

# Enerjide Optimizasyon Uygulamaları: Bir Literatür Araştırması

## Optimization Models in Energy: A Literature Review

Beyzanur ÇAYIR ERVURAL<sup>1\*</sup>, Bilal ERVURAL<sup>2</sup>, Ramazan EVREN<sup>3</sup>

### ÖZET

Enerji ülkeler için öncelikli kalkınma hedefleri arasındadır. Değişen çevre koşulları ve iklim şartları enerji ihtiyacının karşılanması noktasında ülkeleri çıkmaza sokmaktadır. Hızla artan enerji talebinin karşılanmasında enerjinin düşük maliyetli, sürdürülebilir ve güvenilir olması gerekmektedir. Enerji bütün sektörlerin vazgeçilmez girdisi olduğundan bu alanda yapılacak iyileştirmeler tüm sektörleri doğrudan etkiler. Dolayısıyla bu alanda yapılacak optimizasyon uygulamalarına ihtiyaç vardır. Enerji disiplinler arası bir uygulama alanına sahiptir. Bu yüzden farklı mühendislik problemlerinin entegrasyonu optimizasyon uygulamalarını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada enerji sahasında yapılan araştırmalar endüstri mühendisliği bakış açısıyla incelenerek enerjide optimizasyon gerekliliği vurgulanmıştır. Bu açıdan enerji problemleri karar seviyesi, uygulama alanı ve enerji türü bakımından sınıflandırılmış ve ele alınan optimizasyon problemleri model yapıları ve çözüm yöntemleri açısından incelenmiştir. Bu çalışmanın gelecek araştırmalar için alt yapı oluşturacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, yenilenebilir enerji kaynakları, optimizasyon, karar verme.

### ABSTRACT

Energy is one of the priority development objectives for the countries. Changing environmental and climate conditions force countries to meet their energy needs. Energy should be low-cost, sustainable and reliable to meet the rapidly rising demand. Since energy is a substantial input for all sectors, improvements in this area directly affect the sectors. Therefore, there is a need for optimization applications to be performed in this subject. Energy has an interdisciplinary application area, so the integration of different engineering problems requires optimization applications. In this study, optimization problems of energy field are discussed, and energy problems are classified by decision level, application area and energy type. In addition, the related literature is analysed with regard to model structures and solution methods. The paper provides an overview of the applications of energy optimization techniques in order to guide researchers studying in this area.

**Keywords:** Energy, renewable energy sources, optimization, decision making..

## 1. GİRİŞ

Enerji planlaması, yerel, bölgesel hatta küresel enerji sisteminin geleceğine rehberlik etmek amacıyla uzun soluklu politikaların geliştirilme sürecidir. Küreselleşme, hızla nüfusun artması, ülkelerin kalkınmak için sanayileşme çabaları sonucunda enerjiye ve doğal kaynaklara olan talep büyük artış sergilemektedir. Uluslararası Enerji Ajansı dünya birincil enerji talebinin 2007-2030 yılları arasında %40 oranında artacağına işaret etmektedir. Yıllık ortalama %1,5 düzeyinde talep artışına karşılık gelen bu durumun dünya birincil enerji talebi 2007 yılındaki 12 milyar Ton Eşdeğer Petrol (TEP) düzeyinden 2030 yılında 16,8 milyar TEP düzeyine ulaşacağı yapılan araştırmalarla gösterilmektedir.

Enerji üretim kaynakları ana enerji kaynakları ve yenilenebilir(alternatif) enerji kaynakları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ana enerji kaynaklarında su enerjisine hidrolik, kömür, petrol ve gaz enerjisine termik, çekirdek enerjisine de nükleer enerji denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, alternatif enerji kaynağı olarak da kabul edilebilir ve şu şekilde örneklendirilmektedir: Rüzgar, güneş, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle, dalga gücü, güneş pilleri. Burada dikkat edilmesi gereken nokta alternatif enerji kaynaklarının ana enerji kaynakları yerine ikame edilememesidir. Çünkü ana enerji kaynaklarının en önemli kriterinden birisi olan "süreklilik" ilkesini alternatif enerji kaynakları sağlamakta başarısız olabilmektedir.

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, cayirb@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, bervural@itu.edu.tr

<sup>3</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, evrenr@itu.edu.tr

Ana enerji kaynaklarının oluşturduğu sera gazları, küresel ısınmaya yol açmaktayken alternatif enerji kaynaklarında ise maliyetin yüksek oluşu, bilinmeyen risk düzeyleri ve uygun tesis yerinin seçimi gibi problemler belirsizliklere yol açmaktadır. Bu sorunlar ülkelerin öz kaynaklarını etkin biçimde kullanmamasına yol açmakta ve enerjide optimizasyon uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde sürdürülebilirliğin sağlanması ve doğal dengenin korunması enerji sistemlerinin optimal şekilde planlanması (işlenmesi, dağıtılması ve kullanılması) ile mümkündür (TMMOB, 2012).

Jebaraj ve Iniyen (2006) enerji planlama modelleri hakkında geniş bir literatür çalışması yapmışlar ve tahmin modelleri, enerji arz-talep modelleri, optimizasyon modelleri ve emisyon azaltma modelleri olarak kronolojik olarak değerlendirmişlerdir. Enerji planlamasında yer alan üç modelden bahsetmişlerdir. Kleinpeter (1995) toplam enerji talebine karar vermede kullanılan göstergeleri şöyle sunmuştur:

- i. Enerji talep modelleri: enerji talebini sektör bazında endüstriyel, konutsal ve ulaştırma sektörlerinde araştırmışlardır.
- ii. Enerji arz modelleri: öngörülen bir değerde enerji talebini tahmin etmektedir.
- iii. Bir diğeri de, enerji arz ve talebini birlikte ele alan modellerdir.

Enerji konusunda ülkelerin yaptıkları ciddi yatırımlar bu sektörün öncelikli olduğunu göstermektedir. Çoğu enerji kaynağı iklim şartlarına bağlıdır bu yüzden tasarım, planlama ve kontrol süreçlerinde optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan enerji problemlerinin matematiksel modelleri incelenerek problemlerin güçlüğü, modelin uygulanabilirliği ve içerdiği kısıtlarla enerji optimizasyon modelleri sınıflandırılmıştır. Literatürde yer alan çalışmaların çoğunlukla yenilenebilir enerji planlaması, elektrik kullanım planlaması, en uygun enerji alternatifi seçimi, enerji kaynağı atanması, enerji yönetim inşası ve proje planlama konuları üzerine olduğu görülmektedir. Bu açıdan bu alanla ilgili çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla karar verme konusunda araştırmaların yer aldığı gözlenmiştir. Enerji kararları alınırken uygulanan tek/çok amaçlı karar verme, çok kriterli karar verme, karar destek sistemi ve belirsizlik altında karar verme yöntemlerini ele alan çalışmalar incelenmiştir. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) en yaygın kullanılan Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniğidir. Daha sonra PROMETHEE, ELECTRE ve TOPSIS yöntemleri

gelmektedir (Zhou vd., 2006). Enerji sektöründe uygulanan optimizasyon yöntemleri her enerji tipi için ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir. Çalışmalarda geleneksel yaklaşımlar ve meta sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır ancak hesaplama karmaşasından dolayı geleneksel optimizasyon yöntemleri ile optimal çözümü bulmak oldukça zordur. Meta sezgisel yöntemlerin çoğunlukla kullanılmasının nedeni enerji problemlerinin NP-zor olması ve karmaşık yapıdaki modeller için makul sürede çözüm sunmasıdır. Bu çalışmada literatürde yapılmış çalışmalar ele alınan başlıklarla incelenerek eksiklikler tespit edilmiştir. Çalışmanın bu alanda çalışan araştırmacılar ve gelecek çalışmalar için kaynak olacağı öngörülmektedir.

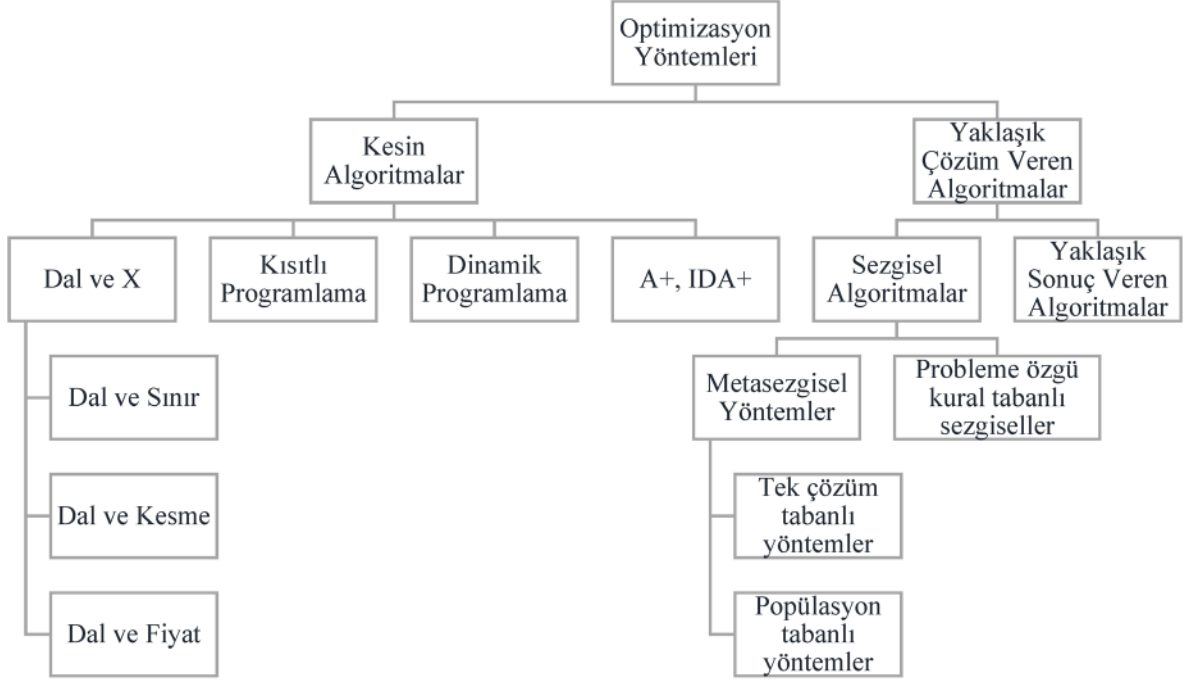
## 2. ENERJİ SEKTÖRÜNDE OPTİMİZASYON

Çoğu enerji kaynağı iklim şartlarına bağlıdır bu yüzden enerjinin tasarım, planlama ve kontrol aşamasında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Enerji sektörü disiplinler arası bir uygulama alanına sahiptir. Farklı mühendislik problemlerinin entegrasyonu optimizasyon uygulamalarını gerekli kılmaktadır. Enerji problemleri karmaşık, belirsizliği yüksek ve çok fazla paydaşa hizmet vermeye çalışmaktadır. Kısıtlı şartlar altında karar verilir. Çok sayıda karar değişkeni ve parametre içerdiğinden teknik karmaşıklığı yüksek ve çözümü zor problemlerdir.

