





Received: December 27, 2017
Accepted: February 24, 2018
Published Online: March 26, 2018

AJ ID: 2018.06.01.OR.05
DOI: 10.17093/alphanumeric.371754

Sustainable and Renewable Energy Power Plants Evaluation by Fuzzy TODIM Technique

A. Çağrı Tolga, Ph.D. * 

Assoc. Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Galatasaray University, İstanbul, Turkey, ctolga@gsu.edu.tr

Zeynep K. Turgut 

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Galatasaray University, İstanbul, Turkey, zeynep.kturgut@gmail.com

* Galatasaray Üniversitesi, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Çırağan Cad. No:36, 34349 Ortaköy/İstanbul/Türkiye

ABSTRACT

Sustainable and renewable energy systems are an effective solution to depletion of fossil energy resources and prevent serious environmental problems resulted from energy production. Turkey has rich renewable energy potential due to its geographical features. In this regard, the government puts emphasis on increasing renewable energy utilization rate in meeting energy demand of the country. Therefore encouragement policies are implemented in this field and energy investors are supported economically. In this study, we aimed to find out the best performing sustainable and renewable energy alternative and thus to guide decision makers on energy investments. Therefore we evaluated four energy power plant types, which are solar, wind, hydroelectric and landfilled gas (LFG). For the evaluation of the alternatives, there are many factors to consider and multicriteria decision making (MCDM) methods are an appropriate approach for this issue. In this regard, we determined 22 evaluation criteria in technical, economical and environmental aspect and applied TODIM technique. It is based on prospect theory and the most significant difference from the other MCDM methods is to deal with risk in decision-making. In order to cope with vagueness and uncertainty in this evaluation process, we integrated fuzzy sets into the system. Finally we evaluated the results obtained and presented a sensitivity analysis at the end.

Keywords: Fuzzy TODIM, Prospect Theory, Power Plants, Sustainable and Renewable Energy

Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Bulanık TODIM Yöntemiyle Değerlendirilmesi

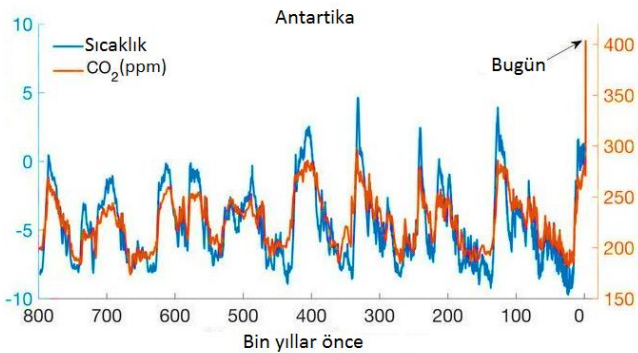
ÖZ Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları, fosil enerji kaynaklarının azalmasına ve enerji üretiminden kaynaklanan ciddi çevresel problemlerin oluşmasına karşı etkili bir çözümdür. Türkiye coğrafi özellikleri bakımından zengin yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir. Bu bağlamda kendi enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artmasına önem vermektedir. Bunun için bu alanda teşvik çalışmaları yapılmakta ve yatırımcılar ekonomik olarak desteklenmektedir. Buradan hareketle, bu çalışmada alternatifler arasında en iyi performans gösteren sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağının belirlenmesi ve böylece enerji yatırımları için referans olunması amaçlanmıştır. Çalışmada Türkiye’de potansiyeli yüksek olan güneş, rüzgar, hidroelektrik ve LFG (çöp gazı) santralleri olmak üzere dört enerji santrali değerlendirilmiştir. Alternatifler değerlendirilirken eş zamanlı olarak dikkate alınması gereken birbirinden bağımsız birçok önemli kriter bulunmaktadır. Bu nedenle, çalışmada ele alınan problemin çözümü için çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemlerinin uygulanması yerinde bir yaklaşımdır. Çalışma kapsamında teknik, ekonomik ve çevresel açıdan olmak üzere toplamda 22 değerlendirme kriteri belirlenmiştir ve yöntem olarak TODIM tekniği uygulanmıştır. TODIM beklenti teorisine dayanan bir ÇÖKV tekniğidir ve diğer yöntemlerden en önemli farkı karar verme mekanizmasında risk faktörünü ele almasıdır. Ayrıca çalışmada belirsiz, muğlak ve müphem durumlara karşı çözüm için bulanık kümeler sisteme entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve çalışmanın sonunda duyarlılık analizine yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık TODIM, Beklenti Teorisi, Elektrik Üretim Santralleri, Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji

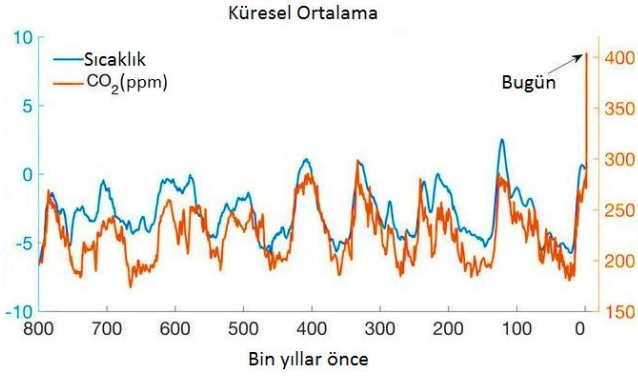
1. Giriş

Günümüzde enerji kullanımı ve enerjiye bağımlılık tüm dünya ülkelerini ilgilendiren güncel konulardan biridir. Dünya genelinde enerji ihtiyacı büyük bir oranda (%81) fosil kaynaklardan karşılanmaktadır (Tasri ve Susilawati, 2014). Yüksek orandaki bu kullanım, rezervlerin tükenmesine ve ciddi çevresel problemlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Fosil yakıt kullanımı CO₂ emisyonunun birincil kaynağıdır. Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının azalması yakın gelecekte enerji tedariki sıkıntısına yol açacaktır; dolayısıyla hem enerji temini hem de çevresel kirlilik açısından bilinçsiz fosil yakıt tüketimi kabul edilir bir seviyeye çekilmelidir. Bu problemlere bir nevi önlem almak amacıyla otoriteler tarafından Kyoto Protokolü (1997), Avrupa İklim Değişikliği Programı (2000), Paris Anlaşması (2015) gibi yasal düzenlemeler getirilerek somut adımlar atılmıştır. Bu düzenlemelerle atmosfere zararlı gaz yayılımının azaltılması hedeflenmektedir. Atmosfere sera gazı yayılmasının aynı seviyede devam etmesi halinde, yüksek olasılıkla tehlikeli iklim değişikliğine sebep olacak ısınma eşik derecesi aşılabacaktır (Lowe vd., 2009). Dolayısıyla CO₂ yoğunluğu ile yerkürenin ısınması doğru orantılı olarak ilişkilidir. Bu değerlerin geçmişten günümüze değişimi ve günümüzde geldiğimiz nokta Şekil 1 ve 2’de yansıtılmaktadır (Henley ve Abram, 2017).

Bu şartlar altında 2100 yılında kadar CO₂ yoğunluğunun dengede tutulması için acil %50-70 oranında azaltma politikası uygulanmalıdır (EEA, 1999). Mevcut durumdan hareketle gerçekleştirilen senaryoların gösterdiği üzere gerekli önlemler alınmadığı takdirde, kısa süre zarfında dünyadaki yaşam, küresel ısınmadan kaynaklı ciddi tehlikelerle karşı karşıya kalacaktır. Bu gelişmeler, otoriteleri bu problemler için çözüm yolları aramaya sevk etmiştir. Bunun bir sonucu olarak, hem enerji ihtiyacını karşılamada hem de karbon salınımını azaltmada etkili bir çözüm olan yenilenebilir enerji kaynaklarına bir yönelim olmuştur. Dolayısıyla temiz enerji kaynaklarından yararlanmak devlet politikalarında, şirketlerde ve araştırmacılar bazında enerji talebini karşılamak ve çevresel problemleri azaltmak için uygulanan bir trend haline gelmiştir.



Şekil 1. Antartika sıcaklık-CO₂ yoğunluğu değişim grafiği



Şekil 2. Dünya genelinde sıcaklık-CO₂ yoğunluğu değişim grafiği

Türkiye Kyoto Protokolü'ne üye ülkelerden biridir ve son 150 yılda küresel ısınmaya sebebiyeti %0.04 oranındadır. 1990 yılında sera gazı emisyonu (SGE) 200 milyon ton seviyelerinde iken 2015 yılında 475 milyon ton seviyesine ulaşmıştır (TÜİK, 2017). Yapılan çalışmalarda bu rakamın 2020 yılına kadar 600 milyon tonu aşacağı tahmin edilmektedir (Gürbüz, 2017). SGE seviyesinin katlanarak artması Türkiye'de endüstriyel faaliyetlerin gelişmesinden ve büyümesinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda endüstriyel anlamdaki bu gelişme ve büyüme Türkiye'nin enerji ihtiyacının artmasına sebep olmuştur. Enerji temini yönünden Türkiye dışa bağımlı bir ülkedir. Bu durumların neticesinde enerjide dışa bağımlılığı ve çevresel hasarı azaltmak adına tüm paydaşların (üreticilerin ve tüketicilerin) enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir kaynaklardan karşılaması için teşvik edici devlet politikaları bulunmaktadır.

