

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**



**RÜZGAR VE TERMİK SANTRALLERDEN OLUŞAN HİBRİT  
SİSTEMLERDE EKONOMİK GÜÇ ÜRETİMİNİN  
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALP KARADENİZ**

**BALIKESİR, ARALIK-2015**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**



**RÜZGAR VE TERMİK SANTRALLERDEN OLUŞAN HİBRİT  
SİSTEMLERDE EKONOMİK GÜÇ ÜRETİMİNİN  
BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ALP KARADENİZ**

**Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. M. Kubilay EKER**

**Doç. Dr. M. Erhan BALCI**

**Yrd. Doç. Dr. Ulaş KILIÇ**

**BALIKESİR, ARALIK-2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Alp KARADENİZ tarafından hazırlanan “RÜZGAR VE TERMİK SANTRALLERDEN OLUŞAN HİBRİT SİSTEMLERDE EKONOMİK GÜÇ ÜRETİMİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.12.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. M.Kubilay EKER

Üye  
Doç. Dr. M.Erhan BALCI

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Ulaş KILIÇ

  
.....  
  
.....  
  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**RÜZGAR VE TERMİK SANTRALLERDEN OLUŞAN HİBRİT  
SİSTEMLERDE EKONOMİK GÜÇ ÜRETİMİNİN BELİRLENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ALP KARADENİZ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD.DOÇ.DR. M.KUBİLAY EKER)  
BALIKESİR, ARALIK-2015**

Rüzgar santrallerin enerji sistemleri üzerindeki etkilerinin, ekonomik güç dağılımı açısından incelendiği bu tez, üç bölümden oluşmaktadır.

Tezin ilk bölümünde, rüzgar ve termik santrallerden oluşan hibrit enerji sistemlerinde, ekonomik güç dağılımı problemi tek zaman aralığı için incelenmiştir. Statik ekonomik dağılım problemi (SED) olarak anılan bu durum, üç güncel sezgisel algoritma (Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Big-Bang Big-Crunch (BB-BC) ve İyon Hareket Optimizasyonu (İHO)) kullanılarak çözülmüştür. Kullanılan algoritmaların performansları, minimum maliyet değeri ve çalışma süreleri açısından karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, 6 zaman aralığı için rüzgar hızı değişimi dikkate alınarak ekonomik güç dağılımı problemi incelenmiştir. Dinamik ekonomik dağılım (DED) problemi olarak anılan bu durumun analizi için, PSO, BB-BC ve İHO algoritmalarının yanında Vortex Search (VS) algoritmalarından yararlanılmıştır. Farklı zaman aralıklarında değişen rüzgar hızının tahmin edilmesi için ise Weibull dağılım modeli kullanılmıştır.

Tezin son bölümünde, Balıkesir-Balya Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak, Weibull dağılım modeli oluşturulmuştur. Weibull dağılım fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesi için 6 farklı metot kullanılmıştır. Elde edilen bu parametreler dikkate alınarak, gerçek verilere göre en az hatayı içeren rüzgar hızı modeli ortaya çıkarılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Ekonomik Güç Dağılımı, Weibull Dağılımı, Weibull Dağılımı Parametrelerini Belirleme Metodları, Big-Bang Big Crunch Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu, İyon Hareket Optimizasyonu, Vortex Search Algoritması.



## **ABSTRACT**

### **DETERMINING ECONOMIC POWER GENERATION OF HYBRID SYSTEMS WHICH CONSIST OF WIND AND THERMAL POWER PLANTS**

**MSC THESIS**

**ALP KARADENİZ**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSIST.PROF.DR M.KUBİLAY EKER )  
BALIKESİR, DECEMBER 2015**

In this thesis which consists of three different studies, the effects of wind power systems on energy systems were examined in terms of economic power dispatch.

In the first part of the thesis, the economic dispatch problem of wind-thermal (hybrid) system was studied for one time interval which named static economic dispatch (SED). SED problem was solved by using three new heuristic algorithms (Big-Bang Big-Crunch (BB-BC), Particle Swarm Optimization (PSO) and Ions Motion Optimization (IMO)). The results were compared with respect to run-time and minimum power production cost values.

In the second part of the thesis, the economic dispatch problem was examined by considering changes of wind speed for six time intervals which named dynamic economic dispatch (DED). DED problem was studied by using Big-Bang Big-Crunch (BB-BC), Particle Swarm Optimization (PSO), Ions Motion Optimization (IMO) and Vortex Search (VS) algorithms. To establish the model of wind speed, which changes for all different time intervals, Weibull distribution was used.

In the last part of the thesis, Weibull distribution was established by using wind speed values which were taken from Balıkesir-Balya Station. To determine the Weibull function parameters, six different methods were utilized and the best wind speed model was established by considering these parameters.

**KEYWORDS:** Economic Dispatch, Weibull Distribution, Defining Weibull Distribution Parameters Methods, Big-Bang Big-Crunch Optimization, Particle Swarm Optimization, Ions Motion Optimization, Vortex Search Algorithm.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. HİBRİT SİSTEMLERDE STATİK EKONOMİK DAĞILIM MODELİ</b> 7	
2.1 Ekonomik Dağılım Probleminin Amaç Fonksiyonu .....	7
2.1.1 Termik Santrallerde Enerji Üretim Maliyeti .....	7
2.1.2 Rüzgar Enerji Üretim Maliyeti.....	8
2.1.3 Sınırlamalar ve Amaç Fonksiyonu.....	9
2.2 Statik Ekonomik Dağılım Modeli için Analiz Edilen Sistem .....	10
2.3 Algoritmalar .....	11
2.3.1 Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu (BB-BC) .....	12
2.3.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) .....	13
2.3.3 İyon Hareket Optimizasyonu (İHO).....	14
2.4 İlk Sistemin Simülasyon Sonuçları .....	16
2.5 Sonuç .....	21
<b>3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN TAHMİNİ KARAKTERİSTİĞİ ve DİNAMİK EKONOMİK DAĞILIM MODELİ</b> .....	<b>22</b>
3.1 Valf Nokta Etkisi ve Gaz Salınım Maliyeti Dikkate Alınarak Dinamik Ekonomik Dağılım Problemi.....	25
3.2 Hat Kayıpları .....	26
3.3 Dinamik Ekonomik Dağılım Modeli için Analiz Edilen Sistem.....	27
3.4 Vortex Search Algoritması (VS).....	31
3.4.1 VS Algoritmasının Metodolojisi .....	31
3.5 İkinci Sistemin Simülasyon Sonuçları .....	33
3.6 Sonuç .....	39
<b>4. BİR BÖLGE İÇİN WEIBULL FONKSİYONU PARAMETLERİNİ BELİRLEME METOTLARI</b> .....	<b>41</b>
4.1 Metodlar .....	42
4.1.1 Enerji Eğilim Faktörü Metodu (EEM) .....	43
4.1.2 Grafik Metodu (GM).....	44
4.1.3 Moment Metodu (MM).....	44
4.1.4 L-Moment Metodu (L_MM).....	45
4.1.5 En Yüksek Olabilirlik Metodu (EYOM).....	45
4.1.6 Basitleştirilmiş En Yüksek Olabilirlik Metodu (BEYOM).....	46
4.2 Hata Analizi Test Yöntemleri .....	46
4.3 Balya Bölgesi İçin Rüzgar Hızının Matematiksel Olarak Modellenmesi 47	

4.4 Sonuç.....	56
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>57</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>59</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Avrupa ülkelerine ait rüzgar enerjisi kapasitesi artış verileri.....	2
Şekil 1.2: Türkiye rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum değerleri.....	3
Şekil 2.1: 6-Baral system.....	10
Şekil 2.2: Generatörlerin maliyet fonksiyonu grafikleri.....	11
Şekil 2.3: 400 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.....	17
Şekil 2.4: 450 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.....	18
Şekil 2.5: 500 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.....	18
Şekil 3.1: 6 farklı zaman aralığı için rüzgar hızı olasılık dağılımları.....	24
Şekil 3.2: 6 farklı zaman aralığı için rüzgar gücü değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu değerleri.....	24
Şekil 3.3: Çıkış güçlerine göre maliyet değerleri.....	28
Şekil 3.4: Çıkış gücüne göre valf nokta etkisi için maliyet değişimi değerleri.....	29
Şekil 3.5: Çıkış gücüne göre gaz salınım ceza maliyetleri.....	30
Şekil 3.6: Toplam maliyet değerleri (6'ncı zaman aralığı için).....	35
Şekil 3.7: Toplam maliyet değerleri (5'inci zaman aralığı için).....	36
Şekil 3.8: Toplam maliyet değerleri (4'üncü zaman aralığı için).....	36
Şekil 3.9: Toplam maliyet değerleri (3'üncü zaman aralığı için).....	37
Şekil 3.10: Toplam maliyet değerleri (2'inci zaman aralığı için).....	37
Şekil 3.11: Toplam maliyet değerleri (1'inci zaman aralığı için).....	38
Şekil 4.1: Balya'da 7 aylık dönemde örneklenen rüzgar hızları değişimi (Saatlik ortalama rüzgar hızları).....	48
Şekil 4.2: Balya'da 7 aylık dönemde örneklenen rüzgar hızları değişimi (Zaman serileri dağılımı ve kümülatif değişimi).....	48
Şekil 4.3: 6 farklı yöntem kullanılarak bulunan parametrelerle elde edilen Weibull dağılımı değişimlerinin GD ile karşılaştırılması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması).....	50
Şekil 4.4: 6 farklı yöntem kullanılarak bulunan parametrelerle elde edilen Weibull dağılımı değişimlerinin GD ile karşılaştırılması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).....	50
Şekil 4.5: EYOM ve MM karşılaştırması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması).....	51
Şekil 4.6: EYOM ve MM karşılaştırması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).....	51
Şekil 4.7: EYOM ve L_MM karşılaştırması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması).....	52
Şekil 4.8: EYOM ve L_MM karşılaştırması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).....	52
Şekil 4.9: EYOM ve GM karşılaştırması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması).....	53
Şekil 4.10: EYOM ve GM karşılaştırması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).....	53
Şekil 4.11: EYOM ve BEYOM karşılaştırması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması).....	54

<b>Şekil 4.12:</b> EYOM ve BEYOM karşılaştırması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma) .....	54
<b>Şekil 4.13:</b> EYOM ve EEM karşılaştırması (Noktasal veriler ile karşılaştırılması) .....	55
<b>Şekil 4.14:</b> EYOM ve EEM karşılaştırması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma) .....	55
<b>Şekil 4.15:</b> EYOM ile gerçek değerlerin karşılaştırılması .....	56

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 2.1:</b> Maliyet fonksiyonu sabitleri.....	10
<b>Tablo 2.2:</b> 400 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.....	19
<b>Tablo 2.3:</b> 450 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.....	19
<b>Tablo 2.4:</b> 500 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.....	19
<b>Tablo 2.5:</b> Farklı yük değerleri için optimum maliyet değerleri.....	20
<b>Tablo 2.6:</b> Algoritmaların ortalama çalışma süreleri.....	20
<b>Tablo 2.7:</b> Algoritmaların tüm yük değerlerindeki minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri.....	20
<b>Tablo 3.1:</b> Generatörlerin maliyet sabitleri.....	28
<b>Tablo 3.2:</b> Valf nokta etkisi parametreleri.....	28
<b>Tablo 3.3:</b> Gaz salınım ceza maliyet katsayıları.....	29
<b>Tablo 3.4:</b> Hat kaybı parametreleri.....	30
<b>Tablo 3.5:</b> Rüzgar hızının 6 zaman aralığı için standart sapma ve ortalama değerleri.....	31
<b>Tablo 3.6:</b> Generatörlerin çıkış güçleri (BB-BC).....	34
<b>Tablo 3.7:</b> Generatörlerin çıkış güçleri (VS).....	34
<b>Tablo 3.8:</b> Generatörlerin çıkış güçleri (İHO).....	34
<b>Tablo 3.9:</b> Generatörlerin çıkış güçleri (PSO).....	35
<b>Tablo 3.10:</b> 4 algoritma için toplam maliyet değerleri.....	38
<b>Tablo 3.11:</b> 4 algoritma için ortalama çalışma süreleri.....	39
<b>Tablo 3.12:</b> 6 farklı zaman aralığı için elde edilen minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri.....	39
<b>Tablo 4.1:</b> 6 farklı yöntemle elde edilen parametre değerleri ve hata uygunluk testi sonuçları.....	49

## SEMBOL LİSTESİ

$C_{t,i}$	: i'inci generatörün güç üretim maliyeti
$m$	: Termik santraldeki generatör sayısı
$N_p$	: Rüzgar tribünündeki generatör sayısı
$a_i$	: i'inci generatörün güç üretim maliyeti katsayısı
$b_i$	: i'inci generatörün güç üretim maliyeti katsayısı
$c_i$	: i'inci generatörün güç üretim maliyeti katsayısı
$P_i$	: i'inci generatörün çıkış gücü
$C_{w,i}$	: i'inci rüzgar tribünü için güç üretim maliyeti katsayısı
$C_{p,i}$	: i'inci rüzgar tribünü için düşük tahmin edilen çıkış gücü için ceza maliyeti
$C_{r,i}$	: i'inci rüzgar tribünü için yüksek tahmin edilen çıkış gücü için ceza maliyeti
$C_{E,i}$	: i'inci generatörün gaz salınım ceza maliyeti
$L_{L,t}$	: t'inci zaman aralığı için hat kaybı değerleri
$k$	: Weibull dağılımı şekil parametresi
$f_v(v)$	: Weibull dağılımının rüzgar hızı için olasılık yoğunluk fonksiyonu
$\mu$	: Weibull dağılımından bulunan ortalama rüzgar hızı değeri
$c$	: Weibull dağılımı ölçek parametresi
$\Gamma(x)$	: Gama fonksiyonu
$w$	: Rüzgar santralinden elde edilen güç değeri
$f_w(w)$	: Weibull dağılımının rüzgar gücü için olasılık yoğunluk fonksiyonu
$g_i$	: i'inci generatörün gaz salınım ceza maliyeti sabiti
$h_i$	: i'inci generatörün gaz salınım ceza maliyeti sabiti
$B_{ij}$	: Hat kaybı sabitleri (i'inci indeks j'inci boyut için)
$p_{i,t}$	: t'inci zaman aralığı i'inci generatörün çıkış gücü değeri
$\bar{x}^c$	: BB-BC algortiması için ağırlık merkezi konumu
$f^i$	: Uyum fonksiyonunun $\bar{x}^i$ noktasındaki değeri
$\sigma$	: Rüzgar hızının standart sapma değeri
$v_{id}$	: (i, d) indeks değerleri için PSO algoritmasında bulunan hız değeri
$x_{id}$	: (i, d) indeks değerleri için PSO algoritmasında bulunan konum değeri

<b>wk</b>	: PSO algoritmasında kullanılan eylemsizlik kuvvet sabiti
<b>U</b>	: [0,1] arasında rastgele bir sayı
<b>gbest</b>	: PSO algoritmasında bulunan global en iyi çözüm
<b>pbest</b>	: PSO algoritmasında bulunan yerel en iyi çözüm
<b>AF<sub>i,j</sub></b>	: (i, d) indeks değerlerindeki anyonlarının çekim kuvveti
<b>CF<sub>i,j</sub></b>	: (i, d) indeks değerlerindeki katyonların çekim kuvveti
<b>AD<sub>i,j</sub></b>	: (i, d) indeks değerlerindeki anyonların birbirini itme kuvveti
<b>CD<sub>i,j</sub></b>	: (i, d) indeks değerlerindeki katyonların birbirini itme kuvveti
<b>A<sub>i</sub></b>	: i'inci anyon
<b>C<sub>i</sub></b>	: i'inci katyon
<b>μ<sub>0</sub></b>	: Vortex Search algoritması için başlangıç merkez nokta değeri
<b>Σ</b>	: Kovaryans matrisi
<b>P<sub>w</sub></b>	: Güç yoğunluğu değeri
<b>V̄</b>	: Ortalama rüzgar hızı değeri
<b>E<sub>PF</sub></b>	: Enerji eğilim faktörü
<b>CV<sub>LMM</sub></b>	: L-moment metodu için değişim sabiti
<b>RMSE</b>	: Hata değerinin karesel ortalamasının karekökü
<b>R<sup>2</sup></b>	: Gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki hata değeri
<b>Pd<sub>ts</sub></b>	: Zaman serileri güç yoğunluğu değeri



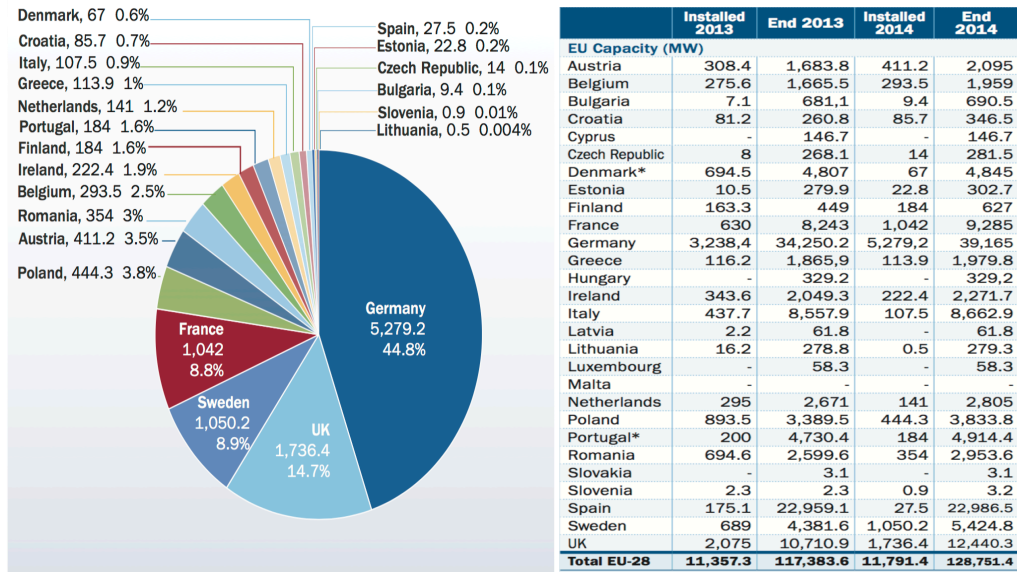
## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın gelişimi boyunca yardımları ve yol göstericiliğiyle yanımda olan; çalışmalarım sırasında emek ve bilgilerini benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kubilay EKER'e; manevi olarak yanımda olup beni yetiştiren babam Yunus KARADENİZ'e, annem Vecihe KARADENİZ'e ve kardeşim Tuğçe KARADENİZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Fosil yakıt fiyatlarının yüksek olması, rezervlerin azalması ve çevreye zararlı olmasından dolayı, güç üretimi için dünyanın birçok ülkesi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Günümüzde yenilebilir enerji kaynakları deyince akla başta rüzgar olmak üzere; güneş, jeotermal, hidrolik, biokütle, hidrojen, jeotermal enerjisi gelmektedir. Sürdürülebilir çevre açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması önemlidir. Bu çalışmada, ülkemizde kullanımı gittikçe artan rüzgar santrallerinin enerji üretim maliyetine etkisi dikkate alınarak termik santrallerle birlikte oluşturulan hibrit sistemlerin ekonomik güç dağılım problemi analiz edilmiştir.

