli alanlarda konumlanmış olmasıdır. Bu santrallerin performans ve güvenlik açısından yeniden değerlendirilmesi, olası risklerin önlenmesi bakımından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, milli parklar, sulak alanlar veya biyolojik çeşitlilik açısından hassas bölgelerin yakınında yeni RES projelerinin planlanmaması hem yasal düzenlemeler hem de çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri açısından dikkate alınmalıdır. Çalışmada yerel biyoçeşitlilik verilerinin kullanılmamış olması da bir diğer sınırlılık olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan CBS tabanlı çok kriterli analiz yöntemi, yerel parametrelerin entegrasyonu ile Ağrı ili dışındaki, diğer bölgelerin rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmede de etkin bir model sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, mekânsal analiz teknikleriyle Ağrı'da RES yer seçimi sürecini değerlendirmiştir. Uzman görüşleri ve literatür taramasıyla sentezlenen karar destek sistemi, RES yer seçimini etkileyen çok boyutlu faktörlerin sistematik bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır. Çalışmada, RES yer seçimini etkileyen on değerlendirme kriteri (rüzgâr hızı, arazi örtüsü, enerji iletim hatlarına uzaklık, eğim, yol ağlarına uzaklık, kentsel alanlara uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, korunan alanlara uzaklık, fay hatlarına ve heyelan bölgelerine uzaklık) ve yedi kısıtlayıcı faktör belirlenmiştir. AHP yöntemi kullanılarak kriterlerin göreceli önemi hesaplanmış ve rüzgâr hızının en yüksek ağırlığa sahip kriter olduğu tespit edilmiştir. CBS tabanlı analizler, belirlenen kriterleri mekânsal olarak birleştirerek çalışma alanını beş uygunluk kategorisine sınıflandırmıştır: çok yüksek uygun, yüksek uygun, orta uygun, düşük uygun ve çok düşük uygun. Bunun dışında RES kurulumu için uygun olmayan alanlar kısıtlı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, çalışma alanının %66,325'i kısıtlı, %1,716'sı düşük uygunluk, %30,757'si orta uygunluk, %1,201'i yüksek uygunluk ve %0,002'si çok yüksek uygunluk olarak sınıflandırılmıştır. Bulgular, Taşlıçay ilçesinin Ağrı ili için RES geliştirme potansiyeli en yüksek alan olduğunu ortaya koymuştur.

Yapılan duyarlılık analizi, kriter ağırlıklarının belirlenmesinin arazi uygunluk değerlendirmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve modelin bu tür değişikliklere karşı hassas olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşlerinin ve bilimsel yöntemlerin kullanılmasının ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. Modelin doğrulanması amacıyla, mevcut RES'lerin konumları oluşturulan arazi uygunluk haritası ile karşılaştırılmıştır. Taşlıçay bölgesindeki RES'lerin konumlarının modelle yüksek oranda uyum gösterdiği tespit edilirken, Diyadin bölgesindeki RES'lerin fay hatlarına yakın olması ve heyelan bölgeleri içinde yer alması nedeniyle uygunluk haritası ile uyuşmadığı belirlenmiştir. Bu durum, RES projelerinin planlanmasında jeolojik risklerin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, CBS ve AHP yöntemlerinin RES yer seçimi süreçlerinde etkili bir şekilde kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşlerinin ve bilimsel yöntemlerin kullanılmasının, karar verme süreçlerinin güvenilirliğini artırdığı belirlenmiştir. Duyarlılık analizi, modelin sağlamlığını değerlendirmek için önemli bir araç olarak öne çıkmıştır. Modelin mevcut RES santrallerinin konumları ile karşılaştırılması, sonuçların güvenilirliğini artırmış ve modelin pratik uygulanabilirliğini desteklemiştir. Ancak, Diyadin bölgesindeki santrallerin fay hatları ve heyelan bölgelerine yakınlığı, RES projelerinin planlanmasında jeolojik risklerin daha detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, Ağrı ili için RES potansiyel alanlarının belirlenmesinde önemli bir adım atmış ve bölgenin sürdürülebilir enerji planlamasına katkı sağlayacak değerli bilgiler sunmuştur. Elde edilen bulgular, benzer çalışmalar için bir referans niteliği taşımakta ve gelecekteki araştırmalara yol göstermektedir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazar(lar) tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

KAYNAKLAR

- Abdullah, A. G., Setiorini, A. H., Dwitasari, N. A., Hakim, D. L., & Aziz, M. (2021). Location suitability analysis for wind farm exploitation using fuzzy analytic hierarchy process. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 6(3), 523-534. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i3.38957>
- Aghaloo, K., Ali, T., Chiu, Y.-R., & Sharifi, A. (2023). Optimal site selection for the solar-wind hybrid renewable energy systems in Bangladesh using an integrated GIS-based BWM-fuzzy logic method. *Energy Conversion and Management*, 283, 116899. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116899>
- Ajanaku, B. A., Strager, M. P., & Collins, A. R. (2021). GIS-based multi-criteria decision analysis of utility-scale wind farm site suitability in West Virginia. *GeoJournal*, 87(5), 3735-3757. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10453-y>
