

Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynaklarının etkinliğinin değerlendirilmesi

Tamer ÖZYİĞİT^{*}, M. Nahit SERARSLAN, E. Ertuğrul KARSAK

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Birden çok girdi ve çıktıya sahip karar birimlerinin göreceli performanslarının ölçülmesi için kullanılan klasik Veri Zarflama Analizi (VZA) modellerinde yalnızca kesin sayısal veriler kullanılabilir. Oysa gerçek hayattaki birçok uygulamada karar birimlerinin kullanıldığı girdiler ve ürettiği çıktılar belirsiz, aralıklar halinde veya sözel olarak ifade edilmiş olabilir. Enerji kaynak alternatiflerinin etkinlik analizindeki uzman görüşleri sözel olarak, maliyet girdisi de belirsiz olduğu için bulanık sayılarla ifade edilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye’de elektrik üretimi için kullanılacak enerji kaynak alternatiflerinin etkinliğinin ölçülmesi için Bulanık VZA (BVZA) kullanılmıştır. Makalede, Charnes vd. (1978) tarafından geliştirilen klasik VZA modelinin (CCR modeli) dual formunu temel alan yeni bir bulanık VZA formülasyonu (Dual Bulanık Veri Zarflama analizi-DBVZA) önerilmektedir. Bulanık model, α -kesmeleri yaklaşımı kullanılarak doğrusallaştırılmıştır. DBVZA modelinde, diğer bulanık VZA modellerinden farklı olarak, Karar Birimlerinin (KB) etkinliği ölçülürken, bulanık girdi ve çıktı değerlerinin α -kesmelerinin uç noktaları yerine, tüm α -kesmeleri performans ölçümünde kullanılmakta ve böylelikle aralığın içindeki verilerin de etkinlik analizinde dikkate alınması sağlanmaktadır. DBVZA’nın karar vericilere sağladığı bir diğer avantaj, tüm α seviyelerinde etkinlik sınırında yer alan, bir başka deyişle %100 etkin olan KB sayısının diğer bulanık VZA yöntemlerine göre düşük olmasıdır. Bu durum KB’lerin etkinliklerine göre sıralanmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca DBVZA ile yapılan uygulamalarda karar birimlerinin etkinliklerine göre sıralanabilmesi için herhangi bir bulanık sıralama yöntemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Veri zarflama analizi, bulanık matematik programlama, etkinlik analizi, enerji alternatifleri, elektrik üretimi.*

^{*}Yazışmaların yapılacağı yazar: Tamer ÖZYİĞİT. tozyigit@gsu.edu.tr; Tel: (212) 227 44 80/432.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliğinin değerlendirilmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 17.04.2007 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.07.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Evaluating the efficiencies of alternative energy resources for electricity generation in Turkey

Extended abstract

With the beginning of 21st century, the consumption of energy all over the world is increasing far more rapidly than in the last century. Today, energy is the most important basic input for economical and industrial development. Especially for developing countries like Turkey, alternative energy resources for power plants have very high strategic importance.

In Turkey, like many other countries, the generation of electric power is based on fossil fuels. The volatility of oil prices, the exhaustibility of fossil fuels and environmental issues force developing industries to revise their alternatives for electricity generation. Now, it is the time to give more attention to stable, reliable and non-polluting energy resources. Most forms of alternative energy resources are dependent on geographical and environmental factors which vary from country to country. Every country has to determine its energy policy considering its specific conditions like demand and supply equilibrium, dependency on other countries, geographical conditions, variations of population, etc. Turkey is a country that lacks sufficient conventional energy resources and is importing oil and natural gas from other countries. As an emerging country, Turkey has been one of the fastest growing energy markets in the world. Turkey's share in total OECD production is expected to increase from 2% in 1995 to 7% in 2020s, making Turkey a significant economic power within the OECD countries but this will be possible only with a proper energy policy and efficient selection of alternative energy resources.

Selecting among different resource alternatives is a very difficult task as the factors which affect the efficiency of energy resources are imprecise and require expert knowledge. The criteria, such as sustainability, security etc. are defined in linguistic form as it is impossible to quantify them. As a result, some of the criteria of efficiency have to be introduced in analysis as fuzzy data. The performance assessment methods which enable us to use fuzzy inputs and outputs are suitable for the evaluation of energy alternatives' efficiencies. The potentially viable electricity resources considered for Turkey are oil, coal, natural gas, nuclear power, hydropower,

wind power, solar power and biomass power. For the evaluation criteria of these energy resources and their values, we refer to expert opinions. The details about efficiency criteria and results of the analysis can be found in the application. The energy resources are ranked by their efficiency scores as follows: Wind, natural gas, hydropower, biomass, coal, oil, solar power and nuclear power.

The existing data envelopment analysis (DEA) models for measuring the relative efficiencies of a set of decision making units (DMUs) using various inputs to produce various outputs are limited to crisp data. However, the data acquired from expert opinions for evaluating the efficiencies of alternative energy resources is generally in linguistic form. This paper proposes a fuzzy DEA formulation based on dual form of the DEA model developed by Charnes et al. (1978) to deal with imprecise or linguistic data that we frequently come across in real-world applications. The model is transformed into a family of crisp linear problems using the α -cut approach. In dual fuzzy DEA formulation, the entire α -cut interval is taken into account unlike many other fuzzy DEA formulations which use the boundary points of α -cuts when calculating the efficiency scores of DMUs. Dual fuzzy DEA is suitable to rank every DMU in all α -levels as we are not faced with the problem of having too many DMUs on the efficient frontier. Another advantage of the dual fuzzy DEA formulation is that, it does not require any fuzzy ranking method to rank the DMUs. As the result, dual fuzzy DEA can be very useful in performance evaluation, especially when decision makers or researchers have few DMUs and a large number of decision criteria (inputs and outputs) as they will be able to rank all DMUs according their efficiency scores.

The paper is organized as follows: A literature survey of fuzzy DEA models is followed by the presentation of the classical DEA model (CCR formulation), dual form of the CCR formulation and fuzzy DEA model. Then, the linearization of dual fuzzy DEA by α -cut approach and variable alterations is introduced. After a real life application concerning the assessment of energy alternatives for electricity production in Turkey, the paper ends with the conclusion.

Keywords: Data envelopment analysis, fuzzy mathematical programming, efficiency analysis, energy alternatives, electricity generation.

Giriş

21. yüzyılın başlarında enerji talebi tüm dünyada geçen yüzyıla göre çok daha hızlı artmaktadır. Günümüzde enerji, ekonomik ve endüstriyel kalkınmanın en önemli temel girdisi haline gelmiştir. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için elektrik santrallerinde kullanılacak enerji kaynak alternatiflerinin stratejik önemi son derece yüksektir.

