



Robust optimizasyon ile güneş enerji kaynağı tesisi kuruluş yeri seçimi ve bir uygulama

Selection of solar energy supply facility location with robust optimization and an application

Turgut KARABULUT^{1*}, Selahattin YAVUZ²

^{1,2}İşletme Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye.
tkarabulut@erzincan.edu.tr, syavuz@erzincan.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.03.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 14.11.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 24.07.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.27243
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Enerji sürekli ihtiyaç ve bu ihtiyaç gittikçe artan bir kaynaktır. Bu enerji kaynaklarından biri olan yenilenebilir enerji, hem temiz hem de sürdürülebilir olması dünyamız için oldukça önemlidir. Dünyada orta kuşak ülkelerden biri olan Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça şanslı bir ülkedir. Bu çalışmada, Erzurum, Erzincan ve Sivas illeri için güneş enerji kaynağı tesisi kuruluş yeri seçimi ve enerji verimliliği için model önerilmiştir. Bu model deterministik ve robust optimizasyon ile çözümlenerek en uygun yer belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonunda her iki çözüme göre kuruluş yeri seçimi için en uygun ilin Erzurum olduğu belirlenmiştir. Erzurum ili için deterministik çözüme göre verim 83950724.1 ile 87591854.81 arasında bulunurken, robust çözüme göre verim 83416034.92 ile 87065524.19 arasında bulunmuştur. İki çözüm arasında yaklaşık olarak %0.618'lik bir fark bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi, Kuruluş yeri seçimi, Robust optimizasyon.

Abstract

Energy is a constant need and this need is a growing resource. Renewable energy, which is one of these energy sources, is very important for our world to be both clean and sustainable. One of the central belt countries in the world, Turkey is a very fortunate country in terms of renewable energy sources. In this study, a model for solar energy source installation and energy efficiency has been proposed for Erzurum, Erzincan, and Sivas. This model has been solved by deterministic and robust optimization. Pursuant to the results obtained from the solutions with these methods, the most suitable location has been determined. At the end of the study, it has been found out that Erzurum is the most suitable city for the selection of the location according to both solutions. According to deterministic solution for Erzurum, the efficiency has been observed between 83950724.1 and 87591854.81 while it has been between 83416034.92 and 87065524.19 according to robust solution. There has been an approximately 0.618% difference between these two solutions.

Keywords: Solar energy, Facility location selection, Robust optimization.

1 Giriş

Enerjiye dün ve bugün olduğu gibi yarın da sürekli ihtiyaç duyulacaktır. Dünyanın varoluşundan beri enerji ihtiyacı artarak devam etmiştir. Özellikle 19. yüzyılda başlayan yeni buluşlarla birlikte gelen sanayi devrimi sonrası enerji ihtiyacı daha da artmıştır. İnsanlığı enerji ihtiyacını önceleri yenilenemeyen enerji kaynakları ile elde etmeye çalışmıştır. Kömür, petrol, doğalgaz vb. yenilenemeyen enerji kaynaklarının giderek azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarına ilginin artmasına sebep olmuştur.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hem temiz hem de sürdürülebilir olması oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitli olması sadece tek bir bölgede üretim yapılmasının da önüne geçmiştir. Bazı bölgelerde rüzgâr enerjisinden faydalanırken diğer bölgelerde güneş enerjisinden faydalanıp enerji üretimi yapılabilmektedir. Bu tip çeşitliliğin olması en önemli avantajlarından biridir.

Dünyada orta kuşak ülkelerinden biri olan Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça şanslı bir ülkedir. Türkiye'de, özellikle güneşten gelen radyasyon ışınım değerlerinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte güneşlenme süreleri de oldukça yüksektir. Güneş enerji

santralleri için önemli olan bu iki parametre, Türkiye'ye yatırım yapılmasını cazip hale getirmektedir.

Güneş enerji santrallerinin kurulması için gereken maliyet oldukça yüksektir. Milyonlarca Euro maliyete sahip olan bu santrallerin kuruluş yeri tercihleri oldukça önemlidir. Literatür incelendiğinde kuruluş yeri seçiminde genellikle çok kriterli karar verme teknikleri kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme tekniklerinde uzman görüşü alınarak seçim yapılması, farklı uzmanlara danışıldığında farklı tercihlere sebebiyet vermesi açısından yöntemin önemli bir dezavantajıdır. Oldukça yüksek maliyetli santrallerin kuruluş yeri seçiminde bu tip dezavantajların olması yatırımcıları olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu dezavantajların ortadan kaldırılması için farklı yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu yöntemlerden biri Robust optimizasyon yöntemidir.

Robust optimizasyon, veri belirsizliğindeki optimizasyon problemleriyle başa çıkmak için önemli bir metodolojidir [18]. Eldeki verinin standart sapmasını minimize ederek en sağlam sonucu veren bu yöntem, güneşlenme süresi, ışınım şiddeti, rüzgâr hızı ve sıcaklık gibi önceden tahmin edilmesi güç olan parametreleri içeren modeller için kullanılabilir.

Bu çalışmada güneş enerjisi yatırımcıları açısından önemli olan santral verimi için bir model önerisinde bulunulmuştur. Model,

*Yazışılan yazar/Corresponding author

10 Temmuz 2012 tarihli, 28349 sayılı Resmi Gazete' de yayımlanan "Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgâr ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Teblig" de yer alan ölçülmesi zorunlu olan parametrelere göre belirlenmiştir. Önerilen model robust (sağlam) optimizasyon ve deterministik olarak sonuçları elde edilip, en uygun kuruluş yeri seçimi yapılması amaçlanmıştır.

2 Enerji kaynakları

Enerji sistemi, enerji tedarikçileri ve enerjiyi sonuna kadar kullanan teknolojilerden oluşur. Enerji sisteminin amacı, enerjinin sunduğu avantajları tüketicilere sunmaktır. "Enerji hizmetleri" terimi, evlerde aydınlatma, yemek pişirme, iç ortam ısıtma, soğutma ve nakliye gibi faydaları tanımlamak için kullanılır. Enerji hizmetleri adeta bütün ticaret ve endüstri hizmetleri için de gereklidir. Örneğin; endüstriyel süreçlerde ısıtma ve soğutma, tarım için hareket gücü ve telekomünikasyon ile elektronik cihazlar için de elektriğe ihtiyaç vardır.

Bu hizmetleri sunan enerji zinciri, bir veya birkaç adımda elektrik veya mazot gibi son kullanımlar için uygun olan enerji taşıyıcılarına dönüştürülebilir birincil enerjinin toplanması veya çıkarılması ile başlar. Enerji son kullanım donanımları (sobalar, ampuller, araçlar, makineler) nihai enerjiyi yararlı enerjiye dönüştürür ve istenen faydaları sağlar. Enerji hizmetleri, çeşitli teknolojilerin, altyapı (sermaye), emek (beceri), malzemeler ve birincil enerjinin birleşiminin bir sonucudur. Bu girdilerin her birinin bir fiyatı vardır ve kısmen birbirleri için ikame edilebilirler. Tüketicilere göre, hizmetlerden türetilen ekonomik değer veya yararlar konusu önemli bir konu olmuştur. Tüketiciler, genellikle, enerji hizmetleri üretmek için gerekli olan arama ve üretim faaliyetlerinden habersizdirler.

1995 yılında Amerika'da kişi başına birincil enerji tüketimi 330 gigajoule' du ve bu rakam ortalama bir Sahra altı Afrikalının (o yıl hem ticari hem de geleneksel enerji dâhil edildiğinde 40 gigajul kullanan) kullandığından sekiz kat daha fazladır. Az gelişmiş ülkelerdeki çoğu insan daha az kullanmaktadır.