- Amiri, A. A., Wahid, M. N., Al-Buraiki, A. S., & Al-Sharafi, A. (2024). A strategic multi-criteria decision-making framework for renewable energy source selection in Saudi Arabia using AHP-TOPSIS. *Renewable Energy*, 236, 121523. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121523>
- 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>
- Ayalke, Z. G., & Şişman, A. (2022). Site selection for wind farms using geographic information system with best-worst method: A case study Amhara Region of Ethiopia. *Advanced Land Management*, 2(2), 69-78.
- Azizi, A., Malekmohammadi, B., Jafari, H. R., Nasiri, H., & Amini Parsa, V. (2014). Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran. *Environ Monit Assess*, 186(10), 6695-6709. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3883-6>
- Badi, I., Pamučar, D., Stević, Ž., & Muhammad, L. J. (2023). Wind farm site selection using BWM-AHP-MARCOS method: A case study of Libya. *Scientific African*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01511>
- Barzehkar, M., Parnell, K. E., Mobarghaee Dinan, N., & Brodie, G. (2020). Decision support tools for wind and solar farm site selection in Isfahan Province, Iran. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(4), 1179-1195. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01978-w>
- Baseer, M. A., Rehman, S., Meyer, J. P., & Alam, M. M. (2017). GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. *Energy*, 141, 1166-1176. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.016>
- Benti, N. E., Alemu, Y. B., Balta, M. M., Gunta, S., Chaka, M. D., Semie, A. G., Mekonnen, Y. S., & Yohannes, H. (2023). Site suitability assessment for the development of wind power plant in Wolaita area, Southern Ethiopia: an AHP-GIS model. *Scientific Reports*, 13(1), 19811. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47149-x>
- Bilgili, A., Arda, T., & Kilic, B. (2024). Explainability in wind farm planning: A machine learning framework for automatic site selection of wind farms. *Energy Conversion and Management*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118441>
- Birdmap. (2025). *Birdmap-The interactive Bird Migration Map visualizes migration paths of birds.* <https://birdmap.5dvision.ee/en/>
- Çolak, Z. (2024). A hybrid MCDM method for enhancing site selection for wind power plants in Turkey. *Energy for Sustainable Development*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101536>
- Dinçer, F., (2025). Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santrali Yatırımı İçin Modelleme ve Simülasyon Analizi: Ilgın/Konya Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 112-128. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1523469>
- Ekiz, S., Şirin, A., & Erener, A. (2021). En uygun rüzgâr enerji santrali yerlerinin coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi: Kocaeli ili örneği. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 9(1), 59-79. <https://doi.org/10.9733/jgg.2022r0005.T>

- Elkadeem, M. R., Younes, A., Sharshir, S. W., Campana, P. E., & Wang, S. (2021). Sustainable siting and design optimization of hybrid renewable energy system: A geospatial multi-criteria analysis. *Applied Energy*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117071>
- Eroğlu, H. (2021). Multi-criteria decision analysis for wind power plant location selection based on fuzzy AHP and geographic information systems. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 18278-18310. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01438-5>
- Flora, F. M. I., Donatien, N., Tchinda, R., & Hamandjoda, O. (2021). Selection wind farm sites based on GIS using a boolean method: evaluation of the case of Cameroon. *Journal of Power and Energy Engineering*, 9(1), 1-24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.91001>
- Franke, K., Garcia, J. F., Kleinschmitt, C., & Sensfuß, F. (2024). Assessing worldwide future potentials of renewable electricity generation: Installable capacity, full load hours and costs. *Renewable Energy*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120376>
- GWA. (2025). Global Wind Atlas. <https://globalwindatlas.info/en/about/KeyFeatures>
- Hosseini Dehshiri, S. S., & Hosseini Dehshiri, S. J. (2022). Locating wind farm for power and hydrogen production based on Geographic information system and multi-criteria decision making method: An application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(58), 24569-24583. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.083>
- Ifkirne, M., El Bouhi, H., Acharki, S., Pham, Q. B., Farah, A., & Linh, N. T. T. (2022). Multi-Criteria GIS-Based Analysis for Mapping Suitable Sites for Onshore Wind Farms in Southeast France. *Land*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/land11101839>
- International Energy Agency (IEA), (2024). Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030. <https://www.iea.org>
