

## Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Rüzgâr Enerji Santrallerinin Etkisinin Diferansiyel Gelişim Algoritmasıyla İncelenmesi

### The Examination of the Influence of the Wind Power Plants on Economic Power Dispatch Problems by Differential Evolution Algorithm

Serdar ÖZYÖN<sup>1</sup>, Celal YAŞAR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Dumlupınar Üniversitesi, KÜTAHYA

<sup>1</sup>[serdarozyon@dpu.edu.tr](mailto:serdarozyon@dpu.edu.tr), <sup>2</sup>[cyasar@dpu.edu.tr](mailto:cyasar@dpu.edu.tr)

#### Özet

*Bu çalışmada rüzgar enerji santrallerinin ekonomik güç dağıtım problemi üzerine etkisi araştırılmıştır. Sistem tarafından talep edilen gücün bir kısmının rüzgar enerjisi ile sağlanması durumunda üretim maliyetindeki değişim diferansiyel gelişim algoritması (DGA) kullanılarak hesaplanmıştır. DGA iki ayrı test sistemine iletim hattı kayıpları hem ihmal hem de dahil edilerek uygulanmıştır. İletim hattı kayıplarının hesaplanmasında B kayıp matrisi değerleri kullanılmıştır. Problemlerin DGA ile çözümünden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar enerji santralleri, Ekonomik güç dağıtımı, İletim hattı kayıpları, Diferansiyel gelişim algoritması.

#### Abstract

*In this study, the influence of wind power plants on economic power dispatch problem has been researched. When same part of the power demanded by the system is provided by wind power, the change in generation cost has been calculated by using differential evolution algorithm (DEA). DEA has been applied to two different test systems both by ignoring and including transmission line losses. B loss matrix has been used in the calculation of transmission line losses. The results obtained by the solution of the problems with DEA have been compared with the results in literature and have been discussed.*

**Keywords:** Wind power plants, Economic power dispatch, Transmission line losses, Differential evolution algorithm.

#### 1. Giriş

Fosil kaynaklı yakıtlar elektrik enerjisi üretimi için kullanılan en önemli kaynaklardır. Bu kaynakların giderek azalması ve çevreye verdikleri büyük zarar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde ise rüzgar enerjisi en yaygın kullanılan enerjidir.

Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde çoğunlukla hidrolik kaynaklar ile linyit, doğal gaz, kömür, fuel oil gibi termik kaynaklar kullanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin son yıllarda dünyada ve ülkemizde elektrik enerjisi üretimi üzerindeki payı giderek artmaktadır. Ülkemizde 2011 yılı sonu itibarıyla elektrik enerjisinin 52911 MW olan toplam kurulu gücünün %3.3'lük kısmına karşılık düşen toplam rüzgar enerjisi kurulu gücü 1729 MW'a ulaşmıştır. Enerji üretimi açısından incelendiğinde ise 228,4 milyar kWh olan toplam elektrik enerjisi üretiminin sadece %2,1'lik kısmının rüzgar enerjisinden üretildiği görülür [1]. Ülkemizin rüzgar enerjisi potansiyeline bakıldığında, rüzgar enerjisinden üretilecek elektrik enerjisinin genel elektrik enerjisi üretimine katkısının gelecek yıllarda da artarak devam edeceği öngörülmektedir. Bu öngörünün ışığında rüzgar enerjisinin ekonomik güç dağıtım problemlerine entegrasyonu üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak ortaya çıkmıştır.

Geleneksel ekonomik güç dağıtım problemi, sistemdeki mevcut yükün, sistemin kısıtları altında üretim birimleri tarafından minimum maliyetle karşılanabilmesi için birimlerin aktif güç çıkışlarının ayarlanması olarak bilinir [2]. Bu geleneksel ekonomik güç dağıtım probleminde ele alınan birimlerden bazılarının rüzgar enerjisi ile çalışması, probleme farklılık katmaktadır. Sistem tarafından talep edilen gücün bir kısmının rüzgar enerjisinden karşılanması durumunda, termik birimler tarafından üretilen elektrik enerjisinin yakıt maliyetinin düşeceği aşikardır.