Çoğu düşük gelirli gelişmekte olan ülkelerdeki küçük bir zengin azınlık, sanayileşmiş dünyadaki çoğu insanın yaptığı gibi çeşitli ticari enerji türlerini kullanır. Fakat düşük gelirli gelişmekte olan ülkelerdeki çoğu insan ise, havalandırması olmayan sobalar veya açık ateş ocakları gibi verimsiz teknolojileri kullanarak geleneksel, ticari olmayan enerji kaynaklarından yararlanmaktadır. Geleneksel enerji kaynakları genellikle enerji istatistiklerine yansımaz. Ticari olarak dağıtılan enerji kaynaklarının kişi başına tüketimi üzerine yapılan analiz yaygın bir veri toplama yöntemidir çünkü veriler daha kolaydır. Belgelendirilmesi zor olsa da, ticari olmayan enerji dünyada çok önemlidir ve birçok gelişmekte olan ülkenin, özellikle de en az gelişmiş ülkelerdeki kırsal alanlarda ticari enerjiden çok daha yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Küresel ticari enerji tüketim oranı Güneş'ten dünyaya akan enerjiden binlerce kez daha küçüktür. Birincil enerji tüketimi, toplam yakıt karışımının yaklaşık yüzde 80'ini temsil eden fosil yakıtlara (petrol, doğal gaz ve kömür) bağlıdır. Nükleer enerji, yüzde 6'dan biraz daha fazla katkıda bulunurken, yenilenebilir enerjilerin her biri yaklaşık yüzde 2 katkıda bulunmaktadır.

Dünya çapında geleneksel (çoğunlukla ticari olmayan) enerji, toplam yakıt karışımının yaklaşık yüzde 10'unu oluşturmaktadır. Ancak dağıtım düzensizdir. Ticari olmayan

enerji, sanayileşmiş ülkelerde enerji tüketiminin yüzde 2'sini, gelişmekte olan ülkelerde ortalama yüzde 30'unu oluşturmaktadır.

2.1 Yenilenebilir enerji kaynakları

Enerji, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji olarak ikiye ayrılmaktadır. Yenilenebilir olmayan enerjiler, doğanın yenileyebileceğinden daha hızlı tükenen enerjilerdir [8]. Günümüzde yenilenebilir olmayan enerji kaynakları kömür, petrol ve petrol ürünleri, doğal gaz ve uranyum/nükleer enerjidir [30]. Kömür, petrol, doğal gaz ve propan, fosil yakıtlar olarak kabul edilir, çünkü milyonlarca yıl önce yaşamış bitki ve hayvanların gömülü kalıntılarından oluşurlar ve onları oluşturmak için çok fazla zaman gerektiği için etkili bir şekilde yenisi konulamamaktadır [8],[23]. Uranyum (nükleer yakıt) fosil yakıt olarak görülmez, ancak yenilenebilir olmayan bir yakıttır. Yenilenemez enerjilerin aksine, yenilenebilir enerjiler yenilenebilir ya da sürdürülebilirdir [23]. Günümüzde en çok kullanılan yenilenebilir enerjiler; hidroelektrik (su), güneş, rüzgar, biyokütle ve jeotermal enerjilerdir [17],[31].

Yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan enerji kavramları açıklandıktan sonra, birincil enerji ve ikincil enerji kavramları şu şekilde açıklanabilir. Birincil enerji kaynakları, insanlar tarafından değiştirilmemiş (herhangi bir enerji dönüşümü olmamış) enerjilere denir. Bu kaynaklar, topraktan çıkarılan yakıtları (kömür, ham petrol veya doğal gaz) veya güneş enerjisi, rüzgar, biyokütle ve jeotermal gibi doğal kaynaklardan elde edilen veya depolanan enerjiyi içerir [23]. İkincil enerji kaynakları birincil kaynakların dönüşümünden elde edilir. Örneğin, ham petrolden benzin veya dizel yakıt çıkarılması ikincil enerjiye örnek verilebilir.

2.1.1 Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, güneş ışınımından elde edilmektedir. Güneş enerjisi, fotovoltaik (güneş pili) ve güneş-termal elektrik adında iki büyük dönüştürme teknolojisi ile üretilebilir. Güneş pili dönüşümü doğrudan fotovoltaik (güneş pili) hücreesindeki güneş ışığından elektrik üretir. Güneş-termal elektrik, gelen bir güneş radyasyonunun enerjisini bir ısı taşıyıcıya toplayarak ve daha sonra ısı taşıyıcısının ısınısını elektriğe dönüştürerek üretilir [16]. Daha sonra bu elektrik enerjisi invertörler ile alternatif akıma çevrilerek kullanılabilir hale gelmektedir.

Genel olarak, yenilenebilir enerji dört farklı pazarda (elektrik üretimi, ısıtma-soğutma, ulaşım yakıtları ve şebekeden bağımsız enerji hizmetleri) fosil ve nükleer yakıtların yerini almaktadır. Yenilenebilir kaynakların genellikle daha az kirlilik oluşturma ve yurtiçinde kullanılabilir olma avantajlarını sunduğu söylenmektedir [17]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir avantajı, yeşil enerji kaynakları olarak adlandırılarak kamuoyu tarafından kabul edilmesidir. Birçok çevreci, yenilenebilir enerjilerin geliştirilmesinde doğabilecek maliyet engellerinin yanında, neredeyse tamamen temiz, yenilenebilir bir enerji yakıtı dünyasını öngörmektedir. Büyük ölçekli bir dezavantajı ise, enerji yoğunluklu geniş ölçekli uygulamalarda kullanım için düşük enerji içeriğidir. Ayrıca, teknolojileri sermayeye yoğun, çoğu zaman yüksek inşaat maliyetleri ve düşük işletme maliyetleri ile fonun kullanılabilirliğine duyarlılık kazandırıyor.

2015 yılında küresel çapta güneş enerjisi ile 227 GW elektrik üretilmiştir. Güneş enerjisi gücü olarak en fazla kapasite sıralaması ise Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika olarak gerçekleşmiştir [13].

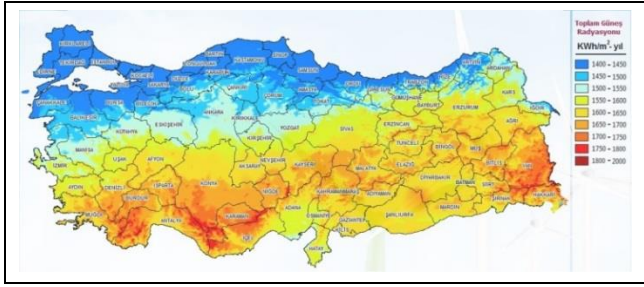
Türkiye’de 2010 yılına kadar evlerin çatılarında su ısıtma sistemleri olarak karşımıza çıkan güneş enerjileri günümüzde elektrik üretimi için de kullanılmaya başlanmıştır. 2015 yılında 249 MW elektrik üretimi yapılırken, 2016 yılında bu rakam 830 MW a kadar yükselmiştir [13].

2.1.1.1 Güneş enerji sistemlerinin verimliliğini etkileyen parametreler

Güneş panelleri çok sayıda güneş gözelerinin seri bağlantı ile bağlanmasıyla oluşturulur. Isı ve basınç yardımıyla birleştirilen bu gözeler, yalıtımlı olarak paketlenerek uzun yıllar (~25 yıl) etkili bir şekilde çalışır.