Bu aşamadan sonra yatırımcılar için yatırımda bulunacağı enerji santral çeşidini seçmek çok önemlidir. En iyi seçeneği belirlemek için alternatiflerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekir. Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji santrallerini değerlendirmeye aldığımız zaman teknik, ekonomik ve sosyal açıdan birçok faktörü eş zamanlı göz önünde bulundurmak durumundayız. Bu nedenle Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemlerini uygulamak doğru ve yerinde bir yaklaşım olacaktır. ÇÖKV teknikleri sayesinde birbirleriyle çelişen kriterler içeren karar verme problemlerini çözebiliriz ve ÇÖKV teknikleri alınan kararların kalitesini arttırabilmektedir.

Gerçek hayat problemlerinde risk her zaman bulunur ve risk faktörü karar verme mekanizmalarında önemli bir yere sahiptir. Yenilenebilir enerji santralleri birçok farklı açılardan riski bünyesinde barındırır. Özellikle güneş, rüzgar ve hidrolik enerji santrallerinin işleyişleri mevsimsel şartlara bağlıdır. Örneğin yağış miktarının azlığı hidroelektrik santraller için elektrik üretimini doğrudan etkileyen bir risk faktörüdür. Aynı şekilde güneşlenme süresi ve rüzgar hızı da güneş ve rüzgar enerjisi santrallerini etkileyen risk etmenleridir. Dolayısıyla enerji üretim santrali değerlendirmesini risk faktörünü göz önünde bulundurarak yapmak tutarlı ve güvenilir sonuçlar elde etmek adına gerekli bir yaklaşımdır. Fakat bu yaklaşımı ÇÖKV yöntemleri içerisinde uygulama imkanı çok kısıtlı olmakta, yöntemlerin büyük bir çoğunluğu riskle başa çıkmada yetersiz kalmakta veya risk faktörü metodolojilerinde göz ardı edilip yer almamaktadır. Bu nedenle yazında yer alan birçok ÇÖKV tekniği arasında, risk faktörünü karar verme sürecine eklemek amacıyla TODIM (Tomada de Decisão Iterativa Multicritério/ İnteraktif ve Çok Ölçütlü Karar Verme) yöntemini çalışmamızda uygulamayı tercih ettik.

Risk faktörünün yanı sıra karar vermede etkili olan başka bir faktör ise belirsiz, anlaşılabilir ve bilinmeyen durumlardır. Enerji santralleri incelendiğinde sistemin verilerinde, bahsedilen bu durumlarla sıklıkla karşılaşılır ve kesin değerleri belirlemek zorlaşır. Bu durumda bulanık küme teorisini uygulayarak kesin değer atayamadığımız durumlarda uygun değer aralıkları belirleyebiliriz. Bu çalışmada sonuçların doğruluğunu ve kalitesini arttırmak amacıyla TODIM metoduna bulanık küme teorisi entegre edilerek uygulama gerçekleştirilmiştir.

TODIM beklenti teorisine dayanan bir ÇÖKV tekniğidir ve karar verme aşamasında risk faktörünü sisteme dahil eder. Beklenti teorisi Kahneman ve Tversky (1979) tarafından betimsel bir model olarak, risk durumunda karar verme üzerine fayda teorisine alternatif olarak ortaya konulmuştur. Beklenti teorisi temel olarak insanların risk altında nasıl karar verdiklerini açıklamaya çalışır. Bunun sonucunda insanların karar verirken her zaman mantıklı davranmadığı, alternatiflerin biri nihai sonuç olarak çok daha yüksek fayda vaat etse dahi gerçekleşme olasılığı yüksek olan ve daha az fayda vaat eden alternatiflerin tercih edildiği görülmüştür. Buna bağlı olarak yazarlar, insanların sonuçları kesin olan durumları abartarak sonuçları kesin olmayan durumlara göre daha fazla değer verdiklerini ve seçimlerini buna göre yaptıklarını kabul etmektedirler. Beklenti teorisinin ileri sürdüğü bu özellik fayda teorisine çelişir çünkü fayda teorisi insanların kendi karlarını maksimize etmeye çalışarak her zaman rasyonel kararlar aldığını varsayar.

Kahneman ve Tversky teori için bir değer fonksiyonu oluşturmuşlardır ve grafiği orijinden geçen S şeklindedir, kazanç ve kayıpları gösterir. Grafiğin içbükey olduğu yer kazanç söz konusu olduğunda riskten kaçınmayı (risk aversion), dışbükey olduğu yer kayıpla yüzleşildiğinde risk almaya eğilimi (risk propensity) ifade eder (Rangel vd., 2011). Değer fonksiyonunun grafiğinde içbükey ve dışbükey kısımların eğimleri eşit değildir, ve kayıp eğrisi daha dik çizilmektedir. Bu durum aynı miktarda kazanç ve kayıpların insanlar üzerinde eşit değerde etkiye sahip olmadıklarını, kaybetmenin üzüntüsünün kazanmanın sevincine ağır bastığı sonucuna götürmektedir. Kahneman ve Tversky' nin bu bulguları onlara 2002 yılında Nobel Ekonomi Ödülünü getirmiştir.

TODIM metodunda alternatiflerin birbiri üzerine kazanç ve kayıpları her bir kriter için hesaplanır. İkili karşılaştırmalar sonucunda alternatifler arasında en iyi seçeneğe ulaşılır. Beklenti teorisinde olduğu gibi TODIM metodu da değer fonksiyonuna sahiptir ve fonksiyon grafiği teoridekiyle aynı şekildedir.

Son olarak bu çalışma bulanık TODIM metodunu kullanarak en iyi performansı gösteren sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağını bulmak amacıyla yürütülmüştür. Bu giriş bölümünden sonra yazın taraması yer alacaktır, ardından uygulama kısmıyla devam edecek tartışma ve sonuç bölümleriyle sona erecektir.

2. Yazın Taraması

TODIM metodu yazında sıklıkla yer almayan nispeten yeni bir ÇÖKV yöntemidir. Gomes ve Lima 1992 yılında yöntemin ilk başarılı örnek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bunun yanı sıra bulanık TODIM tekniği de yazında yaygın olarak yer almamakta ve bulanık küme entegreli yöntemin ilk çalışmaları 2000'li yılların başına dayanmaktadır (Nobre ve Trotta, 1999). Son yıllarda bulanık TODIM tekniği üzerine yapılan

çalışmaların sayısının giderek artması, yöntemin literatürdeki uygulamalarını zenginleştirmektedir.

Klasik TODIM metodunun uygulamalı olarak kullanımı 90'lı yılların başına dayanır. Daha sonra bu uygulamalar devam etmiş; enerji, ekonomi, eğitim ve teknoloji gibi farklı alanlarda çalışmalar yapılmıştır (Gomes vd., 2010)(Gomes vd., 2009)(Adalı, 2016)(Rangel vd., 2011).

Nobre ve Trotta (1999) TODIM' in ilk bulanık uygulamasını gerçekleştirmiştir. Bulanık modeli Brezilya'da sağlık sektörüne uygulamış ve hastane için satın alınmaya aday sekiz teknolojiyi önceliklendirme işlemini yürütmüştür. Krohling ve Souza (2012) metodun bulanık küme entegreli modelinin örnek çalışmalarından birini yapmıştır. Ardından Krohling vd. (2013) bu modeli genişleterek daha karmaşık ÇÖKV sistemlerini çözecek şekilde sezgisel bulanık TODIM metodu öne sürmüşlerdir. Lourenzutti ve Krohling (2013) alternatiflerin performanslarını etkileyecek rassal durumları da oluşturduğu modele ekleyerek sezgisel bulanık kümelerle TODIM metodunu geliştirmiştir. Liu ve Teng (2014) başka bir geliştirme yöntemi uygulayarak 2 boyutlu belirsiz dilsel değişkenlerle entegreli bir model öne sürmüşlerdir. Bu modeli grup bazında çok amaçlı karar verme problemleri yararına sunmuştur. Li vd. (2015) sezgisel bulanık TODIM yöntemini kullanarak distribütör değerlendirme ve seçimi üzerine bir uygulama yapmıştır. Yanwei Li vd. (2015) de benzer bir şekilde aralıklı sezgisel bulanık kümelerle TODIM metodunu birleştirmiş ve bu teknikle havalimanı terminalleri için alan seçimi uygulamasına çalışmasının sonunda yer vermiştir. Araujo (2015) bulanık TODIM yöntemini perakende satış lokasyonu belirlemek amacıyla uygulamıştır. Ekhtari vd. (2016) çalışmada belirsiz şartlarda TODIM tekniğini, kar amacı gütmeyen finansal yatırım girişimlerinde olabilecek riskleri derecelendirmek üzere kullanmıştır. Ren vd. (2016) Pythagorean bulanık kümeleri TODIM metoduna entegre ederek bir model oluşturmuş ve modelin uygulanabilirliğini göstermek için yatırım bankası seçme işlemini örnek olarak göstermişlerdir. Qin vd. (2017) bir diğer sezgisel bulanık TODIM çalışmasını yapmış, sezgisel üçgen bulanık sayıları kullanarak bu yöntemin geçerliliğini ve uygulanabilirliğini göstermek adına yenilenebilir enerji kaynağı seçme üzerine örnek bir çalışma sunmuştur. Qin vd. (2017) de TODIM metodunu Çin ülke genelinde kabul gören enerji performans sözleşmesi modellerinde değerlendirmek üzere kullanmıştır. Bu modeli entropi ölçümleriyle birleştirerek kampüs projesi üzerinde uygulama gerçekleştirmiştir.

