



TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ ALTERNATİFLERİNİN SEÇİMİ İÇİN GRAF TEORİ VE MATRİS YAKLAŞIM

Fahriye UYSAL¹

Özet

Yenilenebilir enerji, doğanın evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen hidrolik, jeotermal, güneş, biokütle ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarını ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları tüm ülkelerde olduğu gibi Türkiye içinde ekonomik, politik ve çevre açısından güvenilir enerji sağlama özellikleri ile oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu yüzden, enerji yatırımları açısından en iyi yenilenebilir enerji alternatifinin seçimi önemlidir. Graf teori bir mantıksal ve sistem yaklaşımı olarak bilim ve teknolojinin çeşitli alanlarında modelleme ve analiz için kullanılan model sunumlarını kapsar. Matris yaklaşım ise, amaçları karşılamak üzere sistem fonksiyonu ve indeks türetmek için graf modellerin analizinde kullanılır. Bu çalışma, yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimi için somut ve soyut kriterlerin değerlendirildiği ve birbiriyle ilişkili her bir kriterin göreceli önceliğinin tanımlandığı bir graf teori ve matris yaklaşım uygulamasını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Graf Teori ve Matris Yaklaşım
Jel Sınıflaması: Q28, C60

Abstract

Renewable energy is the kind of energy including hydro, geothermal, solar, biomass and wind which presents as same in the next day according to natural cycle process. Renewable energy resources, like for all the other countries, make up a significance role in reliable energy supply from economical, political and environmental issues in Turkey. For this reason, selection of the best renewable energy alternative is very important for the energy investment. Graph theory is a logical and system approach consists of model presentations for modeling and analysis in different fields of science and technology. Matrix approach is used in graph models to produce indices and system function to realize the goals. In this study, tangible and intangible criteria are evaluated and relative importance of each criterion is defined according to each other by using graph theory and matrix approach for selecting the best renewable energy alternative.

Keywords: Renewable Energy, Graph Theory and Matrix Approach
Jel Classification: Q28, C60

¹ Dr. Fahriye Uysal, Akdeniz Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, Dumlupınar Bulvarı, Kampüs, Antalya, E-mail: fahriyeuysal@akdeniz.edu.tr

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları, medeniyetin başlangıcından beri insanlar için önemli hale gelmiştir. Açıkça, yerli ve yenilenebilir enerji, fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahip olmasından dolayı, gelecek için anahtar bir rol oynamaktadır (Kahraman vd. 2009). Fosil yakıtları esas alan enerji kullanımı; yakıt konusunda kısmen dışa bağımlılık, yüksek ithalat giderleri ve çevre sorunları gibi önemli olumsuzluklar doğurmaktadır. Yerel doğal zenginlikler konumunda olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve küresel ısınmanın kontrol edilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması ile dünyada tükenmekte olan fosil yakıt rezervlerini olabildiğince korunması amaçlanmaktadır (Ertürk, 2006).

Yenilenebilir enerji, doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağını ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, yenilenebilir oluşları, en az düzeyde çevresel etki yaratmaları, işletme ve bakım masraflarının az olması ve ulusal nitelikleri ile güvenilir enerji sağlama özellikleri ile dünya ve ülkemiz için önemli bir yere sahiptir (Külekçi, 2009).

Başlıca yenilenebilir enerji kaynakları kısaca aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Hidrolik enerji: Taşınan suyun gücünden üretilen enerjidir.

Güneş enerjisi: güneşin gün boyunca atmosfere verdiği ısının enerjiye dönüşümüdür.

Rüzgâr enerjisi: güneşin ısıyla oluşur, güneş enerjisinin başka bir biçimidir, sağlayacağı enerji gücüne ve estiği süreye bağlıdır (İlkiliç ve Türkbay, 2010).

Biokütle enerjisi: Bitkisel ve hayvansal artıklardan oluşan tüm maddeler biokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan üretilen enerji ise biokütle enerjisidir (Koh ve Hoi, 2003).

Jeotermal enerji: Yerkabuğunda depolanan ısıdır. Bölgesel olarak değişen kayaların ve yer altı sularının ısınmasıyla çekirdekten yeryüzüne doğru sürekli bir ısı akışı söz konusudur (Carella, 2001).

Bu çalışma, çok kriterli karar verme sürecinde, en uygun yenilenebilir enerji alternatifini tanımlamak üzere önerilmiştir. Bu amaç için, 5 ana kriter kapsamında 5



yenilenebilir enerji alternatifini değerlendirmek üzere, graf teori ve matris yaklaşım kullanılmıştır.