10 Temmuz 2012 tarihli, 28349 Sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan “Rüzgâr ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvuruları İçin Yapılacak Rüzgâr ve Güneş Ölçümleri Uygulamalarına Dair Tebliğ” ile güneş enerji santrali yapılması düşünülen alanda en az 6 ay süre ölçülmesi zorunlu olan parametreler şu şekildedir:

Global Radyasyon (Işınım): Yatay yüzeye düşen radyasyon miktarını ifade etmektedir. Radyasyon ölçüm cihazları ile ölçülen bu değer birimi ise W/m^2 ’dir. Enerji verimi hesaplamasında %100 etkili bir parametredir. Şekil 1’de Türkiye’nin radyasyon değerleri görülmektedir.



Şekil 1. Türkiye’nin Güneş radyasyon haritası.

Figure 1. The solar radiation map of Turkey

Güneşlenme Süresi: Yüzeye düşen direkt radyasyonun $1395 W/m^2$ ’den yüksek olan alanların süresini ifade etmektedir [15]. Enerji verimi hesaplamasında %100 etkili bir parametredir. Şekil 2’de Türkiye’nin güneşlenme süre değerleri görülmektedir.

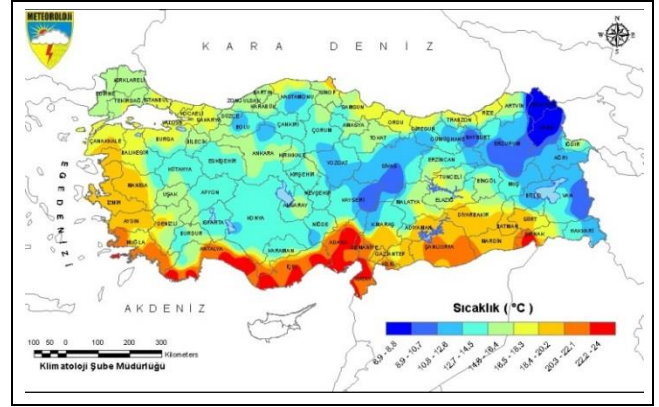


Şekil 2. Türkiye’nin güneşlenme süre haritası.

Figure 2. The sunbathing duration map of Turkey.

Sıcaklık: Santralin kurulacağı alana ilişkin sıcaklık değerini ifade eder. Kurulacak santralde kullanılacak PV panellerin ve inverter gibi ana ekipmanların verimlerine doğrudan etkileyen sıcaklığın değişimi, santralin enerji kazanım hesaplarının düşük belirsizlikle gerçekleştirilebilmesi için önemlidir. Hücre

nominal çalışma sıcaklığına (NOCT) bağlı olarak çalışan panellerde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’nin üzerindeki her $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık artışında verimlilik %0.30-%0.65 oranında azalmaktadır. Aynı şekilde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’nin altındaki her $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık azalışında ise verimlilik %0.30-%0.65 oranında artmaktadır [1],[27]. Şekil 3’te Türkiye’nin sıcaklık değerleri görülmektedir.



Şekil 3. Türkiye’nin sıcaklık haritası.

Figure 3. The temperature map of Turkey.

Bağıl Nem: Santralin kurulacağı alana ait bağıl nem değerleridir. Kurulacak ekipmanların nemden etkilenmemesi için bu parametreye dikkat edilmelidir. Ancak verimliliğe doğrudan etkisi bulunmamaktadır.

Rüzgâr Hızı: Güneş enerji santrali kurulacağı alana ilişkin rüzgâr hızı değerlerini ifade etmektedir. Kullanılması düşünülen mekanik yapının tasarlanması ve alandaki montaj şekline karar verilmesi için rüzgâr yükü hesaplarının gerçekleştirilebilmesi gereklidir. Ayrıca PV panellerde ve diğer ekipmanlarda oluşacak soğutmaya faydası vardır. Hücre nominal çalışma sıcaklığına (NOCT) bağlı olarak çalışan panellerde her 1 m/s hız artışında verimlilik %1-%3.5 oranında artacaktır [12],[27],[29].

Rüzgâr Yönü: Santral alanında esen rüzgârın geliş açısını belirtmektedir. Rüzgâr yüklerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ancak güneş enerji santrallerinde verimliliğe doğrudan etkisi bulunmamaktadır.

3 Kuruluş yeri seçimi

Enerji sistemi, Kuruluş yeri, üretim faaliyetlerinin gerçekleştiği coğrafi alanlar olarak tanımlanmaktadır [6]. Kuruluş yeri seçimi ise üretim faaliyetlerinin optimal ve minimum maliyetle gerçekleşeceği alanı seçme işlemi olarak tanımlanabilmektedir [10]. Enerji santralleri gibi yüksek maliyetli faaliyet alanlarının kuruluş yeri seçimi yatırımcılar açısından önem arz etmektedir.

4 Literatür özeti ve ilgili çalışmalar

Gençoğlu (2002), çalışmasında Türkiye’nin, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği ve potansiyeli bakımından zengin bir ülke olduğunu belirtmiştir. Ülkemizin, jeotermal enerjide dünya potansiyelinin %8’ine sahip olduğunu, ayrıca coğrafi konumu nedeniyle büyük oranda güneş enerjisi aldığını, hidrolik enerji potansiyeli açısından da dünyanın sayılı ülkelerinden olduğunu ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin de yaklaşık 160 TWh olarak tahmin edildiğini belirtmiştir. Çalışmada her bir yenilenebilir enerji kaynağının Türkiye’deki potansiyelinden bahsederek, ülkemizin bu alana yatırımları arttırması gerektiğini belirtmiştir [11].

Bilgen ve diğ. (2004), insanların gelecekte artan enerji ihtiyaçlarının nasıl karşılanabileceği ve hatta nasıl temiz ve güvenilir bir enerji ile karşılanabileceği sorunu üzerine değinmişlerdir. Özellikle Kyoto toplantısında karbondioksit emisyonlarının sınırlandırılması için yapılan anlaşmaya vurgu yaparak incelemelerde bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda hidroelektrik, biyokütle dönüşümü, jeotermal, güneş enerjisi teknolojisi, rüzgâr enerjisi dönüşümü ve artan fotovoltaik kullanımındaki başarı ve ilerlemeyi anlatarak 2030 yılına kadar ihtiyaç duyulan enerjinin bu tip yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir [7].

Panwar ve diğ. (2011), yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarında Dünyamızı kirleten karbondioksit salınımının azaltılması üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çalışma sonucunda tarımsal ürünlerin güneşte kurutulması, geleneksel dizel yakıt yerine bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel kullanılması ve biyokütle gazlarının kullanılması ile yakıt tasarrufu yapılması gibi önerilerle sera gazı salınımı ve karbondioksit salınımının azaltılabileceğini belirtmişlerdir [25].

Atılgan (2000), çalışmasında ülkemizin enerji potansiyelini inceleyerek gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere göre kıyaslamalarda bulunmuştur. Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarına olan talepleri ve bu enerji kaynaklarının üretimi konusunda bilgiler vermiştir. Ülkemizin yenilenebilir olmayan enerji kaynakları konusunda kapasitesinin neredeyse hiç olmadığını ancak buna karşın yenilenebilir enerji kaynakları açısından kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda ikincil enerji kaynağı olan elektriğe olan ihtiyacın gitgide artacağını belirterek, bu yönde çalışmalara hız verilmesini önermiştir [3].

Liang ve Liao (2007), çalışmalarında rüzgâr ve güneş enerji sistemleri için üretim planlama problemini ele almışlardır. Rüzgâr ve güneş enerji santrallerinde enerji üretimi için gerekli olan parametrelerin değerlerindeki belirsizliğine karşı en uygun üretim planını programlamak için bulanık küme optimizasyonunu kullanarak bir model önerisinde bulunmuşlardır. Önerdikleri model ışığında her birim için uygun bir programa ulaşıldığını belirtmişlerdir [19].