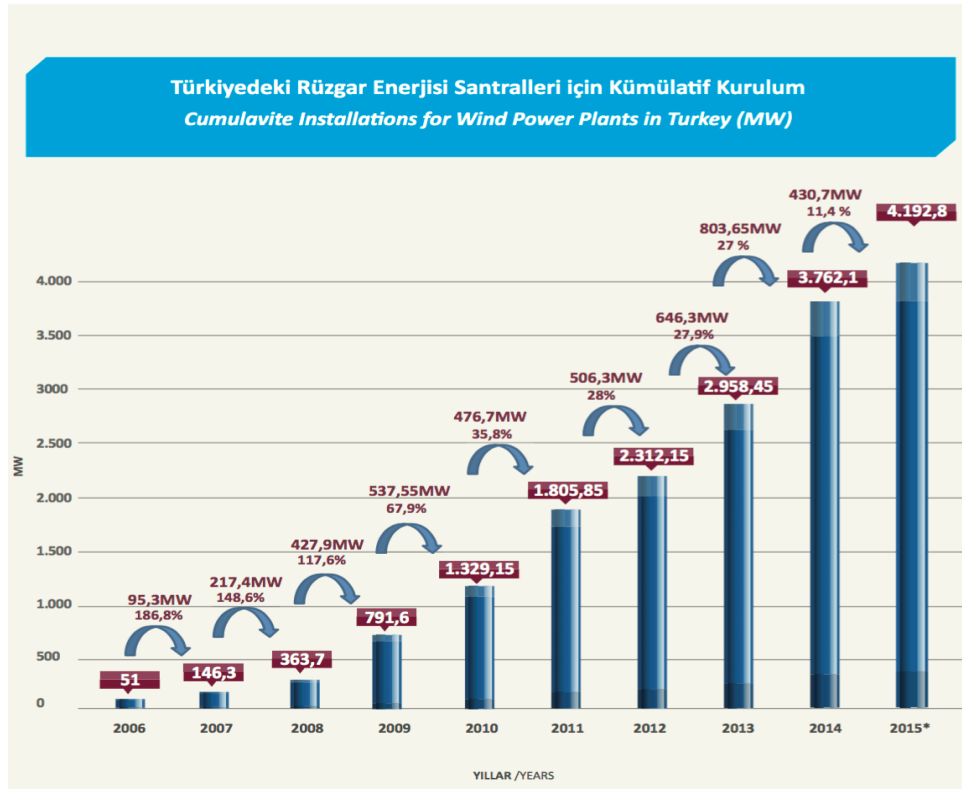
Türbin teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, rüzgar gücü potansiyelinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine yönelik yatırımlar son yıllarda çok daha hızlı artmaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde, 2014 yılı sonu itibariyle elektrik enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücü 910,1 GW'lık değere ulaşmışken, bu gücün %14,1'lik kısmını 128,8 GW ile rüzgar santralleri oluşturmaktadır. Avrupa Birliğinde, 2014 yılında kurulan yeni enerji santralleri içinde rüzgar santrallerinin oranı % 43,7 düzeyindedir ve rüzgar santralleri kurulumunun bir önceki yıla göre artış oranı %3,8'dir. Bu ülkeler içinde rüzgar enerji santrallerine en fazla yatırımı yapan Almanya, 2014 yılında 5279,2 MW'lık kapasite artımıyla rüzgar santralleri kurulu gücünü 39165 MW seviyesine çıkarmıştır. Şekil 1.1' de Avrupa Birliği ülkelerinde rüzgar santrallerindeki kapasite artışları ve artış oranları görülmektedir [1].



Şekil 1.1: Avrupa ülkelerine ait rüzgar enerjisi kapasitesi artış verileri [1].

Enerji ihtiyacı bakımından dışa bağımlılığı yüksek ülkelerden biri olan Türkiye’de, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimini özendirmek için son yıllarda yapılan yasal düzenlemelerle [2], daha fazla yenilenebilir enerji potansiyelinin üretim sistemine dahil edilmesi amaçlanmaktadır. 2006 yılında işletmedeki rüzgar santrali kurulu gücü 51 MW iken, özel sektör yatırımları ve teşvikler sonucu, 2015 yılı temmuz ayında 4192,8 MW değerine ulaşmıştır (Şekil 1.2). 2006-2014 dönemi içerisinde, rüzgar santrallerinin kurulu gücünün bir önceki yıla göre artış oranı %27 seviyelerinin altına hiçbir zaman düşmemiştir [3]. 2014 yılı sonu itibariyle Türkiye’deki elektrik enerjisi üretim santrallerinin kurulu gücü 69519,8 MW düzeyinde iken, bu kurulu gücün %5,22’lik kısmına karşılık gelen 3629,7 MW’ını rüzgar santralleri oluşturmaktadır [4].

Türkiye’nin özellikle batı kıyıları ve güney doğu Anadolu bölgeleri boyunca rüzgar çeken kısımları dikkate alındığında, 88000 MW gücünde rüzgar enerji potansiyelinin mevcut olabileceği belirtilmektedir [5]. Bu ve benzeri analizler dikkate alındığında, Yüksek Planlama Kurulu’nun, 2023 yılında Türkiye’nin toplam rüzgar enerji santrali kurulu gücünün 20000 MW değerine çıkarılması hedeflenmektedir [6].



\* 2015 yılı için 6 aylık veriler değerlendirilmiştir.

**Şekil 1.2:** Türkiye rüzgar enerjisi santralleri için kümülatif kurulum değerleri [3].

Elektrik enerji sisteminin kararlı çalışabilmesi, sonraki gün için tahmin edilen tüketici güçleri toplamının, üreticiler tarafından planlanan zaman dilimi için karşılanması ile mümkündür.

Elektrik güç sistemlerinde, tüketicilerin ihtiyaç duyduğu güç için gerekli güç üretim maliyetinin minimize edilmesi, ekonomik dağılım (ED) problemi olarak adlandırılmaktadır [7]. Buradaki amaç sistemin fiziksel kısıtları altında enerji üretim maliyetinin minimize edilmesidir. Termik santrallerde kullanılan santraller (özellikle termik) dikkate alınarak, ekonomik güç dağılımının belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır [7]–[9]. Fakat rüzgar enerjisine olan ilginin son yıllarda artması ve rüzgar santrallerinin, termik santrallerin yanında yer alması sonucunda, bu hibrit şebeke yapısı için gerekli ekonomik güç dağılımının hesaplanması başlı başına bir gereklilik haline gelmiştir.

Ekonomik güç dağılımı problemlerindeki geleneksel hesaplamalarda, sistemi besleyen her bir santralin güç-maliyet eğrisi ve generatörlerin minimum ve

maksimum kapasitesi gibi kısıtlar dikkate alınarak, tüketiciler tarafından kullanılması beklenen toplam yük değeri için minimum maliyet oluşturacak biçimde hangi santralin ne kadar gücü sisteme aktarması gerektiği planlanmaktadır.

Rüzgar santralının sisteme aktaracağı güç rüzgar hızına bağlı bir büyüklüktür. Bu yüzden tüketicinin değişen güç talepleri için, planlanan zaman dilimi içinde rüzgar santralının sisteme ne kadar güç aktarabileceğinin tahmin edilmesi gerekmektedir. Rüzgar santrali tarafından üretilecek güçle, rüzgar hızı arasında doğrudan bir ilişki olduğu dikkate alındığında, rüzgar hızının belirlenen bir bölge için matematiksel olarak modellenmesi ve bu modelde kullanılan katsayılara bağlı olarak rüzgar santralının üreteceği güç değişiminin tanımlanması, belirlenen bir zaman diliminde rüzgar santralının sisteme aktaracağı gücün bilinmesi önemlidir [10]. Rüzgar hızının tahmini [11] veya rüzgar hızına bağlı gücün Weibull dağılımı [12] ve benzeri [13] istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur.

Hidroelektrik santrallerde olduğu gibi rüzgar santrallerinde de yakıt maliyeti bulunmasa da, elektrik enerjisi işletim operatörü (Türkiye için TEİAŞ), elektrik enerjisi üreticilerinden, gün öncesinde ve gün içinde ne kadarlık gücü ne kadar bedelle satacaklarına ilişkin taleplerini almaktadır [14]. Bütün üreticilerin sistem operatörüne sundukları bu fiyatlar elektrik enerjisi birim fiyatını belirlemektedir. Rüzgar Santrali işletmecilerinin de, elektrik şebekesine ne kadarlık güç aktaracaklarını ve satış maliyetini operatöre iletmeleri gerekmektedir. Ayrıca hidroelektrik santrallerden farklı olarak, planlanan zaman diliminde tahmin edilen rüzgar gücünün üstünde bir gücün sisteme aktarılması durumunda sistemde bulunan geleneksel santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekeceğinden ve bu durum ekonomik maliyet hesaplamasına fazladan bir yük getireceği için bir ceza katsayısının dikkate alınması gerekmektedir. Benzer biçimde rüzgar santralinden alınması beklenen gücün düşük değerde olması durumunda da, sistemdeki geleneksel santrallerinin fazladan sisteme güç aktarması gerekecektir ki, bu da ekonomik dağılım problemi hesaplamalarına (rezerv maliyeti) dahil edilmesi gereken diğer bir unsurdur [15].

Günümüzde birçok sezgisel, üst sezgisel ve bunların haricinde doğadan ilham alınarak bulunan algoritmalar ışığında ekonomik dağılım problemlerine çözüm bulunmaktadır [16]. Daha önceleri kullanılan klasik algoritmaların çoğu rastgele olmayan bir düzene (lineer programlamadaki simpleks metodu gibi) bağlı kalmaktadırlar. Bazı klasik algoritmalar ise yerçekimi metoduna bağlı kalmaktadır ve bunlara yerçekimi tabanlı rastgele olmayan algoritmalar (Newton-Rapson metodu gibi) denilmektedir. Fakat amaç fonksiyonunda devamlı olmayan bir hal var ise bu yöntemler doğru sonuçlar vermeyebilirler. Bu gibi durumlarda ise yerçekimi tabanlı olmayan algoritmalar önerilir. Diğer bir algoritma tipi ise doğadan esinlenerek oluşturulan üst sezgisel metotlardır. Bu tarz metotlarda deneme yanılma yolu ile çözüm uzayında birçok çözüm üretilir ve istenilen amaç fonksiyonunun çözümü elde edilir. Bu çözüm istenilen çözüme ne kadar yakın ise o kadar doğru ve yeterli denebilecek ölçüde bir sonuç elde edilmiş olur. Çözüme yakınlık açısından gerekli sınırlamalar veya şartlar her amaç fonksiyonu için özeldir [16].

Rüzgar enerjisi içeren ED modeli tahmini değişkenler, eşitsizlik ve eşitlik içeren sınırlamalar, birden fazla boyut ve parçalı lineer olmayan bir karakteristiğe sahiptir [17]. Bu problem türünü genetik algoritma (GA), benzetimle tavlama veya gradient metot ile çözmek zordur. Benzetimle tavlama veya GA'yı sisteme uyguladığımızda çözümler yavaş ve stabil olmayan şekilde elde edilir. Diferansiyel evrim (DE) metodu bu tür problemlerde çok iyi sonuçlar vermektedir. Fakat mutant operatöründeki çözüm eksikliği yüzünden ayrı olasılık dağılımı elde edilemeyebilir, bu da tamamen kendiliğinden organize olan yapıyı ortadan kaldıracaktır [17]. Bu yüzden bu çalışmada, daha iyi sonuçlar gözlemlenen Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Big-Bang Big-Crunch (BB-BC), İyon Hareket Optimizasyonu (İHO) ve Vortex Search (VS) algoritmaları kullanılarak lineer olmayan optimizasyon problemine uygulanmış, elde edilen veriler ve grafikler ışığında, algoritmalar arasında çözüme ulaşma süreleri ve buldukları maliyet değerlerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu tez 3 ana parçadan oluşmaktadır. İlk bölümde rüzgar santrallerinin enerji sistemlerindeki etkilerini irdeleyebilmek için, rüzgar ve termik santrallerinden oluşan hibrit bir sistemde statik ekonomik dağılım problemi

(SED), üç güncel sezgisel algoritma (PSO, BB-BC ve İHO) kullanılarak en iyi ekonomik güç dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır. 2 adet rüzgar ve 2 adet termik santral içeren 6 baralı örnek bir sistem üzerinde elektrik enerjisi maliyetlerini eniyilemek için kullanılan PSO ve BB-BC algoritmaları en iyi ve birbirine yakın değerler üretirken İHO algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha yüksek maliyet değerleri ürettiği görülmüştür.

Tezin ikinci kısmında, rüzgar hızının modellenmesi araştırılmış ve bunun için iki parametrelili Weibull dağılımından ve geçmişe yönelik rüzgar hızı verilerinden yararlanılmıştır. Tezin ilk bölümünden farklı olarak, rüzgar hızının tahmini kısa zaman aralıkları için daha doğru sonuçlar verdiğiinden dinamik ekonomik dağılım (DED) modeli kullanılmıştır. Ayrıca, algortimalara Vortex Search (VS) algoritması eklenmiştir. Rüzgar hızı tahmini sonrası, DED problemi dört algoritma (BB-BC, PSO, IMO ve VS) için çözülmüştür. Termik santrallerde güç üretimi maliyeti için ek olarak valf nokta etkisi ve gaz salınım ceza maliyetleride değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, BB-BC ve PSO algortimalarının, VS ve İHO algoritmalarına göre hibrit enerji sistemlerinde DED problemi için maliyet ve süre açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tezin son bölümünde, rüzgar hızı değişimlerini modellemek için yaygın olarak kullanılan Weibull fonksiyonu parametrelerinin, literatürde Weibull fonksiyonu parametrelerini belirlemek için tanımlanan 6 farklı metotla belirlenmesi amaçlanmıştır. Balıkesir-Balya İstasyonu'ndan alınan rüzgar hızı değerleri yardımıyla en iyi metodun belirlenmesine çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda En Yüksek Olabilirlik Metodu ile Moment Metodu'nun en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

## 2. HİBRİT SİSTEMLERDE STATİK EKONOMİK DAĞILIM MODELİ

Enerji sistemlerinde, elektrik üreticisi santrallerin her birinin enerji üretim maliyetleri birbirinden farklıdır. Bir ağ yapısında olan güç sisteminde, ihtiyaç duyulan aktif ve reaktif güç değerlerini, sistemin kısıtları ve hatlar üzerindeki güç kayıplarını da dikkate alarak, üretim maliyetini minimize edecek biçimde hangi generatörlerin sisteme ne kadar güç aktarması gerektiğinin bulunması işleme optimum güç akışı (Optimum Power Flow, OPF) denilmektedir. Bu problemde, amaç fonksiyonu ve kısıtların bir arada toplanıp tek bir ifade altında birleştirilip minimize edilmesi gerekir ve bu işlem için sistemin güç akışı denklemlerinin de kullanılması gerekecektir. Belirli zaman aralığında ihtiyaç duyulacak sadece aktif güç değerlerini dikkate alarak, generatörlerin maksimum-minimum çalışma kısıtları arasında, üretim maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ise Ekonomik Dağılım (Economic Dispatch, ED) problemi olarak adlandırılır. Bu optimizasyon işlemine, OPF hesaplamalarında kullanılan denklemlere göre daha basit hesaplamalarla hatların aktif güç kayıplarının eklenmesi de mümkündür [18].

### 2.1 Ekonomik Dağılım Probleminin Amaç Fonksiyonu

Sistemdeki elemanların maliyet değerlerin belirlenmesi ve bir ifade altında toplanması ile elektrik enerjisi maliyetinin minimizasyonu için gerekli amaç fonksiyonu elde edilebilir. Sistemimizde kullanılan termik santralin güç-maliyet ilişkisini tanımlayan matematiksel ifadesine, gaz emisyon maliyeti ve valf etkisi maliyeti eklenerek diğer maliyet unsurlarının etkisinin de dahil edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgar trübünlerinin ürettiği elektrik enerjisi ise doğrusal maliyet ve ceza maliyetleri ile tanımlanarak amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir.

#### 2.1.1 Termik Santrallerde Enerji Üretim Maliyeti

Genel olarak fosil yakıtlarla çalışan generatörlerin girdileri Btu/h (British thermal unit/hour), çıktıları ise MW cinsindedir. Termik santraller için yakıt giderleri, personel ve işletme giderleri dikkate alınarak elektrik enerjisi maliyet değişimi için eşitlik (2.1)'de verilen denklem kullanılmaktadır [18].



$$C_{t,i} = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.1)$$

Burada;  $a_i$ ,  $b_i$  ve  $c_i$  i'inci generatörün maliyet fonksiyonu katsayılarıdır.  $P_i$  i'inci generatörün planlanmış güç değerini,  $C_{t,i}$  ise i'inci generatörün MW/h cinsinden toplam enerji üretim maliyetini ifade eder. Toplam olarak her bir termik santrallerdeki enerji üretimi için harcanan maliyet tutarı eşitlik (2.2)'de verilmektedir.

$$\sum_{i=1}^m C_i = \sum_{i=1}^m a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.2)$$

Burada,  $m$ : fosil yakıtla çalışan toplam generatör sayısını göstermektedir. Havaya salınan gazların da bir yayılım maliyeti vardır, ancak buradaki formülde bu durum ihmal edilmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminde, fosil yakıt kullanılmadığı için gaz salınımı yoktur ve ilgili maliyet sıfıra eşittir [19].

### 2.1.2 Rüzgar Enerji Üretim Maliyeti

Rüzgar hızı ve dolayısı ile gücünün belirsizliğinden dolayı, planlanan zamanda rüzgardan alınabilecek güçle ilişkili maliyet üç farklı formülle ifade edilir [15]. Eşitlik (2.3)'de verilen, direk veya beklenen maliyet olarak adlandırılan  $C_{w,i}$ , şebekeye o an için rüzgar santralının aktaracağı güce bağlı olarak güç sistemi operatörünün ödeyeceği alım bedelidir.

$$C_{w,i} = d_i w_i \quad (2.3)$$

Burada;  $w_i$ , i'inci generatörde üretilen rüzgar gücünü  $d_i$  ise i'inci rüzgar tribününün direk güç üretim maliyeti sabitini ifade etmektedir.

