

CSP Teknolojisine Sahip Güneş Enerjisi Santrallerinin Kombine ANP-PROMETHEE Yaklaşımı ile Seçimi

Evren Can ÖZCAN

Bakım Yönetim Sistemi Müdürlüğü, Elektrik Üretim A.Ş., 06520, Ankara, TÜRKİYE
enmcan@gmail.com

Nermin AVŞAR ÖZCAN

İş Düzenleme ve Organizasyon Müdürlüğü, Elektrik Üretim A.Ş., 06520, Ankara, TÜRKİYE
nerminavsar.ozcan@euas.gov.tr

Kabul Edilme Tarihi:
09.09.2017

Tamer EREN

Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, 71451, Kırıkkale, TÜRKİYE
teren@kku.edu.tr

Özet

Dünya genelinde birçok ülke ekonomiklik, verimlilik ve çevreye duyarlılık parametrelerini temel alan sürdürülebilir enerji politikalarını küresel olarak güçlerini devam ettirmek ve toplumsal refah düzeyini yükseltmek için uygulamak zorundadır. Elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanımının yaygınlaştırılması ise, bu kaynakların sürdürülebilirliğin söz konusu üç sacayağı üzerindeki kuvvetli etkileri ele alındığında, sürdürülebilir enerji politikalarının yürütülmesinde ülkelere önemli avantajlar sunmaktadır. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynak potansiyeli açısından zengin bir ülkedir ve bu kaynaklar arasında güneş enerjisi yıllık 380 milyar kWh'lik potansiyeli ile ilk sırada yer almaktadır. Tüm zamanların en yüksek enerji kullanım yılı olan 2016'da 278,3 milyar kWh elektrik enerjisi tüketilen Türkiye'de, yüksek potansiyeli ile yıllık toplam enerji tüketimini tek başına fazlasıyla karşılayabilecek güneş enerjisinden bugüne kadar elektrik üretiminde yeterince faydalanılmamıştır. Bu nedenle, Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti güneş enerjisinin elektrik üretiminde giderek daha fazla kullanılmasını sağlamak için bir dizi adım atmıştır. Bu kapsamda bu çalışmada, hükümetin güneş enerjisi ile ilgili stratejik hedefleri referans alınmış ve güneş enerjisinden elektrik üretimini sağlayan Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) teknolojilerinden Parabolik Oluk Kolektör (PTC), Doğrusal Fresnel Reflektör (LFR), Merkezi Alıcı Sistem (Eritilmiş Tuz) (CRS-MS), Merkezi Alıcı Sistem (Kızgın Buhar) (CRS-SHS) ve Parabolik Çanak Sistemleri (PDS) maliyet, sosyal, teknik ve teknoloji başlıklarından oluşan dört ana kriter altındaki on altı alt kriter ile değerlendirilmiştir. Söz konusu kriterler, aralarındaki ilişkilerin dikkate alınmasına olanak sağlayan ANP (Analytic Network Process) yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve bu ağırlıkların literatürde sıklıkla kullanılan ve birçok avantaja sahip bir sıralama algoritması olan PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yönteminde kullanılması ile beş alternatif CSP teknolojisinin Türkiye koşullarında öncelik sıralaması elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CSP teknolojileri, güneş enerjisi, çok kriterli karar verme, ANP, PROMETHEE

Selection of the Solar Power Plants with CSP Technologies by Combined ANP-PROMETHEE Approach

Abstract

Many countries around the world must implement the sustainable energy policies which based on the economical, efficiency and environmental awareness parameters to maintain



their strengths globally and to raise the level of social prosperity. Spreading the use of renewable resources in electricity generation provides significant advantages to the countries for following the sustainable energy policies, when considering the strong impact of these resources on three pillars of sustainability. Turkey is a rich country in terms of renewable energy resource potential, and solar energy ranks the first with a potential of 380 billion kWh per year. Solar energy that can meet the annual total energy consumption exceedingly with high potential by itself, has not been utilized enough to generate electricity in Turkey, where 278.3 billion kWh of electricity is consumed in 2016 is the highest energy utilization year of all time. Therefore, The Government of the Republic of Turkey has taken a series of steps to ensure that solar energy is used more and more in electricity generation. In this context in this study, strategic objectives of the government for solar energy are taken as reference, and Parabolic Trough Collector (PTC), Linear Fresnel Reflector (LFR), Central Receiver System (Molten Salt) (CRS-MS), Central Receiver System (Superheated Steam) (CRS-SHS) and Parabolic Dish Systems (PDS), are the Concentrated Solar Power (CSP) technologies which enable the electricity generation from solar energy, are evaluated with sixteen criteria under the four main criteria consisting the titles of cost, social, technical and technology. These criteria are weighted by the ANP (Analytic Network Process) method, which provides to be considered the relations between them, and priority order of five alternative CSP technologies in Turkey's conditions is obtained by using these criteria in PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) method is an outranking algorithm, often used in the literature and has many advantages.

Keywords: CSP technologies, solar energy, multi criteria decision making, ANP, PROMETHEE

1. Giriş

Dünyada hızla artan nüfus, sürekli gelişen teknoloji, kentsel gelişim ve sanayileşme ile bunlarla ilişkili olarak yaşanan gelir ve ticaret olanaklarındaki artış enerjiye olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA)'nın tahminlerine göre 2014 yılında 13,7 milyar ton eşdeğer petrol (TEP) olan dünya birincil enerji talebinin 2040 yılında mevcut enerji politikaları ile devam senaryosuna göre %43 oranında artışla 19,6 milyar TEP olması öngörülmektedir. Enerji tüketimindeki bu artışa neden olan etkenlerin başında ise nüfus ve gelir artışı gelmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2016, s. 9).

UEA'nın bir başka çalışmasında, 2010-2035 yılları arasında enerji talebindeki artışın %93'ünü gelişmiş ülkelerin oluşturacağı tahmin edilmektedir (Buntaine ve Pizer, 2015, s. 543). Genellikle üye listesi Almanya, Fransa, İngiltere, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gibi dünyanın en büyük ekonomilerine sahip ülkelerden oluşan İktisadi İş Birliği ve Gelişme Teşkilatı (OECD) kurucu üyelerinden olan Türkiye'de de, enerji tüketimi son 10 yılda yaklaşık %60 artış göstermiş olup (Türkiye Elektrik İletim A.Ş. [TEİAŞ], 2016, s. 6), bu dikkate değer artışın devam etmesi beklenmektedir. 2016'da gerçekleşen 278,3 milyar kWh'lik enerji tüketiminin (ETKB, 2017), TEİAŞ tarafından yayımlanan kapasite projeksiyonundaki baz talep senaryosuna göre 2025 yılında %49,8'lik artışla 416,9 milyar kWh seviyesine yükselmesi öngörülmektedir (TEİAŞ, 2016, s. 14).

2015 sonu itibariyle dünyada tüketilen enerjinin %87'si petrol, doğalgaz ve kömür gibi yenilenemeyen fosil kaynaklardan karşılanmış olmakla birlikte (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı [TPAO], 2016), UEA'nın mevcut enerji politikaları ile devam senaryosuna göre bu oranın 2040 yılında %79 seviyesine gerilemesi beklenmektedir (ETKB, 2016, s. 10). Bu beklentinin ana gerekçesi, toplumsal refah düzeyinin ve küresel rekabet gücünün artırılması için verimlilik, ekonomiklik ve çevreye duyarlılık prensiplerinden oluşan sürdürülebilir enerji politikalarını benimseyen ülkelerin, yenilenebilir enerji kaynaklarını elektrik üretiminde daha fazla kullanma çabasıdır. Tüm dünya ile paralel olarak Türkiye de, sahip olduğu yüksek yenilenebilir enerji kaynak potansiyelini mümkün olan en üst seviyede kullanmayı arzulamaktadır ve bu kapsamda, kuruluşunun 100. yılı olan 2023'de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payını en az %30'a yükseltmeyi hedeflemektedir (Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü [YEGM], 2016). Bu hedef, Türkiye'nin sahip olduğu 380 GWh/yıl güneş enerjisi, 144 GWh/yıl rüzgar enerjisi, 140 GWh/yıl hidrolik enerji, 9,3 GWh/yıl biokütle enerjisi ve 4,5 GWh/yıl jeotermal enerji potansiyeli (Özcan, 2013, s. 63) dikkate alındığında rasyonel bir çizgidedir. Bu tip stratejik bir hedefin büyük yatırımları beraberinde getirdiği düşüldüğünde, büyük altyapı yatırımları grubuna giren elektrik üretim santral yatırımlarının çelişen ve/veya ilişkili çok sayıda kriterin dikkate alınarak planlanması Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınması açısından büyük bir öneme sahiptir (Özcan, Ünlüsoy ve Eren, 2017, s. 205).

Yukarıdaki istatistiklerden de görüleceği üzere, güneş enerjisi yıllık 380 milyar kWh'lik potansiyeli ile Türkiye'nin enerji kaynakları arasında ilk sırada yer almaktadır. Oysaki Türkiye'de, bu yüksek potansiyeli ile yıllık toplam enerji tüketimini tek başına fazlasıyla karşılayabilecek (bugüne kadarki en yüksek değer olan 2016 enerji tüketim verisi 278,3 milyar kWh (ETKB, 2017) dikkate alındığında) güneş enerjisinden bugüne kadar elektrik üretiminde yeterince faydalanılmamıştır. Bu nedenle, Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti güneş enerjisinin elektrik üretiminde giderek daha fazla kullanılmasını sağlamak için bir dizi adım atmıştır. Bunlardan en güncel ve dikkat çekici olanı, yatırım tutarının 1,3 milyar doları aşması öngörülen Konya Karapınar 1.000 MW kapasiteli güneş enerjisi santrali yatırımdır.

