

## TÜRKİYE'DE ELEKTRİK ÜRETİM PLANLAMASI İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR KARIŞIK TAM SAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ

Evren Can ÖZCAN<sup>1</sup>, Serpil EROL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Üretim A.Ş. Genel Müdürlüğü, ANKARA

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ANKARA

<sup>1</sup>[evrencan.ozcan@euas.gov.tr](mailto:evrencan.ozcan@euas.gov.tr), <sup>2</sup>[serpiler@gazi.edu.tr](mailto:serpiler@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 13.02.2013; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.03.2013)

**ÖZET:** Ülkelerin sürdürülebilir gelişiminde ve çevre üzerinde, ülkelerce benimsenen enerji politikaları çok büyük öneme sahiptir. Bu nedenle; yerli, sürdürülebilir, çevreci ve ekonomik kaynakların bulunması ve bu kaynakların optimal dağıtımının yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmada, Türkiye'nin gerçekleri ve gereksinimlerini yansıtan ve maliyetin minimizasyonu, CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, fosil yakıt kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu hedeflerini eş zamanlı olarak optimize eden çok amaçlı bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen bu model, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan minimum sapma yöntemi ile dünya genelinde elektrik üretiminde kullanılan bütün enerji kaynakları dikkate alınarak çözülmüş ve Türkiye'de 2012-2023 yılları arasında oluşması beklenen toplam elektrik enerjisi talebini karşılamak için kaynak bazında 12 yıllık bir elektrik üretim planı elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji kaynak planlaması, Çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal programlama, Minimum sapma yöntemi

### A Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming Model for Electricity Generation Planning in Turkey

**ABSTRACT:** The most appropriate energy policy selection has great importance in terms of the countries' sustainable development and environment. Therefore, finding the local, sustainable, environmentally-friendly and economic resources and the optimal distribution of them have become a necessity. In this study, a multi-objective mixed integer linear programming model which reflects the Turkey's realities and necessities and optimizes the objectives of cost minimization, CO<sub>2</sub> emission minimization, fossil resource usage minimization and social acceptance maximization simultaneously is proposed. This model is solved by minimum deviation method that is used for solving the multi-objective optimization problems by considering all the energy resources used for the electricity generation all over the world, and a 12-years electricity generation plan is obtained on resource basis for the purpose of meeting the total electricity demand expected to occur between the years of 2012-2023 in Turkey.

**Key Words:** Energy resource planning, Multi-objective mixed integer linear programming, Minimum deviation method

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji; toplumsal refahı yükselten, ülkelerin sürdürülebilir kalkınmasında kritik öneme sahip olan ve küreselleşen dünyada ülkelerin pozisyonlarını belirleyen en temel unsurlardandır. Küresel ısınma, iklim değişikliği ve dünya genelinde enerji talebinde yaşanan ivmeli artış; kaynak temininde dışa bağımlılığın azaltılarak, sürdürülebilir ve çevreci kaynakların bulunup, kesintisiz, verimli, çevreye duyarlı ve düşük maliyetli enerji üretimi için bu kaynakların optimal dağıtımının yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

90'lı yılların ortasına kadar geleneksel enerji dağıtım problemi, sınırlı kaynakları maliyet minimizasyonu ya da kâr maksimizasyonu gibi tek bir amaç altında ele alırken, son 20 yılda dikkate alınan kaynak çeşitliliği artmış ve problem bu kaynakların optimal dağıtımını çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları ile ele alan bir yapıya kavuşmuştur. Ramanathan ve Ganesh (Ramanathan, 1995), hanelerdeki aydınlanma gereksiniminde 7 enerji kaynağının 12 amaç altında optimal dağıtımını için amaç programlama yaklaşımını kullanırlarken; Hoog ve Hobbs (Hoog, 1993), maliyet, emisyonlar, bölgesel ekonomik etki ve son kullanıcılar için net değer gibi amaçları dikkate alan entegre kaynak planlama modelini geliştirmişlerdir. Daha sonraları, sağladığı esneklikler nedeniyle kaynak dağıtım probleminde bulanık dinamik programlama yaklaşımı kullanılmaya başlanmıştır. Enerji kaynakları dağıtım problemi literatüründe çok amaçlı programlama yaklaşımlarını kullanan çalışmalar, optimize edilen amaçlar, dikkate alınan enerji kaynakları, son kullanım alanları ve kullanılan yöntemler bazında yıl sıralı olarak Çizelge 1'de (San Cristóbal, 2012; Arnette, 2012; Jinturkar, 2011; Deshmukh, 2009; Jana, 2004; Antunes, 2004; Borges, 2003; Agrawal, 2001; Mavrotas, 1999; Mezher, 1998; Pokharel, 1998) sunulmuştur.

Bu çalışma, ülkelerin sürdürülebilir kalkınması için kaynak temininde dışa bağımlılığın azaltılarak, sürdürülebilir ve çevreci kaynakların bulunup, kesintisiz, verimli, çevreye duyarlı ve düşük maliyetli elektrik enerjisi üretiminin sağlanması gerekliliğinden ve elektrik üretiminin yaklaşık yarısını sahip olduğu yüksek yerli ve yenilebilir enerji kaynakları potansiyelinden ziyade, kaynak mevcudiyeti olmayan doğalgazdan karşılayan Türkiye'nin ihtiyaçlarından yola çıkarak, dünya elektrik üretim sektöründeki eğilimler, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)'nin stratejik hedefleri (ETKB, 2009) ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak enerji kaynak planlaması literatürüne katkı sağlamak amacıyla hazırlanmıştır.

Bu bağlamda bu çalışmada elektrik üretim maliyetinin minimizasyonu, CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, fosil yakıt kullanan santrallerin kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu amaçlarını eş zamanlı olarak optimize eden çok amaçlı bir karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Önerilen bu modelin uygulaması ise, temel verileri Çizelge 2'de (ETKB, 2012; Energy Information Administration, 2011; Lazard, 2009; Sovacool, 2008; CDM Gold Standard, 2012) sunulan ve Türkiye'de elektrik üretiminde hâlihazırda kullanılan ve yakın gelecekte kullanılması planlanan 18 tip elektrik üretim santralında gerçekleştirilmiş ve 2012-2023 yılları arasında oluşacak talebi (Çizelge 3 (Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 2011) - TEİAŞ tarafından hazırlanan düşük ve yüksek talep senaryolarından, yüksek talep senaryosu dikkate alınmıştır) karşılamak için kaynak bazında söz konusu santral tiplerinde üretilmesi gereken elektrik enerjisinin miktarını veren bir elektrik üretim planı elde edilmiştir.