Geleneksel santraller için yapılan minimum maliyet analizi sonrasında, planlanan zamanda hesaplanan güç değerini her bir santralin sisteme aktarması beklenir. Planlanan zaman dilimi için rüzgar santralının sisteme aktarabileceği güç, her ne kadar meteorolojik hesaplamalarla daha önceden belirlenmeye çalışılsa da, bu hesaplamaların tamamen gerçekçi bir sonucu yansıtması beklenemez. Bu yüzden, beklenenden farklı bir güç değerinde rüzgar santralının sisteme güç aktarması durumunda, geleneksel santrallerin ya üretimlerini düşürmeleri ya da artırmaları gerekecektir. Bu durumda hesaplanan direk maliyet

hesabının dışında yeni bir maliyet değeri sistem operatörüne yansiyacaktır ki bu durumun maliyet denklemlerinde dikkate alınması gereklidir. Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan düşük tahmin edilmişse, sisteme gelen bu fazla güç sebebiyle geleneksel santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekecektir. Bu durumdan kaynaklanan fazladan maliyet, eşitlik (2.4) ile maliyet denklemine eklenir. Bu denklemdaki;  $k_{p,i}$  ceza katsayısını,  $f_w(w)$  rüzgar gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonunu,  $w_{r,i}$  ise i'inci rüzgar tribününün nominal güç değerini ifade eder [15].

$$C_{p,i} = k_{p,i} \int_{w_i}^{w_{r,i}} (w - w_i) f_w(w) dw \quad (2.4)$$

Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan fazla tahmin edilmişse, yüklerin ihtiyaç duyduğu toplam gücü sağlamak için geleneksel santrallerin sisteme fazladan güç aktarmaları gerekecektir. Bu işlemde doğal olarak fazladan bir maliyet gerektirir ki eşitlik (2.5) ile maliyet hesaplamalara dahil edilir. Bu denklemdaki  $k_{r,i}$  katsayısı, geleneksel santrallerin sisteme fazladan güç aktarmaları durumunda oluşacak maliyetle ilişkili bir katsayıdır [15].

$$C_{r,i} = k_{r,i} \int_0^{w_i} (w_i - w) f_w(w) dw \quad (2.5)$$

### 2.1.3 Sınırlamalar ve Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonunun çözümü sırasında birtakım sınırlamalara uyulması çözümün doğruluğu açısından çok önemlidir. Gerekli şartlar eşitlik (2.6)'da verilmektedir [15].

$$\left. \begin{aligned} p_i^{min} &\leq p_i \leq p_i^{max} \\ 0 &\leq w_i \leq w_{r,i} \\ \sum_{i=1}^M p_i + \sum_{i=1}^N w_i &= L \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

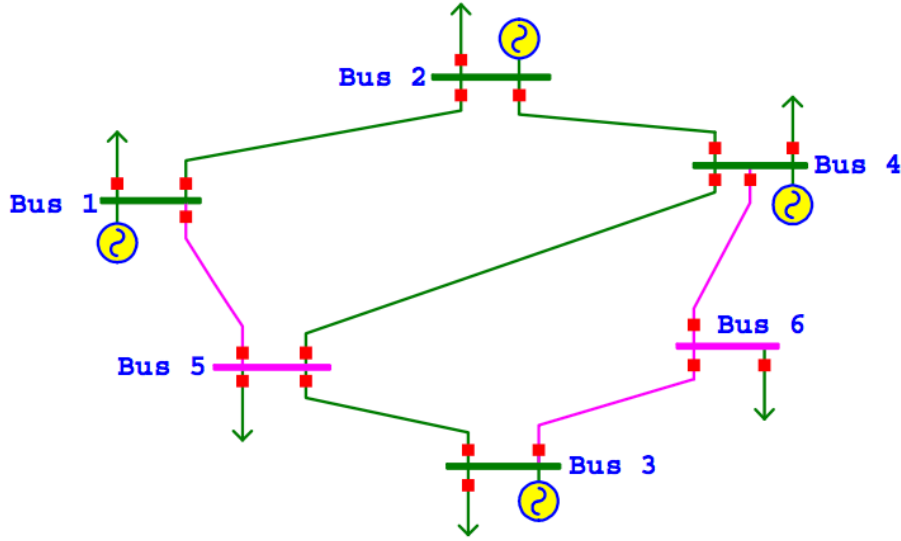
Yukarıdaki ifadedeki  $p_i^{min}$ ,  $p_i^{max}$  sırasıyla i'inci termik santrallerde kullanılan generatörün minimum ve maksimum güç değerlerini,  $w_i$  i'inci rüzgar tribününün ürettiği güç değerini,  $w_{r,i}$  i'inci rüzgar tribününün nominal güç değerini,  $L$  toplam istenilen güç değerini,  $M$  toplam termik santraldeki generatör sayısını,  $N$  ise

toplam rüzgar türbünlerindeki generatör sayısını ifade etmektedir [17]–[20]. Bu durumda amaç fonksiyonu eşitlik (2.7)'de verilen ifade ile gösterilir.

$$\min C = \sum_{i=1}^M C_i(p_i) + \sum_{i=1}^N \llbracket C_{w,i}(w)_i \rrbracket + \sum_{i=1}^N \llbracket C_{p,i}(w)_i \rrbracket + \sum_{i=1}^N \llbracket C_{r,i}(w)_i \rrbracket \quad (2.7)$$

## 2.2 Statik Ekonomik Dağılım Modeli için Analiz Edilen Sistem

Tezin ilk bölümünde irdelenen ve Şekil 2.1'de şematik yapısı verilen 6-baralı sistem, 2 adedi termik (bara 1-2) ve 2 adedi rüzgar (bara 3-4) olmak üzere 4 adet generatörden oluşmaktadır [21]. Sistemde bulunan generatörlerin maliyet fonksiyonları için gerekli katsayı değerleri Tablo 2.1'de verilmektedir [20]. Maliyet fonksiyonu katsayıları, generatörün güç üretimi maliyeti değişimleri dikkate alınarak deneysel yollar kullanılarak bulunur [10].

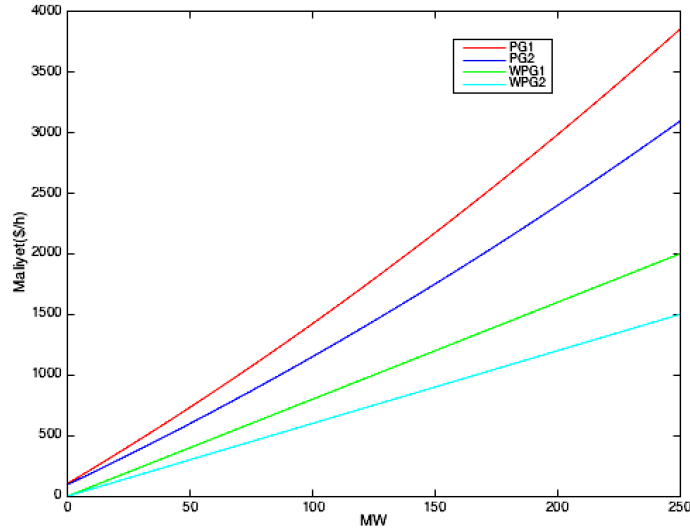


Şekil 2.1: 6-Baralı sistem [21].

Tablo 2.1: Maliyet fonksiyonu sabitleri.

Jen. No	$a_i$ (\$/MW <sup>2</sup> h)	$b_i$ (\$/MWh)	$c_i$ (\$/h)	$d_i$ (\$/MWh)	Pg_min (MW)	Pg_maks (MW)
1	0.012	12	105	0	50	250
2	0.0096	9.6	96	0	50	250
3	0	0	0	8	0	40
4	0	0	0	6	0	40

Yukardaki maliyet fonksiyonu katsayılarına göre maliyet değişimleri Şekil 2.2’de verilmektedir. Bu grafiğe göre, en yüksekten en düşüğe doğru generatörlerin maliyet sıralaması PG1 (Gen-1), PG2 (Gen-2), WPG1 (Gen-3), WPG2 (Gen-4) olarak görülmektedir. Buradaki kısaltmalarda, PG1 ve PG2 termik generatörleri, WPG1 ve WPG2 ise rüzgar tribününden elde edilen güç değerlerini göstermektedir.



Şekil 2.2: Generatörlerin maliyet fonksiyonu grafikleri.

Rüzgar gücü hesaplamalarda kullanılırken, tahmin edilenden fazla oluşan rüzgar gücü için ödenen ceza çarpanı  $k_r = 0.0001$  ve rüzgar gücünün düşük değerde oluşmasına ilişkin maliyet katsayısı  $k_p = 0$  alınmıştır. Bu demek oluyor ki, sistem operatörü rüzgar santrallerin sahibi değildir ve termik santrallerin sisteme katacağı fazladan güç için bir maliyet ortaya çıkarmamaktadır. Rüzgar enerjisi ile çalışan sistemlerde istenilen en büyük güç değeri, rüzgar tribünlerinin üretebileceği en yüksek güç değerine eşittir ve çalışmada  $W_r = 40$  alınmıştır [20].

### 2.3 Algoritmalar

Günümüzde doğadan, evrenin oluşumundan, hayvanların davranışlarından vb. birçok olaylardan esinlenerek çeşitli sezgisel ve üst sezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirilmektedir. Tezin bu bölümünde, yakın zamanda ortaya atılan BB-BC, PSO ve İHO algoritmaları kullanılarak, statik ekonomik güç dağılımının belirlenmesi amaçlanmıştır.

### 2.3.1 Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu (BB-BC)

Big-Bang Big-Crunch metodunda, rastgelelik doğadaki enerji dağılımı olarak, yerel ve global optimal çözüm ise yerçekimsel etki olarak tanımlanabilir. Bu metotta genel olarak düzensizliği enerji dağılımı ile yakınsanmış düzenli parçacıkları dağıtıp, bir sonraki adım için çözüm uzayına çözüm adayları olarak dağıtırız. Burada düzensizlik veya kaos oluşturmuş oluruz. İlk çözüm adayları üretilirken kullanılan metot genetik algoritma (GA) ile benzerdir. Big-Bang Big-Crunch iki fazdan oluşur. İlk Big-Bang yani çözüm uzayına yeni çözüm adaylarını dağıttığımız faz, diğeri ise Big-Crunch fazıdır. Big-Crunch fazında ortak bir kütle merkezi bulunup en iyi çözümün o olduğu varsayılarak, bir sonraki adımdaki üretilecek çözümler bu kütle merkezi etrafına yakınsanarak oluşturulur. Eşitlik (2.8)'de tanımlanan kütle merkezini bulmak için minimize edeceğimiz fonksiyonlarda kütle olarak uyum fonksiyonunun tersi alınır [22].

$$\vec{x}^c = \frac{\sum_{i=1}^{Np} \frac{1}{f^i} \vec{x}^i}{\sum_{i=1}^{Np} \frac{1}{f^i}} \quad (2.8)$$

Yukardaki formülde  $\vec{x}^c$  kütle merkezini,  $\vec{x}^i$  n-boyutlu uzayda bir çözüm noktası,  $f^i$  uyum fonksiyonunun  $\vec{x}^i$  noktasındaki değeri, Np Big-Bang fazında oluşturulan popülasyon büyüklüğünü ifade eder.

Big-Crunch fazında ortak kütle merkezi bulunduktan sonra yeni adımda çözümler bu kütle merkezi ve artı olarak en iyi çözüme sahip çözümün etrafında aşağıdaki denklemlere (eşitlik (2.9) ve (2.10) ) göre oluşturulur [23].

$$x_i^{new} = X^c + \sigma \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{r\alpha(x_{max} - x_{min})}{k} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki formülde  $\alpha$  arama uzayını sınırlandırmak için kullanılan parametre, r standart rastgele oluşturulmuş sayı,  $x_{max}$  ve  $x_{min}$  en üst ve en alt optimizasyon problemi için belirlediğimiz sınır değerleri, k adım sayısını ifade eder. İkinci patlamadan sonra kütle merkezi tekrar hesaplanır. Bu patlama ve toplanma işlemleri durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder.

Çözüm için performansı arttırmak amacı ile eşitlik (2.11)'de verilen denklem ile hem kütle merkezinden hem de global en iyi çözümünden yararlanarak daha iyi yeni çözümler elde edebiliriz [24].

$$X^{(k+1,i)} = \beta X^{c(k)} + (1 - \beta)X^{gbest(k)} + \sigma \quad (2.11)$$

Burada,  $\beta$  değeri global en iyi çözümün kütle merkezine göre öncelik katsayısını ifade etmektedir. Hangisinin daha öncelikli ve etkili olduğu düşünülüyorsa onun  $\beta$  değeri arttırılmalıdır.  $X^{(k+1,i)}$  değeri yeni adımda üretilen çözüm adaylarını ifade eder. Bu çalışmada yapılan denemeler ışığında en iyi sonucu veren  $\beta = 0.2$  ve  $\alpha = 1$  değerleri kullanılmıştır. Durdurma kriteri sağlanana kadar yukarıdaki anlatılanlar bir döngüde devam eder.

### 2.3.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

PSO algoritması, Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından geliştirilmiş sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritma, kuşların sürü halinde birbirleri ile olan çeşitli nedenlerden dolayı; yiyecek bulma, avcılardan korunma vb. konularda bilgi paylaşımına dayandığı için sosyolojik temelli bir algoritmadır. Bu algortmada her bir kuş bir bireyi temsil eder ve bu bireylerin toplamı da sürüyü oluşturur. Burada amaç hangi kuşun en iyi konum bilgisine sahip olduğu ve bunu diğer kuşlara bildirip topluca en iyi çözüm etrafında değişkenlerin (kuş) toplanmasıdır. Her bir kuş kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona göre ayarlar ve bu sırada önceki bilgilerinden de yararlanır. Tabi en iyi konum, her bir parçacığın (kuş) uygunluk fonksiyonu değerlerine göre hesaplanır. Kuşların hız ve konum bilgileri her bir adımda tüm parçacıkların en iyi (gbest) ve o parçacığın en iyi çözümü (pbest) göz önünde bulundurularak hem rastgele hem de matematiksel olarak hazırlanan eşitlik (2.12)'de verilen algoritma ile hesaplanır ve bu değerler saklanır [25]. Algoritmanın genel işleyişi aşağıdaki gibidir:

$$v_{id}^{k+1} = wk * v_{id}^k + c_1 * U * (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 * U * (gbest_d^k - x_{id}^k)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
i &= 1, 2, \dots, n \\
d &= 1, 2, \dots, m \\
v_i &= [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}] \\
pbest_i &= [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{im}]
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

Bu denklemlerdeki:  $n$ , bir gruptaki çözüm sayısını;  $m$ , çözümdeki eleman sayısını;  $k$ , adım (jenerasyon) sayısını;  $wk$ , eylemsizlik kuvveti sabitini;  $c1, c2$  hızlandırma sabitini;  $U$ ,  $[0,1]$  aralığında rastgele bir sayıyı;  $x^{k_{id}}, v^{k_{id}}$ ,  $i$ 'inci çözümün  $k$ 'nci adımdaki pozisyon ve hız bilgisini göstermektedir.

$c1$  ve  $c2$  yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi  $c1=c2=2$  iken çözüme yardımcı olmaktadır.  $wk$  ise  $[0.9,0.4]$  arasında, adım sayısına bağlı olarak eşitlik (2.14)'de gösterilen ifade ile giderek azalır [8].

$$wk = wk_{max} - \frac{wk_{max} - wk_{min}}{iter_{max}} * iter
\tag{2.14}$$

Burada  $wk_{max}, wk_{min}$  sırasıyla eylemsizlik kuvveti  $wk$ 'nin maksimum ve minimum değerlerini,  $iter_{max}$ , algortmada kullanılacak adım sayısının üst limitini ve  $iter$ , değişkeni de o anki adım sayısını ifade eder [8].

### 2.3.3 İyon Hareket Optimizasyonu (İHO)

İyon hareket optimizasyonu, iyonların (anyon ve katyon) birbirleri ile olan iletişimi göz önünde bulundurularak yakın geçmişte bulunan bir optimizasyon tekniğidir. Eksi yüklü iyonlar anyon, artı yüklüler ise katyon olarak adlandırılır. Temel olarak algoritma, aynı yüklü iyonların birbirini itmesi ve ters yüklülerin birbirini çekmesi felsefesine bağlıdır [26]. Çözüm için adaylar, biri anyonları diğeri ise katyonları ifade eden iki gruba ayrılır. Her bir iyon bir çözümü ifade eder ve çekme/itme kuvvetleri bu iyonların arama uzayında hareket etmesini sağlar. İyonlar, uyum fonksiyonundaki değerlerine göre ele alınırlar. Doğal olarak en iyi anyon katyonları, en iyi katyon ise anyonları kendine doğru çeker. Hareket etme oranları ise çekme/itme kuvvetlerine bağlı olarak değişir. Genel olarak her algortmada olduğu üzere, bu algortmada da biri sıvı, diğeri kristal faz olmak üzere iki adım vardır. Kristal fazında yerel minimum/maksimum noktalarına takılan çözümler elenip rastgele olarak atamalar yapılabilir.

### 2.3.3.1 Sıvı Faz

Bu fazda sıvı içerisinde iyonlar daha hızlı hareket ederler. Sıvı fazda iyonların aynı işaretli olanların birbirini itme kuvveti, farklı işaretle olanların birbirini çekme kuvvetine göre çok azdır [16]. Bu yüzden çekme kuvvetleri, aradaki mesafeye bağlı olarak eşitlik (2.15) ve (2.16)'da verildiği gibi matematiksel olarak ifade edilebilir [27].

$$AF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/AD_{i,j}}} \quad (2.15)$$

$$CF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/CD_{i,j}}} \quad (2.16)$$

$$AD_{i,j} = |A_{i,j} - C_{best_j}| \quad (2.17)$$

$$CD_{i,j} = |D_{i,j} - A_{best_j}| \quad (2.18)$$

Yukarıdaki ifadedeki;  $i$ , indeks sayısını;  $j$ , boyut sayısını,  $e$ , euler sayısını;  $AD_{i,j}$   $j$ 'inci boyuttaki en iyi katyon ile  $i$ 'inci sıradaki anyon arasındaki mesafeyi;  $CD_{i,j}$   $j$ 'inci boyuttaki en iyi anyon ile  $i$ 'inci sıradaki katyon arasındaki mesafeyi;  $AF_{i,j}$  anyonların çekim kuvveti,  $CF_{i,j}$  ise katyonların çekim kuvvetini ifade eder [27]. Bu kuvvetler denklemlerden görüleceği üzere mesafe ile ters orantılıdır. Kuvvetler hesaplandıktan sonra bu kuvvet değerlerinden yararlanıp yeni pozisyon bilgisi eşitlik (2.19) ve (2.20) ile atanır.

$$A_{i,j} = A_{i,j} + AF_{i,j} * (C_{best_j} - A_{i,j}) \quad (2.19)$$

$$C_{i,j} = C_{i,j} + CF_{i,j} * (A_{best_j} - C_{i,j}) \quad (2.20)$$

Sadece güç değerinin, her bir iyonun en iyi ters yüklü iyonla doğru olan moment değerinin hesabında etkisi vardır. Adım sayısı arttıkça en iyi iyonlar etrafında diğer iyonlar toplanmaya başlar ve sıvı fazdan kristal faza doğru bir geçiş başlar. Kristal faz ise çözümün bulunduğu fazdır.

### 2.3.3.2 Kristal Faz

Bu fazda, iyonlar bir noktaya yakınsarlar ve arama uzayının şekli bilinmediğinden bu nokta yerel minimum/maksimum noktası olabilir. Bu yüzden kaçış için atlama yapmak gereklidir. Doğada birbirini çeken iyonların sonucunda oluşan kristal faz, aynı gücü aynı yüklerle uygulayarak yok edilip sıvı faza



dönüştürülebilir. Yerel minimum/maksimum noktasından kurtulmak için gerekli algoritmik ifade aşağıda verilmektedir [27].