Birçok ülke gibi Türkiye’de de elektrik enerjisi üretimi fosil yakıtlara bağlıdır. Petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar, fosil yakıtların sınırlı ömürleri ve olumsuz çevresel etkileri gelişmekte olan endüstrilerin elektrik üretimi için kaynak alternatiflerini gözden geçirmeye zorlamaktadır.

Elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının etkinlik ölçütleri coğrafi ve çevresel etkenler nedeniyle ülkeden ülkeye farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle her ülke, arz-talep dengesi, dışa bağımlılık, coğrafi konum, nüfus değişimleri gibi kendine özgü etkenleri göz önüne alarak kendi enerji politikasını geliştirmek durumundadır.

Türkiye, petrol ve doğalgaz gibi konvansiyonel enerji kaynakları açısından fakir ve bu kaynakların büyük bölümünü dışarıdan ithal eden bir ülkedir. Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, dünyada en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biridir. OECD ülkeleri arasında enerji üretimini payı 1995’te %2 olan Türkiye’nin, 2020 yılında bu payını %7’ye çıkararak OECD ülkeleri arasında önemli bir ekonomik güç olacağı tahmin edilmektedir (Topçu ve Ülengin, 2004). Ancak bu büyümenin gerçekleşmesi doğru enerji politikaları ve elektrik üretiminde etkin enerji alternatiflerinin kullanımına bağlıdır.

Değişik enerji kaynakları arasında seçim yapmak, bu kaynakların elektrik üretimindeki etkinliğinin belirsiz ve uzman görüşü gerektiren ölçütlere bağlı olmasından dolayı oldukça güç bir iştir. Sürdürülebilirlik, güvenilirlik, uyumluluk gibi ölçütler sayısal olarak ifade edilemediğinden ancak sözel ifadelerin bulanık kümelerden yararlanılarak sayısallaştırılmasıyla analize dahil edilebilir. Dolayısıyla enerji kaynak alterna-

tiflerinin etkinliklerinin ölçülmesi için bulanık girdi ve çıktı değerlerinin analizde kullanılabilmesine imkân tanıyan performans ölçüm tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu makalede, Türkiye’de elektrik üretimi için kullanılan enerji alternatiflerinin etkinliklerinin değerlendirilmesi için bir Bulanık Veri Zarflama Analizi (BVZA) yöntemi önerilmiştir. Türkiye’de elektrik üretimi için potansiyel enerji kaynakları olarak petrol, kömür, doğalgaz, nükleer enerji, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve biyokütle enerjisi incelenmiştir. Bu enerji alternatiflerinin etkinliğinin ölçülmesinde kullanılan performans ölçütleri, girdi olarak indirgenmiş maliyet, CO₂, SO₂, NO_x salınımları, çıktı olarak ise sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluktur. Çıktı değerleri sayısal olarak ifade edilemediğinden, uzman görüşlerinden elde edilen sözel ifadeler bulanık kümeler teorisinden yararlanılarak sayısallaştırılmıştır. Ayrıca indirgenmiş maliyet için, zaman, teknoloji ve coğrafi konum gibi etkenler nedeniyle belirsizlik söz konusu olduğu için, bu girdi de analizde bulanık sayı olarak yer almıştır.

Bu makalede, öncelikle VZA modelleriyle ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Sonra Charnes ve diğerleri (1978) tarafından geliştirilen VZA (CCR Modeli), CCR modelinin bulanık dual formu yer almaktadır. Sonraki bölüm, dual bulanık VZA (DBVZA) ve DBVZA’nın α -kesmeleri yaklaşımı ile doğrusallaştırılması üzerinedir. Uygulamada, Türkiye’de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinlikleri DBVZA ile değerlendirilmiştir. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve kullanılan yöntem üzerine yorumlar yer almaktadır.

Literatür araştırması

Veri Zarflama Analizi, Charnes ve diğerleri (1978) tarafından geliştirilmiştir ve bu model, günümüzde CCR formülasyonu olarak adlandırılmaktadır. CCR modeli, karar birimlerinin etkinlik değerlerini ölçmek için geliştirilen doğrusal programlama temelli bir yöntemdir.

Bir karar biriminin görelî etkinlik değeri, çıktı değerlerinin ağırlıklı toplamının, girdi değere-

rinin ağırlık toplamına oranlanmasıyla elde edilir. Burada karşılaşılan sorun, girdi ve çıktılara atanacak ağırlık değerlerinin belirlenmesidir. Girdi ve çıktı değerleri, birçok durumda farklı birimlerde ifade edilir. VZA'nın, performans analizinde yaygın olarak kullanılmasının en büyük nedeni, farklı birimlerdeki verilerin kullanılmasına olanak sağlaması ve ağırlıkların belirlenmesinde karar vericilere sağladığı avantajdır. Girdi ve çıktı ağırlıkları, model tarafından her karar birimi için, etkinlik değerini enbüyükleyecek şekilde belirlenir. Bu ağırlıklandırma sırasında sağlanması gereken kısıtlar, aynı ağırlıklarla hiçbir karar biriminin etkinlik değerinin birden yüksek olmaması ve bütün ağırlıkların pozitif olmasıdır. Model, performansı ölçülen karar birimlerinin görece olarak en avantajlı oldukları çıktılara yüksek ağırlık değerleri ve dezavantajlı oldukları çıktılara düşük ağırlık değerleri atayacaktır. Bu ağırlık atamaları girdi değerleri için de aynı şekilde gerçekleşir. Sonuç olarak ağırlıklar belirlenirken bir takım öznel ölçütlere ihtiyaç duyulmamakta, karar verici veya analizcinin bilinçli veya bilinçsiz olarak bazı karar birimlerine avantaj sağlayacak ağırlık değerleri vermesinin önüne geçilmekte ve her karar birimi için nesnel bir etkinlik değerine ulaşılmaktadır.

Modelde, bir karar biriminin etkin olması için iki şart vardır:

- Hiçbir çıktının değeri, bir veya daha fazla girdinin değeri artırılmadan ya da bir veya daha fazla çıktının değeri azalmadan arttırılamaz.
- Hiçbir girdinin değeri, bir veya daha fazla girdinin değeri artırılmadan ya da bir veya daha fazla çıktının değeri azalmadan düşürülemez.

Bu kurallara uyan karar birimleri etkinlik sınırını oluşturur ve etkinlik değerleri 1'dir. Etkin olmayan bir karar biriminin performansı, etkinlik sınırına uzaklığı ile belirlenir.