Yazındaki mevcut çalışmalarda TODIM metodunun başka yöntemlerle karşılaştırılmalı uygulamaları bulunmaktadır. Örneğin; Hanine vd. (2016) katı atık sahası seçimi için bulanık AHP yöntemi ile bulanık TODIM yöntemini karşılaştırmıştır.

TODIM metodu bulanık kümelerle entegre edildiği gibi farklı yöntemlerle ve ÇÖKV teknikleriyle birleşik kullanıldığı çalışmalar da yazında yer almaktadır (Gomes vd. 2010; Ruzgys vd. 2014; Gomes vd. 2015).

3. Bulanık Küme Teorisi

Lütfi Zadeh tarafından 1965' te klasik küme teorisinin bir uzantısı olarak ortaya konulmuştur. Elemanların belirli bir kümeye aidiyetleri üyelik derecesiyle ifade edilir ve bu üyelik derecesi $[0, 1]$ aralığında bir değere sahip olabilir. Diğer bir ifadeyle klasik küme kavramıyla bir eleman belirli bir kümeye ya aittir ya da ait değildir. Halbuki bir

bulanık kümede elemanların o kümeye kısmen aidiyeti söz konusu olabilir. Bulanık küme tanımı aşağıdaki gibidir:

X , x ile simgelenen nesnelere topluluğu ise; X de bulunan \tilde{A} bulanık kümesi bir sıralı ikililer kümesidir.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x) | x \in X)\} \quad (1)$$

$\mu_{\tilde{A}}(x)$ bu kümeye ilişkin üyelik fonksiyonudur. Bulanık kümeler ayrık uzayda da, sürekli uzayda da tanımlı olabilirler. Bir bulanık küme dışbükey ve normalize edilmiş, üyelik fonksiyonu \mathbb{R}' de tanımlanmış parçalı sürekli ise bulanık sayı olarak adlandırılır. Bir kümenin normalize edilmesi demek maksimum üyelik fonksiyonu derecesinin 1 olması demektir (Gao, Zhang & Cao, 2009). Bu çalışmada asıl olarak kullanılan bulanık sayı çeşitlerinden üçgen bulanık sayılar (ÜBS) aşağıda tanımlanmaktadır (Chen, C. Hwang & F. Hwang, 1992) :

$x, l, m, u \in \mathbb{R}$ ve $\mu_{\tilde{A}}(x)$ x' in \tilde{A} ' da üyelik fonksiyonudur. Üçgen bulanık sayı olan $\tilde{A} = (l, m, u)$ şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x \leq l \\ \frac{(x-l)}{(m-l)} & , \quad l < x \leq m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)} & , \quad m < x \leq u \\ 0 & , \quad x > u \end{cases} \quad (2)$$

l ve u sırasıyla alt ve üst sınır değerlerini, m ise \tilde{A} bulanık sayısının en olası değerini gösterir.

Bulanık sayılar dilsel değişkenleri ifade etmede kullanılır. Bu değişkenler doğal ya da yapay dilde değerleri kelimeler olan değişkenlerdir. Örneğin "yaş" değişkeni değerleri 25, 30, 40 gibi kesin rakamlardan ziyade genç, çok genç, yaşlı değil gibi ifadeler olduğunda dilsel değişken olarak adlandırılır (Zadeh, 1975). Bu çalışmada dilsel değişkenlerden, kriter ağırlıklarına karar vermek ve alternatiflerin niteliksel kriterlere göre performanslarını belirlemek için yararlanılmıştır. Tablo 1 ve 2'de dilsel değişken değerlerinin karşılık geldiği üçgen bulanık sayılar gösterilmektedir (Chang, 2014).

Dilsel Değişken	ÜBS Karşılığı
Çok Düşük (ÇD)	(0.0, 0.1, 0.2)
Düşük (D)	(0.1, 0.2, 0.3)
Orta Düşük (OD)	(0.2, 0.35, 0.5)
Orta (O)	(0.4, 0.5, 0.6)
Orta Yüksek (OY)	(0.5, 0.65, 0.8)
Yüksek (Y)	(0.7, 0.8, 0.9)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.8, 0.9, 1.0)

Tablo 1. Kriter ağırlıklarını belirlemek için ÜBS değerleri

Dilsel Değişken	ÜBS Karşılığı
Çok Kötü (ÇK)	(0, 1, 2)
Kötü (K)	(1, 2, 3)
Orta Kötü (OK)	(2, 3.5, 5)
Orta (O)	(4, 5, 6)
Orta İyi (Oİ)	(5, 6.5, 8)
İyi (İ)	(7, 8, 9)
Çok İyi (Çİ)	(8, 9, 10)

Tablo 2. Performans değerlendirmesi için ÜBS değerleri (TFN values for the performance evaluation)

Üçgen bulanık sayıları kullanarak yapacağımız matematiksel işlemler aşağıda tanımlanmaktadır (Opricovic, 2011).

$\tilde{A}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ve $\tilde{A}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ iki farklı ÜBS olmak üzere:

- Toplama: $\tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$
- Çıkarma: $\tilde{A}_1 \ominus \tilde{A}_2 = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2)$
- Çarpma: $\tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2)$ pozitif \tilde{A}_1 için
- Skaler çarpma: $k \otimes \tilde{A} = (k \times l, k \times m, k \times u)$ negatif olmayan k için
- Skaler bölme: $\tilde{A} / k = (l/k, m/k, u/k)$ pozitif k için
- MAX operatörü: $MAX_i \tilde{A}_i = (max_i l_i, max_i m_i, max_i u_i)$
- MIN operatörü: $MIN_i \tilde{A}_i = (min_i l_i, min_i m_i, min_i u_i)$

4. Bulanık TODIM

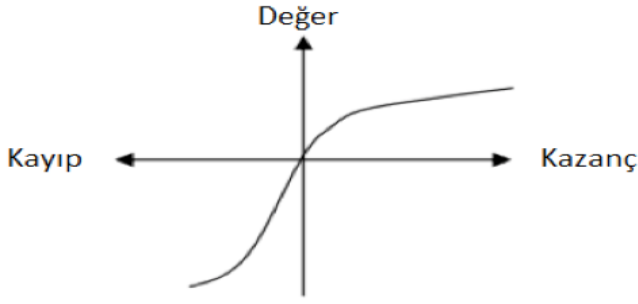
Beklenti teorisi TODIM metodunun altyapısını oluşturur. Aşağıdaki bölümlerde teori ve yöntem ayrı olarak anlatılmaktadır.

4.1. Beklenti Teorisi

Beklenti teorisi Kahneman ve Tversky (1979) tarafından risk altında karar verme üzerine ortaya atılmıştır. İnsanların risk almaya yaklaşımı, kazanma veya kaybetme durumunda kalmasına göre değişmektedir. Teori bu yaklaşımları kazanç durumunda riskten kaçınma, kayıp durumunda risk almaya eğilim olarak sınıflandırmıştır ve aşağıda gösterilen değer fonksiyonuyla ifade etmektedir:

$$v(x) = \begin{cases} x^\alpha & \text{if } x \geq 0 \\ -\theta(-x)^\beta & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

α ve β sırasıyla kazanç ve kayba ilişkin parametrelerdir. θ parametresi kayıp eğrisinin daha dik olmasıyla ilgilidir. Riskten kaçınma durumunda $\theta > 1$ durumu söz konusudur. Kahneman ve Tversky (1979) deneysel yolla değerleri $\alpha = \beta = 0,88$ ve $\theta = 2.25$ olarak tespit etmişlerdir. Daha sonra θ değerinin 2 ve 2.5 aralığında olmasını önermişlerdir (Krohling ve Souca, 2012). Teorinin değer fonksiyonu grafiği Şekil 3'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Beklenti teorisi değer fonksiyonu grafiği

Beklenti teorisinde olduğu gibi TODIM yöntemi de bir değer fonksiyonu ve grafiğine sahiptir. Bu grafik Şekil 3 ile aynı özelliklere sahiptir.

4.2. Bulanık TODIM Yöntemi

Bulanık TODIM yöntemi, bulanık kümelerin klasik TODIM tekniğine entegre edilerek oluşturulan modeldir. Alternatiflerin birbiri üzerinde her bir kriter bazında ikili karşılaştırması yapılır, kazanç ve kayıplar elde edilir. Her bir alternatifin kazanç ve kayıplarının toplamı o alternatifin baskınlık derecesini verir ve alternatifler bu baskınlık derecesine göre sıralanır.

