

## Yenilenebilir Enerji Sistemleri Entegrasyonunun Sezgisel Optimizasyon Destekli Dinamik Stokastik OGA ile Analizi

### *Analysis of Renewable Energy Systems Integration with Heuristic Optimization Supported Dynamic Stochastic OPF*

Başar BAYDAR<sup>1</sup>, Haluk GÖZDE<sup>2</sup>, M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Başkent Elektrik Dağıtım A.Ş./EnerjiSA, Ankara, Türkiye  
basarbaydar@gmail.com

<sup>2</sup>Milli Savunma Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye  
hgozde@kho.edu.tr

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye  
taplam@gazi.edu.tr

#### Özet

Dinamik stokastik optimal yük akışı modeli kullanılarak kapasitesi yüksek olan yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye elektrik şebekesi üzerindeki sürekli durum gerilim kararlılığına etkisinin analizi yapılmıştır. Stokastik yaklaşım ile rüzgâr ve güneş enerjisindeki belirsizlik durumları modele eklenmiştir. Yapılan ilk modelde, 2015 yılı Türkiye aktif ve reaktif güç eğrileri klasik IEEE-30 baralı güç sistemi ve Türkiye elektrik sistemine uyarlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizlik durumlarını hesaplamak için rüzgâr ve güneş verilerini kullanan Weibull ODF (Olasılık Dağılım Fonksiyonu) kullanılmıştır. Yük akış analizinde, klasik Newton-Raphson yöntemi ve Parçacık Sürü Optimizasyonu yöntemi kullanılmıştır. Türkiye elektrik şebekesinden alınan parçaya ait ikinci modelde ise yenilenebilir enerji kaynaklarının Ankara ve Bartın illerinde kurulumu planlanmış ve belirsizlik durumları bu bölgelerin verilerine göre Weibull ODF kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonunda, sonuçlar karşılaştırılmış ve yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye elektrik sistemine entegrasyonunun, hem yıllık toplam üretim maliyetini hem de reaktif enerji üretimini büyük ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Optimal güç akışı, Yenilenebilir enerji kaynakları, Statik gerilim kararlılığı, Belirsizlik etkisi, Weibull olasılık dağılım fonksiyonu.

#### Abstract

Using the optimal stochastic dynamic load flow model, analysis of the effect of high capacity renewable energy sources on the steady state voltage stability on Turkey electricity system has been analyzed. The uncertainty of wind and solar energy is added to the model with

stochastic approach. In the first model, 2015 Turkey active and reactive power curves are adapted to the standard IEEE-30 bus power system and electrical system of Turkey. Weibull PDF (Probability Density Function) which uses wind and solar data was used to calculate the uncertainty of renewable energy sources. The classical Newton-Raphson method and Particle Swarm Optimization method are used in the load flow analysis. In the second model, it is thought that renewable energy sources are established in Ankara and Bartın provinces. Uncertainty cases are calculated using Weibull ODF according to the data of these regions. At the end of the study, the results are compared. As a result of the integration of renewable energy sources in Turkey's electricity system, and the annual total production costs, as well as proven to reduce reactive power production substantially.

**Keywords:** Optimal power flow, Renewable energy sources, Static voltage stability, Uncertainty effect, Weibull probability distribution function.

#### 1. Giriş

Günümüz dünyasının gelişmesinde önemli bir yere sahip olan elektrik enerjisi, modern toplumunun birçok hizmetlerinin enerji kaynağını oluşturmaktadır. Elektrik şebekelerinin altyapısının güvenilir ve aynı zamanda da kaliteli olması bu sebepten önem arz etmektedir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte son yıllarda elektrik enerjisi talebi hızla artmıştır. Bununla birlikte, ham enerji kaynaklarının elektrik enerjisine dönüştürülmesindeki işletme zorlukları, güç sistemlerinin planlanması, işletilmesi ve maliyeti açısından mevcut kaynaklardan en iyi şekilde yararlanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak fosil tabanlı yakıtların kullanımı vazgeçilmez bir hal almış olmakla birlikte fosil kaynaklı yakıt kullanarak elektrik üretimi

yapan tesisler çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi zararların bir kısmını oluşturmaktadırlar. Rüzgâr, güneş, su, biokütle ve jeotermal olarak sınıflandırılan yenilenebilir enerji kaynaklarının, bu zararları her geçen gün azaltması beklenmektedir.