Graf teori, mantıksal ve sistematik bir yaklaşımdır. Graflar ve uygulamaları ile ilgili gelişmiş teori çok iyi belgelenmiştir. Rao (2007) kitabında, bulanık çok amaçlı karar verme yöntemleri ve graf teori kullanarak imalat ortamında karar verme konusundaki birkaç uygulamayı incelemiştir. Graf model sunumları, bilim ve teknolojinin ekonomi, sosyoloji, matematik, mühendislik ve yöneylem araştırması gibi, çeşitli alanlarında, problemleri ve sistemleri modellemek ve analiz etmek üzere kullanılır. Matris yaklaşım ise, amaçları karşılamak için indeks ve sistem fonksiyonu türetmek için graf modellerin analizinde kullanılır (Rao, 2007). Graf teori ve matris yaklaşım, graf/digraf sunum, matris sunum ve sürekli fonksiyon sunumlarını içerir. Digraf, değişkenler ve birbirleri arasındaki görsel sunumdur. Matris, matematik dizin içinde digraf'ı dönüştüren ve sürekli fonksiyon için sayısal indeksi hesaplamaya yardım eden matematiksel bir sunumdur (Faisal vd., 2007).

Bu çalışma aşağıdaki düzende sunulmuştur, bölüm 2, enerji yatırımları ile ilgili çalışmaları içerir. Bölüm 3, alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmek üzere ilgili kriterleri sunar. Bölüm 4'te yenilenebilir enerji alternatiflerinin çok kriterli seçimi için yöntem verilmiştir, bölüm 5, graf teori ve matris yaklaşımın bir uygulamasını içerir. Çalışmanın sonuçları ise bölüm 6'da yer alır.

2. LİTERATÜRE BAKIŞ

Enerji yatırım kararları doğası gereği, çok amaçlıdır. Çok amaçlı karar verme yöntemleri, hükümetlere enerji sektöründeki plan ve politikaları değerlendirmek üzere yardım eder. Günümüzde, çok amaçlı karar verme yöntemleri ile ilgili birçok çalışma, enerji problemleri üzerine yoğunlaşmıştır (Kahraman vd. 2009). Bu konudaki çalışmalar özet olarak verilmiştir.

Beccali vd., (2003), bölgesel ölçekte yenilenebilir enerji politikalarının yayılması için bir hareket planı değerlendirmek üzere, çok amaçlı bir karar verme yöntemi olan ELECTRE'nin bir uygulamasını gösterdi. Pohekar ve Ramachandran (2004), enerji planlama

kararları için 90’den fazla yayını gözden geçirerek ve kullanılan en popüler karar verme yöntemlerini AHP, PROMETHEE ve ELECTRE olarak belirledi. Haralambopoulos ve Polatidis (2003), yenilenebilir enerji projelerini ve Georgopoulou vd., (1998) yenilenebilir enerji planlama sürecini, çok amaçlı karar verme yöntemlerinden PROMETHEE II kullanarak değerlendirdi. Ulutaş (2005) Türkiye’nin enerji kaynakları için alternatif enerjileri değerlendirmek üzere ANP yöntemini kullanarak enerji politikası problemini analiz etti. Afgan ve Carvalho (2002) sürdürülebilirlik koşulunu karşılayan enerji sistemini değerlendirmede kullanılan enerji göstergelerini tanımlamak üzere, parametrelerin sentez ve analizi temelinde yeni ve yenilenebilir enerji teknolojilerini değerlendirmek için seçenekler ve kriterlerin seçimini sunmuştur.

Son yıllarda, enerji problemleri ile ilgili karar verme yöntemlerinin bulanık kümeler ile zenginleştiği görülmektedir. Wang vd., (2009), sürdürülebilir enerji ile ilgili çok amaçlı kararları kriterler bazında objektif, sübjektif ve karma olarak değerlendirmiştir. Enerji tedarik sistem kriterlerini, teknik, ekonomik, çevre ve sosyal açıdan özetlemiştir. Beccali vd., (1998), enerji planlamada, çok amaçlı karar verme yaklaşımında karar vericilere karmaşık problemleri anlama ve seçim yapma konusunda yardımcı olmak üzere, bulanık kümeler metodolojisi ile karşılaştırarak tanıtım amaçlamıştır. Borges ve Antunes (2003), bulanık çok amaçlı doğrusal programlama problemleri için parametrik (ağırlık) şemalarının basit temel sorunlara karşılık gelen kayıtsızlık bölgeleriyle ayrıştırma analizine dayanan interaktif bir yaklaşım önermişlerdir. Girdi-çıkı enerji-ekonomi planlama modelinin belirsiz ve kesin olmayan katsayılarıyla başa çıkmak için tanımlanan model, ulusal seviyede enerji politikaları ve ekonomi arasındaki etkileşiminin analiziyle ilgili karar vericilere karar desteği sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