Bu kapsamda bu çalışmada, Türkiye'de en yüksek potansiyele sahip olan güneş enerjisine, hükümetin 2017'de hızlandırdığı güneş enerjisi ile ilgili stratejik girişimleri de dikkate alınarak odaklanmış ve güneş enerjisinden elektrik üretimini gerçekleştiren ve Fotovoltaik (PV) teknolojiler ile iki ana teknoloji grubundan olan Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (CSP) teknolojilerinden Parabolik Oluk Kolektör (PTC), Doğrusal Fresnel Reflektör (LFR), Merkezi Alıcı Sistem (Eritilmiş Tuz) (CRS-MS), Merkezi Alıcı Sistem (Kızgın Buhar) (CRS-SHS) ve Parabolik Çanak Sistemleri (PDS) teknolojileri maliyet, sosyal, teknik ve teknolojik başlıklarından oluşan dört ana kriter altındaki on altı alt kriter ile değerlendirilmiştir. Problemin büyüklüğü ve çok kriterli yapısı nedeniyle, birbirleri ile etkileşim halinde olan birçok kriter ve alt kriter altında karar

vericilere analitik çözümler üreten yöntemler grubu olarak tanımlanabilecek çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri çalışma kapsamında kullanılmıştır. Söz konusu kriterler, aralarındaki ilişkilerin dikkate alınmasına olanak sağlayan ANP (Analytic Network Process) yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve bu ağırlıkların literatürde sıklıkla kullanılan ve birçok avantaja sahip bir sıralama algoritması olan PROMETHEE (The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yönteminde kullanılması ile beş alternatif CSP teknolojisinin Türkiye açısından yatırım öncelik sıralaması elde edilmiştir.

Çalışma 6 ana bölümden oluşmaktadır. 2. bölümde Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve güneş enerjisi yatırımları CSP teknolojileri ile birlikte sunulurken, literatürde yapılan benzer çalışmalara 3. bölümde yer verilmiştir. Problemin çözümünde kullanılan ÇKKV yöntemlerinin tanıtıldığı 4. bölümün ardından ise, uygulama ve sonuç bölümleri verilerek çalışma tamamlanmıştır.

2. Güneş Enerjisinin Türkiye'deki Durumu ve CSP Teknolojileri

Türkiye elektrik kurulu gücü 2016 yılı sonu itibarıyla 78.538,1 MW düzeyine ulaşmış olup, bu kurulu gücün %54,5'ini doğalgaz (%32,5) ve kömür (%9,5'i ithal) kullanan santraller oluşturmaktadır. Kurulu güçte sadece bu iki fosil yakıtın yüksek payı üretime de yansımış ve 2016 yılında Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin %64,8'i doğalgaz (%32) ve kömürden (%17,4'ü ithal) karşılanmıştır (Elektrik Üretim A.Ş. [EÜAŞ], 2017). Bu da, söz konusu kaynakların tamamının (yerli kömür oranı hariç) ithal edildiği düşünüldüğünde, üretimin sadece kaynak bazlı olarak yarısının dışa bağımlılığını ifade etmektedir. Türkiye'de, 2025 yılında bugüne göre %49,8'lik artışla 416,9 milyar kWh seviyesine yükselmesi beklenen elektrik enerjisi talebi (TEİAŞ, 2016, s. 14) düşünüldüğünde, bu oranın herhangi bir düzenleme yapılmaması halinde artacağı açıktır ve bu duruma engel olmak için yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde kullanımının yaygınlaştırılması bir zorunluluk halini almaktadır.

Bununla birlikte Türkiye, güneş enerjisi (380 GWh/yıl) başta olmak üzere hidrolik (140 GWh/yıl), rüzgar (144 GWh/yıl), biokütle (9,3 GWh/yıl) ve jeotermal (4,5 GWh/yıl) enerjiden oluşan sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarından yıllık olarak yaklaşık 700 milyar kWh enerji üretme potansiyeline sahiptir (Özcan, 2013, s. 63) ve bu potansiyel bugüne kadar ki en yüksek tüketim değeri olan 2016'daki 278,3 milyar kWh'lik değer 2,5 katına karşılık gelmektedir. Buradan hareketle Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarını ekonomiyi kazandırmak ve özellikle kaynak açısından dışa bağımlılığı azaltmak için kuruluşunun 100. yılı olan 2023 için bir vizyon belirlemiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının 2023'de elektrik üretimindeki payını en az %30'a yükseltmeyi hedeflemiştir (YEGM, 2016). Bu hedefin içeriği aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Kaplan, 2015, s. 4):

- Hidrolik santral kapasitesinin 34.000 MW'a ulaşması,
- Rüzgâr santrali kapasitesinin 20.000 MW'a ulaşması,
- Biokütle santral kapasitesinin 1.000 MW'a ulaşması,
- Jeotermal santral kapasitesinin minimum 1.000 MW'a ulaşması,
- Güneş enerjisi santral kapasitesinin minimum 5.000 MW'a ulaşması.

Vizyon 2023'de en dikkat çeken unsurların başında, güneş enerjisi santral yatırımlarının artırılması suretiyle 5.000 MW'lık seviyeye çıkarılması gelmektedir. Çünkü diğer santral alternatiflerinden Türkiye'de hedeflenen değerlere yakın ya da yakın sayılabilecek bir kurulu güç olmasına rağmen (2016 sonu itibariyle, hidrolik-26.721,8 MW, rüzgar 5.738,4 MW, biokütle 467,4 MW, jeotermal 820,9 MW ve güneş 12,9 MW (EÜAŞ, 2017)), güneş enerjisi için mevcut kurulu gücün yaklaşık 388 kat artırılması hedeflenmektedir. Yıllık güneş enerjisi potansiyeli düşünüldüğünde bu hedefin önceliklendirilmesi oldukça makuldür. Bu kapsamda hükümet, yatırım tutarının 1,3 milyar doları aşması öngörülen Konya Karapınar 1.000 MW kurulu güce sahip güneş enerjisi santral yatırım ihalesini Mart 2017 itibariyle tamamlamış ve ilk büyük somut adımı atmıştır.

Türkiye, coğrafi konumu itibariyle güneş açısından oldukça şanslı bir ülkedir. Günlük ortalama 7,5 saatlik (yıllık 2.737 saat) ışıma süresi, güneş enerjisinden yıllık 1.527 kWh/m² (günlük 4,2 kWh/m²) elektrik üretim imkânı vermektedir. Işımanın en yoğun olduğu bölge Güney Doğu Anadolu (günlük ortalama 8,2 saat) iken, en düşük olduğu bölge Batı Karadeniz (günlük ortalama 5,4 saat)'dir (Kaplan, 2015, s. 12). Bununla birlikte, güneş enerjisinden elektrik üretimini gerçekleştiren ana teknoloji grupları olan PV ve CSP teknolojilerinin tüm tipleri Türkiye'de elektrik üretimini mümkün kılmaktadır.

Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisinde kullanımının artırılmasına yönelik olarak geliştirilen Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destek Mekanizması (YEKDEM) kapsamında, kWh başına en yüksek tarifeye sahip enerji türü de güneştir. Güneş enerjisi santralleri için 13,3 \$cent/kWh olan standart tarife, santrallerde kullanılan ekipmanların yerli olması durumunda CSP teknolojileri için 22,5 \$cent/kWh, PV teknolojileri için ise, 20 \$cent/kWh seviyesine çıkmaktadır (Kaplan, 2015, s. 4, 5, 14, 15).

Yukarıda belirtilen tüm bu bilgiler ışığında bu çalışma kapsamında, aşağıda detayları verilen CSP teknolojileri Türkiye'nin güney doğusunda bulunan bir lokasyon için ANP-PROMETHEE kombinasyonu ile sosyal, ekonomik, teknik ve teknolojik kriterler (on altı alt kriter) bazında değerlendirilmiş ve muhtemel yatırımlar için bir öncelik sırası elde edilmiştir.

2.1. CSP teknolojileri

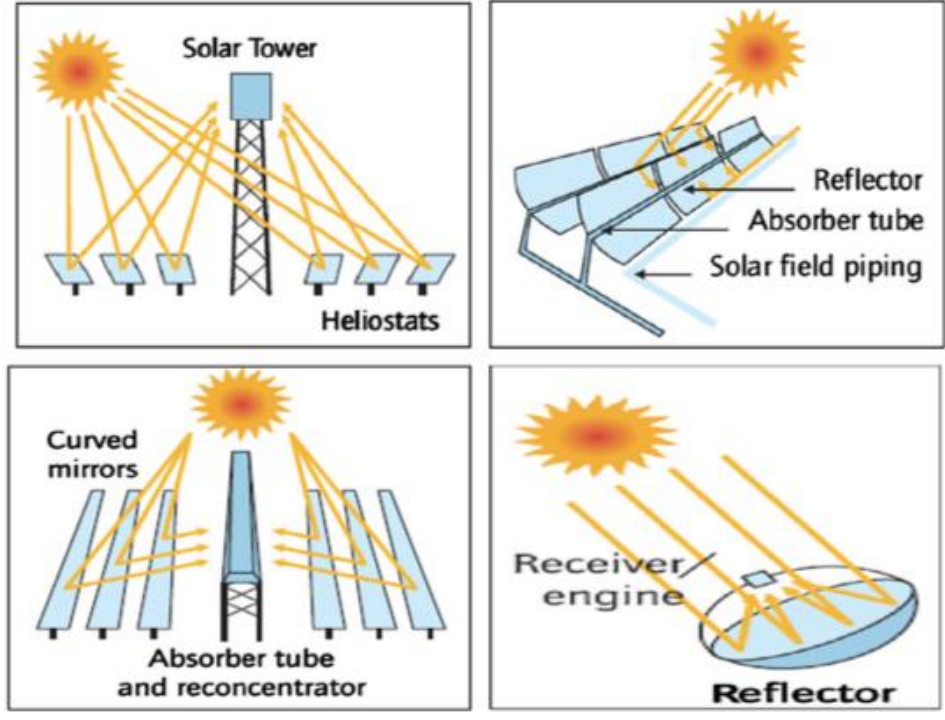
CSP sistemleri, güneşten gelen direkt normal ışınımı (DNI) küçük bir alanda yoğunlaştırarak, oluşan yüksek ısıyı uygun bir termodinamik

çevrim ile sırasıyla mekanik ve elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrik üretim teknoloji grubudur. CSP teknolojilerinin, sürekli açık hava ve bol DNI'nın olduğu orta rakımlı, yarı kurak ve kurak platolarda kullanımı mümkündür (Zhang ve diğerleri, 2013, s. 467; Aydar ve diğerleri, 2010, s. 35). Bu nedenle, dünya genelindeki CSP santrallerinin kapasite artışında ilk üç ülke sırasıyla, DNI'nın bol olduğu alanlara sahip olan Fas, Güney Afrika ve ABD'dir. Bu teknolojileri kullanan santrallerin toplam kapasite açısından sıralamasında ise ilk beş ülke İspanya, ABD, Hindistan, Fas ve Güney Afrika'dır (Karagöl ve Kavaz, 2017, s. 12).