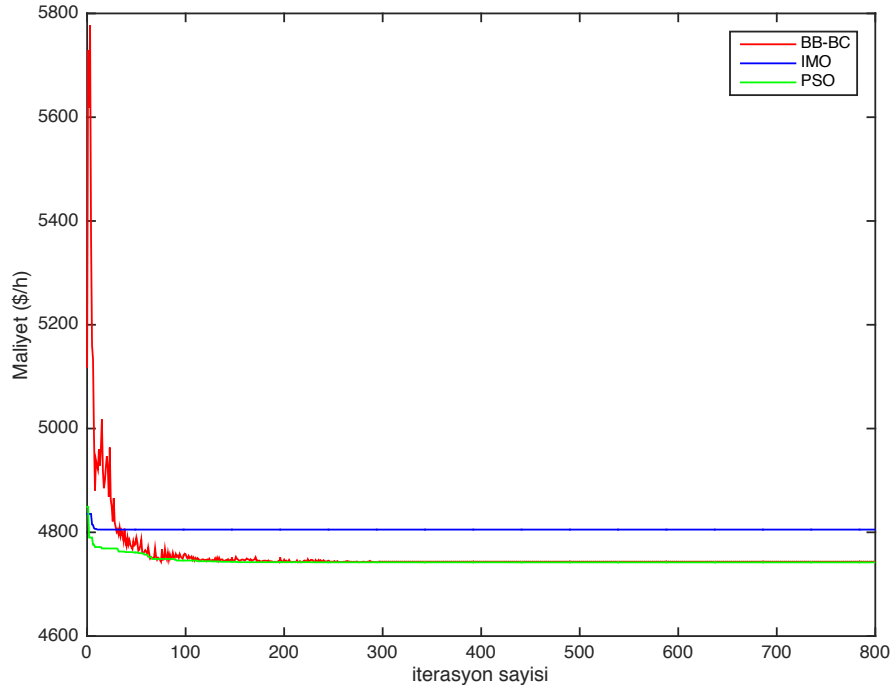
```
    if (CbestFit >= CworstFit/2 and AbestFit >= AworstFit/2)
    if rand () > 0.5
    Ai = Ai + φ1 × (Cbest-1)
    else
    Ai = Ai + φ1 × (Cbest)
    endif
    if rand () > 0.5
    Ci = Ci + φ2 × (Abest-1)
    else
    Ci = Ci + φ2 × (Abest)
    endif
    if rand () < 0.05
    Re – initialized Ai and Ci endif endif
```

Bu ifadede  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  değerleri [-1,1] arasında değişen rastgele sayıları ve rand() ise [0,1] arasında değişen rasgele sayıyı ifade eder. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, ilk başta bir popülasyon oluştururken  $r(ub_i - lb_i) + lb_i$  formülünden yararlanılması gerektiğidir. Burada r rastgele tekdüze dağılımlı [0,1] arasında değişen sayıları, lb ve ub ise sırasıyla alt ve üst limiti ifade eder [27].

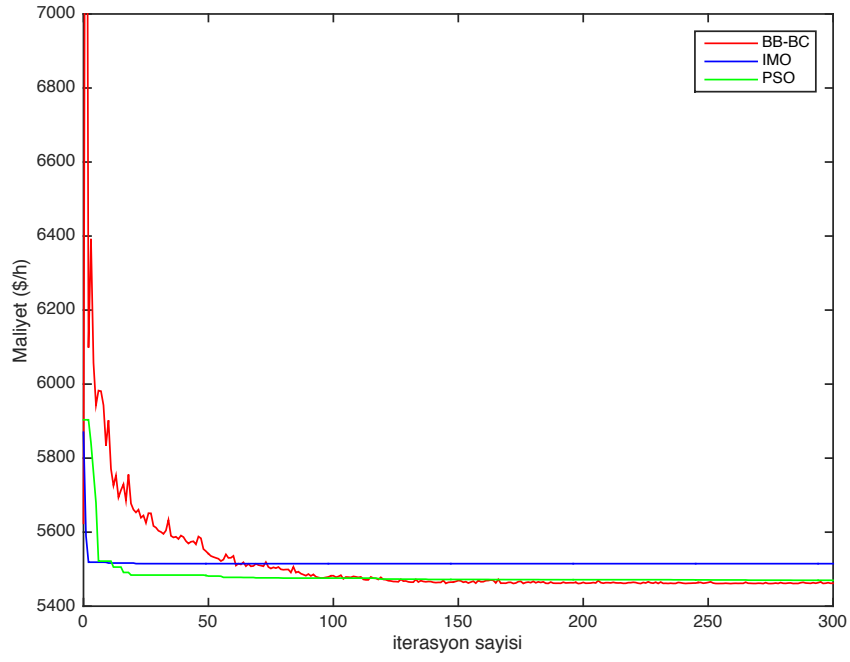
## 2.4 İlk Sistemin Simülasyon Sonuçları

Algoritmaların çözümleri, 4GB DDR3 hafızaya sahip, i5 3.1 GHz işlemcili bilgisayarlar kullanılarak MATLAB ortamında yazılan programlarla elde edilmiştir. Problem her üç algoritmaya 100'er kez olmak şartı ile uygulanıp, en iyi

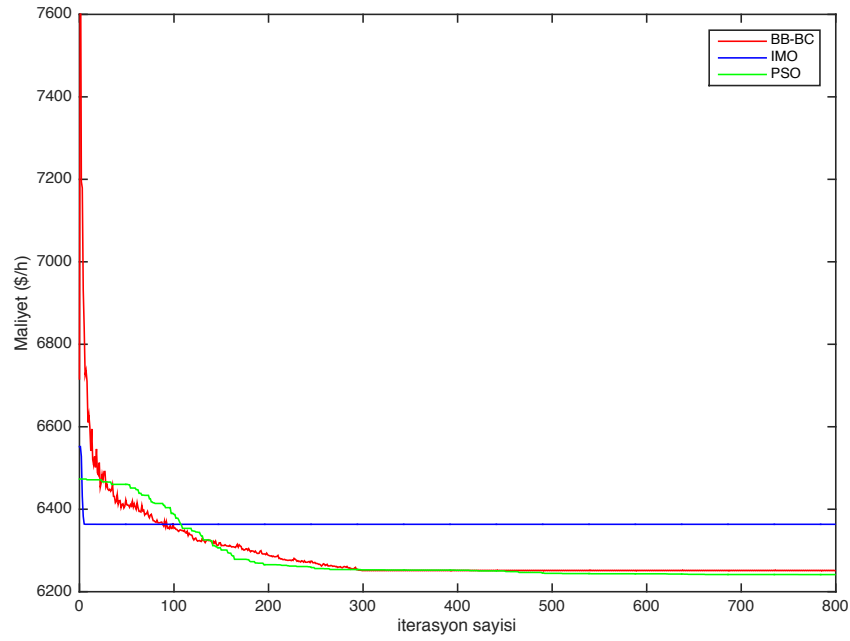
sonuçlar baz alınarak  farklı toplam yük (400 MW, 450 MW, 500 MW) değeri için incelenmiştir. Ayrıca tüm algoritmalar için popülasyon sayısı 100 ve adım sayısı 1000 alınmıştır. 400 ve 450 MW için maliyet fonksiyonu verilerinde 300.nc adımdan sonra değişim yaşanmadığından, grafiklerde 300.nc adıma kadar olan veriler görülmektedir. 500 MW için ise değişimim yaşanmadığı adım değeri 800'dr. şekil 2.3'de 400 MW, şekil 2.4'de 450 MW, şekil 2.5'de ise 500 MW yük değerleri için, 3 farklı optimizasyon algoritması kullanılarak her bir adımda bulunan maliyet değerlerinin değişimi görülmektedir.



şekil 2.3: 400 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.



**Şekil 2.4:** 450 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.



**Şekil 2.5:** 500 MW yük değerinde elde edilen maliyet değerleri.

Tablo 2.2 (400 MW yük için), Tablo 2.3 (450 MW yük için) ve Tablo 2.4'de (500 MW yük için) en iyi maliyet değeri için her bir generatörün sisteme aktarması gereken aktif güç değerleri görülmektedir. Şekillerden görüleceği gibi BB-BC algoritması ağırlık merkezindeki ani değişikliklerden ötürü ilk adım

değerlerinde sıçramalar yapmıştır. 400 MW değeri için PSO ve BB-BC algortimaları birbirine çok yakındır. 450 MW için BB-BC öne geçmiş fakat 500 MW değeri için PSO algoritmasının gerisinde kalmıştır. Bu veriler ışığında BB-BC ve PSO algoritmaları generatör güçleri için bir birine göre nispeten yakın sonuçlar üretmesine rağmen, İHO algoritması diğer iki algortimadan farklı maliyet açısından daha yüksek değerler üretmektedir.

**Tablo 2.2:** 400 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.

Gen (MW)	BB-BC	PSO	İHO
PG1	89.23	89.08	116.66
PG2	231.37	231.68	217.42
PG3	39.40	39.24	30.18
PG4	40.00	40.00	35.74
<b>Toplam</b>	400.00	400.00	400.00

**Tablo 2.3:** 450 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.

Gen (MW)	BB-BC	PSO	İHO
PG1	124.44	125.88	143.80
PG2	246.3	244.80	234.85
PG3	39.26	39.33	37.31
PG4	40.00	39.99	34.04
<b>Toplam</b>	450.00	450.00	450.00

**Tablo 2.4:** 500 MW yük değeri için en iyi güç dağılımları.

Gen (MW)	BB-BC	PSO	İHO
PG1	170.69	170.0	215.13
PG2	249.95	250.0	209.66
PG3	39.36	40.00	37.57
PG4	40.00	40.00	37.64
<b>Toplam</b>	500.00	500.00	500.00

Tablo 2.5’de her bir algoritma için elde edilen maliyet değerleri görülmektedir. Bu verilerden görüleceği üzere, BB-BC algoritması ile PSO algoritması minimuma yaklaşma açısından benzer performans içerisinde olup, çok az farkla PSO algoritması BB-BC algoritmasını geride bırakmayı başarmıştır. Elde edilen veriler ışığında PSO ve BB-BC algoritmaları bu özel örneğin maliyet fonksiyonunu İHO algoritmalarına göre daha başarılı bir şekilde çözmüştür.

**Tablo 2.5:** Farklı yük değerleri için optimum maliyet değerleri.

Yöntem	BB-BC	PSO*	İHO
İterasyon sayısı	1000	1000	1000
Popülasyon sayısı	100	100	100
400 MW için maliyet (\$/h)	4742.30	4742.07	4805.20
450 MW için maliyet (\$/h)	5466.39	5467.03	5514.81
500 MW için maliyet (\$/h)	6246.73	6241.47	6363.42
* En başarılı yöntem			

Tablo 2.6'da, adım sayısını tamamlamak için gereken ortalama süre açısından algoritmalar karşılaştırılmış ve BB-BC algoritmasının, PSO ve İHO algoritmalarına göre daha hızlı sonuca ulaştığı gözlenmiştir. Tablo 2.7'de ise bu üç algoritmanın 400,450 ve 500 MW değeri için elde ettiği minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri verilmiştir.

**Tablo 2.6:** Algoritmaların ortalama çalışma süreleri.

Yöntem	Programın çalışma süresi (sn)		
	400 MW	450 MW	500 MW
BB-BC*	115.02	116.02	116.31
PSO	180.89	181.96	182.20
İHO	226.94	228.82	227.60
* En başarılı yöntem			

**Tablo 2.7:** Algoritmaların tüm yük değerlerindeki minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri.

Maliyet Değerleri (\$/h)				
Algo.		400 MW	450 MW	500 MW
PSO	Min.	4742	5467	6241.5
	Ort.	4753.2	5495.1	6260.3
	Maks.	4779.2	5550.2	6319.4
BB-BC	Min.	4742.3	5466.4	6246.7
	Ort.	4757.5	5653.2	6344.4
	Maks.	4917	5843.3	6457
İHO	Min.	4805.2	5514.8	6363.4
	Ort.	4972	5763	6542.1
	Maks.	5164.2	5987.7	6787.4

## 2.5 Sonuç

Tezin bu bölümünde, rüzgar ve termik santralden oluşan örnek sistem üzerinde, enerji üretim maliyetini minimize etmeye amaçlayan ekonomik güç dağılım problemi için, ikisi (İHO ve BB-BC) yeni olmak üzere üç adet (İHO, BB-BC ve PSO) güncel algoritmanın performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında BB-BC ve PSO algoritmaları başarılı bir performans sergilemiştir. Bulunan minimum maliyet değerleri açısından BB-BC ve PSO algoritmaları birbirine çok yakın değerlerde olup süre bakımından BB-BC algoritması PSO algoritmasına göre 1 dakikadan daha az sürede algoritmayı tamamlayıp sonuca ulaşmıştır. Eğer büyük ve karmaşık bir problem üzerinde çalışılacaksa BB-BC bulduğu optimum sonuçlar ve minimum çalışma zamanı avantajı ile PSO algoritmasının bir adım ötesine geçebilir. BB-BC algoritmasının ilk fazında yaptığı sınırlı çözüm uzayı üzerindeki patlamalar sebebiyle büyük sıçramalar gözlenmiştir. Bunun sebebi sürekli değişen ağırlık merkezidir. Belli bir adım sonrasında BB-BC algoritmasının sıçramaları çok azalmış ve sınırlanmıştır. PSO ve İHO algoritmaları en iyi değerleri hep içerisinde tuttuğu için sıçrama yapmamış, direk olarak düşüğe geçmişlerdir. Problemin daha büyük boyuttaki sistemler üzerinde uygulanması ve algoritmalarda yapılacak iyileştirmeler ile, rüzgar santrallerinin yoğunlukla dahil olmaya başladığı enerji üretim pazarının, maliyet değeri açısından önemli kazanımlar elde edebileceği düşünülmektedir.

### 3. RÜZGAR SANTRALLERİNİN TAHMİNİ KARAKTERİSTİĞİ ve DİNAMİK EKONOMİK DAĞILIM MODELİ

İki parametresi Weibull dağılımı, rüzgar hızının frekans dağılımını ve rüzgar enerjisinin potansiyelini hesaplarken literatürde sürekli tavsiye edilen ve yaygınca kullanılan en önemli yöntemlerden birisidir. Eşitlik (3.1)'de Weibull dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmektedir [15].

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (3.1)$$

Yukardaki ifadede,  $k$  birimsiz şekil verme parametresini, rüzgar hızı ile aynı birimde olan  $c$  ölçeklendirme parametresini ve  $v$  ise rüzgar hızını göstermektedir.

Rüzgar hızı değişimin Weibull dağılımına uygunluğu dikkate alındığında, ölçülen hız verileri dikkate alınarak fonksiyonun oluşturulması için  $k$  ve  $c$  parametrelerinin hesaplanması gerekecektir. Bu değerleri hesaplamak için geçmişe yönelik belirli bir bölge için elimizde bulunan rüzgar hızı verilerinden bulduğumuz ortalama ve standart sapma değerleri ve eşitlik (3.2), (3.3), (3.4) kullanılır [15].

$$\mu = c\Gamma(1 + k^{-1}) \quad (3.2)$$

$$\sigma_v^2 = c\Gamma(1 + 2k^{-1}) - \mu^2 \quad (3.3)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy, \quad y > 0 \quad (3.4)$$

Yukarıda  $\mu$  ortalama hız değerini;  $\sigma_v$  standart sapma değerini;  $\sigma_v^2$  varians değerini ve  $\Gamma$  gama fonksiyonunu ifade etmektedir.

Rüzgar hızı bazı lineer olmayan değerler ihmal edildiğinde rüzgar gücü ile doğrudan bağlantılıdır ve rüzgar tribünlerinin çıkış gücü eşitlik (3.5)'deki gibi ifade edilebilir [28].

$$w = \begin{cases} 0; & v < v_i \\ w_r \frac{(v - v_i)}{(v_r - v_i)} & v_i \leq v < v_r \\ w_r & v_r \leq v < v_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Yukarıda  $v_i$  tribünün çalışması için gereken minimum rüzgarı hızını;  $v_r$  nominal rüzgar hızını;  $v_0$  tribünün çalışabileceği maksimum rüzgarı hızını;  $w_r$  nominal çıkış gücünü;  $w$  rüzgar tribününün çıkış gücünü ifade etmektedir.

Elde edilen Weibull dağılımı hız değerlerinden Weibull dağılımı güç değerlerine lineer dönüşüm fonksiyonları ile geçilebilir. Lineer bölgede dönüşüm eşitlik (3.6) ve eşitlik (3.7)'den yararlanılarak bulunabilir [15].

$$W = T(V) = aV + b \quad (3.6)$$

$$v = T^{-1}(w) \Rightarrow v = \frac{w - b}{a} \quad (3.7)$$

$$f_w(w) = f_v(T^{-1}(w)) \left[ \frac{dT^{-1}(w)}{dw} \right] = f_v \left( \frac{w - b}{a} \right) \left| \frac{1}{a} \right| \quad (3.8)$$

Yukarıdaki ifadede  $V$  rüzgar hızı rastgele değişkeni;  $W$  çıkış gücü rastgele değişkeni ve  $T$  dönüşüm fonksiyonudur.

Eşitlik (3.5)'den görüleceğe üzere rüzgar gücü değeri hem devamlı hem devamsız parçalardan oluşmaktadır. Bu yüzden, çıkış gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonu devamlı ve devamsız olmaz üzere iki bölümden (eşitlik (3.9) ve (3.10)) oluşmalıdır.

$$Pr\{W = 0\} = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} + e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k} \quad (3.9)$$

$$Pr\{W = w_r\} = -e^{-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k}. \quad (3.10)$$

Devamlı parça için aşağıdaki değişkenler tanımlanır:

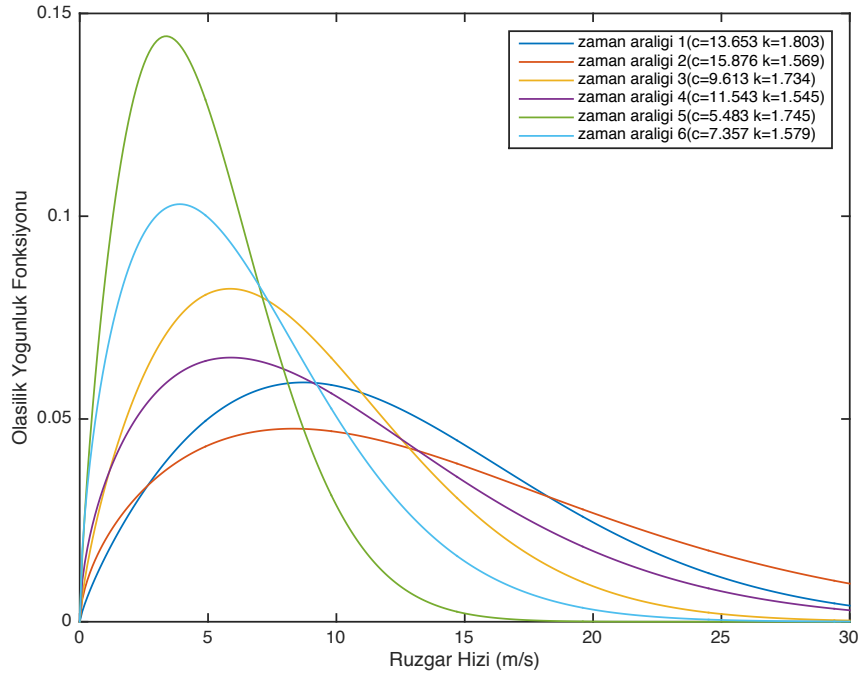
$$p = \frac{w}{w_r}, \quad l = \frac{(v_r - v_i)}{v_i}. \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.12)'de gösterilen çıkış gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonu eşitlik (3.5), (3.8) ve (3.11) den yararlanılarak elde edilebilir [15].