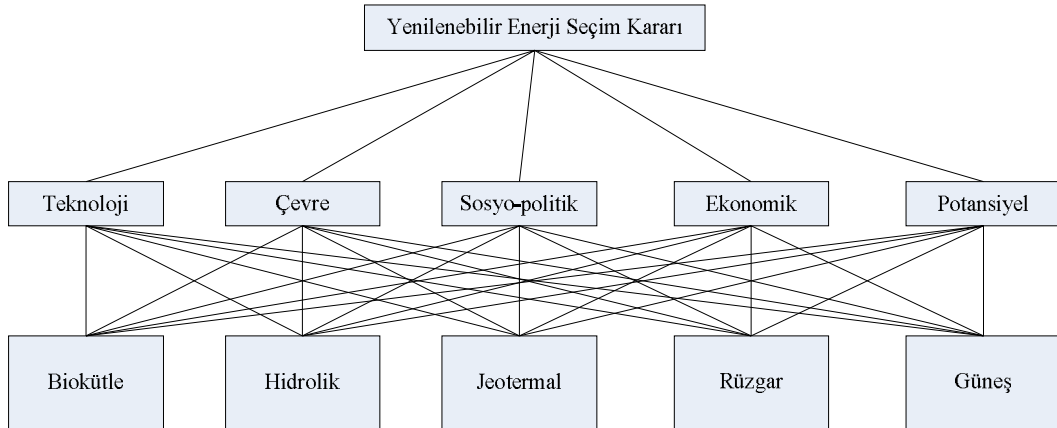
3. DEĞERLENDİRME KRİTERİ

Yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimi ile ilgili az sayıda yayının olmasına rağmen, bu yayınlarda seçim kriterleri; teknoloji, çevre, sosyo-politik ve ekonomik olarak ele alınmıştır (Beccali v.d.,2003, Goletsis v.d.,2003, Topcu v.d. 2004, Kahraman v.d.,2009).

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji alternatiflerini değerlendirmek üzere ele alınan kriterlere, literatüre ilave olarak yenilenebilir enerji potansiyeli eklenmiştir. Gürbüz, (2009)’e

göre ‘yenilenebilir enerji kaynaklarının yerli kaynak olması ve bu kaynaklardan üretilecek enerjinin arttırılması arz güvenliği nedeniyle sağladığı avantajın yanı sıra enerji ithalatının azaltılmasına katkı sağlaması’ seçim kararında potansiyel kriterin önemi ortaya çıkarmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirmek üzere kullanılan kriterler ile ilgili hiyerarşik yapı Şekil 1.’de ve açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

1. Teknoloji: bu kriter, yenilenebilir enerji teknolojisini uygulama, riskler, güvenilirlik, hazırlık aşaması, uygulama aşaması, performans ve teknik bilgi gibi tüm yönleri düşünülerek değerlendirir.
2. Çevre: yenilenebilir enerji kaynaklarının karbon emisyonu düşük, asit yağmuru problemi yok denecek kadar az olmasına rağmen çevreye yönelik bazı olumsuz sayılabilecek etkileri (doğal ortamın tahribatı, hava kirlenmesi, sera etkisi v.b.) açısından değerlendirir.
3. Sosyo-politik: ulusal enerji politikaları çerçevesinde hükümet desteği ve işgücü etkisini sosyal ve politik yönleriyle değerlendirir.
4. Ekonomik: bu kriter, yenilenebilir enerji yatırımlarını toplam maliyet açısından değerlendirir.
5. Potansiyel: yenilenebilir enerji alternatiflerini ülke potansiyeli açısından değerlendirir.



Şekil 1. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Alternatifi Seçimi İçin Hiyerarşik Yapı

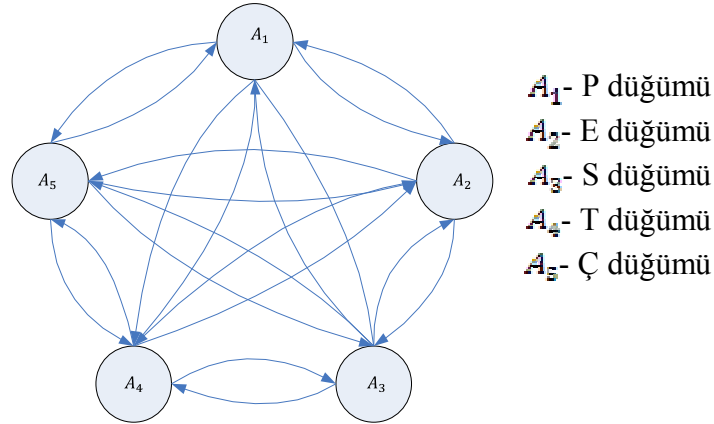
4. YENİLENEBİLİR ENERJİ ALTERNATİFLERİNİN ÇOK KRİTERLİ SEÇİMİ

Graf teori ve matris yaklaşım, literatürde çok amaçlı karar verme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, bazı çalışmalarda bulanık koşullar altında geliştirilmiştir (Rao, 2006, Darvish vd., 2009). Bu çalışmada, graf teori ve matris yaklaşım yöntemi, yenilenebilir enerji alternatifleri arasından seçim yapabilmek amacıyla kullanıldı. Seçim süreci, üç ana adımdan oluşmaktadır. İlk olarak alternatifler ve göreceli kriterler literatürden tanımlandı. İkinci olarak, alternatifler uzmanlar tarafından değerlendirildi. Son olarak, yöntem, değerlendirmelerden yararlanarak seçim süreci için kullanıldı.