**Çizelge 1.** Literatür özeti (*Brief review of literature*)

Araştırmacılar	Optimize Edilen Amaçlar	Dikkate Alınan Enerji Kaynakları	Son Kullanım Alanları	Kullanılan Yöntemler
San Cristóbal	Karbondioksit salınımının, işletme ve bakım giderlerinin, yatırım maliyetlerinin, santraller arası mesafenin minimizasyonu ile üretimin, istihdamın ve sosyal kabulün maksimizasyonu	Rüzgar, hidroelektrik, güneş ve biokütle	Genel	Amaç programlama
Arnette, Zobel	Maliyetin ve sera gazı salınımlarının minimizasyonu	Kömür, nükleer, hidroelektrik, doğalgaz, fuel-	Genel	Çok amaçlı doğrusal programlama

		oil, rüzgar, biokütle, güneş		
Jinturkar, Deshmukh	Maliyetin ve gaz salınımlarının minimizasyonu ile sosyal kabulün ve yerli kaynak kullanımlarının maksimizasyonu	Biokütle, LPG, gaz yağı ve güneş	Pişirme ve ısıtma	Bulanık karışık tam sayılı amaç programlama
Deshmukh, Deshmukh	Maliyetin, gaz salınımlarının ve petrol ürünlerinin kullanımının minimizasyonu ile istihdam olanaklarının, sosyal kabulün, yerli kaynak kullanımının, güvenilirliğin ve sistem verimliliğinin maksimizasyonu	Biokütle, LPG ve güneş	Pişirme, su pompalama, aydınlatma, ısıtma, soğutma, ev aletleri	Amaç programlama
Jana, Chattopadhyay	Toplam maliyetin ve yerli olmayan enerji kaynaklarının minimizasyonu ile sistemin toplam verimliliğinin (örneğin toplam enerji kullanımının minimizasyonu) maksimizasyonu	Gaz yağı, şebeke elektriği, biokütle ve güneş	Aydınlatma	Çok amaçlı bulanık doğrusal programlama
Antunes, Martins, Brito	Toplam genişleme maliyetinin, kurulu güç kapasitesi ile ilgili çevresel etkinin ve enerji çıktısı ile ilgili çevresel etkinin minimizasyonu	Kömür, petrol ürünleri ve doğal gaz	Belirtilmemiş	Çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal programlama
Borges, Antunes	Enerji ithalatının ve karbondioksit salınımının minimizasyonu ile üretilen elektriğin maksimizasyonu	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Çok amaçlı bulanık doğrusal programlama
Agrawal, Singh	Hayat çevrim maliyetinin, kömür ve petrol ürünlerinin kullanımının, karbon, sülfür ve azot salınımlarının minimizasyonu ile yerel enerji kaynaklarının kullanımının, işlemlerin uygunluğunun, güvenlik derecesinin ve performans tahmin edilebilirliği ve sürdürülebilirliğinin maksimizasyonu	Kömür, gaz yağı, LPG, biokütle, güneş, şebeke elektriği ve motorin	Pişirme	Bulanık amaç programlama
Mavrotas, vd.	Yıllık elektrik üretim maliyeti ile toplam kükürt di oksit salınım miktarının minimizasyonu	Kömür, petrol ürünleri ve doğal gaz	Belirtilmemiş	Çok amaçlı karışık tam sayılı doğrusal programlama
Mezher, vd.	Maliyetin, petrol ürünlerinin ve doğalgaz kullanımının ve gaz salınımlarının minimizasyonu ile sistem verimliliğinin, yerli kaynakların kullanımının ve istihdam olanaklarının maksimizasyonu	Motorin, doğalgaz, biokütle, güneş, kömür, rüzgar ve hidroelektrik	Pişirme, su pompalama, aydınlatma, ısıtma, sıcak su, ev aletleri	Amaç programlama
Pokharel, Chandrashekara	Maliyet, enerji girdisi ve gaz salınımının minimizasyonu ile verimlilik, istihdam ve yerli kaynak kullanımının maksimizasyonu	Odon, küspe, hayvansal gübre, biokütle, güneş, hidroelektrik, kömür ve gaz yağı	Ev aletleri, sıcak su, pişirme, ısıtma, aydınlatma	Çok amaçlı doğrusal programlama

Çizelge 2. Santral tipleri ve temel veriler (Types of power plants and basic data)

Santral Tipi	Kullandığı Kaynak	Kurulu Güç (MW)	*Maksimum Üretim Kapasitesi (GWh)	*Birim Üretim Maliyeti (\$Cent/kWh)	Toplam İlk Yatırım Maliyeti (Milyon \$)	CO <sub>2</sub> Salınım Miktarı (g/kWh)	*CO <sub>2</sub> Azaltım Miktarı (ton/yıl)	Kurulum Süresi (yıl)	Mevcut Santral Sayıları	Kaynak Potansiyeli (GWh/yıl)
*T1-PV	Güneş	30	48,8	14,15	74,37	32	28.792	1	0	
*T2-CRS	Güneş	15	26	28,42	69,86	11	15.340	2	0	380.000
*T3-PTC	Güneş	50	128	29,31	378,70	13	75.520	2	0	
T4	Taş Kömürü	360	2.142	9,5	720	960	0	4	0	11
*T5	Taş Kömürü	360	1.525	8,57	0	1.140	0	0	16	
T6	Linyit	360	2.142	11	720	1.050	0	4	0	118
*T7	Linyit	360	1.507	7,45	0	1.055	0	0	24	
T8	Doğalgaz	275	1.856	13,3	292,19	443	0	2	0	0
*T9	Doğalgaz	275	1.773	11,96	0	480	0	0	79	0
T10	Hidrolik	150	540	8,6	525	10	286.200	4	0	
*T11	Hidrolik	150	500	1,04	0	10	265.000	0	130	140.000
T12	Rüzgar	30	110	5,9	66	10	64.900	1	0	
*T13	Rüzgar	30	83	5,9	0	10	48.970	0	69	144.000
T14	Jeotermal	15	114	9,2	60	38	60.420	2	0	4.500
*T15	Jeotermal	15	111	9,2	0	38	58.830	0	8	
T16	Biokütle	10	68	11,3	35,75	25	36.040	2	0	
*T17	Biokütle	10	43	11,3	0	25	22.790	0	13	93.000
T18	Nükleer	1.200	8.880	12,6	8.824	66	0	5	0	0

