

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

STANDORTWAHL FÜR WINDKRAFTANLAGEN: EINE FALLANALYSE AUS DER TÜRKEI

RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ YERLEŞİM YERİ SEÇİMİ: TÜRKİYE'DEN BİR VAKA ANALİZİ

Seda Deniz ÖZDOĞAR* 
Yunus Emre VAN** 
Mehmet Ali TAŞ*** 
Batin Latif AYLAK**** 

Zusammenfassung

Der Konsum hat aufgrund des Anstiegs der Weltbevölkerung und des Wirtschaftswachstums rapide zugenommen. Der Anstieg des Verbrauchs hat zu einem Anstieg des Energiebedarfs geführt. Man geht davon aus, dass diese Situation durch Lösungen wie mehr Energieproduktion und effizientere Energienutzung bewältigt werden kann. Allerdings sollten bei der Entwicklung dieser Lösungen auch die Nachhaltigkeit und Umweltauswirkungen des Energiesektors berücksichtigt werden. In diese Richtung nimmt die Nutzung der Windenergie weltweit zu. Die Türkei gehört aufgrund seiner Lage zu den am besten geeigneten Ländern des Windenergiepotenzials. Ziel dieser Studie ist es, eine mögliche Standortbestimmung für Windkraftanlagen in Tekirdağ auf der Grundlage von multikriteriellen Entscheidungskriterien unter Berücksichtigung der aktuellen Situation von Windkraftanlagen in der Türkei vorzuschlagen. Zu diesem Zweck wird die Standortbestimmung der geplanten Windkraftanlage in Tekirdağ, einer der Provinzen mit dem höchsten Potenzial in der Türkei, mit multikriteriellen Entscheidungsunterstützungen (MCDM)-Ansätzen

* Mühendis, Mercedes-Benz Türk'te Tedarikçi Yönetimi ve Malzeme Tedarik Uzmanı, İstanbul, E-mail: e180502006@stud.tau.edu.tr, ORCID ID: 0009-0008-5096-0452

** Y. L. Öğr., Julius-Maximilians-University, Würzburg, E-mail: e170502014@stud.tau.edu.tr, ORCID ID: 0009-0009-2157-5034

*** Arş. Gör., Türk-Alman Üniversitesi, 34820 Beykoz, İstanbul, E-mail: mehmetali.tas@tau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3333-7972

**** Dr. Öğr. Üyesi, Türk-Alman Üniversitesi, 34820 Beykoz, İstanbul, E-mail: batin.latif@tau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-0067-1835

How to cite this article/Atıf için: Özdoğan SD, Van YE, Taş MA, Aylak BL. (2024). Standortwahl für windkraftanlagen: eine fallanalyse aus der Türkei. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 46(3), 547-567. DOI: 10.14780/muiibd.1438595

Makale Gönderim Tarihi: 18.02.2024

Yayına Kabul Tarihi: 12.04.2024

Benzerlik Oranı: %2



Content of this journal is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

diskutiert. Die zehn Faktoren, die bei der Windparkinstallation bewertet werden können, wurden durch Literaturrecherche und Feedback von Experten ermittelt und die Gewichte dieser Faktoren mit der AHP berechnet. Mithilfe von Gewichten und TOPSIS werden zehn Standorte in Tekirdağ im Hinblick auf die Anwendbarkeit von Windparks aufgelistet. Infolgedessen wurde der Standort 22 km vom Bezirk Şarköy entfernt als am besten geeigneter Punkt ermittelt. Ziel ist es, dass die Studie in Zukunft zu Studien zur nachhaltigen Energiebewertung beitragen wird.

Schlüsselwörter: Nachhaltigkeit, MCDM, Windkraft, AHP, TOPSIS

JEL Klassifikation: Q42, D81

Öz

Dünya nüfusunun artması ve ekonomik büyümeye bağlı olarak tüketim hızla artmıştır. Tüketimin artması enerji ihtiyacının da artmasına neden olmuştur. Bu durumun, daha fazla enerji üretimi ve daha verimli enerji kullanımı gibi çözümler ile yönetilebileceği düşünülmektedir. Ancak bu çözümlerin geliştirilmesinde, enerji sektörünün sürdürülebilirliği ve çevresel etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Rüzgâr enerjisinin kullanımı da bu doğrultuda tüm dünyada artmaktadır. Türkiye konumu itibariyle rüzgar enerjisi potansiyeli bakımından en uygun ülkeler arasındadır. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki rüzgar türbinlerinin mevcut durumu dikkate alınarak çok kriterli karar kriterlerine dayalı olarak Tekirdağ'daki rüzgar türbinlerinin olası yerleşimini önermektir. Bu amaçla Türkiye'deki potansiyeli en yüksek illerden biri olan Tekirdağ ilinde kurulması planlanan rüzgar enerji santralının lokasyonunun çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımları ile belirlenmesi ele alınmıştır. Rüzgâr santrali kurulumunda değerlendirilebilecek 10 faktör, literatür taraması ve uzmanlardan gelen geri dönüşlerle belirlenmiş, AHP yöntemiyle bu faktörlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Tekirdağ'da önceden belirlenmiş 10 farklı lokasyon hesaplanan ağırlıklar ve TOPSIS yöntemi yardımı ile rüzgar santrallerinin uygulanabilirliği açısından sıralanmıştır. Elde edilen sonuçta, Şarköy ilçesine 22 km uzaklıkta bulunan lokasyon en uygun nokta olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmanın gelecekte yapılacak sürdürülebilir enerji değerlendirme çalışmalarına katkıda bulunması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, ÇKKV, Rüzgar Enerjisi, AHP, TOPSIS

JEL Sınıflandırması: Q42, D81

1. Einleitung

Der weltweit steigende Energiebedarf hat die Bemühungen zur Nutzung alternativer Energiequellen verstärkt. Um nachhaltige Lösungen für den steigenden Energiebedarf zu finden, ist der Bedarf an erneuerbaren Energiequellen entstanden. Eines der wichtigsten Grundbedürfnisse ist elektrische Energie. Mit der Weiterentwicklung der Technologie ist elektrische Energie nicht mehr nur eine in der Industrie genutzte Ressource, sondern zu einem unverzichtbaren Lebensbedarf des Menschen geworden (Garetti & Taisch, 2012). Heutzutage wird elektrische Energie in Haushalten, im Gesundheitswesen, in der Landwirtschaft, in der Kommunikation, im Transportwesen, im Bildungswesen und in vielen anderen Bereichen benötigt. Die Türkei ist eines der Länder mit einer wachsenden Bevölkerung und daher steigt der Bedarf an Energie und damit an elektrischer Energie von Tag zu Tag (Benli, 2013).

Durch Bevölkerungswachstum, unkontrollierten Ressourcenverbrauch und technologische Entwicklung ist der Energiebedarf weltweit gestiegen. Eines der heutigen unbestreitbaren Probleme ist die Klimakrise (Dwivedi et al., 2022). Eine der Hauptursachen des Klimawandels sind erhöhte Treibhausgasemissionen. Durch die Nutzung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdgas und Öl steigt die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre und es kommt zum Treibhauseffekt, der

zur Klimakrise führt (Mikhaylov et al., 2020). Es wurde verstanden, dass fossile Brennstoffe nicht nachhaltig sind, weil sie begrenzte Reserven haben, das Leben negativ beeinflussen und zukünftige Generationen bedrohen. Mit der sich entwickelnden Technologie und der wachsenden Bevölkerung steigt der Energiebedarf ständig (Tripathi et al., 2016). Neben den Umweltschäden durch die Nutzung fossiler Brennstoffe wollen die Regierungen mit der gegen die Klimakrise eingeleiteten Mobilisierung die Nutzung erneuerbarer Energiequellen steigern (Ilić et al., 2019). Mit der Nutzung erneuerbarer Energiequellen wird versucht, nachhaltige Zukunftspläne zu erstellen. Erneuerbare Energiequellen, insbesondere Solar – und Windenergie, erzeugen weniger Emissionen als fossile Brennstoffe und sind nachhaltiger. Windenergie ist eine der erneuerbaren Energiequellen, die aufgrund ihrer geringen Kosten und kommerziellen Bequemlichkeit weitverbreitet ist (Awasthi, 2018).