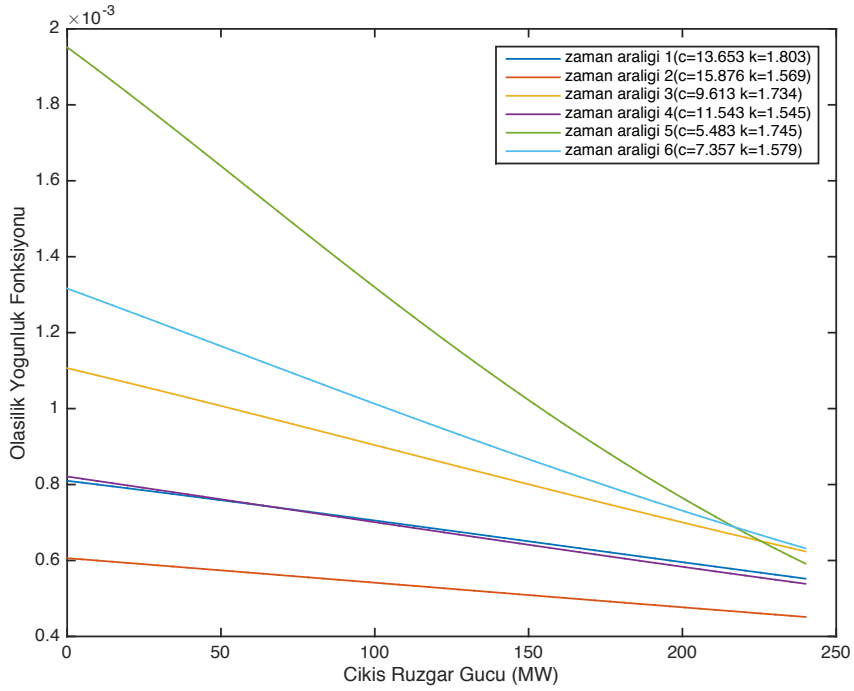
$$f_w(w) = \frac{klv_i}{w_r c} \left( \frac{(1 + pl)v_i}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{(1+pl)v_i}{c}\right)^k} \quad (3.12)$$

$f_v$  ve  $f_w$  karakteristiği, bu çalışmada kullanılan altı zaman aralığı için tanımlanan  $k$  ve  $c$  değerleri kullanılarak Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmiştir.





Şekil 3.1: 6 farklı zaman aralığı için rüzgar hızı olasılık dağılımları.



Şekil 3.2: 6 farklı zaman aralığı için rüzgar gücü değerleri için olasılık yoğunluk fonksiyonu değerleri.

### 3.1 Valf Nokta Etkisi ve Gaz Salınım Maliyeti Dikkate Alınarak Dinamik Ekonomik Dağılım Problemi

Dinamik ekonomik dağılım modeli normal ekonomik dağılım modeline göre tek farkı birden fazla zaman aralıklarına bölünmüş olmasıdır. Bu da rüzgar hızının sürekli değişimi gibi durumlarda sonuçların daha az hata oranıyla gerçeğe yakın çıkmasına olanak tanır [7].

Birden fazla zaman aralığı için termik santrallerin enerji üretim maliyeti polinomik olarak eşitlik (3.13)'de gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^m C_{T,i} = \sum_{i=1}^m c_i p_i^2 + b_i p_i + a_i \quad (3.13)$$

Yukarıda  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$   $i^{\text{inci}}$  generatörün enerji üretim sabitlerini;  $m$  termik santraldeki generatör sayısını;  $C_{T,i}$   $i^{\text{inci}}$  generatörün enerji üretim maliyet değerini;  $p_i$   $i^{\text{th}}$  generatör için beklenen güç değerini ifade eder.

Yük talebi artması durumunda, çoklu valf buhar türbünlü termik santrallerde kullanılan generatörlerin çıkış gücü artar. Bu nedenle buhar türbinleri birden açılarak, generatör birimlerinde dalgalanma etkisi neden olur. Bu etki (valf nokta etkisi) ek bir maliyete neden [29] olur bu maliyet eşitlik (3.14)'de gösterilmiştir.

$$\text{Valf nokta etkisi maliyeti: } \sum_{i=1}^m |g_i \sin (h_i(p_i - p_i^{\text{min}}))| \quad (3.14)$$

Yukarıda  $g_i$ ,  $h_i$  valf nokta etkisi parametleri ve  $p_i^{\text{min}}$   $i^{\text{inci}}$  generatör için minimum çıkış gücünü ifade etmektedir.

Valf nokta etkisi dahil edilmiş maliyet fonksiyonu eşitlik (3.15)'deki gibidir,

$$\sum_{i=1}^m C_{T,i} = \sum_{i=1}^m c_i p_i^2 + b_i p_i + a_i + |g_i \sin (h_i(p_i - p_i^{\text{min}}))|. \quad (3.15)$$

Rüzgar türbinleri aksine, termik santraller kükürt dioksit, karbon monoksit, azot oksit gibi çevre kirliliğine neden olan zararlı gaz salınımı yaparlar. Kirlilik salınım faktörü eşitlik (3.16)'da olduğu gibi matematiksel maliyet fonksiyonu olarak modellenebilir [30].

$$\sum_{i=1}^m C_{E,i} = \sum_{i=1}^m 10^{-2}(\alpha_i + \beta_i p_i + \gamma_i p_i^2) + \zeta_i e^{(\lambda_i p_i)} \quad (3.16)$$

Yukarıda  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\zeta_i$  ve  $\lambda_i$  gaz salınım maliyeti sabitleridir. Bu katsayılar farklı çıkış değerleri için güncel generatör emisyon verileri kullanılarak en küçük kareler metodu ile hesaplanabilir [17].

Vaft nokta etkisi ve gaz salınım faktörü dahil edilmiş ekonomik dağılım modeli ( $C_{toplam}$ ) eşitlik (3.17)'de gösterilmiştir.

$$\min C_{toplam} = C_T + C_E + C_w + C_p + C_r \quad (3.17)$$

Bu bölümde dinamik ekonomik dağılımı kullanıldığı için T zaman aralığı için tüm maliyet tipleri tekrar hesaplanmalıdır. eşitlik (3.17)'de yer alan formül eşitlik (3.18)'e dönüşmüştür.

$$\min C_{Total} = \sum_{t=1}^T (C_{T,t} + C_{E,t} + C_{w,t} + C_{p,t} + C_{r,t}). \quad (3.18)$$

### 3.2 Hat Kayıpları

Tezin ilk bölümünde, problemimizi hat kayıplarını ihmal ederek çözmüştük. Daha gerçekçi sistemler için bu yapılamaz. Bu yüzden,  $B_{ij}$  (Hat kaybı sabitleri) değerleri verilen generatörler için hat kaybı eşitlik (3.19) verilmiştir [18].

$$L_{L,t} = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} p_{i,t} B_{ij} p_{j,t} \quad (3.19)$$

$L_{L,t}$   $t^{\text{inci}}$  zaman aralığı için bulunan hat kayıp değeridir.

$i^{\text{inci}}$  ve  $j^{\text{inci}}$  güç üniteleri arasındaki güç kaybı sabitini  $B_{ij}$  ile ifade edebiliriz. Kısacası,  $B$ -katsayılarını hesaplamak için empedans değerleri, akım değerleri ve matris dönüşümü tekniklerini kullanılır [18].

Aşağıda gösterilen tüm şartlar sağlanırsa doğru sonuca ulaşabiliriz [18].

$$\left. \begin{aligned} p_i^{\min} &\leq p_{i,t} \leq p_i^{\max} \\ 0 &\leq w_{i,t} \leq w_{r,i} \\ \sum_{i=1}^m p_{i,t} + \sum_{i=1}^n w_{i,t} &= L_{D,t} + L_{L,t} \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Yukarıdaki ifadede  $p_i^{min}$ ,  $p_i^{max}$  değerleri generatörün çıkış olarak verebileceği minimum ve maksimum güç değerlerini;  $p_{i,t}$ ,  $w_{i,t}$  sırasıyla  $i^{inci}$  termal generatör ve  $i^{inci}$  rüzgar tribününü için  $t^{inci}$  zaman aralığındaki çıkış güçlerini;  $w_{r,i}$  nominal  $i^{inci}$  rüzgar tribününü çıkış gücünü;  $L_{D,t}$  ise  $t^{inci}$  zaman aralığı için talep edilen toplam güç miktarını ifade eder.

Tezin bu kısmında, BB-BC, PSO, İHO ve yakın zamanda ortaya atılan VS algoritmaları rüzgar tribünlerini içeren hibrit sistemlerin dinamik ekonomik dağılım problemini çözmek için kullanılmıştır.

### 3.3 Dinamik Ekonomik Dağılım Modeli için Analiz Edilen Sistem

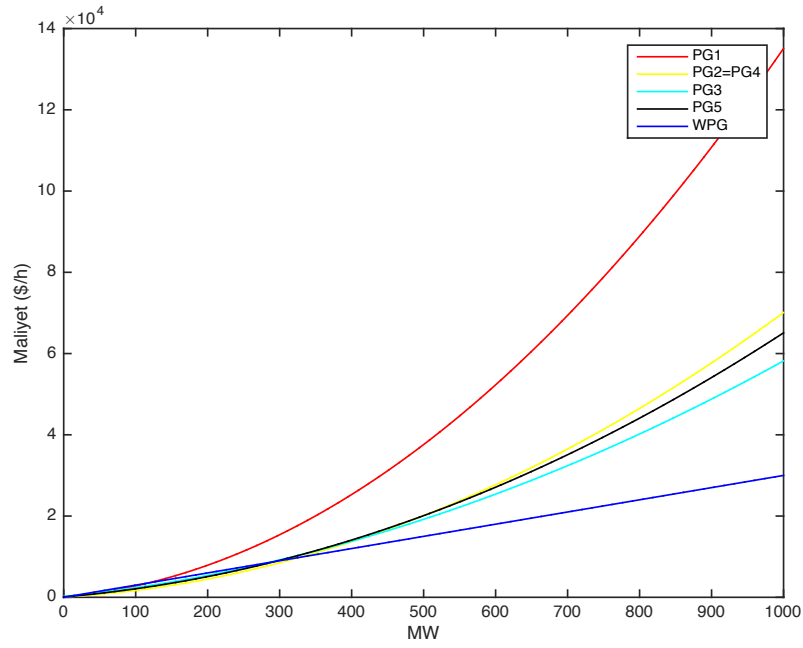
Tezin bu bölümünde , beş termal generatör ve 160 adet rüzgar tribünün bulunduğu büyük bir rüzgar çiftliği içeren 6-baralı rüzgar termik (hibrit) güç sistemi, dört farklı algoritma kullanarak DED sorunu çözmek için kullanıldı. Rüzgar tribünleri aynı özelliklere sahip oldukları için, bir rüzgar tribünü olarak kabul edilebilir [17].

Generatörlerin maliyet katsayıları değerleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir. Maliyet katsayıları değerlerini göre generatörlerin karakteristik özellikleri Şekil 3.3'de verilmiştir. En pahalı generatör birimi PG1 ve en ucuz generatör birimi rüzgar tribünüdür.

Valf nokta etkisi ile gaz salınım etkileri için maliyet parametreleri sırasıyla Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Ayrıca valf nokta etkisi ile gaz salınım etkileri için maliyet parametreleri açısından generatörlerin özellikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1:** Generatörlerin maliyet sabitleri.

Jener.	Generatörlerin maliyet sabitleri			Çıkış gücü sınırları	
	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MW <sup>2</sup> h)	P <sup>min</sup> (MW)	P <sup>max</sup> (MW)
PG1	100	15	0,12	30	400
PG2	200	18	0,04	100	600
PG3	100	10	0,06	100	650
PG4	200	18	0,04	250	800
PG5	100	15	0,05	300	1000
WTGs	0	30	0	0	240



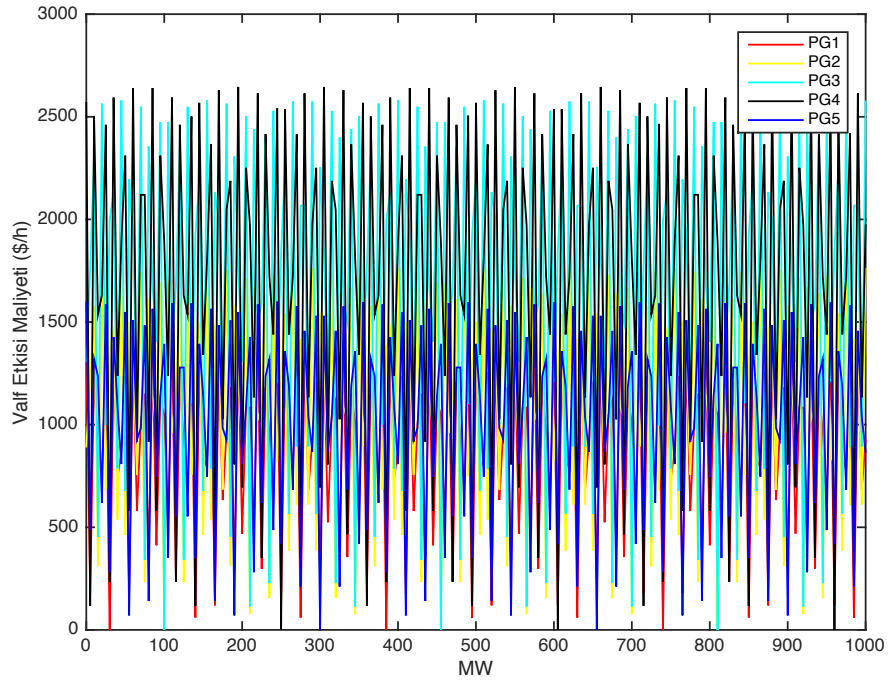
**Şekil 3.3:** Çıkış güçlerine göre maliyet değerleri.

**Tablo 3.2:** Valf nokta etkisi parametreleri.

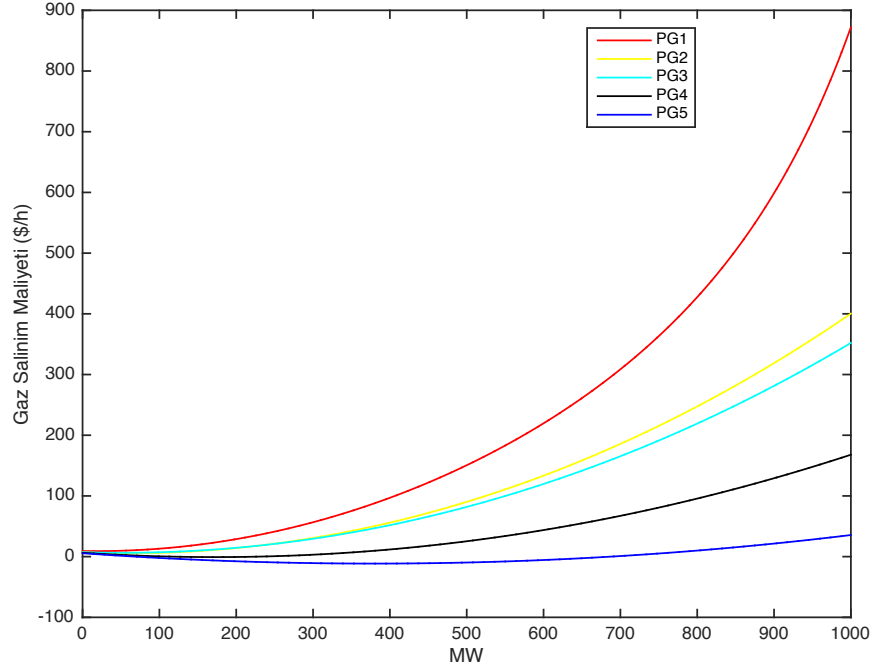
Generatör	Valf nokta etkisi parametreleri	
	g (\$/h)	h (rad/MW)
PG1	260	5.2
PG2	280	6.3
PG3	300	8.6
PG4	270	9.8
PG5	380	4.2

**Tablo 3.3:** Gaz salınım ceza maliyet katsayıları.

Generatör	Gaz salınım ceza maliyet katsayıları				
	$\alpha$ (\$/h)	$\beta$ (\$/MWh)	$\gamma$ (\$/MW <sup>2</sup> h)	$\zeta$ (\$/h)	$\lambda$ (MW)
PG1	911.8	-2.094	0.05859	0.1	0.008
PG2	613.1	-5.457	0.04266	1	0.0031
PG3	628.5	-4.116	0.03669	1	0.003
PG4	542.6	-8.55	0.0238	1	0.0023
PG5	461.3	-9.712	0.01153	1	0.002



**Şekil 3.4:** Çıkış gücüne göre valf nokta etkisi için maliyet değişimi değerleri.



Şekil 3.5: Çıkış gücüne göre gaz salınım ceza maliyetleri.

Hat kaybı katsayıları Tablo 3.4'te gösterilmiştir [17].

Tablo 3.4: Hat kaybı parametreleri.

Hat kaybı sabitleri ( $B_{ii} * 10^{-4}$ )					
$B_{i1}$	$B_{i2}$	$B_{i3}$	$B_{i4}$	$B_{i5}$	$B_{i6}$
7.075	-1.005	-1.865	-1.975	-1.585	-0.36
-1.005	11.355	0.055	-1.07	-1.475	-0.51
-1.865	0.055	7.295	2.905	0.08	-0.945
-1.975	-1.07	2.905	3.96	0.395	-1.03
-1.585	-1.475	0.08	0.395	1.61	-0.535
0.36	-0.51	-0.945	-1.03	-0.535	3.14

Rüzgar tribünleri için nominal güç değeri 1.5 MW'dır. Tüm rüzgar tribünlerini bir rüzgar tribune olarak kabul ettiğimiz için toplam nominal güç değeri 240 MW'dır. Güç alınabilecek minimum rüzgar hızı, devre dışına alınması gerekli maksimum rüzgar hızı ve nominal rüzgar hızı değerleri sırasıyla  $v_i = 3 \text{ m/s}$ ,  $v_o = 25 \text{ m/s}$  ve  $v_r = 15 \text{ m/s}$ . Rüzgar tribünleri için direk maliyet sabiti  $d=30 \text{ \$/MWh}$ , fazla tahminden dolayı kesilen ceza maliyet katsayısı

$k_r = 2.2 \$/MW$  ve beklenen değerlerden daha az tahmin edilen değer için maliyet ceza katsayısı  $k_p = 4 \$/MWh$ 'dir.

Rüzgar karakteristik olarak rastgele bir yapıya sahiptir. Bu nedenle rüzgar hızı, kısa zaman aralıklarında tahmin edilir. Tezin bu bölümü için tüm hesaplamalar ayrı 6 zaman aralığı için hesaplanmıştır. Rüzgar gücünü eşitlik (3.5)'den hesaplamak için öncelikle Tablo 3.5'de verilen ortalama ve standart sapma değerleri kullanılır. Tezin bu bölümünde rüzgar hızını tahmin edebilmek için iki parametrelili ( $k$  ve  $c$ ) Weibull dağılımı kullanılmıştır.  $k$  ve  $c$  değerleri hesaplamak için eşitlik (3.2) , (3.3) ve (3.4)'dan yararlanabiliriz. MATLAB'da rastgele rüzgar hızı değerlerini belirli ( $k$  ve  $c$ ) değerleri ile bulmak için 'wblrnd' komutu kullanılabilir.

**Tablo 3.5:** Rüzgar hızının 6 zaman aralığı için standart sapma ve ortalama değerleri.

	<b>Zaman aralıkları (sn.)</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b><math>\mu</math> (m/s)</b>	12.1	14.07	8.52	10.23	4.86	6.52
<b><math>\sigma</math> (m/s)</b>	7.03	9.29	5.13	6.85	2.91	4.28

### **3.4 Vortex Search Algoritması (VS)**

VS algoritması, bir üst sezgisel algoritmadır ve harmanlanmış akışkanlar ile dikey akışının yarattığı girdap deseninden esinlenmiştir [31]. VS algoritmasının amacı yeni uyumlu adım büyüklüğü ayarlama düzeni kullanarak çözüm bulmaktır.