- a: Belirlenen santral tiplerinin Türkiye’de yıllık çalışma saatleri ve kapasite faktörleri dikkate alınarak hesaplanmış değerlerdir.
- b: Birim elektrik üretim maliyeti, seviyelendirilmiş değerleri göstermektedir. Bu değerlere, işletme, bakım ve rehabilitasyon maliyetleri ve yakıt giderleri yansıtılmıştır.
- c: Maksimum üretim kapasitesi x Emisyon faktörü (Güneş ve Rüzgar için 0,59 ton/MWh, diğerleri için 0,53 ton/MWh)
- d: 9,5 saatlik depolama tesisi mevcuttur.
- e: Türkiye’de işletilen mevcut santralleri göstermektedir.
- \*: PV: Fotovoltaik; CRS: Central Receiver System (Merkezi Alıcı Sistem); PTC: Parabolic Trough Collector (Parabolik Oluk Kolektör)

**Çizelge 3.** 2012-2023 projeksiyonu talep tahminleri (*Demand forecasts for 2012-2023 projection*)

Yıl	Enerji Talebi (GWh)	Artış (%)	Yıl	Enerji Talebi (GWh)	Artış (%)
2012	243.430	7,2	2018	376.350	7,4
2013	262.010	7,6	2019	404.160	7,4
2014	281.850	7,6	2020	433.900	7,4
2015	303.140	7,6	2021	466.443	7,5
2016	325.920	7,5	2022	501.426	7,5
2017	350.300	7,5	2023	539.033	7,5

#### MATEMATİKSEL MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışma kapsamında önerilen ve elektrik üretim maliyetinin minimizasyonu, CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, fosil yakıt kullanan santrallerin kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu amaçlarını eş zamanlı olarak optimize ederek, enerji üretim kaynaklarından belirli bir periyotta üretilmesi gereken elektrik enerjisi miktarını veren matematiksel model, 4 amaç fonksiyonunu ve 17 grup kısıtı içermektedir. Modelde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir:

- $i$  Santral tipi  
 $j$  Yıl  
 $k$  Enerji kaynağı  
 $K$  Enerji kaynağı kümesi;  $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, K_{max}\}$   
 $I$  Santral tipi kümesi;  $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, I_{max}\}$   
 $I_m$  Mevcut santral tipi kümesi;  $I_m = \{5, 7, 9, 11, 13, 15, 17\}$   
 $I_y$  Yenilenebilir kaynak kullanan santral tipi kümesi;  $I_y = \{1, 2, 3, 10-17\}$   
 $I_f$  Fosil yakıt kullanan santral tipi kümesi;  $I_f = \{4, 5, 6, 7, 8, 9\}$   
 $J$  Yıl kümesi;  $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, J_{max}\}$   
 $t_i$   $i$  santral tipinin maksimum üretim kapasitesi  
 $D_j$   $j$  yılında oluşan talep miktarı  
 $x_{ij}$   $i$  santral tipinin  $j$  yılında sunduğu arz miktarı  
 $S_{ij}$   $i$  santral tipinin  $j$  yılında kullanılan sayısı  
 $S_{i0}$   $i$  santral tipinin mevcut sayısı  
 $h$  Hedeflenen üretim miktarı yüzdesi = 0,3 (ETKB, 2009)  
 $\varepsilon_{kj}$   $k$  kaynağının  $j$  yılında kullanılacak potansiyel üst sınırı  
 $u_k$   $k$  enerji kaynağını kullanan santral tipi kümesi;  $u_k \in U$   
 $c_i$   $i$  santral tipinin kWh başına birim elektrik üretim maliyeti  
 $c_{ex}$  Birim ithalat maliyeti = 0,07 \$ (ETKB, 2012)  
 $r_{im}$  Birim ihracat getirisi = 0,11 \$ (ETKB, 2012)  
 $\mu_i$   $i$  santral tipinin birim üretim CO<sub>2</sub> salınım miktarı  
 $\delta_j$   $j$  yılında ithal edilen enerji miktarı

- $\vartheta_j$   $j$  yılında ihraç edilen enerji miktarı  
 $\pi_i$   $i$  santral tipinin sosyal kabul faktörü  
 $y_{ij}$  1,  $i$  santral tipi  $j$  yılında kullanılacak ise  
 0, aksi halde  
 $M$  Büyük bir sayı  
 $\eta_i$   $i$  santral tipinin kurulum süresi  
 $O_{ij}$   $j$  yılında yeni açılan  $i$  santral tipi sayısı  
 $OM_i$   $i$  santral tipinin kurulum maliyeti  
 $\sigma_i$   $i$  santral tipinin yıllık CO<sub>2</sub> azaltım miktarı  
 $s$  CO<sub>2</sub> azaltımından gelen ton başına gelir = 5,73 \$ (CDM Gold Standard, 2012)  
 $e$  Enflasyon oranı = 0,0806 (Hazine Müsteşarlığı, 2012)

### Amaç Fonksiyonları (Objective Functions)

#### Elektrik üretim maliyetinin minimizasyonu

$$\begin{aligned} MinZ_1 = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} c_i e^{j-1} + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} O_{ij} OM_i + \sum_{j \in J} \delta_j c_{ex} - \\ & \sum_{j \in J} \vartheta_j r_{im} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s S_{ij} \sigma_i \end{aligned} \quad (1)$$

Denklem (1), Türkiye’de elektrik üretiminden doğacak ve enflasyon etkili üretim maliyetini (işletme, bakım, rehabilitasyon ve yakıt giderleri yansıtılmış), eldeki kaynak potansiyelini etkin bir şekilde kullanabilmek için yeni açılacak santrallerin kurulum maliyetini ve ithal edilecek elektrik enerjisi (Çizelge 4 (ETKB, 2012)) için harcanacak miktarı içermektedir. Bunların yanı sıra, ihraç edilecek elektrik enerjisinden (Çizelge 5 (ETKB, 2012)) elde edilecek gelir ve yenilenebilir enerji kaynakları için karbon piyasalarından gelecek gelir de Denklem (1)’e yansıtılarak, Türkiye’de elektrik üretiminde ekonomik anlamda olması gereken tüm unsurlar dikkate alınmıştır.

#### CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu

$$MinZ_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \mu_i \quad (2)$$

Çoğunlukla konvansiyonel enerji sistemlerinden kaynaklanan, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından önemli bir kriter olan, küresel ısınmayı tetikleyen ve son yıllarda gelişmiş ülkelerin gündeminde yer alan CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, bu çalışmada bir diğer amaç olarak dikkate alınmıştır.

#### Fosil yakıt kullanan santrallerin kullanımının minimizasyonu

$$MinZ_3 = \sum_{i \in I_f} \sum_{j \in J} x_{ij} \quad (3)$$

Hem Türkiye’de fosil kaynaklı yakıtların önemli bir kısmının ithal edilmesi, maliyetlerinin yüksek olması ve tükenen kaynaklar grubunda yer almaları, hem de ETKB’nin bir stratejik hedefi olması açısından (ETKB, 2009); hızla tükenen, yüksek maliyetli ve çevreye önemli ölçüde zarar veren fosil yakıtları kullanan santrallerin elektrik enerjisi üretiminde kullanımının minimizasyonu bu çalışma kapsamında dikkate alınarak Denklem (3)’deki şekilde formüle edilmiştir.