CSP teknolojilerinin kullanımı için temel gereksinimler şu şekildedir (Özcan ve Bulut, 2011, s. 252)

- CSP teknolojileri, DNI olarak adlandırılan direkt güneş ışınımını kullanırlar. DNI, bulutlar ya da atmosferdeki toz, buhar vb. tarafından saptırılmayan ve dünya yüzeyine paralel olarak gelen ışınlardır.
- CSP teknolojileri için uygun olan alanların metrekare başına alması gereken ışınım miktarı (irradiasyon) yıllık olarak en az 2.000 kWh olmalıdır.
- CSP teknolojilerinin kullanımı için büyük miktarda atmosferik nem, toz ve buharın olmadığı kuru yerler uygundur. Bozkırları, yarı çöl ya da çölleri kapsayan 400 kuzey ya da güney enlemlerinden küçük olan alanlar CSP tesislerinin kurulumu için idealdir.
- Konvansiyonel santrallarda olduğu gibi CSP teknolojilerini kullanan tesislerde de su-buhar çevrimi mevcuttur ve ihtiyaç duyulan soğutma hava ile yapılmayacak ise soğutma için bir su kaynağı gereklidir.
- CSP sistemlerini PV sistemlere göre üstün kılan bazı özellikler aşağıda ise verilmiştir (Aydar ve diğerleri, 2010, s. 35, 36):
- Isının kısa süreler için depolanabilmesi suretiyle bulutlu zamanlar, akşam saatleri gibi DNI'nın olmadığı ya da düşük olduğu zamanlarda elektrik üretilebilmesi,
- Elektrik üretiminin yanı sıra, ısı ve desalinasyon (tuzsuzlaştırma) ihtiyaçlarının karşılanması,
- Daha ekonomik ve verimli oluşları,
- Güvenilir ve uzun ömürlü bir teknoloji grubu olması,
- Kanıtlanmış performans ve işletme yönetimi,
- Şebeke kararlılığı,
- Doğalgaz, jeotermal, biyogaz vb. ikinci bir sistemle hibridlenebilirlik.

Günümüzde dört (PTC, CRS, LFR ve PDS-Şekil 1) CSP teknolojisi bulunmaktadır. Bu çalışmanın kapsamında yer alan bu teknolojiler aşağıda kısaca tanıtılmıştır:



Şekil 1. Mevcut CSP teknolojileri (Soldan sağa sırasıyla CRS, PTC, LFR ve PDS) (Zhang ve diğerleri, 2013, s. 469)

Parabolik oluk kolektör (PTC) teknolojisi: PTC teknolojisini kullanan bir santral, parabolik olarak bükülmüş, bir grup yansıtıcı ile parabolün odağında sabitlenmiş ve ışınımın odaklandığı emici tüpler (absorber tubes) içerir. Yansıtıcı ve emici tüpler gündeğümü ile günbatımı arasında güneş ile birlikte hareket ederler. Paralel olarak bağlanmış yansıtıcılar ve emici tüplerden oluşan grup güneş alanı olarak adlandırılır. Tipik olarak emici tüplerin içindeki ısı transfer akışkanı sentetik yağ, eritilmiş tuz ya da sudur. Isınan bu akışkan (sentetik yağ ve eritilmiş tuz) su ile karşılaştırılarak Rankine çevrim sonucunda elektrik enerjisi elde edilir. Teknolojik olgunluk açısından ilk sırada yer almaktadır (Zhang ve diğerleri, 2013, s. 470).

Merkezi alıcı sistem (CRS) teknolojisi: Güneşi tek ya da iki eksenli olarak izleyen aynaların (heliostatlar) ışınımı yansıtarak bir kulenin tepesinde bulunan alıcı ile yoğunlaştırdığı, ısı transfer akışkanı olarak eritilmiş tuz ya da su kullanılan ve Rankine çevrim sonucunda elektrik üretilen teknoloji grubudur. Odaklamanın oransal yüksekliği, bu teknoloji ile Rankine çevrim içinde üretilen kızgın buharın sıcaklığını diğer teknolojilere göre daha üst seviyelere çıkarmakta, bu da verimi artırırken maliyetleri düşürmektedir. Heliostatların dağılımı, farklı ısı transfer akışkanlarının kullanılabilirliği ve birden fazla kule ile bu kulelerin beslediği bir güç bloğunun da yoğunlaştırma verimini yükseltebildiği oldukça esnek sistemlerdir (Zhang ve diğerleri, 2013, s. 468, 469).

Doğrusal fresnel kolektör (LFR) teknolojisi: PTC teknolojisinin çalışma prensibine benzer bir şekilde çalışmakta olup, bu teknolojiye aynalar yere yakın şekilde yatay olarak sabitlenir. Küçük alanlarda

uygulanmakla birlikte, sabit bir alıcının beraberinde getirdiği yatırım maliyeti düşüklüğü, tasarım kolaylığı ve direkt buhar üretimine olanak sağlamasına rağmen LFR, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme verimindeki düşüklük nedeniyle çok fazla tercih edilmemektedir (Zhang ve diğerleri, 2013, s. 470).

Parabolik çanak sistemleri (PDS) teknolojisi: Güneş enerjisi çanak biçimli parabolik ayna tarafından tek bir noktadaki alıcıda yoğunlaştırılır. Alıcı üzerinde toplanan ışınım ya doğrudan ısı enerjisi olarak kullanılır ya da bir stirling motoru içerisindeki çevrim akışkanına aktarılır. Üretilen bu mekanik güç bir generatör ile elektrik enerjisine dönüştürülür. PDS güneşi iki eksende takip eder. PDS’de su kullanılmadığı için kurak bölgeler için oldukça uygundur. Modüler yapıda olduğu için tek ya da çok sayıda çanak bir arada kullanılabilir. Ancak, hem güvenilir hem de ekonomik bir stirling motoru yapmak oldukça zordur (Aydar ve diğerleri, 2010, s. 38).

3. Literatür Araştırması

Enerji yönetimi ile ilgili problemler, politik, teknik, ekolojik, sosyal ve ekonomik gelişim ile direkt olarak ilgili olduğu için hükümetlerin son yıllarda daha da artan bir ilgi ile konsantre oldukları önemli bir problem grubudur ve akademik dünyanın da önemli odak noktalarındandır (Mardani ve diğerleri, 2017, s. 216). Bununla birlikte insanlığın enerjiye olan bağımlılığı ele alındığında, birbirleri ile çelişen ve/veya ilişkili çok kriterli ve çok amaçlı bir yapıya sahip olan ve bu nedenle etkin çözümlerin üretilmesi için analitik yaklaşımlara ihtiyaç duyan bu karar problemlerini kritik optimizasyon problemleri grubuna dahil etmek mümkündür (Özcan ve Küçükayarar, 2016, s. 113).

Özellikle son 20 yılda sayıları artan enerji yönetimi ile ilgili çalışmalar, enerji kaynak optimizasyonu (Özcan ve Erol, 2014, s. 1157), çevre etki değerlendirmesi (Wanderer ve Herle, 2015, s. 2), bakım yönetimi (Özcan, Ünlüsoy ve Eren, 2017, s. 1410), atık yönetimi (Soltani, Hewage, Reza ve Sadiq, 2015, s. 318), sürdürülebilirlik değerlendirmesi (Santoyo-Castelazo ve Azapagic, 2014, s. 119), santral teknolojilerinin değerlendirmesi (Özcan ve diğerleri, 2017, s. 204), su kaynakları yönetimi (Weng, Huang ve Li, 2010, s. 8242) ve iklim değişikliği (Streimikiene ve Balezentis, 2013, s. 144) gibi konu başlıkları altında araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmıştır. Yukarıda da belirtildiği üzere, enerji ile ilgili bu karar problemlerinin birbirleri ile çelişen ve/veya ilişkili çok kriterli ve çok amaçlı yapısı araştırmacıları ÇKKV yöntemlerine itmiş ve bu çalışmalarda sıklıkla bu yöntemler kullanılmıştır (Mardani ve diğerleri, 2017, s. 216).

Çalışmanın kapsamını oluşturan CSP teknolojileri, güneşten topladığı ısı enerjisini termodinamik çevrimi sürdürerek elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrik enerjisi üretim grubudur (Dowling, Zheng ve Zavala, 2017, s. 1019) ve literatürde, yukarıda belirtilen enerji yönetimi ile ilgili çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu teknolojiler ile ilgili yapılan çalışmalar, mühendislik bilimleri ile ilgili temel veri tabanları

olan Science Direct, Emerald, EBSCO, Taylor&Francis, SpringerLink Journals, Wiley Online Library ve ULAKBİM’de taranmış ve CSP teknolojilerini konu alan politika ve strateji bazında erişilen yayınlar aşağıda özgün bir şekilde gruplandırılmıştır:

- Teknolojilerin ekonomik değerlendirmesi (Dowling ve diğerleri, 2017, s. 1019; Zhao, Chen ve Thomson, 2017, s. 117),
- Teknolojilerin bölgesel gelişim potansiyellerinin / sürdürülebilirliklerinin değerlendirilmesi (Viebahn, Lechon ve Trieb, 2011, s. 4420; Grágeda ve diğerleri, 2016, s. 583),
- Tek bir teknoloji bazında bölgesel uyum açısından analiz (Bakos ve Petroglou, 2014, s. 1),
- Bölgesel enerji sistemleri için bu teknolojilerin modellenmesi (Soria ve diğerleri, 2016, s. 265, Fichter ve diğerleri, 2017, s. 695),
- Bu teknolojilerin farklı fosil ve yenilenebilir kaynaklarla hibridizasyonunun çevresel etkilerinin incelenmesi (Corona ve San Miguel, 2015, s. 63),
- Enerji depolama olanaklarının değerlendirilmesi (Cavallaro, 2010, s. 496)
- Teknolojilerin çok boyutlu karşılaştırmaları (Cavallaro, 2009, s. 1678; Morin ve diğerleri, 2012, s. 1; Nixon, Dey ve Davies, 2010, s. 5230; Zongxian ve diğerleri, 2012, s. 99; Peterseim ve diğerleri, 2013, s. 520).

