

FUCOM subjektif ağırlıklandırma yöntemi ile rüzgâr çiftliği yer seçimini etkileyen faktörlerin analizi

An analysis of the factors affecting wind farm site selection through FUCOM subjective weighting method

Fatih ECER* 

¹İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye.
fatihecer@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 01.02.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 05.08.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.08.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.93271
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Temiz bir enerji kaynağı olan ve doğal dengeyi bozmayan rüzgâr enerjisi, günümüzün en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir. Bu çalışmada rüzgâr çiftlikleri için uygun yer tespitinde kullanılan faktörler, oldukça yeni bir subjektif ağırlıklandırma yöntemi olan FUCOM (Full Consistency Method-Tam Tutarlılık Yöntemi) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. FUCOM, doğrusal programlama temelli bir yöntemdir ve diğer ağırlıklandırma yöntemlerinden daha az ikili karşılaştırmaya ihtiyaç duyar. Çalışmadaki değerlendirme modeli, üç temel boyutu ve on iki faktörü dikkate almaktadır. Bulgular, bir rüzgâr çiftliği sahasının tercih edilmesinin büyük ölçüde rüzgâr potansiyeline ve yerleşim yerlerine olan uzaklığına bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca önerilen yöntemin tutarlılığını ve kullanılabilirliğini göstermek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları rüzgâr enerjisine yönelik politika belirlemede kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr çiftliği, Rüzgâr çiftliği yer seçimi, Sürdürülebilirlik, FUCOM, Çok kriterli karar verme.

Abstract

Wind energy, which is a clean energy source and does not disrupt the natural balance, is today's one of the most popular renewable energy sources. In this paper, the factors which are utilized to determine a suitable site for wind farms have been analyzed by using the FUCOM (Full Consistency Method) method which is a relatively new subjective weighting method. FUCOM is a linear programming-based method and needs less pairwise comparisons than other weighting methods. The evaluation model in the study takes three main dimensions and twelve factors into consideration. The findings showed that the preference of a wind farm site depends largely on the wind potential and distance from residential areas. Furthermore, a sensitivity analysis was performed to demonstrate the consistency and usefulness of the suggested method. The results of this study could be used to determine the wind energy policy.

Keywords: Wind farm, wind farm site selection, Sustainability, FUCOM, Multiple criteria decision making.

1 Giriş

Enerji, bir toplumun sürdürülebilir kalkınması ve refahı için gerekli olan stratejik bir konudur. Halen dünya enerji ihtiyacının %80'i fosil yakıtlardan (petrol, kömür, doğalgaz) karşılanmaktadır [1]. Son yıllarda artan enerji talebi, ülkelerin temiz ve sürdürülebilir enerji üretimleriyle enerji açığını karşılama düşüncesinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş, hidro, biokütle, jeotermal, dalga, gelgit) enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanımı, çevre dostu olmaları, modüler özellikleri ve geri dönüştürülebilir yapıları nedeniyle çabuk kabul görmüş ve dünya geneline yaygınlaşmalarını sağlamıştır. Geleneksel enerji üretim araçlarına kıyasla rekabetçi maliyeti, gelişmiş teknolojisi ve dünyanın neredeyse tamamında bulunması nedeniyle rüzgâr enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla tercih edilenlerden birisidir [2]. İklim değişikliğini tetikleyen ve doğal dengeyi bozan geleneksel elektrik üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisinin çevre üzerinde çok az olumsuz etkisi vardır (görsel etkiler, rüzgâr türbinlerine çarpan parçaların kayıp, gürültünün hayvanlar üzerindeki olumsuz etkileri, habitatların kaybolması veya zarar görmesi) [1].

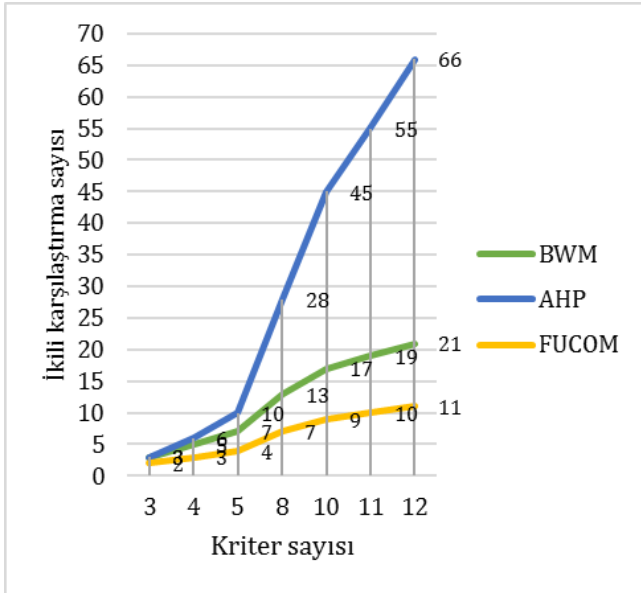
Türkiye, Asya ile Avrupa arasında bir enerji koridoru olmanın yanı sıra, artan kentsel nüfus, yerleşim alanlarının yeniden

yapılandırılması ve gelişmekte olan sanayileşme nedeniyle enerjiye fazlasıyla ihtiyaç duyan bir ülkeye dönüşmüştür. Bunun doğal sonucu olarak yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Dünyada enerji kaynağı temini gerek fosil yakıtların gelecekte tükeneceği gerçeğinden gerekse de dünyadaki çevresel farkındalığın artmasından dolayı fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymaktadır. Türkiye için daha fazla yenilenebilir enerji demek aynı zamanda sera gazı emisyonlarının azalması ve ithal enerjiye daha az bağımlı hale gelmesi demektir. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları bakımından oldukça şanslı bir ülkedir, bu nedenle bu kaynakların etkin şekilde kullanılması büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda ülkemizin rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu farklı bölgelerinde artan sayıda rüzgâr çiftliklerinin kurulduğu ve elektrik enerjisi üretildiği gözlemlenmektedir [3].

Rüzgâr çiftlikleri için uygun yer seçimi, birbiriyle çelişen pek çok kriterin birlikte analizini gerektiren karmaşık bir konudur. Rüzgâr çiftliklerinin ideal yerlerinin belirlenmesinde genellikle sadece ekonomik faktörlerin dikkate alındığı görülmektedir. Oysaki ekonomik faktörlerin yanı sıra çevresel ve sosyal faktörlerin de dikkate alınmasıyla daha gerçekçi ve sürdürülebilir çözümlere ulaşılabilir. Dolayısıyla bu çalışma sürdürülebilirliğin üç ana unsuru olan ekonomik, çevre ve sosyal faktörleri kapsayacak şekilde hazırlanmış ve buna göre değerlendirmeler yapılmıştır. Literatürde rüzgâr çiftliklerinin

*Yazışılan yazar/Corresponding author

yerlerini belirlemeye yönelik çalışmalarda çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [1],[2],[4]-[9]. Bu çalışmanın amacı rüzgâr çiftliklerinin yerlerinin belirlenmesinde etkili olan faktörlerin önem düzeylerinin belirlenmesidir. Bu bağlamda oldukça yeni bir ÇKKV yöntemi olan ve kriter ağırlıklarının subjektif olarak belirlenmesinde kullanılan FUCOM yönteminden yararlanılmıştır. FUCOM yöntemi tıpkı BWM (best-worst method) [10],[11], SWARA (step-wise weight assessment ratio analysis) [12],[13] ve AHP (analytical hierarchy process) [14]-[16] yöntemleri gibi karar problemlerinde en uygun alternatifin seçiminde yararlanılan kriterlerin ağırlıklarının subjektif olarak belirlenmesinde kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Diğer ağırlık belirleme yöntemlerine göre daha az sayıda ikili karşılaştırma gerektirmesi, anlaşılmasının ve uygulanmasının kolay olması, matematiksel geçişlilik özelliğini barındırması ve yoğun ikili karşılaştırmalar neticesinde sıklıklar karşı karşıya kalınan tutarsızlık sorununu ortadan kaldırması, yöntemin karar vericilere sağladığı en önemli avantajlar olup aynı zamanda FUCOM'un bu çalışmada tercih edilme nedenleridir (Şekil 1).



Şekil 1. FUCOM ile diğer yöntemlerin ihtiyaç duydukları ikili karşılaştırma sayıları (Yazar tarafından geliştirilmiştir).

Figure 1. The number of pairwise comparisons required by FUCOM and other methods (Developed by author).