#### Sosyal kabulün maksimizasyonu

$$MaxZ_4 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \pi_i \quad (4)$$

Bir elektrik üretim santralının seçiminde; o santralın maliyet, sera gazı emisyonları, alan ve su kullanımı, istihdam olanakları, görüntü kirliliği, yerli ve yenilenebilir kaynakları kullanması gibi parametreleri içeren ve toplum tarafından kabul edilirlilik göstergesi olan sosyal kabul açısından ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında dikkate alınan sosyal kabulün maksimizasyonu amaç fonksiyonu Denklem (4)'de verilmiştir.

#### Kısıtlar (Constraints)

Enerji kaynağı arz kısıtı

$$x_{ij} - t_i S_{ij} \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in I \quad (5)$$

Talep kısıtı

$$\sum_{i \in I} x_{ij} + \delta_j - \vartheta_j \geq D_j \quad \forall j \in I \quad (6)$$

Hedeflenen üretim kısıtları

$$\sum_{i \in I_1} x_{i12} \geq h \sum_{i \in I} x_{i12} \quad (7)$$

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi içindeki payının 2023 yılında en az %30 ( $h=0,3$ ) düzeyinde olması amaçlanmaktadır (ETKB, 2009).

$$\sum_{i=12}^{13} \sum_{j=1}^4 x_{ij} = 36.670 \quad (8)$$

2015 yılı sonuna kadar rüzgar kaynağından elde edilecek elektrik enerjisinin en az 36.670 GWh seviyesine ulaştırılması hedeflenmektedir (ETKB, 2009).

$$\sum_{i=14}^{15} \sum_{j=1}^4 x_{ij} = 2.280 \quad (9)$$

2015 yılı sonuna kadar jeotermal kaynaklardan elde edilecek elektrik enerjisinin en az 2.280 GWh seviyesine ulaştırılması hedeflenmektedir (ETKB, 2009).

Yıllık potansiyel enerji kaynağı kısıtı

$$\sum_{i \in u_k} x_{ij} \leq \varepsilon_{kj} \quad \forall k \in K, \forall j \in I, \forall u_k \in U \quad (10)$$

Kullanılacak enerji kaynağını belirleme kısıtı

$$x_{ij} - M \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in I \quad (11)$$

Kurulum süresi kısıtı

$$\eta_i - j \leq M(1 - y_{ij}) \quad \forall i \in (I - I_m), \forall j \in I \quad (12)$$

Santral-üretim eşleşme kısıtı

$$x_{ij} - t_i(S_{ij} - 0,9) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in I \quad (13)$$

Modelin, yalnızca ilgili santrali açması durumunda üretim yapılmasını sağlamak amacıyla Denklem (13) modele kısıt olarak eklenmiştir.

Santral denge kısıtı

$$O_{ij} = S_{ij} - S_{ij-1} \quad \forall i \in (I - I_m), \forall j \in I \quad (14)$$

Mevcut santral kısıtı

$$S_{ij} \leq S_{i0} \quad \forall i \in I_m, \forall j \in I \quad (15)$$

Nükleer enerji santrali kısıtları

$$S_{188} = 1 \quad (16)$$

$$S_{189} = 2 \quad (17)$$

$$S_{1810} = 3 \quad (18)$$

$$S_{1811} = 4 \quad (19)$$

$$S_{1812} = 4 \quad (20)$$

$$S_{18j} = 0 \quad j < 8 \quad (21)$$

Türkiye’nin ilk nükleer enerji santralının yapımına 2014 yılında başlanarak, 2019 yılında 1.200 MW kurulu güce (8.880 GWh elektrik üretim kapasitesi) sahip olan ilk ünitenin devreye alınması ve takip eden 3 yıl içinde de 1.200’er MW’lık 3 ünitenin devreye alınarak 4 ünitenin kullanılması hedeflenmektedir (ETKB, 2009).

Diğer kısıtlar

$$\begin{aligned} x_{ij} &\geq 0 && \forall i \in I, \forall j \in I \\ S_{ij} &\geq 0 \text{ ve tamsayı} && \forall i \in I, \forall j \in I \\ O_{ij} &\geq 0 \text{ ve tamsayı} && \forall i \in I, \forall j \in I \\ y_{ij} &\in \{0,1\} && \forall i \in I, \forall j \in I \end{aligned} \quad (22)$$

**Çizelge 4.** Türkiye’de elektrik ithalatının yıllara göre değişimi ve tahminleri (*Electricity export changes and forecasts by years in Turkey*)

	Toplam İthalat	Artış %	Yıllar	Toplam İthalat	Artış %	Yıllar	Toplam İthalat	Artış %
1990	175,5	-68,6	2003	1.158,0	-67,7	2015	6.339,1	7,5
1991	759,3	332,6	2004	463,5	-60,0	2016	6.814,5	7,5
1992	188,8	-75,1	2005	635,9	37,2	2017	7.325,6	7,5
1993	212,9	12,8	2006	573,2	-9,9	2018	7.875,1	7,5
1994	31,4	-85,3	2007	864,3	50,8	2019	8.465,7	7,5
1996	270,0	759,9	2008	789,4	-8,7	2020	9.100,6	7,5
1997	2.492,3	823,1	2009	812,0	2,9	2021	9.783,2	7,5
1998	3.298,5	32,3	2010	1.143,8	40,9	2022	10.516,9	7,5
1999	2.330,3	-29,4	2011	4.746,7	315,0	2023	11.305,7	7,5
2000	3.791,3	62,7	2012	5.102,7	7,5			
2001	4.579,4	20,8	2013	5.485,4	7,5			
2002	3.588,2	-21,6	2014	5.896,9	7,5			

**Çizelge 5.** Türkiye’de elektrik ihracatının yıllara göre değişimi ve tahminleri (*Electricity import changes and forecasts by years in Turkey*)

Yıllar	Toplam İhracat	Artış %	Yıllar	Toplam İhracat	Artış %	Yıllar	Toplam İhracat	Artış %
1990	906,8	-44,2	2002	435,1	35,0	2014	4.762,1	7,5
1991	506,31	-37,9	2003	587,6	94,7	2015	5.119,3	7,5
1992	314,2	87,4	2004	1.144,3	57,1	2016	5.503,2	7,5
1993	588,7	-3,2	2005	1.798,1	24,3	2017	5.916,0	7,5
1994	570,1	22,1	2006	2.235,7	-44,2	2018	6.359,7	7,5
1995	695,9	-50,7	2007	2.422,2	8,3	2019	6.836,7	7,5
1996	343,1	-21,0	2008	1.122,2	-53,7	2020	7.349,4	7,5
1997	271	10,0	2009	1.545,7	37,7	2021	7.900,6	7,5
1998	298,2	-4,3	2010	1.917,6	24,1	2022	8.493,2	7,5
1999	285,3	53,3	2011	3.833,3	99,9	2023	9.130,1	7,5
2000	437,3	-1,0	2012	4.120,8	7,5			
2001	432,8	0,5	2013	4.429,9	7,5			

Çizelge 4 ve Çizelge 5’den de görüleceği üzere, Türkiye’nin geçmişten günümüze kadar yaptığı elektrik ithalatının ve ihracatının belirli bir eğilimi yoktur. Bu nedenle, elektrik ithalat ve ihracatının 2012-2023 projeksiyonunda Çizelge 3’de verilen ve talep artış ortalaması olan %7,5 oranında artacağı varsayılarak ithalat ve ihracat değerleri hesaplanmıştır.

