



APPLICATION OF FUZZY TOPSIS METHOD IN EVALUATION OF SOLAR ENERGY SYSTEM INVESTMENT ALTERNATIVES

Murat Burak KURT* **Yusuf Sait TÜRKAN****

*Tradesoft, ARI 2 Teknokent İTÜ Ayazağa Kampüsü, burakk@tradesoft.com.tr, ORCID:0000-0003-4598-4130

**Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, ysturkan@iuc.edu.tr, ORCID:0000-0001-7240-183X

Received Date: 10.08.2022 Revised Date: 05.10.2022 Accepted Date:02.11.2022

Copyright © 2022 Murat Burak KURT, Yusuf Sait TÜRKAN. This is an open access article distributed under the Eurasian Academy of Sciences License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT

Solar energy systems have an important place in renewable energy systems. In Turkey, which has a sunny weather most of the year, many companies invest in solar energy systems both for reducing energy costs and for a sustainable world. The decision invest in these systems often requires consideration of many criteria. This study includes the evaluation of alternative solar energy system investments in a company. In the study, first the decision criteria were determined and then the company's current energy system and two different solar energy system investments were compared with the Fuzzy TOPSIS method. The findings obtained in this application have revealed that solar energy system investments provide significant advantages to meet the company's energy, and will also contribute to the reduction of greenhouse gas emission.

Keywords: Solar Energy Systems, Investment Decisions, Fuzzy TOPSIS Method, Fuzzy Decision Making, Photovoltaik System, Sustainability

BULANIK TOPSİS UYGULAMASI İLE GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİ YATIRIM ALTERNATİFLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Güneş enerjisi sistemleri (GES), yenilenebilir enerji sistemleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Yılın büyük bölümünde güneşli bir havaya sahip olan Türkiye'de birçok firma hem enerji maliyetlerini azaltmak hem de sürdürülebilir bir dünya için güneş enerjisi sistemlerine yatırım yapmaktadır. Bu sistemlere yatırım kararı çoğu zaman birçok kriterin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu çalışma, bir firmada gerçekleştirilecek alternatif güneş enerjisi sistemi yatırımlarının değerlendirilmesini kapsamaktadır. Çalışmada ilk olarak karar kriterleri belirlenmiş ve sonrasında bulanık TOPSIS metodu ile firmanın mevcut enerji sistemi ile iki farklı güneş enerjisi sistem yatırımını karşılaştırılmıştır. Uygulama sonunda elde edilen bulgular, güneş enerjisi sistemi yatırımlarının firma enerjisini karşılamaya yönelik önemli avantajlar sağladığını, ayrıca sera gazı emisyonunun azaltılmasına da katkı sağlayacağını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerji Sistemleri, Yatırım Kararları, Bulanık TOPSIS Yöntemi, Bulanık Karar Verme, Fotovoltaik Sistem, Sürdürülebilirlik



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte son yüzyılda enerji ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik kullanılan fosil yakıtlar çevreye çok büyük zararlar verdiği gibi gelecek nesillerin ihtiyaç duyabileceği kaynakları da riske atmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları, yaşadığımız dünyayı ve gelecek nesilleri önemseyen herkes için problemlere bir çözüm teşkil etmektedir. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynakları bakımından uygun bir coğrafi konuma ve iyi bir potansiyele sahip olmakla beraber genel olarak enerji kaynakları yönünden kendine yeterli olmayıp, enerji olarak dışa bağımlı bir ülkedir (Erdoğan, 2020). Enerjideki dışa bağımlılık Türkiye ekonomisinde cari açığa sebep olmaktadır. Cari açığın temelini, toplam enerji ithalatının yüksek olması ve bu bundan dolayı da döviz giderlerinin artması oluşturmaktadır (Eroğlu vd., 2017).

Furuncu (2020) yaptığı çalışmada güneş enerjisi sistemleri (GES) ve rüzgâr enerji santrallerinin (RES) enerji üretiminde önemli bir yere sahip olduğunu göstermiştir. 2019'da Türkiye'nin enerji kurulu gücü yaklaşık olarak 90 bin megavata (MW) ulaşmıştır. Bu enerji kurulu gücün yarısına yakın bir kısmı yenilenebilir enerji kaynağı oluşturur. Bunun yaklaşık olarak da %15'i GES ve RES'ten sağlanmaktadır. 2018 ve 2019 yenilenebilir enerji kurulu gücü verileri incelendiğinde güneş, jeotermal ve rüzgâr gücünün 2019 yılında yaklaşık %20'ye yakın büyüdüğü anlaşılmaktadır (Furuncu, 2020).

Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli bakımından avantajlı bir konuma sahiptir. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına göre, Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneş alma süresi 2741 saat, ortalama yıllık toplam ışınım değeri ise 1527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. (Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Türkiye'de 11,6 milyon adet bina bulunmakta olup, bu miktarın yaklaşık %87'si konut nitelikli binalardır. Türkiye'nin bina stokuna her yıl 100.000'den fazla yeni bina eklenmektedir. Bu binaların çatı ve cephelerine önümüzdeki yıllarda büyük miktarlarda güneş enerjisi yatırımlarının yapılabileceği öngörülmektedir (Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı, 2022). Bu kapsamda değerlendirmeye alınabilecek çok farklı çatı alanları bulunmaktadır. Spor salonları, stadyumlar, havalimanları, otoparklar, alışveriş merkezi çatıları, kamu binaları, okullar, fabrika çatıları bunlara örnek olarak verilebilir.

Fotovoltaik (Photovoltaic-PV) güneş enerjisini elektrik akımına dönüştürmeye yarayan teknolojidir. Bu sistemin modüler bir sistem olması, kolay montajı, sonsuz enerji kaynağının olması, çevreye zarar vermemesi ve yüksek bakım gerektirmemesi gibi avantajları bulunmaktadır. Fakat enerji kaynağının sabit olmaması, maliyetli olabilmesi ve düzensiz enerji kaynağı sistemin dezavantajlarıdır (Ekinci, 2019). Bütün bu durumlar değerlendirildiğinde yine de yenilebilir enerji kaynakları arasında en temiz sistemdir.

