

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Metodu (FAHP) Kullanılarak Rüzgar Santralleri için En Uygun Yer Tayini

Finding the Optimum Site for Wind Farms using Geographical Information Systems (GIS) and Fuzzy Analytical Hierarch Process (FAHP)

Hasan Eroğlu

Elektrik–Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gümüşhane Üniversitesi
hasan.eroglu@gumushane.edu.tr

Özet

Ülkelerin gelişimiyle artış gösteren enerji ihtiyacı, daha temiz enerji arayışlarıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyle, bu kaynaklar için en uygun yer tayini çalışmaları, literatürde artış göstermektedir. CBS ile birlikte FAHP gibi karar verme metotları birlikte kullanılması, yenilenebilir enerji kaynakları için en uygun yer tespiti çalışmalarını oldukça kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, CBS ve FAHP kullanılarak rüzgar santralleri için en uygun yer tespitinin yapılmasıdır. Bu amaçla rüzgar santralleri ile ilgili 13 ana ve 62 tane alt kriter tespit edilmiş ve bu kriterlerin ağırlık değerleri FAHP ile verilmiştir. Örnek bir çalışma alanı için tüm veriler CBS ile toplanarak işlenmiştir. Tüm haritaların üst üste toplanmasıyla, rüzgar santralleri için örnek çalışma alanının uygunluk haritası ve kısıtlı bölgeler gösterilmiştir. Bu çalışma rüzgar santralleri yer tespiti çalışmaları için iyi bir referans olacaktır.

Abstract

The need for energy that increasing by the development of the countries has increased the interest to the renewable energy sources with the search for cleaner energy resources. With the interest in the renewable energy sources, suitable place finding studies for these sources also increased in the literature. Using the GIS with the decision making methods like FAHP, has quite facilitates the the site selection studies of wind.

The objective of this study is to find the most suitable places for wind farms by using GIS and Fuzzy Analytical Hierarch Process (FAHP). For this purpose, 13 main and 62 sub criteria relevant to wind farms are determined and the weighting of these criteria is made via FAHP. All the geographical data for a sample study area is collected and processed with GIS. The suitability map and the restricted regions of the sample study area for wind farms are presented by gathering consecutively all the weighted maps. This study will be a good reference to the researchers in site selection studies of wind farms.

1. Giriş

Geçmiş yıllarda insanların enerjiye olan ihtiyaçları teknolojinin gelişimiyle hızlı bir şekilde artmıştır. 1993 ile 2011 yılları arasında toplam birincil enerji arzı, teknolojiye bu gelişmeden dolayı % 48’lik bir artış göstermiştir [1]. Ayrıca, çevresel olarak daha temiz enerji kaynakları arayışı, araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımına yönlendirmiştir. [2-4]. Bazı ülkeler YEK’lerin kullanımını belirli oranlarda şart koşarken [5, 6], bazı ülkeler YEK’lerin kullanımını teşvik etmektedirler [3].

İyi bir YEK olarak rüzgar enerjisi, rüzgarın olduğu her yerde kullanılabilir. 1990 yılından beri Dünya rüzgar enerji kapasitesi her üç buçuk yılda ikiye katlanmaktadır [1]. Rüzgar enerji üretimindeki teknoloji gelişimi, rüzgar enerjisini klasik enerji kaynaklarına nispeten daha umut verici kılmaktadır [5] ve rüzgar enerjisi dünya enerji piyasasında önemli bir rol almaktadır [7].

Rüzgar enerjisinin genel avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

Basit teknoloji, fosil yakıtlara nispeten daha az kirlilik, kara uygulamalarında kolay kurulumu ve sökülmesi, yakıt ve atık maliyetinin olmaması, uzak uygulamalarda daha az yer ihtiyacı olması ve daha temiz bir çözüm olması. Rüzgar enerjisinin bahsedilen avantajlarının yanında rüzgara göre değişken enerji üretimi, doğal yaşam üzerinde olumsuz etkisi (kuş sürülerine olan zararları), ses kirliliği, görsel ve elektromanyetik etkileri gibi dezavantajları vardır [1, 8, 9, 10]. Rüzgar enerjisinin bu negatif etkilerin en aza indirilebilmesi için ilgili kriterlerin belirlenerek ağırlık değerlerinin verilmesi ve CBS yardımıyla en uygun yer tayininin yapılması gerekmektedir.