Während früher die Rentabilität der wichtigste Faktor bei der Auswahl von Energierohstoffen war, spielen heute auch Nachhaltigkeit, Verwendbarkeit und die Umweltbelastung fossiler Ressourcen eine Rolle bei der Ressourcenauswahl. Und diese Rolle wird voraussichtlich allmählich zunehmen. Windenergie hingegen ist aufgrund ihrer geringen Kosten und kommerziellen Bequemlichkeit im Vergleich zu anderen Quellen eine der weitverbreiteten erneuerbaren Energiequellen. Die Nutzung der Windenergie reicht bis in die Antike zurück. Segelboote und Windmühlen, die in der Seefahrt verwendet werden, können als Beispiele für ihre ersten Verwendungen angeführt werden. Mit der sich entwickelnden Technologie hat sich auch die Nutzung der Windenergie verändert und sich zu den heutigen Windturbinen/Kraftwerken entwickelt (Gupta, 2015). Windkraftanlagen sind Geräte, die Windenergie in mechanische Energie und dann in elektrische Energie umwandeln. Ein typischer Windgenerator besteht aus Turm, Generator, Getriebe, Rotor, Achsensystem und Drehzahlregelung. Die Propeller drehen sich in Windrichtung und nutzen die Energie des Windes, um die Turbinen anzutreiben. Die Propeller drehen sich auf der Hauptwelle, dem Rotor. Die Bewegung des Rotors wird über ein Getriebe übertragen, das den Turbinengenerator antreibt. Der Generator wandelt mechanische Energie in elektrische Energie um und erzeugt Strom durch Anschluss an ein elektrisches Netz oder ein lokales Stromnetz (Guo et al., 2017).

Windenergie kann von überall auf der Welt geliefert werden, wenn auch in unterschiedlicher Menge. Es ist im Vergleich zu anderen verwendeten Energiereserven recht sauber. Im Gegensatz zu endlichen fossilen Brennstoffen sorgen erneuerbare, also unbegrenzte Reserven, für eine nachhaltige Energieversorgung. Aufgrund seiner Umweltfreundlichkeit kann es eine globale Erwärmung, sauren Regen, das Abschmelzen von Gletschern und damit eine Störung des ökologischen Gleichgewichts verhindern (Urfali & Eymen, 2021). Es ist unabhängig von Schwankungen des Ölpreises, Preiserhöhungen und verhindert eine ausländische Abhängigkeit beim Öl. Es deckt nicht nur die Stromerzeugung, sondern auch den Bedarf an mechanischer Energie. Darüber hinaus sind Windkraftanlagen gemessen an der jährlichen Energieproduktion die am schnellsten wachsende erneuerbare Energiequelle weltweit (Dincer, 2011). Mit diesem schnellen Wachstum erhöht sich die Energieversorgungssicherheit und bietet Regierungen, Bürgern und Politik wirtschaftliche Nachhaltigkeit (Zhang et al., 2019).

Zudem erfolgt die Installation und Inbetriebnahme von Windkraftanlagen schnell. Weiterhin werden durch die für Wartung und Betrieb benötigte Arbeitskraft neue Arbeitsplätze geschaffen. Ein weiterer Vorteil sind die geringen Betriebskosten der etablierten Anlagen. Einige Staaten bieten auch Anreizunterstützung für die Installation von Einrichtungen. Abgenutzte Windkraftanlagen lassen sich leicht entfernen und das Land, auf dem die entfernte Windkraftanlage steht, kann für andere Zwecke wiederverwendet werden. Wenn auf dem Land produziert wird, unterbricht das Vorhandensein einer Windkraftanlage die Produktion auf dem Land nicht (Beauson et al., 2022). Das Land kann auch für forstwirtschaftliche Aktivitäten genutzt werden. Obwohl Windenergie fossile Brennstoffe nicht direkt und sofort ersetzen kann, kann sie den Einsatz anderer nicht erneuerbarer Energiequellen effektiv reduzieren. Dies spielt eine wichtige Rolle bei der Begrenzung der Nutzung fossiler Ressourcen, bis angesichts der sich entwickelnden Technologien eine bessere Alternative gefunden wird (Wang et al., 2021).

Die Türkei bezieht ihre Energie aus Kohle, Öl, Gas und erneuerbaren Energien. Mit anderen Worten, er bezieht seine Energie nicht aus einer einzigen Quelle, sondern aus der Vielfalt all dieser Quellen. Türkei bezieht immer noch 83% ihrer Energie aus fossilen Brennstoffen im Jahr 2021. Bei den verbleibenden 17% wird angestrebt, die CO₂-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energiequellen zu reduzieren (IEA, 2021). Die Stromerzeugung macht den Großteil der gesamten Energieerzeugung der Türkei aus, und die Energieerzeugungskapazität der Türkei steigt jedes Jahr, ebenso wie der Verbrauch. Die erneuerbare Stromerzeugung in der Türkei hat sich in den vergangenen 10 Jahren verdreifacht. Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der Energieerzeugungsressourcen in der Türkei (MENR, 2023a).

In der gegenwärtigen Situation ist die Türkei weiterhin auf Öl im Transportsektor und Erdgas im Wärmesektor angewiesen, und die Schwankungen dieser Ressourcen wirken sich negativ auf die Verbraucher aus (Aydın & Acar, 2011). Obwohl die Türkei zu den Ländern mit hohem Windpotenzial gehört, bleibt sie hinsichtlich der installierten Windleistung und der von ihr produzierten Energie hinter ihrem Potenzial zurück (Özkan et al., 2022).

Themen wie die Verbreitung der Windenergietechnologie und ihre Anwendung an notwendigen und geeigneten Orten sollten ernst genommen werden und alle Organisationen sollten die notwendige Verantwortung übernehmen. Daher ist es notwendig, die aktuelle Situation der Türkei unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und ökologischen Faktoren zu beobachten.

Tabelle 1: Die Stromproduktion der Türkei im Jahr 2022

Quelle	Prozentsatz
Kohle	34,60
Erdgas	22,20
Wasserkraft	20,60
Wind	10,80
Sonne	4,70
Geothermie	3,00
anderen Quellen	3,70

Die Aufstellungsorte von Windenergieanlagen sind für die Windenergieerzeugung von großer Bedeutung. Bei der Bestimmung des Standorts der Installation sollten viele Kriterien berücksichtigt werden. Um unter alternativen Standorten den optimalen Standort auszuwählen, können unterschiedliche Methoden eingesetzt werden. Einer davon multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (Multi-criteria Decision Making) (MCDM).

Es werden Studien in der Literatur recheriert, in denen MCDM-Methoden zur Lösung von Problemen bei der Standortauswahl von Windkraftanlagen eingesetzt werden. Villacreses et al. (2017) bewertete die Standorte alternativer Windparks in Ecuador mithilfe des geografischen Informationssystems und der MCDM-Methoden OCRA, OWA, VIKOR und TOPSIS. In einer anderen Studie zu Südkorea verwendete Ali et al. (2017) zusätzlich zur GIS-Methode Fuzzy-Analytischer Hierarchieprozess (AHP). In einer weiteren Studie mit denselben Methoden wurden alternative Standorte für eine Provinz in der Schwarzmeerregion der Türkei untersucht (Eroğlu, 2021). In Ägypten (Elhosiny et al., 2021) und Indien (Saraswat et al., 2021) wurden Anwendungen zur Windenergie mithilfe von MCDM-Ansätzen erstellt.