Bu çalışmada, bir işletmenin kısmi enerjisini karşılamaya yönelik fotovoltaik güneş enerji sistemi çözüm alternatifleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda işletmenin ihtiyaçları dikkate alınarak mevcut sisteme alternatif iki öneri geliştirilmiştir. İşletmenin ihtiyaçlarına hangi kurulu güçteki güneş enerji sisteminin daha uygun olabileceği, bulanık TOPSIS metoduyla analiz edilmiştir. Çözümler, elektrik ihtiyacını karşılama düzeyi, kurulum maliyet bilgileri gibi dokuz farklı kriter dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca alternatif çözümlerin, doğalgaz kaynaklı sera gazı salınımını (ton CO₂) nasıl etkilediği de hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR

Yenilenebilir sistemler içerisinde önemli bir yere sahip olan fotovoltaik sistemlerin kaynağı güneş enerjisidir. Sistemin en temel parçası elektrik üreten güneş



panelleridir. Fotovoltaik sistemler doğru akım üretir. Kullanım alanlarına göre inventörler yardımıyla dönüştürülerek enerji alternatif akım olarak da kullanılabilir (Messenger ve Ventre, 2004). Fotovoltaik sistemler şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olmak üzere ikiye ayrılır. Sistemlerin kurulum maliyeti ile gücü arasında doğrusal bir ilişki genellikle yoktur. (Biçen, 2018). Bu sistemin maliyeti yararlanılan panel, montaj ekipmanları, inventör, AC ve DC kutuları, aşırı gerilim ve yıldırımdan koruyucu sistemler ile birlikte planlama ve işgücü maliyetleri dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Güneş hücrelerinin diziliş şekline ve alanına göre çeşitli güneş panelleri bulunmaktadır. Mono-kristal, poli-kristal, amorf-silikon yaygın olarak kullanılan güneş panellerindedir. PV çeşitlerinin maliyetleri, verimlilikleri ve enerji yoğunlukları farklılık göstermektedir (Ekici ve Gülten, 2015). Monokristal silisyumdan üretilen güneş panellerinin veriminin laboratuvar şartlarında %24, ticari panellerde %15 üzerinde olduğu belirtilmiştir. Panel ömürlerinin ise 20-25 yıl arasında değiştiği bilinmektedir. Polikristal silisyum güneş panellerinin maliyeti ise daha düşüktür. Verimleri yaklaşık %2-5 daha azdır. Ömürleri ise yaklaşık 20 yıldır.

Binalar için PV panellerinin kapasitesi ve verimlilikleri hesaplanarak uygun bir çözüm geliştirilebilir. Tasarım gerçekleştirilmeden önce enerji gereksinimleri değerlendirilmelidir (Karaca ve Uçar, 2018). Panelden elde edilebilecek enerji miktarı, binanın enlemine ve panelin yüzey ile yaptığı eğim açısına göre değişir (Turhan ve Çetiner, 2012). Paneller uygulanırken güney yönü tercih edilmelidir.

Enerji üretimi yetersiz olan ülkeler için, dışa bağımlılığın azaltılması yönünde geliştirilen politikalar içerisinde güneş enerji sistemleri önemli bir yere sahiptir (İbrahim ve Swief, 2018; Sobhy, vd., 2021). Bu kapsamda, güneş enerji sistemleri içerisinde Fotovoltaik sistemlere yönelik literatürde çok sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Araştırmalar enerji sistemi ile ilgili politika ve düzenlemeler, enerji sistemlerinin teknik boyutları ve verimliliği, yatırımın değerlendirmesi, uygulamada karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri gibi farklı alanlarda gerçekleştirilmiştir.

Fotovoltaik güneş enerji sistemleri kapsamında yapılan çalışmalardan Wiginton ve arkadaşları (2010), bölgesel yenilenebilir enerji politikası için çatı güneş fotovoltaik potansiyelinin ölçülmesine yönelik bir uygulama gerçekleştirmiştir. Li ve arkadaşları (2012) yapmış oldukları araştırmada kurumsal bir binaya ait şebeke bağlantılı PV sistemini ele almışlardır. Çalışmada 2008'den 2009'a kadar Hong Kong'da mevcut güneş radyasyonu ve üretilen çıkış enerjisi ile ilgili teknik veriler sistematik olarak kaydedilmiştir. Sistemin performansı, enerjisi, çevresel ve finansal açılarından incelenmiştir. Bulgulara göre; 2 yıl için ortalama günlük verimlilik %2,3'lük bir standart sapma ile %11,9 olarak ortaya çıkmıştır. Griffiths ve Mills (2016) Birleşik Arap Emirlikleri'ndeki çalışmalarında fotovoltaik sistemlerin enerji sistemindeki potansiyelini ve yerini araştırmışlardır. Goel (2016) Hindistan'daki çatı güneş enerji sistemlerini, mevcut politikalar ve yenilikler kapsamında ele almış, uygulamalardaki güçlükleri ve problemleri incelemiştir. Ayrıca bu sistemlerin geleceğine yönelik bazı değerlendirmeler ve tahminlerde bulunmuştur. Yadav ve Bajpai (2019) ise güneş çatı fotovoltaik sistemlerin ekonomik ve çevresel performanslarını değerlendirmiştir. Performansa etki eden unsurları ortaya koymuş ve bu unsurların etkilerini incelemiştir. Rathore ve arkadaşları (2019) tarafından Hindistan'da gerçekleştirilen çalışmada ise güneş çatı sistemleri incelenmiştir. Bu sistemlerle ilgili problemler ve uygulama güçlükleri son kullanıcıya da dikkate çekerek paylaşılmıştır.

Türkiye'de yapılan çalışmalar incelendiğinde sistemlerin performans değerlendirilmesi ve uygulamalara yönelik çalışmaların ön planda olduğu görülmektedir.