#### **3.4.1 VS Algoritmasının Metodolojisi**

Diğer tüm üst sezgisel yöntemler gibi, VS algoritması da başlangıçta çözümler üreterek ve çözüm uzayı içinde bu üretilen çözümleri dağıtarak işleme başlar. Bu algortmada bir sonraki daha küçük yarıçaptaki muhtemel arama uzayı, girdap paterni ayarlanmasıyla elde edilir. Yarıçap her iterasyonda daha çok küçülerek algortima sonunda en iyi çözüm bulunabilir [31].

Başlangıç çözüm adayları için ilk ağırlık merkezi aşağıdaki gibi bulunur.



$$\mu_0 = \frac{ub + lb}{2} \quad (3.21)$$

Yukarıda  $ub$  ve  $lb$  çözüm adaylarının alt ve üst sınırlarını;  $\mu_0$  ise başlangıç vorteksi için merkez noktayı belirtir.

Çözümler Gauss dağılımı kullanarak  $\mu_0$  etrafında oluşturulur. Gauss dağılımı kullanmak için, eşitlik (3.22)'de yararlanarak kovaryans matrisinin ( $\Sigma$ ) bulunması gerekir. Kovaryans matrisinin köşegende olmayan elemanları küresel dağılım şeklini elde etmek için sıfır olmalıdır. Böylece, girdap desen şeması korunur. Kovaryans matrisinin değeri, aşağıdaki denklem kullanılarak eşit varyanslar kullanılarak hesaplanabilir

$$\Sigma = \sigma^2 [I]_{dxd} \quad (3.22)$$

yukarıda  $\sigma^2$  dağılımının varyansını;  $d$  boyutu;  $I$  birim  $dxd$  boyutunda matrisi ifade eder [31].

Başlangıç yarıçap değeri ( $r_0$ )'ı bulmak için, eşitlik (3.23)'de gösterilen standart sapma değeri ( $\sigma_0$ ) kullanılabilir. İlk fazlar için yarıçap değeri yerel maksimum veya minimum noktalarına takılmayı önlemek için büyük olmalıdır.

$$\sigma_0 = \frac{ub_{max} - lb_{min}}{2} \quad (3.23)$$

$ub_{max}$  ve  $lb_{min}$  tüm boyutlardaki çözüm değerleri için maksimum ve minimum sınırları ifade eder. Aday çözümleri değerleri sınırları aşması durumunda değerler eşitlik (3.24)'den yararlanarak sınırlar içrisine kaydırılması gerekmektedir.

$$s_k^i = \begin{cases} rand * (ub^i - lb^i) + lb^i & s_k^i < lb^i \text{ and } s_k^i > ub^i \\ s_k^i & lb^i \leq s_k^i \leq ub^i \end{cases} \quad (3.24)$$

Yukarıdaki ifadede  $k$  aday çözümleri indeks sayısı;  $i$  aday çözümlerin boyutudur ;  $s_k^i$   $i$ 'nci boyuttaki  $k$ 'inci aday çözümdür;  $rand$  rasgele sayı değeridir.

Yarıçapı küçültme sürecinde ters gama fonksiyonu kullanılmaktadır [31]. Her adımda, ters gama fonksiyonu değerlerinin güncelleştirilmesi gerekmektedir . MATLAB'da ters gama fonksiyonunu hesaplamak için  $gammaincinv(x, a)$

komutunu kullanılabilir. Burada  $a$  gama fonksiyonunun şekil parametresi;  $x$  rasgele değişkendir. Problem  $x=0.1$  değeri için çözülmüştür [31].  $a$  gama fonksiyonunun şekil parametresi aşağıdaki eşitlik (3.25)'de ifade edilmiştir.

$$a = a_0 - \frac{t}{iter_{max}} \quad (3.25)$$

Yukarıda  $a_0$  ilk şekil parametresi ve arama uzayının tam kapsamı için  $a_0 = 1$  olarak seçilmiştir;  $t$  adımın indeks numarası ve  $iter_{max}$  maksimum adım sayısını ifade eder [31]. Sonunda, her adım için yarıçap değeri MATLAB'da aşağıdaki komutu kullanarak güncellenebilir.

$$r_t = \sigma_0 * \left(\frac{1}{x}\right) * \text{gammaincinv}(x, a_t). \quad (3.26)$$

Bu süreçler durdurma kriterlerin veya adım sayısının sonuna ulaşıncaya kadar tekrarlanmalıdır.

### 3.5 İkinci Sistemin Simülasyon Sonuçları

MATLAB kullanılarak yazılmış olan algoritmalar, 4 GB DDR3 RAM, i5 3.1 GHz işlemcisi bulunan bilgisayarları kullanılarak çözüldü. Tüm algoritmalar, farklı zaman aralıklarında ve farklı yük değerleri için 100'er kez çözüldü. En iyi sonuçlar, tüm çözümler arasında seçildi. Ayrıca, çözüm aday sayısı VS, BB-BC ve PSO algoritmaları için 300 alınırken, İHO algoritması için 150 alınmıştır. Bunun nedeni İHO algoritması kompleks tasarlanmıştır ve çözüme ulaşmak daha uzun çalışma zamanı gerektirir fakat bunun aksine İHO algoritması kullanırken en iyi sonuca ulaşmak için fazla sayıda çözüm adayı gerekmemektedir.

Altı zaman aralığı için, DED probleminin sonuçları Tablo 3.6-3.10'da gösterilmiştir.

**Tablo 3.6:** Generatörlerin çıkış güçleri (BB-BC).

<b>BB-BC</b>								
	<b>Generatör Çıkış Güçleri (MW)</b>						<b>Hat Kaybı (MW)</b>	<b>Yük Miktarı (MW)</b>
<b>Zaman Ara.</b>	<b>PG1</b>	<b>PG2</b>	<b>PG3</b>	<b>PG4</b>	<b>PG5</b>	<b>WTGs</b>	<b>LL</b>	<b>LD</b>
<b>1</b>	205.3	290.9	280.2	515.6	581.220	164.5	137.8	1900
<b>2</b>	249.9	300.7	276.5	497.6	583.139	124.6	80.73	1952
<b>3</b>	295.2	459.5	288.4	570.5	708.522	152.3	214.5	2260
<b>4</b>	345.4	374.9	348.6	471.7	798.280	151.2	160.3	2330
<b>5</b>	294.1	387.5	423.0	420.5	977.0	202.2	298.6	2406
<b>6</b>	179.1	402.1	291.0	420.3	742.590	145.965	155.3	2026

**Tablo 3.7:** Generatörlerin çıkış güçleri (VS).

<b>VS</b>								
	<b>Generatör Çıkış Güçleri (MW)</b>						<b>Hat Kaybı (MW)</b>	<b>Yük Miktarı (MW)</b>
<b>Zaman Ara.</b>	<b>PG1</b>	<b>PG2</b>	<b>PG3</b>	<b>PG4</b>	<b>PG5</b>	<b>WTGs</b>	<b>LL</b>	<b>LD</b>
<b>1</b>	271.3	313.0	224.4	397.6	633.6	121.8	61.91	1900
<b>2</b>	286.9	322.7	165.6	452.4	659.7	169.7	105.1	1952
<b>3</b>	349.1	392.1	252.7	594.1	733.1	153.6	214.9	2260
<b>4</b>	314.2	422.4	261.6	505.3	889.3	45.8	108.8	2330
<b>5</b>	315.9	389.7	201.8	590.0	968.5	62.5	122.8	2406
<b>6</b>	282.0	343.2	278.8	405.2	702.5	162.0	148.0	2026

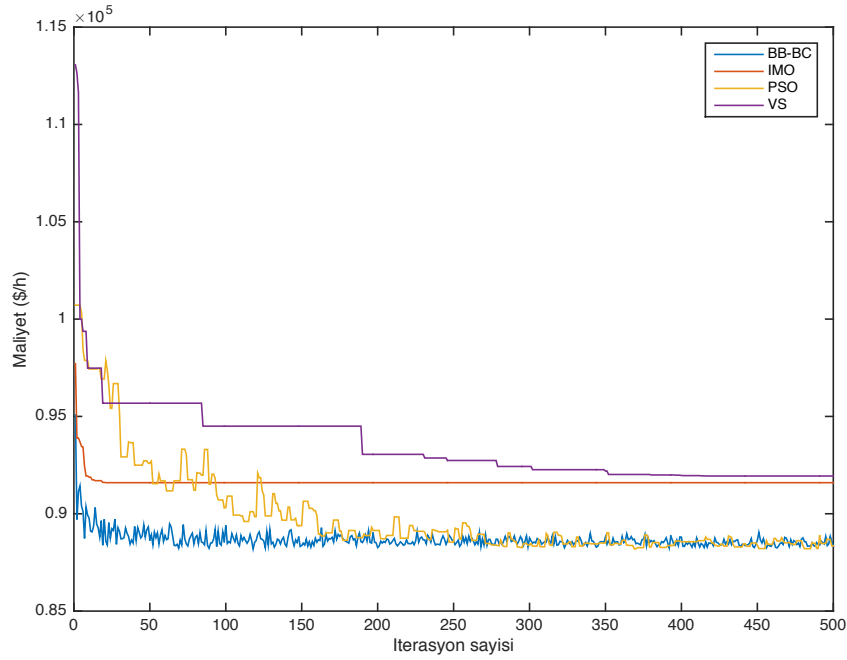
**Tablo 3.8:** Generatörlerin çıkış güçleri (İHO).

<b>İHO</b>								
	<b>Generatör Çıkış Güçleri (MW)</b>						<b>Hat Kaybı (MW)</b>	<b>Yük Miktarı (MW)</b>
<b>Zaman Ara.</b>	<b>PG1</b>	<b>PG2</b>	<b>PG3</b>	<b>PG4</b>	<b>PG5</b>	<b>WTGs</b>	<b>LL</b>	<b>LD</b>
<b>1</b>	228.0	349.9	239.6	416.4	599.6	146.6	80.34	1900
<b>2</b>	298.6	306.5	337.4	493.5	499.2	170.9	154.3	1952
<b>3</b>	326.1	342.7	286.7	519.1	764.4	75.8	55.1	2260
<b>4</b>	285.9	434.5	280.7	484.3	864.3	135.0	155.0	2330
<b>5</b>	260.3	481.4	433.4	571.4	877.5	91.46	309.7	2406
<b>6</b>	201.9	308.9	365.0	478.0	754.4	72.4	154.8	2026

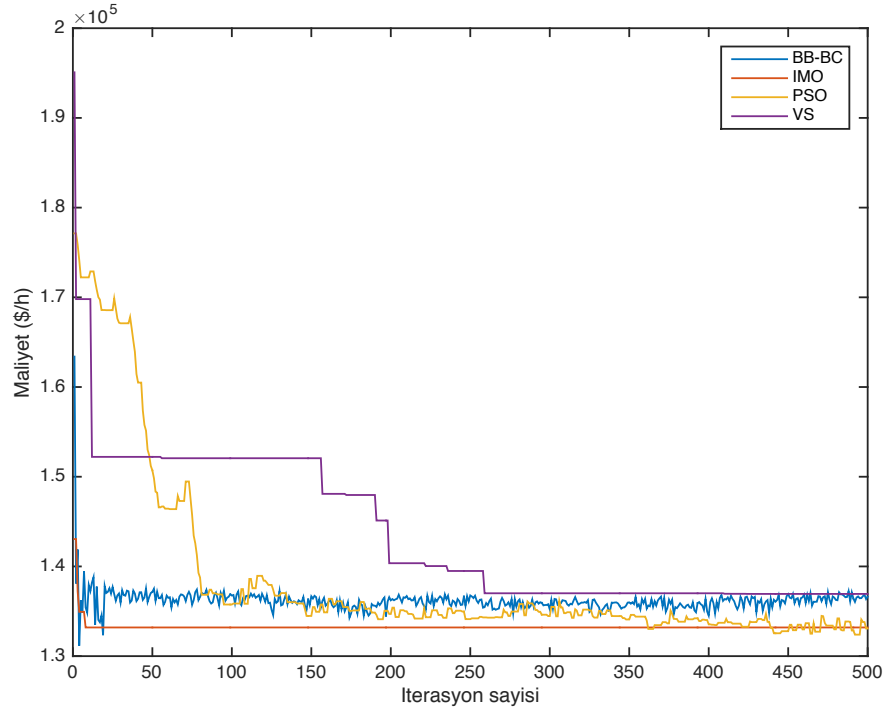
**Tablo 3.9:** Generatörlerin çıkış güçleri (PSO).

PSO								
Zaman Ara.	Generatör Çıkış Güçleri (MW)						Hat Kaybı (MW)	Yük Miktarı (MW)
	PG1	PG2	PG3	PG4	PG5	WTGs	LL	LD
1	319.7	341.6	169.6	419.6	540.010	157.651	48.3	1900
2	264.9	328.5	211.1	442.5	617.951	195.097	108.1	1952
3	307.1	337.5	193.7	566.6	808.988	54.084	8.2	2260
4	256.3	432.0	249.6	614.5	838.257	121.166	182.0	2330
5	296.6	540.3	244.4	603.5	831.216	174.924	285.1	2406
6	263.3	326.3	281.0	378.7	705.961	130.626	60.03	2026

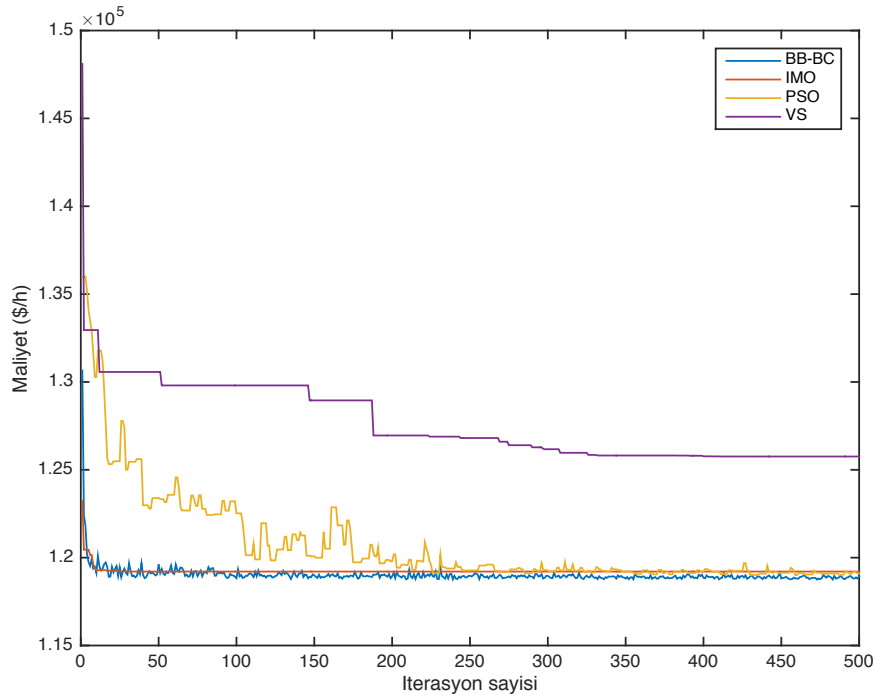
Altı zaman aralığı için adım ve maliyet değerlerine göre dört yöntem karşılaştırması grafikleri Şekil 3.6-Şekil 3.11 gösterilmiştir.



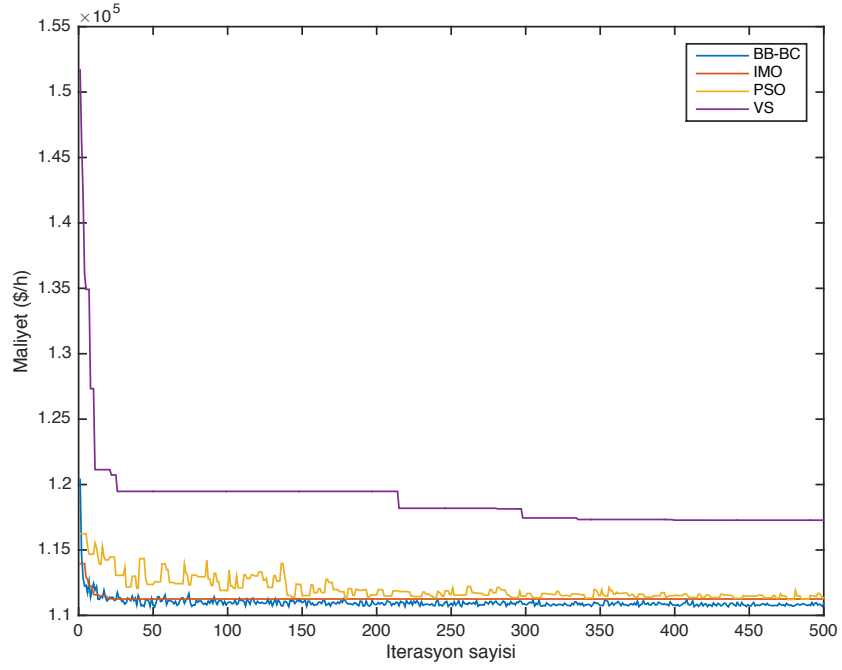
**Şekil 3.6:** Toplam maliyet değerleri (6'ncı zaman aralığı için).



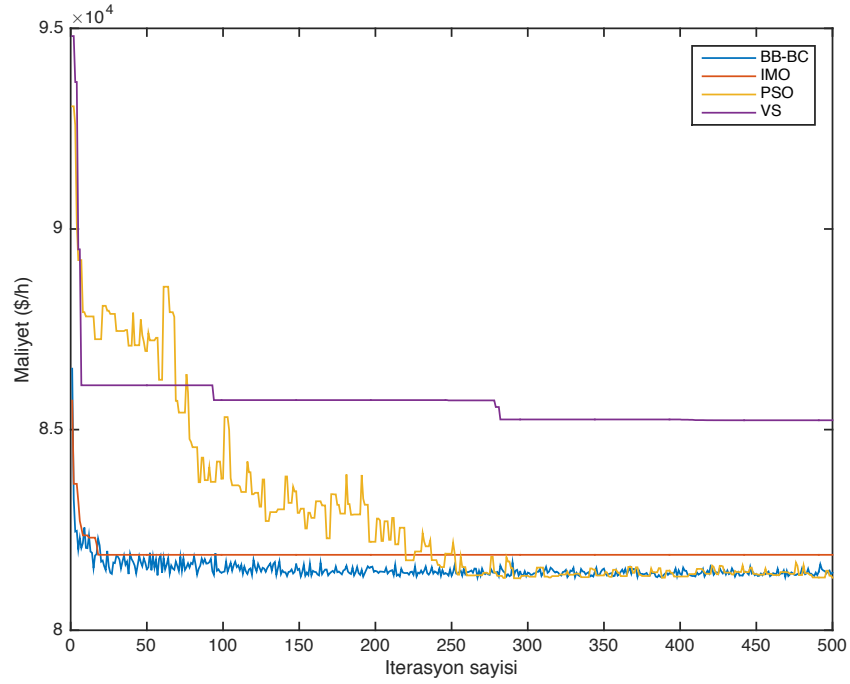
Şekil 3.7: Toplam maliyet değerleri (5'inci zaman aralığı için).