Ziel dieser Studie ist es, den Standort der geplanten Windkraftanlage in Tekirdağ zu bestimmen. Obwohl es in der Literatur Studien gibt, die auf anderen Provinzen basieren, um den geeigneten Standort zu bestimmen, gibt es für Tekirdağ keine Studie, in der AHP – und TOPSIS-Methoden verwendet werden. Bei der Standortbestimmung wurden die für die Installation wichtigen Faktoren anhand der Literaturrecherche ermittelt und durch Einholung von Gutachten überarbeitet. Bei der Durchsicht der Literatur zeigt sich, dass multikriterielle Entscheidungsmethoden für Bewertungsfaktoren und Ranking-Plätze verwendet werden. In dieser Studie wurden AHP – und TOPSIS-Methoden verwendet, bei denen es sich um Entscheidungsfindungstechniken mit mehreren Kriterien handelt. Mit dieser Recherche wurde zunächst detailliert aufgedeckt, aus welchen Quellen die Türkei ihre Energie bezieht. Anschließend wurde die Nutzung der Windenergie ausführlich erläutert. Die Situation von Windkraftanlagen in der Türkei wurde analysiert. Anschließend wurde die Situation der Türkei mit anderen Ländern der Welt verglichen und die Situation der Windkraftanlagen in Tekirdağ untersucht. Die notwendigen Elemente für die Standortwahl des in Tekirdağ zu errichtenden Windkraftanlage wurden ermittelt und erläutert. Die ermittelten Faktoren wurden nach der AHP-Methode mithilfe von Gutachten analysiert und die Gewichte der Faktoren ermittelt. Die ermittelten 10 unterschiedlichen Standorte wurden mithilfe von TOPSIS ausgewertet. Die AHP-Methode wurde in vielen Anwendungen als Lösungsmethode eingesetzt. Beispiele hierfür sind Supply Chain Management (Gaudenzi & Borghesi, 2006), Standortauswahl (Koç & Burhan, 2015), Softwarebewertung (Zaidan et al., 2015) und Fahrzeugauswahl (Sonar & Kulkarni, 2021). Im zweiten Teil der Studie kam die TOPSIS-Methode zum Einsatz. In der Literatur wurde die TOPSIS-Methode zusammen mit vielen anderen MCDM-Methoden verwendet und in verschiedenen Fallstudien angewendet (Abdel-Basset & Mohamed, 2020; Meshram et al., 2020; Chodha et al., 2022; Nazim et al., 2022; Wątróbski et al., 2022).

Diese Studie besteht aus vier Teilen. Im zweiten Teil werden die Methoden der Studie vorgestellt. Im nächsten Abschnitt wird das Anwendungsthema erläutert. Zur Lösung des Problems wurden die ermittelten MCDM-Ansätze eingesetzt. Im vierten und letzten Abschnitt sind die Ergebnisse und Diskussionen enthalten.

2. Methode

2.1. Analytischer Hierarchieprozess (AHP)-Methode

Die AHP-Methode ist ein weitverbreiteter MCDM-Ansatz, der von Saaty (1990) eingeführt wurde. Die AHP-Methode besteht aus fünf Schritten (Chang et al., 2007):

Schritt 1: Bestimmung von Bewertungsfaktoren. Diese Faktoren sind in Tabelle 2 enthalten:

Tabelle 2: Die Bewertungsfaktoren

Faktorcode	Faktoren	Quelle
F01	Die Jährliche Durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	Villacreses et al. (2017)
F02	Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	Değirmenci et al. (2018)
F03	Windkapazitätsfaktor	Chaouachi et al. (2017)
F04	Höhe	Saraswat et al. (2021)
F05	Entfernung von der Siedlung	Villacreses et al. (2017)
F06	Entfernung von der Hauptstraße	Cunden et al. (2020)
F07	Erdbebenrisiko	Genç et al. (2021)
F08	Entfernung zum Vogelzugweg	Değirmenci et al. (2018)
F09	Entfernung zur Endemischen Pflanze	Villacreses et al. (2022)
F10	Entfernung zur Stromleitung	Saraswat et al. (2021)

Schritt 2: Jeder Entscheidungsträger erstellt eine paarweise Vergleichsmatrix. Zum Vergleich der Faktoren wird jedem Experten ein Fragebogen zugesandt.

Schritt 3: Berechnung des Eigenwerts und Eigenvektors. Mit Expertenmeinungen erstellte Matrizen werden durch Bildung des geometrischen Mittels in eine einzige Vergleichsmatrix umgewandelt. Diese erstellte Matrix wurde mit der folgenden Formel (1) normalisiert (Saaty, 1990).

$$a_{ij}' = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Die Zeilensummen in der Matrix geben das Gewicht der Faktoren an und die mathematische Darstellung zur Bestimmung der Gewichte ist da unten zu finden. Es wird also ein mathematisches Verfahren angewendet, um die Wichtigkeit der Faktoren zu bestimmen und somit eine Entscheidungshilfe zu schaffen (Formel (2)).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}'}{n} \quad (2)$$

Schritt 4: Implementierung des Konsistenztests. Die R-Werte, die das CR beeinflussen, sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Faktoren unterschiedlich. Die sich je nach Matrixgröße ändernden R-Werte sind im Tabelle 3 angegeben. n ist die Anzahl der Faktoren und λ_{max} ist als der größte Eigenwertvektorwert definiert. Der Konsistenzindex (CI) wird wie folgt berechnet (Formel (3)):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Dementsprechend wird das Konsistenzverhältnis (CR) mit Formel 4 berechnet:

$$CR = \frac{CI}{R} \quad (4)$$

Tabelle 3: R-Werte Abhängig von der Matrixgröße

Größe der Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Konsistenzindex R	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Schritt 5: Rangfolge der Faktoren. Nach den überprüften Ergebnissen hat der Faktor mit dem höchsten Wert das größte Gewicht (Wichtigkeit).

2.2. TOPSIS-Methode

Die TOPSIS-Methode wurde von Hwang und Yoon (1981) als weitere MCDM-Methode entwickelt. Diese Methode besteht grundsätzlich aus sechs Schritten:

Schritt 1: Erstellen der Entscheidungsmatrix. Diese Matrix wird nach Einschätzung von Experten erstellt.

Schritt 2: Berechnung einer normalisierten Entscheidungsmatrix. Die Werte in der Matrix werden nach folgender Formel 5 rekonstruiert.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

Schritt 3: Berechnung der gewichteten Entscheidungsmatrix. Mit der AHP-Methode ermittelte Faktorgewichte werden im vorherigen Schritt mit den relevanten Elementen in der Matrix multipliziert.

Schritt 4: Bestimmen der Lösungen für das positive ideal (A+) und das negative ideal (A-) mithilfe von Formel 6.

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} \text{ and } A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \quad (6)$$

Schritt 5: Berechnung der Trennmaße. Die Trennmaße S+ und S- werden nach Formel (7) berechnet.

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n \left[(v_{ij} - v_j^+)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ and } S_i^- = \sum_{j=1}^n \left[(v_{ij} - v_j^-)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Schritt 6: Berechnung der relativen Nähe (C+) zur idealen Lösung (Formel 8). Die Alternativen werden entsprechend dem berechneten C_i⁺- Wert vom besten zum schlechtesten eingestuft.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (8)$$