Enerji problemlerinde bir çok amaç aynı zamanda iyileştirmeye çalışıldığından iyi bir optimizasyon sahasıdır, dolayısıyla yöneylem araştırması uygulama alanına girmektedir. Enerjide optimizasyon çalışmaları giderek artan trend sergilemektedir (Baños vd., 2011). Enerji verimliliği artırma, enerjide karar verme, enerji yatırım ve planlaması, enerji tesis yeri seçimi, en uygun enerji alternatifi seçilmesi, enerji kaynağı atanması, enerji yönetim inşası ve proje planlama, enerji kaynağının güvenilirliği gibi problemler literatürde enerjinin optimizasyon uygulamaları kapsamında incelenmektedir. Dünya genelinde enerjiye olan talebin hızlı artışı,

- i. dağıtım ağlarının genişletilmesinde
- ii. uygun maliyetlerle yenilenebilir enerji kaynaklarının uzun dönemli planlanmasında ve tasarımında optimizasyon çalışmalarına ihtiyacı doğurmaktadır.

Şekil 1'de verilen optimizasyon yöntemleri genel olarak enerjide kullanılan yöntemler olup detayları ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır.



Şekil 1: Optimizasyon yöntemleri (Talbi, 2009)

### 3. ENERJİ PROBLEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Bu bölümde enerji problemleri enerji türlerine, uygulama alanlarına ve karar seviyelerine göre sınıflandırılmıştır.

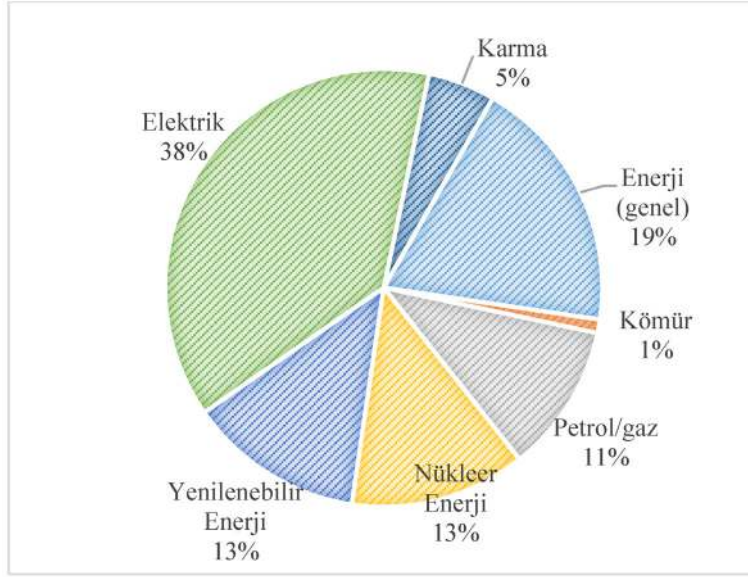
#### 3.1. Enerji Türüne Göre Sınıflandırma

Enerji problemleri enerji türlerine göre altı ana kategoride ele alınmıştır (Zhou vd., 2006). Bunlar;

- Genel: Enerji tedarik ve talebine odaklanır, özel bir enerji kaynağı ile ilgilenmez.
- Katı yakıtlar: Başlıca katı yakıtlar odun ve maden kömürleridir. Linyit, taş kömürü, kok kömürü ve antrasit diğer katı yakıtlardan bazılarıdır.
- Petrol/Gaz: Petrol ve petrol ürünleridir. Gaz yakıtlar, sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG), doğal gaz ve hava gazı gibi yakıtlardır.

- Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Temel yenilenebilir enerji kaynakları rüzgar, güneş, jeotermal, hidrolik ve biyokütledir.
- Nükleer Enerji Kaynakları: Nükleer reaktörler nükleer enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Temel olarak fisyon sonucu açığa çıkan nükleer enerji, nükleer yakıt ve diğer malzemeler içerisinde ısı enerjisine, bu ısı enerjisi de kinetik enerjiye ve daha sonra da jeneratör sisteminde elektrik enerjisine dönüştürülür.
- Elektrik: Mekanik veya kimyasal enerjinin veya ısı enerjisinin elektriğe dönüştürülmesiyle elde edilen ve tüketicilerin kullanımına sunulan enerjidir.

Şekil 2'de enerji türlerine göre yapılan çalışmaların payları verilmiştir.



Şekil 2: Enerji türlerine göre yapılan çalışmalar (Zhou vd., 2006)

### 3.2. Uygulama Alanına Göre Sınıflandırma

Uygulama alanı bakımından Enerji yedi ana başlık altında ele alınmaktadır (Zhou vd., 2006).

- Enerji politikası analizi: Enerji politikası formülasyonu ve gelişimine rehberlik eden enerji sistem değerlendirmesidir. Enerji sistemleri değerlendirme, enerji politikasında kamu borcu, enerji dönüşüm stratejileri, enerji kaynağı atama konularını kapsar.
- Elektrik güç planlaması: Güç üretimi esnasındaki stratejik planlama konularıyla ilgilenir. Güç iletimi ve dağıtımı, güç üretimi genişletme planlaması, elektrik iletim ağı, güç dağıtım planlaması konularıyla ilgilenir.
- Teknoloji seçimi ve proje değerlendirme: Enerjiyle ilgili yatırım projelerinin değerlendirilmesi, enerji teknolojilerinin seçimi ve değerlendirilmesini içerir. Elektrik tedarik projelerinin seçimi ve değerlendirilmesidir.
- Enerji fayda işlemleri ve yönetimi: Enerji endüstrisindeki operasyonel konularla ilgilenir. Enerji teklifi, fiyatlandırma, santral yer seçimi ve enerji şirketlerinin yönetimi konuları bu kapsamda değerlendirilir.
- Enerjiyle alakalı çevre politikaları analizi: İklim politikası değerlendirme, yeşil-ev ısınma üzerine kamuoyu araştırmaları, hava kirliliği kontrol politikası gibi konularla ilgilenmektedir.

- Enerjiyle ilgili çevresel kontrol ve yönetim: Katı atık yönetimi, atık depoları değerlendirme, ana kalkınma projeleriyle ilgili çevresel atıklar bu kapsamda yer almaktadır.
- Diğer: Yukarıda yer alan konulara girmeyen problemlerdir.

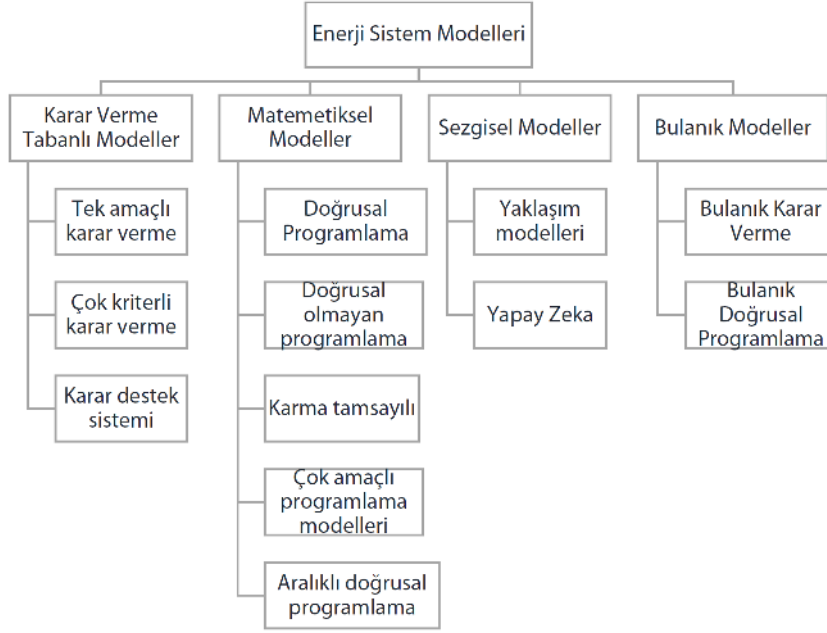
### 3.3. Karar Seviyesi Bakımından Sınıflandırma

Karar seviyesi bakımından enerji problemleri iki ana başlık altında incelenebilir (Zhou vd., 2006).

- Stratejik/politik (S/P) Makro konular: Enerji yatırım kararı, enerji politikası analizi, enerji dönüşümü gibi uzun dönemli kararları içeren çalışmalardır.
- Operasyonel/taktiksel (O/T) Operasyonel konular: Kısa vadeli kalkınma hedefleri, teklif, fiyatlandırma gibi çalışmalar bu kapsamda değerlendirilir.

## 4. ENERJİ SİSTEM MODELLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Literatürde enerji sektöründe yapılan çalışmalar arasında en yaygın olanları enerji planlama modelleri, enerji kaynakları dağıtım planlaması ile ilgili olanlardır. Genellikle karma tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımıyla ele alınmışlardır. Bu bölümde enerji sektöründe kullanılan matematiksel modeller ile enerji kararlarının verilmesinde kullanılan karar verme modellerinden bahsedilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelenerek Şekil 3'te enerji sistem modelleri için bir sınıflandırma önerilmiştir.



**Şekil 3:** Enerji sistem modellerinin sınıflandırılması (Baños vd., 2011; Iqbal vd., 2014)

Tablo 1’de yenilenebilir enerji problemlerinde yer alan girdiler, kısıtlar ve amaç fonksiyonları gösterilmiştir (Iqbal vd., 2014).

**Tablo 1:** Yenilenebilir enerjide yaygın kullanılan girdiler, kısıtlar ve amaçlar (Iqbal vd., 2014)

<b>Girdiler</b>	<b>Çözümü araştırılan konular</b>
Yenilenebilir enerji kaynak, birim, tip ve sayısı	Toplam üretilen enerji
Kullanılan arazi miktarı	Üretim birim kapasite ve sayısı
Atmosfer koşulları	Toplam yatırım
Yenilenebilir enerji kaynağı birim teknolojisi	Yenilenebilir enerji kaynağının ömrü
Operasyon çeşidi	İşlem ve bakım maliyeti
İşlem ömrü	Yenilenebilir enerji kaynağının güvenilirliği
Etkinlik	Beklenen kar
Operasyon ve bakım maliyeti	Tahmin edilen arazi kullanımı
Meteoroloji şartları	Yenilenebilir enerji kaynağı birimlerinin en iyi karışımı
Yenilenebilir enerji kaynak birimlerinin coğrafi yerleşimleri	Yenilenebilir enerji kaynağı açılımı/yerleşimi
Özel girdilerle ilgili yenilenebilir enerji kaynakları	Yenilenebilir enerji kaynağı ile ilgili özel değişkenler
<b>Kısıtlar</b>	<b>Amaçlar</b>
Çevresel/atmosfer kısıtları	<b>En küçükleme (Minimizasyon)</b>
Talep/yük yönetim kısıtları	Sistem toplam maliyeti
Ekonomik/bütçe kısıtları	Birim başına üretilen enerji maliyeti
Pillerin depolama kapasitesi	Arazi alanı
Şarj ve boşaltma kısıtları	Yatırım
Karbondioksit emisyon kısıtları	Toplam bakım maliyeti
Sosyal/düzenleyici kısıtlar	Gürültü ve kirlilik emisyonu
Güç kaybı olasılık kısıtı	Enerji tedariki kayıp olasılığı
Bileşenlerin yaşam ömrü kısıtı	<b>En büyükleme (Maksimizasyon)</b>
Yenilenebilir enerji kaynak birimlerinin güç oran kısıtı	Termal verimlilik
Dağıtım hatlarında maksimum güç akış limit	Toplam güç üretimi
Yenilenebilir enerji kaynakları için kullanılan arazi boyutu	Sistem güvenilirliği
Üretim birimleri	Kar
Enerji kısıt maliyeti	Yaşam süresi
Yenilenebilir enerji kaynağı ile ilgili özel kısıtlar	Toplam gelir
	Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili özel amaçlar