Bu bağlamda, çalışmanın aşağıdaki boşlukları dolduracağı ve böylece literatüre katkı sağlayacağı söylenebilir:

- 1) FUCOM yönteminin ilk kez yenilenebilir enerji alanına ilişkin bir karar probleminde kullanılması,
- 2) Rüzgâr çiftliklerinin yerlerinin belirlenmesinde sürdürülebilirlik çerçevesinde bir değerlendirmenin yapılması.

Çalışma şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümünde ilgili literatüre yer verilmiştir. Üçüncü bölüm, çalışmanın amaçları doğrultusunda yararlanılan kriterleri açıklamak için hazırlanmıştır. Sonraki bölümde FUCOM yöntemi tanıtılmıştır. Beşinci bölümde yapılan uygulama anlatılmış ve yöntemin kullanılabilirliğini ve tutarlılığını göstermek amacıyla bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Altıncı bölüm tartışmaya, son bölüm ise sonuç, sınırlılıklar ve önerilere ayrılmıştır.

2 Literatür incelemesi

Çalışmada rüzgâr çiftlikleri için en ideal yerin belirlenmesinde yararlanılacak kriterlerin tespiti amacıyla kapsamlı bir literatür taraması ve alanında uzman kişilerin görüşlerinden faydalanılmıştır. Rüzgâr çiftliklerinin kuruluş yerlerine ilişkin yapılan literatür taramasında yararlanılan ve aynı zamanda bu çalışmada dikkate alınan kriterlere ilişkin özet bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Ali ve diğ. [4] Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve AHP kullanarak Tayland'da rüzgâr çiftlikleri için ideal yer belirlemiştir. Çalışmalarında fizyografik, çevresel ve ekonomik ana kriterlerinden oluşan 12 kriteri kullanarak analizler yapmışlardır. Ayodele ve diğ. [2] Nijerya'daki uygun rüzgâr çiftliği sahalarını belirlemek için, CBS temelli aralık tip-2 bulanık AHP yöntemini önermiş ve uygulamışlardır. Yazarlar bu amaçla beş kriterden yararlanmışlardır. Azizi ve diğ. [8] CBS temelli ANP ve DEMATEL yöntemlerinden yararlanarak en uygun rüzgâr çiftliği yerine karar verdikleri çalışmalarında kriterler arası ilişkileri belirlemek için DEMATEL yöntemini, kriter ağırlıklarını bulmak için ise ANP yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca ekonomik, çevre ve teknik ana kriterleri çerçevesinde 13 kriterden faydalanmışlardır. Sonuç olarak yer belirlemede en önemli kriterin rüzgâr potansiyeli olduğu tespit edilmiştir. Bennui ve diğ. [9] Tayland'da en uygun rüzgâr çiftliği konumunu belirlemek için CBS temelli AHP yöntemini kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda rüzgâr potansiyeli ile yüksekliğin ideal konum için en belirleyici özellikler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bili ve Vagiona [5], CBS temelli AHP yöntemi kullanarak 21 kriter çerçevesinde en iyi rüzgâr çiftliği konumunu belirlemeye çalışmışlardır. Daneshvar Rouyendegh ve diğ. [6] sezgisel bulanık TOPSIS yöntemi ile Türkiye'deki alternatif rüzgâr çiftlik alanlarını değerlendirmişlerdir. Bu amaçla dört boyut çerçevesinde 10 kriter kullanmışlardır. Gigovic ve diğ. [1] CBS temelli DEMATEL-ANP-MABAC entegre yöntemini kullanarak Sırbistan'da rüzgâr çiftlikleri için en uygun yerleri belirlemiştir. Ekonomik, sosyal ve çevre boyutlarında 11 kriterin kullanıldığı çalışmada çevre boyutu en önemli boyut olarak, rüzgâr ise en önemli kriter olarak tespit edilmiştir. Noorollahi ve diğ. [17] 13 kriterden faydalanarak İran'daki alternatif rüzgâr çiftliği alanlarını CBS temelli ÇKKV ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada her kriterin eşit önem düzeyine sahip olduğu kabul edilerek analizler yapılmıştır. Solangi ve diğ. [7] faktör analizi, AHP ve bulanık TOPSIS kullanarak Pakistan'daki en uygun rüzgâr çiftliği yerini belirlemiştir. Yazarlar ekonomik, çevre, teknik, politik ve sosyal boyutta yer alan 16 kriterden yararlanmışlardır. Çalışmanın sonucunda arazi örtüsünün en önemli kriter olduğu belirlenmiştir. Talinli ve diğ. [18] bulanık AHP yöntemi ile uygun rüzgâr çiftliği yeri belirlemeye çalışmışlar ve bu amaçla dört boyutta toplam 14 kriterden yararlanmışlardır. Çalışmanın sonucunda çevre boyutun yer seçiminde dikkate alınması gereken en önemli boyut olduğu belirlenmiştir. Tegou ve diğ. [19] CBS ve AHP yöntemini kullanarak Yunanistan'daki rüzgâr çiftliklerinin yerlerini değerlendirmişlerdir. 10 kriterin ekonomik, teknik ve çevre boyutları çerçevesinde kullanıldığı çalışmanın sonucunda rüzgâr çiftliği yer seçiminde rüzgâr potansiyelinin en fazla dikkate alınması gereken faktör olduğu belirlenmiştir. Son olarak, Atıcı ve diğ. [3] en uygun rüzgâr çiftliği yerini belirlemek amacıyla CBS temelli AHP ve ELECTRE yöntemlerinden yararlanmışlardır. 13 kriterin kullanıldığı çalışmada kapasite en önemli kriter olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Rüzgâr çiftliklerinin yerlerini değerlendirmede yararlanılan kriterler.

Table 1. Criteria used in evaluating the locations of wind farms.

	Enerji nakil hatlarına uzaklık	Ulaşım ağlarına yakınlık	Kurulum ve bakım maliyeti	Eğim	Yükseklik	Fay hatlarına uzaklık	Korunmuş alanlara uzaklık	Arazi örtüsü	Rüzgâr potansiyeli	Yerleşim yerlerine uzaklık	İşgücüne yakınlık	İstihdama katkı
[4]		•		•	•			•		•		
[2]	•	•		•					•	•		
[8]		•		•	•	•	•	•	•	•		
[9]		•			•		•		•	•		
[5]	•	•					•		•	•		
[6]	•		•					•	•	•		•
[1]	•	•		•			•	•	•	•	•	
[17]	•	•		•	•	•	•	•	•	•		
[7]	•	•	•					•	•	•	•	•
[18]	•		•	•				•	•	•		
[3]	•	•		•	•	•	•			•		
[19]	•	•		•			•	•	•	•		
Bu çalışma	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Oldukça yeni bir yöntem olmasına rağmen FUCOM yönteminin araştırmacılar tarafından giderek daha fazla ilgi gördüğü rahatlıkla söylenebilir. Örneğin Pamucar ve diğ. [20] yolculuk talep yönetiminde, Stevic ve Brkovic [21] insan kaynakları yönetiminde, Cao ve diğ. [22] güneş paneli enerji sistemleri için müteahhit seçiminde, Zagradjanin ve diğ. [23] ise robot sistemlerinin planlanmasında FUCOM yönteminden faydalanmışlardır.

İlgili literatür incelendiğinde rüzgar çiftliği yer seçiminde etkili olan faktörlerin önem ağırlıklarının çeşitli ÇKKV yöntemleriyle tespit edilmeye çalışıldığı ancak oldukça yeni bir sübjektif yöntem olan FUCOM yönteminin bu amaçla henüz kullanılmadığı görülmüştür. Sonuç itibarıyla FUCOM yönteminin daha az sayıda ikili karşılaştırmayla tam tutarlılığına ulaşabilme özelliği sayesinde rüzgar çiftliği yer seçiminde verilecek yanlış kararların önüne geçebileceği düşüncesi, bu çalışmanın hazırlanmasında belirleyici olmuştur.