3. Anwendung

Im Jahr 2021 stieg die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien um etwa 7% auf einen Rekordwert von 522 TWh, wobei Wind – und Solartechnologien etwa 90 % dieses Wachstums ausmachten. Der Anteil erneuerbarer Energiequellen an der weltweiten Stromerzeugung erreichte 2021 nach einem bescheidenen Wachstum von 0,4% bis 28,7%. Das langsame Wachstum des Anteils erneuerbarer Energien war darauf zurückzuführen, dass die weltweite Stromnachfrage im Zuge der wirtschaftlichen Aktivität den höchsten Stand in der Geschichte erreichte (IEA, 2021). Auf China entfiel mehr als die Hälfte des Wachstums der erneuerbaren Stromerzeugung im Jahr 2021, was hauptsächlich auf den Rekordbau von Wind – und Solarkapazität im Jahr 2020 zurückzuführen ist. Die Vereinigten Staaten und die Europäische Union trugen jeweils 8 % zum Wachstum bei. Leider ging die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Brasilien und der Türkei aufgrund anhaltender Dürren zurück, was zu einer geringeren Wasserkrafterzeugung führte, und in Großbritannien und Deutschland, wo längere Perioden mit schwachem Wind die Winderzeugung in Windkraftanlagen behinderten (Bıçakçı et al., 2023). In Europäische Union (EU) im Jahr 2022 produzierte 22 % ihres Stroms aus Wind und Sonne. Sieben EU-Länder, darunter Spanien (33 %), Deutschland (32 %) und die Niederlande (32 %), erzeugten im Jahr 2022 rund ein Drittel oder mehr ihres Stroms aus Wind und Sonne. Die Türkei (15%) liegt über dem Weltdurchschnitt. Drei der fünf größten Wind – und Solarproduzenten der Welt befinden sich in Asien. China, gefolgt von Japan und Indien. Viele Länder Lateinamerikas lagen über der Weltrangliste. Beispiele sind Uruguay (36%), Chile (28%), Brasilien (15%) und Argentinien (12%). In Afrika führen Namibia (25%), Marokko (17%) und Kenia (16%) den Wind – und Solaranteil an. Im Mittleren Osten müssen sich Sonne und Wind erst noch durchsetzen (Wiatros-Motyka, 2023).

Angesichts all dieser Informationen kann gesagt werden, dass die geopolitische Lage und die günstigen Strahlungsbedingungen der Türkei unter ihrem Potenzial liegen. Im Vergleich zu anderen Ländern hat es das Potenzial, zu anderen Ländern aufzuschließen und deren Produktion zu verbessern. Es sollten die notwendigen Investitionen getätigt werden, um das Potenzial der Türkei zu maximieren, und die Qualität von Technologie und Infrastruktur sollte verbessert werden. Es sollte seine Ziele für erneuerbare Energien erhöhen, indem es die Menge an fossilen Brennstoffen reduziert, die es verwendet (IEA, 2021).

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Windkraftanlagen in der Türkei dargestellt. Die aktuelle Situation der Provinz Tekirdağ wurde durch einen Blick auf die anderen Provinzen und die Potenziale dieser Provinzen ermittelt. Die im Vergleich von Tekirdağ und anderen Provinzen verwendeten Tabellen wurden aus den Daten von 2021 gewonnen. Abschließend werden die Windkraftanlagen in Tekirdağ erläutert. Nach den Daten von 2021 beträgt die Anzahl der installierten Windkraftanlagen in der Türkei 273. In diesen Kraftwerken befinden sich insgesamt 3983 Turbinen. Die installierte Gesamtleistung dieser Kraftwerke beträgt 11101,82 MWe. Betrachtet man die kumulierte Installationsverteilung dieser Kraftwerke nach Provinzen, liegt İzmir mit 1886,70 MWe an erster Stelle. Nach İzmir genauer gesagt; Balıkesir, Çanakkale, Manisa, İstanbul, Kırklareli, Hatay, Afyon, Aydın und Konya befinden sich. Der kumulierte installierte Wert (MWe) von Tekirdağ beträgt 187,95 (TÜREB, 2023).

Es gibt insgesamt 12 Kraftwerke in Tekirdağ. Das Kraftwerk mit dem höchsten installierten Leistungswert (50,60) ist das Windkraftwerk Balabanlı. Obwohl das Kraftwerk Balabanlı im Jahr 2014 errichtet wurde, haben die nach 2014 errichteten Kraftwerke einen Wert von weniger als 50,60 MWe. Nach Angaben von 2021 befinden sich in Tekirdağ elf weitere Kraftwerke im Bau. Die Gesamtstromkapazität der in Tekirdağ errichteten Windkraftanlagen wird 37 MWe betragen. Nach dem Bau dieser Kraftwerke wird die installierte Gesamtleistung in Tekirdağ 224,95 MW erreichen. Unter den im Bau befindlichen Kraftwerken wird das Kraftwerk mit der höchsten installierten Leistung das Windkraftwerk Hayrabolu sein. Nach Fertigstellung des Kraftwerks werden die Windkraftwerke von Demirer Energy und Hayrabolu den gleichen Wert haben und in der obigen Tabelle auf Platz 3 platziert werden. Die folgende Tabelle 4 zeigt die im Bau befindlichen Windkraftanlagen für 2021 (Enerji Atlası, 2023).

Tabelle 4: Windkraftanlagen in Bearbeitung (Enerji Atlası, 2023)

Name der Windkraftanlage	Bezirk	Stromkapazität
Bozkır ve Dores Enerji Rüzgar Santrali	Hayrabolu	20 MW
İmparator Konfeksiyon Tekirdağ RES	Ergene	3,00 MW
Asa Kaynak Çerkezköy Rüzgar Santrali	Çerkezköy	2,40 MW
Vatan Kablo Tekirdağ Rüzgar Santrali	Ergene	2,35 MW
Saray Lisanssız RES	Çerkezköy	2,35 MW
Boen Alüminyum Çerkezköy RES	Çerkezköy	2,3 MW
Kapaklı Belediyesi Rüzgar Enerji Santrali	Kapaklı	1 MW
Kapaklı Belediyesi Rüzgar Türbini	Kapaklı	1 MW
Arıteks Tekstil RES	Ergene	0,8 MW
Erkoç Elektrik RES	Süleymanpaşa	0,8 MW
Damla RES	Çorlu	0,8 MW

In Tekirdağ wurden 10 verschiedene Orte ausgewählt. Bei der Auswahl der Standorte wurde darauf geachtet, dass es sich nicht um Militärzonen oder Waldgebiete handelt (Tabelle 5). Die Koordinaten der ermittelten Alternativstandorte werden auf Google Maps markiert und in Abbildung 1 dargestellt.

Tabelle 5: Koordinaten ausgewählter Orte

Ort	Koordinate
1	40°33'57.6"N 26°56'39.5"E
2	40°45'57.0"N 27°16'55.0"E
3	40°46'04.1"N 27°03'13.9"E
4	40°58'56.0"N 27°01'56.1"E
5	41°11'29.2"N 27°17'58.5"E
6	41°03'09.4"N 27°57'53.9"E
7	41°17'56.7"N 26°57'47.3"E
8	41°29'16.0"N 27°56'38.0"E
9	41°11'02.0"N 27°49'33.0"E
10	41°16'53.0"N 27°39'23.1"E



Abbildung 1: Darstellungen ausgewählter Orte auf der Karte

3.1. Faktoren

Um den richtigen Standort in Tekirdağ zu bestimmen, wurden zehn verschiedene Faktoren ermittelt. Diese Faktoren wurden ausgewählt, um zur Literatur in dieser Studie beizutragen, da sie in der Literaturrecherche verwendet wurden.

3.1.1. Die jährliche Durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung (F01)

Die Windgeschwindigkeit ist einer der wichtigsten klimatischen Parameter, der bei der Bestimmung der Gebiete verwendet wird, in denen Windkraftanlagen errichtet werden. Die erforderliche Mindestwindgeschwindigkeit für Turbinen, die Strom aus Wind erzeugen, sollte 2,5 m/s und für eine effiziente und wirtschaftliche Produktion 7 m/s und mehr betragen (Koç, 1998). Die durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeit in der Provinz Tekirdağ beträgt 5,67 m/s, was über der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit von 5,2 m/s in der gesamten Türkei liegt. Die Windgeschwindigkeit in Tekirdağ zeigt eine heterogene Verteilung. In der Studie wurde die jährliche mittlere Windgeschwindigkeitsverteilung von 100 Metern und mehr berücksichtigt in der Abbildung 2 (MENR, 2023b).