Sağır ve Doğanalp (2016) çalışmalarında enerji kaynakları alternatiflerinin değerlendirilmesinde Bulanık TOPSIS metodunu kullanmışlardır. Bu çalışmada yenilebilir enerji, fosil enerji ve nükleer enerjiye yer verilmiştir. Bulanık TOPIS metodundan yararlanarak karar kriterlerinin önem ağırlıkları belirlenmiş ve farklı enerji kaynakları değerlendirilmiştir. Ekici ve Gülten (2015) ise çalışmalarında Elazığ'ın 38.4° kuzey enleminde bulunan bölgesinde varsayılan binanın teras çatısına kurulacak şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem ile elde edebilecekleri elektrik enerjisi potansiyelini değerlendirmişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre panel eğim açısının yıllık optimum değerlere göre ayarlandığında %5 daha fazla enerji üretiminin olabileceğini, aylık ayarlanmanın pratik olmadığı zamanlarda mevsimlik optimum eğim açısına ayarlanması ile yıllığa göre %3.7 oranında daha fazla elektrik üretimi olabileceğinin mümkün olduğunu ifade etmişlerdir.

Durmaz ve arkadaşları (2017) çalışmalarında Turgutlu ilçesine önceden kurulmuş olan PV sisteminin elektrik enerjisi üretimi ve tarımsal mekanizasyonda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Sonuçlara göre fotovoltaik güneş sisteminin (FVGS) 22 ayda 76757 kWh elektrik enerjisi ürettiği gösterilmiştir. Tutabaşı (2018) yaptığı çalışmada sıcak su ve elektriğe ihtiyaç duyan tüketicilere fotovoltaik, termal sistem ve bunların birleşik kullanımının sistem tasarımını yapmayı ve simülasyon kullanarak üretim değerlerini hesaplamayı hedeflemiştir. Aynı zamanda analizler ile uygun lokasyon tespiti ve Türkiye'deki uygulanabilirliği incelenmiştir. Taşkın ve Vardar (2018) ise çalışmalarında, Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Amfi derslik binasının çatısında, enerjinin tüketildiği yerde üretilmesini amaçlanmıştır. Bu çalışmada PC-SOL yazılımı ile 8 farklı seçenekten oluşan senaryo oluşturulmuştur. En fazla elektrik üretimi temmuzda, en düşük üretimin ise ocak ayında olduğu belirlenmiştir. Güneş paneli sayısı arttıkça iletilen toplam gücün arttığı CO2 emisyonu oranının azaldığı gösterilmiştir.

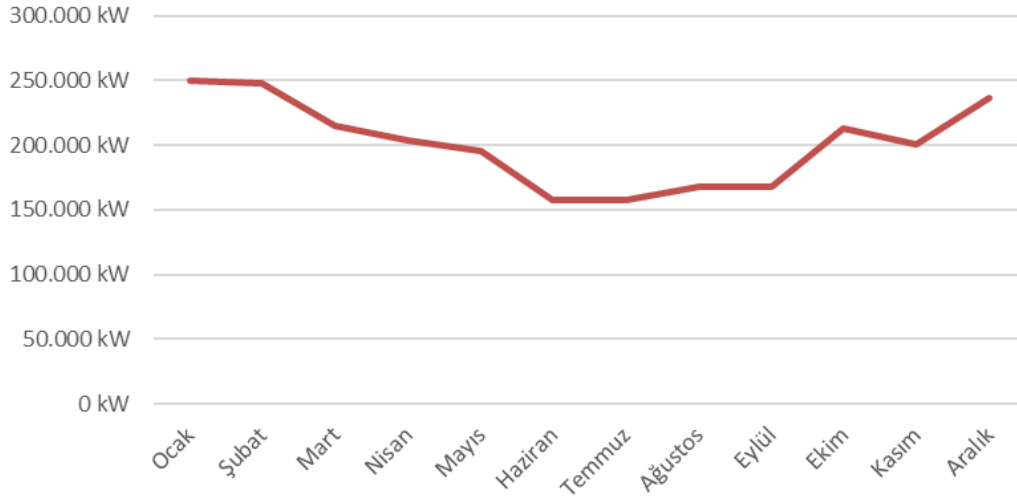
Çelebi (2019) Adıyaman/Kahta ilçesinin güneş enerjisi bakımından yüksek potansiyele sahip olduğunu ifade etmiş, bir fabrika tarafından imal edilen 177 kWp kurulu güce sahip olan endüstriyel çatı üstü güneş enerji santralini incelemiştir. Çalışma enerji kaynaklarının uygulama ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılmasını içermektedir. Duman ve Güner (2020) ise mesken çatı PV sistemlerinin ekonomik analizini, tarife garantisi programı kapsamında incelemişlerdir. Yıldırım ve Aktacir (2021) ise Şanlıurfa kamu binalarının çatıdaki üç farklı PV teknolojisini (mono-Si, p-Si ve CdTe) incelemişlerdir. Güneş enerji potansiyeli verimleri hava sıcaklığı, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı gibi parametreler dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre yıl boyunca ortalama birim alanda, maksimum elektrik enerjisini mono-Si teknolojisi ile sağlanmıştır.