Diğer mühendislik yapılarının yer tespiti çalışmalarında olduğu gibi rüzgar santrallerinin yer tespiti çalışmalarında kriterlerin doğru tespit edilmesi çok önemlidir. Bir kriterin bile göz ardı edilmesi çevresel ya da diğer boyutlarda negatif etkilere neden olacaktır. Ayrıca projenin ilerleyişi açısından da sorun teşkil edebilmektedir. Örneğin “Flora ve Fauna” ana kriteri ve “Önemli bitki türleri alanları” ve “Tropikal alanlar”

gibi alt kriterleri gibi. Mühendislik yapıları yer tespitinde, bu tip önemli kriterler çevreyi olumsuz etkilememek adına göz ardı edilmemelidirler. Literatürde rüzgar santralleri yer tespiti çalışması olarak bu tür kriterlerin göz ardı edildiği bir çok çalışma vardır [8, 11-17]. Ayrıca bu tür kriterler bazı diğer YEK yer tespiti çalışmalarında da göz ardı edildiği görülmektedir [8-22].

Rüzgar santrali yer tespiti çalışmalarında kriterlerin doğru tespit edilmesi gibi kriter ve alt kriterler arasında tercihin yapılabilmesi için tüm kriter ve alt kriterlerin birbirlerine göre ağırlık değerlerinin verilmesi de oldukça önem arz etmektedir. Bu kriterlerin ağırlık değerlerinin verilmesinde insan beyni yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle çoklu kriter karar verme yöntemleri (ÇKKVY) geliştirilmiştir.

ÇKKVY'leri de iki kategoride ele alınmaktadır [23]. Bunlardan biri, karşılaştırma değerlerinin kesin değerler olduğu klasik ÇKKVY'dir [5, 18, 24, 25]. Diğeri ise, karşılaştırma değerlerinin bulanık sayılar olduğu bulanık ÇKKVY'dir [4, 6, 26-28].

ÇKKVY'lerinden biri olan ve Thomas L. Saaty tarafından ortaya atılan Analitik hiyerarşi yöntemi (AHP), insanların karar verirken tercihler arasında kesin tercihlerin yapılamayarak daha çok ara değerlerin seçilmesinden dolayı, insan beyninin tercih yöntemini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu nedenle, tercih yapmada insan beynindeki belirsizliği daha iyi ifade eden Bulanık AHP (FAHP) geliştirilmiştir [29].

Literatürde birçok FAHP metodu vardır [4, 23, 26-30]. Bunlardan en fazla kullanılan [31], sentetik genişletilmiş karşılaştırma değerlerinin kullanıldığı ve Chang tarafından geliştirilen FAHP'de genişletilmiş analiz yöntemidir [26]. FAHP'yi çalışmalarında kullanan birçok araştırmacının FAHP'nin klasik AHP'ye göre bu tür karar verme çalışmalarında daha tatmin edici sonuçlar verdiğinden [32] bu çalışmada kriter ve alt kriterlerin ağırlık değerlerinin bulunmasında kullanılmıştır.

Kriterlerin tespiti ve ağırlık değerlerinin verilmesinden sonra kriterlere ait verilerin toplanması, dijitalleştirilmesi, düzenlenmesi vb. tüm işlemler CBS yardımıyla yapılabilmektedir. CBS dünyada küresel, bölgesel ve yerel olarak çevresel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde CBS'nin YEK çalışmalarına uygulanmasıyla ilgili olarak birçok çalışma mevcuttur [8, 11-22, 28, 33, 34]. CBS ile rüzgar santralleri ya da diğer YEK kaynaklarının çevresel etkileri en aza indirilebilmektedir.

Bu çalışmada, rüzgar santralleri için en uygun yer tespitinde FAHP ve CBS'nin uygulanması gerçekleştirilmiştir. 13 ana kriter ve 62 alt kriter literatürdeki çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlık değerleri FAHP ile hesaplanarak tüm veri işlemleri CBS ile yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, örnek bir çalışma alanında rüzgar santralleri için kısıtlı bölgeler ve uygunluk haritası elde edilmiştir.

2. Kriterlerin Tespiti

Mühendislik yapılarının tümü için olduğu gibi, rüzgar santrallerinin yer tespiti çalışmalarında kriter ve alt kriterlerin doğru olarak tespit edilmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Bir kriterin bile göz ardı edilmesi çalışma maliyetini ve çevreyi olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan kriter ve alt kriterlerin sayısının artışı, daha doğru bir yer tespiti çalışması yapılmasına neden

olacaktır. Literatürde rüzgar santrali yer tespiti çalışmalarında kullanılan bir çok kriter vardır [5, 8, 11-17, 33, 34]. Ancak bu kriterler rüzgar santrali yer tespiti çalışmaları için yeterli değildir. Bu çalışmalar için, toprak, flora&fauna, jeoloji, heyelan, kayalık alanlar ve bu ana kriterlere ait alt bir çok alt kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