VZA, performans ölçümünde son derece kullanışlı bir yöntem olmasına rağmen, modelin bazı sınırlamaları vardır. Bunların en önemlilerinden

biri, VZA'nın, kullanılan verilere karşı çok hassas olmasıdır. Performans değerlerinin ölçümünde kullanılan etkinlik sınırları, verilerdeki hata ve belirsizliklerden çok etkilenir. Bu nedenle VZA ile doğru bir performans değerlemesi yapabilmek için eldeki verilerin kesin ve hatasız olması gerekir. Öte yandan kullanılmak istenen veriler sözel olarak ifade ediliyor olabilir (örneğin: "eski" donanım, "iyi" servis).

Bulanık veriler kullanan VZA (Bulanık VZA), gerçek hayattaki durumları, klasik VZA'ya göre daha gerçekçi bir şekilde ifade eder. Aynı zamanda, bulanık kümeler teorisi, sözel olarak ifade edilen verilerin VZA'da direkt olarak kullanılmasına olanak tanır. Bulanık veriler kullanan VZA formülasyonlarında, model, olabilirlik seviyeleri ve α -kesmeleri gibi yaklaşımlar kullanılarak doğrusal hale getirilmektedir. Modeldeki eşitlik ve eşitsizlikler ise bulanık kümeler teorisinden yararlanılarak tanımlanmakta ve modelin doğrusal matematik programlama yöntemleri kullanılarak çözülmesine olanak sağlanmaktadır.

Kısıtlardaki eşitlik ve eşitsizliklerin değişik şekilde tanımlanması, farklı sıralama yöntemleri, olabilirlik ve α -kesmeleri yaklaşımları birçok bulanık VZA formülasyonunun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bölümde son birkaç yılda ortaya atılmış değişik bulanık VZA formülasyonları ele alınacak, bunların birbirine benzer ve farklı yönleri, avantajları ve dezavantajları incelenecektir.

Bulanık kümeler teorisini VZA'da ilk kullanan Sengupta (1992) olmuştur. Sengupta'ya göre VZA'daki kesin girdi ve çıktı değerleri ihtiyacı, yöntemin kullanım alanını sadece kesin verilere dayalı, belirsiz olmayan sistemlerle kısıtlamaktadır. Deterministik olmayan sistemler için bir alternatif olan stokastik veri zarflama analizi ise, verilerin belli bir matematiksel dağılıma göre belirlendiğini kabul etmektedir. Oysa VZA'da girdi ve çıktı değerleri, matematiksel bir formun varlığına ihtiyaç duymadan, gözlemlere dayanarak belirlenmelidir. Sengupta, bulanık amaç bir fonksiyonu ve bulanık kısıtları olan bir formülasyon için bulanık kümeler teorisini,

VZA modelinde kullanmıştır. Sengupta'nın modelinde karar verici, her kısıt için tolerans limitlerini kendisi belirlemektedir.

Kahraman ve diğerleri (1999), Zimmermann'ın (1976) bulanık matematik programlama yöntemini temel alan bir bulanık VZA modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, girdi ve çıktı değerleri değil, kısıtlar, bulanık olaylar olarak ele alınmıştır. Karar verici tarafından belirlenen tolerans limitleri bu kısıtların ne kadar aşılabileceğini belirlemektedir.

Kao ve Liu (2000), α -kesmeleri yaklaşımını kullanarak bulanık VZA modelini bir lineer model ailesine dönüştürmüşlerdir. Trapezoidal bulanık verilerin kullanılmasına olanak sağlayan bu modelde, bir çift parametrik programla elde edilen kesin verilerin kullanıldığı bir modele dönüştürülür. Etkinlik değerleri de üyelik fonksiyonlarıyla tanımlandığı için karar vericilere daha kullanışlı ve esnek bilgi sağlanmış olur. Elde edilen bulanık etkinlik değerleri Chen ve Klein'in (1997) yöntemiyle sıralanmaktadır.

Guo ve Tanaka (2001), temel VZA modelinin (CCR Modeli), bulanık girdi ve çıktılarla kullanılacak şekilde düzenlemişlerdir. Guo ve Tanaka'nın (2001) geliştirdikleri model, etkinlik değerlerini belli bir α -kesmesinde karşılaştırmaktadır. Öne sürülen model iki seviyeli bir doğrusal programın çözülmesini gerektirmektedir.

Saati ve diğerleri (2002) tarafından geliştirilen yöntemde, α -kesmelerinin alt ve üst sınırlarını kullanmak yerine, söz konusu aralık içinde, kısıtları sağlayan ve ilgili karar biriminin performansını maksimize edecek bir nokta bulunmaktadır. Bu nokta formülasyona yeni bir değişken olarak katılmaktadır. Bu şekilde her karar birimi için bir adet etkinlik skoruna ulaşılmasıyla kalmayıp, α -kesmesinin bütün değerleri performans ölçümünde kullanılmaktadır. Saati ve diğerleri (2002)'nin geliştirdiği bulanık VZA Modelinde, CCR formülasyonu temel alınmıştır. Bu modelde, karar birimlerinin performansları, hiçbir karar biriminin etkinlik değeri 1'i aşmayacak şekilde enbüyüklenmiştir. Modelde, girdi ve çıktıların α -kesmelerinin uç noktaları yer-

ne, α -kesmelerinin içinde bir noktanın kullanılması diğer formülasyonlara göre büyük bir serbestlik sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak karar birimlerinin etkinlik değeri yüksek çıkmakta, birçok karar birimi etkinlik sınırında yer almaktadır ve bu durum sağlıklı bir sıralama yapmaya güçleştirmektedir.

León ve diğerleri (2003), α -kesmelerine benzer bir yaklaşım olan olabilirlik seviyelerini (h levels) kullanarak trapezoidal ve üçgen bulanık verilerin kullanılmasına imkân sağlayan bir bulanık VZA modeli öne sürmüşlerdir.

Lertworasirikul ve diğerleri (2003) ise yine olabilirlik seviyelerinden yola çıkarak, her karar biriminin belli bir olabilirlik seviyesindeki etkinlik değerini belirleyen bir bulanık VZA modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, kısıtlar bulanık faaliyetler olarak ele alınmış ve bulanık sıralama yöntemleri kullanılarak doğrusallaştırılmıştır.