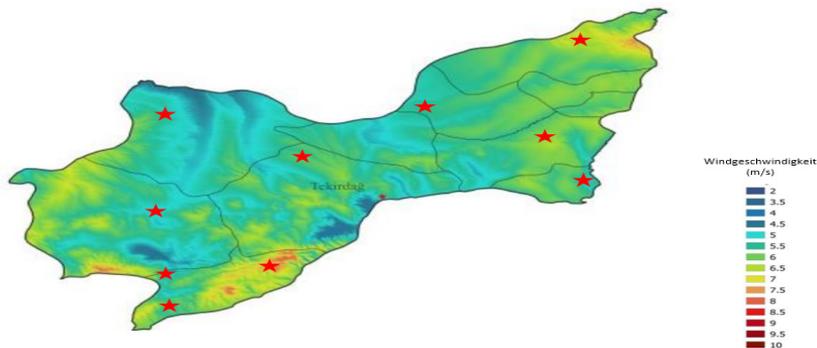


Abbildung 2: Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung über 100 Meter

3.1.2. Die jährliche durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte (F02)

Die Windleistungsdichte ist einer der wichtigsten klimatischen Parameter zur Bestimmung der Standorte von Windkraftanlagen. Bei der Windenergieanalyse ist die Windleistungsdichte ein genauerer Indikator als die Windgeschwindigkeit. Die Winddichte ist der Ausdruck für die Energiemenge, die pro Quadratmeter für eine Region produziert werden kann. Kurz gesagt ist es die Energiemenge pro Quadratmeter. Die durchschnittliche Windleistungsdichte in der Provinz Tekirdağ beträgt $205,71 \text{ W/m}^2$, was unter dem Durchschnitt von $243,04 \text{ W/m}^2$ in der Türkei liegt in der Abbildung 3 (MENR, 2023b).

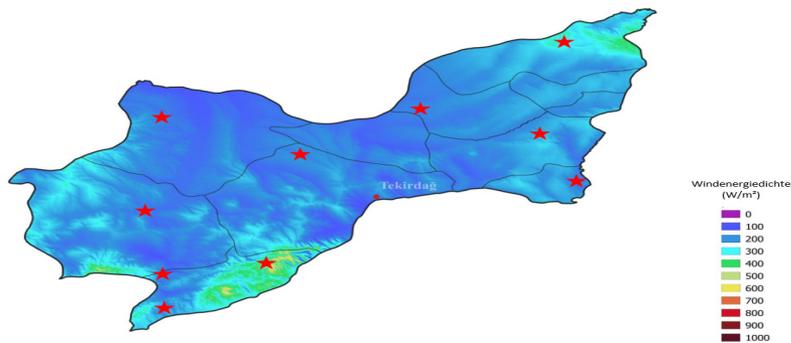


Abbildung 3: Jährliche durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte über 100 Meter

3.1.3. Windkapazitätsfaktor (F03)

Der Kapazitätsfaktor wird mithilfe der Windgeschwindigkeitsverteilung und der Windleistungsdichte berechnet. Kurz gesagt kann es als erzeugte Leistung / maximal erzeugbare Leistung bezeichnet werden. Die Verteilungskarte des Kapazitätsfaktors wurde unter Berücksichtigung der technischen Werte einer 3-MW-Windkraftanlage erstellt in der Abbildung 4.

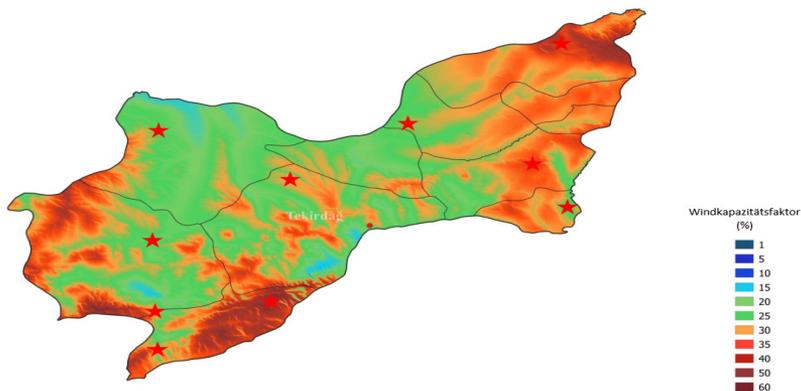


Abbildung 4: Windkapazitätsfaktor über 100 Meter

3.1.4. Höhe (F04)

Die Bedeutung der Höhe einer Windkraftanlage besteht darin, dass sie aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit und des regelmäßigen Windes eine höhere Energieerzeugung bietet (Yıldırım et al., 2016). Im Allgemeinen haben größere Höhen stärkere und stabilere Winde. Daher ermöglicht der Bau von Windkraftanlagen in höheren Lagen höhere Windgeschwindigkeiten und damit mehr Energieerzeugung. Die Höhe trägt auch dazu bei, eine weniger turbulente Strömung mit weniger Blockierungseffekt zu erzeugen, wenn der Wind vom Boden aufsteigt. Die weniger turbulente Strömung von Windenergieanlagen bewirkt, dass die Turbinen effizienter arbeiten und weniger Verschleiß verursachen. Daher ist die Höhe von Windkraftanlagen wichtig für eine höhere Energieeffizienz, niedrigere Betriebskosten und eine längere Lebensdauer.

3.1.5. Entfernung von der Siedlung (F05)

Windkraftanlagen verursachen im Betrieb ein gewisses Maß an Lärm. Dieser Lärm kann die Stille nahegelegener Wohnhäuser stören und Unbehagen bei den Menschen hervorrufen. Daher werden Windkraftanlagen so weit wie möglich von den Wohnorten entfernt gebaut (Çelik et al., 2018).

3.1.6. Entfernung von der Hauptstraße (F06)

Die Entfernung von der Hauptstraße ist ein wichtiger Faktor, da große Turbinen schwer zu transportieren/logistisch sind. Große Turbinen transportieren große Fahrzeuge, was die Bewegung von Fahrzeugen einschränkt, wenn Windkraftanlagen nicht in der Nähe von Hauptverkehrsmitteln liegen (Jiang, 2021). Der Transport zu einer Windkraftanlage, die weit vom Haupttransport entfernt ist, kann die Installations – und Wartungskosten erhöhen. Die Entfernung vom potenziellen Windkraftanlage zu den Hauptverkehrsstraßen sollte möglichst gering sein, um den Transport der Windenergieanlagen nicht unmöglich zu machen und die Kosten zu senken (Abbildung 5).

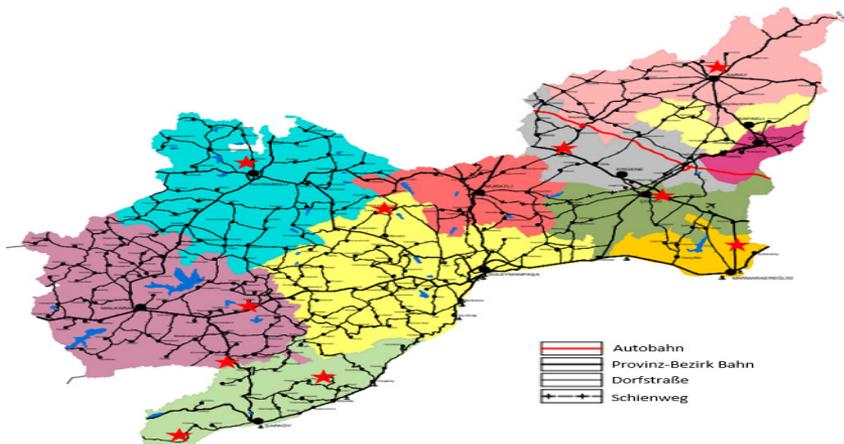


Abbildung 5: Straßenkarte von Tekirdağ

3.1.7. Erdbebenrisiko (F07)

Verwerfungslinien sind Orte, an denen es natürliche Brüche gibt, die seismische Aktivitäten verursachen können. Wenn Windkraftanlagen in der Nähe von Verwerfungslinien gebaut werden, können sie daher durch Naturkatastrophen wie Erdbeben gefährdet sein. Dies kann ein Sicherheitsrisiko sowohl für die Sicherheit der Anlage als auch für benachbarte Wohnungen, Lebewesen und Siedlungen darstellen. Für eine nachhaltige Stromerzeugung sollten zu errichtende elektrische Kraftwerke nicht in der Nähe von Verwerfungslinien errichtet werden (Ritschel et al., 2003).