Yukarıdaki gruplandırmada araştırmacıların üzerinde en sık durdukları konu, bu çalışmanın da kapsamını oluşturan teknolojik karşılaştırmadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Morin vd. ticarileşme sürecindeki LFR teknolojisi ile dünya genelinde ticarileşme konusunda yol kat etmiş PTC teknolojisini güneşlenme süresi, elektrik üretim miktarı, alan gereksinimi, kolektör performansı gibi teknik parametreler, yıllık çalışan maliyeti, yıllık personel gereksinimi, su kullanımı, yıllık değişim maliyeti gibi işletme ve bakıma yönelik parametreler ile güneş alanının spesifik maliyeti, güç bloğunun spesifik maliyeti, arazi maliyetleri, sigorta giderleri, faiz oranı ve seviyelendirilmiş birim elektrik üretim maliyeti (levelised cost of electricity-LCOE) gibi maliyet parametreleri altında sistem simülasyonu ile karşılaştırmıştır. Neticede, daha ucuz aynalara ve yapısal avantajlara sahip olmalarından dolayı LFR’ın PTC’ye göre önemli bir maliyet indirgeme potansiyeline sahip olduğu sonucuna ulaşmışlar ve LFR’ın PTC ile kıyaslanma seviyesine ulaşabilmesi için çalışmada sunulan maliyet ve performans hedeflerini LFR teknoloji üreticilerinin sağlamaları gerektiğini vurgulamışlardır (Morin ve diğerleri, 2012, s. 1, 4, 12).

Cavallaro, PTC, CRS ve PDS teknolojilerine ait farklı güç ve hibridizasyon olanakları ile türettiği on iki adet santral alternatifini yöntemin avantajlarını baz alarak PROMETHEE ile güneş kapasite faktörü, sıcaklık, çevresel etkiler, teknolojik gelişmişlik, LCOE, işletme ve

bakım maliyetleri ile yatırım maliyeti kriterleri altında karşılaştırmış ve İspanya Sevilya'da bir bölge için bir öncelik sıralaması elde etmiştir (Cavallaro, 2009, s. 1678, 1682, 1683). Nixon vd. ise, mevcut tüm CSP teknolojilerini Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemini kullanarak teknik, ekonomik ve çevresel kriterler altında dört farklı bölge için ayrı ayrı değerlendirmiş ve her bir bölgeye en uygun teknolojiyi tespit etmişlerdir (Nixon ve diğerler, 2010, s. 5230, 5233, 5240).

Teknolojilerin kıyaslamasını içeren çalışmalar arasında yukarıdakilerden farklı olan iki tanesi dikkat çekmektedir. Bunlardan Zongxian vd. tarafından yapılan çalışmada, CSP teknolojilerine sahip santral yatırımlarının Çin için risk değerlendirmesi ele alınmıştır. Araştırmacılar, bulanık kapsamlı değerlendirme metodu ile teknolojiler için risk değerlendirme indeks sistemi kurmuşlar ve bu sistemin, gerçekteki uygulamalar ile verdiği tutarlı sonuçları kullanarak uygulanabilirliğini kanıtlamışlardır (Zongxian ve diğerleri, 2012, s. 99, 106). Peterseim vd. ise, CSP teknolojilerinden hangisinin diğer santral tipleri ile hibrit olarak çalışmasının daha uygun olacağı sorusunun cevabını araştırdıkları çalışmalarında, AHP kullanarak yaptıkları analiz neticesinde kömürlü termik, doğalgaz kombine çevrim ve konvansiyonel olmayan yakıtları kullanan santrallar için en uygun CSP hibridizasyon teknolojisini elde etmişlerdir (Peterseim ve diğerleri, 2013, s. 520, 528-531).

Literatürde yapılan çalışmalar, Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti'nin elektrik üretiminde güneş enerjisinden daha fazla faydalanarak Türkiye'nin sahip olduğu yüksek güneş enerjisi potansiyelini harekete geçirmek için attığı adımlar ve bir önceki bölümde belirtilen CSP teknolojilerinin avantajları ve önemi ile Türkiye'nin CSP teknolojilerinin kullanılması için gerekli olan niteliklerde alanlara sahip olması referans alınarak bu çalışmada, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve DNI açısından en zengin olan güney doğusundaki bir lokasyon için en uygun CSP teknolojisini belirlenmesine odaklanılmıştır. Yine literatürdeki diğer çalışmalar bu çalışmanın, gerekçeleri hem bu bölümün ikinci paragrafında hem de aşağıdaki bölümde belirtildiği üzere ÇKKV yöntemlerine yönelmesini sağlamıştır.

Bu çalışma, literatürdeki diğer teknoloji karşılaştırma çalışmalarına benzemekle birlikte, Türkiye için ilk değerlendirmeyi yapması, ilk kez ÇKKV yöntemlerinden iki tanesinin (ANP-PROMETHEE) kombinasyonunu kullanarak kararın analitiklik düzeyini artırması ve literatürdeki diğer çalışmalarda dikkate alınan değerlendirme kriterlerine ek olarak sosyal ve teknolojik kriterleri de analize dahil etmesi açısından literatüre katkı sağlar niteliktedir.

4. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Günlük ya da profesyonel iş yaşantısı ile ilgili karar verme süreçlerinde birbirleri ile çelişen/ilişkili birçok kriterin dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte yukarıda detaylı bir şekilde bahsedildiği üzere, enerjinin dünya siyaseti ve insanlık üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, enerji ile ilgili karar problemleri için analitik çözümlerin

geliştirilmesi bir zorunluluk halini almıştır. Bu problemlerin birbirleri ile çelişen/ilişkili çok kriterli ve çok amaçlı yapıları, bilim insanlarını karar verme sürecinde belirli bir amaç ya da amaçlara ulaşmak için etki sahibi kriterleri ve bunlar arasındaki ilişkileri temel alan ve bu sayede verilen kararların analitiklik seviyesini artıran yöntemler bütünü olan ÇKKV yaklaşımlarına odaklanmıştır (Özcan ve Küçükayarar, 2016, s. 113). Enerji yönetimi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılması, bu çalışmanın da enerji yönetimi kategorisinde yer alması ve özellikle bu kategorideki problemler için sunduğu kanıtlanmış etkin çözümlerden dolayı ÇKKV felsefesi bu çalışma kapsamında benimsenmiş ve bu felsefe altında yer alan ANP ve PROMETHEE yöntemlerinin kombinasyonu ile Türkiye'nin güney doğusundaki bir lokasyon için beş CSP teknolojilerinden hangisinin daha uygun olduğu sorusunun cevabına ulaşılmıştır.

ÇKKV başlığı altında, AHP, ANP, COPRAS (Complex Proportional Assessment), DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), VIKOR (VIšekriterijumsko KOMPromisno Rangiranje - Multi-criteria Optimization and Compromise Solution), GP (Goal Programming), SAW (Simple Additive Weighting), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality) ve PROMETHEE gibi birçok yöntem geliştirilmiş olmakla birlikte, bu yöntemlerin farklı koşullarda uygulanabilirliklerine göre görece avantaj ve dezavantajları literatürde tartışılmış bir konudur (Özcan ve diğerleri, 2017, s. 1413). Bu kapsamda, kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkileri dikkate alması ve böylelikle tek bir yöne bağlı modelleme zorunluluğunu ortadan kaldırarak karar vericilere daha hassas ve tutarlı sonuçlar sunan ANP (Özcan ve diğerleri, 2017, s. 209) ile kullanım kolaylığına sahip, kriterlerin birbirleri ile orantılı olması gerektiğine ilişkin bir varsayıma bağlı olmayan, on yıllardır enerji, çevre, su kaynakları, iş ve finansal yönetim, lojistik, ulaştırma, üretim, montaj ve tarım gibi çok geniş bir sektör listesindeki karar problemleri için kullanılan, bu zaman diliminde iterasyonları geliştirilen ve etkin sonuçlar üreten PROMETHEE (Velasquez ve Hester, 2013, s. 62) yöntemi sahip oldukları bu avantajlar nedeniyle bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Bunun yanı sıra üçüncü bölümde bahsedildiği üzere, CSP teknolojilerinin çeşitli kriterler altında karşılaştırılmasına ilişkin çalışmalardan ÇKKV yöntemlerini kullananlar arasında,

- Yalnızca birisinde (Cavallaro, 2009, s. 1678) PROMETHEE'nin tek başına kullanımı,
- Diğer iki çalışmada (Peterseim ve diğerleri, 2013, s. 520; Nixon ve diğerleri, 2010, s. 5230) ise, AHP'nin tek başına kullanımı söz konusudur.

Bu kapsamda bu çalışmada ANP, yukarıda belirtilen kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkileri dikkate alması özelliği ile problem kapsamındaki kriter ve alt kriterlerin birbirleri ile ilişkili olması durumlarının tutarlılığından hareketle literatürde bu problem için ilk kez kullanılmış ve yine literatürde ilk kez CSP teknolojileri ÇKKV

yöntemlerinden iki tanesinin kombinasyonu kullanılarak karşılaştırılmış ve kararın analitiklik düzeyinin artırılması sağlanmıştır.