4.1. Yenilenebilir Enerji Seçimi İçin Graf Model

Yenilenebilir enerji seçim kriterleri graf modeli, yenilenebilir enerji seçim kriterleri ve onlar arasındaki ilişkileri içerir. Graf, $N = \{n_i\}$ düğümleri kümesi ile $t = 1, 2, 3, \dots, M$ ve $E = \{e_{ij}\}$ yönlendirilmiş kenarların kümesini içerir. n_i düğümü, t . yenilenebilir enerji seçim kriterini, kenarlar ise kriterler arasındaki göreceli önemi sunar. M düğüm sayısı, yenilenebilir enerji seçimi için düşünülen kriterlerin sayısına eşittir. Yenilenebilir enerji seçim sürecinde eğer t düğümü diğer j düğümü üzerinde göreceli öneme sahip ise, yönlendirilmiş kenar veya ok t düğümünden j düğümüne çizilir (e_{tj}). Eğer j , t düğümünden daha göreceli öneme sahip ise yönlendirilmiş kenar veya ok j düğümünden t düğümüne çizilir (e_{jt}). (Rao, 2007).

Ülke ihtiyacını vermek üzere, yenilenebilir enerji seçimi için bir örnek problem düşünüldü. Yenilenebilir enerji seçim kriterleri; Teknoloji, Çevre, Sosyo-politik, Ekonomik ve Potansiyel olarak belirlendi. Yenilenebilir enerji seçimi için düşünülen 5 seçim kriteri graf’ı 5 düğümden oluşmaktadır. Her bir düğüm göreceli olarak T, Ç, S, E ve P seçim kriterini sunar. Potansiyel kriteri ekonomik kriterinden daha önemlidir. Teknoloji kriteri ise çevre kriterinden daha önemlidir. Kriterin göreceli önemi her iki yönde iki kriter arasında yer almaktadır. Yenilenebilir enerji seçim kriteri graf’ı Şekil 2’de gösterildiği üzere geliştirilmiştir.



Şekil 2. Yenilenebilir Enerji İçin Seçim Kriterinin Graf Gösterimi

Yenilenebilir enerji seçim kriteri graf'ı, kriterler ve göreceli önemleri arasında hızlı görsel değerlendirme yapmak üzere, grafik sunumu verir. Düğün sayısı ve onlar arasındaki ilişki arttıkça graf daha karmaşık hale gelir. Bu durumda görsel analiz mümkün olamayabilir. Karmaşık durumu çözmek amacıyla matris yaklaşım kullanılabilir. Karmaşık görünümdeki graf, matris form kullanılarak satırlar ve sütunlarla ifade edilebilir, böylece ilave hesaplamalar ve durumu anlamada kolaylık sağlar.

4.2. Yenilenebilir Enerji Seçim Kriteri Graf'ının Matris Sunumu

Yenilenebilir enerji seçim kriteri matrisi, seçim kriterlerinin tümünü (A_1 gibi) ve $M \times M$ boyutta onların göreceli önemlerini içerir. Şekil 2'de matris B olarak seçim kriteri graf'ı verilmiştir.

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} P & E & S & T & Ç \end{matrix} \\ \begin{matrix} P \\ E \\ S \\ T \\ Ç \end{matrix} & \begin{bmatrix} A_1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & A_2 & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & A_3 & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & A_4 & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & A_5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(1)

Burada, A_i n_i düğümünü temsil eden i. kriterinin değeridir ve a_{ij} i kriterinin j üzerinden e_{ij} kenarını temsil eden göreceli önemini verir. B matrisi, yenilenebilir enerji seçim kriter fonksiyonu olarak tanımlanır. Standart matris fonksiyonu kombinatoryal matematikte

kullanılır (Jurkat and Ryser, 1966). Sürekli kavramının uygulamasında negatif işaret olsun olmasın bilgi kaybolmayacak ve seçim kriteri daha iyi ifade edilecektir. Böylece, sürekli fonksiyon pozitif olarak, tüm belirleyici şartlar düşünülerek matris determinantı temsil eder (Rao and Gandhi, 2002, Wani and Gandhi, 1999).

Jurkat ve Ryser (1966) yenilenebilir enerji için matris ifadenin seçim kriteri fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned}
 per(B) = & \prod_{i=1}^5 A_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^5 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=k+1}^3 \sum_{m=i+1}^4 (a_{ij} a_{jl}) A_k A_l A_m \\
 & + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \sum_{k=j+1}^5 \sum_{l=1}^3 \sum_{m=i+1}^4 (a_{ij} a_{jk} a_{kl} + a_{ik} a_{kj} a_{ji}) A_l A_m \\
 & + \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^5 \sum_{k=j+1}^4 \sum_{l=i+2}^5 \sum_{m=1}^4 (a_{ij} a_{ji} a_{kl} a_{lk}) A_m \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^4 \sum_{k=i+1}^5 \sum_{l=j+1}^5 \sum_{m=1}^4 (a_{ij} a_{jk} a_{kl} a_{li} + a_{li} a_{ik} a_{kj} a_{ji}) A_m \right) \\
 & + \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \sum_{k=j+1}^5 \sum_{l=1}^4 \sum_{m=i+1}^5 (a_{ij} a_{jk} a_{kl} + a_{ik} a_{kj} a_{ji}) a_{lm} a_{mi} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{i=1}^1 \sum_{j=i+1}^4 \sum_{k=i+1}^5 \sum_{l=i+1}^5 \sum_{m=j+1}^5 (a_{ij} a_{jk} a_{kl} a_{lm} a_{mi} \right. \\
 & \quad \left. + a_{im} a_{mi} a_{im} a_{kj} a_{ji}) \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