3. PROBLEMİN TANIMI ve KARAR KRİTERLERİ

3.1. Problem Tanımı ve Alternatifler

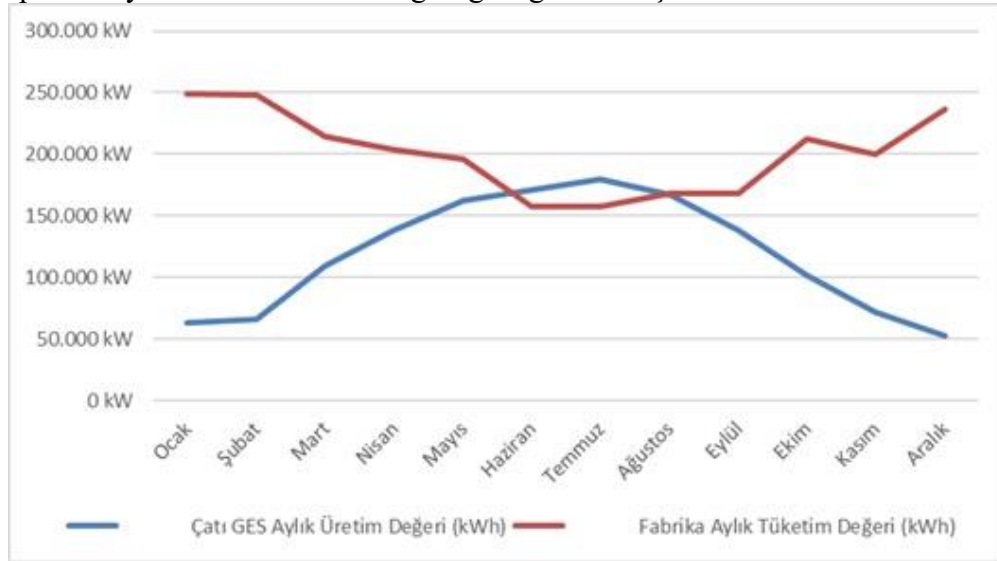
Uygulama, Çorum ilinde makina üretimi konusunda faaliyet gösteren bir firmanın fabrika binasında mevcut sisteme entegre edilecek alternatif güneş enerjisi sistemlerinin, dokuz farklı kriterden oluşan bir karar modeli ile halihazırdaki durum ile karşılaştırılma uygulamasıdır. Buna göre karşılaştırılacak üç alternatif şu şekildedir;

Alternatif 1: Mevcut sistemin devam etmesi durumudur. Mevcut sistemde fabrika ihtiyacı olan tüm elektrik şebekeden tedarik edilmektedir. Fabrikanın yıllık toplam elektrik tüketim değeri 2.412.610 kW'dir. Şekil 1'de fabrikanın aylık tüketim değeri (kWh) verilmiştir.



Şekil 1: Fabrika Aylık Tüketim Değeri (kWh)

Alternatif 2: Mevcut sisteme entegre edilecek kurulu gücü 1.000 kWp'lik güneş enerjisi sistemi yatırımdır. Kurulacak 1.000 kWp'lik güneş enerjisi sistemi ile yılda toplam 1.423.809 kW elektrik üretilmesi beklenmektedir. Haziran ve temmuz aylarında kurulan güneş enerjisi sisteminin fabrikanın ihtiyacından daha fazla elektrik üreteceği düşünülmektedir. Bu dönemde üretilmesi beklenen toplam 36.290 kW elektrik enerjisinin bir kısmının elektrik dağıtım şirketine satılması planlanmaktadır. Şekil 2'de fabrikanın 1.000 kWp GES aylık tahmini üretim değeri grafiği verilmiştir.



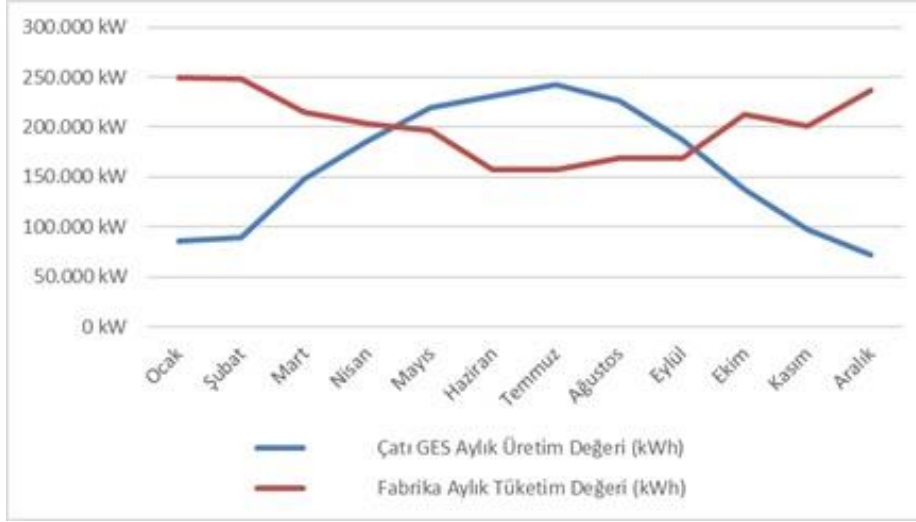
Şekil 2. 1.000 kWp GES Aylık Üretim ve Fabrika Aylık Tüketim Değerleri (kWh)

1.000 kWp GES için yatırım tutarı 975.000 \$ olup tasarruf edilen üretim 125.837 \$'dır. Tasarruf edilen üretim bedelinin yatırım tutarına bölünmesiyle amortisman süresi 7,75 yıl olarak hesaplanmıştır.

Alternatif 3: Mevcut sisteme entegre edilecek kurulu gücü 1.350 kWp'lik güneş enerjisi sistemi yatırımdır. Kurulacak 1.350 kWp'lik güneş enerjisi sistemi ile yılda toplam 1.922.143 kW elektrik üretilmesi beklenmektedir. Mayıs, haziran, temmuz, ağustos ve eylül aylarında kurulan güneş enerjisi sisteminin fabrikanın ihtiyacından daha



fazla elektrik üretmesi beklenmektedir. Bu dönemde üretilmesi beklenen toplam 258.294 kW elektrik enerjisinin, elektrik dağıtım şirketine satılması planlanmaktadır. Şekil 3’de fabrikadaki 1.000 kWp GES aylık üretim değeri grafiği verilmiştir.



Şekil 3. 1.350 kWp GES Aylık Üretim ve Fabrika Aylık Tüketim Değeri (kWh)

1.350 kWp GES için yatırım tutarı 1.316.250 \$ olup tasarruf edilen üretim 150.898 \$’dır. Bu bilgilere göre amortisman süresi tahmini 8,72 yıldır.

3.2. Karar Kriterleri

Uygulamada, Sağır ve Doğan’ın (2016) çalışmalarında belirlemiş oldukları karar kriterlerinden, güneş enerji sistemi çalışması için uygun olanlar belirlenmiştir. Bu süreçte alanında uzman 4 akademisyen karar verici olarak rol almıştır. Çalışmada yer alan 9 karar kriteri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Karar Kriterleri

Kodu	Karar Kriteri	Karar Kriteri
C1		Güvenilirlik
C2		Rezerv Miktarı
C3		Maliyet
C4		Enerji Miktarı
C5		İklim Değişimine Etkisi
C6		Sürdürülebilirliğe Katkı
C7		Hükümet Politikalarınca Destek
C8		Ülke Ekonomisi Açısından Taşıdığı Önem
C9		Basitlik.