4.1. ANP

Karar verme probleminde dikkate alınan kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkileri göz önünde bulunduran ANP yöntemi, Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen AHP'nin geliştirilmiş halidir (Alptekin, 2010, s. 21). ANP, sayısal faktörlerin ifade edilemediği durumlarda da etkin çözümler sunmaktadır ve AHP'ye kıyasla daha karmaşık karar problemlerine uygulanabilmektedir. ANP yönteminin uygulama adımları şu şekildedir (Özcan ve diğerleri, 2017, s. 209):

- Adım 1: Karar verme probleminin belirlenmesi
- Adım 2: İlişkilerin belirlenmesi: Kriter ve alt kriterler arasındaki etkileşimler belirlenir.
- Adım 3: Kriterler arası ikili karşılaştırmaların yapılması. İkili karşılaştırmalar Tablo 1'de verilen Saaty'nin önem skalasına göre yapılır ve ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur.
- Adım 4: Matris tutarlılığının kontrolü: Her bir karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı (CR) aşağıdaki eşitlikler ve Tablo 2 kullanılarak hesaplanır. Eğer, $CR < 0,10$ ise matris tutarlıdır. Bu şart sağlanmazsa Adım 3'e dönlür.

$$\text{Tutarlılık İndeksi } CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)},$$

$$\text{Tutarlılık Oranı } CR = CI/RI$$

Tablo 1. Önem skalası (Saaty, 1980)

Önem Derecesi	Açıklama
1	Her iki faktörün eşit öneme sahip olması durumu
3	1. Faktörün 2. faktörden daha önemli olması durumu
5	1. Faktörün 2. faktörden çok önemli olması durumu
7	1. Faktörün 2. faktöre nazaran çok güçlü bir öneme sahip olması durumu
9	1. Faktörün 2. faktöre nazaran mutlak üstün bir öneme sahip olması durumu
2,4,6,8	Ara değerler

Tablo 2. Farklı n değerleri için RI değerleri (Saaty, 1980)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

- Adım 5: Süper matrislerin (ağırlıklandırılmamış, ağırlıklandırılmış ve limit) oluşturulması: Süper matrisler, problemi oluşturan kriter, alt kriter ve alternatifler arasındaki tüm etkileşimlerin dikkate alındığı ve üstünlük vektörlerinden oluşan bir kare matristir.

- Adım 6: En uygun alternatifin seçimi: Alternatifler, limit süper matris ve kriter ağırlıklarının bulunarak bu değerler arasından en yüksek olan alternatifin seçilmesi.

4.2. PROMETHEE

PROMETHEE, Brans tarafından geliştirilmiş bir sıralama algoritmasıdır. PROMETHEE’de karar noktalarının önem sırası, PROMETHEE I (kısmi sıralama) ve PROMETHEE II (tam sıralama) ile belirlenir. Yöntem, karar noktalarının değerlendirme kriterlerine göre ikili kıyaslamalarına dayanır. PROMETHEE’yi diğer sıralama algoritmalarından farklı kılan temel özellikler, değerlendirme kriterlerinin birbirleri arasındaki ilişki düzeyini gösteren önem ağırlıkları ile her bir kriterin kendi iç ilişkisini karar verme sürecinde dikkate almasıdır (Bedir ve Eren, 2015, s. 48). Yöntem, yedi adımdan oluşmaktadır (Gür, Bedir ve Eren, 2017, s. 82-84):

- *Adım 1: Veri matrisinin oluşturulması:* Alternatifler, kriterler, kriter ağırlıkları ve alternatiflerin kriterlere göre aldığı değerlerin tablolanmış halidir.
- *Adım 2: Kriterler için tercih fonksiyonların tanımlanması:* Tercih fonksiyonları kriterin yapısına bağlı olarak belirlenir. Kriterlerin iç ilişkilerini gösteren altı tip tercih fonksiyonu vardır (Tablo 3).

Tablo 3. Tercih fonksiyonları

Tip	Parametre	Fonksiyon	Grafik, $P(x)$
Birinci Tip (olagan)	-	$p(x) = \begin{cases} 0, & \forall x \leq 0 \\ 1, & \forall x > 0 \end{cases}$	
İkinci Tip (U-tipi)	l	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ 1, & x > l \end{cases}$	
Üçüncü Tip (V-tipi)	m	$p(x) = \begin{cases} x/m, & x \leq m \\ 1, & x \geq m \end{cases}$	
Dördüncü Tip (Seviyeli)	q, p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ 1/2, & q < x \leq q + p \\ 1, & x > q + p \end{cases}$	
Beşinci Tip (Lineer)	s, r	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s \\ (x-s)/r, & s < x < s+r \\ 1, & x \geq s+r \end{cases}$	
Altıncı Tip Gaussian	σ	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}, & x \geq 0 \end{cases}$	

- *Adım 3: Ortak tercih fonksiyonlarının belirlenmesi:* Tercih fonksiyonları temel alınarak alternatif kümesinde bulunan

alternatif çiftleri için ortak tercih fonksiyonları aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenir:

$$P(a, b) \begin{cases} 0 & , f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)] & , f(a) > f(b) \end{cases}$$

- *Adım 4: Tercih indekslerinin belirlenmesi: a ve b alternatiflerinin tercih indeksi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:*

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \cdot P_i(a, b)}{\sum_{i=1}^k w_i}$$

- *Adım 5: Alternatifler için üstünlüklerin belirlenmesi: Pozitif ve negatif üstünlükler aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanır:*

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(a, b) \quad \Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(b, a)$$

- *Adım 6: Kısmi sıralamanın elde edilmesi (PROMETHEE I): a ve b alternatiflerinin kısmi öncelikleri belirlenirken; Aşağıdaki koşullardan herhangi biri sağlanıyorsa, a alternatifi b alternatifine tercih edilir.*

$$\begin{aligned} \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &= \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{aligned}$$

Aşağıda verilen koşul sağlanıyor ise a alternatifi ile b alternatifi farksızdır.

$$\Phi^+(a) = \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) = \Phi^-(b)$$

Aşağıdaki koşullardan herhangi biri sağlanıyor ise, a alternatifi b alternatifi ile karşılaştırılmaz.

$$\begin{aligned} \Phi^+(a) &> \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) > \Phi^-(b) \\ \Phi^+(a) &< \Phi^+(b) \text{ ve } \Phi^-(a) < \Phi^-(b) \end{aligned}$$

- *Adım 7: Tam sıralamanın elde edilmesi (PROMETHEE II): Tüm alternatifler net öncelik değerleri ile aynı düzlemde değerlendirilir ve tam sıralama elde edilir. Şöyle ki;*

$\Phi(a) > \Phi(b)$ ise a alternatifi b alternatifine tercih edilir.
 $\Phi(a) = \Phi(b)$ ise a alternatifi ile b alternatifi farksızdır.

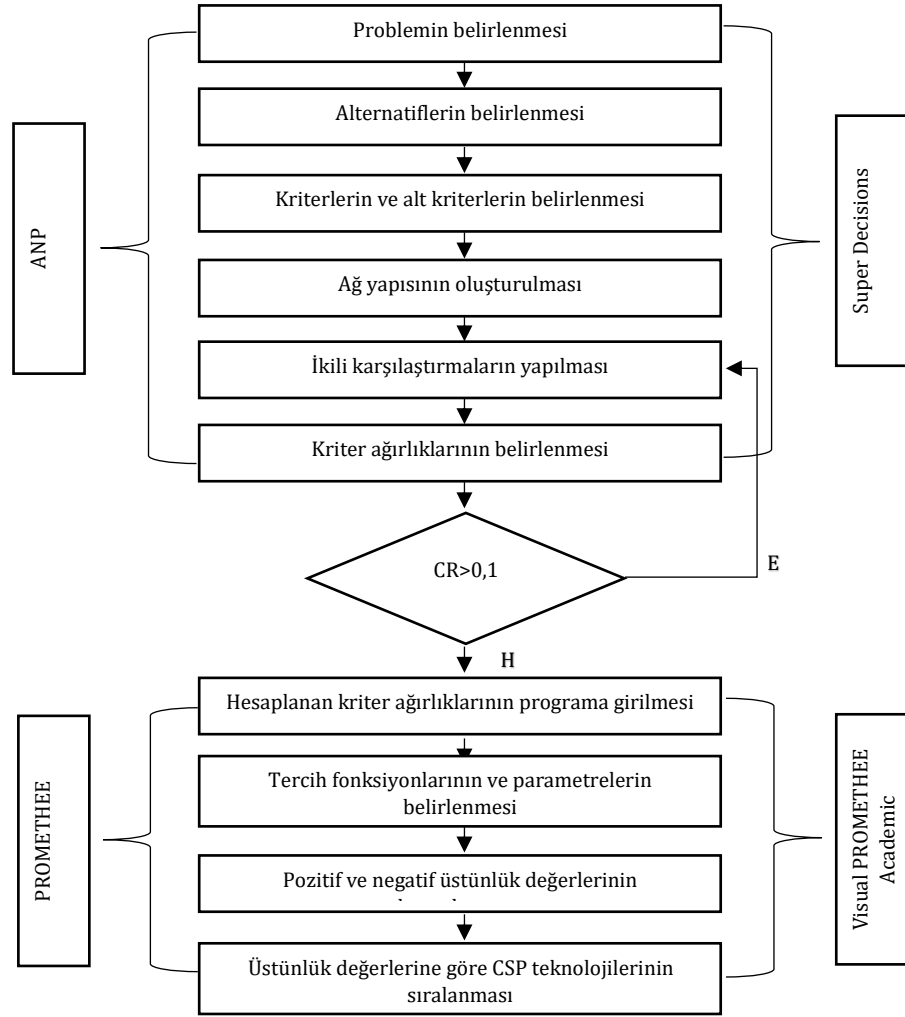
5. Uygulama

Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti, yerli ve yenilebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde daha fazla kullanımına odaklanmış olan sürdürülebilir enerji politikası gereğince attığı somut adımları 2017 yılında daha da artırmış ve sahip olduğu tüm enerji kaynakları arasında potansiyel olarak ilk sırada yer alan güneş enerjisini ekonomiye kazandırmak için 1,3 milyar doları aşan yatırım bütçesi ile Konya Karapınar için ihale sürecini tamamlamıştır.