3 Rüzgar çiftliği yerlerinin belirlenmesinde kullanılan kriterler

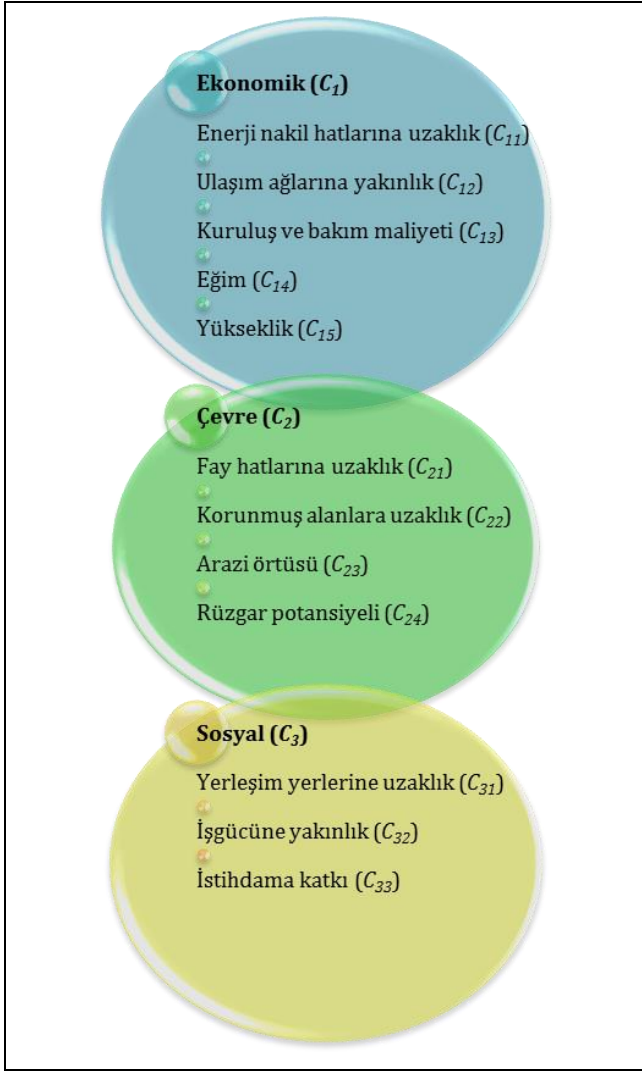
Detaylı literatür taraması ve uzman görüşlerinin alınmasının ardından çalışmada rüzgar çiftliği kuruluş yeri belirlemede sürdürülebilirlik bağlamında göz önünde bulundurulmuş 3 boyut

(ekonomik, sosyal, çevre) ile bunlara ilişkin 12 alt faktör belirlenmiştir. Analizlerde, sürdürülebilirlik boyutları ana kriterler olarak, alt faktörler ise alt kriterler olarak dikkate alınmıştır. Şekil 2'de çalışmada kullanılan ana ve alt kriterler görülmektedir.

3.1 Ekonomik faktörler

Enerji nakil hatlarına uzaklık: Rüzgar çiftliği kuruluş maliyetini düşürme konusunda en önemli konulardan biri, enerjiyi iletmek için altyapı inşa etme maliyetini azaltmaktır. Bu bakımdan konum seçerken mevcut elektrik şebekesinin kullanılabilirliğini ve erişimini göz önünde bulundurmak gerekir [1],[19]. Uzaklık ne kadar fazla olursa, bağlantıyı sağlamak için mevcut hatları büyütme için yeni nakil hatları oluşturma maliyeti de o kadar yüksek olur. Bir rüzgar çiftliği ile enerji nakil hatları arasında 250 m mesafe olması yeterlidir [2],[4],[5],[17].

Ulaşım ağlarına yakınlık: Rüzgar çiftliklerinin gerek kurulum gerekse de bakım işlemlerinin kolayca gerçekleştirilmesi için belirlenen kuruluş yerinin ana yollara ve bağlantı yollarına yakınlığı önemli bir husustur. Nakliye maliyetlerini azaltmak için, kuruluş yeri ile yol mesafesinin mümkün olduğunca küçük olması tercih edilir [1],[2],[4],[5].



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ana ve alt kriterler.

Figure 2. Main and sub-criteria used in the study.

Ulaşım ağının iki açıdan özel bir önemi vardır. Birincisi türbinlerin anayollara çok yakın olması yüksek sesleri nedeniyle hem karayolu taşımacılığını etkiler hem de türbin kanatları nedeniyle karayolları gölgelenir ve trafik tehlikeye düşer. Buna ek olarak, ekipmanın muazzam ağırlığı nedeniyle, rüzgar santrallerinin yollara optimal uzaklığı büyük önem taşır, çünkü rüzgar türbinlerinin kurulması için nakliye masrafları oldukça yüksektir [8]. Sonuçta rüzgâr çiftliklerinin ulaşım ağlarına olan uzaklığının 500 m ile 10 km arasında olması önerilmektedir [7],[17],[24].

Kurulum ve bakım maliyeti: Rüzgârdan elektrik üretimi, elektriğin son kullanıcıya aktarılması için iletim hattının erişilebilirliği, yol tesisleri, su temini ve bölgedeki diğer bazı yerel altyapılar için gelişmiş bir altyapı sistemi gerektirir [7]. Bu bakımdan kurulum ve yıllık bakım maliyetleri göz ardı edilmemesi gereken kriterlerdir [6].

Eğim: Tesisler ve altyapılar için uygun yerlerin seçimi üzerinde büyük etkisi olan doğal etkenlerden biri de arazi eğimidir. Eğimin yönü ve yüzdesi dikkate alındığında, arazi kullanımı inşaat giderlerini etkileyebilir (yüzey suyu drenajı, arazi tesviyesi vb.) [25]. Ekstra inşaat ve bakım maliyetleri nedeniyle %10'dan daha eğimli arazi, rüzgâr çiftliklerinin gelişimi için

genellikle uygun görülmemektedir [1],[5]. Buna ilave olarak eğim değeri düşük olan alanlar rüzgâr çiftliği için en uygun alanlardır çünkü yüksek eğim yüksek rüzgar türbülansı demektir ve böyle alanlar hem ulaşım hem de enerji üretimi yönünden uygun yerler değildir [2].

Yükseklik: Bölgenin topografyasına bağlı olarak rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü çok değişmektedir [18]. Genel ilke yükseklik artışının bir tesis kurma olasılığını zorlaştırdığıdır [25]. Bu nedenle uygun alanın seçilmesinde, yüksek arazilerden kaçınmak gerekir çünkü bu tür coğrafik alanlarda yatırım maliyetleri artar [9].

3.2 Çevresel faktörler

Korunmuş alanlara uzaklık: Doğa, arkeolojik ve tarihi yerler, turizm alanları, vahşi yaşam ve kültürel miras alanları gibi alanlar rüzgâr çiftliği uygunluk çalışmalarının dışında tutulur [2]. Korunmuş alanlar, jeolojik, biyolojik ve ekosistem çeşitliliği [1] ile dünyanın doğal ve kültürel kaynaklarının devamlılığında önemli bir rol oynamaktadır [8]. Bu bakımdan kurulacak olan rüzgâr çiftliğinin çevreye ve tarihi mirasa zarar vermesine izin verilmemelidir [6]. Rüzgâr çiftliklerinin korunmuş alanlara en az 500 m uzaklıkta olması gerekir [2],[17].

Arazi örtüsü: Orman, ormanlık alanlar ve sulak alanlar gibi belirli arazi örtüleri rüzgâr çiftliği için uygun yerler değildir. Çünkü ormanlık alanlar ve ağaçlar rüzgâr akışını engeller, sulak alanlar ise elektrik tesisatı kurulumu için uygun değildir [2]. Ayrıca biyolojik çeşitliliği ve doğal rezervleri korumak adına sulak alanlar ve ormanlar ile rüzgâr santralleri arasında bir tampon bölge gereklidir [4]. Bu nedenle rüzgâr çiftliklerinin ormanlık ve sulak alanlara 2000 m'den yakın olması uygun değildir [17].

Fay hatlarına uzaklık: Diğer inşaat projelerinde olduğu gibi rüzgâr santralleri, deprem faylarının neden olduğu tehlikeli sonuçlardan kaçınmak için fay hatlarından uzak olmalıdır [8]. Uzaklığın en az 500 m olması gerektiği söylenebilir [17]. Bir başka ifadeyle faylara uygun bir mesafeye sahip olmak, rüzgâr santrallerinde mevcut tesislerin güvenliğini korumak için gerekli ve kaçınılmaz bir meseledir [26].

Rüzgâr potansiyeli: Rüzgâr potansiyeli, ortalamanın üzerinde bir rüzgâr hızı ve rüzgârdan maksimum fayda sağlama anlamına gelir [6]. Bir rüzgâr çiftliği kurmadan önce doğru rüzgâr verilerini elde etmek çok önemlidir [7]. Coğrafi bir bölgede rüzgâr potansiyelini hesaplamak rüzgâr enerjisine, enerjinin değerlendirilmesine ve diğer özelliklerine nazaran ilk ve en temel konudur [7],[8]. Yıllık rüzgâr hızı ortalaması, rüzgâr enerjisi yoğunluğu ve rüzgârlı günlerin yüzdesi rüzgâr çiftlikleri için konum seçmede çok önemli özelliklerdir [27]. Bir rüzgâr potansiyeli haritasının, rüzgâr çiftliği için alternatif alanların seçiminde önemli bir rol oynadığı ve tesislerin finansal değerlendirmelerini destekleyen en önemli kaynak olduğu açıktır [8], [28]. Dolayısıyla bir rüzgâr çiftliği, ortalama rüzgâr hızı gibi yönlerden projenin teknik ve ekonomik fizibilitesini karşılamalıdır [1]. Çünkü rüzgâr hızının daha yüksek olduğu alanlarda daha fazla elektrik üretilebilir [5].