Türkiye elektrik şebekesinin daha etkili bir şekilde planlanabilmesine katkı sağlamak amacıyla büyük kapasiteli yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekenin sürekli durum gerilim kararlılığına etkisi dinamik OGA yöntemi ile bir yıllık yük eğrisi referans alınarak analiz edilmiştir. Bu analizde, klasik IEEE-30 baralı güç sistemi, Türkiye elektrik şebekesine uyarlanmış ve entegre edilen YEKA'ların belirsizlikleri olasılık dağılım fonksiyonları ile modellenmiştir. OGA'nın çözümünde klasik yöntemle ilave olarak sezgisel PSO yöntemi kullanılmıştır. Son olarak, bütün bu analizler Türkiye elektrik şebekesinden alınan gerçek bir şebeke parçası üzerinde test edilmiştir.

## 2. Optimal Güç Akış Problemi

Optimal Güç Akışı (OGA) ilk kez 1962 yılında *Carpentier* tarafından tanıtılmıştır [1]. Güç sistemlerinde kullanılan donanımların fiziksel sınırlarını aşmadan üretimde, generatörler ve baralar arasındaki güç değişimi, üretim paylaşımı olarak tanımlanır. Optimize edilmesi gereken bir akış, istenen bir eşitlik, eşitsizlik kısıtlaması ve bir problem çözme metodu içeren doğrusal olmayan bir optimizasyon problemidir [2, 3]. OGA, bir elektrik güç sistemi içindeki güç akışını, güç akışı kısıtlamalarını ve işletim sınırlarını ihlal etmeden, en iyi şekilde optimize eder [4, 5]. Sonuç olarak, enerji kalitesini en üst düzeye çıkarır ve güç sistemi için en uygun çalışma koşulunu belirler. Genel OGA problemi Denklem 1'de formüle edilmiştir [6]:

$$\begin{aligned} f(x, u) &= 0 \text{ (amaç fonksiyonu)} \\ g(x, u) &= 0 \text{ (eşitlik kısıtları)} \\ h(x, u) &\leq 0 \text{ (eşitsizlik kısıtları)} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada:

$f(x, u)$  çözümü optimize edilmesi istene minimizasyon fonksiyonu,  
 $g(x, u)$  güç akış denklemlerini temsil eder,  
 $h(x, u)$  güç sistemi güvenlik limitlerini temsil eder.

ve  $x, u$  sırasıyla, durum ve kontrol değişkenleridir.

Güç sisteminin durum değişkenleri; referans barasının aktif çıkış gücü, yük baralarının gerilim genlik değeri, generatör baralarının reaktif çıkış gücü olarak tanımlanır. Kontrol değişkenleri ise referans barası hariç generatör baralarının aktif çıkış güçlerini, generatör baralarının gerilim genlik değerlerini, transformatörlerin kademe değerlerini, generatör baralarının aktif çıkış güçlerini içerir. Güç sisteminin tüm üretim maliyetini en aza indirmek için genel maliyet fonksiyonu  $F_{yakit}$  Denklem 2'de formüle edilmiştir.

$$F_{yakit} = \sum_{i=1}^{N_R} (\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2) \quad (2)$$

Burada:

$N_g$  güç sisteminde bulunan generatör sayısı,  
 $P_{gi}$  generatörün aktif gücü,  
 $\alpha_i, \beta_i$  ve  $\gamma_i$  generatörün yakıt maliyet katsayılarıdır.

Sistemde bulunan  $k$  barasındaki aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem 3 ve Denklem 4'te verilmiştir.

$$P_k = 0 = V_k \sum_{m=1}^N [V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)]] - P_{GK} + P_{LK} \quad (3)$$

$$Q_k = 0 = V_k \sum_{m=1}^N [V_m [g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)]] - Q_{GK} + Q_{LK} \quad (4)$$

Bu çalışmada, dinamik OGA modeli ve stokastik OGA modeli ile yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsiz değişimleri güç sisteminin statik kararlılığına etkisini incelemek için birbiriyle birleştirilmiştir. Bu amaçla, dinamik OGA bir aylık periyotta modellenirken, stokastik OGA her ay için Weibull PDF güneş radyasyonu ve rüzgâr hızı değişimi ile modellenmiştir.