Ayrıca, bazı kriterler farklı çalışmalarda farklılık göstermektedir. Örneğin, “yerleşim yerlerine uzaklık” kriteri [33]'te 2000 m., [34]'te 500-1500 m., [11]'de 1000-2000 m. ve [8]'de 1000-3000 m olarak alınmıştır. Bu değerlerdeki farklılıklar, rüzgar santrali yer tespiti çalışması yapacak olan araştırmacılar için oldukça karmaşık bir problemdir. Bunlara ek olarak, bazı çalışmalarda yer tespiti, kriterleri “kabul edilebilir” ya da “kabul edilemez” olarak [8, 16, 17, 33, 36] ya da çok dar bir alt kriter aralığı kullanılarak [11-13] gerçekleştirilmiştir. Rüzgar santrali yer tespiti ve benzer çalışmalarda, alt kriterlerin belirlenmesinin çalışmada etkili olması için, alt kriterler için ara değerlerin ayrıntılı tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, Rüzgar santralleri yer tespiti çalışmalarına ve CBS temelli ÇKKVY'lerinin kullanıldığı diğer YEK yer tespiti çalışmalarına göre Çizelge 1'de gösterildiği gibi 13 adet ana kriter ve 62 adet alt kriter tespit edilmiştir [5, 8, 11-22, 27-29, 33-36].

Çizelge 1: Çalışma için belirlenen kriterler

Rüzgar potansiyeli	Sulak alanlar	Yerleşim
<3 m/s	< 500 m	<2 km
3-5 m/s	500-1 km	2 - 5 km
5-7 m/s	1 - 2 km	5 - 10 km
>7 m/s	2 - 5 km	10 - 20 km
	>5 km	> 20 km
Ormanlık alanlar	Eğim	Kayalık alanlar
< 500 m	<30	0 - 500 m
500-1 km	3 - 50	500m. - 1 km
1 - 2 km	5 - 100	1 - 10 km
2 - 5 km	10 - 200	>10 km
>5 km	>200	
Yollara uzaklık	Toprak	Jeoloji
< 500 m	1. sınıf toprak	Asit-Ortaç Intr.
500 m - 1 km	2. sınıf toprak	Bazik-ultrabazikler
1 - 3 km	3. sınıf toprak	Metamorfitletler
3 - 5 km	4. sınıf toprak	Volkanitler
5 - 10 km	5. sınıf toprak	Sedimanter
> 10 km	6. sınıf toprak	Kayaçlar
	7. sınıf toprak	
Heyelan	Kuş göç yolları	Rekreasyon
Aktif heyelan alanları	<2,5	Mesire yeri
Potansiyel heyelan alanları	2,5 - 5 km	Yaylalar
Eski heyelan alanlar	5 - 10 km	Diğer
Diğer	>10 km	
	Flora-Fauna	
	<500 m	
	500m - 1 km	
	1 - 5 km	

3. FAHP ile Kriterlerin Ağırlık Değerlerinin Tespiti

Bulanık mantığın AHP'ye uyarlanmasıyla elde edilen FAHP ile kriterlerin ağırlıklandırılması, karar vermedeki zorluğu biraz daha hafifleterek karar vericilerin kararları doğrultusunda elde edilen ağırlık değerlerin daha doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır [26, 30, 32, 37-39].

Bulanık AHP'nin uygulandığı birçok problemde Chang tarafından önerilen genişletilmiş bulanık AHP yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem yapay derece değerlerini kullanmasının yanında basit seviye sıralaması ve karma toplam sıralaması ile öne çıkmaktadır. Hesaplamaların azlığı ve klasik AHP'de kullanılan adımların takip edilmesi bu yöntemi avantajlı kullmaktadır. Dezavantajı ise sadece bulanık üçgensel sayıları kullanmasıdır [39].

$X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ Nesneler kümesi ve $U=(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$ bir hedef kümesi olduğu varsayılırsa Chang'ın genişletilmiş analiz yöntemine göre, her bir nesne ele alınarak her hedef için g_i değerleri oluşturulur. Böylece, her bir nesne için m tane genişletilmiş analiz değerleri;

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, M_{g_i}^3, \dots, M_{g_i}^m, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

Şeklinde elde edilebilir. Burada verilen tüm $M_{g_i}^j$ ($j=1,2,\dots,m$) değerleri, parametreleri l , m ve u olan üçgensel bulanık sayıdır. l , en düşük, m orta, u en geniş değerdir ve (l, m, u) şeklinde gösterilir. Chang'ın genişletilmiş analiz yönteminin adımları aşağıda gösterilmiştir [37-39].