Karar verme sistemimizde m sayıda alternatif $i = 1, 2 \dots m$ ve n sayıda değerlendirme kriteri $j = 1, 2 \dots n$ bulunur. A_i , i inci alternatifi; C_j , j inci kriteri ifade eder. Her bir kriter farklı önem derecesine sahiptir ve $w = (w_1, w_2 \dots w_n)^T$ kriterlerin ağırlık vektörüdür; ayrıca w_j, C_j kriterinin önem derecesini gösteren ağırlığıdır. Bunların arasında $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ve $0 \leq w_j \leq 1$ ilişkisi vardır. Alternatifler her bir kriterde göre performans değerine sahiptir ve \tilde{x}_{ij} , i inci alternatifin j inci kriterde göre olan performans değerini gösterir. Burada w_j ' nin tam sayı ve \tilde{x}_{ij} ' nin üçgen bulanık sayı olduğunu belirtmemiz gerekir. Bu çalışmada literatürde bulunan bulanık TODIM yöntemlerinden faydalanılmıştır ve yöntemin adımları aşağıdaki şekilde belirtilmektedir (Tosun ve Akyüz 2015; Zhang ve Fan 2011; Sen vd. 2016).

1. Adım: Kriter ağırlıklarının ve alternatiflerin performans değerlerinin belirlenmesi

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve niteliksel kriterlere göre performans değerlendirmesi için üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır. Alternatiflerin niceliksel kriterlere göre performansı sayısal değerlerle belirtilmiştir. Sayısal değerlerle ölçülemeyen niteliksel kriterlere göre performans değerlendirmesi ve kriter ağırlıklarının belirlenmesi karar vericiler tarafından yapılmaktadır ve aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} \left[\sum_{e=1}^k \tilde{x}_{ij}^e \right] \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

\tilde{x}_{ij}^e , e inci karar verici tarafından, alternatif i nin j kriterine göre belirlenen performans değeridir. k toplam karar verici sayısıdır.

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} \left[\sum_{e=1}^k \tilde{w}_j^e \right] \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

\tilde{w}_j^e , f inci kriterin e inci karar verici tarafından belirlenen önem ağırlığıdır. Farklı birimlerdeki performans değerlerinin normalize edilmesi gerekir. $\tilde{x}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ bulanık performans değerinin normalleştirilmiş değeri olan bulanık \tilde{r}_{ij} , Denklem (6) ve Denklem (7) de belirtildiği üzere hesaplanır:

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^*}, \frac{m_{ij}}{u_j^*}, \frac{u_{ij}}{u_j^*} \right), \quad j \in B \quad (6)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right), \quad j \in C \quad (7)$$

B ve C sırasıyla fayda ve maliyet kriterlerinin kümeleridir. $j \in B$ ise $u_j^* = \max_i u_{ij}$, $j \in C$ ise $l_j^- = \min_i l_{ij}$. Bu normalizasyon işlemi bulanık performans değerlerini standart hale getirir ve değer aralığı 0 ve 1 arasında yer alır [0, 1]. Elde edilen sonuçlarla normalize edilmiş performans matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\begin{array}{c} C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1m} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{r}_{n1} & \tilde{r}_{n2} & \dots & \tilde{r}_{nm} \end{bmatrix} \\ j = 1, 2, \dots, n \\ i = 1, 2, \dots, m \end{array} \quad (8)$$

2. Adım: Bulanık kriter ağırlıklarının durulaştırılması

Abdel-Kader ve Dugdale' nin (2001) çalışmasındaki durulaştırma yöntemi kullanılmıştır. α iyimserlik endeksini ifade eder ve karar vericinin riske karşı tutumunu yansıtır. Daha büyük α değerleri iyimser bir karar vericiyi ifade ederken, daha küçük değerler kötümser bir karar vericinin göstergesidir. Bu çalışmada α değeri iyimserlik ve kötümserlik arasındaki dengeyi sağlamak için 0.5 olarak alınmıştır.

$\alpha \in [0,1]$ ve $\tilde{F}_j = (l_j, m_j, u_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$, bir üçgen bulanık sayıdır. $V(\tilde{F}_j)$ ise \tilde{F}_j ' nin duru değeridir.

$$V(\tilde{F}_j) = m_j \left\{ \alpha \left[\frac{u_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min} + u_j - m_j} \right] + (1 - \alpha) \left[1 - \frac{x_{\max} - l_j}{x_{\max} - x_{\min} + m_j - l_j} \right] \right\} \quad (9)$$

$x_{\min} = \infimum S$, $x_{\max} = \supremum S$

$$S = \bigcup_{j=1}^n S_j \quad (10)$$

$$S_j = (l_1, m_1, u_1, \dots, l_n, m_n, u_n) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Hesaplanan duru değerlerin normalizasyonu aşağıdaki eşitlik kullanılarak yapılır:

$$w_j = \frac{V(\tilde{F}_j)}{\sum_{j=1}^n V(\tilde{F}_j)} \quad (12)$$

3. Adım: Kazanç ve kayıpların hesaplanması

Bir alternatifin diğer alternatif üzerinde kazanç ve kaybı ikili karşılaştırma yapılarak elde edilir. Bu durumda \tilde{x}_{ij} ve \tilde{x}_{kj} sırasıyla alternatif A_i ve A_k ' nin kriter C_j ' ye göre performans değerleri olsun, $k = 1, 2 \dots m$. \tilde{x}_{ij} ve \tilde{x}_{kj} performans değerleri üçgen bulanık sayılarla ifade edilir; aralarındaki Öklid uzaklığı Denklem (13)' deki formül üzerinden hesaplanır:

$$d(\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{kj}) = \sqrt{\frac{1}{3} \left[(x_{ij}^l - x_{kj}^l)^2 + (x_{ij}^m - x_{kj}^m)^2 + (x_{ij}^u - x_{kj}^u)^2 \right]} \quad (13)$$

A_i 'nin A_k ' ye karşı C_j kriterine göre kazanç (G_{ik}^j) ve kaybı (L_{ik}^j) aşağıdaki ifadelerle gösterilir.

Fayda kriteri için:

$$G_{ik}^j = \begin{cases} d(\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{kj}), & \hat{x}_{ij} \geq \hat{x}_{kj} \\ 0, & \hat{x}_{ij} < \hat{x}_{kj} \end{cases} \quad (14)$$

$$L_{ik}^j = \begin{cases} 0, & \hat{x}_{ij} \geq \hat{x}_{kj} \\ -d(\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{kj}), & \hat{x}_{ij} < \hat{x}_{kj} \end{cases} \quad (15)$$

Maliyet kriteri için:

$$G_{ik}^j = \begin{cases} 0, & \hat{x}_{ij} \geq \hat{x}_{kj} \\ d(\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{kj}), & \hat{x}_{ij} < \hat{x}_{kj} \end{cases} \quad (16)$$

$$L_{ik}^j = \begin{cases} -d(\hat{x}_{ij}, \hat{x}_{kj}), & \hat{x}_{ij} \geq \hat{x}_{kj} \\ 0, & \hat{x}_{ij} < \hat{x}_{kj} \end{cases} \quad (17)$$

Bunun üzerine $G_{ik}^j + L_{ki}^j = 0$ ve $G_{ii}^j = L_{ii}^j = 0$ olacağı açıktır. Bu eşitlikler kullanılarak kazanç matrisi $G_j = [G_{ik}^j]_{m \times m}$ ve kayıp matrisi $L_j = [L_{ik}^j]_{m \times m}$ her bir kriter için oluşturulur.

4. Adım: Kriterlerin göreceli ağırlıklarının hesaplanması w_{jr}

Kriterlerin göreceli ağırlıkları bir referans kriteri baz alınarak elde edilir. Bu referans kriteri en büyük ağırlığa sahip olan kriterdir. C_r referans kriteri olduğunda C_j kriterinin göreceli ağırlığı w_{jr} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_{jr} = \frac{w_j}{w_r} \quad (18)$$

w_j kriter C_j ' nin ağırlığı iken w_r kriter C_r ' nin ağırlığıdır.

5. Adım: Kısmi baskınlık derecesi matrisinin oluşturulması

$\phi_{ik}^{j(+)}$ kazancın baskınlık derecesini, $\phi_{ik}^{j(-)}$ kaybın baskınlık derecesini simgeler. Matrisi oluşturmak için alternatif A_i ' nin A_k üzerindeki kriter C_j ' ye göre kazanç ve kayıp baskınlık derecesi aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır:

$$\phi_{ik}^{j(+)} = \sqrt{G_{ik}^j \frac{w_{jr}}{\sum_{j=1}^n w_{jr}}} \quad (19)$$

$$\phi_{ik}^{j(-)} = -\frac{1}{\theta} \sqrt{-L_{ik}^j \frac{\sum_{j=1}^n w_{jr}}{w_{jr}}} \quad (20)$$

θ parametresi kaybı hafifletme faktörüdür. Karşılaştırılan alternatiflerin söz konusu kriter bazında kısmi baskınlık derecesi ϕ_{ik}^j aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\phi_{ik}^j = \phi_{ik}^{j(+)} + \phi_{ik}^{j(-)} \quad (21)$$

Daha sonra C_j kriteri için $\phi_j = [\phi_{ik}^j]_{m \times m}$ kısmi baskınlık derecesi matrisi oluşturulur.