Literatürde çeşitli ekonomik güç dağıtım problemlerine çok farklı algoritmalarla çözümler aranmıştır. Bunlardan bazıları adaptif bakteri yiyecek arama algoritması (ABYAA) [3], kalıp arama optimizasyonu [4], vekil değer değiş-tokuş yaklaşımı [5], newton metodu (NM) [6], analitik çözüm metodu [7], genetik algoritma (GA) [8], yeni hibrid arama yaklaşımı (MSG-HS) [9], diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [10], parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) [11], harmoni arama algoritması (HAA) [12], yapay arı koloni optimizasyon algoritması (YAKOA) [13] ve nokta tahmin metotları (NTM) [14] olarak belirtilebilir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin geleneksel ekonomik güç dağıtım problemleri üzerindeki etkisi ABYAA [3], NM [6] ve NTM [14] ile de araştırılmıştır.

Bu çalışmada toplam yükün %10'luk kısmının rüzgar enerjisinden elde edildiği varsayılmıştır. Dolayısıyla rüzgar enerjisi santrallerini içeren ekonomik güç dağıtım probleminin çözüm algoritması olarak diferansiyel gelişim algoritması (DGA) kullanılmıştır. Çözüm algoritması iki farklı test sistemine hem iletim hattı kayıplarını ihmal hem de dahil ederek ayrı ayrı uygulanmıştır.

## 2. Problemin Formülasyonu

Sistemdeki üretim birimlerinin yakıt maliyeti fonksiyonu her bir birim için aktif güç üretiminin 2. derece fonksiyonu olarak alınmıştır [3].

$$F_n(P_{G,n}) = a_n + b_n P_{G,n} + c_n P_{G,n}^2, \quad (\$/h) \quad (1)$$

Denklem (1)'de ( $P_{G,n}$ )'in birimi MW olarak alınmaktadır.

Amaç fonksiyonu olarak bilinen sistemdeki toplam yakıt maliyeti  $F_T(P_{G,n})$  denklem (2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

Ekonomik güç dağıtım probleminin çözümü, sistem kısıtları altında amaç fonksiyonunun minimize edilmesi şekliyle bulunur.

$$F_T(P_{G,n}) = \sum_{n \in N_G} F_n(P_{G,n}), \quad (\$/h) \quad (2)$$

Kayıplı sistemdeki güç denge kısıtı denklem (3)'teki gibi alınmıştır.

$$\sum_{n \in N_G} P_{G,n} - P_{yük} - P_{kayıp} = 0 \quad (3)$$

Termik üretim birimlerinin çalışma sınır değerleri denklem (4)'te verilmiştir.

$$P_{G,n}^{min} \leq P_{G,n} \leq P_{G,n}^{max}, \quad (n \in N_G) \quad (4)$$

Sistemin iletim hatlarında meydana gelen güç kayıpları B kayıp matrisi ile denklem (5) kullanılarak hesaplanmaktadır [3].

$$P_{kayıp} = \sum_{n \in N_G} \sum_{j \in N_G} P_{G,n} \cdot B_{nj} \cdot P_{G,j} \quad (5)$$

Denklem (3)'te verilen güç denge kısıtı, rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin ( $P_W$ ) sisteme katılmasıyla denklem (6)'da verilen şekilde dönüşür [3,6].

$$\sum_{n \in N_G} P_{G,n} - (P_{yük} - P_W) - P_{kayıp} = 0 \quad (6)$$

Denklem (6)'daki rüzgâr gücü ( $P_W$ ), rüzgâr santralinden elde edilen uygun güç üretimi ( $P_{av}$ )'ye bağlı olarak denklem (7)'yle sınırlandırılır [3,6].

$$P_{kayıp} + P_{yük} - \sum_{n \in N_G} P_{G,n} \leq P_{av} \quad (7)$$

## 3. DGA ve DGA'nın Probleme Uygulanması

DGA, Price ve Storn tarafından 1995 yılında geliştirilmiş, işleyiş açısından genetik algoritmaya dayanan popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Popülasyonu dayalı çalışmayıp, tek tek kromozomlar operatörlere tabi tutularak yeni bir birey elde edilmektedir. Bu işlem sırasında mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılmaktadır. Yeni bireyin uygunluğu eskisinden daha iyi ise yeni birey, aksi

takdirde eski birey bir sonraki jenerasyona (nesile) aktarılmaktadır. Bu algoritmanın kolay kodlanabilmesi diğer algoritmalara göre üstünlüğü olarak belirtilebilir. DGA'da kullanılan parametreler; popülasyon büyüklüğü (NP), değişken sayısı (gen sayısı, D), çaprazlama oranı (CR), nesil (jenerasyon) (1,2,3,...,g<sub>max</sub>) (g), ölçekleme faktörü (F) şeklinde belirtilebilir [10, 15-17].