1.Adım: Bulanık yapay büyüklük değeri, i . nesneye göre şöyle tanımlanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (2)$$

$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$ ifadesinin elde edilebilmesi için, m değerleri üzerinde bulanık sayılarda toplama işlemi belirli bir matris için şu şekilde gerçekleştirilir:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (3)$$

ve $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1}$ ifadesinin elde edilebilmesi için, $M_{g_i}^j$ ($j=1,2,\dots,m$) değerleri üzerinde bulanık toplama işlemi yapılır,

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_j, \sum_{i=1}^n m_j, \sum_{i=1}^n u_j \right) \quad (4)$$

ve bu adımın en son aşaması olarak (4)'teki denklemdeki vektörün tersi hesaplanır.

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_j}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_j} \right) \quad (5)$$

2. Adım: $M_1=(l_1, m_1, u_1) \leq M_2=(l_2, m_2, u_2)$ ifadesinin olasılık derecesi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[\min \left(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y) \right) \right] \quad (6)$$

$M_1=(l_1, m_1, u_1)$ ve $M_2=(l_2, m_2, u_2)$ Üçgensel (konveks) bulanık sayılar olmak üzere:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt} (M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & , m_2 \geq m_1 \\ 0 & , l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7)$$

ifadesi elde edilir.

Şekil1'de görüldüğü gibi, $V(M_2 \geq M_1)$ ifadesi $M_1=(l_1, m_1, u_1)$ ve $M_2=(l_2, m_2, u_2)$ üçgensel bulanık sayılarının kesişim noktasının ordinatıdır. Diğer bir ifadeyle üyelik fonksiyonunun değeridir. M_1 ve M_2 'yi karşılaştırmak için $V(M_2 \geq M_1)$ ve $V(M_1 \geq M_2)$ değerlerinin her ikisinin de bulunması gerekir.

3. Adım: Konveks bir bulanık sayının olasılık derecesinin k konveks sayıdan M_i ($i=1,2,\dots,k$) daha büyük olması aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$V(M \geq M_2, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1), (M \geq M_2), \dots, (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i), \quad i=1,2,\dots,k \quad (8)$$

$k=1,2,\dots,n; k \neq j$ için $d(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$ olarak alınırsa, ağırlık vektörü aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

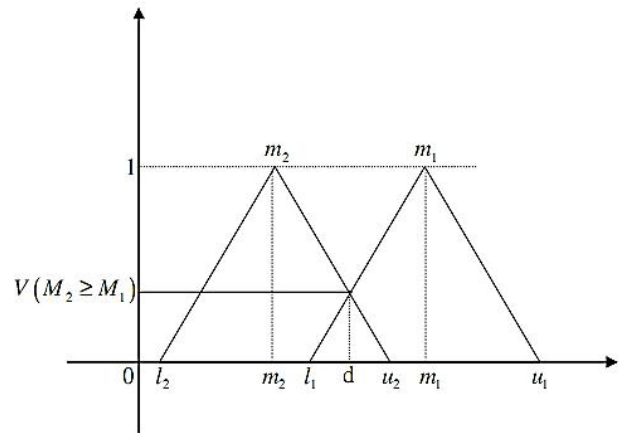
$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (9)$$

Burada A_i ($i=1,2,\dots,n$) n elemandan oluşmaktadır.

4.Adım: (9)'daki denklem normalize edilirse:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (10)$$

vektörü bulunur. Buradaki W ağırlık vektörü bulanık bir sayı değildir.



Şekil 1. M_2 ve M_1 üçgen bulanık sayılarının kesişimi

Çizelge 2: Çalışmada kullanılan üçgensel sayı tablosu

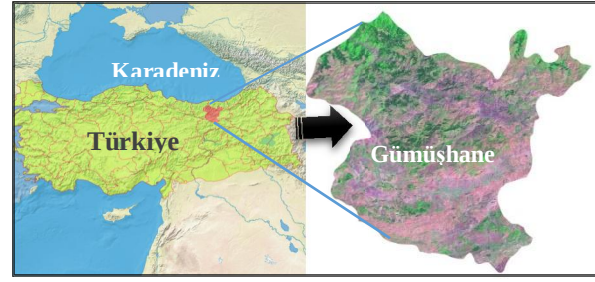
Dilsel ölçek	Üçgensel Bulanık Sayılar	Üçgensel Bulanık Sayı Eşleniği
Eşit derecede önemli	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Biraz daha fazla önemli	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Kuvvetli derecede önemli	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Çok kuvvetli derecede önemli	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Tamamıyla önemli	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)

Bu çalışmada, kriterlerin ağırlık değerlerinin verilebilmesi için Çizelge 2’de gösterilen üçgensel sayı tablosu kullanılmıştır [29].