6. Adım: Nihai baskınlık derecesi matrisinin oluşturulması

Alternatif i nin alternatif k üzerindeki nihai baskınlık derecesi δ_{ik} :

$$\delta_{ik} = \sum_{j=1}^n \phi_{ik}^j \quad (22)$$

Bu durumda $m \times m$ boyutunda Δ nihai baskınlık derecesi matrisi oluşur, $\Delta = [\delta_{ik}]_{m \times m}$.

7. Adım: Alternatiflerin sonuç değerlerinin hesaplanması ve sıralama işlemi

Önceki adımda oluşan Δ matrisine dayanarak, alternatif A_i ' nin sonuç değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\xi(A_i) = \frac{\sum_{k=1}^m \delta_{ik} - \min_{i \in M} \left\{ \sum_{k=1}^m \delta_{ik} \right\}}{\max_{i \in M} \left\{ \sum_{k=1}^m \delta_{ik} \right\} - \min_{i \in M} \left\{ \sum_{k=1}^m \delta_{ik} \right\}} \quad (23)$$

$0 \leq \xi(A_i) \leq 1$ ve daha büyük $\xi(A_i)$ daha iyi alternatif demektir. Bu nedenle alternatifler azalan $\xi(A_i)$ değerine göre sıralanır.

5. Uygulama: Sürdürülebilir ve Yenilenebilir Enerji Santrallerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Türkiye'de yer alan en yaygın yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji santral türlerinden güneş enerjisi (GE), rüzgar enerjisi (RE), hidroelektrik enerji (HE) ve çöp gazı enerjisi (LFG-E) değerlendirmesi yer almaktadır. Bu değerlendirmeler dört enerji türü için Türkiye'de faaliyet gösteren santraller üzerinden yapılmıştır ve dolayısıyla gerçek hayat problemidir. Karar vericiler olarak; enerji ticareti ve yatırım alanında

uzman sahadaki yöneticiler ile yenilenebilir enerji alanında akademisyen olan toplamda dört mühendisin görüşleri alınmıştır. Akademisyen karar vericilerimiz İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü'nde yenilenebilir enerji teknolojileri alanında değerli çalışmaları olan ve İstanbul Üniversitesi'nde sürdürülebilirlik, yenilenebilir enerji alternatifleri üzerinde çalışmalar yapan uzman kişilerdir. Öte yandan sektörün içinde yer alan diğer karar vericilerimiz Türkiye' de 30 yıllık enerji sektörü tecrübesi bulunan enerji şirketinde konularında uzman yöneticilerdir.

Çalışmanın en önemli adımlarından biri değerlendirme kriterlerini belirleme işlemidir. Bu aşamada bir enerji üretim santralini incelerken göz önünde bulundurulması gereken teknik, ekonomik ve çevresel etmenler kriter olarak belirlenmiştir. Tablo 3'te ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

5.1. Kriter Ağırlıklarının ve Alternatiflerin Performans Değerlerinin Belirlenmesi

Kriter ağırlıkları, karar vericilerin Tablo 1'e göre her bir kriter için yaptığı değerlendirmeler Denklem (5) kullanılarak elde edilmiştir. Kriterlerin bulanık ağırlıkları Tablo 4'te gösterilmektedir. Alternatiflerin performans değerleri sadece niteliksel kriterler (görsel etki, olgunluk vb.) için karar vericiler tarafından belirlenir, diğer niceliksel kriterlerin (inşa süresi, yatırım maliyeti vb.) verileri ölçülebilir. Performans değerlerini belirlemek için benzer şekilde karar vericiler Tablo 2'yi kullanarak görüşlerini bildirirler ve Denklem (4) ile hesaplama işlemi yapılır. Örnek üzerinden işlemler aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

$$\tilde{x}_{21} = \frac{1}{4} [(4, 5, 6) \oplus (7, 8, 9) \oplus (7, 8, 9) \oplus (8, 9, 10)] = (6.5, 7.5, 8.5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{w}_1 &= \frac{1}{4} [(0.8, 0.9, 1.0) \oplus (0.7, 0.8, 0.9) \oplus (0.8, 0.9, 1.0) \oplus (0.8, 0.9, 1.0)] \\ &= (0.775, 0.875, 0.975) \end{aligned}$$

Veriler farklı birimlere sahip olduğu için performans değerlerini Denklem (6) ve Denklem (7)'yi kullanarak normalize etmemiz gerekir. Sırasıyla fayda ve maliyet kriteri bazında örnek hesaplamalar:

$$\tilde{r}_{11} = \left(\frac{0.15}{0.95}, \frac{0.187}{0.95}, \frac{0.22}{0.95} \right) = (0.158, 0.196, 0.232),$$

$$\tilde{r}_{15} = \left(\frac{11.538}{11.562}, \frac{11.538}{11.55}, \frac{11.538}{11.538} \right) = (0.998, 0.99, 1)$$

Bu aşamadan sonra normalize edilmiş performans matrisi oluşturulmuştur ve Tablo 5'te gösterilmektedir

Kriterler	Açıklama	Birim
C ₁ : Teknik verimlilik	Enerji kaynağından elde edebileceğimiz faydalı enerjiyi belirtir.	oran
C ₂ : Teknik risk	Santralin faaliyetinden ve çevre şartlarından dolayı (yağışlar, dolu, buzlanma vs.) kayıp oluşma ihtimalidir.	-
C ₃ : Olgunluk	Kullanılan teknolojinin güvenilirliğini, hata payının azaltılmış olmasını ve ulaşılabilirliğini belirtir.	-
C ₄ : Yıllık net elektrik üretim miktarı	Yılın sonunda elde edilen net elektrik üretim miktarıdır.	MWh/yıl
C ₅ : İnşaat süresi	Santralin inşa edilme süresidir.	ay
C ₆ : Saha kullanımı kWh/m ²	Saha kullanımını belirtir. Yıllık m ² başına düşen net enerji üretimini ifade eder.	kWh/m ²
C ₇ : Birim kurulu güç MW/km ²	Km ² ye düşen santral kurulu gücüdür.	MW/km ²
C ₈ : Santral çalışma ömrü	Santrallerin faaliyette olduğu süredir.	yıl
C ₉ : Rezerv potansiyeli	Santrallerin elektrik üretim kaynağının Türkiye rezerv potansiyelidir. (Örneğin hidroelektrik için Türkiye' nin su potansiyeli)	MW
C ₁₀ : Yıllık gelir	Santral yatırımdan elde edilen yıllık gelir miktarıdır.	cent/kWh
C ₁₁ : Yatırım maliyeti	Santral kurulum projesi için gerekli hizmetlerin karşılığı olan toplam maliyeti belirtir.	cent/kWh
C ₁₂ : Toplam işletim maliyeti	Santral faaliyetlerinden kaynaklı bakım-onarım masrafları, personel giderleri gibi maliyetlerin tümünü ifade eder.	cent/kWh
C ₁₃ : Geri ödeme periyodu	Yatırımın kendini karşılama süresidir.	yıl
C ₁₄ : Devlet destek oranı	Elektrik alım garantisinin devlet destek oranını belirtir.	cent/ kWh
C ₁₅ : İşletim, bakım onarım maliyeti yıllık artış oranı	Bu türdeki maliyetlerin yıllık yüzde kaç artış gösterdiğini belirtir.	% (yüzde)
C ₁₆ : Oluşan istihdam	Santral faaliyetinden kaynaklı oluşan istihdamı ifade eder.	adet
C ₁₇ : Hayat boyu sera gazı emisyonu	Santralin faaliyetlerinden dolayı oluşan sera gazı emisyonu miktarıdır.	ton/yıl
C ₁₈ :Sera gazı emisyonu önleme miktarı	Santrallerin temiz enerji üretiminden dolayı zararlı gaz emisyonlarını önlemesi.	CO ₂ -eq kg/kWh
C ₁₉ : Ekosisteme etkisi	Santrallerin çalışma süresince ekosisteme verebileceği potansiyel zararı belirtir.	-
C ₂₀ : Toplumsal kabul edirlilik	Kurulacak santrale karşı kamuoyu görüşüdür.	-
C ₂₁ : Gürültü	Santralin sebep olduğu gürültü kirliliğidir.	-
C ₂₂ : Görsel etki	Santralin sebep olduğu görüntü kirliliğidir.	-

Not: [-] niteliksel kriterlerdir, ölçüm birimlerinin olmadığını belirtir.