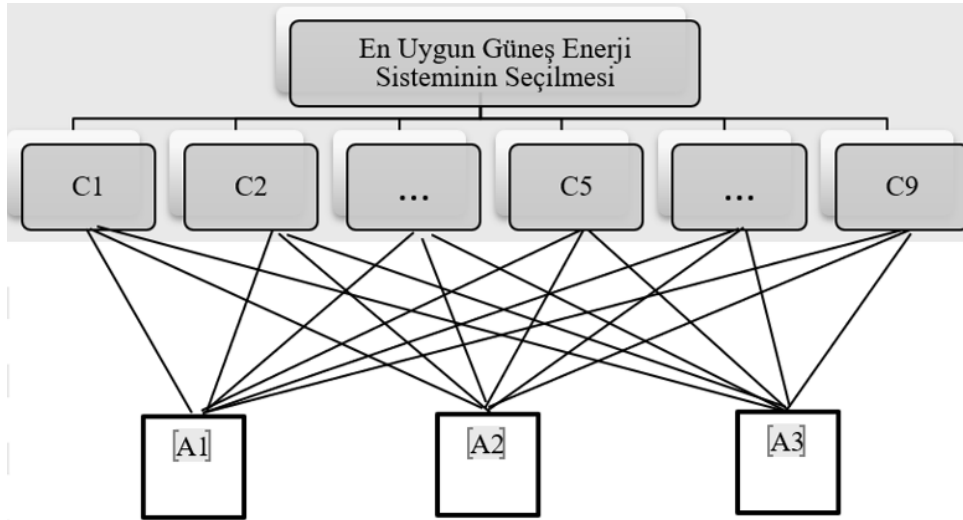
Karar kriterlerinden güvenilirlik, enerji kaynağının sürekliliği ve ihtiyaç duyulduğu anda kesintisiz temin edilebilmesidir (Sağır ve Doğanalp, 2016). Enerji arz güvenliği, ülkenin ekonomik gelişimini ve ulusal güvenliğini etkileyen önemli bir kavramdır. Kısacası her ülke güvenilir, temiz, ucuz ve kesintisiz farklı kaynaklardan enerji temin edebilmelidir. Türkiye’nin enerji arz güvenliği için enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve üretimin artması gerekmektedir (Çalışkan, 2009).



İkinci kriter olan rezerv miktarı enerji kaynağının kullanılabilirliği potansiyeli iken, üçüncü kriter maliyet, seçilen kaynaktan enerji elde etmek için gereken bedeldir (Sağır ve Doğanalp, 2016). Çalışmada yatırım maliyeti de hesaplama dahil edilmiştir. Enerji kaynağının yıllık üretim kapasitesi, enerji miktarı olarak ifade edilen kriter ile belirtilmiştir. İklim değişimine etki, son zamanlarda küresel ısınma sorunuyla beraber çok önemli bir değerlendirme kriteri haline gelmiştir. Sürdürülebilirliğe katkı kriteri, sürdürülebilirlik altındaki tüm boyutları kapsamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma, gelecekteki nesillerin taleplerini karşılama imkanını ortadan kaldırmadan, şimdiki nesillerin ihtiyaçlarını karşılamaktır (Dinçer ve Karakuş, 2020). Bu durumda yenilebilir enerji yatırımları sürdürülebilirliğe katkı sağlamalıdır.

Hükümet politikalarınca destek kriteri, alternatif çözümlere ait finansal ve diğer alanlardaki destekleri ifade etmektedir. Güneş enerji sistemleri ülkemizde desteklenen bir yatırımdır. Sekizinci kriter olan ülke ekonomisi açısından taşıdığı önem direkt firma ile ilişkili olmasa da dolaylı kazanımları içermektedir. Ülkeye olan katkı topluma ve ticarete de yansacaktır. Güneş enerji sistemleri enerji konusunda dışa bağımlılığı azalttığı için önem taşımaktadır. Son kriter olan basitlik kriteri, enerji sisteminin kurulumunun ve işletiminin kolay ve kullanıcı dostu olmasını ifade etmektedir.

Çorum ilinde bir fabrika enerji sistemine entegre edilecek en uygun güneş enerjisi sistemi karar probleminin hiyerarşik yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



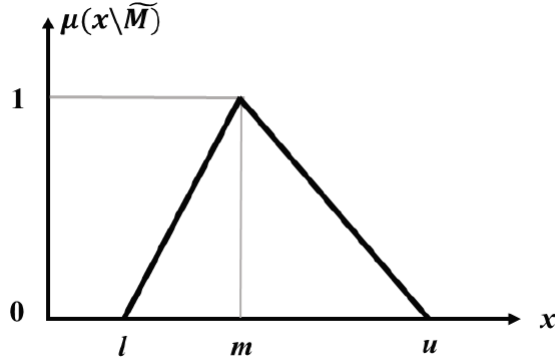
Şekil 4. Karar Problemi Hiyerarşik Yapısı

4. YÖNTEM

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi, Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilmiştir. Bu yöntemin temel prensibi, pozitif ideal çözüme (PIS) en yakın uzaklığa, negatif ideal çözüme (NIS) en fazla uzaklığa sahip olan alternatifin seçimine dayanmasıdır. Fayda kriteri maksimize edilirken, maliyet kriterinin minimize edilmesine pozitif ideal çözüm denmektedir. Bunun tam tersi çözüm ise negatif ideal çözüm olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada Bulanık TOPSIS yönteminden yararlanılmıştır. Tercihler ve insan düşünceleri belirsizdir ve bu yargıları kesin sayısal değerler ile ifade etmek yerine dilsel değişkenler ile değerlendirmek daha doğru olabilir. Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) yöntemi, dilsel değişkenlerin bulanık sayı karşılığının kullanılması bakımından TOPSIS'ten ayrılır



(Sağır ve Doğanalp, 2016). Yöntemde bulanık kümelerden yararlanılmaktadır. Bulanık üye fonksiyonları çok farklı şekillerde olabilir. Fakat genellikle üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bir üçgensel bulanık sayı (l,m,u) şeklinde ifade edilir. Bunlar Şekil 5'te de gösterildiği üzere, bir durumdaki en düşük değer "l" (lower), net değer "m" (middle) ve en yüksek değer "u" (upper) olarak gösterilir (Karakul, 2020).