Kriter ağırlıklandırma kullanılan tüm hesaplama adımları Microsoft Exel’de gerçekleştirilmiştir. FAHP ile elde edilen kriter ağırlık değerleri Çizelge 3’te gösterilmektedir. Her bir alt kriterin toplam ağırlık değeri, ana kriter ile ilgili alt kriterin ağırlık yüzde değerlerinin çarpımı olarak alınmıştır.

4. Verilerin Elde Edilmesi ve İşlenmesi

Günümüzde CBS teknolojileri, birçok mühendislik probleminde kullanılmaktadır. Rüzgar santralleri yer tespiti



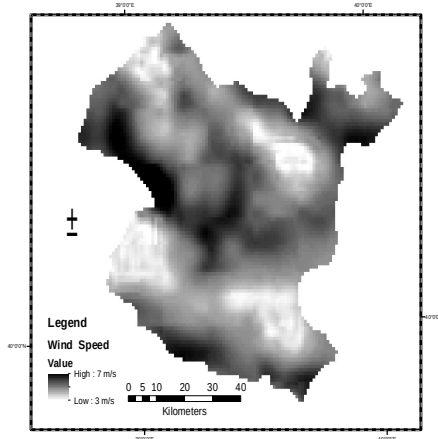
Şekil 2. Çalışma alanının gösterimi

probleminde CBS yazılımlarının bir çok parçası kullanılmaktadır. Dünyada yaygın olarak kullanılan bir yazılım olan ArcGIS 10 yazılımı, bu çalışmadaki düzenleme, dönüşüm, dijitalleştirme, tüm haritaların toplanması gibi işlemlerin yapılmasında kullanılmıştır.

Çalışma alanı, engebeli bir arazi yapısına sahip olmasından dolayı Şekil 2’de harita üzerinde gösterilen Gümüşhane ili olarak seçilmiştir. Çalışma alanına ait ana ve alt kriterler doğrultusunda veriler, ilgili kuruluşlardan, üniversitelerdeki ilgili bölümlerden ya da özel sektördeki ilgili kişilerden temin edilmiştir. Bazı veriler basılı haritalar üzerinden sayısallaştırma yapılarak, bazıları ise ArcMap ortamında işlenerek elde edilmiştir.