Tablo 3. Elektrik üretim santralleri için değerlendirme kriterleri

Kriterler	\tilde{w}_j	V_j	w_j	w_{jr}
C ₁	(0.775, 0.875, 0.975)	0.729	0.065	1
C ₂	(0.7, 0.813, 0.925)	0.618	0.055	0.847
C ₃	(0.725, 0.825, 0.925)	0.642	0.058	0.88
C ₄	(0.7, 0.8, 0.9)	0.6	0.054	0.823
C ₅	(0.175, 0.313, 0.45)	0.069	0.006	0.094
C ₆	(0.433, 0.55, 0.667)	0.26	0.023	0.357
C ₇	(0.433, 0.55, 0.667)	0.26	0.023	0.357
C ₈	(0.6, 0.713, 0.825)	0.464	0.042	0.636
C ₉	(0.733, 0.833, 0.933)	0.656	0.059	0.899
C ₁₀	(0.7, 0.8, 0.9)	0.6	0.054	0.823

Kriterler	\tilde{w}_j	V_j	w_j	w_{jr}
C ₁₁	(0.725, 0.838, 0.95)	0.66	0.059	0.905
C ₁₂	(0.725, 0.825, 0.925)	0.642	0.058	0.88
C ₁₃	(0.675, 0.788, 0.9)	0.577	0.052	0.792
C ₁₄	(0.75, 0.85, 0.95)	0.685	0.061	0.939
C ₁₅	(0.675, 0.788, 0.9)	0.577	0.052	0.792
C ₁₆	(0.275, 0.388, 0.5)	0.114	0.01	0.157
C ₁₇	(0.675, 0.788, 0.9)	0.577	0.052	0.792
C ₁₈	(0.75, 0.85, 0.95)	0.685	0.061	0.939
C ₁₉	(0.75, 0.85, 0.95)	0.685	0.061	0.939
C ₂₀	(0.65, 0.75, 0.85)	0.521	0.047	0.714
C ₂₁	(0.5, 0.613, 0.725)	0.331	0.03	0.455
C ₂₂	(0.375, 0.488, 0.6)	0.197	0.018	0.27

Tablo 4. Kriterlerin bulanık, duru, normalize ve göreceli ağırlıkları

	GE	RE	HE	LFG-E
C ₁	(0.158, 0.196, 0.232)	(0.263, 0.305, 0.421)	(0.316, 0.383, 0.526)	(0.842, 0.961, 1)
C ₂	(0.703, 0.811, 0.919)	(0.703, 0.811, 0.919)	(0.784, 0.892, 1)	(0.351, 0.459, 0.568)
C ₃	(0.757, 0.865, 0.973)	(0.757, 0.878, 1)	(0.676, 0.797, 0.919)	(0.703, 0.824, 0.946)
C ₄	(0.151, 0.152, 0.152)	(0.272, 0.272, 0.272)	(0.187, 0.187, 0.188)	(0.998, 0.999, 1)
C ₅	(0.998, 0.999, 1)	(0.784, 0.785, 0.786)	(0.457, 0.458, 0.458)	(0.915, 0.916, 0.917)
C ₆	(0.216, 0.217, 0.217)	(0.014, 0.014, 0.014)	(0.0004, 0.0004, 0.0004)	(0.998, 0.999, 1)
C ₇	(0.998, 0.999, 1)	(0.04, 0.04, 0.04)	(0.001, 0.001, 0.001)	(0.94, 0.941, 0.942)
C ₈	(0.611, 0.612, 0.612)	(0.509, 0.51, 0.51)	(0.998, 0.999, 1)	(0.713, 0.714, 0.714)
C ₉	(0.998, 0.999, 1)	(0.855, 0.856, 0.857)	(0.846, 0.847, 0.848)	(0.068, 0.068, 0.068)
C ₁₀	(0.529, 0.53, 0.53)	(0.262, 0.263, 0.263)	(0.998, 0.999, 1)	(0.498, 0.499, 0.499)
C ₁₁	(0.247, 0.247, 0.248)	(0.272, 0.272, 0.272)	(0.308, 0.308, 0.308)	(0.998, 0.999, 1)
C ₁₂	(0.795, 0.796, 0.797)	(0.998, 0.999, 1)	(0.303, 0.303, 0.303)	(0.611, 0.612, 0.612)
C ₁₃	(0.713, 0.714, 0.714)	(0.499, 0.5, 0.5)	(0.499, 0.5, 0.5)	(0.998, 0.999, 1)
C ₁₄	(0.927, 0.928, 0.929)	(0.463, 0.464, 0.464)	(0.392, 0.392, 0.393)	(0.998, 0.999, 1)
C ₁₅	(0.998, 0.999, 1)	(0.45, 0.451, 0.451)	(0.25, 0.25, 0.25)	(0.649, 0.649, 0.65)
C ₁₆	(0.2, 0.2, 0.2)	(0.14, 0.14, 0.14)	(0.479, 0.48, 0.48)	(0.998, 0.999, 1)
C ₁₇	(0.003, 0.024, 0.154)	(0.016, 0.077, 0.333)	(0.008, 0.077, 1)	(0.02, 0.044, 0.2)
C ₁₈	(0.114, 0.114, 0.114)	(0.114, 0.114, 0.114)	(0.114, 0.114, 0.114)	(0.998, 0.999, 1)
C ₁₉	(0.789, 0.895, 1)	(0.711, 0.816, 0.921)	(0.289, 0.408, 0.526)	(0.474, 0.592, 0.711)
C ₂₀	(0.763, 0.882, 1)	(0.658, 0.776, 0.895)	(0.395, 0.513, 0.632)	(0.526, 0.645, 0.763)
C ₂₁	(0.795, 0.897, 1)	(0.308, 0.41, 0.513)	(0.179, 0.282, 0.385)	(0.41, 0.513, 0.615)
C ₂₂	(0.742, 0.871, 1)	(0.645, 0.79, 0.935)	(0.484, 0.629, 0.774)	(0.387, 0.516, 0.645)

Tablo 5. Normalize edilmiş performans matrisi (Normalized performance matrix of TODIM)

5.2. Bulanık Kriter Ağırlıklarının Durulaştırılması

Tablo 4'te verilen bulanık ağırlıklar Denklem (9) kullanılarak duru değerler elde edilir ve ardından bu değerler Denklem (12) ile normalizasyonu yapılır. Daha açıklayıcı olması adına aşağıda bu işlemlerin bir örnek üzerinden açıklaması verilmiştir, sonuçlar aynı tabloda ikinci sütunda yer almaktadır.

$$V(\tilde{C}_1) = 0.875 \left\{ 0.5 \left[\frac{0.975 - 0.175}{0.975 - 0.175 + 0.975 - 0.875} \right] + (1 - 0.5) \left[1 - \frac{0.975 - 0.775}{0.975 - 0.175 + 0.875 - 0.775} \right] \right\} = 0.729$$

$$\sum_{j=1}^{22} V(\tilde{C}_j) = 0.729 + 0.618 + \dots + 0.197 = 11.14$$

$$w_1 = 0.729/11.147 = 0.065$$

5.3. Kazanç ve Kayıpların Hesaplanması

Performans değerlerinin normalizasyonu sonrasında bütün kriterler fayda kriteri özelliğini almıştır. Örneğin; normalizasyon öncesi fayda kriteri için en iyi alternatif en büyük sayısal değere sahip olan alternatif, maliyet kriteri için de bu en küçük değere sahip olan alternatif demektir. Ancak normalizasyon sonrası bütün değerler standartlaştırılmış ve her bir kriter bazında en iyi alternatif en büyük değere sahip olan alternatif olmuştur. Bu nedende hesaplamalar Denklem (14) ve (15)'e göre yapılmıştır. Hesaplama örneği aşağıda gösterilmektedir:

$$\tilde{x}_{21} = (0.2631, 0.3052, 0.4211) > \tilde{x}_{12} = (0.1579, 0.1964, 0.2316)$$

$$d(\tilde{x}_{21}, \tilde{x}_{12}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(0.2632 - 0.1579)^2 + (0.3052 - 0.1964)^2 + (0.4211 - 0.2316)^2]} = 0.1400$$

$$G_{21}^1 = 0.1400, \quad L_{21}^1 = 0 \quad \text{ve} \quad L_{12}^1 = -0.1400$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1400 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2210 & 0.0814 & 0 & 0 \\ 0.7402 & 0.6058 & 0.5280 & 0 \end{bmatrix} \quad L_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.1400 & -0.2210 & -0.7402 \\ 0 & 0 & -0.0814 & -0.6058 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5280 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Görüldüğü gibi kayıp matrisi kazanç matrisinin transpozisinin eksi işaretlidir. Bu hesaplamalar her kriter için tekrar edilir.

5.4. Göreceli Ağırlıkların w_{jr} Hesaplanması

Kriter göreceli ağırlığı w_{jr} 'nin hesaplanması Denklem (18) ile yapılmıştır. Referans kriteri, en yüksek önem derecesine sahip olan C_1 kriteridir. Sonuçlar Tablo 4'te dördüncü sütunda gösterilmektedir.

$$w_{1r} = 0.065/0.065 = 1$$

5.5. Kısmi Baskınlık Derecesi Matrisinin Oluşturulması

Bu çalışmada θ değerleri 1, 2.5, 3 ve 4 olarak seçilerek ayrı ayrı uygulanmıştır. Aşağıda yer alan hesaplamalar Denklem (19), (20), (21) uygulanarak, birinci kriter göre $\theta = 1$ için örnek gösterim olarak yapılmıştır.

$$\phi_{12}^{1(+)} = \sqrt{(0)(1)/(15.287)} = 0,$$

$$\phi_{12}^{1(-)} = -\frac{1}{1}\sqrt{(0.14)(15.287)/(1)} = -1.4630, \quad \phi_{12}^1 = -1.4630$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1.4630 & -1.8379 & -3.3638 \\ 0.0957 & 0 & -1.1152 & -3.0431 \\ 0.1202 & 0.0729 & 0 & -2.8409 \\ 0.2200 & 0.1991 & 0.1858 & 0 \end{bmatrix}$$

Aynı hesaplamalar belirlenen θ değerinde diğer kriterler için tekrar edilir.