Formül 2, yenilenebilir enerji seçimi için tam bir anlatım sunar. Formül, göreceli önemleri ile birlikte kriterlerinin tümünü göz önünde bulundurur. Formülde sunulan ifade, belirleyici köşegen elemanlar ve farklı boyutta köşegen elemanların döngü kümesidir ($a_{ij} a_{ji}$ gibi). Şayet burada seçim kriteri M sayıda ise tüm kriterler arasında göreceli önem mevcuttur seçim kriteri grafi C matrisi olarak yazılabilir.



$$C = \begin{matrix} \text{Kriter} & 1 & 2 & 3 & \dots & M \\ 1 & A_1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1M} \\ 2 & a_{21} & A_2 & a_{23} & \dots & a_{2M} \\ 3 & a_{31} & a_{32} & A_3 & \dots & a_{3M} \\ \dots & a_{41} & a_{42} & a_{43} & \dots & a_{4M} \\ m & a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} & \dots & A_M \end{matrix}$$

C matrisi ile sunulan seçim kriteri fonksiyonu M sayıda faktöriyel terimi içerir ve sigma biçiminde yazılabilir.

Yenilenebilir enerji için seçim kriteri fonksiyonu, (M+1) grupta ve göreceli önemler döngüsü ve kriter ölçümleri temsil eden grupları içerir. İlk grup M kriterin ölçümünü içerir ikinci grupta grafta döngü yoktur. Üçüncü grup, M-2 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün iki eksiğini içerir. Dördüncü grupta her bir terim, M-3 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün üç eksiğini sunar. Beşinci grup iki alt grubu içerir. İlk gruptaki terim, M-4 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün iki eksiğidir. İkinci gruptaki her bir terim ise, M-4 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün dört eksiğidir. Altıncı grupta iki alt grubu içerir. İlk alt grup, M-5 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün iki eksiğini temsil eder. İkinci alt grubun her bir terimi ise, M-5 kriterinin ölçümünü ve göreceli önem döngüsünün beş eksiğidir. Benzer olarak formülün diğer terimleri tanımlanır. Böylece, yenilenebilir seçim kriteri fonksiyonu ele alınan seçim problemini ifade eder. Formül 4, MxM boyutunda pozitif işaretlidir bilgisayarda hesaplamalar kolaylaşır.

4.3. Yenilenebilir Enerji Seçim İndeksi

Yenilenebilir enerji seçim indeksi, belirli bir uygulama için yenilenebilir enerjinin performans ölçüsüdür. Endeksin yüksek değer alması daha iyi bir performansı ifade eder. Denklem 2'de tanımlanan kriterler ve onların göreceli önemlerini içeren seçim kriteri fonksiyonu, yenilenebilir enerji seçim indeksini değerlendirmek için uygundur. Seçim kriteri fonksiyonunun sayısal değeri, yenilenebilir enerji seçim indeksi olarak adlandırılır. Seçim kriteri fonksiyonu sadece pozitif terimleri içerir, A_i ve a_{ij} 'nin yüksek değerleri, yenilenebilir enerji seçim indeksi değerinde artışa neden olur. Bu değeri hesaplamak için A_i ve a_{ij} bilgisine ihtiyaç vardır.

A_i 'nin değeri tercihen i.kriter için standart alınmalıdır. Eğer bu niceliksel değer mevcut değilse, kriterin değerini atamak üzere Tablo 1’deki gibi 0-10 arasında bir ölçek kullanılarak derecelendirilebilir.

Tablo 1. A_i Yenilenebilir Enerji Kriterinin Değeri

Yenilenebilir enerji kriterinin nitel ölçümü	A_i Yenilenebilir enerjinin kriter değeri
Aşırı düşük	0
Son derece düşük	1
Çok düşük	2
Ortalama altı	3
Ortalama	4
Ortalama üstü	5
Yüksek	6
Çok yüksek	7
Oldukça yüksek	8
Son derece yüksek	9
Aşırı yüksek	10

$$A_i = \begin{cases} \left(\frac{10}{A_{iy}} \right) A_{id} & \text{for } A_{i1} = 0 \\ \left(\frac{10}{A_{iy} - A_{id}} \right) (A_{id} - A_{i1}) & \text{for } A_{i1} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

Denklem 3 genel olarak fayda kriteri için geçerlidir. Fayda kriteri, uygulamadaki arzu edilen yüksek kriter değeridir. Faydası olmayan kriter ise arzu edilenden daha az kriter değerine sahiptir. Burada kullanılan ölçekte kriterin en yüksek değerine 10 ve düşük değerine 0 değeri atanır. Diğer yandan A_{ij} 'nin orta değerine 0 ile 10 arasında bir değer atanır.