DGA'da yer alan işlem basamakları kodlama, mutasyon, çaprazlama ve seçim olarak belirtilebilir. Kodlama ve başlangıç popülasyonu basamağında, popülasyonun büyüklüğü (NP) kadar D boyutlu kromozomdan meydana gelen başlangıç popülasyonunun üretimi denklem (8) kullanılarak gerçekleştirilir [10, 15-17].

$$x_{j,i,g=0} = x_j^{(l)} + rand_j[0,1] \cdot (x_j^{(u)} - x_j^{(l)}) \quad (8)$$

Denklemde  $x_{j,i,g}$ , g neslindeki i kromozomunun j parametresini, ( $x_j^{(l)}$ ,  $x_j^{(u)}$ ) değişkenlere ait alt ve üst değerleri göstermektedir. Denklem (9)'da verilen mutasyon, kromozomun genleri üzerinde rassal değişiklikler yapar. Ağırlıklandırılmış fark kromozomu ile üçüncü kromozom toplamı [10, 15-17].

$$n_{j,i,g+1} = x_{j,i,g} + F \cdot (x_{j,\eta_1,g} - x_{j,\eta_2,g}) \quad (9)$$

Denklemde F genellikle 0-2 arasında değer almaktadır ve  $n_{j,i,g+1}$  g+1 mutasyon ve çaprazlaştırmaya tabi tutulmuş ara kromozomu göstermektedir. Mutasyon sonucunda elde edilen fark kromozomu ve  $x_{i,g}$  kromozomu kullanılarak yeni kromozom ( $u_{i,g+1}$ ) çaprazlamayla üretilir [10, 15-17].

$$x_{j,u,g+1} = \begin{cases} x_{j,n,g+1} & \text{eğer } rand[0,1] \leq CR \text{ veya } j = j_{rand} \\ x_{j,i,g} & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (10)$$

Mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak hedef kromozomla birlikte üç farklı kromozom kullanılarak yeni bir kromozom (deneme kromozu) elde edilmiştir. Yeni nesile ( $g = g + 1$ ) aktarılacak olan kromozom uygunluk fonksiyon değerine bakılarak belirlenir. Kromozomlardan uygunluğu yüksek olan kromozom yeni nesile aktarılması seçim olarak isimlendirilir. Döngü  $g = g_{max}$  olana kadar devam eder ve en iyi birey çözüm olarak alınır [10, 15-17].

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} x_{u,g+1} & \text{eğer } f(x_{u,g+1}) \leq f(x_{i,g+1}) \\ x_{i,g} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (11)$$

Amaç sürekli daha iyi uygunluk değerine sahip kromozomlar elde etmek ve optimumu yakalamak ya da yaklaşmaktır. Bu döngü  $g = g_{max}$  olana kadar devam ettirilmektedir. Algoritmanın durdurulması belirlenen iterasyon sayısına bağlıdır [10, 15-17].

Kaynak [10]'da daha ayrıntılı olarak anlatılan DGA'nın ekonomik güç dağıtım problemlerine uygulanması bu bölümde özetlenmiştir. Başlangıç sürecinde birey kümesi rastgele olarak aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$P_{G,n} = P_{G,n}^{min} + U(0,1) \times (P_{G,n}^{max} - P_{G,n}^{min}) \quad (12)$$

Denklemde  $U(0,1)$  sıfırla bir arasında düzgün dağılmış rastgele sayıdır. Denklem (6)'daki aktif güç eşitlik kısıtının

sağlanması için üretim gücü  $P_{G,l}$  olan  $l$ . bağımlı generatör rastgele olarak seçilir. Bağımlı generatör gücü  $P_{G,l}^{eski}$ 'nin değeri başlangıç durumunda  $P_{kayıp}^{eski} = P_{kayıp}^{ilk} = 0$  alınarak denklem(13)'ten hesaplanır [10].