5.6. Nihai Baskınlık Derecesi Matrisinin Oluşturulması

Her farklı θ değeri için nihai baskınlık matrisi Denklem (22) ile aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\delta_{12} = \phi_{12}^1 + \phi_{12}^2 + \dots + \phi_{12}^{22} = -1.463 + 0 + \dots + 0.038 = -6.1786 \quad \theta = 1 \text{ için.}$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & -6.1786 & -17.5832 & -33.8932 \\ -39.4613 & 0 & -17.7152 & -53.7932 \\ -46.4521 & -28.0141 & 0 & -59.9528 \\ -28.8923 & -16.5477 & -15.4308 & 0 \end{bmatrix}$$

5.7. Alternatiflerin Sonuç Değerlerinin Hesaplanması ve Sıralama İşlemi

Aşağıdaki hesaplamalar $\theta = 1$ için yapılmıştır. Δ_1 matrisinin birinci satırından:

$$\delta_{11} = 0, \quad \delta_{12} = -6.1786, \quad \delta_{13} = -17.5832, \quad \delta_{14} = -33.8932$$

$$\sum_{k=1}^4 \delta_{1k} = 0 - 6.1786 - 17.5832 - 33.8932 = -57.6549$$

$$\sum_{k=1}^4 \delta_{2k} = -110.9697, \quad \sum_{k=1}^4 \delta_{3k} = -134.4190$$

$$\sum_{k=1}^4 \delta_{4k} = -60.8709$$

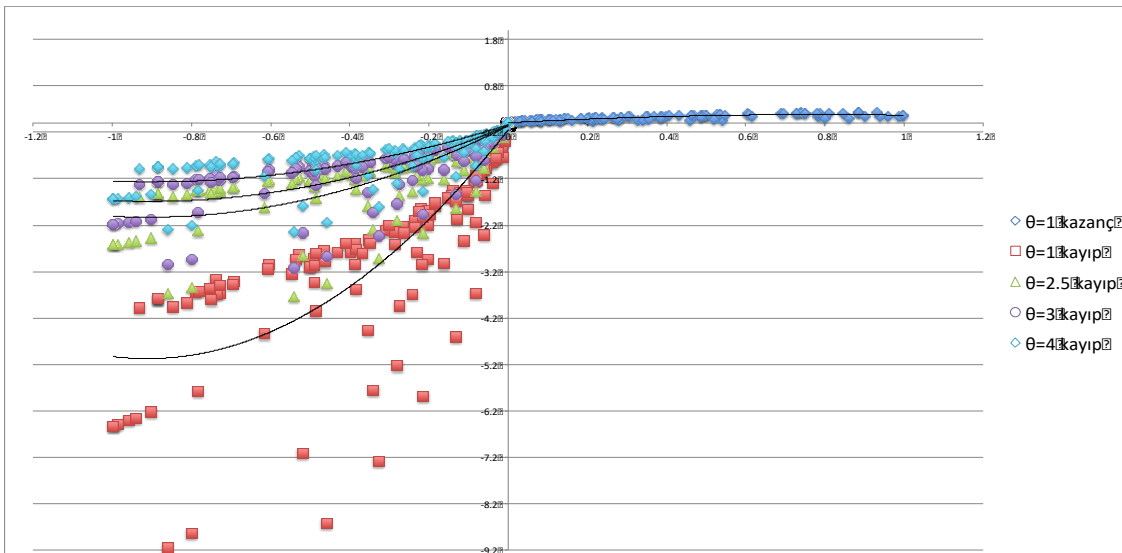
Bu değerler Denklem (23)'deki formüle yerleştirilir.

$$\xi(GE) = [(-57.6549) - (-134.4190)] / [(-57.6549) - (-134.4190)] = 1$$

$$\xi(RE) = 0.3055, \quad \xi(HE) = 0 \text{ ve } \xi(LFG - E) = 0.9581$$

Bu sonuçlara göre $\theta = 1$ için güneş enerjisi birinci, çöp gazı enerjisi ikinci sırada yer alarak onları sırasıyla rüzgar enerjisi ve hidroelektrik enerji takip etmiştir.

$$GE > LFG - E > RE > HE.$$



Şekil 4. TODIM uygulaması değer fonksiyonu

5.8. TODIM Duyarlılık Analizi

Farklı durumların sonuçlara etkisini gözlemlemek amacıyla θ parametresi üzerinde duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 6 farklı θ değerleri için elde edilen sonuç değerlerini, Tablo 7 ise alternatiflerin sıralamalarını göstermektedir. Bu sıralamalar $\theta = 3'$ ken değişiklik göstermiş ve LFG-E ile GE sıralamada yer değiştirmiştir.

Önerilen θ değer aralığı 2 ve 2.5 arasındadır (Krohling ve Souza, 2012). Bu durumda enerji yatırımcıları $\theta = 2.5$ için oluşan sıralamayı tercih edebilirler. Diğer taraftan riskten büyük oranda kaçınmak isteyen yatırımcılar $\theta = 3$ ya da $4'$ de yer alan sıralamayı baz alabilir.

	$\theta = 1$	$\theta = 2.5$	$\theta = 3$	$\theta = 4$
$\xi(GE)$	1	1	0,3068	0,9856
$\xi(RE)$	0,3055	0,2948	0,0255	0,2809
$\xi(HE)$	0	0	0	0
$\xi(LFG - E)$	0,9581	0,9873	1	1

Tablo 6: Farklı θ değerleri için alternatiflerin sonuç değerleri

θ değerleri	Sıralamalar
$\theta = 1$	$GE > LFG - E > RE > HE$
$\theta = 2.5$	$GE > LFG - E > RE > HE$
$\theta = 3$	$LFG - E > GE > RE > HE$
$\theta = 4$	$LFG - E > GE > RE > HE$

Tablo 7: θ değerlerine göre alternatiflerin sıralaması

Şekil 4'te ortaya çıkan grafik beklenti teorisinin 5 şekil grafiğiyle aynı karakteristik özelliklere sahiptir.

Bu grafikte kazanç tarafında x-ekseni gerçek kazancı, y-ekseni o kazancın etkisini gösterir. Benzer şekilde grafiğin kayıp tarafında x-ekseni gerçek kaybı, y-ekseni o kaybın etkisini gösterir. Kazanç ve kaybın gerçek değerleri Denklem (14) ve (15)'de, bunların etkileri Denklem (19) ve (20)'de belirtilen ölçümlerle ifade edilir. Grafik incelendiğinde kayıpların etkisinin kazançlardan daha fazla olduğunu görebiliriz. Bu fark θ değeri arttıkça azalır çünkü daha önce de belirtildiği gibi daha büyük θ değeri risk açısından daha güvenli sonuçlar verir.

6. Sonuçlar ve Tartışmalar

Bu çalışmada sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji alternatifleri, enerji yatırımcılarına bir referans olması amacıyla bulanık TODIM metodu uygulanarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme işleminin ilk aşamasında değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Bu adımda yazında sıklıkla kullanılan kriterler (teknik verimlilik, yatırım maliyeti vb.) seçildiği gibi nadiren kullanılan (devlet destek oranı) ve kendi oluşturduğumuz kriterler (bakım onarım maliyeti yıllık artış oranı) yer almıştır. Karar vericiler kriter ağırlıklarını belirlemiş ve bunun sonunda en önemli birinci kriter teknik verimlilik, ikinci kriterde devlet destek oranı, önlenilen sera gazı emisyonu ve ekosisteme etki birlikte yer almış, üçüncü kriter ise yatırım maliyeti olmuştur. Buradan da anlaşılacağı gibi enerji alternatifleri değerlendirmesinde teknik, ekonomik ve çevresel faktörler birlikte önem arz etmektedir, sadece bir alana yönelik analiz yapmak değerlendirmeyi eksik bırakacak ve doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Kriterlerin belirlenmesinden sonraki aşamada ise bulanık TODIM yöntemi uygulanmıştır. Uygulamada farklı θ değerleriyle

farklı sıralama sonuçları ortaya çıkmıştır. θ 1 veya 2.5 olduğu durumlarda en iyi alternatif olarak güneş enerjisi, ikinci olarak LFG enerji ve ardından rüzgar, hidroelektrik enerji gelmiştir. θ 3 veya 4' e eşit olduğunda ilk iki sıralama yer değiştirmiş, en iyi alternatif LFG, ikincisi güneş enerjisi olup diğer sıralamalar aynı kalmıştır. Bu durumda normal şartlar altında en iyi alternatif olarak güneş enerjisi önerilir ancak sonuçlara göre riskten duyulan endişenin yüksek olduğu durumlarda karar vericiler LFG enerjiyi en iyi alternatif olarak değerlendirmelidir. Hidroelektrik enerji tüm sıralamalarda en son sırada yer almıştır. Günümüzde de hidroelektrik santrallerin sürdürülebilirliği tartışma konusudur ve diğer yenilenebilir enerji alternatifleriyle karşılaştırıldığında daha az çevre dostudur. Dolayısıyla bu çalışmada, çevresel kriterlerde düşük performans değerlerine sahip olup, sıralamalarda sonda yer almasının sebebinin bunlar olduğu düşünülmektedir.