$$A_i = \begin{cases} 10 \left(1 - \frac{A_{id}}{A_{id}} \right) & \text{for } A_{i1} = 0 \\ \left(\frac{10}{A_{iy} - A_{id}} \right) (A_{id} - A_{i1}) & \text{for } A_{i1} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

İki kriterin göreceli önemi için 0-10 arasında ölçek üzerinden bir değer atanır. Göreceli önemi ifade eden a_{ij} verilen uygulama için i kriterinin j kriteri ile göreceli önemini karşılaştırır. İ ve j ile j ve i arasındaki göreceli önem 0-10 ölçeğinde değerlendirilir.

$$a_{ji} = 10 - a_{ij} \quad (5)$$

Ölçek 0-10 arasında, kriterlerin göreceli önemlerinin karşılaştırılması için kullanılır. j kriterinin i kriteri ile karşılaştırılmasında formül 5'ten yararlanır. Örneğin j. Kriter i. kriterden biraz daha önemli ise $a_{ij} = 6$ ve $a_{ji} = 4$ değerini alır. Tablo 2. a_{ij} ile ilgili atamaları gösterir(Rao ve Gandhi, 2001). Yenilenebilir enerji için yenilenebilir enerji seçim indeksi formül 2 kullanılarak elde edilir. Yenilenebilir enerji alternatiflerini seçerken indeks değeri yüksek olan önemlidir.

Tablo 2. A_i Kriterlerinin Göreceli Önemi

Sınıf değerlendirme	Kriterlerin Göreceli önemi	
	a_{ij}	$a_{ji} = 10 - a_{ij}$
İki kriter eşit önemdedir	5	5
Bir kriter diğerinden biraz fazla önemlidir.	6	4
Bir kriter diğerinden çok önemlidir	7	3
Bir kriter diğerinden daha çok önemlidir	8	2
Bir kriter diğerinden son derece önemlidir	9	1
Bir kriter diğerinden aşırı derecede önemlidir	10	0

4.4. Yenilenebilir Enerjinin Tespiti ve Karşılaştırması

Seçim kriteri fonksiyonu, yenilenebilir enerjilerin karşılaştırma ve tespiti için kullanışlıdır. Belirli bir uygulama için seçim kriteri fonksiyonunun her bir grubundaki terimlerin sayısı aynı olacaktır. Ancak değerleri farklı olacaktır. Bu açıdan amaç için kullanılacaktır. T_{ij} seçim kriteri fonksiyonunda i. grubun j. Alt grubundaki terimlerin toplam değerini sunar. Alt grup bulunmadığı zaman i. grubun terimlerinin toplam değeri $T_{ij} = T_i$ dir.

Uygulama için yenilenebilir enerjinin tespit kümesi, formül (6) ile iki yenilenebilir enerjiyi karşılaştırmak için kullanılır.

$$|T_1|T_2|T_3|T_4|T_{E1} + T_{E2}|T_{E1} + T_{E2}|...| \quad (6)$$

Genel olarak, iki yenilenebilir enerjinin karşılaştırılması, grup ve alt gruplarının seçim kriteri fonksiyonunun terimlerinin sayısal değeri benzerlik ve farklılık katsayıları değerlendirilerek gerçekleştirilir. Benzerlik ve farklılık katsayıları 0-1 aralığındadır. Eğer iki yenilenebilir enerji benzer performans bilgisine sahip ise benzerlik katsayısı 1, farklılık katsayısı 0 değerini alır. İki yenilenebilir enerji farklılık katsayısı denklem (7) ile verilir.

$$C_d^P = 1/Q(\sum_i \sum_j \theta_{ij}) \quad (7)$$

Burada, $Q = \max[\sum \sum |T_{ij}| \vee \sum \sum |T'_{ij}|]$ ve $\theta_{ij} = |T_{ij} - T'_{ij}|$ ve benzerlik katsayısı, denklem (8) ile ifade edilir.

$$C_s^P = 1 - C_d^P \quad (8)$$

Benzerlik, farklılık ve tespit kümelerinin katsayıları (Rao ve Gandhi, 2001), yenilenebilir enerjiyle ilgili bilgiler toplama açısından yararlı olacaktır.

4.5. Metodoloji

Graf teori ve matris yaklaşım esas alınarak, yenilenebilir enerji seçim tespit ve karşılaştırması için verilen uygulamada metodoloji aşağıdaki adımlarla sıralanabilir (Rao ve Gandhi, 2001):

1. Uygulama ihtiyaçlarını karşılamak üzere, yenilenebilir enerji alternatiflerini sıralanır ve seçim kriterlerini tanımlanır. A_{ij} değerini ve a_{ij} göreceli önem değerlerini elde edilir.
2. Seçim kriteri ve göreceli önemlerini göstermek üzere graf geliştirilir. Düğüm sayısı adım 1 de belirlenen seçim kriterleri sayısına eşit olacaktır.
3. Seçim kriteri matrisini geliştirilir.
4. Seçim kriteri matrisinden formül 2'deki seçim kriteri fonksiyonunu elde edilir.