Çizelge 3: FAHP ile elde edilen kriter ağırlık değerleri

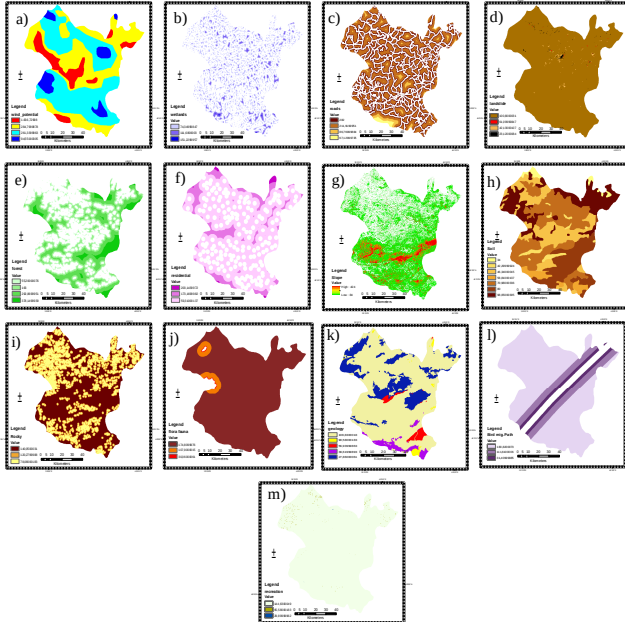
Rüzgar potansiyeli	33,37389149	Sulak alanlar	5,677391473	Yerleşim	5,810599505
<3 m/s	4,151668446	< 500 m	Kullanılamaz	<2 km	Kullanılamaz
3-5 m/s	11,47535758	500-1 km	14,47692593	2 - 5 km	10,23217436
5-7 m/s	12,5056327	1 - 2 km	21,74445223	5 - 10 km	29,87283169
>7 m/s	71,86734128	2 - 5 km	29,44424548	10 - 20 km	35,04288932
		>5 km	34,33437635	> 20 km	24,85210463
Ormanlık alanlar	8,641571526	Eğim	8,641571526	Kayalık alanlar	5,550154152
< 500 m	Kullanılamaz	<3°	47,78001033	0 - 500 m	15,96655415
500-1 km	6,208335636	3 - 5°	32,73770466	500m. - 1 km	24,59550381
1 - 2 km	18,32951425	5 - 10°	10,00186826	1 - 10 km	28,63753224
2 - 5 km	32,93562907	10 - 20°	9,480416752	>10 km	30,80040981
>5 km	42,52652105	>20°	Kullanılamaz		
Yollara uzaklık	5,950208617	Jeoloji	4,730551948	Kuş göç yolları	4,730551948
< 500 m	Kullanılamaz	Asit-Ortaç Intr.	8,60472504	<2,5	Kullanılamaz
500 m - 1 km	41,7914648	Bazik-ultrabazikler	12,23437662	2,5 - 5 km	9,698843425
1 - 3 km	31,36410471	Metamorfittler	17,58352209	5 - 10 km	34,4645662
3 - 5 km	12,86027049	Volkanitler	27,97013307	>10 km	55,83659037
5 - 10 km	9,950484297	Sedimanter Kayaçlar	33,60724318		
> 10 km	4,033675704				
Toprak	5,550154152	Flora-Fauna	4,521898913	Rekreasyon	3,977011517
1. sınıf toprak	6,953572677	<500 m	Kullanılamaz	Mesire yeri	12,45213012
2. sınıf toprak	8,650210768	500m - 1 km	9,698843425	Yaylalar	27,31348833
3. sınıf toprak	9,475771198	1 - 5 km	34,4645662	Diğer	60,23438155
4. sınıf toprak	11,96263108	>5 km	55,83659037	Heyelan	2,844443238
5. sınıf toprak	12,02634525			Aktif heyelan alanları	10,1793435
6. sınıf toprak	14,51464959			Potansiyel heyelan alanları	18,54927511
7. sınıf toprak	16,36718165			Eski heyelan alanlar	26,89919967
8. sınıf toprak	20,04963779			Diğer	44,37218172



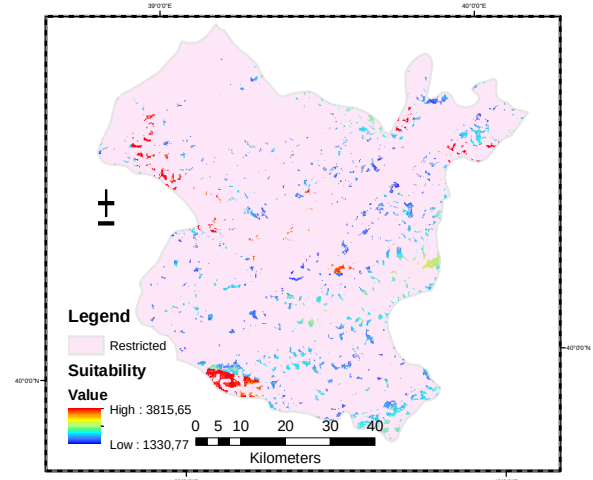
Şekil 3. Çalışma alanına ait rüzgar hızı haritası.

Şekil 3'te gösterilen 50 metre yükseklikteki rüzgar hızı dağılımını gösteren rüzgar enerji potansiyeli haritası, yenilenebilir enerji genel müdürlüğünün rüzgar haritasından (İl Bazlı Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası) dijitalleştirilmiştir. Ağırlık değerleri, harita veri tabanlarına girildikten sonra, alt kriter haritalarından oluşan ana kriter haritaları, haritalar üzerinde aritmetik işlemlerin yapılabilmesi için 200 m. x 200 m. piksel boyutunda piksel tabanlı haritaya (raster) dönüştürülmüştür. Sınırlandırılmış bölgeler (kullanılamaz yerler), ArcGIS ortamında verinin olmaması anlamına gelen "No Data" olarak sınıflandırılmıştır.

Uygunluk haritasının elde edilebilmesi için ArcGIS'te "Raster Calculator" (RC) fonksiyonu kullanılmıştır. RC fonksiyonunda toplama vb. matematiksel işlemler piksel tabanlı haritalar arasında uygulanabilmektedir. Ayrıca RC fonksiyonunda, "No Data" ile ifade edilen bir sınırlandırılmış bölge,



Şekil 4. Çalışma alanına ait ağırlıklandırılmış ve birleştirilmiş haritalar.