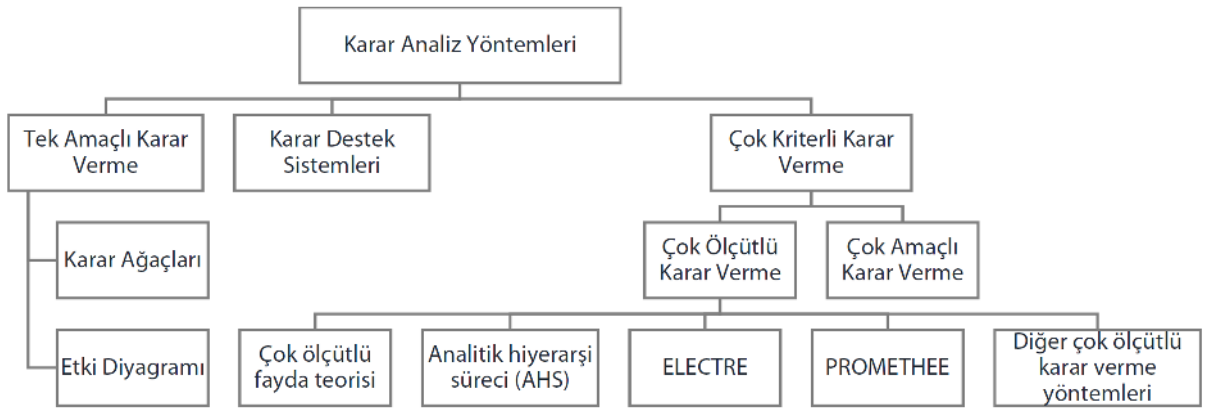
#### 4.1. Karar Verme Tabanlı Modeller

Karar verme tabanlı modeller tek amaçlı karar verme, çok kriterli karar verme ve karar destek sistemleri olarak sınıflandırılabilir (Zhou vd., 2006).

- Tek amaçlı karar verme : Tek amaç altında mevcut alternatiflerin değerlendirilmesi için bir yöntemler sınıfıdır.
- Çok kriterli karar verme: Birden fazla kriter altında karar vericilerin alternatifleri sıralamasına veya arasından en iyiyi seçmeye yardımcı olur. Kararlar birbiriyle çelişen çok sayıda kriter arasından uzlaşılarak yada

ödünleşmeye dayanılarak verilir. Çok amaçlı karar verme (ÇAKV) ve çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) bu model türünün iki alt sınıfıdır.

- Karar Destek Sistemleri (KDS): Modelleri veri tabanlarını ve diğer karar yardım araçlarını bütünleştiren etkileşimli esnek ve uyarlanabilir yazılım araçlarını ifade eder. KDS çözümü güç yapılandırılmamış ve karmaşık karar problemlerinin çözümüne destek sağlar. Geleneksel KDS de uygun parametre ve modelleri seçmek için kullanıcılar uzman bilgisine bağımlıdır. Şekil 4'te karar verme tabanlı modeller sınıflandırılmıştır.



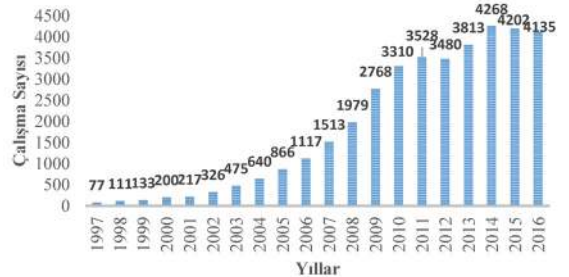
Şekil 4: Karar analizi metodlarının sınıflandırılması (Zhou vd., 2006)

#### 4.2. Matematiksel Modeller

Modeller sınıflandırıldığında çalışmalarda yer alan en yaygın modeller şunlardır (Taha, 2007):

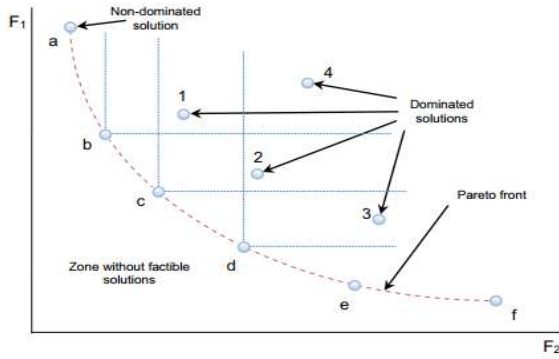
- *Doğrusal programlama modelleri*: Bir doğrusal amaç fonksiyonun doğrusal eşitlikler ve eşitsizlikler kısıtlamaları ile optimizasyon yapılmasıdır.
- *Doğrusal olmayan modeller*: Karar modelinin kısıtlarından en az biri veya amaç fonksiyonunun doğrusal olmadığı durumlar için geliştirilen modellerdir.
- *Karma tamsayı modeller*: Modeldeki değişkenlerin bazıları tamsayı, bazıları kesirli ise karma tamsayı modelleme kapsamında değerlendirilir.
- *Çok amaçlı programlama modelleri*: Birden çok ve birbiriyle çelişen amaçları içeren model türüdür. ÇAKV karar vericilere farklı amaçlar için farklı faydalar arasında ödünleşmeyi esas alır ve öncelikli olanı seçer (Savic, 2002).

Çoğu gerçek mühendislik problemlerinde genellikle maliyetin azaltılması, performansın artırılması, güvenilirliğin artırılması gibi çoklu amaçlar yer alır. Bu noktada ÇAKV artan karmaşıklıkta enerji yönetimi problemlerinde etkin çözümler sunar. Scopus veritabanı incelendiğinde son yıllarda araştırmacıların ÇAKV'e olan ilgisinin arttığını görebiliriz (Şekil 5).



Şekil 5: Son 20 yılda ÇAKV konusunda yapılan çalışmalar (Scopus, 2016)

- *Aralıklı doğrusal programlama*: Model katsayılarının tümünün veya bir kısmının kapalı reel sayı aralıkları olarak verilmesi halinde optimal çözüme ulaşmaktadır.
- *Pareto optimizasyon yaklaşımları*: Pareto temelli yaklaşımlar birden fazla amacın olduğu problemler için baskın ve baskın olmayan çözümleri seçim şemasının pareto optimalliğine dayandırarak uygun çözüm sunan yaklaşımlardır. İlk olarak Goldberg tarafından önerilmiştir (1989). Şekil 6'da pareto optimizasyon yaklaşımı gösterilmiştir.



**Şekil 6:** Çok amaçlı evrimsel bir algoritma için pareto optimizasyon yaklaşımı (Dufo-López vd., 2011)

Matematiksel yöntemleri çözüm yöntemleri açısından dört başlıkta inceleyebiliriz (Taha, 2007; Turkyay, 2006):

- *Simpleks yöntemi*: Grafik yöntemin uygulanamayacağı çok değişkenli doğrusal programlama problemlerinin çözümünde yaygın biçimde kullanılan bir uç nokta arama algoritmasıdır.
- *Lagranj gevşetmesi*: Çözümü güç tamsayılı doğrusal programlama problemlerinde bazı kısıtların duali alınarak bunların lagranj çarpanı olarak amaç fonksiyonuna ceza değeri olarak ekleyen modellerdir.
- *Dinamik programlama*: Dinamik programlama, n değişkenli bir problemin optimum çözümünü problemi n aşamaya ayrıştırarak ve her aşamada tek değişkenli bir alt problemi çözerek belirler.
- *Dal sınır algoritmaları*: Dal-sınır algoritması tamsayılı değişkenlerin alabileceği tamsayılar kümesindeki en küçük ve en büyük değerler arasında herhangi bir reel sayıyı alabilecek

şekilde gevşetilmesiyle elde edilen problemlerin çözümü esasına dayanır.

### 4.3. Sezgisel Modeller

Optimizasyonda kesin yöntemlerin tersine sezgisel yöntemler optimal çözümü garanti etmezler. Sezgisel yöntemlerin kullanılmasında bazı nedenler söz konusudur (Bakır ve Altunkaynak, 2003; Talbi, 2009):

- Sezgisel yöntemler kesin bir formülasyonu ve çözüm yöntemi olmayan problemler için kullanılır.
- Problem için kesin çözüm yöntemleri olsa bile büyük ölçekli problemler için yoğun hesaplama gereklilikleri ve çözüm zamanı bakımından sıkıntı söz konusu olduğunda, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda sezgisel yöntemler tercih edilebilir.
- Sezgisel yöntemler aynı zamanda dal ve sınır çözüm yönteminde optimal çözümün sınırlarını hesaplamak için kullanılabilir.

Literatür incelendiğinde enerji alanında Yapay Sinir Ağları (YSA), Genetik Algoritmalar (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Tavlama Benzetimi, Karınca Koloni Algoritması (KKA) ve hibrid modellere rastlanmaktadır.

### 4.4. Bulanık Mantık Temelli Modeller

Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanan bir matematiksel disiplindir. Bulanık mantık doğrusal olmayan, karmaşık, modellemesi güç ve bilgilerin, niteliklerin belirsiz veya kesin olmadığı durumlarda kullanılan başarılı bir metottur (Tiryaki ve Kazan, 2007). 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan bir makalede bulanık mantık veya bulanık küme kuramı adı altında ortaya konulmuştur. Kullanılan modeller şöyledir (Suganthi vd., 2015):

- Bulanık modeller* (a) bulanık delphi (b) bulanık regresyon (c) bulanık gri tahmin (d) bulanık AHS (e) bulanık Analitik Ağ Süreci (AAS) (f) bulanık kümeleme
- Hibrid modeller* (a) sinirsel bulanık, uyarlanabilir sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) (b) bulanık GA, sinirsel bulanık GA (c) bulanık uzman sistem, sinirsel bulanık uzman sistem (d) bulanık KDS (e) bulanık Veri Zarflama Analizi (VZA), sinirsel bulanık VZA
- Çok kriterli karar modelleri* (a) bulanık VIKOR (b) bulanık TOPSIS (c) bulanık destek vektör makinesi (d) bulanık PSO (e) bulanık arı kolonisi

optimizasyonu (f) bulanık guguk kuşu arama optimizasyonu (g) bulanık kuantum PSO (h) bulanık KKO.

#### 4.5. Belirsizlik Modelleri

Şekil 7'de belirsiz parametreler için geliştirilmiş bazı belirsizlik modelleme metotları verilmiştir. Bu yöntemler arasındaki temel fark, girdi parametrelerinin belirsizliği tanımlamak için kullanılan farklı tekniklerle uyumudur. Örneğin, stokastik yöntemler olasılık yoğunluk fonksiyonunu kullanırken bulanık mantık belirsiz bir parametreyi tanımlayan üyelik fonksiyonlarını kullanır. Bunların benzerliği, girdi parametrelerinin modelin çıktıları üzerindeki etkinliğini ölçebilmektir.