Altıntop ve Erdemir (2013), çalışmalarında Türkiye'deki güneş enerjisi ile ilgili gelişmelerden bahsetmişlerdir. Türkiye'de 2004 yılına kadar güneş enerjisinden ısıl uygulamalar için kullanım varken, 2004 yılından itibaren kullanımı gittikçe düşerek daha çok elektrik üretimi için kullanımına döndüğünü belirtmişlerdir. Özellikle lisanssız güneş enerji santrallerinin 0.5 MW kapasiteden 1 MW kapasiteye artırılması ve YEK Kanunu ile açıklanan fiyat ile 10 yıllık satın alma garantisinin verilmesi ile güneş enerjisinden elektrik üretimine ilginin arttığını söylemişlerdir [2].

Özçakar ve Bastı (2012), çalışmasında kuruluş yeri seçiminde, hizmet veren tesisler ile talep noktaları arasındaki taşıma maliyetini minimize etmeyi amaçlamıştır. Maliyetleri minimize etmek için meta sezgisel algoritmalarından parçacık sürü optimizasyonu, diferansiyel gelişim algoritması ve yapay arı kolonisi algoritmalarını kullanmıştır. Harcanan toplam zamana göre en başarılı algoritma parçacık sürü optimizasyonu olurken, yapay arı kolonisi algoritması ikinci sırada, diferansiyel gelişim algoritması son sırada yer almıştır [24].

Aydın (2013), çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi santrali için kuruluş yeri seçimi problemini ele almıştır. Optimal kuruluş yeri seçiminde Bulanık TOPSIS ve VIKOR yöntemlerini kullanmıştır. Ele almış olduğu kriterler ve

alternatifler arasında en uygun yatırım bölgesinin İzmir olduğu sonucunda ulaşmıştır [5].

Keleş (2014), çalışmasında işletmelerin kuruluş yeri için teknokent seçiminde en uygununun tespitini amaçlamıştır. Bu amaçla kuruluş yeri seçiminde önem verdikleri kriterleri ağırlıklarını AHP ile belirledikten sonra Electre III yöntemi ile kuruluş yeri seçimlerini belirlemiştir. Yapmış olduğu analiz sonucunda ODTÜ Teknokent'in genel olarak yüksek puan aldığı ve kuruluş yeri tercihinde ilk sırada geldiğini belirtmiştir [14].

Righetto ve diğ. (2016) çalışmalarında, kırtasiye şirketlerinin nakit yönetimi problemindeki kararları desteklemek için karma tamsayılı doğrusal programlama ve robust optimizasyona dayanan etkili bir optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Zaman içindeki finansal akışları tanımlayan parametrelerde belirsizliği olan bir ortamda şebeke kazançları ve kayıplardaki sorunu ele almışlardır. Karar vericiyi risk ve getiri arasındaki değiş tokuş ile ilgili olarak desteklemek için bu robust optimizasyon yaklaşımını uygulayarak çeşitli sonuçlar ve analizler sunmuşlardır. Bu yaklaşımın, diğer yaklaşımlardan daha iyi çözümler üretebildiğini göstermişlerdir [26].

Zokae ve diğ. (2016), afetlerde yardım operasyonlarının önemi nedeniyle belirsizlik altında insancıl lojistiği desteklemeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Tedarikçilerden, yardım dağıtım merkezlerinden ve etkilenen alanlardan oluşan üç seviyeli bir yardım zinciri modelini ele almışlardır. Önerilen model, yardım zincirinin toplam maliyetlerini en aza indirmeye çalışırken, etkilenen alanlarda insanların ihtiyaçlarına ulaşmadaki memnuniyet düzeyini en üst düzeye çıkarmaktadır. İran'ın Alborz bölgesindeki deprem felaketi sonrasında elde edilen bir veri seti ile önerilen robust yardım zinciri modelinin etkinliğini deterministik formuna göre test etmişlerdir. Çalışma sonucunda robust optimizasyon kullanılarak oluşturulan modelin, deterministik modele göre daha etkin olduğuna ulaşmışlardır [30].

Wang ve diğ. (2016), rüzgâr enerjisi entegrasyonu ve fiyatlara cevap veren talebin neden olduğu önemli ölçüde artan belirsizlikler nedeniyle, gün öncesi piyasasında ekonomik dağıtımın yeni zorluklarla karşı karşıya kaldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında yeni bir aktif robust optimizasyon gönderme modeli önermişlerdir. Önerilen model, tüm olası rüzgâr enerjisi koşullarını göz önünde bulundurarak, fiyatı duyarlı talebin etkilerini ortaya çıkarmak için dinamik optimizasyonla robust optimizasyonu birleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen aktif robust optimizasyon gönderme modelinin etkin olduğunu tespit etmişlerdir [28].

Modarres ve Izadpanahi (2016), enerji planlaması için talep ve üretim kapasitesini göz önünde bulundurarak toplu bir planlama modeli geliştirmişlerdir. Model, işletme maliyetini, enerji maliyetini ve karbon salınımını en aza indiren üç nesnel işlevli doğrusal bir programdır. Belirsiz girdi verilerinin etkilerini yenmek için, bu modele robust optimizasyon yaklaşımını uygulamışlardır. Amaç fonksiyon parametrelerindeki belirsizliği göz önünde bulundurarak, belirsizlik bütçeleri ile optimal değerler arasındaki ilişkiye dair bazı görüşler sunmuşlardır. Ayrıca, ürün taleplerindeki belirsizlik konusunda, deterministik çözümlerden daha iyi performansla sahip robust çözümler üretmişlerdir. Sonuç olarak, enerji maliyetlerinin toplam maliyetlerin %21 ini oluşturduğunu göstermişlerdir [22].

Literatürde enerji santrali kuruluş yeri seçimine dair çalışmalar incelendiğinde robust optimizasyon yöntemi kullanılarak

enerji üretim tesisi kuruluş yerinin belirlenmesi ile ilgili çalışma mevcut değildir.

5 Yöntem

Birçok optimizasyon uygulamasında, problem verilerinin kesin olarak bilindiği varsayılmaktadır. Ancak, bu uygulamada pek de karşılaşılabilen bir durum değildir. Gerçek veriler, rastgele olmaları, ölçüm hataları veya diğer nedenlerden dolayı belirsizliğe maruz kalırlar. Bir optimizasyon probleminin çözümü genellikle Ben-Tal ve Nemirovski'nin gösterdiği gibi veri bozulmalarına karşı yüksek hassasiyet gösterdiğinden, veri belirsizliğini göz ardı etmek, pratik olmayan uygulamalar için yetersiz veya mümkün olmayan çözümlere yol açabilir [18].

Robust optimizasyon, veri belirsizliğindeki optimizasyon problemleriyle başa çıkmak için önemli bir metodolojidir. Bu tür bir yöntemin birinci aşamasında belirsiz bir alanda belirleyici bir veri seti tanımlanmış ve ikinci aşamada verilen sette veri belirsizliğinin herhangi bir şekilde gerçekleştirilmesi için mümkün olan en iyi çözüm elde edilmiştir. Karşılık gelen ikinci aşama optimizasyon problemine ise robust eşdeğer optimizasyon problemi denir. Robust optimizasyonun tercih edilmesinin önemli bir sebebi de, birçok uygulamada veri setinin uygun bir parametre belirsizliği olduğu, parametre belirsizliğinin stokastik olmadığı veya dağılımın bilinmediği durumlar için kullanılabilir olmasıdır [18].