5. Yenilenebilir seçim indeksini değerlendirmek üzere adım 1'deki elde edilen değerler kullanılır.
6. Seçim indeksi değerlerini büyükten küçüğe doğru sıralanır. En büyük değer en iyi seçimdir.
7. Formül (6)'yı kullanarak her bir yenilenebilir enerji tespit kümesini elde edilir.
8. Benzerlik ve farklılık katsayılarını hesaplayarak tüm olası kombinasyonlar listelenir.
9. Gelecek analiz ve başvurular için sonuçlar açıklanır.

5. TÜRKİYE'DE YENİLENEBİLİR ENERJİ ALTERNATİFLERİNİN SEÇİMİ UYGULAMASI

Bu çalışmada uygulama örneği olarak, Türkiye'de yenilenebilir enerji alternatiflerinin graf teori ve matris yaklaşım kullanılarak seçimi sunulmuştur. Yenilenebilir enerji alternatifleri güneş enerjisi, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi olarak literatürden belirlenmiştir. Yenilenebilir enerji kriterleri, değerlendirme kriteri başlığı altında geniş olarak açıklanmıştır.

Şekil 2'de elde edilen graf'ın matris formu aşağıdaki B matrisi olarak yazılabilir, aynı zamanda B matrisi, kriterlerin birbirine göre önemini de vermektedir;

$$B = \begin{matrix} & P & E & S & T & Ç \\ \begin{matrix} P \\ E \\ S \\ T \\ Ç \end{matrix} & \begin{bmatrix} - & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 4 & - & 6 & 7 & 8 \\ 3 & 4 & - & 6 & 7 \\ 2 & 3 & 4 & - & 6 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & - \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Tablo 3'te yukarıdaki kriterlerin enerji alternatiflerine karşılık gelen değerleri verilmiştir. Bu değerlerden Ekonomik, Sosyo-politik, Çevre ve Teknoloji ile ilgili kriter değerleri 4 farklı uzman görüşüne başvurularak hazırlanmıştır. Bu değerler, Tablo 1.'den 0-10 ölçeğinden ve denklem 3-4'ten yararlanarak normalize edilmiştir (Tablo 4.)

Tablo 3. Yenilenebilir Enerji Alternatiflerine Ait Kriter Değerleri

	POTANSİYEL	EKONOMİK	SOSY-P	ÇEVRE	TEKNO.
	Milyar kw/saat				
BİYOKÜTLE	372	6,7	8,3	7,7	7,7
JEOTERMAL	1,4	7,7	8,2	7,5	7,6
HİDROLİK	124,5	7,0	7,9	6,0	7,2
GÜNEŞ	305	6,9	8,9	7,3	6,1
RÜZGÂR	50	7,6	8,9	7,2	6,9

Tablo 4. Yenilenebilir Enerji Seçim Kriterlerinin Normalize Edilmiş Değerleri

	POTANSİYEL	EKONOMİK	SOSY-P	ÇEVRE	TEKNO.
BİYOKÜTLE	10	0	4	10	0
JEOTERMAL	0	10	3	9	1
HİDROLİK	4	4	0	0	4
GÜNEŞ	9	3	10	8	10
RÜZGÂR	2	9	10	8	6

Seçim kriteri fonksiyonunu veren formül 2’den yararlanarak, yenilenebilir enerji indeksi için değerler hesaplanarak elde edilen değerler farklı gruplara göre tablo 5.’te verilmiştir. Bu tablodaki toplam değerler büyükten küçüğe sıralandığında,

445985	Güneş Enerjisi
341085	Rüzgâr Enerjisi
191625	Biokütle Enerji
113899	Hidrolik Enerji
96650	Jeotermal Enerji



Yenilenebilir enerji seçimi ile ilgili sonuca ulaşılır.

Tablo 5. Yenilenebilir Enerji Alternatifleri İçin Farklı Grupların Değerleri

	1.GRUP	2.GRUP	3.GRUP	4.GRUP	5.GRUP	6.GRUP	TOPL.
B.	0	0	3600	26400	105515	56110	191625
J.	0	0	5898	10362	24280	56110	96650
H.	0	0	1360	9920	46509	56110	113899
G.	21600	0	89406	110360	168472	56110	445948
R.	8640	0	52542	79620	144173	56110	341085

B.:Biokütle, J.: Jeotermal, H.:Hidrolik, G.;Güneş, R.:Rüzgar

Benzerlik değerlerini veren katsayılar formül 7 ve 8'den yararlanarak Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Farklı Yenilenebilir Enerjiler İçin Benzerlik Katsayıları

ENERJİ	J.	H.	G.	R.
B.	0,520	0,406	0,522	0,413
J.		0,239	0,735	0,691
H.			0,696	0,641
G.				0,206

Böylece önerilen yöntem, Türkiye'deki yenilenebilir enerji seçimi ile ilgili basit ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Çözüm ile ilgili tüm hesaplamalar için C++ bilgisayar programlama dili kullanılarak, bir program yazılmıştır.