3.3 Sosyal faktörler

Yerleşim yerlerine uzaklık: Gürültü kirliliği, sağlık, estetik ve güvenlik gibi nedenlerden dolayı rüzgâr çiftlikleri, yerleşim alanlarından uzak olmalıdır [6]. Gürültünün etkisi, gölgelerin ve güvenliğin etkisi ve uçan buz parçaları veya hasarlı bir pervaneden kaynaklanan olası yaralanmalar açısından insanlar üzerindeki etkisi de dahil olmak üzere rüzgâr çiftliklerinin

sosyal etkileri çok önemli kısıtlamalar olarak kabul edilmektedir [1]. Olası yerleşim alanlarına rüzgâr türbinlerinin kurulmasının sınırlandırılmasındaki en önemli faktör yüksek sesleridir. Ayrıca, kentnin fiziksel gelişiminin dinamik ve sürekli bir süreç olduğu dikkate alınarak konum belirlenmesinin önemli olduğu söylenebilir. Bu nedenle, yerleşim alanlarında gelecekte yaşanacak gelişmeler göz önüne alınarak çevre araziler değerlendirilmelidir [8],[29]. Tüm bunlara ilave olarak, yapay ortamlar iklim değişikliğine neden olur ve genel olarak yerleşim yerlerindeki rüzgâr hızı diğer bölgelere göre % 25 daha düşüktür [26]. Sonuç olarak rüzgâr çiftliklerinin yerleşim yerlerine olan uzaklığın en az 2000 m olması gerektiği ifade edilebilir [4],[17].

İşgücüne yakınlık: Tesisin mevcut insan kaynağına yakın olması, çalışanların konaklama ve maaşları açısından önemlidir [6]. Rüzgâr çiftliklerinin kurulumu, çalıştırılması, koordine edilmesi ve bakımı için uzman işgücünün olması gereklidir. Seçilecek bölgede böyle bir işgücü potansiyeli varsa o bölgenin seçilmesi çok faydalı olacaktır. Aksi halde çalışanlara eğitim verilebilir ancak eğitim, şirket için ek bir maliyet anlamına gelir [7].

İstihdama katkı: İstihdama katkı, yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği teknolojilerinin kurulmasıyla ilişkili olan sosyo-ekonomik boyuttur. Rüzgâr çiftliği yeri seçimi, o bölgedeki yerel ekonomik gelişime katkıda bulunur, istihdam sağlar ve bölgenin altyapı şartlarını geliştirir [7],[29]. Bu nedenle seçilecek kuruluş yeri, uzun süredir işsiz olan insanlar için istihdam olanaklarının artırılmasına yardımcı olmalıdır [29].

4 FUCOM yöntemi

Oldukça yeni bir ÇKKV yöntemi olan ve sübjektif ağırlıklandırma amacıyla önerilen FUCOM (Full Consistency Method-Tam Tutarlılık Yöntemi), Pamucar ve diğ. [30] tarafından geliştirilmiştir. Doğrusal programlama (DP) temelli model, ağırlık katsayılarının optimal değerlerini sağlaması için gereken iki koşulun sağlanmasını zorunlu kılar. Birinci koşul, kriterlerin ağırlık katsayıları arasındaki ilişkilerin kriterlerin karşılaştırmalı önceliklerine eşit olmasıdır. İkinci koşul ise matematiksel geçişlilik koşullarına dayanılarak tanımlanmaktadır. Kısıtlamaları belirledikten ve modeli çözdükten sonra, optimal ağırlık değerlerine ek olarak, tam tutarlıktan sapma (TTS) elde edilir. TTS derecesi, elde edilen ağırlık katsayılarının kriterlerin tahmini karşılaştırmalı önceliklerinden sapma değeridir. TTS ayrıca elde edilen kriter ağırlıklarının güvenilir olduğunun göstergesidir.

FUCOM'un diğer ağırlıklandırma yöntemlerine (AHP, ANP, BWM vb.) göre temel avantajları şunlardır:

- ✓ Daha az sayıda ikili karşılaştırma ile sonuca ulaşır (n kriter sayısını göstermek üzere sadece n-1 tane ikili karşılaştırma),
- ✓ Kriterlerin tutarlı bir şekilde ikili karşılaştırmasına izin verir,
- ✓ Kriter ağırlıklarının daha güvenilir şekilde hesaplanmasına olanak sağlar.

FUCOM yöntemi aşağıdaki üç adımı kullanarak sonuca ulaşır:

Adım 1. Karar vericiler kriterlerin sıralaması yaparlar. Sıralama, kriterlerin önemine göre yani en fazla önemli görülen

kriterden en az önemli görülen kriterine doğru yapılır. Böylece Eşitlik (1)'de görüldüğü gibi ağırlık katsayılarının beklenen değerlerine göre sıralanmış kriterler elde edilir. Eşitlik (1)'de k, dikkate alınan kriterin derecesini temsil eder.

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (1)$$

Aynı öneme sahip iki veya daha fazla kriterin varlığına dair bir yargı varsa, Eşitlik (1)'deki ">" yerine "=" işareti yazılır.

Adım 2. Karar vericinin tercihlerine dayanarak, sıralanan kriterlerin karşılaştırmalı öncelikleri ($\varphi_{k/(k+1)}$) belirlenir ve değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı öncelik vektörü elde edilir.

$\varphi_{k/(k+1)}$, $C_j(k)$ kriterinin sıralamasının $C_j(k+1)$ kriterinin sıralamasına göre avantajını temsil eder. Böylece, Eşitlik (2)'deki değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı önceliklerinin vektörleri elde edilir:

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \varphi_{3/4}, \dots, \varphi_{k/(k+1)}) \quad (2)$$

Öte yandan FUCOM yöntemi, kriterlerin ikili karşılaştırması için tamsayı, ondalık değerler veya önceden tanımlanmış bir ölçeğin değerleri kullanılarak kriterlerin ikili karşılaştırmasına izin verir.

Adım 3. Son adımda, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerleri yani $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ hesaplanır. Ağırlık katsayılarının nihai değerleri aşağıdaki 2 koşulu sağlamak zorundadır:

Koşul 1. Ağırlık katsayılarının oranı, Adım 2'de tanımlanan gözlemlenen kriterler arasındaki karşılaştırmalı önceliğe ($\varphi_{k/(k+1)}$) eşittir.

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (3)$$

Koşul 2. Ağırlık katsayılarının son değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu sağlamalıdır, yani $\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$. Ayrıca $\varphi_{k/(k+1)} = \frac{w_k}{w_{k+1}}$ ve $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}}$ olduğu için $\frac{w_k}{w_{k+1}} \otimes \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}$ elde edilir. Böylece, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin yerine getirmesi gereken başka bir koşul Eşitlik (4)'teki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (4)$$

Tam tutarlılık, yani minimum TTS (χ), yalnızca geçişliliğe tam olarak uyulduğunda gerçekleşir. Bir başka ifadeyle $\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)}$ ve $\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)}$ koşulları sağlanırsa minimum TTS elde edilir. Bu şekilde maksimum tutarlılık (0.000) sağlanır, yani ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri için TTS değeri $\chi = 0$ 'dır. Koşulların sağlanabilmesi için, ağırlık katsayılarının $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ değerlerinin, χ değerinin minimizasyonu $\left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi$ ve $\left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi$ koşulunun gerçekleşmesi gerekir.

Sonuç olarak, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerini belirlemek için DP modeli Eşitlik (5)'teki gibi tanımlanabilir.