$$P_{G,l}^{eski} = P_{yük} + P_W + P_{kayıp} - \sum_{n \in N_G, l \in N_G} P_{G,n} \quad (13)$$

$P_{G,l}^{eski}$ 'ninde bulunmasıyla denklem (5)'ten  $P_{kayıp}^{yeni}$  hesaplanır. Buna göre  $P_{G,l}^{yeni}$ 'nin değeri aşağıdaki eşitlikten tekrar hesaplanır.

$$P_{G,l}^{yeni} = P_{G,l}^{eski} + P_{kayıp}^{yeni} - P_{kayıp}^{eski} \quad (14)$$

Bu işlemin sonucu denklem (15)'ten kontrol edilir ve *Hata* tolerans değerinin altında olduğunda denklem (6) eşitliği de sağlanmış olur.

$$Hata = |P_{kayıp}^{yeni} - P_{kayıp}^{eski}|, \quad Hata \leq TOL_{hata} \quad (15)$$

Bu durumda elde edilen  $P_{G,l}^{yeni}$  değerinin denklem (4) kısıtını sağlayıp sağlamadığına bakılır. Eğer sağlıyorsa işleme devam edilir. Eğer sağlamıyorsa denklem (12) eşitliğine dönülerek rastgele atama işlemi yeniden yapılır. Mutasyon işlemine gelince denklem (9)'da tanımlanan salınan bireyler üretilir. Denklem (4)'teki eşitliği sağlamayan bireylerin herhangi elemanı aşağıdaki denkleme göre değiştirilir [10].

$$P_{G,n} = \begin{cases} P_{G,n}^{min} & \text{eğer } P_{G,n} < P_{G,n}^{min} \\ P_{G,n} & \text{eğer } P_{G,n} > P_{G,n}^{max} \end{cases} \quad (16)$$

Popülasyona, mutasyon işleminden sonra çaprazlama işlemi uygulanır. Salınan bireyler ve yeni bireyler denklem (11)'e göre seçilir. Değerlendirme ve seçim bölümünde ise en iyi uyumu sağlayan birey seçilir. Bu çalışmada denklem (2)'deki toplam yakıt maliyet fonksiyonu uygunluk fonksiyonu olarak tanımlanır. Tüm iterasyonlarda tüm bireylerin minimum uygunluk değeri hesaplanır. İçlerinde en uygun fonksiyon değerine sahip çözüm en uygun çözüm olarak seçilir [10]. Durma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı belirlenir. Bu sayıya ulaşıncaya iterasyon durdurulur.

#### 4. Örnek Problemlerin Çözümleri

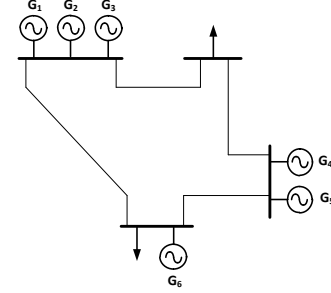
Bu çalışmada literatürde daha önce farklı metodlarla çözülmüş iki farklı test sistemi (Test sistemi I ve II) DGA ile çözülmüştür. Test sistemi I'de iletim hattı kayıpları dikkate alınmamış ve Test sistemi II'de ise kayıplar dikkate alınmıştır. Her iki test sisteminde de problemler ilk olarak klasik ekonomik güç dağıtım problemi olarak, sonra rüzgar santralleri sisteme ilave edilerek çözülmüştür.

Yapılan çalışmada DGA parametreleri popülasyon büyüklüğü 50, değişken sayısı 5, çaprazlama oranı 0,8, ölçekleme faktörü 0,5, iterasyon sayısı 100 ve hata tolerans değeri ise  $TOL_{hata} = 1 \times 10^{-6} MW$  olarak alınmıştır.

Test sistemlerinin çözümü için MATLAB R2010a'da bir program yazılmış ve bu program AMD 64 X2 2.31 GHz işlemcili, 4 GB RAM bellekli bilgisayarda çalıştırılmıştır.