#### ÖNERİLEN MODELİN ÇÖZÜMÜ (SOLUTION of the PROPOSED MODEL)

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde en sık kullanılan yöntemlerin başında amaç programlama yöntemi gelmektedir. Bu yöntemin genel gayesi, değerleri kesin olarak belirlenen iki veya daha fazla amaç fonksiyonunun, hedeflenen değerlerinden sapmalarını minimize etmektir (Tabucanon, 1988). Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında önerilen matematiksel modelde yer alan 4 amaç fonksiyonu için, hedeflenen değerlerin bulunmaması nedeniyle amaç programlama yaklaşımı kullanılamamıştır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde literatürde yine sıklıkla kullanılan diğer yöntemler grubu ise, amaç fonksiyonlarının birleştirilmesine yönelik yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlar arasında; global amaç yöntemi, minimum sapma yöntemi ve uzlaşık programlama yöntemi sayılabilir. Bu yöntemlerin tamamında, her bir amacın optimal değerlerinden sapma miktarları toplamı en küçüklenerek en iyi uzlaşık çözüme ulaşılmaya çalışılır (Tabucanon, 1988). Bu bağlamda, elektrik üretim maliyetinin minimizasyonu, CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, fosil yakıt kullanan santrallerin kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu amaçlarını eş zamanlı olarak optimize ederek, 2012-2023 yılları arasında oluşacak talebi karşılamak için kaynak bazında üretilmesi gereken elektrik enerjisinin miktarını veren modelin çözümü için, literatürde kabul görmüş çok amaçlı optimizasyon çözüm yaklaşımlarından olan minimum sapma yöntemi kullanılmıştır.

#### Minimum Sapma Yöntemi (Minimum Deviation Method)

Minimum sapma yöntemi, karar vericinin amaçlar hakkında kısmi bir bilgisi olması durumunda (amaçların optimal değerlerinin bilinmesi, fakat bunların arasındaki göreceli önem derecelerinin bilinmemesi gibi) uygulanabilir bir yöntemdir. Bu yöntemde, her bir amacın kesirli sapmaları toplamı en küçüklenerek en iyi uzlaşık çözüme ulaşılmaya çalışılır (Tabucanon, 1988).



### Ceza tablosunun oluşturulması (Creating the penalty table)

Ceza tablosunun oluşturulmasında ilk olarak, her bir amaç fonksiyonu için modelin orijinal kısıtları kullanılarak optimal sonuçlar bulunur. Diğer amaç fonksiyonlarının değerleri, bulunan amaç fonksiyonlarının her birinin optimal noktaları kullanılarak hesaplanır. Bu prosedür bütün amaç fonksiyonları için uygulandığında, ceza tablosu Şekil 1’deki gibi elde edilir.

	$X^{1*}$	...	$X^j$	...	$X^{k*}$
$Z_1$	$f_1^*$	...	$f_{1j}$	...	$f_1^k$
...	...	...	...	...	...
$Z_i$	$f_i^1$	...	$f_i^*$	...	$f_i^k$
...	...	...	...	...	...
$Z_k$	$f_k^1$	...	$f_{kj}$	...	$f_k^*$

Şekil 1. Ceza tablosu (*Penalty table*)

Ceza tablosundaki  $j$  sütunu,  $j$ . amacı optimize eden  $X^{j*}$  çözüm vektörüne ( $f_i(X)$ ) karşılık gelmektedir.  $f_i^j$  ise,  $f_i(X)$ 'in her bir amaç fonksiyonu için optimal değer olan  $f_j^{*}$ 'ye ulaşması durumunda  $f_i(X)$  fonksiyonunun aldığı değerdir. Her bir amaç fonksiyonunun almış olduğu bireysel optimal değerler, ceza tablosunun köşegeninde yer alan elemanlardır (Tabucanon, 1988).

$X^*$  ideal çözümü ifade etmektedir ve her bir amaç fonksiyonunun optimal değerinin  $k$  vektörünü vermektedir. Böylece ideal amaç vektörü aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$F^*(X^*) = [f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*] \quad (23)$$

Bu vektör, çelişen amaçların var olması durumunda elde edilemez (Tabucanon, 1988).

### Hesaplama prosedürü (Computational procedure)

En düşük toplam kesirli sapmayı veren çözüm, en iyi uzlaşık çözüm olarak tanımlanır. Her bir amacın kesirli sapma değerleri, en büyük sapma değerleri hesaba katılarak hesaplanır (Tabucanon, 1988).

Çünkü;

- Bu çalışmada olduğu gibi amaçlar, farklı birimlerde olabilirler. Kesirli dönüşüm, hesaplamada boyut farklılıklarının etkisini elimine etmeye yardımcı olacaktır.
- Amaç fonksiyonlarının önem dereceleri arasında önemli farklar olması durumunda toplam sapma, daha büyük önem derecesine sahip amaç tarafından domine edilecektir. Kesirli terim, her bir amacın önem derecesinin normalize edilmesine yardımcı olacaktır.
- Bir amacın optimal değerinin sıfıra çok yakın olması durumunda ortaya çıkacak zorluk ortadan kaldırılacaktır.