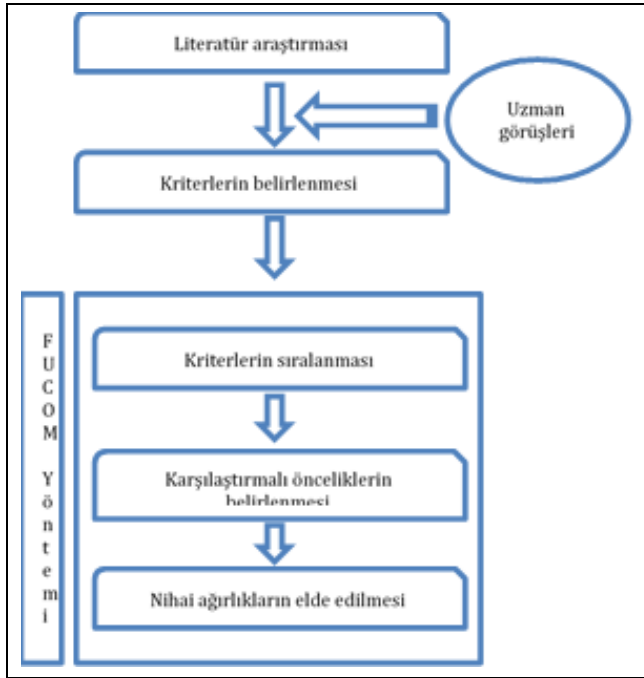
$$\min \chi$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k+1)}} - \varphi_{\frac{k}{k+1}} \right| \leq \chi, \forall j \\ \left| \frac{w_j^{(k)}}{w_j^{(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi, \forall j \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j \end{array} \right. \quad (5)$$

Eşitlik (5)'teki modelin çözülmesi ile değerlendirme kriterlerinin $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ nihai değerleri ve TTS (χ) derecesi elde edilir.

5 Rüzgar çiftliği yerlerinin belirlenmesinde yararlanılan kriterlerin analizi

Rüzgâr çiftliği yerlerinin belirlenmesinde yararlanılan faktörlerin önem düzeylerinin ortaya konulmasına yönelik olarak hazırlanan bu çalışmada sürdürülebilirlik çerçevesinde ekonomik, çevre ve sosyal boyutlar dikkate alınmış olup bu boyutlara ait 12 faktörün ağırlıkları tespit edilmiştir. Araştırmanın akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Akış şeması.

Figure 3. Flowchart.

Bu çalışma için kullanılan karar kriterleri, kapsamlı bir literatür taraması ve üç uzman görüşünün dikkate alınmasıyla belirlenmiştir. Birden fazla uzman karar sürecine dahil edilmesinde amaçlanan, çıkar çatışmalarını ve kişisel önyargıları en aza indirmektir. Seçilen uzmanların tümü yenilenebilir enerji alanına aşina olup rüzgar enerjisi uygulamaları hakkında güçlü bilgi sahibi bir mühendis, bir akademisyen ve bir ekonomisttir.

FUCOM yöntemi ile kriterlerin önem ağırlıkları şöyle bulunmuştur:

Adım 1. Uzmanlar öncelikle karar kriterlerini kişisel düşünce ve tecrübeleri doğrultusunda önem düzeylerine göre sıralamışlardır. Örneğin Uzman 1, ana kriterlerin önem sıralamasının çevre, ekonomi, sosyal olması gerektiğini düşünmüştür. Buna göre Tablo 2'de görüldüğü gibi "çevre >

ekonomi > sosyal" şeklinde yazılmıştır. Aynı uzman, ekonomik ana kriterine ilişkin alt kriterlerin önem sıralamasının "Kuruluş ve bakım maliyeti", "Eğitim", "Ulaşım ağlarına yakınlık", "Enerji nakil hatlarına uzaklık" ve "Yükseklik" şeklinde olması gerektiğini belirtmiş ve bu sıralama ise Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Ana kriterlerin uzman görüşlerine göre sıralanması.

Table 2. Ranking of the main criteria according to expert opinions.

Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
$C_2 > C_1 > C_3$	$C_1 > C_2 > C_3$	$C_2 > C_3 > C_1$

Tablo 3. Alt kriterlerin uzman görüşlerine göre sıralanması

Table 3. Ranking of the sub-criteria according to expert opinions.

Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
$C_{13} > C_{14} > C_{12}$	$C_{14} > C_{15} > C_{13}$	$C_{13} > C_{12} > C_{11}$
$> C_{11} > C_{15}$	$> C_{12} > C_{11}$	$> C_{14} > C_{15}$
$C_{24} > C_{23} > C_{21}$	$C_{24} > C_{21} > C_{22}$	$C_{23} > C_{24} > C_{21}$
$> C_{22}$	$> C_{23}$	$> C_{22}$
$C_{31} > C_{32} > C_{33}$	$C_{32} > C_{31} > C_{33}$	$C_{31} > C_{33} > C_{32}$

** > " daha önemlidir anlamında kullanılmıştır.

Adım 2. Sıralamaların ardından uzmanlar hem ana kriterleri hem de alt kriterleri 1-9 skalasında (1: en düşük, 9: en yüksek) karşılaştırmışlardır. Burada önemle vurgulanması gereken husus, karşılaştırmaların daima en önemli kriterlere göre yapılıyor olmasıdır. Uzmanların ana kriterler için yaptıkları karşılaştırmalar Tablo 4'te, alt kriterler için yaptıkları değerlendirmeler ise Tablo 5'te verilmiştir. Örneğin ana kriterlerin karşılaştırıldığı Tablo 4'te Uzman 1'e göre en önemli ana kriter çevredir. Uzman 1, ayrıca çevrenin ekonomiye göre 2 kat, sosyal özelliklere göre ise 2.5 kat daha önemli olduğunu düşünmektedir.

İkili karşılaştırmaların ardından kriterlerin karşılaştırmalı öncelikleri hesaplanır. Örneğin Uzman 1'in ana kriterlere göre yaptığı karşılaştırmalara göre karşılaştırmalı öncelikler şöyledir:

$$\varphi_{C_2/C_1} = 2/1 = 2, \varphi_{C_1/C_3} = 2.5/2 = 1.25$$

Uzman 1'in ekonomik faktörlerin alt kriterlerine göre yaptığı karşılaştırmaların neticesinde elde edilen karşılaştırmalı öncelikler ise şöyledir:

$$\varphi_{C_{13}/C_{14}} = 1.3/1 = 1.3, \varphi_{C_{14}/C_{12}} = 1.5/1.3 = 1.15,$$

$$\varphi_{C_{12}/C_{11}} = 2/1.5 = 1.33, \varphi_{C_{11}/C_{15}} = 2.2/2 = 1.1$$

Adım 3. Son adımda aşağıdaki iki koşulun sağlanması gerekir:

(1) Ağırlık katsayılarının oranı, kriterler arasındaki karşılaştırmalı önceliğe eşittir. Örneğin Uzman 1'in değerlendirmeleri doğrultusunda ana kriterler,

$$\frac{w_2}{w_1} = 2; \frac{w_1}{w_3} = 1.25 \text{ olur.}$$

Aynı uzmanın değerlendirmeleri doğrultusunda ekonomi ana kriterinin alt kriterleri ise,

$$\frac{w_{13}}{w_{14}} = 1.3; \frac{w_{14}}{w_{12}} = 1.15; \frac{w_{12}}{w_{11}} = 1.33 \text{ ve } \frac{w_{11}}{w_{15}} = 1.1 \text{ olur.}$$

Tablo 4. Ana kriterlerin uzmanlarca puanlanması.

Table 4. Scoring of the main criteria by experts.

Ana kriterler	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
C ₁	2	1	2
C ₂	1	1.5	1
C ₃	2.5	1.8	1.5

Tablo 5. Alt kriterlerin uzmanlarca puanlanması.

Table 5. Scoring of the sub-criteria by experts.

Alt kriterler	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
C ₁₁	2	3	1.5
C ₁₂	1.5	2.5	1.1
C ₁₃	1	2	1
C ₁₄	1.3	1	1.8
C ₁₅	2.2	1.6	2
C ₂₁	1.7	1.5	2
C ₂₂	2	2	2.2
C ₂₃	1.4	2.5	1
C ₂₄	1	1	1.8
C ₃₁	1	1.2	1
C ₃₂	1	1	2
C ₃₃	1.5	1.4	2.5

(2) Ağırlık katsayılarının nihai değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu sağlamalıdır. Örneğin Uzman 1'in değerlendirmeleri doğrultusunda 2. ana kriterin 3. ana kritere göre değeri,

$$\frac{w_2}{w_3} = \frac{w_2}{w_1} \otimes \frac{w_1}{w_3} = 2 \otimes 1.25 = 2.5 \text{ bulunur.}$$

Benzer şekilde, Uzman 1'in değerlendirmeleri doğrultusunda ekonomi ana kriteri için,

$$\frac{w_{13}}{w_{12}} = \frac{w_{13}}{w_{14}} \otimes \frac{w_{14}}{w_{12}} = 1.3 \otimes 1.15 = 1.49$$

$$\frac{w_{14}}{w_{11}} = \frac{w_{14}}{w_{12}} \otimes \frac{w_{12}}{w_{11}} = 1.15 \otimes 1.33 = 1.99$$

$$\frac{w_{12}}{w_{15}} = \frac{w_{12}}{w_{11}} \otimes \frac{w_{11}}{w_{15}} = 1.33 \otimes 1.1 = 1.46$$

değerleri elde edilir.