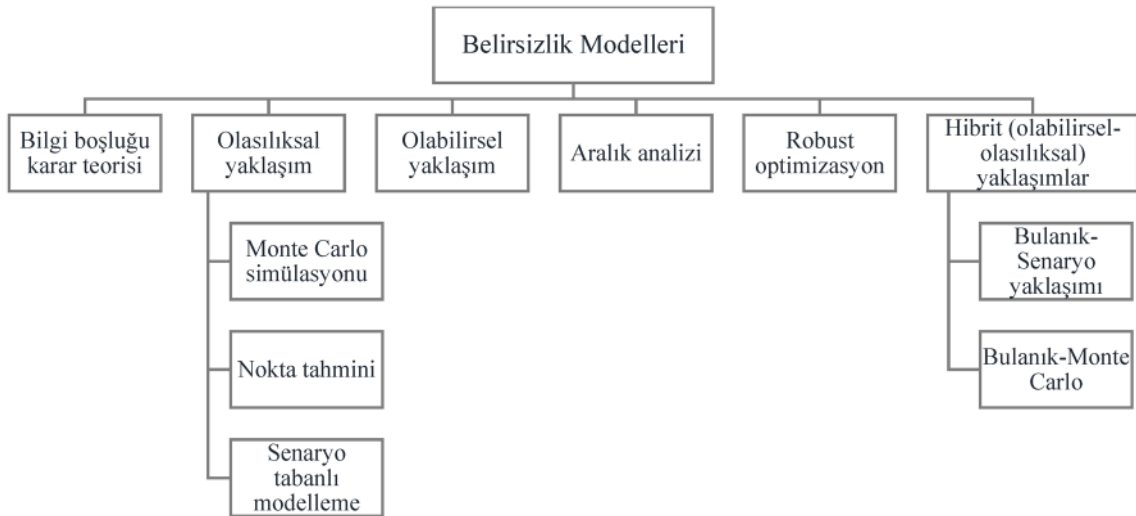
*Olasılıksal yaklaşım:* Stokastik programlamada ilk olarak Dantzing (1955) tarafından önerilmiştir.

Bu modelin girdi parametreleri, bilinen bir olasılık yoğunluk fonksiyonu ile rastgele değişkenler olduğu varsayılmaktadır.

*Olabilirselyaklaşım:* Lotfi A. Zadeh, 1965 tarafından tanıtılmıştır. Modelin girdi parametrelerini üyelik fonksiyonu kullanılarak açıklamıştır.

*Hibrid olabilirselyaklaşım:* Hem rassal hem olasılıklı parametreler modelde mevcuttur.

*Bilgi boşluğu karar teorisi (IGDT):* Yakov Ben-Haim, 1980 tarafından ilk kez önerilmiştir. Metotta girdi parametreleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu ya da üyelik fonksiyonu yoktur. Bilinmeyenler karşısında beklenen sonuçları maksimize edecek faaliyetlerin seçilmesiyle dinamikliği maksimize, başarısızlığı minimize etmeyi amaçlamaktadır (Ben-Haim, 2006).



Şekil 7: Enerji sistemlerinde belirsizlik altında karar verme (Soroudi ve Amraee, 2013)

*Robust optimizasyon:* Belirsizlik kümeleri, girdi parametrelerinin belirsizliğini tanımlamak için kullanılır. Bu teknik kullanılarak belirli bir kümede verilen belirsiz parametrelerin kullanılmasıyla en kötü durum için elde edilen kararlar optimal kalmaktadır (Bertsimas ve Sim, 2004).

*Aralık analizi:* Ramon E. Moore, (1966) tarafından ilk kez tanıtılmıştır. Bilinen bir aralıkta belirsiz parametrelerin alınmasına dayanmaktadır. Olasılıksal modellemeye düzgün olasılık yoğunluk fonksiyonu ile benzetmektedir.

*Z Sayısı (Z-Number):* Bulanık mantığın kurucusu Zadeh (2011) tarafından bulanık sayıların yeni bir sınıfı olarak ortaya konulmuştur.  $Z=(A, B)$ , klasik bulanık sayılarla karar verici sadece Z'nin davranışını

tanımlayan A koşuluna sahip iken Z-sayısında A'ya ek olarak bilginin belirlilik (güvenilirlik) derecesi (B) kullanılmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü gibi belirsizlik altındaki model trendleri geçmişten geleceğe yönelik sunulmuştur.



Şekil 8: Belirsizlik modelleri: Geçmiş, günümüz, gelecek (Lotfi A. Zadeh, 2011)



## 5. ENERJİ KAYNAKLARINA GÖRE MODELLERİN SINIFLANDIRILMASI VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde enerji kaynaklarına göre modeller sınıflandırılmış ve literatür taraması sunulmuştur. Literatür araştırmasında incelenen çalışmalar her bir enerji kaynağı için farklı optimizasyon modellerini içerecek şekilde en çok atıf alan önemli çalışmalar arasından seçilmiştir.

Enerji kaynakları sahip olduğu pek çok avantaja rağmen üretimlerindeki süreksizlik gibi önemli bir dezavantaj sunmaktadır. Çoğu enerji kaynağı iklim şartlarına bağlıdır bu yüzden enerjinin tasarım, planlama ve kontrol aşamasında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Dünya genelinde enerjiye olan talep artışı, dağıtım ağlarının genişletilmesini önemli kılmaktadır. Yenilenebilir enerji maliyetleri yüzünden enerji sistemlerinin uzun dönemli planlamasında ve tasarımında en iyiyi seçmek için karar verilmektedir.

Bazı araştırmacılar aralıklı doğrusal programlama, şans-kısıtlı programlama ve karma tamsayılı programlama tekniklerini arzu edilen enerji kaynak/hizmet atanmasında ve en küçük sistem maliyeti ile kapasite genişletme planlarında, en büyük sistem güvenilirliğinde ve enerji güvenliğinde uygulamaktadırlar (Cai vd., 2009). Soroudi vd. (2011) dağıtım ağları için dağıtık enerji seçeneklerinin yanında uzun vadeli çok amaçlı dinamik programlama modelini GA kullanarak maliyetleri ve optimal büyüklükteki tasarımların kararlaştırılmasında kullanmıştır.

Bazı araştırmacılar karbon emisyonu ticaret programı altında güç iletim ağlarının en küçük maliyetli çözümünde karma tamsayılı programlama modeli, GA, tavlama benzetimi ve TA yöntemlerini kullanmışlardır (Sadegheih, 2011). Zangeneh vd. (2009), bazı nesil teknolojileri düşünerek optimal planlama projeleri için pareto tabanlı çok amaçlı optimizasyon kullanmışlardır. Cai vd. (2009) çeşitli ekonomik ve sistem güvenilirliği kısıtları altında karar alternatiflerinin verilmesine yardımcı olmak için uzun dönemli yenilenebilir enerji yönetim planlamasında tamsayılı doğrusal programlama, iki seviyeli programlama ve üstünlük-aşağılık tabanlı bulanık stokastik programlama modelini önermiştir.

Bazı belirsizliklerin varlığı yüzünden kısa vadeli enerji planları için yeni optimizasyon tekniklerinin önemi artmaktadır. Fleten vd. (2007) yenilenebilir üretimin geniş ölçekli senaryolarında rüzgar, güneş ve su gücü mevcudiyetinin rassallığı ve değişkenliğinin

etkisini telafi etmek için uygun optimizasyon modeli kullanmıştır. Hiremath vd. (2007) YSA kullanarak enerji talep tahmini yapan optimizasyon tekniği kullanmışlardır. Bazı araştırmacılar çizelgeleme ve işgücü çizelgeleme gibi gerçek problemde mükemmel sonuçlar almak için önışleme teknikleri ve sezgisel algoritmaları kullanmaktadır (Alvarez-Valdes vd.,2008).

Enerji planlama problemleri çoklu karar verici ve çoklu kriterler yöntemleriyle daha da komplekstir. Literatürde yenilenebilir enerji problemlerinde uygulanan bazı çok kriterli karar verme yöntemleri vardır (Pohekar ve Ramachandran, 2004; Wang vd., 2009). Niknam ve Firouzi (2009), Nelder-Mead Simpleks ve PSO hibridi ile yapılan yöntemin diğer populasyon tabanlı yöntemlerden daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Niknam vd. (2010), GA, PSO, KKA ve Tabu Arama (TA) ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiğinden yakıt hücre güç santrali içeren dağıtım ağlarının optimal operasyon yönetimini çözmek için bulanık adaptif PSO önermişlerdir.

Mourmouris ve Potolias (2013) bölgesel düzeyde enerji planlaması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması için birden fazla kriter kullanan ÇKKV yöntemi önermişlerdir. Farklı yenilenebilir enerji kaynaklarına göre yapılan çalışmalarda kullanılan optimizasyon çalışmaları aşağıdaki başlıklarda sunulmuştur. Bazı çalışmalarda en uygun yenilenebilir enerji alternatifi belirlemek için bulanık tabanlı ÇKKV yöntemleri uygulanmıştır. (Kahraman, Kaya ve Cebi, 2009; Kaya ve Kahraman, 2011).

### 5.1. Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Modeller

Dünyada rüzgar enerjisi potansiyelini gösteren çok fazla çalışma vardır. Rüzgar gücündeki trendler, büyüyen küçük ölçekli şebekeye bağlı türbinleri ve dünyada çok daha geniş çeşitlilikte yer alan yeni rüzgar projelerini içermektedir. Li vd. (2010) uzun vadeli rüzgar hızı dağılımlarında Bayes yöntemini uygulamışlardır. Zhao vd. (2009) üretim maliyeti ve sistem güvenilirliği bakımından rüzgar tarlalarının elektrik sistemi tasarımındaki girdilerin anahtar spesifikasyonlarını belirlemede GA'yı kullanmışlardır. Wen vd. (2015), enerji sistemi maliyetini en aza indirmek ve sistem voltaj seviyesini iyileştirmek amacıyla depolama birimlerini konumlandırmak ve boyutlandırmak için rüzgar enerjisi üretimindeki belirsizlikleri göz önüne alan bir çok amaçlı hibrid PSO yaklaşımı önermişlerdir.

Araştırmalarda rüzgar gücü ile ilgili önemli konu optimal rüzgar tarlası tasarımındaki rüzgar

türbinlerinin tasarımı ve rüzgar tarlası yerleşimidir. Firmalar ortalama türbin boyutlarını ve teknolojilerini geliştirmeye çalışmaktadırlar. Benini ve Toffolo (2002), çok amaçlı evrimsel yaklaşımı ile rüzgar parkının metrekare başına toplam enerji üretimindeki en iyi performansı bulacak yatay eksenli rüzgar türbinlerinin rotor konfigürasyonunu bulacak geometrik parametre optimizasyonunda kullanmışlardır. Kusiak ve Zheng (2010) veri madenciliği ve evrimsel hesaplamayı birleştirerek rüzgar türbinleri tarafından üretilen gücü optimize etmişlerdir. Diğer yazarlar rüzgar hızı dağılımı ve güç-hız karakteristiklerinden kaynaklanan hesap belirsizliklerini dikkate alınarak optimum kapasite saptanması için karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modeli içeren bir karar analiz tekniği önermişlerdir (Kongnam vd., 2009). Zakariazadeh vd. (2014) yüksek rüzgâr gücü etkisiyle akıllı bir dağıtım sisteminde enerji ve rezervin çizelgelenmesi için stokastik çok amaçlı bir ekonomik / çevresel / operasyonel yöntem önerilmiştir.