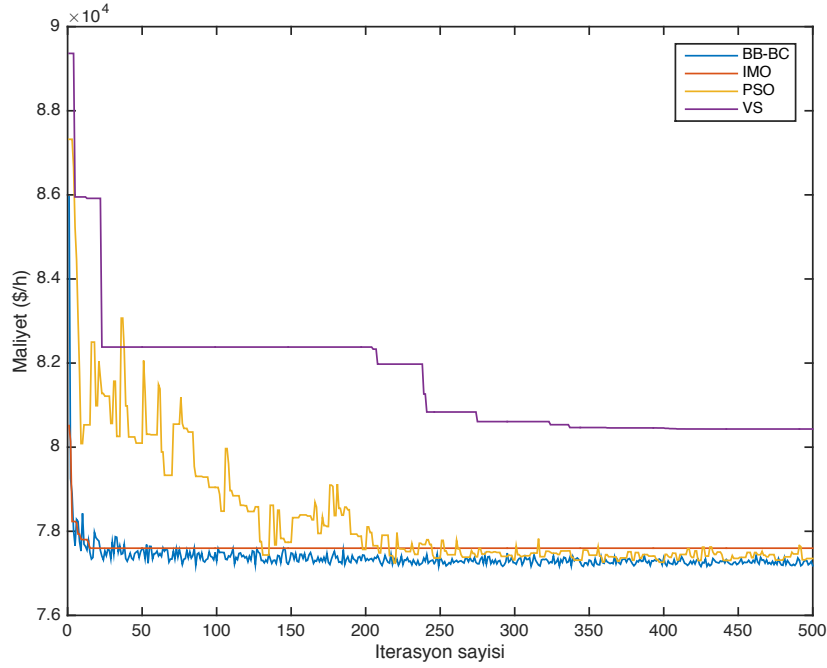
Şekil 3.8: Toplam maliyet değerleri (4'üncü zaman aralığı için).



Şekil 3.9: Toplam maliyet değerleri (3'üncü zaman aralığı için).



Şekil 3.10: Toplam maliyet değerleri (2'inci zaman aralığı için).



**Şekil 3.11:** Toplam maliyet değerleri (1'inci zaman aralığı için).

Şekiller ve sonuç değerleri incelendiğinde, BB-BC ve PSO en iyi sonuçları verirken İHO orta seviyede sonuçlar vermiştir. VS algoritması ise maliyet hususunda diğerlerine oranla daha kötü sonuçlar vermiştir. BB-BC algoritması yine başlarda kütle merkezinin değişiminden dolayı büyük atlamalar yapmıştır.

Tüm zaman aralıkları için maliyet değerleri ve toplam maliyet değerleri Tablo 3.10'da görülmektedir.

**Tablo 3.10:** 4 algoritma için toplam maliyet değerleri.

<b>Maliyet Değerleri (\$/h)</b>							
<b>Zaman aralıkları</b>							
<b>Algo.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Toplam</b>
<b>PSO</b>	77352.5	81311.1	111350.9	119093.0	133079.1	88352.0	610538.7
<b>BB-BC</b>	77181.6	81432.7	110920.2	118924.5	136636.5	88353.5	613449.1
<b>İHO</b>	77597.8	81879.6	111251.2	119208.6	133196.8	91596.5	614730.5
<b>VS</b>	80431.7	85233.2	117276.8	125756.7	136935.7	91938.8	637572.9

Algoritmaların ortalama çalışma süreleri Tablo 3.11'de verilmiştir. BB-BC algoritması diğerlerine göre çok daha kısa sürede sonuca ulaşmıştır. VS ve PSO algoritmalarının çalışma süreleri birbirine yakındır. İHO'nun çalışma zamanı, algoritmanın karmaşıklığı nedeni ile diğerlerine göre daha uzundur. Tablo 3.12'de

ise bu dört algoritma kullanılarak elde edilen minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri verilmektedir.

**Tablo 3.11:** 4 algoritma için ortalama çalışma süreleri.

<b>Ortalama çalışma süreleri (sn.)</b>						
<b>Algo.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>BB-BC</b>	181.118	175.679	183.660	180.178	181.637	182.804
<b>VS</b>	261.725	261.216	236.607	245.712	267.069	256.675
<b>PSO</b>	286.795	267.717	283.695	273.774	238.752	282.934
<b>İHO</b>	303.384	367.683	331.716	326.362	328.296	330.909

**Tablo 3.12:** 6 farklı zaman aralığı için elde edilen minimum, ortalama ve maksimum maliyet değerleri.

<b>Maliyet Değerleri (\$/h)</b>								
<b>Zaman aralıkları</b>								
<b>Algo.</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Toplam</b>
<b>PSO</b>	<b>Min.</b>	77353	81311	111351	119093	133079	88352	610539
	<b>Ort.</b>	78050	81930	111650	119970	133510	88510	613620
	<b>Maks.</b>	78740	82550	119950	120850	133940	88680	624710
<b>BB-BC</b>	<b>Min.</b>	77182	81433	110920	118925	136637	88354	613449
	<b>Ort.</b>	78850	83293	112900	121070	146380	91700	634193
	<b>Maks.</b>	81280	87210	114390	124270	158520	96790	662460
<b>İHO</b>	<b>Min.</b>	77598	81880	111251	119209	133197	91597	614731
	<b>Ort.</b>	81110	83980	115360	123910	147350	95120	646830
	<b>Maks.</b>	84210	88710	121250	134230	185710	99970	714080
<b>VS</b>	<b>Min.</b>	80432	85233	117277	125757	136936	91939	637573
	<b>Ort.</b>	80452	85301	117843	125923	139492	92123	641134
	<b>Maks.</b>	80483	85382	118394	126093	142052	92312	644716

### 3.6 Sonuç

Tezin bu kısmında, dört algoritma (BB-BC, İHO, PSO ve VS) bir rüzgar termal enerji sisteminin enerji üretim maliyetini en aza indirmek için kullanılmıştır. Termal generatörlerin maliyeti; üretim maliyeti, valf nokta etkisi maliyeti ve gaz salınım ceza maliyeti olmak üzere üç grupta incelenmiştir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin maliyeti ise, direk maliyet ve ceza maliyetleri başlıkları altında incelenmiştir. Rüzgar hızı rastgele özelliklere sahip olduğundan, Weibull dağılım fonksiyonu rüzgar hızı modelini belirlemek ve oluşturmak için kullanılmıştır. Rüzgar hızı sadece kısa vadede doğru tahmin edilebilir olduğu için altı zaman aralığı kullanılmıştır. Bu sebeple SED yerine çoklu zaman aralıkları



için kullanılan DED problemi oluşturulmuştur. Rüzgar hızı belirledikten sonra, DED problemi dört farklı algoritma kullanılarak çözülmüştür. Algoritmalar maliyet değerleri ve çalışma zamanı değerleri açısından karşılaştırılmıştır. BB-BC ve PSO algoritmaları VS ve İHO algoritmalarından daha iyi performans seğilemişlerdir. VS algoritması en kötü sonuçlar veren algoritma olmuştur. Gelecek çalışmalar adına, büyük ölçekli rüzgar tribunleri içeren hibrit güç sistemlerinde DED problemini irdelemek ve çözmek için, kısa çalışma zamanı açısından BB-BC ve minimum maliyet değerine ulaşma açısından PSO algoritmaları kullanılabilir.

## 4. BİR BÖLGE İÇİN WEIBULL FONKSİYONU PARAMETLERİNİ BELİRLEME METOTLARI

Tezin bu kısmında, eşitlik (3.1)'de bahsedilen ve literatürde rüzgar hızı değişimlerini modellemek için yaygın olarak kullanılan Weibull fonksiyonu parametrelerinin, 6 farklı metodla belirlenmesi amaçlanmıştır. Literatürde Weibull fonksiyonu parametrelerini belirlemek için tanımlanan; Grafik Metodu, Moment Metodu, L-Moment Metodu, En Yüksek Olabilirlik Metodu, Basitleştirilmiş En Yüksek Olabilirlik Metodu kullanılarak Balıkesir-Balya İstasyonu'ndan alınan rüzgar hızı değerleri yardımıyla en iyi metodun belirlenmesine çalışılmıştır.

Rüzgar santrallerinin, rüzgar potansiyeli yüksek bölgelere kurulabilmesi için kapsamlı rüzgar ölçümlerinin yapılması ve rüzgar hızı değişiminin yüksek doğrulukla modellenmesi gerekmektedir. Rüzgar santrallerinin kuruluşu sonrasında, bir sonraki günün her saati için şebekeye ne kadar aktif güç aktaracağı sorusunun cevaplanabilmesi için de, bilinen rüzgar verilerinden yola çıkarak rüzgar hızı tahminlerinin yapılması, şebekenin güvenilir olarak işletilebilmesi için zorunludur [14].

Rüzgar hızının istatistiksel analizi için çeşitli dağılım yöntemleri kullanılmaktadır. Bir çalışmada [32] sadece Weibull Dağılımı dikkate alınarak analiz yapılırken, diğer bir çalışmada [33] Rayleigh Dağılımını, bir kısmında ise [34]–[38] Weibull Dağılımı ve Rayleigh Dağılımlarını karşılaştırmalı olarak incelenmekte, bir çalışmada [13] Burr, Genelleştirilmiş Gama ve Weibull Dağılımlarını karşılaştırmakta, diğer bir çalışmada [39] ise Log-normal ve Gamma Dağılımları karşılaştırılmaktadır.

Türkiye'de, bir bölgeye rüzgar santralının kurulmasının uygunluğunun analiz edilmesi amacıyla en az 1 yıl süreyle rüzgar verilerinin ölçülmesi zorunluluğu vardır [40]. Yatırımcı firmaların yaptığı bu ölçümler, ihale safhasında Elektrik İşleri Etüt İdaresi'ne iletilmektedir. Bu veriler yardımıyla belirlenen bölgedeki güç yoğunluğu hesaplanmakta ve ihale sürecinde değerlendirmeye esas alınmaktadır. Hesaplanan bu veriler, Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilen

veriler ve diğer analizler dikkate alınarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Türkiye için bölgesel ve noktasal koordinatlarda yaklaşık olarak rüzgar hızı Weibull Dağılım parametrelerini isteyenlere temin etmektedir [41]. Danimarka merkezli bir firma, WAsP isimli yazılımıyla dünya çapında rüzgar türbinlerinin yer seçiminin belirlenebilmesi için bir yazılım paketi sunmaktadır [42]. Bu ve benzeri yazılımlar (Wind Pro, RetScreen), rüzgar verisi, bölge pürüzlülük bilgileri, yakın çevre engel bilgileri ve bölgenin topoğrafyasını dikkate alarak yaklaşımlar sunmasına rağmen, yerinde yapılacak rüzgar ölçümleri ve bu verilere dayalı olarak yüksek doğruluklu rüzgar dağılım modellemeleri, sonraki gün ve saatler için şebekeye aktarılacak aktif gücün belirlenebilmesi açısından çok önemlidir.

Bu bölümde, Meteoroloji Müdürlüğü'ne ait Balıkesir Balya istasyonundan alınan, 02.02.2015 ile 31.08.2015 dönemine ait saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılarak, 2 parametrelili Weibull Dağılım fonksiyonu oluşturulmuştur. Weibull dağılım fonksiyonuna ait parametrelerin bulunabilmesi için literatürde mevcut 6 farklı yöntem kullanılarak, gerçek verileri en iyi tanımlayan yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Her ne kadar Weibull fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesi için 3 farklı yöntemi karşılaştıran bir çalışma [12] ve 6 farklı yöntemi karşılaştıran başka bir çalışma [43] mevcut olsa da, ilk çalışmaya göre daha fazla yöntemin ele alınması, ikinci çalışmaya göre ise amprik metod olarak verilen basit yöntem yerine, az sayıda veri için iyi bir yöntem olduğu belirtilen [12] L-Moment metodunun kullanılması, ayrıca farklı bir coğrafi bölge için karşılaştırmaların yapılması, bu çalışmanın farklılıklarını ortaya koymaktadır.

#### 4.1 Metodlar

İki parametrelili Weibull dağılımı, rüzgar hızının frekans dağılımını ve rüzgar enerjisinin potansiyelini hesaplarken literatürde sürekli tavsiye edilen ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Eşitlik (4.1)'de Weibull dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmektedir [15].

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (4.1)$$

Yukardaki ifadede,  $k$  birimsiz şekil verme parametresini, rüzgar hızı ile aynı birimde olan  $c$  ölçeklendirme parametresini ve  $v$  ise rüzgar hızını göstermektedir.

Ayrıca Weibull dağılımından elde edilen kümülatif dağılım fonksiyonu eşitlik (4.2)'de verilmektedir.

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.2)$$

Rüzgar hızı değişimin Weibull dağılımına uygunluğu dikkate alındığında, ölçülen hız verileri dikkate alınarak fonksiyonun oluşturulması için  $k$  ve  $c$  parametrelerinin hesaplanması gerekecektir. Bu çalışmada,  $k$  ve  $c$  parametrelerinin bulunması için Enerji Eğilim Faktörü Metodu, Grafik Metodu, Moment Metodu, L-Moment Metodu, En Yüksek Olabilirlik Metodu ve Basitleştirilmiş En Yüksek Olabilirlik Metodu olmak üzere 6 farklı metod kullanılmış, bulunan parametrelerin oluşturduğu fonksiyonun, ölçülen verilerle karşılaştırması yapılarak en iyi metodun belirlenmesine çalışılmıştır.

#### 4.1.1 Enerji Eğilim Faktörü Metodu (EEM)

Yeni sayılabilecek olan bu metotta, enerji eğilim faktörü ( $E_{PF}$ ) Weibull dağılımı parametrelerini bulmak için kullanılmıştır [44]. Weibull dağılımına göre güç yoğunluğu ifadesi eşitlik (4.3)'de verilmektedir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (4.3)$$

Bu ifadede  $\rho$  bölgedeki hava yoğunluğunu,  $P_w$  ise güç yoğunluğunu göstermektedir. Eşitlik (4.4)'den yararlanarak  $c$  parametresi, ortalama rüzgar hızı ( $\bar{V}$ ) ve eşitlik (4.5)'de verilen gama fonksiyonu ifadesi kullanılarak bulunabilir.

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (4.4)$$

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (4.5)$$

eşitlik (4.3) ve eşitlik (4.4)'den yararlanarak, enerji eğilim faktörünü ( $E_{PF}$ ) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$E_{PF} = \frac{\bar{V}^3}{(\bar{V})^3} = \frac{\Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)^3} \quad (4.6)$$

Bulunan  $E_{PF}$  değerleri dünya çapında 1.4 ile 4.4 arasında değişir [44].  $E_{PF}$  değeri bulunduktan sonra  $k$  parametresi ise eşitlik (4.7) ile bulunur.

$$k = 1 + \frac{3.69}{E_{PF}^2} \quad (4.7)$$

#### 4.1.2 Grafik Metodu (GM)

Grafik metodunda, Weibull dağılımında elde edilen ve eşitlik (4.2)'de verilen kümülatif dağılım fonksiyonu ifadesinde, eşitliğin ikinci tarafında  $e$  içeren ifadeden kurtulmak için, eşitliğin iki kez doğal logaritması alınır [45]. İşlem sonucu eşitlik (4.8)'de verilmektedir.

$$\ln[-\ln[1 - F(v)]] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (4.8)$$

Yukardaki ifade  $y = ax + b$  formunda bir doğru ifadesidir.  $k$  grafiğin eğimini,  $\ln(v)$  grafikteki değişkeni ve  $-k \ln(c)$  doğrudaki sabit sayı değeridir.

$$k = a, \quad b = -k \ln(c) \quad (4.9)$$

$$c = e^{-\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (4.10)$$

Bu doğrudaki  $\ln[-\ln[1 - F(v)]]$  değerini hesaplamak için önce rüzgar hızı datalarından frekans dağılımının hesaplanması daha sonra ise kümülatif frekans dağılımının hesaplanması gerekir. Bu değerler bulunduktan sonra en küçük kareler yöntemiyle parametreler hesaplanır [45].

#### 4.1.3 Moment Metodu (MM)

Moment metodu, ölçülen verilerden elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri ile Weibull fonksiyonu  $k$  ve  $c$  parametreleri arasında eşitlik (4.12) ve (4.13)'te tanımlanan ifadelerin çözülmesiyle parametrelerin bulunması esasına dayanır. Eşitlik (4.13)'te verilen  $k$  parametresinin bulunabilmesi için sayısal çözümleme yöntemlerinden birinin kullanılması gerekmektedir [43].

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (4.11)$$

Yukarıdaki eşitlikde,  $v_i$   $i$ 'nci rüzgar hızı verisini;  $n$  veri sayısını ifade etmektedir.

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (4.12)$$

$$\sigma = c \left( \Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{k} + 1\right) \right)^{0.5} \quad (4.13)$$

$\sigma$ , eşitlik (4.14)'de ifadesi verildiği gibi hesaplanan, ölçülen rüzgar hızlarının standart sapma değeridir.

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{0.5} \quad (4.14)$$

#### 4.1.4 L-Moment Metodu (L\_MM)

L-Moment metodu sıralı istatistiksel verilere bağlı lineer kombinasyonları kullanır. Diğer metodlardan farkı rüzgar hızı verileri işlenmeden önce küçükten büyüğe sıralanmasıdır [46].

$$CV_{L_{MM}} = \left[ \frac{\left(\frac{2}{n}\right) \left[ \sum_{i=1}^n \left(\frac{i-1}{n-1}\right) x_i \right] n}{\left(\frac{1}{n}\right) \left[ \sum_{i=1}^n x_i \right]} - 1 \right] \quad (4.15)$$

Yukarda verilen eşitlikte,  $CV_{L_{MM}}$  değişim sabiti;  $x$  sıralanmış rüzgar hızı değerleridir.

$$\left(2^{\frac{-1}{k}}\right) = 1 - CV_{L_{MM}} \quad (4.16)$$

Eşitlik (4.16)'dan yararlanarak  $k$  değeri, eşitlik (4.17)'den yararlanarak ise  $c$  değeri bulunur.

$$c = \left[ \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \left[ \sum_{i=1}^n x_i \right]}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \right] \quad (4.17)$$

#### 4.1.5 En Yüksek Olabilirlik Metodu (EYOM)

En yüksek olabilirlik metodunda, istatistiksel tahmin teorisi baz alınmıştır. Eşitlik (4.18)'de verilen  $k$  değerinin bulunabilmesi için Newton-Rapson vb. iteratif birtakım yöntemler kullanılmalıdır [47].

$$\left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} - k = 0 \quad (4.18)$$

$k$  değeri bulunduktan sonra  $c$  değeri eşitlik (4.19)'dan yararlanılarak hesaplanır.

$$c = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.19)$$

#### 4.1.6 Basitleştirilmiş En Yüksek Olabilirlik Metodu (BEYOM)

Bu metot en yüksek olabilirlik metodundaki  $k$  değerini iteratif yollara başvurmadan bulabilmemize olanak sağlamaktadır [48]. Eşitlik (4.20)'de verilen ifade ile  $k$  değeri eşitlik (4.18)'e göre daha kolay bir hesaplamayla çözülebilir.

$$k = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \left[ \frac{n(n-1)}{n(\sum_{i=1}^n \ln^2(v_i)) - (\sum_{i=1}^n \ln(v_i))^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.20)$$

$c$  değeri ise eşitlik (4.19)'dan bulunur.

## 4.2 Hata Analizi Test Yöntemleri

Weibull fonksiyonu parametrelerinin bulunması için kullanılan 6 farklı metodun sonuçlarının doğruluğunun analiz edilmesi için 3 farklı uyum testi kullanılmıştır. Bunlardan ilki eşitlik (4.21)'de ifadesi verilen  $R^2$  testidir ve bu değer bire yakın olması hata değerinin düşüklüğünün göstergesidir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.21)$$

Burada,  $n$  frekans dağılımı yöntemi ile ilk baştaki rüzgar hızı verilerimiz arasından seçilen veri sayısını;  $y_i$  i'inci verinin frekans değeri;  $x_i$  Weibull dağılımından elde edilen i'inci frekans değeri;  $\bar{y}$  ise  $y_i$  değerlerinin ortalama değerini ifade eder [44].