3.1.8. Entfernung zum Vogelzugweg (F08)

Windkraftanlagen können aufgrund ihrer Höhe die Zugwege von Vögeln blockieren und die Sicherheit und das Überleben von Vögeln gefährden. Aus diesem Grund sollte der Bau von Windkraftanlagen in Gebieten vermieden werden, die sich mit Vogelzugrouten kreuzen (Fetanat & Khorasaninejad, 2015).

3.1.9. Entfernung zur Endemischen Pflanze (F09)

Windkraftanlagen können die Vegetation und insbesondere endemische Pflanzen schädigen. Beim Bau von Windkraftanlagen kann den Pflanzen der Zugang zu Sonnenlicht, Wasser und Boden verwehrt werden. Dies kann das Wachstum von Pflanzen und das Ökosystem beeinträchtigen. Schäden an endemischen Pflanzen können zur Zerstörung natürlicher Lebensräume und zum Verlust der Artenvielfalt führen (Villacreses et al., 2022).

3.1.10. Entfernung zur Stromleitung (F10)

Hochspannungsleitungen zur Stromerzeugung können Energie über große Entfernungen transportieren. Daher kann der Bau von Windkraftanlagen in der Nähe von Übertragungsleitungen zur Kostensenkung beitragen. Außerdem kann der Anschluss von Turbinen an nahe gelegene Übertragungsleitungen dazu beitragen, die Stromerzeugung zu beschleunigen und die Kapitalrendite zu steigern (Höfer et al., 2016).

3.2. Bestimmung der Gewichte von Faktoren mit AHP

In dieser Fallstudie wurde AHP zur Bestimmung der Bewertungen der Faktoren genutzt. Es wurde eine Umfrage mit den paarweisen Vergleichen der Faktoren an 5 Experten geschickt, die bereits an der Bestimmung der Position der Windturbinen gearbeitet hatten, und die erhaltenen Rückmeldungen wurden zur Anwendung von AHP genutzt.

Tabelle 6: Die Umfrage wurde an Experte 1 verschickt

Faktoren	Wichtigkeitsstufe										Faktoren							
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Windkapazitätsfaktor
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Höhe
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Siedlung
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Hauptstraße
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Windkapazitätsfaktor
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Höhe
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Siedlung
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Hauptstraße
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Jährliche Durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Windkapazitätsfaktor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Siedlung
Windkapazitätsfaktor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Hauptstraße
Windkapazitätsfaktor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Windkapazitätsfaktor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Windkapazitätsfaktor	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Siedlung
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Hauptstraße
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Höhe	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung von der Hauptstraße
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Entfernung von der Siedlung	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Entfernung von der Hauptstraße	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Erdbebenrisiko
Entfernung von der Hauptstraße	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Entfernung von der Hauptstraße	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Entfernung von der Hauptstraße	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Erdbebenrisiko	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zum Vogelzugweg
Erdbebenrisiko	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Erdbebenrisiko	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Entfernung zum Vogelzugweg	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Endemischen Pflanze
Entfernung zum Vogelzugweg	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung
Entfernung zur Endemischen Pflanze	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Entfernung zur Stromleitung

Basierend auf den Rückmeldungen von 5 verschiedenen Experten wurden fünf verschiedene Matrizen erstellt, die Faktoren in Zeilen und Spalten enthalten. Diese Matrizen enthalten Faktoren in Zeilen und Spalten. Eine der Matrizen ist die Vergleichsmatrix, die auf dem Feedback des Entscheidungsträgers 1 basiert und in Anhang dargestellt ist. Der Fragebogen ist in Tabelle 6 enthalten. Die erzielten Bewertungen bzw. Eigenvektoren sind wie folgt in der Tabelle 7.

Tabelle 7: Eigenvektoren von Faktoren

Faktorcode	Faktoren	Eigenvektor
F01	Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	0,1252
F02	Jährliche durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	0,2347
F03	Windkapazitätsfaktor	0,2204
F04	Höhe	0,0701
F05	Entfernung von der Siedlung	0,028
F06	Entfernung von der Hauptstraße	0,0366
F07	Erdbebenrisiko	0,0613
F08	Entfernung zum Vogelzugweg	0,0607
F09	Entfernung zur Endemischen Pflanze	0,0541
F10	Entfernung zur Stromleitung	0,1089

Entscheidungsträger sollen sich konsequent verhalten, wenn sie Kriterien vergleichen. Um dies zu messen, muss der Konsistenzfaktor berechnet werden. Wenn der aus den Berechnungen erhaltene Wert unter 0,1 liegt, gilt die erstellte Vergleichsmatrix als konsistent, wie von Saaty angegeben (Saaty, 1987).

In dieser Studie wurde das Eigenvalue durch die Multiplikation der Vergleichsmatrix mit dem Eigenvector erhalten. Durch die Division des Eigenvalues durch den Eigenvector ergibt sich das λ_{max} Ergebnis. In diesem speziellen Fall wurde der λ_{max} Wert als 10,3525 berechnet. Da es in der Anwendung 10 verschiedene Multiplikatoren gibt, wird die Konstante 1,49 angenommen. Der CI-Wert wurde durch diese Konstante dividiert und der Wert 0,0262 erhalten. Da dieser Wert (CR) kleiner als 0,1 ist, kann man sagen, dass die Gewichte konsistent sind.

3.3. Sortierung von Standorten mit TOPSIS

Die Werte der Standorte gemäß den Faktoren sind in der folgenden Tabelle 8 angegeben.

Tabelle 8: Werte von Orten nach Faktoren

Größe der Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Die jährliche durchschnittliche Windgeschwindigkeitsverteilung	6	7,5	6	5	6	5	5	7	7	5
Jährliche durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte	100	400	100	100	100	100	100	400	300	100
Windkapazitätsfaktor	35	60	35	25	30	30	25	40	35	25
Höhe	35	761	113	142	116	25	78	228	153	127
Entfernung von der Siedlung	3,6	3,4	1,4	2,2	1,1	4	0,8	2,5	2	1,4
Entfernung von der Hauptstraße	0,8	6,5	0,8	8,9	1,1	0,1	5,3	2	1,4	0,1
Erdbebenrisiko	1	1	1	2	3	2	3	4	3	3
Entfernung zum Vogelzugweg	1	2	1	2	3	4	3	5	2	1
Entfernung zur Endemischen Pflanze	4	4	1	5	4	2	5	5	3	4
Entfernung zur Stromleitung	7	4	1,7	8,5	16	0,1	0,1	0,1	1,1	0,8

Nachdem diese Matrix normalisiert wurde, wurde eine neue Matrix erhalten, indem die aus dem AHP-Ergebnis erhaltenen Werte multipliziert wurden. In dieser Matrix wurden in jeder Spalte Minimal – und Maximalwerte ermittelt; Die Differenz zwischen diesen minimal und maximal Werten und den Werten in der Matrix wurde mit Euklidisch berechnet. Die PI-Werte der Positionen wurden durch Berechnung zwischen den beiden Werten erreicht. Die erreichten PI-Werte lauten wie folgt.

Tabelle 9: PI Werte von Orten

Ort	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PI	0,330	0,780	0,441	0,266	0,179	0,462	0,452	0,714	0,603	0,451

Ein hoher PI-Wert zeigt an, dass der Standort am besten geeignet ist. Nach den Berechnungen kann gesagt werden, dass der Standort 2, der 22 km von Şarköy entfernt liegt, der geeignetste Punkt unter den Standorten für die Installation der Windturbinen ist. Als weitere beste Plätze wurden Standort 8 genauer gesagt Standort 9 ermittelt (Tabelle 9).