Şekil 5. Sınırlandırılmış yerler ve uygunluk haritası

ağırlıklandırılmış başka bir bölgeyle toplandığında, bir sayının sıfırla çarpımı gibi sınırlandırılmış bir bölge oluşmaktadır. Bu işlem bir kriter açısından, sınırlandırılmış (kullanılamaz) olan bir bölgenin başka bir kriter için ağırlık değeri olmasına karşın, üst üste geldiğinde kullanılamaması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan ağırlıklandırılmış ve birleştirilmiş haritalar Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'teki parça haritalarda sırasıyla, a'da Rüzgar potansiyeli, b'de Sulak alanlar, c'de Yollara uzaklık, d'de Heyelan alanları, e'de Ormanlık alanlar, f'de Yerleşim yerlerine uzaklık, g'de Eğim, h'de Toprak yapısı, i'de Kayalık alanlar, j'de Flora fauna, k'da Jeoloji, l'de Kuş göç yolları ve m'de Rekreatyon alanları gösterilmektedir. RC fonksiyonu kullanılarak Şekil 4'teki bütün haritaların birleştirilmesiyle elde edilen sınırlandırılmış yerler ve uygunluk haritası Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 5'te sınırlandırılmış bölgeler pembe renklerde gösterilmektedir. Bu harita üzerinde yüksek ağırlık değerlerinden düşük değerlere gösterim kırmızı renkten mavi rengine doğru yapılmaktadır. Rüzgar santrali yer tespiti için toplam ağırlık değerleri yüksek olan kırmızıya yakın yerler tercih edilmelidir. Bu harita üzerindeki piksel değeri 3000'den daha düşük değerli yerlerde rüzgar santrali kurulumu, verimlilik açısından tavsiye edilmemektedir.

5. Sonuçlar

İyi bir YEK alternatifi olarak yeni bir rüzgar santrali, ekonomik, çevresel ve sosyal açılarından en uygun yerin tespitinin yapılmasını gerektirmektedir. Rüzgar santralleri için en uygun yerin tespitinde ilgili kriterlerin belirlenmesi ve ÇKKVY'lerden olan FAHP ile birbirlerine göre ağırlık değerlerinin verilmesi, oldukça önemli bir işlemdir. Diğer taraftan FAHP'nin CBS ile birlikte kullanılması rüzgar santrali yer tespiti çalışmalarında oldukça kullanışlı bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalar ve uzman görüşleri doğrultusunda rüzgar santralleri için oldukça geniş bir yelpazede kriterler belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlık değerlerinin verilmesi literatürde birçok çalışmada kullanılan ÇKKVY'lerinden FAHP ile yapılmıştır. Sınırlandırılmış bölgeler tespit edilerek tüm veri işlemleri CBS ortamında gerçekleştirilmiştir. CBS ortamındaki RC fonksiyonuyla tüm

veriler birleştirilerek rüzgar santrali yer tespiti için uygunluk haritası elde edilmiştir. Yapılan çalışmayla çevresel, ekonomik ve sosyal kriterler göz önünde bulundurularak rüzgar santralleri yer tespiti daha doğru olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kriterlerin sayısı artırıldıkça daha uygun ve daha doğru yer tespiti çalışmalarının yapılabilmesi mümkündür. Ancak ülkemiz şartları göz önünde bulundurulduğunda bazı kriterlere ait dijital verilerin bulunması mümkün olmadığından çalışmada kullanılacak kriterlere ait verilerin elde edilebilirliği kontrol edilmelidir.