Robust eşdeğer optimizasyonla ilgili en eski makalelerden biri, Soyster' in çalışmasıdır. Bu çalışma ile verilerdeki basit karışıklıkların olduğunu düşünen ve elde edilen çözümün tüm olası karışıklıklar altında uygulanabilir olması için orijinal lineer programlama probleminin yeniden yapılandırılmasını bulmayı amaçlamıştır. Bununla birlikte, bu yaklaşım en konservatiftir, çünkü tüm potansiyel gerçekleştirmelere karşı uygulanabilirlik sağlar. Soyster' in bu yaklaşımında belirsiz parametreler belirli bir aralıkta dağılım göstermektedir. Sağlamlık ve performans arasında değişime izin verecek bir mekanizma sağlanması son derece arzu edilir. Ayrıca bu modele en kötü durum analizi adı verilmektedir [18].

5.1 Robust optimizasyon modelleri

Enerji, Robust optimizasyon genel olarak ikiye ayrılmaktadır. Senaryo tabanlı robust optimizasyon, deterministik modelin doğrusal yapıdan doğrusal olmayan yapıya dönüştürülmesi ile oluşturulmaktadır. Bu dönüşüm ile problem daha karmaşık bir yapı haline dönüşerek, hesaplaması zor bir yapı haline gelmektedir. Diğer robust optimizasyon ise küme tabanlıdır [9].

Küme tabanlı robust optimizasyon modellerinde parametrelerin belirsizlik kümelerinde yer aldığı varsayılmaktadır. Bu modellerin çözümünde kullanılan yöntem, belirsizlik kümesinde yer alan parametrelerin en kötü değerleri için en uygun çözümü sunmaktadır [9].

Belirsizlik kümelerinin seçimi ve robust eşdeğer problemin kurulması, robust optimizasyonun temel iki aracını oluşturmaktadır. Verideki belirsizliklerin tanımlanması bu kümenin seçimi ile mümkün olmaktadır. Bu küme genelde sınırlandırılmış konveks bir küme olup, belirsiz parametrenin mümkün tüm değerlerini içinde barındırmaktadır. Belirsizlik kümelerine göre farklı robust eşdeğer problemler oluşacağı için belirlenecek olan küme çok fazla önem arz etmektedir [21].

Belirsiz doğrusal optimizasyon problemleri aşağıdaki gibi ifade edilecek olursa;

$$\begin{aligned} \max_x \quad & \sum_j \tilde{c}_j x_j \\ \sum_j \quad & \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i \end{aligned} \quad (1)$$

Yeni bir z değişkeni eklenerek robust eşdeğer problem aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned} \max z \\ z - \sum_j \tilde{c}_j x_j & \leq 0 \\ \tilde{b}_i x_0 + \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j & \leq 0 \\ x_0 & = -1 \end{aligned} \quad (2)$$

Burada yer alan; \tilde{c}_j , \tilde{a}_{ij} , \tilde{b}_i belirsiz parametrelerdir.

- \tilde{c}_j , $[\underline{c}_j, \bar{c}_j]$ aralığında değer olarak kendi ortalaması $E(\tilde{c}_j)$ etrafında simetriktir bir dağılıma sahiptir,
- Amaç vektörünün tanımlanan değeri sıfırdan farklıdır,
- \tilde{b}_i , $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$ aralığında dağılım gösteren bağımsız rassal değişkenlerdir,
- \tilde{a}_{ij} , $[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ aralığında değerler alır ve Eşitlik 3 ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{ij} & = a_{ij} + \varepsilon_{ij} \hat{a}_{ij} \quad \forall_j \in J_i \\ \tilde{b}_i & = b_i + \varepsilon_{i0} \hat{b}_i \\ \tilde{c}_j & = c_j + \varepsilon_j \hat{c}_j \end{aligned} \quad (3)$$

a_{ij} , c_j ve b_i , parametrenin nominal değerleri,

\hat{a}_{ij} , \hat{b}_i ve \hat{c}_j , pozitif sabit dalgalanmaları,

J_i , belirsizlik bulunan katsayıların değişken indeksini içeren alt kümeyi,

ε_{ij} ve ε_{i0} belirsizliğe maruz kalan rastlantı değişkenlerini ifade etmektedir. Belirsizliğe maruz kalan rassal değişkenler $[-1,1]$ aralığında dağılmaktadır. Belirsiz parametreler, belirsizlik kümesinde yer alan bir oynaklığı sahiptir. En uygun çözümün elde edilmesi için bu belirsizliğe karşı bir dayanıklılık kazandırılmalıdır. Bu sayede belirsizlik kümesinde yer alan tüm değerler için en uygun sonuca ulaşılabilmektedir.

5.1.1 Aralık (Kutu) belirsizlik kümesi

Robust eşdeğer problemlerin modellenmesinde belirsizlik kümelerinin seçiminin önemli olduğundan daha önce bahsetmiştik. Belirsizlik kümeleri farklılaştıkça modellerde farklılaşmaktadır. En çok kullanılan belirsizlik kümelerinden biri de aralık (kutu) belirsizlik kümesidir. Parametrelerdeki belirsizlikleri ε rastlantı vektörü kullanılmaktadır.

Belirsiz veri vektörünü ∞ olarak seçersek, aralık;

$$U_\infty = \{\varepsilon \mid \|\varepsilon\|_\infty \leq \Psi\} = \{\varepsilon \mid |\varepsilon_j| \leq \Psi, \forall_j \in J_i\} \quad (4)$$

olarak belirlenir. Burada Ψ aralık belirsizlik kümesinin genişliğini kontrol eden ayarlama parametresidir. Eğer belirsiz parametre, $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}] \forall_j \in J_i$ aralığında sınırlanmış ise, belirsizlik $\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \varepsilon_j \hat{a}_{ij}$ eşitliğine dönüşmüş olur. Aralık

belirsizlik kümesinde $\Psi=1$ olarak alındığında, $(U_\infty = \{\varepsilon ||\varepsilon_j| \leq 1, \forall_j \in J_i\})$ aralık belirsizlik kümesinin özel bir durumu ele alınmış olur. Bu durumda aralık belirsizlik kümesi bütün belirsizlik uzayını karşılamış olur.

Amaç fonksiyonu parametrelerinde belirsizlik olma durumunda doğrusal model (1) No.lu ifadedeki gibi;

$$\max_x \sum_j \tilde{c}_j x_j$$

$$\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_i$$

ile ifade edilir. Amaç fonksiyonunda belirsiz parametreler olduğunda yeni bir karar değişkenini amaç fonksiyonu olarak tanımlayıp, bu değişkenin değeri maksimize edilir. (2) No.lu ifadedeki gibi tanımlanan bu z karar değişkeninin hesaplanacak olan değeri, doğrusal modeldeki amaç fonksiyonu olan $\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j$ değerinden daha küçük olacaktır. Bunun sebebi, robust optimizasyonun verilerdeki belirsizliklere karşı koruma sağlamasındadır. Bu koruma sebebiyle yeni amaç fonksiyonu değerinin daha küçük elde edilmektedir. (2) No.lu ifadedeki model tekrar yazılacak olursa;

$$\max z$$

$$z - \sum_j \tilde{c}_j x_j \leq 0$$

$$\tilde{b}_i x_0 + \sum_j \tilde{a}_{ij} x_j \leq 0$$

$$x_0 = -1$$

olur. Amaç fonksiyonu değerlerindeki belirsizlikler aralık belirsizlik kümesi olarak tanımlanıp model şu şekilde oluşturulur.

$$\max z$$

$$z - \sum_j c_j x_j + \sum_{j \in J_0} \hat{c}_j |x_j| \leq 0$$

$$\sum_j a_{ij} x_j + \left[\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + \hat{b}_i |x_0| \right] \leq b_i \quad \forall i$$

$$x_0 = -1$$

Bu eşitsizlik $x_0 = -1$ eşitlik kısıtı kaldırılıp, mutlak değer ifadeleri de u değişkeni eklenerek yeniden (6) No.lu ifadedeki gibi yazılabilir [4].

$$\max z$$

$$z - \sum_j c_j x_j + \sum_{j \in J_0} \hat{c}_j |x_j| \leq 0$$

$$\sum_j a_{ij} x_j + \left[\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + \hat{b}_i \right] \leq b_i$$

$$-u_j \leq x_j \leq u_j$$

6 Uygulama

Uygulama için araştırma modelinde yer alacak parametreler, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonu belirlenecektir.