Şekil 5. Üçgensel Bulanık Sayı (Karakul, 2020)

Karar vericilerin yapmış olduğu dilsel değerlendirmeler için kullanılan gösterimler Tablo 2'de, alternatiflerin karşılaştırılmasında kullanılan dilsel ifadeler ise Tablo 3'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kriterlerin Önem Ağırlıkları için Kullanılan Dilsel Değişkenler ve Bulanık Karşılıkları (Chen, 2000)

Dilsel İfade	Bulanık Gösterim
Çok Düşük (ÇD)	(0,0,0.1)
Düşük (D)	(0,0.1,0.3)
Orta Düşük (OD)	(0.1,0.3,0.5)
Orta (O)	(0.3,0.5,0.7)
Orta Yüksek (OY)	(0.5,0.7,0.9)
Yüksek (Y)	(0.7,0.9,1.0)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.9,1.0,1.0)

Tablo 3. Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Dilsel İfadeler ve Üçgen Bulanık Karşılıkları (Chen,2000)

Dilsel İfade	Bulanık Gösterim
Çok Kötü (ÇK)	(0,0,1)
Kötü (K)	(0,1,3)
Orta Kötü (OK)	(1,3,5)
Orta (O)	(3,5,7)
Orta İyi (Oİ)	(5,7,9)
İyi (İ)	(7,9,10)
Çok İyi (Çİ)	(9,10,10)



Çalışmada Chen (2000) tarafından geliştirilen bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Yöntem adımları şu şekildedir;

x_{ij}^K i. alternatifin j kriterine göre değerini göstermek üzere, K tane karar vericiden oluşan bir grupta, alternatiflerin kriter değerleri,

$$x_{ij} = \frac{1}{K} [x_{ij}^1(+), x_{ij}^2(+), \dots, x_{ij}^K] \quad (1)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

w_j^K j. karar kriterinin önem ağırlığını göstermek üzere, K tane karar vericiden oluşan bir grupta karar kriterlerinin önem ağırlıkları,

$$x_{ij} = \frac{1}{K} [w_j^1(+), w_j^2(+), \dots, w_j^K] \quad (2)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Bir bulanık çok kriterli karar verme probleminin matrisi olarak gösterimi şu şekildedir;

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} & W = [w_1 & w_2 & \dots & w_n] \end{matrix} \quad (3)$$

Burada x_{ij} ($\forall i, j$) ve w_j $j=(1,2,\dots,n)$ dilsel değişkenler olmak üzere, A_1, A_2, A_m karar vericilerin aralarında seçim yaptıkları alternatifleri; C_1, C_2, \dots, C_n alternatiflerin performanslarının ölçüldüğü karar kriterlerini; x_{ij} A_i alternatifinin C_j kriterine göre değerini w_j ise C_j kriterinin ağırlığını göstermektedir. Bu dilsel değişkenler $x_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ ve $w_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$ şeklinde üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilebilmektedir. D matrisine bulanık karar matrisi, W matrisine ise bulanık ağırlıklar matrisi denir.

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, r_{ij}

$$r_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B, c_j^* = \max c_{ij}, \quad (5)$$

ya da

$$r_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), j \in C, a_j^- = \min a_{ij}, \quad (6)$$

B ve C sırasıyla fayda ve maliyet kriter kümesini göstermektedir. Normalize edilmiş bulanık karar matrisi, karar kriterinin fayda kriteri olması durumunda her sütundaki elemanların, bu sütundaki elemanların üçüncü bileşenleri bazında en büyük değere bölünmesi ile elde edilmektedir. Maliyet kriterinde ise her sütundaki ilk elemanların minimum değeri önemlidir. Normalizasyon işlemi sayesinde normalize edilmiş üçgensel bulanık sayılar $[0,1]$ aralığında kalır.

Her bir karar kriterinin farklı ağırlıkları ile ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi



$$V=[v_{ij}]_{m \times n} \quad i=1,2,\dots,m ; j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

şeklinde oluşturulur. Bu kısımda,

$$v_{ij}=r_{ij}(\cdot)w_j \quad (8)$$

eşitliğinden yararlanılır. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi, normalize edilmiş bulanık karar matrisi ile bulanık ağırlıklar matrisinin çarpımıyla bulunur. Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisine göre $V_{i,j}$ için V_{ij} elemanlarının; normalize edilmiş pozitif üçgensel bulanık sayılardır ve $[0,1]$ aralığında bulunur. Bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS)

$$A^*=(v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*), \quad (9)$$

Bulanık negatif ideal çözüm (FNIS)

$$A^-=(v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-), \quad (10)$$

olarak tanımlanır. Burada $v_j^*=(1,1,1)$ ve $v_j^-= (0,0,0)$ 'dır. Karar kriter sayısı kadar $(1,1,1)$ ve $(0,0,0)$ vardır. Her bir alternatifin FPIS ve FNIS'ten olan uzaklıkları sırasıyla,

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^*), \quad i=1,2,\dots,m \quad (11)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^-), \quad i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Burada $d(\cdot, \cdot)$ iki bulanık sayı arasındaki uzaklığı göstermektedir. Vertex Metodu ile hesaplanmaktadır. İki üçgensel bulanık sayı $\tilde{a}=(a_1, a_2, a_3)$ ve $\tilde{b}=(b_1, b_2, b_3)$ olmak üzere bu sayılar arasındaki uzaklığın Vertex ile hesaplanması şu şekildedir;

$$d(\tilde{a}, \tilde{b}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1-b_1)^2 + (a_2-b_2)^2 + (a_3-b_3)^2]} \quad (13)$$

Yakınlık katsayısı,

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. CC_i 1'e yaklaştıkça alternatif bir A_i FPIS'e (A^*) daha yakındır ve FNIS (A^-)'dan daha uzaktır. Bu nedenle, yakınlık katsayısına göre, tüm alternatiflerin sıralama sırası belirlenebilir. Bu durum, alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif çözüme en uzak alternatif olduğunu gösterir. Bu şekilde bir dizi uygulanabilir alternatif arasından en iyisi seçilebilir.