#### 4.1. Test Sistemi-I:

Bu bölümde Şekil 1'de verilen 4 baralı 6 generatörlü test sistemi [6] iletim hattı kayıpları ihmal edilerek çözülmüştür. Burada 900 MW'lık yük talebi hem rüzgar enerjisiz (klasik ekonomik güç dağıtım) hem de rüzgar santralının sisteme ilave edilmesiyle karşılanmıştır. Rüzgar enerjisi ilave edilmesi durumunda talep edilen yükün %10'luk kısmının rüzgar enerjisi ile karşılandığı varsayılmıştır. Test sisteminin üretim birimlerine ait yakıt maliyet fonksiyonu ve aktif güç üretim sınırları Çizelge 1'de verilmiştir [6].



Şekil 1. Test sistemi I (6 generatörlü 3 baralı) [6]

Çizelge 1. Üretim birimlerinin yakıt maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları

Bara No	a	b	c	$P_{min}$ (MW)	$P_{max}$ (MW)
1	756.79886	38.53973	0.15247	10	125
2	451.32513	46.15916	0.10587	10	150
3	1049.32513	40.39655	0.02803	40	250
4	1243.5311	38.30553	0.03546	35	210
5	1658.5696	36.32782	0.02111	130	325
6	1356.6592	38.27041	0.01799	125	315

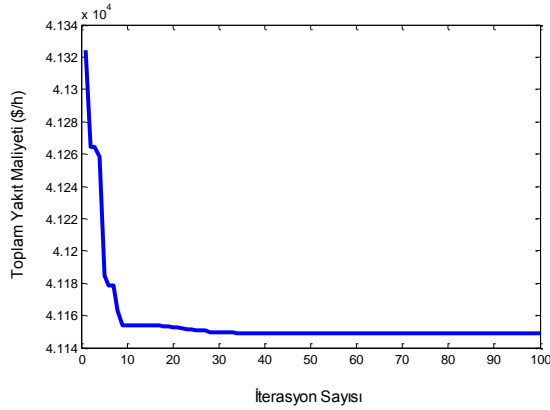
Test sisteminin çözümünden hem rüzgar enerjisiz hem de rüzgar santralının sisteme ilave edilmesiyle elde edilen minimum yakıt maliyeti değerini veren optimal güç üretim değerleri literatürdeki değerlerle birlikte Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Test Sistemi I'in optimal çözüm değerleri

	Rüzgar enerjisiz		Rüzgar enerjili
	NM [6]	DGA	DGA
$P_1$	32.4969	32.4955	29.1244
$P_2$	10.8160	10.8165	10.0000
$P_3$	143.6460	143.6493	125.2967
$P_4$	143.0318	143.0394	128.5269
$P_5$	287.1039	287.1044	262.7390
$P_6$	282.9054	282.8950	254.3130
$F_T$ (\$/h)	45463.5000	45463.4922	41148.9930
Süre (sn)	-	0.3816	0.4051

Çizelge 2 incelendiğinde DGA ile elde edilen sonuçlar literatürdeki NM ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. DGA ile çözümden elde edilen toplam yakıt maliyeti, rüzgar enerjisi 45463,49 \$/h iken rüzgar enerjisi sisteme katıldığında ise 41148,99 \$/h olarak ortaya çıkmıştır.

Test sisteminin DGA çözümünden rüzgar enerjisi dahil edildiği durumda elde edilen en iyi minimum toplam yakıt maliyetinin iterasyon sayılarına göre değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’de toplam yakıt maliyetinin optimal değerini yaklaşık 34. iterasyonda yakaladığı görülmektedir.



Şekil 2. Toplam yakıt maliyetinin iterasyon sayısına göre değişimi

#### 4.2. Test Sistemi-II:

Seçilen IEEE 6 generatörlü 30 baralı test sistemine iletim hattı kayıpları dahil edilerek 1800 MW yük talebi için DGA, hem rüzgar enerjisi hem de rüzgar santrali sisteme ilave edilerek olmak üzere iki kez uygulanmıştır. Test sisteminin üretim birimlerine ait maliyet fonksiyonu ve aktif güç üretim sınır değerleri Çizelge 3’te, iletim hattı kayıplarının hesaplanmasında kullanılan B kayıp matrisi değerleri Çizelge 4’te verilmiştir [18].