Böylece Uzman 1'in değerlendirmeleri doğrultusunda ana kriterlerin öncelik ağırlıklarını belirlemeye yönelik nihai model (DP modeli) Eşitlik (5) kullanılarak şöyle tanımlanabilir:

min χ

$$\begin{cases} \left| \frac{w_2}{w_1} - 2 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_1}{w_3} - 1.25 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_2}{w_3} - 2.5 \right| \leq \chi, \\ \sum_{j=1}^3 w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j \end{cases}$$

Modelin MS Excel çözücü ile çözülmesi sonucu kriterlerin öncelik ağırlıkları $w_{C_2} = 0.526$; $w_{C_1} = 0.263$; $w_{C_3} = 0.211$ bulunur.

Benzer şekilde Uzman 1'in değerlendirmeleri doğrultusunda ekonomi ana kriterine ait alt kriterlerin öncelik ağırlıklarını belirlemeye yönelik nihai model (DP modeli) ise yine Eşitlik (5) kullanılarak şöyle tanımlanabilir:

min χ

$$\begin{cases} \left| \frac{w_{13}}{w_{14}} - 1.3 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_{14}}{w_{12}} - 1.15 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_{12}}{w_{11}} - 1.33 \right| \leq \chi, \\ \left| \frac{w_{11}}{w_{15}} - 1.1 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_{13}}{w_{12}} - 1.49 \right| \leq \chi, \left| \frac{w_{14}}{w_{11}} - 1.99 \right| \leq \chi, \\ \left| \frac{w_{12}}{w_{15}} - 1.46 \right| \leq \chi, \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 w_{ij} = 1, w_{ij} \geq 0, \forall i, j \end{cases}$$

Modelin MS Excel çözücü ile çözülmesi neticesinde kriterlerin öncelik ağırlıkları $w_{C_{13}} = 0.295$; $w_{C_{14}} = 0.227$; $w_{C_{12}} = 0.197$; $w_{C_{11}} = 0.147$ ve $w_{C_{15}} = 0.134$ olarak bulunur.

Böylece üç uzmanın görüşleri doğrultusunda elde edilen ana kriter ağırlıkları Tablo 6'da, alt kriter ağırlıkları ise Tablo 7'de verilmiştir. Ayrıca elde edilen değerlerin ortalaması alınarak bulunan ana ve alt kriterlerin yerel ağırlıkları her tablonun son sütununda yer almaktadır.

Tablo 6. Ana kriterlerin yerel ağırlıkları.

Table 6. Local weights of main criteria.

	Öncelik ağırlıkları			Yerel ağırlık
	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	
C ₁	0.263	0.450	0.230	0.314
C ₂	0.526	0.300	0.462	0.429
C ₃	0.211	0.250	0.308	0.256

Tablo 7. Alt kriterlerin yerel ağırlıkları.

Table 7. Local weights of sub-criteria.

	Öncelik ağırlıkları			Yerel ağırlık
	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	
C ₁₁	0.147	0.117	0.184	0.149
C ₁₂	0.197	0.140	0.250	0.196
C ₁₃	0.295	0.175	0.275	0.248
C ₁₄	0.227	0.349	0.153	0.243
C ₁₅	0.134	0.219	0.138	0.164
C ₂₁	0.210	0.260	0.181	0.217
C ₂₂	0.178	0.195	0.198	0.190
C ₂₃	0.255	0.155	0.398	0.269
C ₂₄	0.357	0.390	0.221	0.323
C ₃₁	0.375	0.327	0.526	0.409
C ₃₂	0.375	0.393	0.263	0.344
C ₃₃	0.250	0.280	0.211	0.247

Son aşamada ise Tablo 8'deki tüm alt kriterlerin global ağırlıkları elde edilir.

Tablo 8. Kriterlerin nihai ağırlıkları.

Table 8. Final weights of criteria.

Öncelik ağırlıkları		
Ana kriterler	Alt kriterler	Global ağırlıklar
C ₁ (0.314)	C ₁₁ (0.149)	0.314 ⊗ 0.149 = 0.047
	C ₁₂ (0.196)	0.314 ⊗ 0.196 = 0.062
	C ₁₃ (0.248)	0.314 ⊗ 0.248 = 0.078
	C ₁₄ (0.243)	0.314 ⊗ 0.243 = 0.076
	C ₁₅ (0.164)	0.314 ⊗ 0.164 = 0.051
C ₂ (0.429)	C ₂₁ (0.217)	0.429 ⊗ 0.217 = 0.093
	C ₂₂ (0.190)	0.429 ⊗ 0.190 = 0.082
	C ₂₃ (0.269)	0.429 ⊗ 0.269 = 0.115
	C ₂₄ (0.323)	0.429 ⊗ 0.323 = 0.139
C ₃ (0.256)	C ₃₁ (0.409)	0.256 ⊗ 0.409 = 0.105
	C ₃₂ (0.344)	0.256 ⊗ 0.344 = 0.088
	C ₃₃ (0.247)	0.256 ⊗ 0.247 = 0.063

Tablo 8'de görüldüğü gibi rüzgar çiftliği yerinin seçiminde en önemli ana kriter %42.9 ile çevredir. Onu sırasıyla %31.4 ile ekonomik faktörler ve %25.6 ile sosyal faktörler izlemektedir. Çevreye ilişkin alt kriterlerin içinde en önemli görülen kriter rüzgar potansiyelidir (%32.3). Onu sırasıyla arazi örtüsü (%26.9) ve fay hatlarına uzaklık (%21.7) takip etmektedir. Ekonomi ana kriterinin alt kriterlerinde kuruluş ve bakım maliyeti %24.8 ile ilk sıradadır. Eğitim (%24.3) ile ulaşım ağırlıklarına yakınlık (%19.6) ise, kuruluş ve bakım maliyetinden sonra gelen diğer en önemli alt kriterlerdir. Sosyal faktörlere ilişkin alt kriterler ise önem sırasına göre yerleşim yerlerine uzaklık (%40.9), işgücüne yakınlık (%34.4) ve istihdama katkı (%24.7) olarak sıralanmıştır. Ana kriterlerin ve ana kriterlere ait alt kriterlerin yerel ağırlıklarının çarpımı sonucu elde edilen global ağırlıklar Tablo 8'in son sütununda verilmiştir. Sonuç olarak, rüzgar çiftliği yer seçiminde yararlanılan kriterler arasında en önemli ilk üç kriter sırasıyla rüzgar potansiyeli (%13.9), arazi örtüsü (%11.5) ve yerleşim yerlerine yakınlık (%10.5).

5.1 Duyarlılık analizi

Rüzgar çiftliği yer seçiminde dikkate alınan faktörlerin önem düzeylerini belirlemek amacıyla önerilen FUCOM yönteminin etkinliğini ve verimliliğini belirlemek amacıyla bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, FUCOM gibi subjektif ağırlık belirleme yöntemleri sınıfında yer alan AHP, BWM ve SWARA subjektif ağırlıklandırma yöntemleriyle değerlendirilmeler yapılarak kriter ağırlıkları ve kriter sıralamaları tespit edilmiştir. Tablo 9'da elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Tablo 9. Farklı ağırlıklandırma yöntemleriyle elde edilen sonuçlar.

Table 9. Results obtained by various weighting methods.

	BWM	Sıra	AHP	Sıra	SWARA	Sıra	FUCOM	Sıra
C ₁₁	0.054	12	0.039	12	0.064	9	0.047	12
C ₁₂	0.065	8	0.071	9	0.052	11	0.062	10
C ₁₃	0.087	4	0.084	6	0.074	7	0.078	7
C ₁₄	0.058	9	0.072	8	0.068	8	0.076	8
C ₁₅	0.056	10	0.062	10	0.056	10	0.051	11
C ₂₁	0.085	6	0.101	3	0.089	5	0.093	4
C ₂₂	0.087	4	0.076	7	0.075	6	0.082	6
C ₂₃	0.123	2	0.121	2	0.120	2	0.115	2
C ₂₄	0.148	1	0.127	1	0.153	1	0.139	1
C ₃₁	0.099	3	0.098	4	0.113	3	0.105	3
C ₃₂	0.081	7	0.095	5	0.092	4	0.088	5
C ₃₃	0.056	10	0.053	11	0.043	12	0.063	9
r _s	0.916		0.965		0.923		-	

Sperman'ın sıra korelasyon katsayısı, elde edilen kriter sıralamaları arasındaki korelasyonu belirlemekte kullanılır ve 0 ile 1 arasında değer alır. Elde edilen değer 0.8'den büyük olduğunda oldukça güçlü bir benzerlikten söz edilir [31]. Tablo 9'a göre tüm korelasyon katsayıları 0.8'den büyüktür ve sonuçlar arasında oldukça güçlü bir benzerlik vardır. Sonuç olarak FUCOM yönteminin diğer yöntemlerle oldukça tutarlı sonuçlar verdiği söylenebilir.