Turgut ve Tolga (2017) bu dört enerji alternatifini bir başka ÇÖKV tekniği olan bulanık VIKOR yöntemiyle değerlendirmiştir. Çalışmalarında alternatiflerin sıralamasını LFG>GE>RE>HE olacak şekilde elde etmişlerdir. VIKOR yönteminde oluşturulan çözüm kümesine dört alternatiften hepsi dahil olmuş ve alternatiflerin birbiri üzerinde kabul edilebilir bir avantajı olmadığı, dolayısıyla alternatiflerden birini veya diğerini seçmek arasında önemli bir fark olmayacağı sonucu ortaya çıkmıştır. Oysa TODIM metodunda bu durum farklılık gösterir. Alternatifler, θ parametresi değerinin değişimlerine duyarlılık göstermiş ve değerler değiştikçe sıralama da değişmiştir. Bu nedenle alternatifler arasında anlamlı bir fark oluşmuştur. VIKOR yöntemi risk faktörünü değerlendirme işlemine katmaz ve uzaklık tabanlı, alternatifleri ideale yakınlığa göre sıralayan bir yöntemdir. Bu durumda, değerlendirme işleminde alternatiflerin birbirlerine göre olan konumları göz ardı edilir. TODIM tekniği risk faktörünü içeren, ikili karşılaştırmalarla sonuca giden bir ÇÖKV yöntemidir. Bu durum bize alternatifler üzerinde detaylı inceleme yapma imkanı sunar. Örneğin; güneş enerjisi ile rüzgar enerjisini yıllık gelir bakımından spesifik olarak, kısmi baskınlık matrislerine bakarak karşılaştırabiliriz.

Gelecek çalışmalar için aynı çalışma bölgesel olarak yürütülebilir. Örneğin; Ege Bölgesi için en iyi sürdürülebilir ve yenilenebilir enerjiyi bulmak daha isabetli sonuçlara götürebilir. Ayrıca farklı ÇÖKV teknikleri ve farklı bulanık sayılar kullanılarak sonuçlar karşılaştırılabilir ve elde edilen çözüm iyileştirilebilir.

Kaynakça

- Abdel-Kader, M.G. and Dugdale, D. (2001). Evaluating investments in advanced manufacturing technology: a fuzzy set theory approach. *Br. Account. Rev.* 33, 455-489
- Adalı, E.A. (2016). Todim Method For The Selection Of The Elective Courses. *European Scientific Journal*, 314-324
- Araujo, R.M. (2015). Multicriteria Classification with TODIM-FSE. *Procedia Computer Science*, 55, 559-565
- Chang, T. H. (2014). Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan. *Information Sciences* : 271 : 196-2
- Chen, S. J., Hwang, C. L., Hwang, F. P. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*, Berlin: Springer-Verlag, pp. 88-89
- Ekhtiari, M., Yadegari, E., Sadidi, G. (2016). Ranking entrepreneurship main risks in non-profit financial funds by todim technique under grey conditions (a case study in Iran). *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 50(3), 319-336

- European Environment Agency. (1999). Environment in the European Union at the turn of the century: Summary. pp. 1-43
- Gao, S., Zhang, Z., Cao, C. (2009). Multiplication Operation on Fuzzy Numbers. *Journal Of Software* :4(4): 331-338
- Gomes, C.F.S., Gomes, L.F.A.M., Maranhao, F.J.C. (2010). Decision analysis for the exploration of gas reserves: merging todim and thor. *Pesquisa Operacional*, 30(3), 601-617
- Gomes, L.F.A.M. and Lima M.M.P.P. (1992). From modeling individual preferences to multicriteria ranking of discrete alternatives: A look at Prospect Theory and the additive difference model, *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 17(3),171– 184
- Gomes, L.F.A.M. and Rangel, L.A.D. (2009). An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties. *European Journal of Operational Research*,193, 204–211
- Gomes, L.F.A.M., Machado, M.A.S., Santos, D.J., Caldeira, A.M. (2015). Ranking of Suppliers for a Steel Industry: A Comparison of the Original TODIM and the Choquet-extended TODIM Methods. *Procedia Computer Science*, 55, 706-714
- Gürbüz, Ö. Türkiye kömür sevdası yüzünden tarihi fırsatı kaçırıyor. [Online]. Available: <http://www.bbc.com/turkce/haberler-turkiye-40565449>, [Accessed: 11-Jul-2017]
- Hanine, M., Boutkhoum, O., Tikniouine, A., Agouti, T. (2016). Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TODIM methods for land fill location selection. *SpringerPlus* :5: 1-30
- Henley, B. and Abram, N. This is what ancient, 3km long ice cores tell us about climate change.[Online]. Available: <https://www.weforum.org/agenda/2017/06/800-000-years-of-climate-change-in-3-minutes>, [Accessed: 19-Jun-2017].
- Kahneman, D. and Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica* :47(2) : 263-291
- Krohling, R.A. and Souza, T.T.M. (2012). Combining prospect theory and fuzzy numbers to multi-criteria decision making. *Expert Systems with Applications* :39: 11487–11493
- Krohling, R.A., Pacheco, A.B.C., Siviero, A.V.T. (2013). IF-TODIM An intuitionistic fuzzy TODIM to multi-criteria decision making. *Elsevier Knowledge-Based Systems*, 53, 142-146
- Li, M., Wu, C., Zhang, L., You, L.N. (2015). An intuitionistic fuzzy-todim method to solve distributor evaluation and selection problem. *Int j simul model*, 14(3), 511-524
- Liu P. and Teng, F. (2014). An Extended TODIM Method for Multiple Attribute Group Decision-Making Based on 2-Dimension Uncertain Linguistic Variable. *Wiley Online Library*, 21(5), 20-30
- Lourenzutti, R. and Krohling, R.A. (2013). A study of TODIM in a intuitionistic fuzzy and random environment. *Expert Systems with Applications*, 40(16), 6459-6468
- Lowe, J. A., Huntingford, C., Raper, S.C.B., Jones, C.D., Liddicot, S. K. and Gohar, L. K. (2009). How difficult is it to recover from dangerous levels of global warming?. *IOPScience Environmental Research Letters* :4 :1-9
- Nobre, F.F., Trotta, L.T.F., Gomes, L. F. A. M.,(1999). Multi-criteria decision making - An approach to setting priorities in health care . *Statistics in Medicine*:18(23): 3345-3354
- Opricovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert System with Applications* :38 (10): 12983-12990
- Qin, Q., Liang, F., Li, L., Wei, Y. (2017). Selection of energy performance contracting business models: A behavioral decision-making approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 422-433
- Qin, Q., Liang, F., Li, L., Wei, Y., Yu, G. F. (2017). A TODIM-based multi-criteria group decision making with triangular intuitionistic fuzzy numbers. *Applied soft computing*, 55, 93-107
- Qin, Q., Liang, F., Chen, Y.W., Yu, G.F. (2017). A TODIM-based multi-criteria group decision making with triangular intuitionistic fuzzy numbers. *Applied Soft Computing*: 55 : 93–107
- Rangel, L., Gomes, L., Cardoso, F. (2011). An Application Of The TODIM Method To The Evaluation Of Broadband Internet Plans. *Pesquisa Operacional* . :31(2): 235-249
- Ren, P., Xu, Z., Gou, X. (2016). Pythagorean fuzzy TODIM approach to multi-criteria decision making. *Applied Soft Computing*, 42, 246-259

- Ruzgys, A., Volvačiovas, R., Ignatavičius, C., Turskis, Z. (2014). Integrated evaluation of external wall insulation in residential buildings using SWARA-TODIM MCDM method. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20 (1), 103-110
- Sen, D. K., Datta, S., Patel, S. K., Mahapatra, S.S. (2016). Fuzzy-TODIM for Industrial Robot Selection. *International Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering*. 1-8
- Tasri, A. and Susilawati, A. (2014). Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* :7: 34-44
- Tosun, Ö. and Akyüz, G. (2015). A fuzzy TODIM approach for the supplier selection problem. *International Journal of Computational Intelligent Systems*. :8(2): 317-329
- Turgut, Z. K. and Tolga, A. Ç. (2017). Sustainable and Renewable Energy Power Plants Evaluation by Fuzzy VIKOR Technique. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2017, Hong Kong*, 774-779
- TÜİK (2017). Seragazi Emisyon İstatistikleri, 1990-2015. Available: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24588>
- Yanwei, L., Yuqing, S., Peide, L. (2015). An Extended TODIM Method for Group Decision Making with the Interval Intuitionistic Fuzzy Sets, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-9
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control* :8,:338-353
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information Sciences* :8: 199-249
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill
- Zhang, X. and Fan, Z. P. (2011). A method for linguistic multiple attribute decision making based on TODIM. *International Conference on Management and Service Science*. 1-4.