5. UYGULAMA

Tesis edilecek güneş enerji sistemleri ve mevcut durumun karşılaştırmasına yönelik karşılaştırmalar dört uzman tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kriterlere yönelik dilsel değerlendirmeler Tablo 4'de verilmiştir.



Tablo 4. Kriterlerin Önem Ağırlığı İçin Yapılan Dilsel Değerlendirmeler

Kriter (C)	Karar Verici (D)			
	D1	D2	D3	D4
C1	ÇY	Y	ÇY	ÇY
C2	ÇY	ÇY	Y	Y
C3	ÇY	ÇY	Y	ÇY
C4	Y	Y	Y	Y
C5	Y	O	O	Y
C6	O	Y	Y	ÇY
C7	O	Y	ÇY	Y
C8	Y	ÇY	ÇY	ÇY
C9	O	O	O	Y

Karar problemindeki, alternatif enerji çözümlerine ait örnek değerlendirmeler Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Karar Vericinin Alternatif Değerlendirmesi Örneği

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
A1	O	K	İ	K	ÇK	ÇK	ÇK	K	İ
A2	Oİ	İ	OK	Oİ	Oİ	Oİ	İ	O	OK
A3	İ	Çİ	K	İ	İ	İ	İ	O	OK

Ağırlıklı normalize edilmiş bulanık karar matrisi (Tablo 6) hesaplandıktan sonra her bir alternatifin Tablo 7’de gösterilen pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklıkları hesaplanmıştır.

Tablo 6. Normalize Edilmiş Bulanık Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	(0.33,0.40,0.46)	(0,0.074,0.20)	(0.99,0.94,0.86)	(0,0.087,0.21)	(0,0,0.074)
A2	(0.55,0.56,0.59)	(0.61,0.66,0.69)	(0.14,0.31,0.43)	(0.58,0.61,0.65)	(0.58,0.61,0.66)
A3	(0.76,0.72,0.66)	(0.70,0.74,0.69)	(0,0.10,0.25)	(0.81,0.78,0.72)	(0.81,0.79,0.74)
	C6	C7	C8	C9	
A1	(0,0,0.074)	(0,0,0.070)	(0,0.14,0.29)	(0.98,0.90,0.81)	
A2	(0.58,0.61,0.66)	(0.70,0.70,0.70)	(0.70,0.70,0.67)	(0.14,0.30,0.41)	
A3	(0.81,0.79,0.74)	(0.70,0.70,0.70)	(0.70,0.70,0.67)	(0.14,0.30,0.41)	

**Tablo 7.** Alternatiflerin FPIS ve FNIS'ten Uzaklıkları

Alternatifler	d*	d ⁻
A1	98,631	46,859
A2	79,928	48,932
A3	80,196	53,488

Tablo 8'da görüldüğü üzere denklem 14 kullanılarak yakınlık katsayıları hesaplanmıştır.

Tablo 8. Yakınlık Katsayıları ve Alternatif Değerleri

Alternatifler	CCi	Sıralama
A1	0,322	3
A2	0,379	2
A3	0,400	1

Elde edilen veriler Tablo 9 yardımıyla değerlendirilmiştir.

Tablo 9. Kabul Koşulları (Özçakar ve Demir, 2011)

Yakınlık Katsayısı	Değerlendirme Durumu
CC _i € [0,0,0.2)	Tavsiye Edilmez
CC _i € [0.2,0.4)	Yüksek risk ile tavsiye edilir.
CC _i € [0.4,0.6)	Düşük risk ile tavsiye edilir.
CC _i € [0.6,0.8)	Kabul edilir.
CC _i € [0.8,1.0)	Kabul edilir ve tercih edilir.

6. SONUÇ

İşletme yapısına entegre edilecek 1.000 kWp ve 1.350 kWp kurulu güçteki güneş panellerinden veya mevcut sistem arasından en mantıklı seçimi yapmak için Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Uygulama neticesinde Tablo 10'da gösterilen yakınlık katsayıları ve alternatif sıralamaları elde edilmiştir.

Tablo 10. Yakınlık Katsayıları ve Alternatif Değerleri

Alternatifler	CCi	Sıralama
A1	0,322	3
A2	0,379	2
A3	0,400	1

Uygulama gerçekleştirilen Çorum'da faaliyet gösteren makina fabrikası için en uygun güneş enerji sisteminin değerlendirilmesi neticesine ilk tercih sırasını 1.350 kWp kurulu güce sahip GES yatırımı almıştır. Sonrasında 1.000 kWp kurulu güce sahip GES yatırımı ikinci sırada yer almış ve mevcut sistem ise en son tercih edilmesi gereken sistem olarak tespit edilmiştir.

İşletmede yapılan inceleme sonunda 2019 yılı verilerine göre elektriğin %19'unun doğalgazdan karşılandığı bilinmektedir. İşletmenin tükettiği enerji toplamı yıllık 2,412610 Gwh'tır. Bu da yaklaşık 0,4584 Gwh elektrik miktarının doğalgazdan



karşılandığını göstermektedir. Mevcut sisteme devam edildiği takdirde işletmenin doğalgazdan kaynaklı ortalama sera gazı emisyonu 228,7 Ton CO₂ olacaktır. 1.350 kWp kurulu güce sahip güneş enerji sistemi kurulduğu takdirde işletme yıllık 1,02509 Gwh enerjiyi elektrik dağıtım şirketinden sağlayacaktır. Bu enerjinin 0,1945 Gwh kısmının doğalgazdan karşılandığı kabul edildiği takdirde doğalgazdan kaynaklanan sera gazı emisyonu ise ortalama 97,19 Ton CO₂ olarak hesaplanmıştır. GES'in tercih edilmesi ile doğalgazdan kaynaklanan işletmenin sera gazı emisyonu %57,51 azaltılabilir. İşletme tükettiği enerjinin %58'ini işletmesine uygun güneş enerji sistemi ile sağlayabilmektedir. Yapılan çalışma ile yapılacak GES yatırımının sadece işletme karlılığına değil aynı zamanda sera gazı emisyon değerlerinin de azalmasına katkı sağlayacağı görülmektedir.