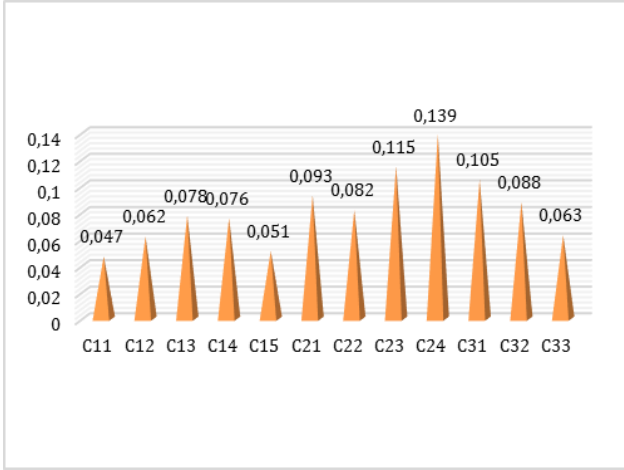
Diğer taraftan, yukarıdaki analizleri gerçekleştirmek için BWM'de 18, AHP'de 22 ikili karşılaştırma yapmak gerekirken FUCOM'da ise sadece 11 ikili karşılaştırma (ikisi ana kriterler, dördü ekonomi alt kriterleri, üçü çevre alt kriterleri ve ikisi de sosyal alt kriterleri için) yeterli olmuştur. Sonuç olarak, daha önce de vurgulandığı gibi, FUCOM yöntemi ile daha kısa zamanda analizler gerçekleştirilirken aynı zamanda tutarlı ve güvenilir sonuçlara da ulaşılabilmektedir.

6 Tartışma

Bu bölüm iki farklı yönden çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesini içermektedir: (1) Elde edilen bulguların literatürdeki bulgularla karşılaştırılarak benzerliklerinin ve farklılıklarının ortaya konulması, (2) FUCOM yönteminin diğer ağırlıklandırma yöntemlerine göre avantajlarının ortaya konulması.

Şekil 4'te rüzgâr çiftliği yer seçiminde yararlanılan kriterlerin nihai ağırlıkları görülmektedir. Buna göre en önemli görülen kriter rüzgâr potansiyelidir. Onu sırasıyla arazi örtüsü ve yerleşim yerlerine yakınlık takip etmiştir.

Elde edilen bulgular literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla da uyumludur. Daneshvar Rouyendegh ve diğ. [6] tarafından yapılan çalışmada rüzgâr potansiyeline ilişkin kriterlerin ilk sıralarda yer aldığı görülmüştür. Ancak yerleşim yerlerine yakınlık kriterinin daha az önemli olduğu tespit edilmiştir. Gigovic ve diğ. [1], 11 kriterden oluşan çalışmalarında elde ettikleri bulgulara göre rüzgâr potansiyeli en önemli kriter olmuştur. Ayrıca, arazi örtüsü dördüncü sırada ve yerleşim yerlerine uzaklık beşinci sırada yer almıştır. Rüzgâr potansiyeli Solangi ve diğ. [7] tarafından yapılan çalışmada teknik faktörler grubunda yer almış ve teknik faktörlerin üçüncü en önemli faktör olduğu bulunmuştur.



Şekil 4. Kriterlerin önem ağırlıkları.

Figure 4. Importance weights of criteria.

Ayrıca Zahedi [27] ile Bili ve Vagiona [5] tarafından yapılan çalışmalar, rüzgâr potansiyelinin rüzgâr çiftliği yer seçiminde en önemli faktörlerden biri olduğunu göstermiştir. Ayodele ve diğ. [2], rüzgar potansiyelinin Nijerya'daki rüzgar çiftliği yerlerinin belirlenmesinde en belirleyici kriter olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca arazi örtüsünün de konum üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Arazi örtüsü ile yerleşim yerlerine yakınlık, Noorollahi ve diğ. [17] tarafından yapılan çalışmada en önemli belirleyiciler arasında yer almıştır. Azizi ve diğ. [8], rüzgar potansiyelinin konum seçiminde en önemli kriter olduğunu belirlemiştir. 13 kriterin kullanıldığı çalışmada arazi örtüsü ikinci, yerleşim yerlerine yakınlık ise dokuzuncu sırada yer almıştır. Yerleşim yerlerine yakınlık Sooriyaarachchi ve diğ. [29], Jafari ve diğ. [26] ve Ali ve diğ. [4] tarafından yapılan çalışmalarda da en önemli kriterlerden biri olarak belirlenmiştir.

Rüzgâr çiftliği yerinin belirlenmesinde yararlanılan kriterlerin ağırlıklandırılmasında ilk kez kullanılan FUCOM yönteminin pek çok açıdan diğer ağırlıklandırma yöntemlerine göre üstünlüğü olduğu görülmüştür. Tablo 10'da yöntemlerin şeffaflık, hesaplama süresi, basitlik ve matematiksel hesaplamalar çerçevesinde karşılaştırmaları görülmektedir.

Tablo 10. Çeşitli ağırlıklandırma yöntemlerinin karşılaştırılması.

Table 10. Comparison of various weighting methods.

Yöntem	Şeffaflık	Hesaplama süresi	Basitlik	Hesaplama
AHP	İyi	Uzun	Orta	Çok
BWM	İyi	Normal	Orta	Çok
SWARA	Orta	Kısa	Orta	Normal
FUCOM	Çok iyi	Kısa	Düşük	Az

Tümü ikili karşılaştırma temeline dayalı olan Tablo 10'daki yöntemler arasında FUCOM ile SWARA en az sayıda ikili karşılaştırma gerektiren yöntemlerdir. Ancak SWARA yönteminde yapılan karşılaştırmaların tutarlılığını belirlemeye yönelik bir analiz bulunmamaktadır. Tutarlılık kontrolü yapmaya olanak sağlayan AHP ve BWM yöntemlerinde ise FUCOM yöntemine göre çok daha fazla ikili karşılaştırmaya gereksinim duyulması nedeniyle sıklıkla tutarsızlık sorunuyla

karşılaşmakta ve değerlendirmelerin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Buna ilave olarak, ikili karşılaştırmaların fazla olması nedeniyle işlem yükü de kaçınılmaz olarak artmaktadır. FUCOM yöntemi matematiksel yapısı sayesinde hem işlem yükünü azaltmakta hem de araştırmacının tutarsızlık sorunuyla karşı karşıya kalmasının önüne geçmektedir [32].

7 Sonuçlar

Bu çalışmada rüzgâr çiftliği yer seçim probleminde yararlanılan kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Sürdürülebilirlik çerçevesinde ekonomik, sosyal ve çevresel boyutlara ilişkin 12 kriterin önem ağırlıkları oldukça yeni bir yöntem olan FUCOM ile belirlenmiştir. Yöntemin ilk kez literatürde böyle bir amaçla kullanılması, çalışmanın orijinal yönlerinden birini oluşturmaktadır. Elde edilen bulgulara göre yer seçiminde en önemli boyut çevredir. Onu sırasıyla ekonomik ve sosyal boyutlar izlemiştir. Alt kriterler bazında yapılan analizler sonucunda ise en önemli kriterin rüzgâr çiftliğinin konumlanacağı yerdeki rüzgâr potansiyeli olduğu saptanmıştır. Arazi örtüsü, yerleşim yerlerine uzaklık, fay hatlarına uzaklık ve işgücüne yakınlık diğer en önemli kriterler olmuştur. Böylece, uygun kuruluş yeri seçiminde belirtilen kriterler doğrultusunda seçim yapılması, hem doğru bir yatırım kararı verilmesine neden olacak hem de ülkemiz ve dünyamız için giderek büyük bir problem haline dönüşen enerji sorununun çözümüne önemli bir katkıda bulunacaktır.