Literatürde tahmin hassasiyetini artırmak için birçok rüzgar hızı tahmin algoritması önerilmiştir (Guo vd., 2011; Ren vd., 2014). Rüzgar mühendisliğindeki en önemli problemlerden biri rüzgar hızına ve sistem değerlerine bağlı olan rüzgar türbinlerinin çıktı verilerini tahmin etmektir. Bu durum araştırmacıların rüzgar türbini güç eğrisi tahminlemede bulanık mantık modelleme kullanmalarının nedeni olarak açıklanabilir (Üstüntaş ve Şahin, 2008). Grady vd. (2005) kurulu türbin sayısını sınırlandırarak maksimum üretim kapasitesi için rüzgar türbinlerinin optimum yerleşimini belirlemek için bir GA sunmuştur. Gebraad vd. (2016) rüzgar santralının iyileştirilmiş enerji üretimi için rüzgar türbinlerinin yalpalama ayarlarını optimize eden bir rüzgar santrali kontrol stratejisi sunmaktadırlar.

## 5.2. Güneş Enerjisinde Kullanılan Modeller

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışımaya enerjisidir. Rüzgar enerjisi problemlerinde olduğu gibi güneş enerjisi santrali kurulum yeri seçimi önemli kararlardan biridir. Vafaeipour vd. (2014) güneş enerjisi santrallerinin kurulması için bölgelerin önceliklendirilmesi amacıyla ekonomik, çevresel, teknik, sosyal ve risk kriterlerini göz önünde bulunduran hibrit bir ÇKKV yaklaşımı uygulamışlardır. Omिताomu vd. (2012), yenilenebilir enerji kaynakları tesis yeri seçimi için Coğrafi Bilgi Sistemine (CBS) dayalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Lozano vd. (2013), İspanya'nın bir bölgesinde fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin

optimal yerleşiminin değerlendirilmesi için CBS ve ÇKKV yöntemlerinin kombinasyonunu önermişlerdir.

Diğer bir çalışma alanı güneş ışınım düzeyi tahmini çalışmalarıdır. Bosch vd. (2008) tek radyometrik istasyonu verilerini kullanarak karmaşık dağ arazi üzerinde güneş ışınım düzeylerini hesaplamak için YSA tabanlı bir yapay zeka tekniği sunmuşlardır. Güneş ışınımı tahmini için uygulanan diğer algoritmalar YSA (Cao ve Lin, 2008; Zervas vd., 2008) ve nöro-bulanık çıkarım sistemleridir (Mellit ve Kalogirou, 2011). Kalogirou vd. (2004) güneş enerji sistemini faydasını maksimize etmek için YSA ve GA kullanmışlardır. İsmail vd. (2013) fotovoltaik modül için geliştirilen modelinin parametrelerini elde etmek için GA'dan yararlanmışlardır.

Chang ve Ko (2009) güneş enerjisinden maksimum elektrik enerjisi sağlamak için nonlinear yapıyla birleştirilen PSO yaklaşımlı bir hibrid sezgisel geliştirmişlerdir. Mellit vd. (2010) fotovoltaik sistemlerde YSA ve GA uygulamışlardır. Cirre vd. (2009) dağıtık güneş kolektör sahası kontrolü için bulanık mantık ve fiziksel model tabanlı iki yaklaşım geliştirmişlerdir.

## 5.3. Hidroelektrik Enerjide Kullanılan Modeller

Hidroelektrik enerji kaynağını nehirler oluşturmaktadır. Anagnostopoulos ve Papantonis (2007) hidroelektrik tesisinin optimal büyüklüğünü maksimum enerji ve ekonomik fayda sağlamak için stokastik bir evrimsel algoritma kullanmışlardır. Peña vd. (2009) zaman serileri tahmin yöntemini küçük bir su tesisinin kapasite tahmininde kullanmışlardır. Yoo (2009) lineer programlama yaklaşımıyla modelin duyarlılığını ve etkinliğini analiz eden hidroelektrik enerjisi üretimini en büyükleyen bir çalışma hazırlamıştır. Haddad vd. (2011) bal arısı optimizasyonu algoritması ile küçük hidroelektrik santrallerinin optimum tasarım, kontrol ve işletilmesi için bir stratejiyi ele almışlardır. De Laurantate vd. (2009) barajlarda üretilen elektriğin satılmasıyla elde edilen karın maksimize edilmesi için deterministik ve stokastik modelleri analiz etmişlerdir. Kuby vd. (2005) stok kapasitesini artırmak ve su gücü kayıplarını azaltmak için nehir sistemindeki barajla ilgili ekolojik ve ekonomik ödünleşmeyi analiz etmek için çok amaçlı kombinatorial yöntem kullanmışlardır. Finardi vd. (2005) sıralı kuadratik programlama ve lagranj gevşetmesi ile su termalleriyle bağlantılı su gücü tesislerinin çizelgesinin optimumluğunu bulmaya çalışmışlardır. Liu vd. (2009) orta dönemde akımların ve pazar fiyatlarının belirsizliği ile

hidroelektrik portföy yönetimi için bir stokastik doğrusal programlama çatısı sunmuşlardır. Pérez-Díaz vd. (2010) hidroelektrik tesis için kısa dönemli işlemlerin güç dağılımı ve optimum birimlere karar veren bir nonlineer model uygulamışlardır. Huang vd. (2003) uzun dönemli su seviyesi tahminleri için YSA kullanmışlardır. Kazeminezhad vd. (2005) dalga parametrelerini tahmin etmek için adaptif ağ tabanlı bulanık sistem yaklaşımı geliştirmişlerdir. Reikard (2009) zaman değişimli regresyon modeliyle YSA'ni birleştirerek hibrid bir model ile okyanus dalgalarından kazanılacak enerjiyi tahmin etmek için zaman serileri modeli uygulamışlardır. Adhikary vd. (2015), hidroelektrik enerji projesi planlaması ve geliştirilmesi sürecinde hidrolik türbin seçimi için yeni bir ÇKKV yöntemi sunmuşlardır. Frijns vd. (2015), hidro enerji potansiyelinden daha iyi yararlanmak amacıyla optimum hidroelektrik performansı ve su temini hizmeti ile dengede olan çok amaçlı bir teknik önermişlerdir.

#### 5.4. Biyoenerjide Kullanılan Modeller

Biyoenerji kaynağı biyolojik atıklardır. Reche-López vd. (2009), biyokütle yakıtlı elektrik santrallerini yerleştirme ve tedarik alanlarını optimize etmek amacıyla çeşitli dört farklı meta sezgisel tekniği uygulamışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Bir diğer çalışmada biyokütle yakıtlı enerji santrallerinin yeri ve büyüklüğünün belirlenmesi amacıyla hibrid bir PSO yaklaşımı önerilmiştir (Gómez-González vd., 2013). Pantaleo vd. (2014) kentsel alanlardaki ısı ve enerji üretimi için çoklu biyokütle ve doğal gaz stratejik tedarik zinciri tasarımını optimize etmek amacıyla karma tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımı sunmuşlardır.

Rentizelas vd. (2009) çoklu-biyokütle enerji dönüşüm uygulamalarını dikkate alarak çeşitli teknik, yasal, sosyal ve mantıksal kısıtlamalar altında bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Madlener (2009) ekonomik ve çevre açısından göreceli performansını belirlemek için tarla biyogaz bitkilerinin büyük sayıda performansını değerlendirmek amacı ile çok kriterli bir yöntemle araştırma yapmıştır.

#### 5.5. Jeotermal Enerjide Kullanılan Modeller

Jeotermal enerji kaynağı yer altı sularıdır. Bir jeotermal ısı pompası depolanan ısıyı kışın binaya transfer edebilir ve yazın binadan ısı aktarabilir (Omer, 2008). Dagdas (2007) yıllık net karı maksimum yapacak bir optimizasyon modeli önermiştir. Tselepidou ve Katsifarakis (2010) hesaplanan yıllık maliyetler yardımıyla düşük entalpili jeotermal enerji sistemini

GA kullanarak hazırlamışlardır. Sener ve Van (2005) jeotermal enerji projesi değerlendirme teknikleri için bir literatür çalışması yayınlamışlardır. Sigurdardottir vd. (2015) operasyonel ve sürdürülebilirlik kısıtlarına sahip düşük sıcaklıktaki jeotermal kaynaklarını kullanarak mevcut kâr değerini optimize etmek için karma tam sayılı optimizasyon modeli önermişlerdir.

#### 5.6. Hibrid Sistemlerde Kullanılan Modeller

Birden çok enerji kaynağı kullanılarak oluşturulan enerji sistemlerine hibrid enerji sistemleri denir. Fotovoltaik güneş panellerinin ve rüzgar türbinlerinin enerji üretimi iklim şartlarına göre değiştiğinden ayrı ayrı kullanıldıklarında çok etkin değillerdir. Rüzgar ve güneş enerji sistemleri birleştirilerek daha etkin hibrid sistemler oluşturulur.

Pereira vd. (2016) termik ve yenilenebilir enerji santrallerini entegre edebilen bir elektrik planlama modeli önermişlerdir. Karışık bir hidro-termik-rüzgar enerjisi sistemi için farklı elektrik senaryolarının analizi, önerilen karma tamsayı optimizasyon modeli kullanılarak sunulmuştur. Katsigiannis vd. (2010) sistemdeki gaz emisyonlarını en küçüklerken enerji maliyetini de en küçükleyen çok amaçlı bir algoritma kullanmışlardır. Ould vd. (2010) en az kayıpla güç tedariki ve en küçük maliyetle bir hibrid güneş-rüzgar bataryası için Pareto çok amaçlı GA önermişlerdir. Montoya vd. (2010) güç ağlarındaki kayıpları ve voltaj sapmalarını en küçüklemek için bir Pareto çok amaçlı metasezgisel önermişlerdir. Lagorse vd. (2009) tek başına sokak aydınlatma sistemi için fotovoltaik, pil ve bir yakıt hücresini bağlayan bir hibrid sistemi optimize etmek için GA ve simpleks algoritması uygulamışlardır. Eke. vd. (2005) aylık ortalama güneş ışınımı ve rüzgar hızı verilerini dikkate alarak elektrik tüketimini karşılamak için bir rüzgar-fotovoltaik hibrid sistem tasarımı için bir optimizasyon yöntemi sunmuştur. Giannakoudis vd. (2010) hibrid bir enerji üretim sisteminin tasarımı ve işletilmesi için optimizasyon yöntemi önermiştir. Stoppato vd. (2014) PSO'ya dayanan bir optimizasyon modeli sayesinde, kullanıcıların gereksinimlerini karşılamak ve sistem verimliliğini artırmak için küçük bir köyde elektrik ve su tedarik etmeyi amaçlayan bir sistem önermişlerdir. Bernal-Agustin ve Dufo-López (2009) karmaşık bir fotovoltaik-rüzgar-dizel-batarya-hidrojen sisteminden oluşan elektrik enerjisi üretiminde bir hibrid sistemin verimli tasarımı ve kontrolü için bir evrimsel algoritma sunmuşlardır. Chakraborty vd. (2009) rüzgar ve güneş enerji sistemleri ile entegre termik ünitelerin planlama sorunlarını çözmek için GA ve PSO uygulamışlardır.