Bulanık veri zarflama analizi

n adet karar birimi (KB), m adet girdi ve t adet çıktının olduğu durumda, j . karar biriminin (KB_j) x_{ij} ($i = 1, \dots, m$) girdilerini kullanarak y_{rj} ($r = 1, \dots, t$) çıktılarını ürettiğini varsayalım. Bu durumda Charnes ve diğerleri (1978) tarafından geliştirilen VZA modeli (CCR modeli) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\text{enb } h_0 = \sum_{r=1}^t u_r y_{rj_0}$$

kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^t u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j,$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad \forall i, r.$$

Yukarıdaki formülasyonda:

h_0 : KB_0 'ın etkinlik değerini,

u_r : r . çıktının ağırlığını,

v_i : i . girdinin ağırlığını,

y_{rj} : j . KB tarafından üretilen r . çıktı miktarını,

x_{ij} : j . KB tarafından kullanılan i . girdi miktarını,
 n : KB sayısını,
 t : çıktı sayısını,
 m : girdi sayısını ifade etmektedir.

Yukarıdaki formülasyon, etkinliği ölçülmek istenen j_0 karar birimi için tanımlanmıştır. Tüm karar birimleri için n adet doğrusal programın çözülmesiyle, her karar birimi için etkinlik değerine ulaşılır. Görüleceği gibi her karar birimi için girdi ve çıktılara verilecek ağırlık kümeleri (1)'in çözümüyle elde edilmektedir. Formülasyondaki kısıtlar, aynı ağırlık kümeleleriyle, hiçbir karar biriminin etkinlik değerinin 1'i aşmamasını sağlamaktadır. Alternatif olarak bu modelin duali de çözülebilir. Primal modelde $t+m$ karar değişkeni ve karar birimi sayısı kadar, (n adet) kısıt varken, dual formülasyonda $t + m$ adet kısıt ve n adet karar değişkeni vardır. VZA uygulamalarında genelde karar birimi sayısı, girdi ve çıktı sayısı toplamından daha yüksek olduğu için, çözüm aşamasında dual formülasyon daha avantajlı olabilir:

Min Z_0

kısıtlar:

$$\begin{aligned} x_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j &\geq 0 \quad \forall i, \\ -y_{rj_0} + \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j &\geq 0 \quad \forall r, \\ \lambda_j &\geq 0 \quad \forall j, \\ Z_0 &\text{ kısıtsız.} \end{aligned} \quad (2)$$

Dual problemde, girdileri $i = 1, \dots, m$ için $\sum x_{ij} \lambda_j$, çıktıları $r = 1, \dots, t$ için $\sum y_{rj} \lambda_j$ olan ve j_0 karar biriminden daha üstün performans gösteren bileşik bir karar birimi aranmaktadır. λ_j , j 'inci karar biriminin yoğunluk değerini göstermektedir. j_0 karar birimi (2)'deki 2. ve 3. kısıtlar için eklenen atıl değişkenlerin (sırasıyla S_i^- ve S_r^+) sıfıra ve Z_0 'ın bire eşit olduğu durumda etkinlik sınırında yer alır. Bu durumda j_0 'dan daha iyi performans gösteren bir bileşik karar birimi bulunamayacağı gösterilmiş olur. Buna karşılık eğer Z_0 birden küçük ve atıl değiş-

kenler sıfırdan büyükse, j_0 etkin olmayan bir karar birimidir. Optimal λ_j değerleri j_0 'dan daha iyi performans gösteren ve j_0 için hedefler oluşturan bir bileşik karar birimi meydana getirmektedirler.

CCR modelinde, KB'lerin girdi ve çıktılarının kesin sayılarla ifade edildiği varsayılmaktadır. Ancak gerçek hayattaki birçok durumda bu mümkün değildir. Bu gibi durumlarda girdi ve çıktı değerleri hakkındaki uzman görüşlerinden elde edilen sözel ifadelerin analizde bulanık sayılar olarak yer alması gerekir. Verilerin bulanık olduğu durumda CCR modelinin dual formu aşağıdaki şekli alır:

Min Z_0

kısıtlar:

$$\tilde{x}_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n \tilde{x}_{ij} \lambda_j \geq 0 \quad \forall i, \quad (3)$$

$$-\tilde{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \tilde{y}_{rj} \lambda_j \geq 0 \quad \forall r,$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j,$$

Z_0 kısıtsız.

Yukarıdaki formülasyonda \tilde{x}_{ij} ve \tilde{y}_{rj} , sırasıyla bulanık girdi ve çıktıları ifade etmektedir.

Dual bulanık veri zarflama analizi

CCR modelinin dual bulanık formu klasik lineer programlama yöntemleri ile doğrudan çözülememektedir. Dual bulanık VZA ile etkinlik analizi gerçekleştirilmesi için modelin α -kesmeleri kullanılarak yeniden yazılması gerekir. Etkinlik analizinde yer alan enerji kaynaklarının bulanık verileri üçgensel formdadır. Bir \tilde{A} üçgen bulanık sayısı, tabanının sol ve sağ sınırı (sırasıyla x^L ve x^R) ve en olabilir noktasıyla (x^M), $\tilde{A} = (x^L, x^M, x^R)$ şeklinde gösterilir. Aşağıda üçgen bulanık sayıların genel bulanık üyelik fonksiyonu verilmiştir:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x - x^L)/(x^M - x^L), & x^L \leq x \leq x^M \\ (x^R - x)/(x^R - x^M), & x^M < x \leq x^R \\ 0, & \text{aksi halde.} \end{cases} \quad (4)$$

Şekil 1’de bir üçgen bulanık sayının grafiği görülmektedir. Şekil 1’de görüleceği gibi bir üçgen bulanık sayının α -kesmesi $[(\alpha x^M + (1-\alpha)x^L), (\alpha x^M + (1-\alpha)x^R)]$ aralığı ile ifade edilmektedir. DBVZA’da girdi ve çıktılar α -kesmesi aralıklarında yeni değişkenler olarak tanımlanmakta ve bu sayede aralığın sadece noktaları uç noktaları değil, bütün aralık analizde kullanılmaktadır.