Türkiye'nin elektrik üretiminin yaklaşık %4'ü güneş enerji sistemlerinden elde edilmektedir. Güneş enerjisi potansiyeli bakımından avantajlı bir konuma sahip olan Türkiye'de, güneş enerji sistemi kurulumlarına destek verilmesi durumunda, dış enerji bağımlılığı zamanla ortadan kalkabilecek, cari açığın azalması sağlanacak aynı zamanda bu uygulamada görüldüğü gibi işletmelere de önemli bir katkı sağlanabilecektir.

REFERENCES

- Biçen, T. (2018). *Güneş Panelleri İle Elektrik Üretiminin Teknik Ve Ekonomik Analizi: Bursa Örneği*, Yüksek Lisans, Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment, *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.
- Çalışkan, Ş. (2009). Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılık ve enerji arz güvenliği sorunu, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25, 297-310.
- Çelebi, Ö. (2019). *Endüstriyel Çatı Uygulamalı Bir Güneş Enerji Santralinin Teorik ve Gerçek Zamanlı Enerji Üretim Değerlerinin İncelenmesi ve Ekonomik Analizi*, Yüksek Lisans, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dinçer, H., & Karakuş, H. (2020). Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilir Ekonomik Kalkınma Üzerindeki Etkisi: BRICS Ve MINT Ülkeleri Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz, *ESAM Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(1), 100-123.
- Duman AC, Güler Ö. (2020). Economic analysis of grid-connected residential rooftop PV systems in Turkey. *Renew Energy*;148:697–711.
- Durmaz, F., Akdeniz, R. C., Kömekçi, F. (2017). Fotovoltaik Enerji ile Tarımsal İşletmelerin Enerji Gereksiniminin Karşılabilirliği: Manisa- Turgutlu Örneği, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 13(3), 193-199.
- Ekici, B. B., & Gülten, A., (2015). Elâzığ İli İçin Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Sistemin Performans Analizi, *Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu*, Ankara.
- Ekinci, G., (2019). *PV Sistemlerinin Yaşam Döngüsü, Enerji ve Ekserji Analizi*, Yüksek Lisans, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı. (2020). “*Güneş Enerjisi*” <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> [ziyaret tarihi: 05.11.2022]



- Eroğlu, İ., Çidem, Y., & Yeter, F. (2018). Cari Açık Sorunu Perspektifinde Türkiye'nin Enerji Açığı ve Geleceğe İlişkin Öneriler, *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(13), 106-118.
- Furuncu, Y. (2020). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve RES Ve GES Yatırımları, *SETA Perspektif*, 295, 1-3.
- Goel M. (2016). Solar rooftop in India: Policies, challenges and Outlook. *Green Energy Environ*;1(2):129–37
- Griffiths S, Mills R. (2016). Potential of rooftop solar photovoltaics in the energy system evolution of the United Arab Emirates. *Energy Strategy Rev*, 9 (1):1–7.
- Ibrahim AM, Swief RA. (2018). Comparison of modern heuristic algorithms for loss reduction in power distribution network equipped with renewable energy resources. *Ain Shams Eng J*. 9(4):3347
- Karaca, Ü. B., ve Uçar, S. (2018). Konut Çatı ve Cephelelerinde Farklı Fotovoltaik Sistem Uygulamalarının Değerlendirilmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 65-76
- Kayahan Karakul, A. (2020). Bulanık Ahp Yöntemi İle Yenilenebilir Enerji Kaynağı Seçimi. *Journal Of Social Sciences Institute/Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(19).
- Li, D. H., Cheung, K. L., Lam, T. N., & Chan, W. W. (2012). A study of grid-connected photovoltaic (PV) system in Hong Kong, *Applied Energy*, 90(1), 122-127.
- Messenger RA, Ventre J. (2004). *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press Magazine, USA 2(2).
- Özçakar, N., & Demir, H. (2011). Bulanık Topsis Yöntemiyle Tedarikçi Seçimi, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 22(69), 25-44.
- Rathore P, Chauhan D, Singh R. (2019). Decentralized solar rooftop photovoltaic in India: On the path of sustainable energy security, *Renewable Energy J*,131(c):297–307.
- Sağır, H., & Doğanalp, B. (2016). Bulanık Çok-Kriterli Karar Verme Perspektifinden Türkiye İçin Enerji Kaynakları Değerlendirmesi. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(1), 233-256.
- Sobhy MA, Abdelaziz AY, Hasanien HM, Ezzat M. (2021). Marine predators algorithm for load frequency control of modern interconnected power systems including renewable energy sources and energy storage units. *Ain Shams Eng J*;12(4):3843–57.
- Taşkın, O., Vardar, A. (2018). Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Amfi Çatısının Güneş Elektriği Potansiyelinin Tahminlenmesi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(1), 45-51.
- Turhan, S., Çetiner, İ. (2012). Fotovoltaik Sistemlerde Performans Değerlendirilmesi, *6. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 12-13 Nisan, Bursa, Türkiye, 243-252.
- Tutabaşı, C. C. (2018). *Güneş Enerjisinden Isı ve Elektrik Eldesinin Tekno-Ekonomik Simülasyonu: Örnek Bir Uygulama*, Yüksek Lisans, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi.



- Wiginton LK, Nguyen HT, Pearce JM. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Comput Environ Urban Syst*;34(4):345–57.
- Yadav S, Bajpai U. (2019). Energy, the economic and environmental performance of a solar rooftop photovoltaic system in India. *Int J Sustain Energ*;39:51–66.
- Yıldırım, E., Aktacir, M. A. (2021). Çatı Üstü PV Elektrik Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Şanlıurfa Örneği, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12, 69-77.