Hibrid enerji modellerine en iyi örnek pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerdir. Bu alanda literatürde bir çok çalışma bulunmaktadır (J.S. Anagnostopoulos ve Papantonis, 2008; Bozorg, vd., 2014). Papaefthymiou ve Papathanassiou (2014) bir ada üzerinde çalışan pompaj depolamalı hibrit enerji

santralinde (hidro türbinler, pompalar, rüzgar tarlaları) GA'dan yararlanarak optimum boyutlandırmayı araştırmışlardır.

Bu bölümde sunulan çalışmalar Tablo 2'de özetlenmektedir.

**Tablo 2:** Literatür Araştırması

	<b>Yazar(lar)</b>	<b>Yıl</b>	<b>Problem</b>	<b>Çözüm Yöntemi</b>
Genel	Mourmouris ve Potolias	2013	Yenilenebilir enerji kaynakları planlaması	ÇKKV yöntemi
	Soroudi vd.	2011	Dağıtık ağ planlama modeli	Çok amaçlı dinamik programlama, GA
	Niknam vd.	2010	Yakıt güç santrali içeren dağıtım ağlarının optimal operasyon yönetimi	Bulanık adaptif PSO
	Sadegheih	2010	Sistem iletim ağlarının en küçük maliyetle optimal tasarım yöntemleri	Karma tam sayılı model, GA, tavlama benzetimi, tabu arama
	Cai vd.	2009	Enerji kaynak planlaması, enerji sistem tahmini	Aralıklı doğrusal programlama, Karma tamsayı programlama, Şans-kısıtlı programlama
	Zanenh vd.	2009	Optimal planlama projeleri	Pareto tabanlı çok amaçlı optimizasyon
	Cai vd.	2009	Sistem güvenilirliği kısıtları altında karar alternatiflerinin verilmesi	Tam sayılı programlama, iki seviyeli bulanık stokastik programlama
	Kahraman vd.	2009	En uygun yenilenebilir enerji alternatifi belirlemek	ÇÖKV yöntemi
	Wang vd.	2009	Enerji planlamasında çok kriterli karar verme	ÇKKV yöntemi
	Alvarez vd.	2009	Enerji sistemlerinde işgücü çözelgeleme	Sezgisel algoritmalar
	Niknam ve Frouzi	2009	Enerji dağıtım durum tahmini	Hibrit Nelder-Mead simpleks algoritması ve PSO
	Loken E.	2007	Enerji planlamasında çok kriterli karar verme	ÇKKV yöntemi
	Hremath vd.	2007	Enerji talep tahmini yapan optimizasyon tekniği	YSA
	Pohekar vd.	2004	Enerji planlamasında çok kriterli karar verme	ÇKKV yöntemi
Rüzgar Enerjisi	Gebraad vd.	2016	rüzgar türbinlerinin yalpalama ayarlarını optimizasyonu	Simülasyon temelli optimizasyon yöntemi
	Wen	2015	Rüzgar türbini için optimum yerleşim ve boyutlandırma ile enerji sistemi maliyetini en aza indirgenmesi	Hibrid PSO taklaşımı

Tablo 2 (devam): Literatür Araştırması

	Yazar(lar)	Yıl	Problem	Çözüm Yöntemi
Rüzgar Enerjisi	Zakariazadeh vd.	2014	Akıllı bir dağıtım sisteminde enerji ve rezervin çizelgelenmesi	stokastik çok amaçlı matematiksel yöntem
	Ren vd.	2014	Rüzgar hızı tahmini	Sinir ağı tabanlı PSO
	Guo vd.	2011	Rüzgar hızı tahmini	YSA
	Lı vd.	2010	Rüzgâr hızı dağılımı	Bayes yöntemi
	Kusiak ve Zheng	2010	Rüzgâr türbini üretim gücü optimizasyonu	Veri madenciliği, evrimsel hesaplama
	Kongnam	2009	Rüzgar hızı belirlemede optimum kapasitenin saptaması	Karma tamsayı model yaklaşımıyla bir karar analiz tekniği
	Zhao vd.	2009	Rüzgâr tarlaları elektrik sistem tasarımı	GA
	Üstüntaş	2008	Rüzgâr türbini güç eğrisi tahmini	Bulanık mantık
	Grady vd.	2005	Rüzgar türbini için optimum yerleşim tasarımı	GA
	Benini ve Toffolo	2002	Rüzgâr parkında parametre tahmini	Çok amaçlı evrimsel yaklaşım
Güneş Enerjisi	Vafaeipour vd.	2014	Santral yeri seçimi	ÇKKV yöntemi
	Lozano	2013	Fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin optimal yerleşiminin değerlendirilmesi	CBS'ye dayalı ÇKKV yaklaşımı
	Ismail vd.	2013	Parametre tahmini	GA
	Omitaomu vd.	2012	Yenilenebilir enerji kaynağı tesis yeri seçimi	CBS'ye dayalı ÇKKV yaklaşımı
	Mellit vd.	2010	Fotovoltaik sistemler	YSA, GA
	Chang ve Ko	2009	Maksimum elektrik enerjisi sağlama	Doğrusal olmayan model ve PSO ile hibrid bir sezgisel
	Cirre ve ark	2009	Dağıtık güneş kolektör saha kontrolü	Bulanık mantık
	Bosch vd.	2008	Güneş radyasyon düzey hesaplaması	YSA
	Cao, Zervas vd.	2008	Güneş ışınlam tahmini	YSA, GA
	Mellit vd.	2008	Güneş ışınlamı tahmini	ANFIS
Kalogirou ve ark	2004	Güneş enerjisi sitemi optimizasyonu	YSA, GA	

**Tablo 2 (devam):** Literatür Araştırması

	<b>Yazar(lar)</b>	<b>Yıl</b>	<b>Problem</b>	<b>Çözüm Yöntemi</b>
Hidroelektrik Enerjisi	Adhikary vd	2015	Hidrolik türbin seçimi	ÇKKV yöntemi
	Frijns vd.	2015	Optimum hidr-enerji potansiyelinin belirlenmesi	Çok amaçlı yaklaşım
	Haddad vd.	2011	Hidroelektrik santrallerinin optimum tasarım, kontrol ve işletilmesi	Bal arısı optimizasyonu
	Pérez-Díaz vd.	2010	Hidroelektrik tesisinde güç dağılımı	Doğrusal olmayan model
	Pena vd.	2009	Kapasite tahmini	Zaman serileri
	Ladurantate vd.	2009	Barajlardaki elektriğin satılmasıyla maksimum karın elde edilmesi	Deterministik ve stokastik modeller
	Liu vd.	2009	Hidroelektrik yönetimi	Stokastik doğrusal programlama
	Yoo	2009	Hidroelektrik enerji üretimi verimliliği	Lineer programlama
	Reikard	2009	Okyanus dalgalarından kazanılacak enerji tahmini	Regresyon modeli ve YSA ile hibrid birmodel
	Anagnostopoulos ve Papantonis	2007	Hidroelektrik santralinden maksimum enerji elde edilmesi	Stokastik evrimsel algoritma
	Finardi vd.	2005	Su tesislerinin çizelgelenmesi ile optimum enerji planının sağlanması	Sıralı kuadratik programlama ve lagranj gevşetmesi
	Kuby vd.	2005	Barajlarda stok kapasite artırımı	Çok amaçlı programlama
	Kazeminezhad vd.	2005	Dalga parametrelerinin tahmini	Adaptif ağ tabanlı bulanık sistem yaklaşımı
Huag vd.	2003	Su seviyesi tahmini	YSA	
Biyo-enerji	Pantaleo vd.	2014	Biyokütle ve doğal gaz stratejik tedarik zinciri tasarımı	Karma tamsayı doğrusal programlama yaklaşımı
	Gomez vd.	2013	Biyo enerji santrallerinin yeri ve büyüklüğünün belirlenmesi	Hibrid PSO
	Madlener	2011	Tarımsal biyogaz bitkilerinin performansının değerlendirilmesi	ÇKKV yöntemi
	Reche vd.	2009	Dağıtık güç üretimi için biyoenerji sistemlerinin optimum yer seçimi	GA
	Rentizelas vd.	2009	Multi-biyokütle enerji dönüşümü için optimizasyon	Optimizasyon modeli

Tablo 2 (devam): Literatür Araştırması

	Yazar(lar)	Yıl	Problem	Çözüm Yöntemi
Jeo-termal	Sigurdardottir vd	2015	Jeotermal kaynaklar kullanarak mevcut kârın optimizasyonu	Karma tamsayıli model
	Tselepidou ve Katsifarakis	2010	Düşük entalpili enerji sistemi optimizasyonu	GA
	Omer	2008	Jeotermal ısı aktarımı	
	Dagdas	2007	Net karın maksimizasyonu	Matematiksel model
Hibrid Sistemler	Pereira vd.	2016	Termik ve yenilenebilir enerji santrallerinin entegrasyonu	Karma tamsayıli programlama modeli
	Stoppato vd.	2014	Hibrid hidro enerji santralinin optimizasyonu	PSO yaklaşımı
	Bozorg vd.	2014	Pompaj depolamalı hidroelektrik santral optimizasyonu	Doğrusal olmayan programlama modeli
	Papaefthymiou ve Papathanassiou	2014	Pompaj depolamalı hidroelektrik santral optimizasyonu	GA
	Katsigiannis vd.	2010	Gaz emisyonu ve enerji maliyetini en küçüklenmesi	Çok amaçlı bir GA
	Ould vd.	2010	Hibrid bir güneş-rüzgar batarya sistem büyüklüğünün belirlenmesi	Pareto çok amaçlı GA
	Giannakoudis vd.	2010	Hibrid enerji üretim sisteminin tasarımı ve işletilmesi	Matematiksel model
	Montoya vd.	2009	Güç ağlarındaki kayıpların ve voltaj sapmalarının en küçüklenmesi	Pareto tabanlı çok amaçlı meta sezgisel
	Lagorse vd.	2009	Hibrid sistemin optimizasyonu	GA, simpleks yöntemi
	Bernal-Agustín ve López	2009	Hibrid sistemin verimli tasarımı ve kontrolü	Evrimsel Algoritma
	Chakraborty vd.	2009	Termik ünite planlama problemi	GA, PSO
	Anagnostopoulos ve Papantonis	2008	Pompaj depolamalı hidroelektrik santral optimizasyonu	Simülasyon temelli optimizasyon yaklaşımı
	Eke. vd.	2005	Bir rüzgar-fotovoltaik hibrid sistem tasarımı	Matematiksel model

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada enerji sektöründe ele alınan çeşitli problemler optimizasyon modelleri altında incelenerek sınıflandırılmış ve genel çerçeve literatür araştırması ile sunulmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde enerji üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunu farklı disiplinlerden araştırmacılar tarafından ele alındığı görülmektedir. Enerjinin optimizasyonda uygulanabilecek geniş bir uygulama sahası mevcuttur. Enerji ile ilgili çalışmalar yüksek karmaşıklık ve belirsizlik içermesine rağmen literatürde stokastik ve bulanık modellere

çok az rastlanmıştır. Ayrıca matematiksel modelin oluşturulmasının zor olduğu durumlarda benzetim uygulamaları karar vericiler için çok kullanışlı bir araç olabilir.