- Karataş, K., & Bıçakçı, C. (2025). Creation of Wind Speed Maps and Determination of Wind Energy Potential with Geographic Information Systems: The Case of Kırklareli Province, Türkiye. *Sustainability*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/su17031185>
- Koc, A., Turk, S., & Sahin, G. (2019). Multi-criteria of wind-solar site selection problem using a GIS-AHP-based approach with an application in Iğdir Province/Turkey. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(31), 32298-32310. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06260-1>
- Latinopoulos, D., & Kechagia, K. (2015). A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.041>
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. (John Wiley and Sons: New York.). In: USA.
- Mercan, Ç. (2025). Assessment of walnut (*Juglans regia* L.) cultivation land suitability using a multiple-criteria decision-making method in Southeastern Turkey. *Scientific Reports*, 15(1), 2716. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87110-8>
- Mercan, Ç., & Acibuca, V. (2023). Land Suitability Assessment for Pistachio Cultivation Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making: A Case Study of Mardin, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1300. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11899-y>
- Mercan, Ç. (2023). Coğrafi bilgi sistemi ve AHP ile arıcılık faaliyet alanları için arazi uygunluk değerlendirmesi: Bitlis/Türkiye Örneği. *Uludağ Arıcılık Dergisi*, 23(1), 61-77. <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.1245078>
- MGM. (2025). *Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Resmi istatistikler*. <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=MARDIN>
- Molla, S., Farrok, O., & Alam, M. J. (2024). Electrical energy and the environment: Prospects and upcoming challenges of the World's top leading countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114177>
- Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Rosso, D. (2020). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>
- Moslem, S. (2024). A novel parsimonious spherical fuzzy analytic hierarchy process for sustainable urban transport solutions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107447>

- Mutlu, S. (2022). *Balık Gölü fay zone'nun paleosismolojik özellikleri ve segmentasyonu*. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yayınlanmamış doktora tezi).
- Mutlu, S. (2025). Iğdır Fay Zonu'nun Doğu Anadolu Kısımlı Tektonik Bloğu içerisindeki önemi ve Morfotektonik Özellikleri. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 68(2), 225-258. <https://doi.org/10.25288/tjb.1627676>
- Nagababu, G., Puppala, H., Pritam, K., & Kantipudi, M. V. V. P. (2022). Two-stage GIS-MCDM based algorithm to identify plausible regions at micro level to install wind farms: A case study of India. *Energy*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123594>
- Nasery, S., Matci, D. K., & Avdan, U. (2021). GIS-based wind farm suitability assessment using fuzzy AHP multi-criteria approach: the case of Herat, Afghanistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(12). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07478-5>
- Nekhay, O., Arriaza, M., & Guzmán-Álvarez, J. R. (2009). Spatial analysis of the suitability of olive plantations for wildlife habitat restoration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(1), 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.07.012>
- Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, M. (2016). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 13, 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.11.007>
- Öztürk, M., Kayabaşı, R., & Taşdemir, O. (2025). Kırşehir'in Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve İç Anadolu Bölgesi Kurulu Rüzgar Enerjisi Santrallerinin Güç Analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 189-201. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1533576>
- Pamuçar, D., Gigović, L., Bajić, Z., & Janošević, M. (2017). Location Selection for Wind Farms Using GIS Multi-Criteria Hybrid Model: An Approach Based on Fuzzy and Rough Numbers. *Sustainability*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/su9081315>
- Price, J., Warren, R., & Forstehäusler, N. (2024). Biodiversity losses associated with global warming of 1.5 to 4 °C above pre-industrial levels in six countries. *Climatic Change*, 177(3). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03666-2>
- Rediske, G., Burin, H. P., Rigo, P. D., Rosa, C. B., Michels, L., & Siluk, J. C. M. (2021). Wind power plant site selection: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111293>
- Rekik, S., Khabbouchi, I., & El Alimi, S. (2025). A Spatial Analysis for Optimal Wind Site Selection from a Sustainable Supply-Chain-Management Perspective. *Sustainability*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/su17041571>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.