\tilde{x}_{ij} ve \tilde{y}_{rj} bulanık girdi ve çıktı değerleri aralığın içinde \hat{x}_{ij} ve \hat{y}_{rj} değişkenler olarak tanımlandığında dual bulanık VZA formülasyonu aşağıdaki şekli alır:

$$\text{Min } Z_0$$

kısıtlar:

$$\hat{x}_{ij_0} Z_0 - \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} \lambda_j \geq 0 \quad \forall i,$$

$$-\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \hat{y}_{rj} \lambda_j \geq 0 \quad \forall r,$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j,$$

Z_0 kısıtsız,

$$\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^L \leq \hat{x}_{ij_0} \quad \forall i,$$

$$\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^R \geq \hat{x}_{ij_0} \quad \forall i,$$

$$\alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^L \leq \hat{y}_{rj_0} \quad \forall r,$$

$$\alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^R \geq \hat{y}_{rj_0} \quad \forall r,$$

$$\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L \leq \hat{x}_{ij} \quad \forall i, j,$$

$$\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R \geq \hat{x}_{ij} \quad \forall i, j,$$

$$\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L \leq \hat{y}_{rj} \quad \forall r, j,$$

$$\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R \geq \hat{y}_{rj} \quad \forall r, j.$$

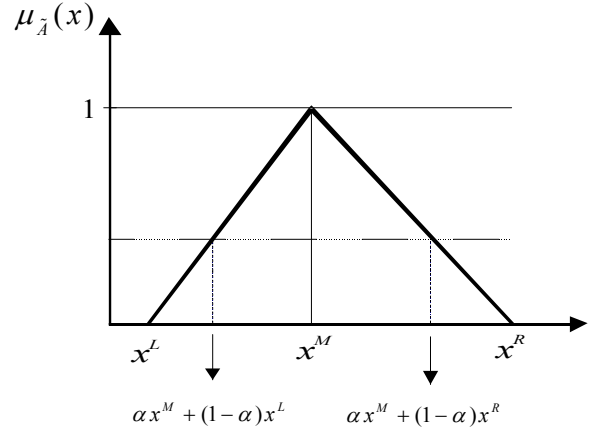
Yukarıdaki formülasyonda son sekiz kısıt, formülasyona, bulanık girdi ve çıktı değerlerinin yerine katılan \hat{x}_{ij} ve \hat{y}_{rj} değişkenlerinin içinde bulunduğu α -kesmelerini tanımlamak için eklenmiştir. \hat{x}_{ij} ve \hat{y}_{rj} birer karar değişkeni olduğu için (5) formülasyonu doğrusal değildir. Modeli doğrusallaştırmak için aşağıdaki değişken dönüşümleri uygulanır:

$$Z_0 \hat{x}_{ij_0} = \bar{x}_{ij_0}$$

$$\lambda_j \hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij}$$

$$\lambda_j \hat{y}_{rj} = \bar{y}_{rj}$$

(6)



Şekil 1. Üçgen bulanık sayı ve α -kesmesi

Bu değişken dönüşümlerinden sonra model doğrusal programlama yöntemleriyle çözülebilecek olan son halini alır:

$$\text{Min } Z_0$$

kısıtlar:

$$\bar{x}_{ij_0} - \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \geq 0 \quad \forall i,$$

$$-\hat{y}_{rj_0} + \sum_{j=1}^n \bar{y}_{rj} \geq 0 \quad \forall r,$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j,$$

Z_0 kısıtsız,

$$Z_0[\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^L] \leq \bar{x}_{ij_0} \quad \forall i,$$

$$Z_0[\alpha x_{ij_0}^M + (1-\alpha)x_{ij_0}^R] \geq \bar{x}_{ij_0} \quad \forall i,$$

$$\alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^L \leq \hat{y}_{rj_0} \quad \forall r,$$

$$\alpha y_{rj_0}^M + (1-\alpha)y_{rj_0}^R \geq \hat{y}_{rj_0} \quad \forall r,$$

$$\lambda_j[\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^L] \leq \bar{x}_{ij} \quad \forall i, j,$$

$$\lambda_j[\alpha x_{ij}^M + (1-\alpha)x_{ij}^R] \geq \bar{x}_{ij} \quad \forall i, j,$$

$$\lambda_j[\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^L] \leq \bar{y}_{rj} \quad \forall r, j,$$

$$\lambda_j[\alpha y_{rj}^M + (1-\alpha)y_{rj}^R] \geq \bar{y}_{rj} \quad \forall r, j.$$

(7)

Önerme: DBVZA’da karar birimlerinin etkinlik değerleri, α seviyeleri düştükçe azalmakta veya aynı kalmaktadır. Bir başka deyişle,

$$\forall \alpha_1 \geq \alpha_2 \Rightarrow Z_{\alpha_1}^* \geq Z_{\alpha_2}^* \quad (8)$$

Kanıt: Herhangi bir girdi (veya çıktı) için α_1 ve α_2 kesmelerini sırasıyla \tilde{x}_{α_1} ve \tilde{x}_{α_2} aşağıdaki şekilde tanımlarsak:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{\alpha_1} &= [\alpha_1 x^M + (1 - \alpha_1)x^L; \alpha_1 x^M + (1 - \alpha_1)x^R] \\ \text{ve} \\ \tilde{x}_{\alpha_2} &= [\alpha_2 x^M + (1 - \alpha_2)x^L; \alpha_2 x^M + (1 - \alpha_2)x^R] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \forall \alpha_1, \alpha_2 \text{ için } \alpha_1 \geq \alpha_2 \text{ ise,} \\ \tilde{x}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{x}_{\alpha_2} \Leftrightarrow \forall \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x} \in \tilde{x}_{\alpha_2} \end{aligned} \quad (10)$$

Aynı şekilde üçgen bulanık girdiler için de

$$\begin{aligned} \forall \alpha_1, \alpha_2 \text{ için } \alpha_1 \geq \alpha_2 \text{ ise,} \\ \tilde{y}_{\alpha_1} \subseteq \tilde{y}_{\alpha_2} \Leftrightarrow \forall \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{y} \in \tilde{y}_{\alpha_2} \end{aligned} \quad (11)$$

(5) formülasyonunun α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için olurlu çözüm kümeleri S_{α_1} ve S_{α_2} olarak tanımlanırsa, (10) ve (11)'den:

α_1 seviyesi için (5) formülasyonunun çözüm kümesinde yer alan \hat{x} ve \hat{y} değerleri, formülasyonun kısıtlarını α_2 seviyesi için de sağlayacaktır. Yani:

$$\forall \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_1} \Rightarrow \hat{x}, \hat{y} \in S_{\alpha_2} \Leftrightarrow S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2} \quad (12)$$

yazılabilir. Bu durumda:

$$\forall \alpha_1, \alpha_2 \text{ için } \alpha_1 \geq \alpha_2 \text{ ise, } S_{\alpha_1} \subseteq S_{\alpha_2} \quad (13)$$

olacaktır.