## 3. DSOPF Modelinin Hazırlanması

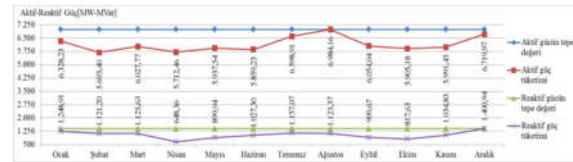
Güç sistemi olarak standart IEEE-30 baralı güç sistemi ile Ankara ve Bartın illerini kapsayan gerçek güç sistemi kullanılmıştır. Dinamik stokastik optimal güç akışı (DSOPF) modelinin hazırlanması amacıyla belirtilen iki model her iki güç sistemi üzerinde uygulanmıştır.

*Model-1:* Her iki güç sisteminde bir yıl süresince aylık dinamik OGA modeli,

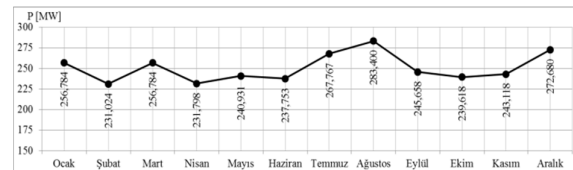
*Model-2:* Weibull olasılık dağılım fonksiyonu (ODF) ile modellenen belirsiz yenilenebilir enerji kaynakları dâhil iki güç sisteminde de bir yıl süresince birleştirilmiş aylık DSOPF modeli.

### 3.1. Modelin uyarlanması

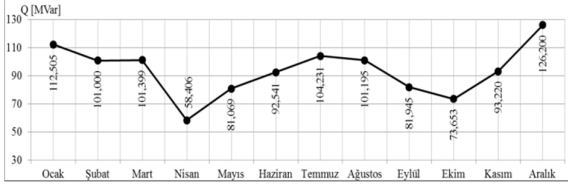
2015 yılına ait Türkiye'nin aktif ve reaktif güç yük eğrileri referans alınarak TEİAŞ yıllık sektör raporlarından elde edilmiş ve 1 yıllık olacak şekilde yük eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 1'de 2015 yılı Türkiye için aktif ve reaktif güç yük eğrileri verilmiş, Şekil 2 ve Şekil 3'te bu eğri referans alınarak oluşturulan IEEE-30 bara için aylık toplam aktif ve reaktif güç eğrileri verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te ise gerçek güç sistemi için aylık toplam aktif ve reaktif güç eğrileri verilmiştir.



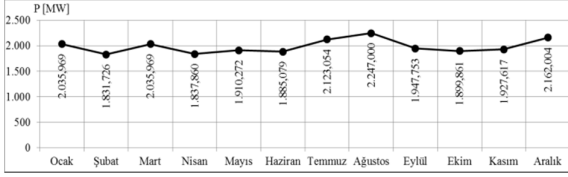
Şekil 1. 2015 yılı Türkiye aktif/ reaktif güç yük eğrileri



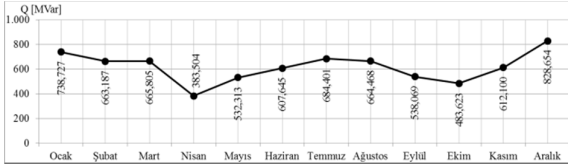
Şekil 2. IEEE-30 bara için aylık aktif güç yük eğrisi



Şekil 3. IEEE-30 bara için aylık reaktif güç yük eğrisi



Şekil 4. Gerçek güç sistemi aylık aktif güç yük eğrisi



Şekil 5. Gerçek güç sistemi aylık reaktif güç yük eğrisi

### 3.1.1. Her iki güç sisteminde YEKA düzenlenmesi

Yenilenebilir enerji kaynakları Model-1'e toplam kapasitenin %48'i oranında bir kapasite ile entegre edilmiştir. 5 ve 11 numaralı baralardaki termik santraller rüzgâr santrali ile, 13 numaralı barada ki termik santral ile güneş santrali değiştirilmiş, modifiye edilen IEEE-30 baralı güç sistemi Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Santrallerin yeni üretim kapasiteleri(IEEE-30)