- Sachit, M. S., Shafri, H. Z. M., Abdullah, A. F., Rafie, A. S. M., & Gibril, M. B. A. (2024). A novel GeoAI-based multidisciplinary model for SpatioTemporal Decision-Making of utility-scale wind-solar installations: To promote green infrastructure in Iraq. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(1), 120-136. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.02.001>
- Shobande, O. A., Ogbeifun, L., & Tiwari, A. K. (2025). Net-zero transitions: Advancing dynamic econometric analysis of carbon tax, renewable energy, and circular economy on government actions. *J Environ Manage*, 378, 124761. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124761>
- Tegou, L. I., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. A. (2010). Environmental management framework for wind farm siting: methodology and case study. *J Environ Manage*, 91(11), 2134-2147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.010>
- Tekdamar, D. A., & Tekdamar, K. (2024). Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Analitik Hiyerarşi Yöntemi Kullanılarak Güneş Enerjisi Santrali Yer Seçimi: Mardin İli Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 199-212. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1371448>

- Tercan, E. (2021). Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101491>
- TETKB. (2022). *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye ulusal enerji planı*. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf
- Toprak, A., & Sunkar, M. (2022). Ağrı İlinde Meydana Gelen Doğal Afetlerin Mekânsal ve Zamansal Analizi. *Coğrafya Dergisi / Journal of Geography*, 0(44), 97-113. <https://doi.org/10.26650/jgeog2022-978387>
- TUIK. (2025). *Türkiye İstatistik Kurumu*. Resmi istatistik bilgileri. <https://www.tuik.gov.tr/>
- TWES. (2024). *Turkish Wind Energy Statistics Report*. T. W. E. Association. <https://www.tureb.com.tr/eng/lib/uploads/3201020b27d9b8e8.pdf>
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- Yaman, A. (2024). A GIS-based multi-criteria decision-making approach (GIS-MCDM) for determination of the most appropriate site selection of onshore wind farm in Adana, Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(12), 4231-4254. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02866-3>
- Yamaçlı, V. (2025). Rüzgâr Gücü Tahmininde Uzun Kısa-Sürelili Bellek: Veri Örnekleme ve Kümelemenin Etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 202-215. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1535461>
- Yildiz, S. S. (2024). Spatial multi-criteria decision making approach for wind farm site selection: A case study in Balıkesir, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114158>
- Yılmaz, E. A., & Can Öziç, H. (2018). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli ve Gelecek Hedefleri. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 8(3), 525-535.
- Yousefi, H., Moradi, S., Zahedi, R., & Ranjbar, Z. (2024). Developed analytic hierarchy process and multi criteria decision support system for wind farm site selection using GIS: A regional-scale application with environmental responsibility. *Energy Conversion and Management: X*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100594>
- Yousefi, H., Motlagh, S. G., & Montazeri, M. (2022). Multi-Criteria Decision-Making System for Wind Farm Site-Selection Using Geographic Information System (GIS): Case Study of Semnan Province, Iran. *Sustainability*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137640>
- Zalhaf, A. S., Elboshy, B., Kotb, K. M., Han, Y., Almaliki, A. H., Aly, R. M. H., & Elkadeem, M. R. (2021). A High-Resolution Wind Farms Suitability Mapping Using GIS and Fuzzy AHP Approach: A National-Level Case Study in Sudan. *Sustainability*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/su14010358>