Bununla birlikte Türkiye, coğrafi konumu itibariyle bölüm 2.1'de belirtilen CSP teknolojilerinin elektrik üretiminde kullanılabilmesi için gerekli şartları taşıyan alanlara sahip olmakla birlikte PV teknolojilerine göre, YEKDEM ile kWh başına satış fiyatının en çok 2,5 \$cent daha fazla olmasına, ısının kısa süreler için depolanabilmesi suretiyle bulutlu zamanlar, akşam saatleri gibi DNI'nın olmadığı ya da düşük olduğu zamanlarda elektrik üretim imkanı vermesine, elektrik üretiminin yanı sıra, ısı ve desalinasyon ihtiyaçlarını karşılayabilmesine, daha ekonomik, verimli, güvenilir ve uzun ömürlü bir teknoloji grubu olmasına ve hibridizasyon imkanları sunmasına rağmen Mersin'de bulunan 5 MW'lık CRS santrali haricinde CSP örneğini kurulu güç portföyünde bulundurmamaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'nin DNI açısından en zengin olan güney doğu bölgesindeki bir lokasyon için dünya genelinde mevcut olan dört CSP teknolojisine kullanan beş santral alternatifi ANP-PROMETHEE kombinasyonu ile hem uygulama sahası hem yöntem konfigürasyonu hem de kullandığı kriterler açısından literatüre katkı sağlayan bu çalışmada değerlendirilmiştir. Uygulama adımları Şekil 2'de sunulmuştur.

5.1. Kriter önceliklerinin belirlenmesi

Günümüzde dünyada geliştirilmiş ve ticari olarak elektrik üretiminde kullanılan dört temel CSP teknolojisi mevcuttur. Bunlar, PTC, CRS, LFR ve PDS'dir. Bu teknolojilerden CRS'de, ısı transfer akışkanı olarak dünya genelinde eritilmiş tuz ya da su kullanılmaktadır. Bu eğilim çalışma kapsamında dikkate alınmış ve geçerli dört teknolojiyi kullanan beş santral alternatifi analize dahil edilmiştir.



Şekil 2. Uygulama aşamaları

Literatürde yapılan çalışmalar, elektrik üretim teknolojileri ve özellikle CSP teknolojilerinde dünya genelindeki uygulamalar, parametreler, gelişmeler ve zorunluluklar temel alınarak, alternatiflerin değerlendirilmesi için maliyet, sosyal, teknolojik ve teknik başlıklarından oluşan dört adet ana kriter grubu belirlenmiştir. Bu kriterlerden maliyet ile ilgili olanlar, literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi santralin hem kurulum hem de işletme dönemine ait tüm maliyetleri içermektedir. Teknik, sosyal ve teknolojik kriterlerin tamamı da, hem elektrik üretim sektörü hem de literatür ile tutarlıdır. Ancak, sosyal kriterlerden görsel etki ile teknolojik kriterlerden teknoloji üretici sayısı bu çalışma ile CSP teknoloji seçim literatürüne kazandırılmıştır. Görüntü kirliliğinin santral teknolojilerinin seçiminde sosyal kabul faktörü içinde düşük de olsa bir etkiye sahip olduğu Özcan ve Erol (2014, s. 1161) tarafından belirtilmiştir. Nitekim, bu bölümün sonunda sunulan kriter ağırlıklarında görsel etkinin payı %1 olarak hesaplanmış olup, en düşük ağırlık değeridir. Teknoloji üretici sayısı kriteri ise, Türkiye’de uygulanan YEKDEM bağlamında bu çalışmaya özgü bir kriterdir. Çünkü, santralda üretilen elektriğin satış fiyatı yurt içi teknoloji üreticilerinin varlığı ile

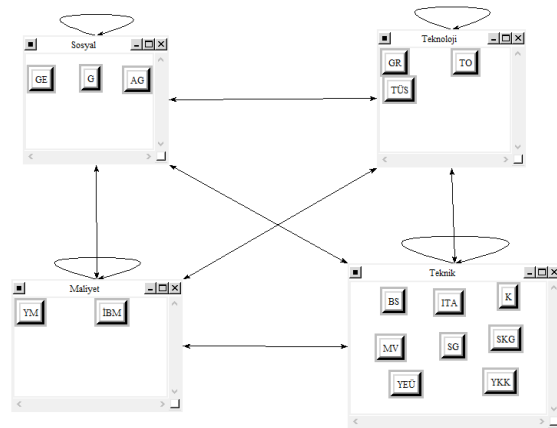
değişiklik gösterebilmektedir. Kriter grupları ile bunlar altında yer alan kriterler Tablo 4'de, kriterler arasındaki etkileşimler ise Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5'deki etkileşimler, kriterlerin birbirleriyle olan doğrudan ilişkilerini göstermektedir. Örneğin işletme bakım maliyeti; yatırım maliyeti, güvenilirlik, alan gereksinimi, buhar sıcaklığı, ısı transfer akışkanı, konsantrasyon, santral kurulu gücü, maksimum verim, su gereksinimi, yıllık elektrik üretimi, yıllık kapasite kullanımı, gelişim riski ve teknoloji olgunluğu kriterleri ile doğrudan ilişkilidir.

Tablo 5'den de görüleceği üzere, kriterler arasında karmaşık ilişkiler mevcuttur. Bununla birlikte ANP yöntemi, kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkileri dikkate alması ve böylelikle tek bir yöne bağlı modelleme zorunluluğunu ortadan kaldırarak daha hassas ve tutarlı sonuçlar üretmektedir. Bu kapsamda, kriter ağırlıklarının hesaplanmasında ANP yöntemi kullanılmış ve Super Decisions paket programı ile kriter ağırlıkları Şekil 3'de verilen ağ yapısı temel alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. Kriterler ve alt kriterler

KRİTERLER	ALT KRİTERLER
Maliyet	1 İşletme ve Bakım Maliyeti (İBM)
	2 Yatırım Maliyeti (YM)
Sosyal	3 Görsel Etki (GE)
	4 Güvenilirlik (G)
	5 Alan Gereksinimi (AG)
Teknik	6 Buhar Sıcaklığı (BS)
	7 Isı Transfer Akışkanı (ITA)
	8 Konsantrasyon (K)
	9 Santral Kurulu Gücü (SKG)
	10 Maksimum Verim (MV)
	11 Su Gereksinimi (SG)
	12 Yıllık Elektrik Üretimi (YEÜ)
	13 Yıllık Kapasite Kullanım (YKK)
Teknoloji	14 Gelişim Riski (GR)
	15 Teknoloji Olgunluğu (TO)
	16 Teknoloji Üretici Sayısı (TÜS)



Şekil 3. Ağ yapısı

Tablo 5. İkili etkileşim matrisi

	İBM	YM	GE	G	AG	BS	ITA	K	SKG	MV	SG	YEÜ	YKK	GR	TO	TÜS
İBM	-	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
YM	*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
GE		*	-	*					*							
G	*	*		-	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
AG	*	*	*	*	-				*			*				
BS	*	*		*		-	*	*	*	*	*	*		*	*	
ITA	*	*		*		*	-	*	*	*	*	*	*	*	*	
K	*	*		*		*	*	-	*	*	*	*	*	*	*	
SKG	*	*	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*	*
MV	*	*		*		*	*	*	*	-	*	*	*	*	*	*
SG	*	*		*		*	*	*	*	*	-	*	*	*	*	
YEÜ	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*	*
YKK	*	*		*		*	*	*	*	*	*	*	-	*	*	*
GR	*	*		*		*	*	*	*	*	*	*	*	-	*	*
TO	*	*		*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	*
TÜS		*		*					*	*		*	*	*	*	-

Bu noktadan sonra ANP'nin uygulama adımlarına göre sıradaki aşama, kriterler arasındaki ikili karşılaştırmaların yapılmasıdır. Güneş enerjisi teknolojileri konusunda uzman kişilerce Tablo 1'de verilen Saaty'nin önem skalasına göre kriter bazlı ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Söz konusu matrislerin tutarlılık oranları bölüm 4.1'e göre hesaplanmış ve tamamı 1'den küçük çıkmıştır. Bu, matrislerin tutarlı olduğu anlamına gelmektedir. Tutarlı karar matrisleri ile Super Decisions programı kullanılarak hesaplanan kriter ağırlıkları Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Kriterlerin ağırlık değerleri

Kriter	Ağırlık	Kriter	Ağırlık	Kriter	Ağırlık	Kriter	Ağırlık
İBM	0,172628	AG	0,053921	SKG	0,027583	YKK	0,041102
YM	0,193521	BS	0,027740	MV	0,037290	GR	0,078895
GE	0,011605	ITA	0,018067	SG	0,035416	TO	0,078894
G	0,096970	K	0,029680	YEÜ	0,067610	TÜS	0,029078

Özellikle teknik ve teknolojik kriterlere göre değişiklik göstermekle birlikte, CSP teknolojileri için en belirleyici kriterler tüm santral alternatiflerinde olduğu gibi maliyet ile ilgili olanlardır. Tablo 6'dan da görüleceği üzere, işletme ve bakım maliyeti (İBM) ve yatırım maliyeti (YM) kriterlerinin toplam ağırlığı %36'dan fazladır. Türkiye'de ve dünyada, CSP teknolojilerinden yeterince faydalanılmama sebeplerinin başında da bu teknolojilerin birçok konvansiyonel santral teknolojisine nazaran sahip oldukları yüksek maliyetler gelmektedir. Bu kapsamda, elde edilen sonuç gerçek hayat ile tutarlıdır yorumu yapılabilir.

5.2. Alternatiflerin sıralanması

İlk aşamada, kriterlerin iç ilişkilerine göre belirlenen tercih fonksiyonları tespit edilmiştir. Bu problemde, 3 adet beşinci tip (lineer),

5 adet dördüncü tip (seviyeli), 5 adet üçüncü tip (V tipi) ve 3 adet birinci tip (olağan) olmak üzere kriterler için seçilmiş 4 farklı tercih fonksiyonu kullanılmıştır. Ardından, alternatifler, kriterler, ANP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları, tercih fonksiyonları ve parametreler Visual PROMETHEE Academic programına girilmiştir. Programın ekran görüntüsü Şekil 4’de gösterilmiştir.

Yapılan çözümlenme sonucunda elde edilen alternatiflerin pozitif ve negatif üstünlükleri Tablo 7’de gösterilmiştir.

36

Tablo 7. Alternatiflerin pozitif ($\Phi+$) ve negatif ($\Phi-$) üstünlükleri

	PTC	LFR	CRS-MS	CRS-SHS	PDS
$\Phi+$	0,2594	0,1423	0,1535	0,2608	0,2580
$\Phi-$	0,1505	0,2926	0,2744	0,1031	0,2535

The screenshot shows the Visual PROMETHEE Academic software interface. The main window displays a table with columns for various criteria and scenarios. The table is organized into sections: Preferences, Statistics, and Evaluations. The Evaluations section shows the final ranking of alternatives based on the criteria.