Çalışmada enerji konusunda bilgi birikimi ve tecrübesi olan üç uzmanın görüşleri doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı uzmanların oluşturacağı bir komitenin görüşleri ile elde edilecek sonuçlarda değişikliklerin olabileceği ihtimali bu çalışmanın kısıtlarındandır. Diğer taraftan uzman sayısının artırılarak analizler yapılması, ileride yapılacak çalışmalar için tavsiye edilebilir. Gelecekteki çalışmalarda ayrıca ağırlıklandırma amacıyla kullanılan farklı ÇKKV yöntemlerinin (SWARA, AHP, ANP, BWM vb.) kullanılması önerilebilir. Ayrıca ileride bulanık kümeler ile uzantılarının (sezgisel bulanık, tereddütlü bulanık, Pisagor bulanık vb.) ÇKKV yöntemleriyle entegre edildiği çalışmalar gerçekleştirilebilir.

8 Conclusions

In this work, it was aimed to determine the importance weights of the criteria used in wind farm location selection problem. The importance weights of 12 criteria related to economic, social, and environmental dimensions within the context of sustainability have been determined by FUCOM, which is a fairly new method. The first use of the method for such a purpose in the literature is one of the original aspects of the study. According to the findings, the most important dimension in the choice of location is the environment. It was followed by economic and social dimensions, respectively. As a result of analyzes realized on the basis of sub-criteria, it was determined that the most important criterion is the wind potential at the location of the wind farm. Land cover, distance to settlements, distance to fault lines, and proximity to the workforce were other important criteria. Making a selection in accordance with the criteria specified in the selection of the appropriate sitting location, therefore, will not only make a right investment decision, but will also make an important contribution to the solution of the energy problem, which has become an increasingly large problem for our country and the world.

In the present study, analyzes were carried out in line with the opinions of three experts with knowledge and experience in energy issue. The possibility of changes in the results to be obtained with the opinions of a committee formed by different experts is among the limitations of this study. On the other hand, increasing the number of experts and making analyzes can be recommended for future studies. In future studies, it may be suggested to utilize different MCDM methods (SWARA, AHP, ANP, BWM, etc.) used for weighting purposes. Moreover, studies in which fuzzy sets and their extensions (intuitive fuzzy sets, hesitant fuzzy sets, Pythagorean fuzzy sets, etc.) are integrated with MCDM methods can be carried out in the future.

9 Kaynaklar

- [1] Gigovic L, Pamučar D, Božanić D, Ljubojević S. "Application of the GIS-DANP-MABAC multi-criteria model for selecting the location of wind farms: A case study of Vojvodina, Serbia". *Renewable Energy*, 103, 501-521, 2017.
- [2] Ayodele TR, Ogunjuyigbe ASO, Odigie O, Munda JL. "A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria". *Applied Energy*, 228, 1853-1869, 2018.
- [3] Atici KB, Simsek AB, Ulucan A, Tosun MU. "A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection". *Utilities Policy*, 37, 86-96, 2015.
- [4] Ali S, Taweekun J, Techato K, Waewsak J, Gyawali S. "GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand". *Renewable Energy*, 132, 1360-1372, 2019.
- [5] Bili A, Vagiona DG. "Use of multicriteria analysis and GIS for selecting sites for onshore wind farms: the case of Andros Island (Greece)". *European Journal of Environmental Sciences*, 8(1), 5-13, 2018.
- [6] Daneshvar Rouyendegh B, Yildizbasi A, Arikan ÜZ. "Using intuitionistic fuzzy TOPSIS in site selection of wind power plants in Turkey". *Advances in Fuzzy Systems*, 12(1), 1-14, 2018.
- [7] Solangi Y, Tan Q, Khan M, Mirjat N, Ahmed I. "The selection of wind power project location in the southeastern corridor of Pakistan: a factor analysis, AHP and fuzzy-TOPSIS application". *Energies*, 11(8), 1940-1949, 2018.
- [8] Azizi A, Malekmohammadi B, Jafari HR, Nasiri H, Parsa VA. "Land suitability assessment for wind power plant site selection using ANP-DEMATEL in a GIS environment: case study of Ardabil province, Iran". *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(10), 6695-6709, 2014.
- [9] Bennui A, Rattanamanee P, Puetpaiboon U, Phukpattaranont P, Chetpattananondh K. "Site selection for large wind turbine using GIS". *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE*, Songkhla, Thailand, 10-11 May 2007.
- [10] Hashemkhani Zolfani S, Ecer F, Pamučar D, Raslanas S. "Neighborhood selection for a newcomer via a novel BWM-based revised MAIRCA integrated model: a case from the Coquimbo-La Serena conurbation, Chile". *International Journal of Strategic Property Management*, 24(2), 102-118, 2020.
- [11] Ecer F, Pamucar D. "Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-criteria model". *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981, 2020.
- [12] Kersuliene V, Zavadskas EK, Turskis Z. "Selection of rational dispute resolution method by applying new stepwise weight assessment ratio analysis (SWARA)". *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243-258, 2010.
- [13] Hashemkhani Zolfani S, Bahrami M. "Investment prioritizing in high tech industries based on SWARA-COPRAS approach". *Technological and Economic Development of Economy*, 20(3), 534-553, 2014.
- [14] Ecer F. "An integrated Fuzzy AHP and ARAS model to evaluate mobile banking services". *Technological and Economic Development of Economy*, 24(2), 670-695, 2018.
- [15] Ecer F. "A hybrid banking websites quality evaluation model using AHP and COPRAS-G: a Turkey case". *Technological and Economic Development of Economy*, 20(4), 758-782, 2014.
- [16] Ecer F, Kinay AÖ, Nasiboğlu E. "Determination of the financial support required by the families with disabilities to achieve standard life conditions with the AHP method". *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İİBF Dergisi*, 5(3), 687-704, 2018.
- [17] Noorollahi Y, Yousefi H, Mohammadi M. "Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 13, 38-50, 2016.
- [18] Talinli I, Topuz E, Aydin E, Kabakci SB. "A holistic approach for wind farm site selection by FAHP". Wind farm: technical regulations, potential estimation and siting assessment. *InTech, Croatia*, 3(1), 213-234, 2011.
- [19] Tegou LI, Polatidis H, Haralambopoulos DA. "Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study". *Journal of Environmental Management*, 91(11), 2134-2147, 2010.
- [20] Pamucar D, Deveci M, Canitez F, Bozanic D. "A fuzzy Full Consistency Method-Dombi-Bonferroni model for prioritizing transportation demand management measures". *Applied Soft Computing*, 87, 105952, 2020.
- [21] Stevic Z, Brkovic N. "A novel integrated FUCOM-MARCOS model for evaluation of human resources in a transport company". *Logistics*, 4(1), 4-14, 2020.
- [22] Cao Q, Esangbedo MO, Bai S, Esangbedo CO. "Grey SWARA-FUCOM weighting method for contractor selection MCDM problem: A case study of floating solar panel energy system installation". *Energies*, 12(13), 2481, 2019.
- [23] Zagradjanin N, Pamucar D, Jovanovic K. "Cloud-Based multi-robot path planning in complex and crowded environment with multi-criteria decision making using full consistency method". *Symmetry*, 11(10), 1241, 2019.
- [24] Mostafaeipour A, Abarghoeei H. "Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1758-1766, 2008.
- [25] Farajisabokbar H, Nasiri H, Hamzeh M, Talebi S, Rafee Y. "Analysis of land suitability to locate rural service centres using PROMETHEE II and AHP methods in GIS environment (Case study in Soltanieh-Abhar city)". *Journal of Rural Development*, 2, 95-118, 2010.
- [26] Jafari H, Azizi A, Nasiri H. "Analysis of land suitability to establish wind power plants in Ardabil province using AHP and SAW models in GIS". *Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 23-41, 2011.
- [27] Zahedi M, Salah B, Jamil M. "Calculation of wind density and potentials for use of wind energy in Ardabil". *Journal of Research in Geography*, 37(53), 41-55, 2005.

- [28] Lee KH, Jun SO, Pak KH, Lee DH, Lee KW, Park JP. "Numerical optimization of site selection for offshore wind turbine installation using genetic algorithm". *Current Applied Physics*, 10(2), 2-6, 2010.
- [29] Sooriyaarachchi TM, Tsai IT, El Khatib S, Farid AM, Mezher T. "Job creation potentials and skill requirements in, PV, CSP, wind, water-to-energy and energy efficiency value chains". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 653-668, 2015.
- [30] Pamucar D, Stević Ž, Sremac S. "A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full consistency method (FUCOM)". *Symmetry*, 10(9), 393, 2018.
- [31] Ecer F. "Multi-criteria decision making for green supplier selection using interval type-2 fuzzy AHP: a case study of a home appliance manufacturer". *Operational Research*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00552-y>.
- [32] Ecer F. *Çok Kriterli Karar Verme Geçmişten Günümüze Kapsamlı Bir Yaklaşım*. Ankara, Türkiye, Seçkin Yayıncılık 2020.