6.1 Modelde yer alacak parametreler

Güneş enerji santrallerinin verimini etkileyen birçok parametre bulunabilmektedir. Bunlar; santral tipi, panel tipi, arazi eğimi, kablolama çeşidi, güneşlenme süresi, ışınlam değeri, rüzgâr hızı, sıcaklık, invertör tipi ve kurulum seti vb. gibi. Bunlar arasında değerlerinde belirsizliğe sahip olan güneşlenme süresi, ışınlam değeri, rüzgâr hızı ve sıcaklık parametreleridir. Diğer parametrelerin verime etkisi genellikle bilinmektedir. Bu sebeple güneşlenme süresi, ışınlam değeri, rüzgâr hızı ve sıcaklık parametreleri dışındaki parametreler, santral kurulumu düşünülen alanlar için sabit olarak kabul edilmiştir.

6.2 Araştırmanın modeli

Araştırma modelinde Güneş enerji santrali için resmi gazetede yer alan ölçülmesi zorunlu olan parametrelerden güneşlenme süresi (T), ışınlam şiddeti (R), rüzgâr hızı (W) ve sıcaklık (S) değerleri yer almaktadır. Burada bağıl nem parametresine bakılmamasının sebebi verime olan katkısının neredeyse hiç olmamasındadır. Araştırma modelinde yer alan parametreler kuruluş yeri seçimi için kriterler olarak belirlenmiştir. Bu kriterlerden güneşlenme süresi (T), ışınlam şiddeti (R) ve rüzgâr hızı (W) verimi pozitif etkilediği için maksimize edilirken, sıcaklık (S) verime negatif etkilediği için minimize edilmiştir. Yani $Max Z_1$ ve $Min Z_2$ ye göre kuruluş yeri için seçim yapılacaktır.

Model kurulurken rüzgâr hızı ile sıcaklık katsayılarının verime katkısı için alt ve üst sınırları bulunduğu için hem alt sınır hem de üst sınıra göre verim değerleri hesaplanacaktır. Kurulacak yere ait verim için alt ve üst sınırları hesaplanacaktır.

Kuruluş yeri seçimi için alternatifler ise Meteoroloji Genel Müdürlüğünden verileri eksiksiz olarak alınabilen Erzincan, Erzurum ve Sivas il merkezleri olmak üzere toplam 3 il olarak belirlenmiştir. Bu iller şekil 1, 2 ve 3 bakıldığında güneşlenme süresi, ışınlam değeri ve sıcaklık açısından optimal iller arasındadır.

Araştırma modelinde $i \in I = \{1, 2, \dots, 20\}$ olmak üzere 1999-2018 arasındaki yılları kapsayan sınıfı, $j \in J = \{1, 2, \dots, 12\}$ olmak üzere 1 - 12 arasındaki ayları kapsayan sınıfı ve $k \in K = \{1, 2, 3\}$ olmak üzere sırasıyla Erzincan, Erzurum, Sivas illerini kapsayan sınıfı temsil etmektedir.

Karar değişkeni;

$$X_k: k. \text{ şehre kurulacak tesis}$$

Amaç fonksiyonu;

$$Max Z_1 = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} W_{ijk}) X_k, k \in K$$

$$Min Z_2 = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (S_{ijk}) X_k, k \in K$$

Alt sınır;

$$Max Verim_{alt\ sınır} = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} (1 + (0,01 W_{ijk})) (1 - (0,0065 (S_{ijk} - 20)))) X_k, k \in K$$

Üst sınır;

$$\begin{aligned} \text{Max Verim}_{\text{üst sınır}} = & \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} (1 + (0,035 W_{ijk}))) (1 \\ & - (0,003(S_{ijk} - 20))) X_k, k \in K \end{aligned}$$

Amaç fonksiyonu katsayıları;

T_{ijk} : k. şehrin i. yılındaki j. ayına ait güneşlenme süresi (saat)

R_{ijk} : k. şehrin i. yılındaki j. ayına ait ışınlam şiddeti (W/m^2)

W_{ijk} : k. şehrin i. yılındaki j. ayına ait rüzgar hızı (m/s)

S_{ijk} : k. şehrin i. yılındaki j. ayına ait ortalama sıcaklık değeri ($^{\circ}C$)

Kısıtlayıcılar;

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 &= 1 \\ X_k &= 0, 1 \\ R_{ijk} &> 0 \\ W_{ijk} &> 0 \\ T_{ijk} &> 0 \end{aligned}$$

6.3 Modelin çözümleri

Modelin çözümü hem deterministik olarak hem de sosyter (en kötü durum senaryosu) yaklaşımına göre robust optimizasyon ile çözülecektir.

6.3.1 Modelin Soyster yaklaşımına göre robust çözümü

Sosyter yaklaşımına göre robust optimizasyon çözümü aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

Amaç fonksiyonu;

$$\begin{aligned} \text{Max Verim}_{\text{alt sınır}} \\ \text{Verim} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} (1 + (0,01 W_{ijk}))) (1 - (0,0065(S_{ijk} - 20))) X_k \\ + \Psi \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (\widehat{T}_{ijk} \widehat{R}_{ijk} (1 + (\widehat{0,01} W_{ijk}))) (1 - (0,0065 \widehat{S}_{ijk} - 20)) X_k \\ \leq 0, k \in K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Max Verim}_{\text{üst sınır}} \\ \text{Verim} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} (1 + (0,035 W_{ijk}))) (1 - (0,003(S_{ijk} - 20))) X_k \\ + \Psi \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (\widehat{T}_{ijk} \widehat{R}_{ijk} (1 + (\widehat{0,035} W_{ijk}))) (1 - (0,003 \widehat{S}_{ijk} - 20)) X_k \\ \leq 0, k \in K \end{aligned}$$

$$\text{Max } Z_1$$

$$\begin{aligned} Z_1 - \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (T_{ijk} R_{ijk} W_{ijk}) X_k + \Psi \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (\widehat{T}_{ijk} \widehat{R}_{ijk} \widehat{W}_{ijk}) X_k \\ \leq 0, k \in K \end{aligned}$$

$$\text{Min } Z_2$$

$$Z_2 - \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (S_{ijk}) X_k - \Psi \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} (\widehat{S}_{ijk}) X_k \leq 0, k \in K$$

Kısıtlayıcılar;

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 &= 1 \\ X_k &= 0, 1 \\ R_{ijk} &> 0 \\ W_{ijk} &> 0 \\ T_{ijk} &> 0 \end{aligned}$$

6.3.2 Modelin deterministik çözümü

Modelin deterministik olarak çözümü excel programı ile çözülmüştür.

Hem deterministik hem de robust sonuçlar aşağıdaki Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. Kuruluş yeri tercihi için Max Z_1 değerleri.