Bara Numarası	Santral Tipi	Üretim Kapasitesi (MW)
1	Termik	99,248
2	Termik	80,000
5	Rüzgâr	75,000
8	Termik	20,000
11	Rüzgâr	60,000
13	Güneş	50,000

Yenilenebilir enerji kaynakları Model-1'e toplam kapasitenin %6'sı oranında bir kapasite ile entegre edilmiş olup herhangi bir üretim olmayan 3 ve 24 numaralı baralara rüzgâr santrali, 29 numaralı baraya güneş santrali eklenerek Türkiye güç sistemi için YEKA ilavesi yapılmıştır. Bu veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Santrallerin yeni üretim kapasiteleri (Gerçek güç sistemi)

Bara Numarası	Santral Tipi	Üretim Kapasitesi (MW)
1	Termik	853,00
3	Rüzgâr	75,00
13	Termik	379,00
14	Termik	840,00
20	Termik	620,00
22	Termik	798,00
24	Rüzgâr	60,00
29	Güneş	50,00

### 3.1.2. Belirsizlik durumlarının hesaplanması

Stokastik OGA modeli, rüzgâr hızının belirsizliğinden meydana gelen aylık değişimlerini ve güneş ışınımından oluşan değişimleri modellemek amacıyla Model-2'de Weibull olasılık dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. IEEE-30 baralı güç sisteminde bulunan 5 numaralı baraya 75 MW, 11 numaralı baraya ise 60 MW üretim kapasitesine sahip rüzgâr santrali kurulmuştur. Benzer şekilde, gerçek güç sisteminde de, 3 ve 24 numaralı baralara sırasıyla 75 MW ve 60 MW rüzgâr santrali kurulmuştur.

Rüzgâr santralinin kurulmasının yapılacağı bölge olarak Model-2'de Türkiye'nin Bartın ili Amasra ilçesi seçilmiştir. Amasra bölgesi için seçilen hava yoğunluğu ( $\rho = 1,211 \text{ kg/m}^3$ ), ölçek faktörü  $k$  ve şekil faktörü  $c$  hesaplanmıştır. Bu veriler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Amasra bölgesi için  $k$  ve  $c$  katsayıları, türbinlerin çalışma güçleri

Ay	$k$	$c$	$P_{75\text{MW}}$ [MW]	$P_{60\text{MW}}$ [MW]
Ocak	1,48	8,63	48,3643	38,6914
Şubat	1,50	8,22	45,1714	36,1371
Mart	1,54	9,81	56,9099	45,5279
Nisan	1,39	7,79	42,5674	34,0539
Mayıs	1,40	5,56	25,5626	20,4501
Haziran	1,40	6,10	29,6640	23,7312
Temmuz	1,30	7,41	40,3642	32,2914
Ağustos	1,49	6,53	32,4981	25,9985
Eylül	1,82	7,11	35,9964	28,7971
Ekim	1,59	8,97	50,3915	40,3132
Kasım	1,63	7,16	36,7414	29,3931
Aralık	1,94	9,57	54,0577	43,2462

Güneş radyasyonu belirsizliğini modelleyebilmek için, Model-2'de, IEEE-30 baralı güç sistemindeki 13 numaralı baraya 50 MW, gerçek güç sisteminde ise 29 numaralı baraya 50 MW üretim kapasitesine sahip güneş enerjisi santrali kurulmuştur. Santrallerin, Türkiye'de Ankara bölgesinde kurulduğu planlanmıştır. Bu değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Ankara bölgesi için DNI değerleri

Ankara	$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$P_{50\text{MW}}$ [MW]
Ocak	341,7083	17,0854
Şubat	475,2083	23,7604
Mart	639,3750	31,9688
Nisan	679,5000	33,9750
Mayıs	767,6667	38,3833
Haziran	848,3333	42,4167
Temmuz	1052,9167	52,6458
Ağustos	1189,1667	59,4583
Eylül	1136,0000	56,8000
Ekim	787,2917	39,3646
Kasım	635,8333	31,7917
Aralık	376,0417	18,8021

### 3.2. Uyarlanmış IEEE-30 baralı güç sistemi ile çalışma

Gerilim kararlılığı, toplam yakıt maliyeti ve faz açlarına ait değişimleri gözlemek için tüm OGA problemleri

MATLAB ortamında Newton-Raphson ve Parçacık Sürü Optimizasyon algoritması çözüm yöntemleri ile çözülmüştür.