Sonuç olarak girdi ve çıktıların bulanık sayılar olduğu durumlarda α_1 ve α_2 alfa seviyeleri için amaç fonksiyonu optimum değerlerini sırasıyla $Z_{\alpha_1}^*$ ve $Z_{\alpha_2}^*$ olarak tanımlanırsa, (5) bir enküçükleme problemi olduğundan (13)'ten:

$$\forall \alpha_1 \geq \alpha_2 \Rightarrow Z_{\alpha_1}^* \geq Z_{\alpha_2}^* \text{ yazabiliriz.}$$

Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliğinin değerlendirilmesi

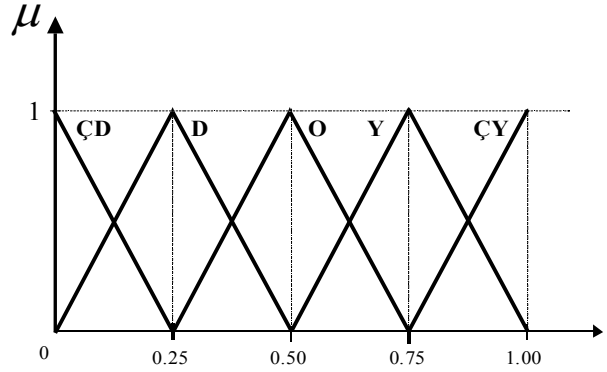
Bu makaledeki uygulamada Türkiye'de elektrik üretimi için enerji kaynak alternatiflerinin etkinliği DBVZA ile değerlendirilmiştir. Analizde, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, güneş, rüzgâr, hidrolik ve biyokütle gibi alternatif enerji kaynakları yer almıştır. Enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki etkinliklerinin değerlendirilmesi ve bu değerlendirme için ölçütlerin belirlenmesi uzman bilgisi gerektirmektedir. Sağlıklı bir araştırma için alternatifler, tüm ekonomik, sosyal ve çevresel faktörler göz önüne alınarak değerlendirilmelidir.

Fosil yakıtlarla (petrol, kömür, doğalgaz) elektrik üretimi görelî olarak ucuz ve kolaydır. Ancak fosil yakıtların en büyük dezavantajı küresel ısınmaya, hava ve çevre kirliliğine yol açmalarıdır. Petrol, doğalgaz ve kömür rezervlerinin kısıtlı ömürleri de etkinliklerini düşüren nedenlerdir. Akarsulardan elde edilen hidrolik enerji, temiz ve yenilenebilir bir alternatiftir. Ayrıca görelî olarak pahalı olan ilk yatırımdan sonra yakıt maliyeti sıfırdır. Hidrolik enerjinin en büyük dezavantajları, kurulan barajlar için uygun coğrafi bölgelere ihtiyaç duyulması, bölgenin sosyal ve çevresel dokusuna zarar verme ihtimali ve elde edilen gücün yağışlara bağlı olmasıdır. Nükleer güç ile çalışan santrallerde salınım değerleri çok düşük ve yakıt maliyeti de son derece azdır (Keskin, 2004). Ancak nükleer atıkların depolanması, olası bir nükleer kazanın ağır sonuçları ve sosyo-politik etkenler nedeniyle güvenilirlikleri son derece düşüktür. Nükleer santrallerin bir diğer dezavantajı ise kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Rüzgâr, güneş ve biyokütle enerjileri diğerlerine göre daha yeni alternatiflerdir. Rüzgâr, yenilenebilir, yakıt maliyeti olmayan ve çevreye zarar vermeyen bir enerji kaynağıdır. Yeni olmasına rağmen maliyet açısından diğer alternatiflerle rekabet edebilmesinin yanında Türkiye'nin rüzgâr potansiyelinde oldukça iyi konumda olması da bu enerji kaynağının kullanılması açısından ülkemiz için avantajdır (Enis, 2004). Güneş enerjisi yenilenebilir ve temiz bir enerji alternatifi olmasına rağmen, güneşten elektrik üretmenin yüksek

maliyeti ve elektriğin depolanma sorunu yaygın olarak kullanılmasını önlemektedir. Güneş enerjisi ülkemizde daha çok ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Biyokütle enerjisi, diğer yenilenebilir kaynaklara göre salınım değerleri açısından dezavantajlı konumdadır. Ayrıca biyokütleden elektrik üretiminin maliyeti fosil yakıtlara göre pahalıdır. Ancak bir tarım ve hayvancılık ülkesi olan Türkiye’de, biyokütlenin, uzun vadede petrol ve doğalgazın yerini alabileceği göz önüne alınmalıdır (Dündar ve Arıkan, 2004).

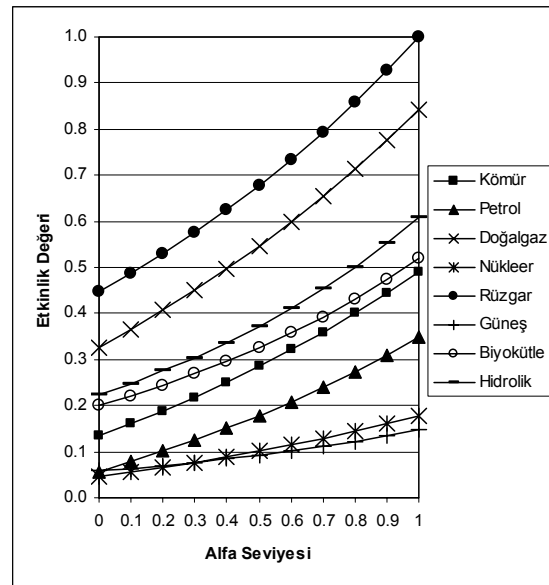
Bu çalışmadaki performans kriterleri ve özellikle bulanık ölçütlerin değerleri belirlenirken Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) Elektrik Mühendisleri Odası (EMO) uzmanlarının görüşlerinden yararlanılmıştır. Enerji kaynaklarının performans analizindeki girdiler, birim elektrik üretimi için indirgenmiş maliyet, CO₂, SO₂ ve NO_x salınımlarıdır. Çıktılar ise sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumluluk olarak belirlenmiştir. İndirgenmiş maliyet analizde bulanık bir girdi olarak yer alırken, uzmanlar tarafından çıktılar için yapılan sözel değerlendirmeler de bulanık üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilmiştir. İndirgenmiş maliyet girdisi, bir enerji santralindeki ilk yatırım, yakıt, işletme ve bakım giderleri toplamının santralin ekonomik ömrü boyunca eşdeğer yıllık maliyetinin kW’s başına değeridir. Bulanık bir girdi olan indirgenmiş maliyet değerleri Roth ve Ambs’ın (2004) makalesinden ve American Rüzgar Enerjisi Birliği (American Wind Energy Association) yayınlarından alınmıştır. Enerji alternatiflerinin gaz salınım değerleri Bakan ve diğerleri (2004) tarafından Türkiye IV. Enerji Sempozyumunda sunulan bildiriden alınmıştır. Kullanılan birim pounds (lb)/kW’s’dir (1 lb = 0.4536 kg). Görüşlerinden yararlanan uzmanlar enerji alternatiflerinin sürdürülebilirlik, güvenilirlik ve uyumlulukları için “çok düşük”, “düşük”, “orta”, “yüksek” ve “çok yüksek” ifadelerini kullanmışlardır. EMO uzmanlarının, analizdeki bulanık çıktılar için kullandığı sözel ifadelerin bulanık üyelik fonksiyonları Şekil 2’de görülmektedir. Sürdürülebilirlik, bir enerji kaynağının, gelecekte, çevresel ve ekonomik etkenler de göz önüne alındığında, ulaşılabilir olması anlamına gelmektedir. Örneğin petrol, kısıtlı ömrü ve olumsuz çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilirliği düşük bir enerji kaynağıdır. Güvenilirlik,