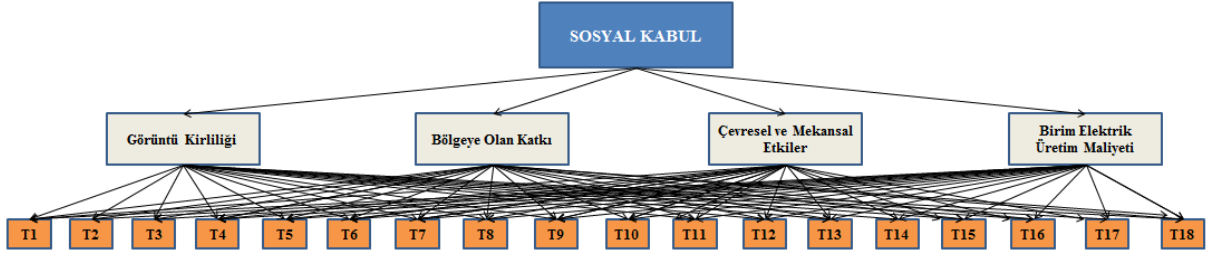
$f_{j*}$ ,  $j$ . amacın arzu edilen en kötü değerini ve  $f_j^*$ ,  $j$ . amacın optimal değerini göstermek üzere minimum sapma problemi aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$\text{Min}Z_0 = \sum_{j=1}^k \left[ \frac{f_j^* - f_j(X)}{f_j^* - f_{j*}} \right] \quad (24)$$

### Sosyal Kabul Faktörünün Belirlenmesi (Determining the Social Acceptance Factor)

Denklem (4)'de verilen "Sosyal kabulün maksimizasyonu" amaç fonksiyonunda yer alan her bir santral tipinin sosyal kabul faktörünün ( $\pi_i$ ) hesaplanması için, çok ölçütlü karar verme tekniklerinden olan ve verilen alternatifler kümesi için bağlantılı önceliklerin bir skalaya (1-9 öncelik skalası) oturtulmak sureti ile karar vericinin sezgisel yargılarını ve karar verme prosesindeki alternatiflere ait karşılaştırma tutarlılığını da dikkate alarak karar verme prosesini en etkin şekilde tamamlamayı amaçlayan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılmıştır (Saaty, 1980).

"Sosyal Kabul Faktörünün Belirlenmesi" amacı altında hazırlanan hiyerarşik yapı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Sosyal kabul faktörünün belirlenmesi için hiyerarşik gösterim (Hierarchical representation for determining the social acceptance factor)

Şekil 2'den de görüleceği üzere, 18 santral alternatifi için 4 kriter (*görüntü kirliliği*, istihdam, turizm getirisi, ülke geneli ve dünyada tanınırlık, v.b. açısından *bölgeye olan katkı*, arazi kullanımı, su kaynakları kullanımı, atıklar, hava kalitesi, v.b. açısından *çevresel ve mekânsal etkiler* ve *birim elektrik üretim maliyeti*) belirlenmiştir.

Kriterlere göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisleri ile kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yer alan elektrik üretim santrallerinin bulunduğu yerleşim birimlerinde yaşayan kişiler ve elektrik üretimi konusunda söz sahibi olan kurum ve kuruluşların yetkilileri ile yapılan görüşmeler neticesinde oluşturulmuştur. AHP hesaplama prosedürüne göre (Saaty, 1980) yapılan değerlendirmeler neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Santrallerin sosyal kabul faktörleri (Social acceptance factors of the power plants)

Santral Tipi	Sosyal Kabul Faktörü	Santral Tipi	Sosyal Kabul Faktörü
T1	0,0959	T10	0,0639
T2	0,1137	T11	0,0639
T3	0,1053	T12	0,1340
T4	0,0479	T13	0,1340
T5	0,0479	T14	0,1312
T6	0,0492	T15	0,1312
T7	0,0492	T16	0,1270
T8	0,0537	T17	0,1270
T9	0,0537	T18	0,0782

Çizelge 6'dan da görüleceği üzere, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santraller en yüksek öncelik değerlerine sahip iken, fosil yakıt kullanan santrallerin toplum tarafından kabul edilebilirlikleri en alt seviyede çıkmıştır. Bu sonuç, yenilenebilir enerji santrallerinin fosil yakıtlı santrallara göre

kapladıkları alanların daha az oluşu, görünümündeki üstünlükler ve özellikle sera gazı salınımı açısından çevre üzerinde olumsuz etkilerinin olmaması açısından günümüz dünyasında toplumların elektrik üretim santralleri ile ilgili değer yargıları ile tutarlıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan santraller arasındaki öncelik sıralamanın rüzgar santralleri – jeotermal santraller – biokütle santralleri – CRS santralleri – PTC santralleri ve PV santralleri şeklinde oluşmasının temel nedenleri arasında ise, santrallerin üretim verimleri, istihdam olanakları, santrallerin işletme, bakım ve rehabilitasyonundaki kolaylıklar ve üretim maliyetleri yer almaktadır. Nükleer enerji santrallerinde gerekli tedbirlerin alınması ile çevre ve insan hayatının olumsuz bir şekilde etkilenmesinin önüne geçilebilecek olması gerçeği, değerlendirmeyi yapan kişilerce de kabul görmüş olup, bu santral tipinin sosyal kabul faktörü sıralamada ortalarında yer almıştır. Burada en dikkat çekici sonuç; yenilenebilir enerji santrallerinden rüzgar, biokütle, güneş ve jeotermal santrallerinin sosyal kabul faktörlerinin birbirlerine yakın olmasına rağmen, yine bir yenilenebilir enerji santrali olan hidroelektrik santrallerin sosyal kabul faktörünün söz konusu santrallara nazaran oldukça düşük olmasıdır. Bunun temel nedenleri arasında; hidroelektrik santrallerin kuruldukları bölgenin doğal yapısını bozması (nehir kenarında var olan orman arazilerini tahrip etmesi, tarıma elverişli alanları su altında bırakarak kullanılamaz hale getirmesi, kullanılabilir tarım arazilerinde nehirden sulama yönünü değiştirmesi, v.b.), bölge halkını yerleşim yerlerini değiştirmek zorunda bırakması, kurulumundaki teknik zorluklar, yüksek kurulum maliyetleri ve uzun kurulum süreleri sayılabilir.

Matematiksel modelin çözümü için GAMS IDE 2.0.36.7 versiyonu kullanılmıştır. İlk olarak; Denklem (1) – Denklem (4) arasında verilen amaç fonksiyonları, ceza tablosunda yer alacak köşegen değerlerinin belirlenmesi amacıyla Denklem (5) – Denklem (22) arasında verilen kısıtlar ile çözülmüş, ardından her bir amaç için orijinal kısıtlara diğer amaç fonksiyonlarının eklenmesi ile model yeniden çözülerek, yani diğer amaç fonksiyonlarının değerlerinin, bulunan amaç fonksiyonlarının her birinin optimal noktaları kullanılarak hesaplanmasıyla Çizelge 7’de verilen ceza tablosu elde edilmiştir.