Durum-1: Tüm santrallerin termik olması durumu (Tablo 5)

Durum-2: Bazı santrallerin belirsizlik içeren YEKA olması durumu (Tablo 6)

**Tablo 5.** Durum-1 için N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

DURUM 1 /AY	Gerilim Büyüklüklerinin Standart Sapması		Faz Açılarının Standart Sapması		Maliyet (\$/h)	
	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA
1	0,01653	0,01653	2,8422	2,8603	707,06	707,004
2	0,01571	0,01571	2,5156	2,5305	618,91	618,592
3	0,01567	0,01615	2,8459	2,8624	706,86	706,809
4	0,01498	0,01491	2,5545	2,5639	620,90	620,698
5	0,01441	0,01574	2,6623	2,6791	651,80	651,775
6	0,01570	0,01570	2,6120	2,6296	641,32	641,118
7	0,01648	0,01643	2,9705	2,9818	745,72	745,697
8	0,01664	0,01665	3,1367	3,1451	802,05	802,036
9	0,01450	0,01578	2,7230	2,7410	667,93	667,962
10	0,01460	0,01581	2,6509	2,6632	647,30	647,229
11	0,01582	0,01579	3,0806	2,7055	659,56	659,408
12	0,01758	0,01757	3,0153	3,0270	763,63	763,614
<b>Ort.</b>	<b>0,01572</b>	<b>0,01606</b>	<b>2,8008</b>	<b>2,7824</b>	<b>686,08</b>	<b>685,995</b>

**Tablo 6.** Durum-2 için N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

DURUM 2 /AY	Gerilim Büyüklüklerinin Standart Sapması		Faz Açılarının Standart Sapması		Maliyet (\$/h)	
	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA
1	0,01660	0,01731	2,2085	2,3791	391,00	386,712
2	0,01578	0,01688	2,0345	1,9932	310,88	309,189
3	0,01620	0,01723	2,2220	2,1781	309,64	308,010
4	0,01482	0,01480	1,9912	1,9799	297,27	296,105
5	0,01582	0,01699	2,1925	2,1411	404,46	399,604
6	0,01581	0,01687	2,0884	2,0421	359,31	356,165
7	0,01677	0,01742	2,3394	2,2876	361,85	358,568
8	0,01712	0,01675	2,3453	3,0993	435,72	428,834
9	0,01450	0,01695	2,1770	2,1268	307,25	305,384
10	0,01456	0,01454	2,0449	2,0325	265,36	264,680
11	0,01586	0,01699	2,1499	2,1031	368,38	364,938
12	0,01760	0,01793	2,2719	2,5189	403,73	398,924
<b>Ort.</b>	<b>0,01595</b>	<b>0,01672</b>	<b>2,1721</b>	<b>2,2401</b>	<b>351,24</b>	<b>348,093</b>

Belirsizlik durumları dâhil yenilenebilir santrallerin mevcut olduğu Durum-2'ye ait N-R metodu ile elde edilen yıllık toplam yakıt maliyeti 4214,85 \$/h, PSO ile

elde edilen yıllık toplam yakıt maliyeti 4177,118 \$/h, yıllık toplam yakıt maliyeti farkı ise 37,7316 \$/h olarak hesaplanmıştır. Durum-2'de Weibull olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizlikler hesaba katıldığında, üretim maliyetleri daha gerçekçi bir duruma gelmektedir. Bu sayede, gerçek duruma uygun olarak IEEE-30 baralı güç sistemi modeline belirsizlik içeren YEKA'lar ilave edildiğinde yıllık 37,7316 \$/h tasarruf sağlandığı görülmüştür. Bu durum Tablo 7'de gösterilmiştir. Durum-1 ve Durum-2 karşılaştırıldığında hem toplam aktif güç üretiminin hemen hemen aynı olmasına hem de gerilim büyüklüklerinin ve faz açıları sabit kalmasına rağmen, %48'lik YEKA entegrasyonu yapıldığında elektrik üretim maliyetlerinin neredeyse yarı yarıya azaldığı açıkça görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizlik durumlarını da göz önüne alan dinamik stokastik optimal yük akışı analizi (Durum-2), yapılan bu çalışma ile, yenilenebilir enerji santrallerinin aynı zamanda konvansiyonel termik santralleri de içeren enerji sistemine ilave edilmesinin katkısının önemli bir seviyede tasarruf sağladığını göstermektedir. Tablo 8'de bu durum özetlenmiştir.