Çizelge 3. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu katsayıları ve aktif güç üretim sınırları

Bara No	a	b	c	$P_{min}$ (MW)	$P_{max}$ (MW)
1	85.6348	8.43205	0.002035	150	600
2	303.7780	6.41031	0.003866	150	600
3	847.1484	7.42890	0.002182	150	600
4	274.2241	8.30154	0.001345	150	600
5	847.1484	7.42890	0.002182	150	600
6	202.0258	6.91559	0.005963	150	600

Çizelge 4. B kayıp matrisi değerleri

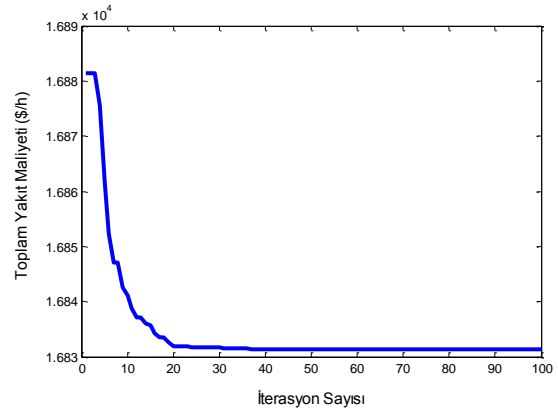
$$[B] = 10^{-5} \begin{bmatrix} 20.0 & 1.0 & 1.5 & 0.5 & 0 & -3.0 \\ 1.0 & 30.0 & -2.0 & 0.1 & 1.2 & 1.0 \\ 1.5 & -2.0 & 10.0 & -1.0 & 1.0 & 0.8 \\ 0.5 & 0.1 & -1.0 & 15.0 & 0.6 & 5.0 \\ 0 & 1.2 & 1.0 & 0.6 & 25.0 & 2.0 \\ -3.0 & 0,0024 & 0.8 & 5.0 & 2.0 & 21.0 \end{bmatrix}$$

Test sisteminin çözümünden elde edilen minimum toplam yakıt maliyeti değerini veren güç üretim değerleri literatürdeki çözümlerin güç değerleriyle birlikte Çizelge 5’te verilmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde DGA ile elde edilen çözümde rüzgar enerjisi toplam yakıt maliyeti 18715,412 \$/h, rüzgar enerjisi sisteme katıldığında ise 16831,3706 \$/h olarak literatürdeki ABYAA ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında sonuçların daha iyi değerleri yakaladıkları görülmüştür.

Çizelge 5. Test Sistemi II’nin optimal çözüm değerleri

	Rüzgar enerjisi		Rüzgar enerjili	
	ABYAA [3]	DGA	ABYAA [3]	DGA
$P_1$	252.3140	251.7184	269.3201	215.2082
$P_2$	303.3200	303.6196	270.4433	282.1148
$P_3$	503.0940	503.1064	435.2460	452.2535
$P_4$	372.7410	371.9615	329.0709	319.6537
$P_5$	301.3290	302.5391	261.0364	274.2593
$P_6$	197.3180	197.2535	158.5697	181.2373
$P_{toplam}$ (MW)	1930.1160	1930.199	1723.6860	1724.7270
$P_{kayıp}$ (MW)	130.1160	130.1985	103.6863	104.7268
$F_T$ (\$/h)	18721.3900	18719.4120	16853.4982	16831.3706
Süre (sn)	0.5629	0.6355	0.6132	0.7254

Test sisteminin DGA çözümünden rüzgar enerjisi dahil olduğu durumda elde edilen en iyi minimum toplam yakıt maliyetinin iterasyon sayılarına göre değişimi Şekil 3’te ve iletim hattı kayıplarının iterasyonlara göre değişimi ise Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 3’ten toplam yakıt maliyetinin optimal değerini yaklaşık 38. iterasyonda yakaladığı görülmüştür.



Şekil 3. Toplam yakıt maliyetinin iterasyon sayısına göre değişimi

Şekil 4’ten iletim hattındaki kayıpların yaklaşık 40. iterasyonda neredeyse optimal değeri yakaladığı, 40. ile 52. iterasyonlar arasında salındığı ve yaklaşık 52. iterasyondan sonra sabitlendiği görülmüştür.