**Çizelge 7.** Ceza tablosu (*Penalty table*)

	$X^1$	$X^2$	$X^3$	$X^4$
$Z_1$	101.236.869.095,38	791.227.000.000,00	645.646.000.000,00	1.171.750.000.000,00
$Z_2$	1.599.044,83	159.895,35	221.191,17	240.708,56
$Z_3$	2.622.723,80	170.274,00	170.274,00	291.151,20
$Z_4$	321.374,40	452.617,68	398.611,87	626.926,48

Çizelge 7’de verilen ceza tablosu kullanılarak, Denklem (24)’e göre 4 amaç fonksiyonunu da içeren minimum sapma fonksiyonu Denklem (25)’de sunulmuştur.

$MinZ$

$$= \left[ \frac{101.236.869.095,38 - MinZ_1}{101.236.869.095,38 - 1.171.750 \times 10^6} \right] + \left[ \frac{159.895,35 - MinZ_2}{159.895,35 - 1.599.044,83} \right] + \left[ \frac{170.274 - MinZ_3}{170.274 - 2.622.723,80} \right] + \left[ \frac{626.926,48 - MinZ_4}{626.926,48 - 321.374,40} \right] \quad (25)$$

Denklem (5) – Denklem (22) arasında verilen orijinal model kısıtlarının, Denklem (25)’de verilen amaç fonksiyonu altında çözülmesi ile 2012-2023 yılları arasındaki 12 yıl boyunca oluşacak elektrik üretim talebini karşılamak için santral ve kaynak bazında gerçekleştirilmesi gereken elektrik üretimine ait miktarlar, başka bir deyişle Türkiye’nin 12 yıllık elektrik üretim planı elde edilmiş ve sonuçlar Çizelge 8’de sunulmuştur.

## SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION)

Bu çalışmada, elektrik üretim maliyetinin minimizasyonu, CO<sub>2</sub> salınımının minimizasyonu, fosil yakıt kullanan santrallerin kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu amaçlarını eş zamanlı olarak optimize eden çok amaçlı bir karışık tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Önerilen bu model, Türkiye’de 2012-2023 yılları arasında oluşacak talebi karşılamak için kaynak bazında tespit edilen 18 santral tipinde üretilmesi gereken elektrik enerjisinin miktarının belirlenmesi amacıyla minimum sapma yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Çizelge 8’deki sonuçlar incelendiğinde, 12 yıllık projeksiyonda yenilenebilir enerji kaynaklarının ilgili santrallerin işletmeye alınmasının mümkün olduğu yıldan itibaren tercih edilmesi gerektiği açıkça görülmektedir.

Güneş enerjisini kullanan 3 santral tipinden yalnızca, diğer 2 tip güneş enerjisi santralından daha kısa sürede kurulabilen, diğer 2 santralda olduğu gibi direkt güneş ışımaya ihtiyaç duymayan, daha düşük maliyetli, işletme ve bakım kolaylığına sahip olan ve düz alanların yanı sıra yamaçlara da inşa edilebilen PV santrallerinde üretim yapılması durumu, Türkiye’deki yatırımcı eğilimi ile örtüşmektedir.

Planlama döneminde üretimin %82,3’ü güneş enerjisi, rüzgâr ve biokütle kaynaklarından karşılanmaktadır. 12 yıl boyunca yapılacak üretimin %4,4’ü ise nükleer santrallerde gerçekleştirilmektedir.

12 yıllık bu planda, güneş enerjisi kaynak potansiyelinin %43,7’si kullanılmaktadır. Potansiyelin kalan kısmının kullanılmamasının temel nedeni, bu santrallerin ilk kurulum maliyetleri (hidroelektrik hariç) ile birim üretim maliyetlerinin diğer yenilenebilir santrallara nazaran daha yüksek olmasıdır. Güneş enerjisi potansiyelinin tam olarak kullanılmama gerekçelerine benzer olarak model, yeni hidroelektrik santral inşasını da öngörmemiştir. Çünkü kurulum süreleri uzun olan hidroelektrik santrallerin ilk kurulum maliyetleri oldukça yüksek olmakla birlikte, sosyal kabul faktörü diğer yenilenebilir enerji santrallerine göre daha düşüktür. Rüzgâr, jeotermal ve biokütle santrallerinde ise kaynak potansiyelin tamamının kullanılması önerilmektedir.

Modelin çözüm sonuçları; fosil kaynak kullanan santrallerde yalnızca yenilenebilir kaynak kullanan santrallerin inşa sürecinin devam ettiği 1. yılda üretim yapılması, kaynak mevcudiyeti olmayan doğalgazdan vazgeçilmesi, Türkiye’de yatırımcıların en çok tercih ettiği rüzgâr kaynağının en etkin şekilde kullanılması gibi sonuçlar üretmesi açısından Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının stratejik hedefleri (ETKB, 2009) ve Türkiye’nin gereksinimleri ile de tutarlıdır.

Elektrik üretiminde herkes tarafından kabul edilen, kesintisiz, çevreye duyarlı, düşük maliyetli ve güvenilir üretim felsefeye paralel olarak, Çizelge 1’deki çalışmalarda sıklıkla dikkate alınan amaçların; maliyet minimizasyonu, sera gazı salınımlarının minimizasyonu, fosil yakıt kullanımının minimizasyonu ve sosyal kabulün maksimizasyonu olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen modelde dikkate alınan amaçların, bu bağlamda literatürle tutarlı olduğu açıktır.

Literatürdeki çalışmaların çoğu, belirli amaçlar için (pişirme, aydınlatma, ısıtma, v.b.) belirli bir bölgedeki elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla en uygun kaynak kombinasyonunun tespit edilmesiyle ilgilenmektedir (Çizelge 1). Oysaki bu çalışma kapsamında önerilen model, her ne amaçla olursa olsun tüm elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamaya yönelik olmakla birlikte, Türkiye’nin belirli bir bölgesinde değil, tamamında uygulanmıştır.

Literatürdeki çalışmaların bir tanesi hariç diğerlerinde ((Mavrotas, 1999) hariç), bir zaman periyodu yoktur. Çünkü bu çalışmalar, bir üretim ve/veya yatırım programı oluşturmak için değil, en uygun kaynak kombinasyonunun belirlenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Oysaki bu çalışma kapsamında önerilen modelin gerçek veriler ile çözümünü neticesinde, Türkiye’nin 12 yıl boyunca üretmesi gereken elektrik enerjisinin miktarı elde edilmiştir.

Çizelge 1’de verilen çalışmaların hemen hemen hepsinde yer alan maliyet minimizasyonu amacı, sıklıkla ve yalnızca değişken üretim maliyeti toplamı olarak ifade edilirken, bu çalışma kapsamında önerilen modelde “Elektrik Üretim Maliyetinin Minimizasyonu” amaç fonksiyonu, değişken üretim

maliyetini, yeni kurulacak santrallerin kurulum maliyetini, ithalat giderlerini, ihracat getirisini ve karbon piyasalarından elde edilecek geliri ihtiva etmesi açısından oldukça kapsamlıdır.