**Tablo 7.** Durum-1-2 N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

Maliyet	Yıllık Toplam N-R (\$/h)	Yıllık Toplam PSO (\$/h)	Fark (\$/h)	Yıllık Ortalama N-R (\$/h)	Yıllık Ortalama PSO (\$/h)
Durum-1	8233,04	8231,947	1,0926	686,086	685,99562
Durum-2	4214,85	4177,118	37,7316	351,237	348,09320

**Tablo 8.** Durum-1-2 sonuçlarının karşılaştırılması

	Toplam Aktif Güç (MW)	Toplam Reaktif Güç (MVar)	Gerilim Büyüklüklerinin Standart Sapmasının Ortalaması	Faz Açılarının Standart Sapmasının Ortalaması
Durum-1	3096,95	643,43	0,0157	2,8000
Durum-2	3059,84	323,83	0,0159	2,1721

### 3.3. Gerçek güç şebeke üzerinde uygulama çalışması

Türkiye elektrik şebekesinden seçilen değerler gerçek bir şebeke parçasında uyarlanmıştır. Bu amaçla, Ankara ve Bartın illerinin içerecek bir güç sistemi kullanılmıştır. Gerçek güç sistemine entegre edilen yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizlik durumuna daha önce göz önünde bulundurulmuş düzenlemelere göre incelemek için Durum-1 ve Durum-2 kullanılarak iki durum gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 9.** Durum-1 için N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

DURUM 1 /AY	Gerilim Büyüklüklerinin Standart Sapması		Faz Açılarının Standart Sapması		Maliyet (\$/h)	
	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA
1	0,02886	0,02690	4,16702	4,3100	11741,56	11071,12
2	0,02620	0,02620	3,78065	3,5205	10693,90	10134,84
3	0,02745	0,02812	4,14790	4,1565	11738,07	10063,14

4	0,01800	0,01763	3,73703	3,3483	10709,84	10214,46
5	0,02330	0,02047	4,70321	4,1658	8894,540	8979,900
6	0,02542	0,02014	4,64084	4,6145	8736,560	7714,280
7	0,02830	0,02570	4,4439	4,3421	12136,12	11997,42
8	0,02854	0,02385	4,84960	4,5387	12804,44	12372,68
9	0,02316	0,02014	3,84880	3,9819	11393,91	11257,96
10	0,02122	0,01922	3,70469	3,7662	11234,76	10766,00
11	0,02527	0,02156	3,80760	3,8001	11327,89	11206,06
12	0,03088	0,02666	4,62529	4,5245	12342,23	11424,62
<b>Ort.</b>	<b>0,02555</b>	<b>0,02305</b>	<b>4,20471</b>	<b>4,0891</b>	<b>11146,15</b>	<b>10600,2</b>

**Tablo 10.** Durum-2 için N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

D U R U M 2 /AY	Gerilim Büyükliklerinin Standart Sapması		Faz Açılarının Standart Sapması		Maliyet (\$/h)	
	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA	N-R OGA	PSO OGA
1	0,02683	0,02591	5,02028	5,19094	7314,14	7266,45
2	0,02459	0,02418	4,19342	4,15218	5804,48	5781,62
3	0,02572	0,02722	4,97454	4,93059	7067,12	7030,67
4	0,01980	0,02191	4,12738	4,11603	5797,31	5718,63
5	0,02257	0,02385	4,50002	4,44859	6482,11	6443,92
6	0,02382	0,02400	4,36046	4,31415	6224,22	6128,67
7	0,02646	0,02729	5,27066	5,21883	7873,79	7839,79
8	0,02680	0,02689	5,85344	6,60747	9101,67	9078,67
9	0,02281	0,02170	4,51838	4,46820	6485,38	6454,12
10	0,02158	0,02085	4,38044	4,36806	6084,03	6019,93
11	0,02412	0,02524	4,52949	4,48263	6512,77	6464,87
12	0,02828	0,02909	5,54774	5,79479	8314,38	8236,34
<b>Ort.</b>	<b>0,02445</b>	<b>0,02484</b>	<b>4,77302</b>	<b>4,84104</b>	<b>6921,78</b>	<b>6871,97</b>

Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizlik durumları da göz önüne alan dinamik stokastik optimal güç akışı analizi, yapılan bu çalışma ile, yenilenebilir enerji santrallerinin aynı zamanda konvansiyonel termik santralleri de içeren güç sistemine entegre edilmesinin katkısının önemli bir seviyede olduğunu göstermiştir. Belirsizlik durumları dâhil yenilenebilir santrallerin mevcut olduğu Durum-2'ye ait N-R metodu ile elde edilen yıllık toplam yakıt maliyeti 83061,40 \$/h, PSO ile elde edilen yıllık toplam yakıt maliyeti 82463,68 \$/h, yıllık toplam yakıt maliyeti farkı ise 597,72 \$/h olduğu görülmüştür. Bu sayede, % 6 YEKA ilavesi ile sistemde yıllık toplam 597,72 \$/h sağlandığı görülmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren diğer modellerden oluşan N-R ve PSO yıllık toplam yakıt maliyeti farkı nispeten büyük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum Tablo 11'de de özetlenmiştir. Durum-2'de Weibull olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarındaki belirsizlikler hesaba katıldığında, üretim maliyetleri daha gerçekçi bir duruma geldiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlarda, hem toplam aktif güç üretiminin neredeyse aynı olmasına hem de gerilim büyüklüklerinin ve faz açılarının sabit kalmasına rağmen, elektrik enerjisi üretim maliyetlerinin Durum-1'e göre neredeyse yarı yarıya azaldığı açıkça görülmektedir. Buna ek olarak, reaktif güç üretiminin de bu durumda neredeyse

yarısında azalma sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu değerler Tablo 12'de verilmiştir.

**Tablo 11.** Durum-1-2 N-R ve PSO sonuçlarının karşılaştırılması

Maliyet	Toplam (N-R)	Toplam (PSO)	Fark (\$/h)	Ortalama (N-R)	Ortalama (PSO)
Durum-1	133753,8	127202,48	6551,34	11146,15	10600,20
Durum-2	83061,4	82463,68	597,72	6921,783	6871,973

**Tablo 12.** Durum-1-2 elde edilen sonuçların karşılaştırılması

	Toplam Aktif Güç (MW)	Toplam Reaktif Güç (MVar)	Gerilim Büyükliklerinin Standart Sapmasının Ortalaması	Faz Açılarının Standart Sapmasının Ortalaması
Durum-1	24152,62	12113,0	0,025549	4,20470
Durum-2	24196,94	12678,3	0,024448	4,77301

#### 4. Sonuçlar

Yapılan çalışma sonucunda, parçacık sürü algoritması ile elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, normal çalışma koşullarında sürekli durumda şebekenin gerilim genliği ve faz açılarının standart sapmalarında önemli bir değişim gözlenmemesine rağmen, toplam üretim maliyetlerinde, Durum-1 (tümünün termik santral olması durumu) ve Durum-2 (belirsizliğe sahip YEKA entegrasyonu olması durumu) arasında yaklaşık %38'lik bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Gerilim kararlılığında ise önemli bir değişim gözlenmemekle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliklerinden dolayı bazı aylardan sistemdeki toplam reaktif gücün yetersiz kalması nedeniyle düşüşler görülmüş, ancak buna karşılık faz açılarının daha kararlı duruma geldiği gözlenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Carpentier, J., "Contribution a l'etude du dispatching economique", *Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens*, 3(1), 431-447, 1962.
- [2] Ghaddar B., Marecek J., Mevissen M., "Optimal Power Flow As A Polynomial Optimization Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 539-546, 2016.
- [3] Lin J., Li V.O., Leung K.C., Lam A.Y., "Optimal Power Flow With Power Flow Routers", *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(1), 531-543, 2017.
- [4] Frank S., Steponavice I., Rebennack S., "Optimal Power Flow: A Bibliographic Survey I", *Energy Systems*, 3(3), 221-258, 2012.
- [5] Almeida K.C., Kocholik A., "Solving Ill-Posed Optimal Power Flow Problems Via Fritz-John Optimality Conditions", *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6), 4913-4922, 2016.

- [6] Chandekar A.D., Subroto D., "A Review on Optimal Power Flow Solutions under Variable Load", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(1), 2015.