	Min Z_1		
	Deterministik Çözüm	Robust Çözüm	Fark (%)
Erzincan	98852653.91	98685256.89	0.169
Erzurum	237483974.90	236869138.20	0.258
Sivas	101470897.20	101573302.60	0.164

Tablo 1'e bakıldığında kuruluş yeri seçimi için güneşlenme süresi, ışınlam değeri ve rüzgâr değerlerinin her iki çözüm için de maksimum olduğu yer Erzurum ili olmuştur. Bu ili sırasıyla Sivas ve Erzincan illeri takip etmiştir.

Tablo 2. Kuruluş yeri tercihi için Min Z_2 değerleri.

	Min Z_2		
	Deterministik Çözüm	Robust Çözüm	Fark (%)
Erzincan	2809.20	3086.70	-9.878
Erzurum	1337.40	1177.48	11.957
Sivas	2367.90	2717.25	-14.754

Tablo 2'ye bakıldığında kuruluş yeri seçimi için sıcaklık değerinin her iki çözüm için de minimum olduğu yer Erzurum ili olmuştur. Bu ili sırasıyla Sivas ve Erzincan illeri takip etmiştir.

Max Z_1 ve Min Z_2 değerlerine bakıldığında dal-sınır algortiması ile çözümüne göre Güneş enerji santrali için en uygun ilin Erzurum ili olduğu tespit edilmiştir. Bu ili sırasıyla Sivas ve Erzincan illeri takip etmiştir.

Tablo 3'e bakıldığında illerin verimlilik için alt ve üst sınırları görülmektedir. Buna göre Erzurum ilinde modelin deterministik çözümü için verimlilik 83950724.10 ile 87591854.81 değerleri arasında gerçekleşirken, robust çözüm için de 83416034.92 ile 87065524.19 değerleri arasında gerçekleşmiştir. Verimlilik alt sınırı için çözümler arasında %0.636'luk bir fark oluşurken, verimlilik üst sınırı için çözümler arasında %0.600'lük bir fark oluşmuştur.

Tablo 3. Kuruluş yeri tercihi için *Max Verimlilik Alt ve Üst Sınır* değerleri.
Table 3. *Max Efficiency Low and High Limit values for establishment location preference.*

	<i>Max Gerçekleşen Değer Alt Sınır</i>			<i>Max Gerçekleşen Değer Üst Sınır</i>		
	Deterministik Çözüm	Robust Çözüm	Fark (%)	Deterministik Çözüm	Robust Çözüm	Fark (%)
Erzincan	74992767.91	74227195.49	1.020	76824959.73	76098883.95	0.945
Erzurum	83950724.10	83416034.92	0.636	87591854.81	87065524.19	0.600
Sivas	85921344.43	85010235.70	1.060	87322547.11	86456955.00	0.991

Sivas ilinde modelin deterministik çözümü için verimlilik 85921344.43 ile 87322547.11 değerleri arasında gerçekleşirken, robust çözüm için de 85010235.70 ile 86456955.00 değerleri arasında gerçekleşmiştir. Verimlilik alt sınırı için çözümler arasında %1.060'lık bir fark oluşurken, verimlilik üst sınırı için çözümler arasında %0.991'lik bir fark oluşmuştur.

Erzincan ilinde modelin deterministik çözümü için verimlilik 74992767.91 ile 76824959.73 değerleri arasında gerçekleşirken, robust çözüm için de 74227195.49 ile 76098883.95 değerleri arasında gerçekleşmiştir. Verimlilik alt sınırı için çözümler arasında %1.020'lik bir fark oluşurken, verimlilik üst sınırı için çözümler arasında %0.945'lik bir fark oluşmuştur.

7 Sonuç ve öneriler

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, su vb. çeşitliliğin çok olması açısından tercih edilmeye başlanmıştır. Ayrıca bu enerji kaynaklarının üretimi için gerekli olan hammaddenin doğa tarafından sağlanması ile maliyetlerinin olmaması en önemli avantajlarından birisidir. Elbette bu enerjinin üretilmesi için santrallerin kurulması gerekmektedir. Bu santraller de oldukça maliyetlidir. Ortalama olarak bir santralin kuruluş maliyetlerinin amorti edilmesi 5-6 yıl sürmektedir. 1MW'lık güneş enerjisi santralının ortalama maliyeti 2-2.5 milyon Euro civarındadır [20]. Günümüz kuruyla yaklaşık 12-15 milyon lirayı bulmaktadır. Bu kadar yüksek maliyetli santrallerin kuruluş yerinin belirlenmesi de önemli bir sorun olmaktadır.

Bu çalışmada güneş enerjisi kuruluş yeri seçimi problemi için bir model önerilmiştir. Güneş enerjisi santrallerinin verimini önemli derecede etkileyecek olan güneşlenme süresi, ışınım değeri, rüzgâr hızı ve sıcaklık parametreleri dikkate alınarak model önerisi sunulmuştur. Modelde yer alan parametrelerin değerlerinin gelecekte nasıl olacağı belirsizdir. Bu sebeple veri setindeki belirsizliğe karşı koruma sağlayan robust optimizasyon ile çözümler elde edilmiştir. Ayrıca yer seçimi için güneş enerjisi santralının verimini pozitif etkileyecek olan güneşlenme süresi, ışınım değeri ve rüzgâr hızının maksimum olduğu ve negatif etkili olan sıcaklık değerinin minimum olduğu yer belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada Erzincan, Erzurum ve Sivas illeri arasında en uygun yerin seçilmesi için model deterministik olarak ve robust optimizasyon ile çözülmüştür. Her iki çözüme göre en uygun il Erzurum olarak belirlenirken, elde edilebilecek maksimum verim için farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Deterministik çözüme göre verim 83950724.10 ile 87591854.81 arasında bulunurken, robust çözüme göre verim 83416034.92 ile 87065524.19 arasında bulunmuştur. İki çözüm arasında yaklaşık olarak %0.618 lik bir fark bulunmuştur. İkinci sırada yer alan Sivas ili için deterministik çözüme göre verim 85921344.43 ile 87322547.11 arasında bulunurken, robust çözüme göre verim 85010235.70 ile 86456955.00 arasında bulunmuştur. Sivas ili için iki çözüm arasında yaklaşık

%1.025'lik bir fark bulunmuştur. Son sırada yer alan Erzincan ili için deterministik çözüme göre verim 74992767.91 ile 76824959.73 arasında bulunurken, robust çözüme göre verim 74227195.49 ile 76098883.95 arasında bulunmuştur. Erzincan ili için iki çözüm arasında yaklaşık %0.982'lik bir fark bulunmuştur.

Robust optimizasyon ile elde edilen çözümünün deterministik çözümden daha az çıkması beklenen bir durumdur. Çünkü, robust optimizasyon verideki belirsizliğe karşı bir koruma sağlayarak en kötü durum için bile bir çözüm üretmektedir.

Güneş enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları santrallerinin kurulumu ve işletim maliyetleri oldukça yüksek olduğundan kuruluş yeri seçimleri önem arz etmektedir. Çalışma kuruluş yeri seçimi için robust optimizasyonun kullanılarak çözüme ulaşılması açısından bir ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca en kötü şartlar altında santralin verimliliği ve kuruluş yeri hakkında bilgi vermesi yatırımcılar açısından önemlidir.

Bu çalışma ışığında diğer yenilenebilir enerji kaynakları kuruluş yeri seçimleri de belirlenebilir. Parametre değerlerinin enerji santrali kurulması düşünülen sahalarda ölçümü yapılarak, daha net sonuçlara ulaşılması sağlanabilir.