Scenario	SHG	K	ITA	BS	AG	SG	YK	MV	YGE	TO	TUS	GR	YM	BM	GE	G
Unit	Mtne	Surs	[]	°C	km ²	n+Müh	%	%	%	[]	[]	[]	Ekm	mEa	[]	[]
Cluster/Group																
Min/Max	max	max	max	max	min	min	max	max	max	max	max	max	min	min	max	max
Weight	0,03	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,07	0,08	0,03	0,08	0,19	0,17	0,01	0,10
Preference Fcn.	Linear	Linear	Level	Linear	Level	Level	V-shape	V-shape	V-shape	Usual	Usual	Usual	V-shape	V-shape	Level	Level
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
-Q: Indifference	250,00	750,00	3,00	300,00	2,00	0,10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	4,00
-P: Preference	700,00	900,00	7,00	400,00	4,00	2,00	25,00	20,00	15,00	n/a	n/a	n/a	6000,00	8,00	6,00	6,00
-S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Minimum	200,00	60,00	3,00	260,00	2,00	0,10	24,00	18,00	10,00	2,00	4,00	3,00	3500,00	5,00	3,00	3,50
Maximum	850,00	1300,00	10,00	650,00	6,00	3,00	55,00	31,00	22,00	7,00	10,00	10,00	7000,00	11,00	10,00	8,75
Average	350,00	686,00	6,60	474,00	3,74	2,42	36,00	23,60	16,40	3,80	5,80	5,60	5300,00	6,80	7,00	5,90
Standard Dev.	252,98	518,75	2,94	137,25	1,34	1,16	11,44	4,32	3,83	1,83	2,23	2,42	1392,04	2,23	2,76	2,10
Evaluations																
Parabolik oluk	300,00	70,00	3,00	380,00	4,20	3,00	43,00	25,00	16,00	7,00	10,00	10,00	6000,00	6,00	5,00	3,50
Fresnel oluk	200,00	60,00	10,00	260,00	2,00	3,00	24,00	18,00	10,00	2,00	4,00	3,00	3500,00	5,00	3,00	3,75
Merkez alo-eril	200,00	1000,00	6,00	540,00	6,00	3,00	55,00	22,00	17,00	2,00	5,00	5,00	7000,00	7,00	10,00	7,75
Merkez alo-kizg	200,00	1000,00	10,00	540,00	3,50	3,00	30,00	22,00	17,00	4,00	4,00	6,00	3500,00	5,00	10,00	5,75
Parabolik çanak	850,00	1300,00	4,00	650,00	3,00	0,10	28,00	31,00	22,00	4,00	6,00	4,00	5500,00	11,00	7,00	8,75

Şekil 4. Visual PROMETHEE Academic ekran görüntüsü

Üstünlük değerleri hesaplandıktan sonra ilk olarak PROMETHEE I sıralaması yapılmıştır. PROMETHEE I’e göre alternatifler; CRS-SHS, PTC, PDS, CRS-MS ve LFR şeklinde sıralanmıştır. PROMETHEE I’e göre sıralama yapılabildiği için PROMETHEE II’ye gerek kalmamıştır. Alternatiflerin nihai sıralaması Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Alternatiflerin nihai sıralaması

1	M.A.Kızgın Buh.	2	Parabolik Oluk	3	Parabolik Çanak	4	M.A.Ertilmiş T.	5	Fresnel Oluk
$\Phi+$	0,2608	$\Phi+$	0,2594	$\Phi+$	0,2580	$\Phi+$	0,1535	$\Phi+$	0,1423
$\Phi-$	0,1031	$\Phi-$	0,1505	$\Phi-$	0,2535	$\Phi-$	0,2744	$\Phi-$	0,2926

6. Sonuç ve Öneriler

Enerjinin insanlığın hayatını idame ettirebilmesi için bir zorunluluk halini aldığı günümüzde, tükenmekte olan fosil yakıtların dünyamıza verdiği zararları da dikkate alan hükümetler, artan enerji taleplerini karşılamak, toplumsal refahı yükseltmek ve dünya siyaset sahnesinde en azından pozisyonlarını korumak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan

Türkiye de dünyayı yakından takip etmekte ve bu kapsamda, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarını ekonomisine kazandırmak için sürdürülebilir bir enerji politikası izlemektedir. Türkiye'nin sahip olduğu tüm enerji kaynakları arasında ilk sırada ise güneş enerjisi yer almaktadır. Bununla birlikte Türkiye, güneş enerjisinden elektrik üretmeyi sağlayan iki teknoloji grubunun (PV ve CSP) tüm ön şartlarına sahiptir.

CSP teknolojilerinin PV teknolojilerine göre avantajları, yukarıda belirtilen Türkiye'nin gereklilikleri ve yenilenebilir kaynak yatırımları ile literatürdeki eksiklikten hareketle bu çalışmada, CSP teknolojilerinden Türkiye'nin en uygun bölgesi olan Güney Doğu Anadolu'daki bir lokasyon için en uygun olanının belirlenmesi amacı ile bir tekno-ekonomik analiz ÇKKV yöntemlerinden ANP – PROMETHEE kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3'de de belirtildiği üzere bu çalışma, literatürde konu ile ilgili yapılan diğer çalışmalardan kullanılan kriterler ve yöntemler bazında ayrılmaktadır. Sosyal ve teknolojik kriterlerin analize eklenmesi ile daha geniş bir çerçevede ve daha hassas bir kararın verilmesi amaçlanmış ve kriterler arasındaki etkileşimleri dikkate alabilme olanağı sağlayan ANP ile kriterler ağırlıklandırılarak birçok avantaja sahip olan PROMETHEE yöntemi kullanılarak bu amaca ulaşılmıştır. Bir başka ifade ile hem yeni kriterlerin kullanımı hem de yöntem konfigürasyonu ile literatüre bu çalışma ile katkı sağlanmıştır.

Analizin sonucunda elde edilen sıralama, kullanılan yöntem ve kriterlerin elektrik üretim sektörü ile de tutarlılığını ortaya koymaktadır. Çünkü, birinci ve ikinci sırada yer alan CRS-SHS ve PTC teknolojileri, özellikle verim, maliyet, diğer birçok teknik parametre ve teknolojik olgunluk açısından LFR ve PDS'ye göre oldukça üstündür ve bu iki teknoloji arasındaki değer farkı çok azdır. Dünya genelindeki CSP teknolojileri arasında en çok PTC ve CRS-SHS kullanıldığı, teknik zorluklar açısından avantajlarına rağmen PDS teknolojisinin bu teknolojilerden sonra geldiği ve verimi çok düşük olan LFR ile maliyet yüksekliğinden dolayı CRS-MS'nin en az tercih edilen teknolojiler olduğu düşünüldüğünde, paragrafın başındaki cümle doğrulanmaktadır.

PV ve CSP teknolojileri çalışma prensipleri açısından farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, bu teknolojiler temel bir değerlendirme için bu çalışmada kullanılan kriterler temelinde analiz edilebilir. Bu kapsamda, CSP ve PV teknolojilerinin hem ayrı ayrı hem de bütünleşik olarak literatürde kullanılmayan ÇKKV yöntemlerinden özellikle TOPSIS ve GP ile Türkiye özelinde sıralanması ileri çalışmalar olarak önerilebilir.

Kaynakça

Alptekin, N. (2010). Analitik ağ süreci yaklaşımı ile Türkiye’de beyaz eşya sektörünün pazar payı tahmini. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 11(1), 18-27.

Aydar, E., Üresin, E. ve Livatyalı, H. (2010). Yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden elektrik üretimi. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, Temmuz-Ağustos, 35-40.

Bakos, G.C. ve Petroglou, D.A. (2014). Simulation study of a large scale line-focus trough collector solar power plant in Greece. *Renewable Energy*, 71, 1-7.

Bedir, N. ve Eren, T. (2015). AHP-PROMETHEE yöntemleri entegrasyonu ile personel seçim problemi: Perakende Sektöründe bir uygulama. *Social Sciences Research Journal*, 4(4), 46-58.

Buntaine, M.T. ve Pizer, W.A. (2015). Encouraging clean energy investment in developing countries: what role for aid? *Climate Policy*, 15(5), 543-564.

Cavallaro, F. (2010). Fuzzy TOPSIS approach for assessing thermal-energy storage in concentrated solar power (CSP) systems. *Applied Energy*, 87, 496-503.

Cavallaro, F. (2009). Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34, 1678-1685.

Corona, B. ve San Miguel, G. (2015). Environmental analysis of a concentrated solar power (CSP) plant hybridised with different fossil and renewable fuels. *Fuel*, 145, 63-69.

Dowling, A.W., Zheng, T. ve Zavala, V.M. (2017). Economic assessment of concentrated solar power technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1019-1032.

Elektrik Üretim A.Ş. (2017). Yıllık faaliyet raporu 2016. 11 Ağustos 2017 tarihinde http://www.euas.gov.tr/Documents/yillik_raporlar/EUAS_2016_YILLIK_FAALIYET_RAPORU_.pdf adresinden erişildi.

Fichter, T., Soria, R., Szklo, A., Schaeffer, R. ve Lucena, A.F.P. (2017). Assessing the potential role of concentrated solar power (CSP) for the northeast power system of Brazil using a detailed power system model. *Energy*, 121, 695-715.

Grágeda, M., Escudero, M., Alavia, W., Ushak, S. ve Fthenakis, V. (2016). Review and multi-criteria assessment of solar energy projects in Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 583-596.

Gür, Ş., Bedir, N. ve Eren, T. (2017). Analitik ağ süreci ve PROMETHEE yöntemleri ile gıda sektöründeki orta ölçekli işletmeler için pazarlama stratejilerinin seçimi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 79-92.

Kaplan, D. 2015. *Renewable Energy Turkey. Opportunity?* Ankara: Embassy of the Kingdom of the Netherlands.

Karagöl, E.T. ve Kavaz, İ. (2017). Dünya ve Türkiye’de yenilenebilir enerji. *Analiz*, 197, 1-31.