4. Fazit

Steigender Energiebedarf, mangelnde Nachhaltigkeit fossiler Brennstoffe und Preisschwankungen bei nicht erneuerbaren Energiequellen wie Erdgas und Öl haben die Menschen zu erneuerbaren Energiequellen gedrängt. Windenergie ist eine natürliche Ressource und hat unbegrenztes Potenzial. Diese Energie kann mithilfe von Windkraftanlagen in elektrische Energie umgewandelt werden. Die Türkei hat aufgrund ihrer geopolitischen Lage, die Wind empfängt, ein sehr hohes Windenergiepotenzial. Nicht nur unter Berücksichtigung der Gewinnspanne; Energieeffizienz und Ökobilanz sollten auch bei der Windinstallation eine wichtige Rolle spielen.

Beim Scannen der Literatur wurde festgestellt, dass eine solche Studie für die Provinz Tekirdağ nicht durchgeführt wurde, und es wurde versucht, diese Lücke in der Literatur zu schließen. In der Studie wurden Informationen über Windkraftanlagen gegeben und dem Leser Informationen über die aktuelle Situation der Türkei und Tekirdağ vermittelt. Dann wurden 10 Punkte ermittelt, die für eine Windinstallation in Tekirdağ geeignet sind, und eine Rangfolge unter diesen 10 Punkten erstellt, dank zehn verschiedener Faktoren, die zuvor bestimmt und von Experten gewichtet wurden. Nach den Ergebnissen der AHP-Methode wurde der wichtigste Faktor als F02 (Jährliche durchschnittliche Verteilung der Windenergiedichte) mit 0,2347 berechnet. Als Ergebnis wurde denn bestimmt, dass der am besten geeignete Punkt unter diesen bestimmten Punkten der Punkt war, der 22 km vom Bezirk Şarköy entfernt ist. Als dieser Punkt und seine Umgebung untersucht wurden, wurde festgestellt, dass ein weiteres Kraftwerk in 2 km Entfernung errichtet wurde. Dies ist ein Beweis dafür, dass die Studie eine konsistente Studie ist.

Diese Forschung soll als Leitfaden für zukünftige Forschungen dienen. Die Provinz Tekirdağ, die ein hohes Potenzial für die Installation von Windkraftanlagen hat, sollte ihr Potenzial erreichen. Abhängig von den ermittelten Faktoren und den verwendeten Methoden können die Faktoren in zukünftigen Studien erhöht werden. Überdies kann eine detailliertere Untersuchung durchgeführt werden, indem die Zahl der Experten erhöht wird. Darüber hinaus ist eine periodische Aktualisierung der aktuellen Stromerzeugungs – und Windkraftanlageninformationen erforderlich. AHP – und TOPSIS-Methoden können für Gebiete ähnlich der Provinz Tekirdağ verwendet werden.

Literatur

- Abdel-Basset, M., & Mohamed, R. (2020). A novel plithogenic TOPSIS-CRITIC model for sustainable supply chain risk management. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119586.
- Ali, S., Lee, S. M., & Jang, C. M. (2017). Determination of the most optimal on-shore wind farm site location using a GIS-MCDM methodology: Evaluating the case of south korea. *Energies*, 10(12), 2072.
- Awasthi, S. R. (2018). *Wind power: practical aspects*. The Energy and Resources Institute (TERI).
- Aydın, L., & Acar, M. (2011). Economic impact of oil price shocks on the Turkish economy in the coming decades: A dynamic CGE analysis. *Energy Policy*, 39(3), 1722-1731.
- Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Jensen, J. P. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111847.

- Benli, H. (2013). Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies. *Renewable Energy*, 50, 33-46.
- Bıçakçı, E., Balabanlı, C., & Emrah, A. (2023). Tarım ve Mera Alanlarında Rüzgâr ve Güneş Enerji Sistemleri Kurulması Hakkında Değerlendirmeler. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 700-712.
- Chang, C. W., Wu, C. R., Lin, C. T., & Chen, H. C. (2007). An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine. *Computers & Industrial Engineering*, 52(2), 296-307.
- Chaouachi, A., Covrig, C. F., & Ardelean, M. (2017). Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*, 103, 179-192.
- Chodha, V., Dubey, R., Kumar, R., Singh, S., & Kaur, S. (2022). Selection of industrial arc welding robot with TOPSIS and Entropy MCDM techniques. *Materials Today: Proceedings*, 50, 709-715.
- Cunden, T. S., Doorga, J., Lollchund, M. R., & Rughooputh, S. D. (2020). Multi-level constraints wind farms siting for a complex terrain in a tropical region using MCDM approach coupled with GIS. *Energy*, 211, 118533.
- Çelik, İ., Yıldız, C., & Şekkeli, M. (2018). Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6(4), 898-908.
- Değirmenci, S., Bingöl, F., & Sofuoğlu, S. C. (2018). MCDM analysis of wind energy in Turkey: decision making based on environmental impact. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 19753-19766.
- Dincer, F. (2011). The analysis on wind energy electricity generation status, potential and policies in the world. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9), 5135-5142.
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Kar, A. K., Baabdullah, A. M., Grover, P., Abbas, R., ... & Wade, M. (2022). Climate change and COP26: Are digital technologies and information management part of the problem or the solution? An editorial reflection and call to action. *International Journal of Information Management*, 63, 102456.
- Elhosiny, A. M., El-Ghareeb, H., Shabana, B. T., & AbouElfetouh, A. (2021). A hybrid neutrosophic gis-mcdm method using a weighted combination approach for selecting wind energy power plant locations: A case study of sinai peninsula, egypt. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 21(1), 12-28.
- Enerji Atlası (2023). *Tekirdağ Rüzgar Santralleri*. <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar-enerjisi-haritasi/tekirdag> Abgerufen am: 01.12.2023
- 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.
- Fetanat, A., & Khorasaninejad, E. (2015). A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran. *Ocean & Coastal Management*, 109, 17-28.
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: trends and research challenges. *Production planning & control*, 23(2-3), 83-104.
- Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006). Managing risks in the supply chain using the AHP method. *The International Journal of Logistics Management*, 17(1), 114-136.
- Genç, M. S., Karipoğlu, F., Koca, K., & Azgın, Ş. T. (2021). Suitable site selection for offshore wind farms in Turkey's seas: GIS-MCDM based approach. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1213-1225.
- Guo, S. J., Chen, J. H., & Chiu, C. H. (2017). Fuzzy duration forecast model for wind turbine construction project subject to the impact of wind uncertainty. *Automation in Construction*, 81, 401-410.