Enerji problemleri yüksek karmaşıklık içermesi ve birden çok amaca hizmet etmesi nedeniyle ÇAKV ve Pareto optimal yaklaşımların literatürde sıkça tercih edildiği görülmüştür. Enerji problemlerinin NP-zor olması nedeniyle karmaşık yapıdaki bu modeller için makul sürede çözüm sunan sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Gerçek vaka analizleri bakımından ele alındığında literatürde nükleer santral ile ilgili

çalışmalara az sayıda rastlanmıştır. Gelecekte enerji yatırımlarının büyük kısmını oluşturacağı öngörülen nükleer santrallerle ilgili daha çok çalışmaya yer verilebilir ve risk dereceleri, katkı dereceleri, enerji miktarları açısından analizler yapılabilir. Özellikle ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan

ilginin arttığı şu günlerde sürdürülebilir, güvenilir ve temiz optimal enerji kaynağı seçimi üzerine çalışmalar farklı enerji sahaları için artırılabilir. Ülkemizin enerji sektöründeki planlama ve uygulama eksikliği düşünüldüğünde bu alanda verilecek kararlar için analitik tekniklerin kullanımı kaçınılmaz olacaktır.

## KAYNAKLAR

Adhikary, P., Roy, P. K. ve Mazumdar, A. (2015) “Turbine supplier selection for small hydro project: Application of multi-criteria optimization technique” *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(5), 13109–13122.

Alvarez-Valdes, R., Crespo, E., Tamarit, J. M. ve Villa, F. (2008) “GRASP and path relinking for project scheduling under partially renewable resources” *European Journal of Operational Research*, 189(3), 1153–1170. doi:10.1016/j.ejor.2006.06.073

Anagnostopoulos, J. S. ve Papantonis, D. E. (2007) “Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant” *Energy Conversion and Management*, 48(10), 2663–2670. doi:10.1016/j.enconman.2007.04.016

Anagnostopoulos, J. S. ve Papantonis, D. E. (2008) “Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy” *Renewable Energy*, 33(7), 1685–1694. doi:10.1016/j.renene.2007.08.001

Bakır, M. A. ve Altunkaynak, B. (2003) “Tamsayılı programlama: teori, modeller ve algoritmalar” Ankara: Nobel Yayınları.

Baños, R., Manzano-Aguilario, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A. ve Gómez, J. (2011) “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766. doi:10.1016/j.rser.2010.12.008

Ben-Haim, Y. (2006) “Info-gap decision theory: decisions under severe uncertainty” 2. Edition, Amsterdam: Elsevier/Academic Press.

Benini, E. ve Toffolo, A. (2002) “Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation” *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(4), 357–363. doi:10.1115/1.1510868

Bernal-Agustín, J. L. ve Dufo-López, R. (2009) “Efficient design of hybrid renewable energy systems using evolutionary algorithms” *Energy Conversion and Management*, 50(3), 479–489. doi:10.1016/j.enconman.2008.11.007

Bertsimas, D. ve Sim, M. (2004) “The Price of Robustness” *Operations Research*, 52(1), 35–53. doi:10.1287/opre.1030.0065

Bosch, J. L., López, G. ve Batlles, F. J. (2008) “Daily solar irradiation estimation over a mountainous area using artificial neural networks” *Renewable Energy*, 33(7), 1622–1628. doi:10.1016/j.renene.2007.09.012

Bozorg, H., Ashofteh, P.-S., Rasoulzadeh-Gharibdousti, S. ve Mariño, M. A. (2014) “Optimization model for design-operation of pumped-storage and hydropower systems” *Journal of Energy Engineering*, 140(2) “doi:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000169

Cai, Y. P., Huang, G. H., Tan, Q. ve Yang, Z. F. (2009) “Planning of community-scale renewable energy management systems in a mixed stochastic and fuzzy environment” *Renewable Energy*, 34(7), 1833–1847. doi:10.1016/j.renene.2008.11.024

Cai, Y. P., Huang, G. H., Yang, Z. F., Lin, Q. G. ve Tan, Q. (2009) “Community-scale renewable energy systems planning under uncertainty—An interval chance-constrained programming approach” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 721–735. doi:10.1016/j.rser.2008.01.008

Cao, J. ve Lin, X. (2008) “Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks” *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1396–1406. doi:10.1016/j.enconman.2007.12.030

Chakraborty, S., Senjyu, T., Saber, A. Y., Yona, A. ve Funabashi, T. (2009) “Optimal Thermal Unit Commitment Integrated with Renewable Energy Sources Using Advanced Particle Swarm Optimization” *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 4(5), 609–617. doi:10.1002/tee.20453

Chang, Y.-P. ve Ko, C.-N. (2009) “A PSO method with nonlinear time-varying evolution based on neural network for design of optimal harmonic filters” *Expert Systems with Applications*, 36(3, Part 2), 6809–6816. doi:10.1016/j.eswa.2008.08.007

Cirre, C. M., Berenguel, M., Valenzuela, L. ve Klemmou, R. (2009) “Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field” *Euro-*



pean Journal of Operational Research, 193(3), 709–717. doi:10.1016/j.ejor.2007.05.056

Dagdas, A. (2007) “Heat exchanger optimization for geothermal district heating systems: A fuel saving approach” *Renewable Energy*, 32(6), 1020–1032. doi:10.1016/j.renene.2006.03.008

Dantzig, G. B. (1955) “Linear Programming under Uncertainty” *Management Science*, 1(3/4), 197–206.

De Ladurantaye, D., Gendreau, M. ve Potvin, J.-Y. (2009) “Optimizing profits from hydroelectricity production” *Computers & Operations Research, Scheduling for Modern Manufacturing, Logistics, and Supply Chains*, 36(2), 499–529. doi:10.1016/j.cor.2007.10.012

Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L., Yusta-Loyo, J. M., Domínguez-Navarro, J. A., Ramírez-Rosado, I. J., Lujano, J. ve Aso, I. (2011) “Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage” *Applied Energy*, 88(11), 4033–4041. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.019

Eke, R., Kara, O. ve Ulgen, K. (2005) “Optimization of a Wind/PV Hybrid Power Generation System” *International Journal of Green Energy*, 2(1), 57–63. doi:10.1081/GE-200051304

Finardi, E. C., da Silva, E. L. ve Sagastizábal, C. (2005) “Solving the unit commitment problem of hydro-power plants via Lagrangian Relaxation and Sequential Quadratic Programming” *Applied Mathematics*, 24(3), 317–342. doi:10.1590/S0101-82052005000300001

Fleten, S.-E., Maribu, K. M. ve Wangensteen, I. (2007) “Optimal investment strategies in decentralized renewable power generation under uncertainty” *Energy*, 32(5), 803–815. doi:10.1016/j.energy.2006.04.015

Frijns, J., Marchet, E. C., Carriço, N., Covas, D., Monteiro, A. J., Ramos, H. M., ... Makropoulos, C. (2015) “Management tools for hydro energy interventions in water supply systems” *Water Practice and Technology*, 10(2), 214–228. doi:10.2166/wpt.2015.024

Gebraad, P. M. O., Teeuwisse, F. W., van Wingerden, J. W., Fleming, P. A., Ruben, S. D., Marden, J. R. ve Pao, L. Y. (2016) “Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—a CFD simulation study” *Wind Energy*, 19(1), 95–114. doi:10.1002/we.1822

Giannakoudis, G., Papadopoulos, A. I., Seferlis, P. ve Voutetakis, S. (2010) “On the Systematic Design and Optimization under Uncertainty of a Hybrid Power Generation System Using Renewable Energy Sources and Hydrogen Storage” S. P. and G. B. Ferraris (Ed.), *Computer Aided Chemical Engineering içinde*, 20th European

*Symposium on Computer Aided Process Engineering* (C. 28, ss. 907–912), Elsevier. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157079461028152X> adresinden erişildi.

Goldberg, D., Deb, K. ve Korb, B. (1989) “Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results” *Complex Systems*, (3), 493–530.

Gómez-González, M., López, A. ve Jurado, F. (2013) “Hybrid discrete PSO and OPF approach for optimization of biomass fueled micro-scale energy system” *Energy Conversion and Management*, 65, 539–545. doi:10.1016/j.enconman.2012.07.029

Grady, S. A., Hussaini, M. Y. ve Abdullah, M. M. (2005) “Placement of wind turbines using genetic algorithms” *Renewable Energy*, 30(2), 259–270. doi:10.1016/j.renene.2004.05.007

Guo, Z., Wu, J., Lu, H. ve Wang, J. (2011) “A case study on a hybrid wind speed forecasting method using BP neural network” *Knowledge-Based Systems*, 24(7), 1048–1056. doi:10.1016/j.knosys.2011.04.019

Haddad, O., Moradi-Jalal, M. ve Mariño, M. A. (2011) “Design–operation optimisation of run-of-river power plants” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 164(9), 463–475. doi:10.1680/wama.2011.164.9.463

Hiremath, R. B., Shikha, S. ve Ravindranath, N. H. (2007) “Decentralized energy planning; modeling and application—a review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 729–752. doi:10.1016/j.rser.2005.07.005

Huang, W., Murray, C., Kraus, N. ve Rosati, J. (2003) “Development of a regional neural network for coastal water level predictions” *Ocean Engineering*, 30(17), 2275–2295. doi:10.1016/S0029-8018(03)00083-0

Iqbal, M., Azam, M., Naeem, M., Khwaja, A. S. ve Anpalagan, A. (2014) “Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 640–654. doi:10.1016/j.rser.2014.07.120

Ismail, M. S., Moghavvemi, M. ve Mahlia, T. M. I. (2013) “Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm” *Energy Conversion and Management*, 73, 10–25. doi:10.1016/j.enconman.2013.03.033

Jebaraj, S. ve Iniyar, S. (2006) “A review of energy models” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 281–311. doi:10.1016/j.rser.2004.09.004

Kahraman, C., Kaya, İ. ve Cebi, S. (2009) “A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process” *Energy*, 11th

Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, 34(10), 1603–1616. doi:10.1016/j.energy.2009.07.008

Kalogirou, S. A. (2004) “ Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms” *Applied Energy*, 77(4), 383–405. doi:10.1016/S0306-2619(03)00153-3

Katsigiannis, Y. A., Georgilakis, P. S. ve Karapidakis, E. S. (2010) “ Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables” *IET Renewable Power Generation*, 4(5), 404–419. doi:10.1049/iet-rpg.2009.0076

Kaya, T. ve Kahraman, C. (2011) “ Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology” *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577–6585. doi:10.1016/j.eswa.2010.11.081

Kazeminezhad, M. H., Etemad-Shahidi, A. ve Mousavi, S. J. (2005) “ Application of fuzzy inference system in the prediction of wave parameters” *Ocean Engineering*, 32(14-15), 1709–1725. doi:10.1016/j.oceaneng.2005.02.001

Kleinpeter, M. (1995) “ Energy planning and policy” Chichester, John Wiley & Sons.