tüketiciye sürekli ve uygun fiyatta elektrik sunmanın yanı sıra olası bir kazanın da ihtimali ve sonuçlarının etkilerini kapsamaktadır. Uyumluluk ise, hem politik ve çevresel etkenlerin, hem de komşu ülkelerle ekonomik ve teknolojik işbirliği imkânlarının dikkate alınmasını sağlayan bir performans ölçütüdür. Laboratuarda deneme aşamasındaki bir enerji kaynağının uyumluluğu, teknolojisi kanıtlanmış bir kaynağa göre daha düşüktür.



Şekil 2. Bulanık çıktılar için sözel ifadelerin üyelik fonksiyonları

Bulanık çıktılarının değerleri için üç uzmandan alınan görüşlerin üyelik fonksiyonlarının ortalaması alınmıştır. Analizde kullanılan çıktı ve girdi değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’deki 2, 3 ve 4. sütunlarda çıktı, son 4 sütunda girdi değerleri görülmektedir.



Şekil 3. Enerji alternatiflerinin etkinlikleri

Tablo 1. Enerji alternatiflerinin çıktı ve girdi değerleri

Enerji Alternatifi	Sürdürülebilirlik	Güvenilirlik	Uyumluluk	İ. Maliyet €/kWs	CO ₂ lb/kWs	SO ₂ lb/kWs	NO _x lb/kWs
Kömür	(0,0,025)	(0.17,0.42,0.67)	(0.17,0.42,0.67)	(4.8,5.15,5.5)	2898.5	18.23	10.34
Petrol	(0,0,08,0.33)	(0.08,0.33,0.58)	(0.08,0.25,0.5)	(5.3,5.7,6.1)	1061.4	7.62	2.86
Doğalgaz	(0,0,25,0.50)	(0.17,0.42,0.67)	(0.33,0.58,0.83)	(3.9,4.15,4.4)	700.8	0	1.22
Nükleer	(0.17,0.42,0.67)	(0,0,0.25)	(0.08,0.25,0.5)	(11.1,12.8,14.5)	4	0	0
Rüzgar	(0.67,0.92,1)	(0.58,0.83,0.92)	(0.58,0.83,0.92)	(4.0,5.0,6.0)	12	0	0
Güneş	(0.58,0.83,1)	(0.67,0.92,1)	(0.33,0.58,0.83)	(21.6,26.5,32.4)	354.48	0	0.47
Biyokütle	(0.58,0.83,1)	(0.42,0.67,0.92)	(0.33,0.58,0.83)	(5.8,8.7,11.6)	443.1	13.65	14.3
Hidrolik	(0.42,0.67,0.92)	(0.42,0.67,0.92)	(0.58,0.83,1)	(5.1,8.2,11.3)	15	0	0

Alternatif enerji kaynaklarının DBVZA ile değerlendirilmesinde 11 adet α seviyesi (0.0, 0.1, ..., 1.0) kullanılmış, dolayısıyla her enerji alternatifi için 11 adet etkinlik değerine ulaşılmıştır. Sıralamanın daha iyi görülebilmesi için Tablo 2'deki etkinlik değerleri Şekil 3'te grafik olarak gösterilmektedir. Şekil 3'te görülebileceği gibi, en etkin enerji kaynağı rüzgâr enerjisidir. Bu sonuç Güngör ve Arıkan (2000), Topçu ve Ülengin (2004) ve Karsak ve Dursun (2006) tarafından bu alanda yapılmış çalışmalarla uyumludur. Türkiye rüzgâr potansiyeli açısından, özellikle Ege ve Kuzey Anadolu bölgelerinde oldukça şanslı konumdadır. Türkiye'nin

gelecekteki enerji politikası oluşturulurken yenilenebilir ve çevreye zararı olmayan bu enerji kaynağının, üzerinde dikkatle durulması gerekmektedir. Etkinlik sıralamasında ikinci sırada olan doğalgazın küresel ısınma ve hava kirliliğine etkisi, fosil bir yakıt olmasına rağmen, petrol ve kömüre göre azdır. Düşük maliyetleri ve rezervlerinin ömrü petrole göre uzun olması doğalgazı, kısa ve orta vadede Türkiye'nin karşılabileceği enerji darboğazlarının aşılmasında önemli bir kaynak haline getirmektedir. Üçüncü en iyi alternatif hidrolik enerjidir. Türkiye'de elektrik üretiminde hâlihazırda

Tablo 2. Enerji alternatiflerinin etkinlik değerleri

Alfa	Kömür	Petrol	Doğalgaz	Nükleer	Rüzgâr	Güneş	Biyokütle	Hidrolik
1.0	0.4913	0.3488	0.8419	0.1783	1.0000	0.1496	0.5185	0.6098
0.9	0.4449	0.3103	0.7764	0.1608	0.9266	0.1358	0.4728	0.5525
0.8	0.4012	0.2742	0.7143	0.1444	0.8580	0.1233	0.4310	0.5006
0.7	0.3601	0.2403	0.6555	0.1291	0.7938	0.1120	0.3928	0.4535
0.6	0.3213	0.2085	0.5999	0.1147	0.7337	0.1017	0.3577	0.4108
0.5	0.2849	0.1787	0.5474	0.1013	0.6776	0.0926	0.3256	0.3719
0.4	0.2507	0.1508	0.4977	0.0888	0.6250	0.0845	0.2961	0.3364
0.3	0.2187	0.1248	0.4509	0.0772	0.5758	0.0771	0.2689	0.3041
0.2	0.1887	0.1006	0.4068	0.0663	0.5299	0.0702	0.2440	0.2747
0.1	0.1606	0.0780	0.3652	0.0562	0.4869	0.0640	0.2211	0.2478
0.0	0.1344	0.0570	0.3261	0.0469	0.4467	0.0582	0.2000	0.2232