6. SONUÇ

Graf teori ve matris yaklaşım, göreceli ve yeni, çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Yöntemin uygulaması Türkiye’de yenilenebilir enerji seçimi üzere yapılmıştır. Bu amaçla, enerji sektöründe karar verici uzman görüşlerine, enerji alternatiflerine ve seçim kriterlerine gerek duyulur. Değerlendirme sürecini, yenilenebilir enerji seçim graf’ı, matris sunumu ve yenilenebilir enerji seçim endeksi oluşturmaktadır. Burada seçim graf’ı, nitel ve nicel kriterler ile aralarındaki önem ağırlıklarını modeller, matris sunum, graf modelin bir fonksiyonunun ifadesidir. Seçim kriteri fonksiyonunun sayısal değeri, yenilenebilir enerji seçim indeksini vermektedir.

Uygulamada kullanılan graf teori ve matris yaklaşım ile yenilenebilir enerji alternatiflerinden güneş enerjisi, en iyi alternatif olarak önerilebilir. Güneş enerjisi-rüzgâr enerjisi-biokütle enerjisi-hidrolik enerji-jeotermal enerji sıralamasında, esas alınan kriterlerden potansiyel, ekonomik, sosyo-politik, çevre ve teknoloji konularında meydana gelecek değişiklikler, seçim sıralamasında değişikliğe neden olabilecektir.

KAYNAKÇA

Afgan N.H, Carvalho M.G. (2002), “Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants”, *Energy*, 27:739–55.

Beccali M, Cellura M, Mistretta M., (2003), “Decision-making in energy planning: application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology”, *Renewable Energy*, 28:2063–87.

Beccali, M., Cellura, M., ve Ardente, D., (1998), “Decision making in energy planning: the ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a FUZZY-SETS methodology”, *Energy Conversion and Management*, 39(16): 1869-1881

Borges, A. R.,ve Antunes, C. H. (2003), “A fuzzy multiple objective decision support model for energy-economy planning”, *European Journal of Operational Research*, 145:304–16.

Carella, R., (2001), “The future of European geothermal energy: EGEC and the Ferrara Declaration”, *Renewable Energy*, 24(4): 397-399



Darvish, M., Yasaei, M., Saeedi, A., (2009), “ Application of the graph theory and matrix methods to contractor ranking”, *International Journal of Project Management* 27 : 610–619

Ertürk, F., (2006), “Türkiye’nin alternatif enerji üretim imkanları ve fırsatları”, Türkiye’de Enerji ve Kalkınma, (Editörler :Sandıklı, A., Dikici, B., H.,) Tasam yayınları, İstanbul.

Faisal M. N., Banwet D. K., Shankar R. (2007), “Quantification of risk mitigation environment of supply chains using graph theory and matrix methods”. *European Journal of Industrial Engineering*, 1(1):22–39.

Georgopoulou, E., Sarafidis, Y. ve Diakoulaki, D., (1998), “Design and implementation of a group DSS for sustaining renewable energies exploitation”, [European Journal of Operational Research](#), 109(2): 483-500

Goletsis Y, Psarras J, Samouilidis J. E., (2003), “Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups”, *Annals of Operations Research*, 120:135–57.

Gürbüz, A., (2009), “Enerji piyasası içinde yenilenebilir enerji kaynaklarının yeri ve önemi”, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye.

Haralambopoulos, D.A. ve Polatidis, H., (2003), “Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework”, *Renewable Energy*, 28(6):961-973

İlkiliç, C. ve Türkbay, İ., (2010), “Determination and utilization of wind energy potential for Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8):2202-2207.

Jurkat, W. B. ve Ryser, H. J. (1966), “Matrix factorisation of determinants and permanents”. *J. Algebra*, 3, 1–11.

Kahraman, C., Kaya, İ., Cebi, S., (2009), “A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy”, *Energy*, 34, 1603-1616.

Koh, M. P. ve Hoi, W. K., (2003), “Sustainable biomass production for energy in Malaysia”, *Biomass and Bioenergy*, 25(5): 517-529.

Külekçi, Ö.,Ç. (2009), “Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi”, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2, 83-91.



Pohekar, S. D. ve Ramachandran, M., (2004), “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4): 365-381

Rao, R. V. Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods. London: Springer; 2007.

Rao, R. V., (2006), “A material selection model using graph theory and matrix approach, *Materials Science and Engineering A*, 431: 248–255

Rao, R. V., Gandhi, O. P., (2002), ”Digraph and matrix methods for the machinability evaluation of work materials”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, 321–330.

Topcu Y. I, Ulengin F., (2004), “Energy for the future: an integrated decision aid for the case of Turkey”, *Energy*, 29:137–54.

Ulutaş, B.H. (2005), “Determination of the appropriate energy policy for Turkey”, *Energy* , 30:1146–61.

Wang, J., Jing, Y., Zhang, C., ve Zhao, J., (2009), “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making”, [*Renewable and Sustainable Energy Reviews*](#), 13(9): 2263-2278

Wani, M. F. ve Gandhi, O. P. (1999) ‘Development of maintainability index for mechanical systems’, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 65, No. 3, pp.259–270.