Kongnam, C., Nuchprayoon, S., Premrudeepeeracharn, S. ve Uatrongjit, S. (2009) “ Decision analysis on generation capacity of a wind park” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2126–2133. doi:10.1016/j.rser.2009.01.023

Kuby, M. J., Fagan, W. F., ReVelle, C. S. ve Graf, W. L. (2005) “ A multiobjective optimization model for dam removal: an example trading off salmon passage with hydropower and water storage in the Willamette basin” *Advances in Water Resources*, 28(8), 845–855. doi:10.1016/j.advwatres.2004.12.015

Kusiak, A. ve Zheng, H. (2010) “ Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm” *Energy*, 35(3), 1324–1332. doi:10.1016/j.energy.2009.11.015

Lagorse, J., Paire, D. ve Miraoui, A. (2009) “ Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV and battery” *Renewable Energy*, 34(3), 683–691. doi:10.1016/j.renene.2008.05.030

Liu, H., Jiang, C. ve Zhang, Y. (2009) “ Portfolio management of hydropower producer via stochastic programming” *Energy Conversion and Management*, 50(10), 2593–2599. doi:10.1016/j.enconman.2009.06.010

Li, Y. F., Li, Y. P., Huang, G. H. ve Chen, X. (2010) “ Energy and environmental systems planning under

uncertainty—An inexact fuzzy-stochastic programming approach” *Applied Energy*, 87(10), 3189–3211. doi:10.1016/j.apenergy.2010.02.030

Lozano, J. M. S., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L. ve Socorro, G.-C. (2013) “ Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 544–556. doi:10.1016/j.rser.2013.03.019

Madlener, R., Antunes, C. H. ve Dias, L. C. (2009) “ Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis” *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1084–1094. doi:10.1016/j.ejor.2007.12.051

Mellit, A. ve Kalogirou, S. A. (2011) “ ANFIS-based modelling for photovoltaic power supply system: A case study” *Renewable Energy*, 36(1), 250–258. doi:10.1016/j.renene.2010.06.028

Mellit, A., Kalogirou, S. A. ve Drif, M. (2010) “ Application of neural networks and genetic algorithms for sizing of photovoltaic systems” *Renewable Energy*, 35(12), 2881–2893. doi:10.1016/j.renene.2010.04.017

Montoya, F. G., Baños, R., Gil, C., Espín, A., Alcaide, A. ve Gómez, J. (2010) “ Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods” *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Advances in metaheuristics for hard optimization: new trends and case studies*, 23(5), 695–703. doi:10.1016/j.engappai.2010.01.011

Moore, R. E. (1966) “ Interval analysis” Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Mourmouris, J. C. ve Potolias, C. (2013) “ A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy sources at a regional level: A case study Thassos, Greece” *Energy Policy*, 52, 522–530. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.074

Niknam, T. ve Firouzi, B. B. (2009) “ A practical algorithm for distribution state estimation including renewable energy sources” *Renewable Energy*, 34(11), 2309–2316.

Niknam, T., Firouzi, B. B. ve Ostadi, A. (2010) “ A new fuzzy adaptive particle swarm optimization for daily Volt/Var control in distribution networks considering distributed generators” *Applied Energy*, 87(6), 1919–1928. doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.003

Omer, A. M. (2008) “ Ground-source heat pumps systems and applications” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. doi:10.1016/j.rser.2006.10.003

- Omitaomu, O. A., Blevins, B. R., Jochem, W. C., Mays, G. T., Belles, R., Hadley, S. W., ... Rose, A. N. (2012) "Adapting a GIS-based multicriteria decision analysis approach for evaluating new power generating sites" *Applied Energy*, 96, 292–301. doi:10.1016/j.apenergy.2011.11.087
- Ould Bilal, B., Sambou, V., Ndiaye, P. A., Kébé, C. M. F. ve Ndong, M. (2010) "Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)" *Renewable Energy*, 35(10), 2388–2390. doi:10.1016/j.renene.2010.03.004
- Pantaleo, A. M., Giarola, S., Bauen, A. ve Shah, N. (2014) "Integration of biomass into urban energy systems for heat and power Part I: An MILP based spatial optimization methodology" *Energy Conversion and Management*, 83, 347–361. doi:10.1016/j.enconman.2014.03.050
- Papaefthymiou, S. V. ve Papathanassiou, S. A. (2014) "Optimum sizing of wind-pumped-storage hybrid power stations in island systems" *Renewable Energy*, 64, 187–196. doi:10.1016/j.renene.2013.10.047
- Peña, R., Medina, A., Anaya-Lara, O. ve McDonald, J. R. (2009) "Capacity estimation of a minihydro plant based on time series forecasting" *Renewable Energy*, 34(5), 1204–1209. doi:10.1016/j.renene.2008.10.011
- Pereira, S., Ferreira, P. ve Vaz, A. I. F. (2016) "Optimization modeling to support renewables integration in power systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 316–325. doi:10.1016/j.rser.2015.10.116
- Pérez-Díaz, J. I., Wilhelmi, J. R. ve Sánchez-Fernández, J. Á. (2010) "Short-term operation scheduling of a hydropower plant in the day-ahead electricity market" *Electric Power Systems Research*, 80(12), 1535–1542. doi:10.1016/j.epsr.2010.06.017
- Pohekar, S. D. ve Ramachandran, M. (2004) "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(4), 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007
- Reche-López, P., Ruiz-Reyes, N., García Galán, S. ve Jurado, F. (2009) "Comparison of metaheuristic techniques to determine optimal placement of biomass power plants" *Energy Conversion and Management*, 50(8), 2020–2028. doi:10.1016/j.enconman.2009.04.008
- Reikard, G. (2009) "Forecasting ocean wave energy: Tests of time-series models" *Ocean Engineering*, 36(5), 348–356. doi:10.1016/j.oceaneng.2009.01.003
- Ren, C., An, N., Wang, J., Li, L., Hu, B. ve Shang, D. (2014) "Optimal parameters selection for BP neural network based on particle swarm optimization: A case study of wind speed forecasting" *Knowledge-Based Systems*, 56, 226–239. doi:10.1016/j.knsys.2013.11.015
- Rentzelas, A. A., Tatsiopoulou, I. P. ve Tolis, A. (2009) "An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply" *Biomass and Bioenergy*, 33(2), 223–233. doi:10.1016/j.biombioe.2008.05.008
- Sadegheih, A. (2011) "Optimal design methodologies under the carbon emission trading program using MIP, GA, SA, and TS" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 504–513. doi:10.1016/j.rser.2010.07.035
- Savic, D. (2002) "Single-objective vs. Multiobjective Optimisation for Integrated Decision Support, In: Integrated Assessment and Decision" *Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society* içinde (ss. 12–7) "
- Scopus. (2016) "Scopus - Document search results" 23 Aralık 2016 tarihinde [https://www.scopus.com/fields=TITLE\\_ABS\\_KEY=Multi+Objective+Decision+Making%multi+objective+optimization%multiple+objective+decision+making](https://www.scopus.com/fields=TITLE_ABS_KEY=Multi+Objective+Decision+Making%multi+objective+optimization%multiple+objective+decision+making) adresinden erişildi.
- Sener, A. C. ve Van, D. (2005) "Evolution of technical and economical decision making in geothermal energy projects" *Transactions - Geothermal Resources Council, C*, 29, ss. 475–481.
- Sigurdardottir, S. R., Valfells, A., Pálsson, H. ve Stefansson, H. (2015) "Mixed integer optimization model for utilizing a geothermal reservoir" *Geothermics*, 55, 171–181. doi:10.1016/j.geothermics.2015.01.006
- Soroudi, A. ve Amraee, T. (2013) "Decision making under uncertainty in energy systems: State of the art" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 376–384. doi:10.1016/j.rser.2013.08.039
- Soroudi, A., Ehsan, M. ve Zareipour, H. (2011) "A practical eco-environmental distribution network planning model including fuel cells and non-renewable distributed energy resources" *Renewable Energy*, 36(1), 179–188. doi:10.1016/j.renene.2010.06.019
- Stoppato, A., Cavazzini, G., Ardizzon, G. ve Rossetti, A. (2014) "A PSO (particle swarm optimization)-based model for the optimal management of a small PV(Photovoltaic)-pump hydro energy storage in a rural dry area" *Energy*, 76, 168–174. doi:10.1016/j.energy.2014.06.004
- Suganthi, L., Iniyar, S. ve Samuel, A. A. (2015) "Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585–607. doi:10.1016/j.rser.2015.04.037
- Taha, H. A. (2007) "Yöneylem araştırması" (Ş. A. Baray ve Ş. Esnaf, Çev.) "İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- Talbi, E.-G. (2009) "Metaheuristics: from design to implementation. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

Tiryaki, A. E. ve Kazan, R. (2007) “Bulaşık makinelerin bulanık mantık ile modellenmesi” *Mühendis ve Makina*, 48(565), 3–8.

TMMOB. (2012) “Dünyada ve Türkiye’de Enerji Verimliliği (No: 589)” *Ankara: TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, [http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/fa34c3c2eb9b729\\_ek.pdf](http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/fa34c3c2eb9b729_ek.pdf) adresinden erişildi.

Tselepidou, K. ve Katsifarakis, K. L. (2010) “Optimization of the exploitation system of a low enthalpy geothermal aquifer with zones of different transmissivities and temperatures” *Renewable Energy*, Special Section: IST National Conference 2009, 35(7), 1408–1413. doi:10.1016/j.renene.2009.11.004

Turkay, M. (2006) “Optimization Models and Solution Algorithms” *New Frontiers in Total Quality and Strategic Management* içinde. Ankara, Türkiye: Gazi Publishing.

Üstüntaş, T. ve Şahin, A. D. (2008) “Wind turbine power curve estimation based on cluster center fuzzy logic modeling” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(5), 611–620. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.001

Vafaipoor, M., Hashemkhani Zolfani, S., Morshed Varzandeh, M. H., Derakhti, A. ve Keshavarz Eshkalag, M. (2014) “Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach” *Energy Conversion and Management*, 86, 653–663. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.083

Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F. ve Zhao, J.-H. (2009) “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. doi:10.1016/j.rser.2009.06.021

Wen, S., Lan, H., Fu, Q., Yu, D. C. ve Zhang, L. (2015) “Economic Allocation for Energy Storage System

Considering Wind Power Distribution” *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(2), 644–652. doi:10.1109/TPWRS.2014.2337936

Yoo, J.-H. (2009) “Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model” *Journal of Hydrology*, 376(1–2), 182–187. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.026

Zadeh, L. A. (1965) “Fuzzy sets” *Information and Control*, 8(3), 338–353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X

Zadeh, L. A. (2011) “A Note on Z-numbers” *Information Sciences*, 181(14), 2923–2932. doi:10.1016/j.ins.2011.02.022

Zakariazadeh, A., Jadid, S. ve Siano, P. (2014) “Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach” *Energy Conversion and Management*, 78, 151–164. doi:10.1016/j.enconman.2013.10.051

Zangeneh, A., Jadid, S. ve Rahimi-Kian, A. (2009) “Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning” *Renewable Energy*, 34(12), 2765–2773. doi:10.1016/j.renene.2009.06.018

Zervas, P. L., Sarimveis, H., Palyvos, J. A. ve Markatos, N. C. G. (2008) “Prediction of daily global solar irradiance on horizontal surfaces based on neural-network techniques” *Renewable Energy*, 33(8), 1796–1803. doi:10.1016/j.renene.2007.09.020

Zhao, M., Chen, Z. ve Blaabjerg, F. (2009) “Optimisation of electrical system for offshore wind farms via genetic algorithm” *IET Renewable Power Generation*, 3(2), 205. doi:10.1049/iet-rpg:20070112

Zhou, P., Ang, B. W. ve Poh, K. L. (2006) “Decision analysis in energy and environmental modeling: An update” *Energy*, 31(14), 2604–2622. doi:10.1016/j.energy.2005.10.023