yaygın olarak kullanılan hidrolik enerji, yakıt maliyetlerinin ve gaz salınımı değerlerinin sıfır olması sebebiyle etkin bir enerji kaynağıdır. Biyokütle enerjisi performans sıralamasında dördüncüdür. Elektrik üretim maliyeti fosil yakıtlara göre ve sera gazı salınım değerleri diğer yenilenebilir kaynaklara göre yüksek olmasına rağmen biyokütlenin uzun vadede petrol ve doğalgazın yerini alacağı tahmin edilmektedir. Kömür ve petrol, biyokütleden sonra sıralanmaktadır. Ülkemizin kömür rezervleri açısından zengin olması, dışa bağımlılığın azaltılması açısından bu kaynağın önemini arttırmaktadır. Güneş enerjisi ve nükleer enerji ise son iki sırayı paylaşmaktadır. Nükleer enerjinin önündeki en büyük engeller, yatırım maliyetlerinin yüksekliği, atık sorunu ve güvenilirliğinin düşüklüğüdür. Güneş enerjisi ise mevcut teknoloji ile çok yüksek maliyetleri nedeniyle diğer kaynaklarla rekabet edememektedir. Ancak gelecekte güneş enerjisi ile elektrik üretiminin maliyetinin azalacağı tahmin edilmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, Türkiye’de elektrik üretimi için alternatif enerji kaynaklarının etkinlikleri dual bulanık VZA (DBVZA) ile değerlendirilmiştir. Analizde, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, güneş, rüzgâr, hidrolik ve biyokütle gibi alternatif enerji kaynakları yer almıştır. Uygulama sonucunda, DBVZA’nın, bulanık girdiler kullanarak, bulanık çıktılar üreten karar birimlerinin etkinliklerinin ölçülmesi için kullanışlı bir yöntem olduğu görülmüştür. Tüm α seviyelerinde %100 etkin olan karar birimi sayısının az olması, karar birimlerinin etkinlik değerlerine göre sağlıklı bir şekilde sıralanmasını mümkün kılmaktadır. α -kesmelerinin uç noktaları yerine tüm α -kesmesi aralıklarının veri olarak kullanılması, analizde daha çok verinin dikkate alınmasına imkan tanımaktadır. Sonuç olarak Türkiye fosil enerji kaynakları açısından fakir ve dışa bağımlı olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynakları açısından son derece şanslı bir konumdadır. Özellikle rüzgâr gücü ve hidrolik enerji, elektrik üretimindeki etkinlikleri ve ülkemizde yüksek bir kullanım potansiyeline sahip olmaları nedeniyle üzerinde önemle durulması gereken kay-

naklardır. Bu potansiyelin etkin bir biçimde değerlendirilmesi ile Türkiye uzun vadede enerji ihraç eden ve sürdürülebilir bir enerji politikası uygulayan bir ülke konumuna gelebilir. Ancak bunun gerçekleşmesi için rüzgâr, hidrolik ve biyokütle gibi yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların artırılması gerekmektedir. Ayrıca bu yeni enerji kaynaklarına yönelirken kısa ve orta vadede doğalgaz gibi görece olarak ucuz ve temiz, kömür gibi ülkemizde bol miktarda bulunan kaynakların da önemi göz ardı edilmemelidir.

Kaynaklar

- Bakan, G., Akdağ, Ö., Özkoç, H.B., (2004). Çevresel etki değerlendirmesinin önemi ve Samsun mobil santral örneği, *Bildiriler Kitabı*, Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, 379-390, Ankara.
- Charnes A., Cooper W., Rhodes E., (1978). Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, **2**, 429-444.
- Chen, C.B., Klein, C.M., (1997). A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities, *IEEE Trans. Systems Man Cybernet Part B, Cybernet*, **27**, 26-35.
- Dündar, C., Arıkan, Y., (2004). Enerji, çevre ve sürdürülebilirlik, *Bildiriler Kitabı*, Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, 379-390, Ankara.
- Enis, A., (2004). Enerji politikaları ile yerli, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları, *Bildiriler Kitabı*, Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, 379-390, Ankara.
- Guo, P., Tanaka, H., (2001). Fuzzy DEA: A perceptual evaluation method, *Fuzzy Sets and Systems*, **119**, 149-160.
- Güngör, Z., Arıkan, F., (2000). A fuzzy outranking method in energy policy planning, *Fuzzy Sets and Systems*, **114**, 115-122.
- Kahraman, C., Ulukan, Z., Tolga, E., (1999). Selection among advanced manufacturing technologies using fuzzy data envelopment analysis, *Tatra Mountains Mathematical Publications*, **16**, 1-13.
- Kao, C., Liu, S., (2000). Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis, *Fuzzy Sets and Systems*, **113**, 427-437.
- Karsak, E.E., Dursun, M., (2006). A fuzzy MCDM approach to energy resource planning for electricity generation in Turkey, IEMS 2006, Cocoa Beach, Florida, USA.

- Keskin, M., (2004). Son on yılda Türkiye’de uygulanan enerji politikalarının ağır bedeli ve barışçıl enerji seçeneklerinin önemi, *Bildiriler Kitabı*, Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, 379-390, Ankara.
- León, T., Liern, V. ve Ruiz, J.L., Sirvent, I., (2003). A fuzzy mathematical programming to the assessment of efficiency with DEA models, *Fuzzy Sets and Systems*, **139**, 407-419.
- Lertworasirikul S., Fang, S., Jeffrey, A.J., Nuttle, H.L.W., (2003). Fuzzy data envelopment analysis (DEA): A possibility approach, *Fuzzy Sets and Systems*, **139**, 379-294.
- Roth, I.F., Ambs, L.L., (2004). Incorporating externalities into a full cost approach to electric power generation life-cycle costing, *Energy*, **29**, 2125-2144.
- Saati, S., Memariani, A., Jahanshahloo, G.R., (2002). Efficiency analysis and ranking of DMUs with fuzzy data, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, **1**, 255-267.
- Sengupta, J.K., (1992). A fuzzy systems approach in data envelopment analysis, *Computers. and Mathematical Applications*, **24**, 259-266.
- Topcu, Y.I., Ulengin F., (2004). Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey, *Energy*, **29**, 137-154.
- Zimmermann, H.J., (1976). Description and optimization of fuzzy systems, *International Journal of General Systems*, **2**, 209-215.
-
- American Wind Energy Associaton, (2001). Comparative cost of wind and other energy sources. www.awea.org, (12.01.2006)