8 Conclusion and recommendations

Renewable energy sources including solar, wind, water, etc. have started to be preferred in terms of their diversity. In addition, the fact that the raw materials required for the production of the energy sources are provided by nature itself and don't have any costs is one of the most important advantages of them. Of course, power plants need to be installed to generate this energy. These power plants are also very costly. On average, it takes 5-6 years to pay for the establishment costs of a power plant. The average cost of a 1MW solar power plant is around 2-2.5 million Euros [20]. This cost corresponds approximately to 12-15 million Turkish Liras regarding the current exchange rates. Thus, it is crucial to determine the location of such high-power plants.

In this study, a model is proposed for the problem of choosing solar installation location. This model is suggested by bearing in mind the sunshine duration, radiation value, wind speed, and temperature parameters which significantly affect the efficiency of solar power plant. For this reason, solutions have been obtained with robust optimization that protects against uncertainty in the data set. In addition, the location where sunbathing duration, radiation value, and wind speed deemed to affect the efficiency of the solar power plant in a positive way and the location where temperature value deemed to affect the efficiency of the solar power plant negatively is minimum are aimed to be determined.

In the study, the model has been solved deterministically and with robust optimization in order to choose the most suitable location between Erzincan, Erzurum and Sivas. While the most

suitable province for both solutions is determined as Erzurum, different results have been obtained for the maximum efficiency that can be achieved. According to the deterministic solution, the efficiency has been found between 83950724.10 and 87591854.81 whereas it has been between 83416034.92 and 87065524.19 according to the robust optimization. A difference of approximately 0.618% has been found between these two solutions. According to the deterministic solution for Sivas, which is in the second rank, it has been observed between 85921344.43 and 87322547.11 while it has been between 85010235.70 and 86456955.00 according to the robust solution. A difference of approximately 1.025% has been observed between these two solutions for Sivas. According to the deterministic solution Erzincan, which is in the last rank, efficiency has been between 74992767.91 and 76824959.73 while the efficiency obtained from robust solution has been between 74227195.49 and 76098883.95. A difference of approximately 0.982% has been found between these two solutions for Erzincan.

Robust optimization solution is expected to come out less than the deterministic solution due to the fact that robust optimization provides a protection against uncertainty in the data and even a solution for the worst case.

Since the installation and operating costs of other renewable energy power plants such as solar energy are quite high, determination of the location for these solar powers requires great importance. This study keeps its originality in becoming a first in literature in terms of applying robust optimization to and reaching a final solution by using it for location selection. Moreover, it is important for investors that this method provides information about the efficiency and location of the plant under the worst conditions.

In the light of this study, other edible energy sources locations can be determined. More precise results can be achieved by measuring the parameter values at the location where the power plant is planned to be established.

9 Kaynaklar

- [1] Abd-Elhady MS, Serag Z, Kandil HA. "An innovative solution to the overheating problem of PV panels". *Energy Conversion and Management*, 157, 452-459, 2018.
- [2] Altuntop N, Erdemir D. "Dünyada ve Türkiye'de güneş enerjisi ile ilgili gelişmeler". *Engineer & the Machinery Magazine*, 54(639), 69-76, 2013.
- [3] Atılğan İ. "Türkiye'nin enerji potansiyeline bakış". *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 31-47, 2000.
- [4] Apaydın A, Kazancık LB. "Robust optimizasyon ile türkiye elektrik enerjisi modeli". *TISK Academy/TISK Akademi*, 12(23), 76-97, 2017.
- [5] Aydın Y. Bulanık Topsis ve Vikor Yöntemi Kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Santral Yer Seçimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [6] Barutçugül İ. *Üretim Sistemi ve Yönetim Teknikleri*, Bursa, Türkiye, Uludağ Üniversitesi Yayınları, 1988.
- [7] Bilgen S, Kaygusuz K, Sari A. "Renewable energy for a clean and sustainable future". *Energy Sources*, 26(12), 1119-1129, 2004.
- [8] Cassedy ES, Grossman PZ. *Introduction to Energy*, Cambridge, UK, Cambridge U. Press, 1998.
- [9] Düzgün R. Robust Optimization With Multiple Ranges and Chance Constraints. PhD Thesis, Lehigh University, Pennsylvania, USA, 2012.
- [10] Ertuğrul İ, Karakaşoğlu N. "Comparison of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for facility location selection". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(7-8), 783-795, 2008.
- [11] Gençoğlu MT. "Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye açısından önemi". *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(2), 57-64, 2002.
- [12] Kaldellis JK, Kapsali M, Kavadias KA. "Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations, Experience obtained from outdoor measurements in Greece". *Renewable Energy*, 66, 612-624, 2014.
- [13] Karagöl ET, Kavaz İ. "Renewable energy in the world and Turkey". *Journal of Seta Foundation*, 4(197), 5-32, 2017.
- [14] Keleş MK. İşletmelerin Teknokent Seçiminde Hiyerarşik Electre Yönteminin Kullanımı ve Ankara Bölgesinde Bir Uygulama. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2014.
- [15] Kökey İ. "Güneş enerji santrallerinin kurulumunda güneş ölçümünün önemi ve Türkiye'de Yasal Mevzuat". VIII. *Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Kocaeli, Türkiye, 26-28 Eylül 2013.
- [16] Kruger P. *Alternative Energy Resources: The Quest for Sustainable Energy*. 1st Ed. New Jersey, USA, Wiley, 2006.
- [17] Kubasek NK, Silverman GS. *Environmental Law*, 8th Ed. New York, USA, Pearson, 2014.
- [18] Li Z, Ding R, Floudas CA. "A comparative theoretical end computational study on robust counterpart optimization: 1. robust linear optimization and robust integer linear optimization". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(18), 10567-10603, 2011.
- [19] Liang RH, Liao JH. "A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems". *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1665-1674, 2007.
- [20] Mevlana Kalkınma Ajansı. "Karapınar İlçesi'nde Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Tesisi Yatırımları için Enerji İhtisas Endüstri Bölgesi Kurulmasına Yönelik Fizibilite Çalışması Raporu". Konya, Türkiye, 117, 2012.
- [21] Moazeni M. Flexible Robustness in Linear Optimization. PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2006.
- [22] Modarres M, Izadpanahi E. "Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach". *Journal of Cleaner Production*, 133, 1074-1085, 2016.
- [23] Ngô C, Natowitz J. *Our Energy Future: Resources, Alternatives and The Environment*, 2nd ed. New York, USA, Wiley, 2009.
- [24] Özçakar, N, Bastı, M; "P-Medyan kuruluş yeri seçim probleminin çözümünde parçacık sürü optimizasyonu algoritması yaklaşımı". *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 41(2), 241-257, 2012.
- [25] Panwar NL, Kaushik, SC, Kothari S. "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524, 2011.
- [26] Righetto GM, Morabito R, Alem D. "A robust optimization approach for cash flow management in stationery companies". *Computers & Industrial Engineering*, 99, 137-152, 2016.
- [27] Vasel A, Iakovidis F. "The effect of wind direction on the performance of solar PV plants". *Energy Conversion and Management*, 153, 455-461, 2017.

- [28] Wang X, Jiang C, Li B. "Active robust optimization for wind integrated power system economic dispatch considering hourly demand response". *Renewable Energy*, 100(97), 798-808, 2016.
- [29] Yerli B. İstanbul İklim Şartlarında Meteorolojik Parametrelerin PV (Fotovoltaik Pil) Elektrik Üretimi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [30] Zokaee S, Bozorgi-Amiri A, Sadjadi SJ. "A robust optimization model for humanitarian relief chain design under uncertainty". *Applied Mathematical Modelling*, 40(17-18), 7996-8016, 2016.
- [31] U.S. Energy Information Administration. "Renewable & Alternative Fuels". <https://www.eia.gov/> (20.10.2018).