Mardani, A., Kazimieras Zavadskas, E., Khalifaha, Z., Zakuana, N., Jusoha, A., Nora, K.M. ve Khoshnoudic, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 216-256.

Morin, G., Derschb, J., Platzerc, W., Eckd, M. ve Haberle, A. (2012). Comparison of linear fresnel and parabolic trough collector power plants. *Solar Energy*, 86, 1-12.

Nixon, J.D., Dey, P.K. ve Davies, P.A. (2010). Which is the best solar thermal collection technology for electricity generation in north-west India? Evaluation of options using the analytical hierarchy process. *Energy*, 35, 5230-5240.

Özcan, E.C. (2013). *Elektrik üretim planlamasında çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı: Türkiye örneği*. Doktora tezi. Gazi Üniversitesi. Ankara.

Özcan, E.C. ve Bulut, M. (2011). Güneş enerjisi teknolojileri ve bu teknolojilerin Türkiye’deki geleceği, VI. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu: 21-22 Ekim içinde (ss. 248-262). Kayseri: Makine Mühendisleri Odası.

Özcan, E.C. ve Erol, S. (2014). A multi-objective mixed integer programming model for energy resource allocation problem: The case of Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 27(4), 1157-1168.

Özcan, E.C. ve Küçükayarar, U. 2016. Assessment of potential southern gas corridor projects with a combined methodology, “Embracing New Frontiers”: 23rd World Energy Congress: 09-13 Ekim içinde (ss.105-121). İstanbul: World Energy Council.

Özcan, E.C., Ünlüsoy, S. ve Eren, T. (2017). ANP ve TOPSIS yöntemleriyle Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 204-219.

Özcan, E.C., Ünlüsoy, S. ve Eren, T. (2017). A combined goal programming-AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423.

Peterseim, J.H., White, S., Tadros, A. ve Hellwig, U. (2013). Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation? *Renewable Energy*, 57, 520-532.

Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*, New York: McGraw-Hill.

Santoyo-Castelazo, E. ve Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: Integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Clean Production*, 80, 119-138.

Soltani, A., Hewage, K., Reza, B. ve Sadiq, R. (2015). Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review. *Waste Management*, 35, 318-328.

Soria, R., Lucena, A.F.P., Tomaschek, J., Fichter, T., Haasz, T., Szklo, A., Schaeffer, R., Rochedo, P., Fahl, U. ve Kern, J. (2016). Modelling concentrated solar power (CSP) in the Brazilian energy system: A soft-linked model coupling approach. *Energy*. 116, 265-280.

Streimikiene, D. ve Balezentis, T. (2013). Multi-objective ranking of climate change mitigation policies and measures in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 18, 144-153.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2017). Türkiye elektrik üretim ve tüketim değerleri 2016. 5 Ağustos 2017 tarihinde <http://www.enerji.gov.tr/trTR/Sayfalar/Elektrik> adresinden erişildi.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2016. 2017 Yılı Bütçe Sunumu. Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 2016. Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu 2016-2020. Ankara: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (2016). Ham petrol ve doğalgaz sektör raporu. 5 Ağustos 2017 tarihinde http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2F_Sekt%C3%B6r%20Raporu%2FTP_HAM_PETROL-DOGAL_GAZ_SEKTOR_RAPORU_2015.pdf adresinden erişildi.

Velasquez, M. ve Hester, P.T. (2013). An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56-66.

Viebahn, P., Lechon, Y. ve Trieb, F. (2011). The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe-A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. *Energy Policy*, 39, 4420-4430.

Wanderer, T. ve Herle, S. (2015). Creating a spatial multi-criteria decision support system for energy related integrated environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 52, 2-8.

Weng, S.Q., Huang, G.H. ve Li, Y.P. (2010). An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning – A case study in the Haihe River Basin. *Expert System with Application*, 37, 8242-8254.

Yaralıoğlu, K. (2010). Karar verme yöntemleri, Ankara: Detay Yayıncılık. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (2016). Türkiye ulusal yenilenebilir enerji eylem planı. 5 Ağustos 2017 tarihinde http://www.eie.gov.tr/duyurular_haberler/document/Turkiye_Ulusal_Yenilenebilir_Enerji_Eylem_Plani.PDF adresinden erişildi.

Zhao, Z.Y., Chen, Y.L. ve Thomson, J.D. (2017). Levelized cost of energy modeling for concentrated solar power projects: A China study. *Energy*, 120, 117-127.

Zhang, H.L., Baeyens, J., Degrêve, J. ve Cacêres, G. (2013). Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 466-481.

Zongxian, Z., Yang, W., Xiaofei, S. ve Ming, Z. (2012). Risk assessment of concentrating solar power based on fuzzy comprehensive evaluation. *Systems Engineering Procedia*, 4, 99 – 106.

Selection of the Solar Power Plants with CSP Technologies by Combined ANP-PROMETHEE Approach

Introduction

42

Energy is the most basic element for raising social welfare, playing a fascinating role in economic and social progress of the countries' and thus increasing the competitiveness of the countries in the globalizing world. In addition to this, population growth, urbanization, industrialization and constantly developing technology increase the need and demand for this critical power slightly day by day. Countries take new measures to meet increasing energy demand and in this context, revise their existing policies within the scope of sustainability. Because, energy demand growth which has social, economic and environmental effects necessitates carrying out the sustainable energy policies based on relevant effects (Özcan et al., 2017, p. 1410). In this context, many countries around the world implement the sustainable energy policies which based on the economical, efficiency and environmental awareness parameters to maintain their strengths globally and to raise the level of social prosperity. Spreading the use of renewable resources in electricity generation provides significant advantages to the countries for following the sustainable energy policies, when considering the strong impact of these resources on three pillars of sustainability.

Turkey is a rich country in terms of renewable energy resource potential with 380 GWh/a solar, 144 GWh/a wind, 140 GWh/a hydro, 9.3 GWh/a biomass and 4.5 GWh/a geothermal energy (Özcan, 2013, p. 63). In other words, Turkey has about 700 billion kWh per year of power generation potential and this is 2.5 times of the consumption of 278.3 billion kWh in 2016 which is the highest energy utilization year of all time. Consistent with this potential and statistics, Turkey aims to increase the share of renewable energy resources in electricity generation portfolio to at least 30% in 2023, the 100th anniversary of its founding (YEGM, 2016). The most notable target in Vision 2023 is solar energy. Because, Turkey aims to reach solar power plant capacity of minimum 5,000 MW and it means that the current installed capacity of solar energy (12.9 MW-EÜAŞ, 2017) will be increased about 388 times. Prioritization of this target is reasonable when annual solar energy potential is considered. In this context, The Government of the Republic of Turkey has taken a series of steps to ensure that solar energy is used more and more in electricity generation.

Turkey is a very lucky country in terms of solar energy with its geographical location and use of the PV and CSP are two main technology groups which convert the solar energy to the electricity, is suitable for Turkey. Furthermore, Turkey applies the highest feed in tariff for solar energy among all renewables. The selling price per kWh can be up to 20 \$cent for PV and 22.5 \$cent for CSP power plants with using locally produced equipment bonuses.

Some of the superior features of CSP compared to PV can be summarized as follows: Electricity can be generated when there is no or low DNI such as cloudy times and evening hours by storing the heat for short periods of time, in addition to electricity generation, meeting the needs of heat and desalination, being more economical and efficient technologies, being a reliable and long-lasting technology group, proven performance and business management,

network stability and hybridization with a second system such as natural gas, geothermal, biogas, etc.

In the light of all the information mentioned above in this study, five proven power plants using CSP technologies are evaluated for the location in south east Turkey which has the highest DNI with combined ANP-PROMETHEE approach under four main (cost, social, technical and technological) and sixteen sub-criteria, and a priority order for possible CSP power plant investments is obtained.

Method Determination

In our daily or professional lives, conflicting/related multiple criteria need to be considered while making decisions. The decision making processes are related to energy, which are included in the crucial optimization problems group when considering the indispensability of energy in terms of world politics and humanity, and they have also intrinsically multiple criteria structures and therefore, analytical approaches for effective solutions for these problems are needed. In this context in this study, MCDM, which is a sub-discipline of operations research that explicitly considers multiple criteria in decision-making environments is based and ANP and PROMETHEE combination is used to evaluate the most suitable CSP technology for a location in south eastern Turkey.

There are so many improved MCDM methods such as AHP, ANP, CBR, GP, TOPSIS, ELECTRE and PROMETHEE in the literature, and their relative advantages and disadvantages are discussed according to their applicability in different situations (Özcan et al., 2017, p. 1413). ANP is the general form of AHP and it allows for dependence and includes independence. It can better handle interdependence than AHP and “can support a complex, networked decision-making with various intangible criteria” (Velasquez and Hester, 2013, p. 59, 62). PROMETHEE which is the other method is used in this study, is easy to use. Furthermore, it does not require the assumption that the criteria are proportionate. PROMETHEE is frequently used in the literature such as environmental, energy, water, business and financial management, chemistry, logistics and transportation, manufacturing and assembly, and agriculture. PROMETHEE has been utilized for many decades and its ease of use has made it a common method as its iterations have improved (Velasquez and Hester, 2013, p. 59, 62).

Besides the advantages of the methods are used in this study which are given above, in consideration of the structure of CSP technology selection problem in terms of complexity, and the lack of the studies that uses the combined methodologies in the relevant literature, in this study a combined ANP-PROMETHEE approach is suggested and the level of analyticity of the decision has been increased.

Findings

The ranking obtained as a result of the analysis is consistent with the electricity generation sector. Because, CRS-SHS and PTC which are in the first two orders with very close priority values, are quite superior to LFR and PDS especially in terms of efficiency, cost, many other technical parameters and technological maturity. Despite its advantages, PDS ranks third because of technical difficulties, and CRS-MS and LFR are the least preferred alternatives due to high cost and low yield respectively.

Contribution to the Literature

This study differs from the other studies in the related literature in terms of the some evaluation criteria and methods used in. In this study, it is aimed to make a more precise decision in a wider frame by adding some social and technological criteria to the analysis. This aim is realized by weighting the criteria with ANP which provides to be consider the relations between them and by using these criteria in PROMETHEE method is an outranking algorithm, often used in the literature and has many advantages.