Bu çalışma, araştırmacılar için rüzgar santralleri yer tespiti çalışmalarında, kriterlerin tespiti, ağırlıklandırılması ve diğer CBS işlemleri açısından iyi bir referans olacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] World Energy Council. World Energy Resources 2013 Survey. 2013. Available from: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf
- [2] Erbil, A. Ö., “Social acceptance of the clean energy concept: Exploring the clean energy understanding of Istanbul residents”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 15, 4498–506, 2011.
- [3] Chingulpitak, S. ve Wongwises, S., “Critical review of the current status of wind energy in Thailand”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 31, 312–8, 2014
- [4] Lee, SK. ve ark., “A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 21, 347–55, 2013.
- [5] Lee, AHL., Chen, HH., Kang, H-Y., “Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms”, *Renew Energy*, 34, 120–6, 2009.
- [6] Painuly, J., “Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis”, *Renew Energy*, 24, 73–89, 2001.
- [7] Pechak, O. ve ark., “Role and contribution of the clean development mechanism to the development of wind energy”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 15, 3380–7, 2011.
- [8] Aydin, NY ve ark., “GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 14, 364–73, 2010.
- [9] Wrixon, GT, Rooney, A-ME, Palz W. *Renewable energy-2000*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1993.
- [10] İlkiliç, C., “Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 16, 1165–73, 2012.
- [11] Van, H. R. ve Fthenakis, V., “GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 15, 3332–40, 2011.
- [12] Janke, JR., “Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado”, *Renew Energy*, 35, 2228–34, 2010.
- [13] Mari, R., ve ark., “A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy)”, *Renew Energy*, 36, 754–63, 2011.
- [14] Tegou, L-I., ve ark., “Environmental management framework for wind farm siting: methodology and case study”, *J Environ Manage*, 91, 2134–47, 2010.
- [15] Aydin, NY., ve ark., “GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey”, *Energy Convers Manag.*, 70, 90–106, 2013.
- [16] Sliz-Szkliniarz, B. ve Vogt, J., “GIS-based approach for the evaluation of wind energy potential: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 15, 1696–707, 2011.
- [17] Aydin, NY., “GIS-based site selection approach for wind and solar energy systems: a case study from western Turkey”, Türkiye, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2009 ([Doktora Tezi]).
- [18] Uyan, M., “GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region, Konya/Turkey”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 28, 11–7, 2013.
- [19] Charabi, Y. ve Gastli, A., “PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation”, *Renew Energy*, 36, 2554–61, 2011.
- [20] Sánchez-Lozano, JM. ve ark., “Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 24, 544–56, 2013.
- [21] Sánchez-Lozano, JM. Ve ark., “GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain”, *Renew Energy*, 66, 478–94, 2014.
- [22] Defne, Z. ve ark., “GIS based multi-criteria assessment of tidal stream power potential: A case study for Georgia, USA”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 15, 2310–21, 2011.
- [23] Ertay, T. ve ark., “Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey”, *Technol Econ Dev Econ.*, 19, 38–62, 2013.
- [24] Stein, EW., “A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 22, 640–54, 2013.
- [25] Selçuk, L., “An Avalanche Hazard Model for Bitlis Province, Turkey, Using GIS Based Multicriteria Decision Analysis”, *Turkish J Earth Sci.*, 523–35, 2013.
- [26] Heo, E. ve ark., “Analysis of the assessment factors for renewable energy dissemination program evaluation using fuzzy AHP”, *Renew Sustain Energy Rev.*, 14, 2214–20, 2010.
- [27] Choudhary, D. ve Shankar, R., “An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India”, *Energy*, 42, 510–21, 2012.
- [28] Kengpol, A., ve ark., “A Decision Support System for Selection of Solar Power Plant Locations by Applying Fuzzy AHP and TOPSIS: An Empirical Study”, *J Softw Eng.*, 470–81, 2013.
- [29] Eroğlu, H. ve Aydin, M., “Optimization of electrical power transmission lines’ routing using AHP, Fuzzy AHP and GIS”, *Online.journals.tubitak.gov.tr*. DOI: 10.3906/elk-1211-5.
- [30] Kahraman, C. ve Kaya, İ., “A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives”, *Expert Syst Appl*, 37, 6270–81, 2010.
- [31] Chang, DY., “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP”, *European Journal of Operational Research*, 95, 649–655, 1996.
- [32] Özdağoğlu, A. ve Özdağoğlu, G., “Comparison of AHP and Fuzzy AHP for the Multi- Criteria Decision Making Processes with Linguistic Evaluations”, *Istanbul Commerce University journal of Natural and Applied Sciences*, 11, 65–85, 2007.
- [33] Baban, SM. ve Parry, T., “Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK”, *Renew Energy*, 24, 59–71, 2001.
- [34] Hansen, H., “GIS-based multi-criteria analysis of wind farm development”, *ScanGIS’2005 Scand Res Conf.*, 75–87, 2005.
- [35] Yıldırım, V. ve Nisanci, R., “Developing a geospatial model for power transmission line routing in Turkey”, *FIG Congress*, 11–16, 2010.
- [36] Voivontas, D. ve Assimacopoulos, D., “Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system”, *Renew Energy*, 13, 333–334, 1998.
- [37] Kahraman, C. ve ark. “Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey”, *International J of Production Economics*, 87, 171–184, 2004.
- [38] Topel, A., “Analitik hiyerarşi prosesinin bulanık mantık ortamındaki uygulamaları-bulanık analitik hiyerarşi prosesi”, Türkiye: İstanbul Üniversitesi, 2006, ([Y.L. Tezi]).
- [39] Göksu, A., “Bulanık analitik hiyerarşik proses ve üniversite tercih sıralamasında uygulanması”, Türkiye: Süleyman Demirel Üniversitesi, 2008, ([Doktora Tezi]).