- Gupta, A. K. (2015). Efficient wind energy conversion: Evolution to modern design. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(5), 051201.
- Höfer, T., Sunak, Y., Siddique, H., & Madlener, R. (2016). Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen. *Applied energy*, 163, 222-243.
- Hwang, C. L., Yoon, K., Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-art Survey*, 58-191.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Turkey 2021 – Energy Policy Review*. <https://www.iea.org/reports/turkey-2021> Abgerufen am: 06.11.2023
- Ilić, B., Stojanovic, D., & Djukic, G. (2019). Green economy: mobilization of international capital for financing projects of renewable energy sources. *Green Finance*, 1(2), 94-109.
- Jiang, Z. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110576.
- Koç, T. (1998). Ayvalık'ta Rüzgar Enerjisi Potansiyeli. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1(2), 1-18.
- Koç, E., & Burhan, H. A. (2015). An application of analytic hierarchy process (AHP) in a real world problem of store location selection. *Advances in Management and Applied Economics*, 5(1), 41.
- Meshram, S. G., Alvandi, E., Meshram, C., Kahya, E., & Fadhil Al-Quraishi, A. M. (2020). Application of SAW and TOPSIS in prioritizing watersheds. *Water Resources Management*, 34, 715-732.
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897.
- Ministerium für Energie und natürliche Ressourcen (MENR). (2023a). *Elektrik*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> Abgerufen am: 01.12.2023
- Ministerium für Energie und natürliche Ressourcen (MENR). (2023b). *Rüzgar*. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> Abgerufen am: 01.12.2023
- Nazim, M., Mohammad, C. W., & Sadiq, M. (2022). A comparison between fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods to software requirements selection. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 10851-10870.
- Özkan, A., Yeter, U., & Gedikli, E. (2022). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinde rüzgâr gücü ve Danimarka örneği. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 22(2), 26-35.
- Ritschel, U., Warnke, I., Kirchner, J., & Meussen, B. (2003, November). Wind turbines and earthquakes. In *2nd World Wind Energy Conference* (pp. 1-8). Cape Town,, South Africa: World Wind Energy Association.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Saraswat, S. K., Digalwar, A. K., Yadav, S. S., & Kumar, G. (2021). MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*, 169, 865-884.
- Sonar, H. C., & Kulkarni, S. D. (2021). An integrated AHP-MABAC approach for electric vehicle selection. *Research in Transportation Business & Management*, 41, 100665.
- Tripathi, L., Mishra, A. K., Dubey, A. K., Tripathi, C. B., & Baredar, P. (2016). Renewable energy: An overview on its contribution in current energy scenario of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 226-233.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB). (2023). *Rakamlarla Rüzgar Enerjisi*. <https://www.tureb.com.tr/>
- Urfalı, T., & Eymen, A. (2021). CBS ve AHP yöntemi yardımıyla Kayseri İli Örneğinde rüzgâr enerji santrallerinin yer seçimi. *Geomatik*, 6(3), 227-237.

- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., & Jijón, D. J. (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. *Renewable energy*, 109, 275-286.
- Villacreses, G., Jijón, D., Nicolalde, J. F., Martínez-Gómez, J., & Betancourt, F. (2022). Multicriteria Decision Analysis of Suitable Location for Wind and Photovoltaic Power Plants on the Galápagos Islands. *Energies*, 16(1), 29.
- Wątróbski, J., Bączkiewicz, A., Ziemia, E., & Sałabun, W. (2022). Sustainable cities and communities assessment using the DARIA-TOPSIS method. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103926.
- 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).
- Wiatros-Motyka, M. (2023). *Global Electricity Review 2023*. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> Abgerufen am: 05.12.2023
- Yıldırım, U., Gazibey, Y., & Güngör, A. (2016). Niğde ili rüzgar enerjisi potansiyeli. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 37-47.
- Zaidan, A. A., Zaidan, B. B., Al-Haiqi, A., Kiah, M. L. M., Hussain, M., & Abdulnabi, M. (2015). Evaluation and selection of open-source EMR software packages based on integrated AHP and TOPSIS. *Journal of biomedical informatics*, 53, 390-404.
- Zhang, D., Xu, Z., Li, C., Yang, R., Shahidehpour, M., Wu, Q., & Yan, M. (2019). Economic and sustainability promises of wind energy considering the impacts of climate change and vulnerabilities to extreme conditions. *The Electricity Journal*, 32(6), 7-12.

WIND POWER PLANT LOCATION SELECTION: A CASE ANALYSIS FROM TÜRKİYE

Seda Deniz ÖZDOĞAR* 
Yunus Emre VAN** 
Mehmet Ali TAŞ*** 
Batin Latif AYLAK**** 

Consumption has increased rapidly due to the increase in the global population and economic growth. The increase in consumption has also led to an increase in energy demand. This situation necessitates alternative solutions such as increasing energy production and using energy more efficiently. Investments in renewable energy sources are therefore encouraged. The widespread use of renewable energy sources is critical in terms of its impact on nature. However, the sustainability and environmental impacts of the energy sector should also be taken into account when developing these practices. In this respect, various sustainable energy sources such as solar, biomass and geothermal can be utilized. One of the most promising of these sources is wind energy. Investments in wind energy and its utilization capacities are rising worldwide. In 2021, electricity generation from renewable energy sources increased by nearly 7% to a record high of 522 TWh, with wind and solar technologies accounting for nearly 90% of this growth. The share of renewables in global electricity generation reached 28.7% in 2021 after a modest growth of 0.4%. The European Union (EU) produced 22% of its electricity from wind and solar in 2022. Seven EU countries, including Spain (33%), Germany (32%) and the Netherlands (32%), generated around a third or more of their electricity from wind and solar in 2022. Turkey (15%) is above the global average. Three of the five largest wind and solar producers in the world are located in Asia.

* Eng., Specialist for Supplier Management and Material Supply at Mercedes-Benz Türk, İstanbul, E-mail: e180502006@stud.tau.edu.tr, ORCID ID: 0009-0008-5096-0452

** Grad. Stud., Julius-Maximilians-University, Würzburg, E-mail: e170502014@stud.tau.edu.tr, ORCID ID: 0009-0009-2157-5034

*** Re. As., Turkish-German University, 34820 Beykoz, İstanbul, E-mail: mehmetali.tas@tau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-3333-7972

**** Asst. Prof., Turkish-German University, 34820 Beykoz, İstanbul, E-mail: batin.latif@tau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-0067-1835

Türkiye is recognized as one of the most suitable countries for wind energy potential due to its location. It can be said that Türkiye's geopolitical situation and favorable radiation conditions are below its potential. Compared to other countries, it has the potential to catch up with other countries and improve their production. The necessary investments should be made to maximize Türkiye's potential and the quality of technology and infrastructure should be improved. According to 2021 data, the number of installed wind power plants in Türkiye is 273. These plants have a total of 3983 turbines. The total installed capacity of these power plants is 11101.82 MWe. Looking at the cumulative installation distribution of these power plants by provinces, İzmir ranks first with 1886.70 MWe. After İzmir, Balıkesir, Çanakkale, Manisa, İstanbul, Kırklareli, Hatay, Afyon, Aydın and Konya follow İzmir. The cumulative installed capacity (MWe) of Tekirdağ is 187.95 MWe. There are a total of 12 power plants in Tekirdağ. Balabanlı wind power plant has the highest installed capacity (50.60). Although the Balabanlı plant was built in 2014, the plants built after 2014 have a value lower than 50.60 MWe. According to 2021 figures, eleven more plants are under construction in Tekirdağ. The total electricity capacity of the wind power plants built in Tekirdağ will be 37 MWe.

This study aims to propose a possible location for wind power plants in Tekirdağ based on multi-criteria decision criteria, considering the current situation of wind power plants in Türkiye. For this purpose, the site selection of the proposed wind power plant in Tekirdağ, one of the provinces with the highest potential in Türkiye, is addressed with multi-criteria decision criteria approaches. In the study, Analytical Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods, which are widely used in the literature, were used in an integrated manner. Ten factors that can be considered in wind farm siting were identified through a literature review and feedback from experts, and the weights of these factors were calculated using the AHP method. The identified factors in the study are: Annual average wind speed distribution, Annual average distribution of wind energy density, Wind capacity factor, Height, Distance to settlements, Distance to main street, Earthquake risk level, Distance to bird migration route, Distance to endemic plants and Distance to power lines. The weights of the criteria were calculated with the AHP method. According to the results obtained, the most important factors were found to be the annual average distribution of wind energy density (0.2347), wind capacity factor (0.2204) and annual average wind speed distribution (0.1252). Since the calculated consistency values are considerably smaller than 0.1, the results are considered acceptable. With the help of weights and the TOPSIS method, ten sites in Tekirdağ were listed in terms of wind farm viability. As a result of the implementation of the TOPSIS method, the most suitable location for the installation of a wind power plant in Tekirdağ is 22 km away from Şarköy district. It is thought that the study can be expanded by comparing the findings obtained with evaluations involving different cities in Türkiye. In addition, the results of different multi-criteria decision making approaches and AHP-TOPSIS methodology can be compared. The study is expected to contribute to sustainable energy analysis studies in the future.