Yine literatürdeki çalışmalarda sıklıkla dikkate alınan sosyal kabulün maksimizasyonu amacı için belirlenmesi gereken sosyal kabul faktörü için de, önerilen model ile literatürdeki çalışmalar arasında farklılıklar vardır. Literatürdeki çalışmalarda ya sosyal kabul faktörünün nasıl belirlendiği belirtilmemiş, ya da 1-10 arası değerlerin atanması suretiyle bu değer tespit edilmiştir. Oysaki bu çalışmada sosyal kabul faktörünün belirlenmesi, çok ölçütlü bir karar problemi olarak ele alınarak AHP metodolojisine göre santral bazında hesaplanan sosyal kabul faktörleri önerilen modelde kullanılmıştır.

Bu çalışma, literatürdeki diğer çalışmalarda dikkate alınan yerli kaynak kullanımının maksimizasyonu, ithalat oranının minimizasyonu, istihdamın maksimizasyonu, güvenilirliğin ve sistem verimliliğinin maksimizasyonu ve sürdürülebilirliğin maksimizasyonu gibi amaçlar eklenerek ve diğer çok amaçlı çözüm yöntemleri kullanılarak geliştirilebilir.

**Çizelge 8.** Türkiye’nin 12 yıllık elektrik üretim planı (GWh) (12 year electricity generation plan for Turkey)

Santraller		Yıllar											
Kodu	Adı	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
T1	Güneş - PV	-	103.944,0	103.900,08	122.250,0	149.625,68	178.856,88	194.858,4	194.858,4	194.858,4	194.858,4	194.858,4	194.858,4
T2	Güneş - CRS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3	Güneş - PTC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T4	Taş Kömürü	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T5	Taş Kömürü Mevcut	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	Linyit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T7	Linyit Mevcut	30.297,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T8	Doğalgaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T9	Doğalgaz Mevcut	139.983,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T10	Hidrolik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T11	Hidrolik Mevcut	65.000,0	65.000,0	50,0	50,0	50,0	50,0	15.293,6	47.550,0	65.000,0	65.000,0	65.000,0	65.000,0
T12	Rüzgar	-	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0	138.270,0
T13	Rüzgar Mevcut	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0	5.727,0
T14	Jeotermal	-	-	3.648,0	3.612,0	3.648,0	3.612,0	3.648,0	3.648,0	3.648,0	3.648,0	3.648,0	3.648,0
T15	Jeotermal Mevcut	888,0	888,0	852,0	888,0	852,0	888,0	852,0	852,0	852,0	852,0	852,0	852,0
T16	Biokütle	-	-	85.252,62	92.412,0	92.372,32	92.412,00	92.412,00	92.412,00	92.412,00	92.412,00	92.412,00	92.479,7
T17	Biokütle Mevcut	559,0	559,0	559,0	559,0	559,0	544,12	559,0	559,0	559,0	559,0	559,0	520,3
T18	Nükleer	-	-	-	-	-	-	-	1.115,6	17.760,0	26.640,0	35.520,0	35.520,0

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agrawal, R.K., Singh, S.P., 2001, “Energy Allocations for Cooking in UP Households (India): A fuzzy Multi Objective Analysis”, *Energy Conver Manage*, Vol. 42, pp. 2139–2154.
- Antunes, C.H., Martins, A.G., Brito, I.S., 2004, “A Multiple Objective Mixed Integer Linear Programming Model for Power Generation Expansion Planning”, *Energy*, Vol. 29, pp. 613–627.
- Arnette, A., Zobel, C.W., 2012, “An Optimization Model for Regional Renewable Energy Development”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 4606–4615.
- Borges, A.R., Antunes, C.H., 2003, “A Fuzzy Multiple Objective Decision Support Model for Energy-Economy Planning”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 145, pp. 304–316.
- Deshmukh, S.S., Deshmukh, M.K., 2009, “A New Approach to Micro-Level Energy Planning – A Case of Northern Parts of Rajasthan, India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 634–642.

- Energy Information Administration, 2011, "Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2011.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2012, "Türkiye Elektrik Üretim, Tüketim, İthalat ve İhracat İstatistikleri".
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2009, "Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2010 - 2014 Stratejik Planı", pp. 25-30.
- Estimation of Emission Reductions, <http://www.cdmgoldstandard.org/project-certification/rules-and-toolkit>, 2012.
- Hazine Müsteşarlığı, 2012, "2012 Yılı Aylık ve Yıllık Enflasyon Oranları, <http://www.hazine.org.tr/tr/index.php/ekonomi/enflasyon>.
- Hoog, D., Hobbs, B., 1993, "An Integrated Resource Planning Model Considering Customer Value, Emissions and Regional Economic Impacts", *Energy*, Vol. 18, No. 11, pp. 1153-1159.
- Jana, C., Chattopadhyay, N., 2004, "Block Level Energy Planning for Domestic Lighting - A Multi Objective Fuzzy Linear Programming Approach", *Energy*, Vol. 29, pp. 1819-1829.
- Jinturkar, A.M., Deshmukh, S.S., 2011, "A Fuzzy Mixed Integer Goal Programming Approach for Cooking and Heating Energy Planning in Rural", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 9, pp. 11377-11381.
- Lazard, 2009, "Levelized Cost of Energy Analysis".
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D., Papayannakis, L., 1999, "An Energy Planning Approach based on Mixed 0-1 Multiple Objective Linear Programming", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 6, pp. 231-244.
- Mezher, T., Chedid, R., Zahabi, W., 1998, "Energy Resource Allocation Using Multi Objective Goal Programming: The Case of Lebanon", *Applied Energy*, Vol. 61, pp. 175-192.
- Pokharel, S., Chandrashekara, M., 1998, "A Multi Objective Approach to Rural Energy Policy Analysis", *Energy*, Vol. 23, No. 4, pp. 325-336.
- Ramanathan, R., Ganesh, L.S., 1995, "Energy Alternatives for Lighting in Households: An Evaluation Using an Integrated Goal Programming-AHP Model", *Energy*, Vol. 20, No. 1, pp. 63-72.
- Saaty, T.L., 1980, "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, New York, A.B.D.
- San Cristóbal, J.R., 2012, "A Goal Programming Model for the Optimal Mix and Location of Renewable Energy Plants in the North of Spain", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 4461-4464.
- Sovacool, B.K., 2008 "Valuing the Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power: A Critical Survey", *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 2950-2962.
- Tabucanon, M.T., 1988, "Multiplecriteria Decision Making in Industry", Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 2011, "Türkiye Elektrik Enerjisi 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2011-2020)", pp. 9-16.