Diğer metod, hatanın karesel ortalamasının bulunması esasına dayanan ve eşitlik (4.22)'de ifadesi verilen RMSE testidir. Bu değer sıfıra yakın olması, hatanın daha küçük olmasını ifade eder.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

Eşitlik (4.24)'de ifadesi verilen güç yoğunluğu hata testi, eşitlik (4.3)'te verilen Weibull dağılımı güç yoğunluğu  $P_w$  değeri ile eşitlik (4.23)'ten elde edilen zaman serileri güç yoğunluğu değerleri arasındaki bağıl değişimin hesaplanması ile bulunur [44]. Bu değer in sıfıra yakın olması hatanın daha az olduğunu göstergesidir.

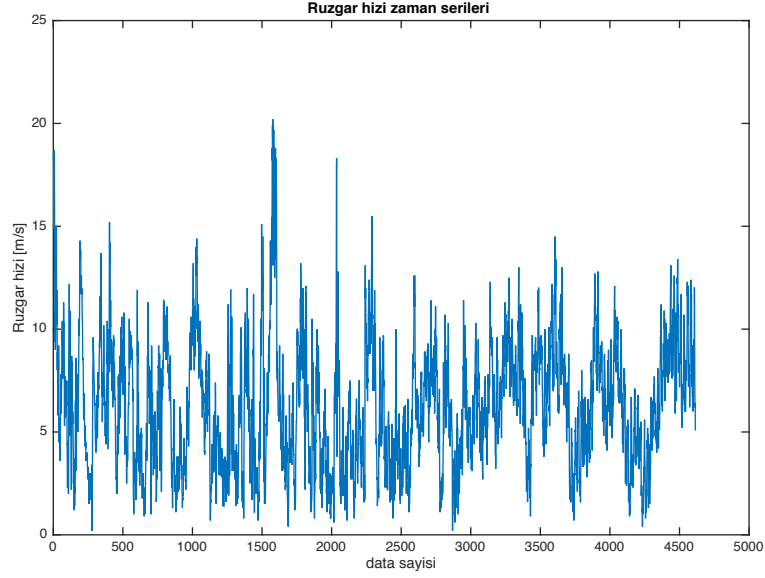
$$Pd_{ts} = \frac{1}{2} \rho \overline{V^3} \quad (4.23)$$

$$Error(\%) = \left| \frac{P_w - Pd_{ts}}{Pd_{ts}} \right| \quad (4.24)$$

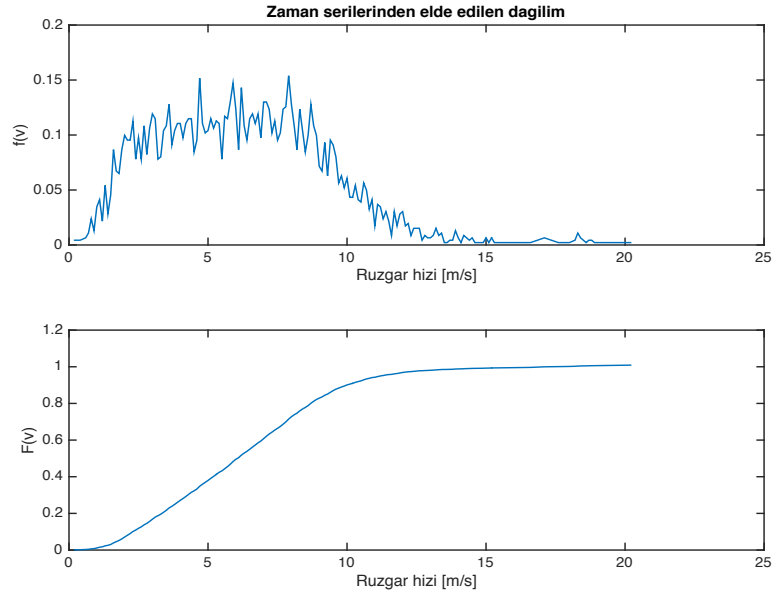
### 4.3 Balya Bölgesi İçin Rüzgar Hızının Matematiksel Olarak Modellenmesi

Bu bölümde, Meteoroloji Müdürlüğü'ne ait Balıkesir Balya bölgesinde, 631 metre rakım, 39°73' enlem ve 27°62' boylamdaki istasyondan, 02.02.2015 ile 31.08.2015 döneminde 10 metre yükseklikte alınan saatlik ortalama rüzgar hızları kullanılmıştır. Bu veriler yardımıyla, rüzgar hızının değişimini karakterize eden Weibull fonksiyonu parametreleri 6 farklı metod kullanılarak elde edilmiştir. Bu dönemde ölçülen 7 aylık saatlik ortalama rüzgar hızlarının değişimi Şekil 4.1'de, bu değişimin zaman serileri dağılımı ve bu dağılımın kümülatif değişimi Şekil 4.2'de görülmektedir. Verilerin incelenmesi sonucu, bazı ölçüm değerlerinin Meteoroloji Müdürlüğü sistemine aktarılamadığı anlaşılmaktadır. Toplamda 5064 adet verinin sisteme aktarılması beklenirken, bazı saatlerde veri transferinin gerçekleşmemesi yüzünden toplam 4614 adet veri üzerinden analiz yapılmıştır.





**Şekil 4.1:** Balya'da 7 aylık dönemde örneklenen rüzgar hızları değişimi (Saatlik ortalama rüzgar hızları).



**Şekil 4.2:** Balya'da 7 aylık dönemde örneklenen rüzgar hızları değişimi (Zaman serileri dağılımı ve kümülatif değişimi).

Balya İstasyonundan alınan ortalama rüzgar hızı verileri kullanılarak, Weibull parametrelerinin bulunması için tanımlanan 6 farklı yöntem yardımıyla  $k$  ve  $c$  parametreleri elde edilmiştir. Bulunan parametrelerle oluşturulan Weibull fonksiyonu değerleri ile ölçülen değerlerin zaman serileri değerleri hata analiz yöntemleri kullanılarak doğrulukları açısından karşılaştırılmıştır. Bu parametreler

için Weibull fonksiyonu güç yoğunluğu ( $P_w$ ) bulunarak, zaman serisi güç yoğunluğu ( $P_{ts}$ ) ile aralarındaki bağıl hata sonuçları elde edilmiştir. Analizler sonucu elde edilen değerler Tablo 4.1’de verilmektedir.

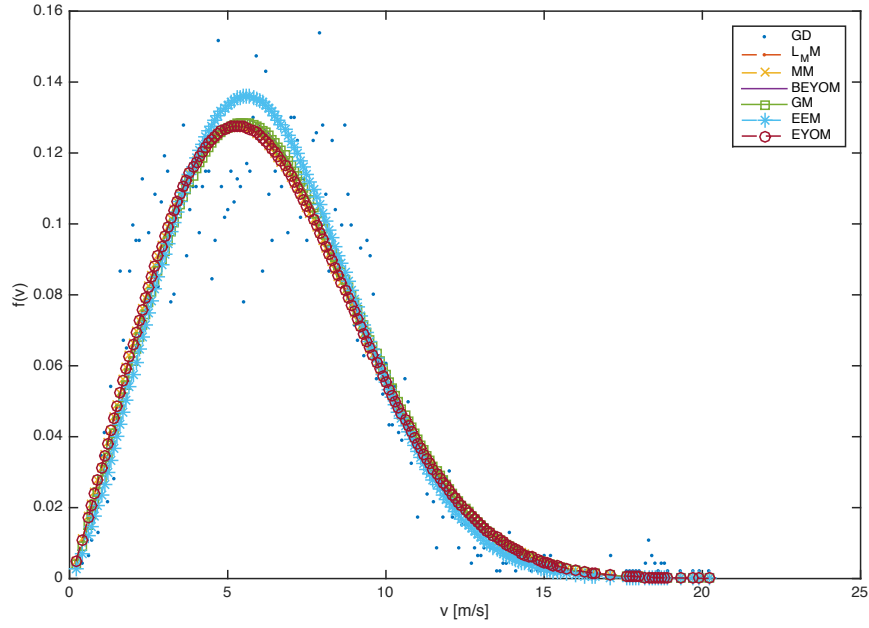
**Tablo 4.1:** 6 farklı yöntemle elde edilen parametre değerleri ve hata uygunluk testi sonuçları.

Metotlar	k	c	R <sup>2</sup>	RMSE	P <sub>w</sub>	P <sub>ts</sub>	v <sub>m</sub>	Güç Yoğ.
EYOM	2.1558	7.080	0.8975	0.01535	268.224	269.7662	6.2702	0.57
MM	2.1539	7.075	0.8974	0.01532	268.268	269.7762	6.2663	0.56
L_MM	2.1684	7.075	0.8971	0.01537	266.663	269.7600	6.2670	1.15
GM	2.2199	7.172	0.8965	0.01535	272.097	269.7700	6.3521	0.86
BEYOM	2.2231	7.121	0.8956	0.01540	266.097	269.7662	6.3076	1.36
EEM	2.3483	7.202	0.8839	0.01627	263.462	269.7662	6.3826	2.34

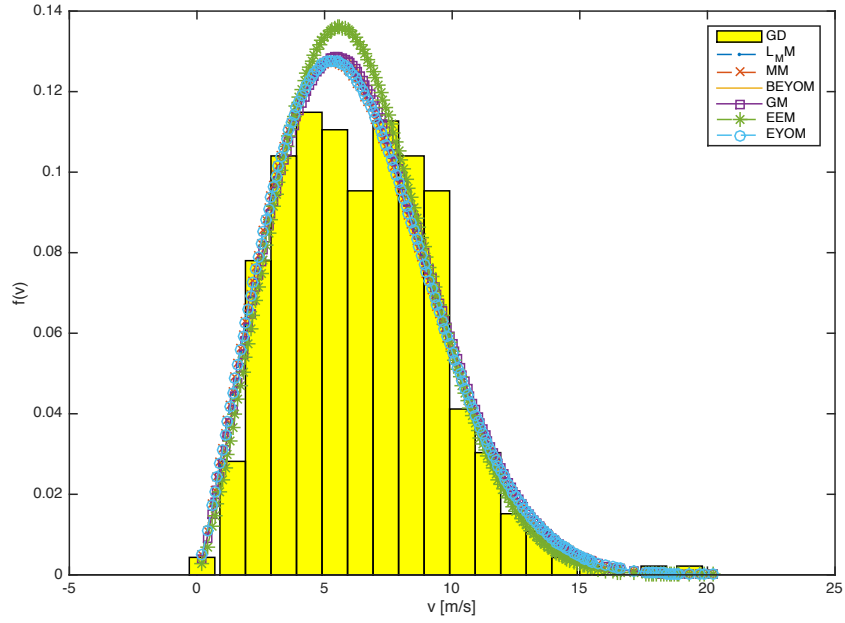
Tablo 4.1’den görüleceği gibi, R<sup>2</sup> uyumluluk testi dikkate alındığında EYOM en iyi sonucu verirken, MM ikinci en iyi sonucu, EEM ise en kötü sonucu üretmektedir. RMSE uyumluluk testi dikkate alındığında, MM’nun en iyi sonucu ürettiği ortaya çıkarken, EYOM ve L\_MM ikinci en iyi sonucu üretmektedir. Bu test açısından da en kötü sonuçlar EEM ile elde edilmektedir. Güç yoğunluğu hatası testi dikkate alındığında ise, en iyi metodlar sırasıyla MM ve EYOM’dur. EEM, bu test için de en kötü sonuçları üretmektedir.

Bu sonuçlar dikkate alındığında, EYOM ve MM birbirlerine yakın olarak hatanın en az değerde olduğu dağılım için Weibull fonksiyonu  $k$  ve  $c$  parametrelerini üretmektedir. EEM ise bu veriler için en çok hatalı sonuçları veren parametreleri üretmektedir. Hesaplamalar sonucu, EEM için gerekli enerji eğilim faktörü  $E_{pf}$ , 3.6675 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.3’de gerçek değerlerin (GD) zaman serileri ve 6 farklı yöntemle elde edilen parametreler kullanılarak elde edilen Weibull fonksiyonu dağılımları noktasal ve bar grafik halinde değişimi görülmektedir.

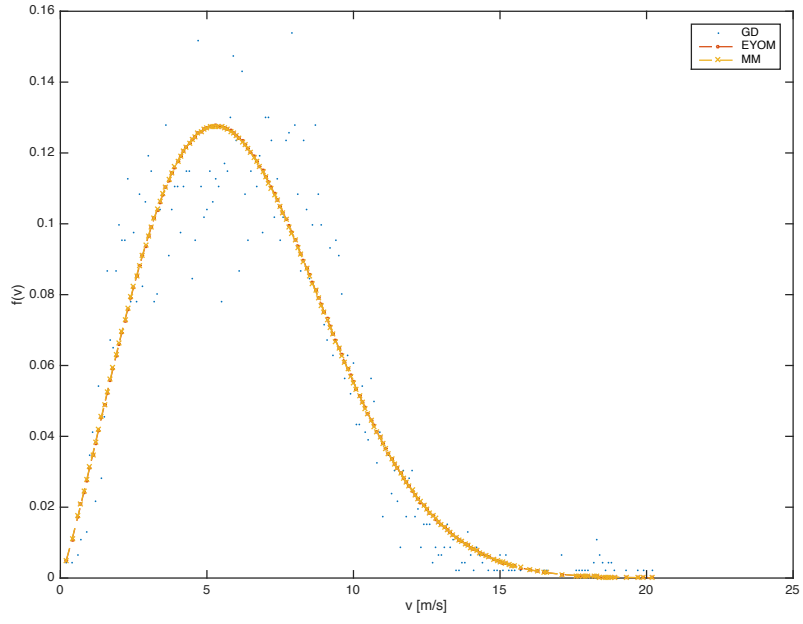


**Şekil 4.3:** 6 farklı yöntem kullanılarak bulunan parametrelerle elde edilen Weibull dağılımı değişimlerinin GD ile karşılaştırılması (Noktasal veriler ile karşılaştırma).

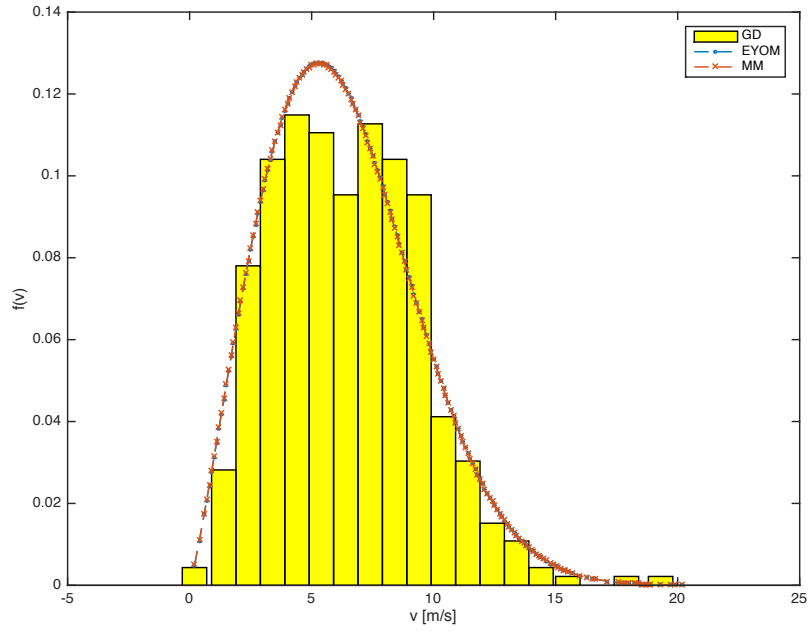


**Şekil 4.4:** 6 farklı yöntem kullanılarak bulunan parametrelerle elde edilen Weibull dağılımı değişimlerinin GD ile karşılaştırılması (Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).

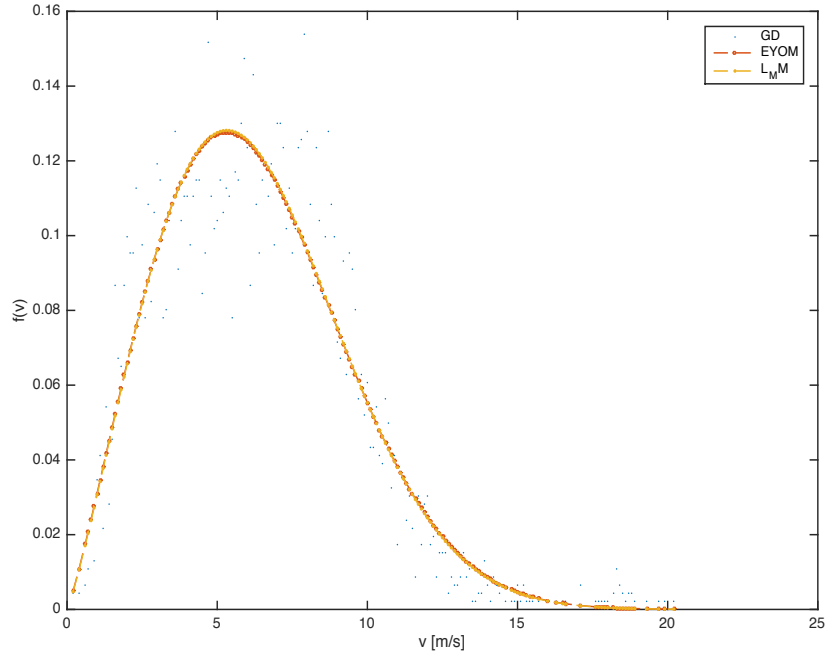
Yöntemler sonucu bulunan parametreler dikkate alınarak oluşturulan Weibull dağılımlarının birbiri ile kıyaslanmasını sağlamak için Şekil 4.4 – Şekil 4.14’de, en iyi sonucu veren EYOM ile diğer metodların karşılaştırılmalı grafikleri görülmektedir.



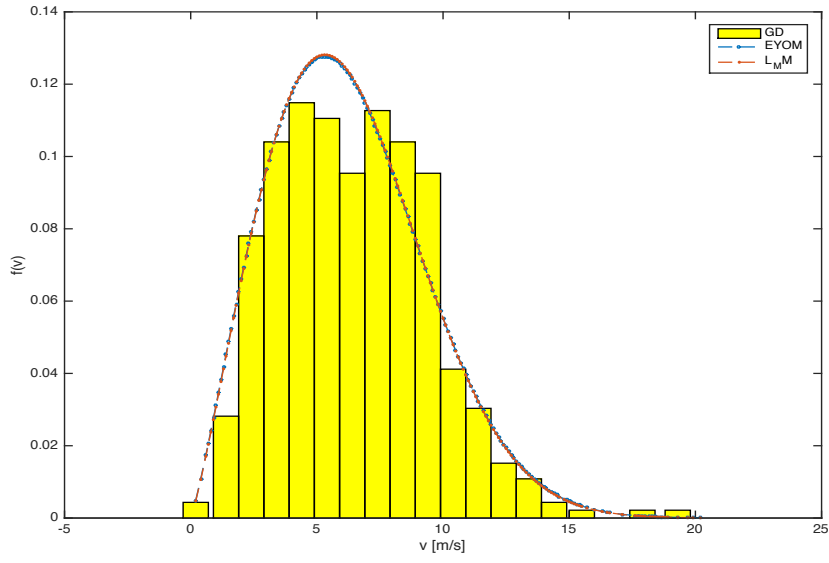
**Şekil 4.5:** EYOM ve MM karşılaştırması  
(Noktasal veriler ile karşılaştırma).



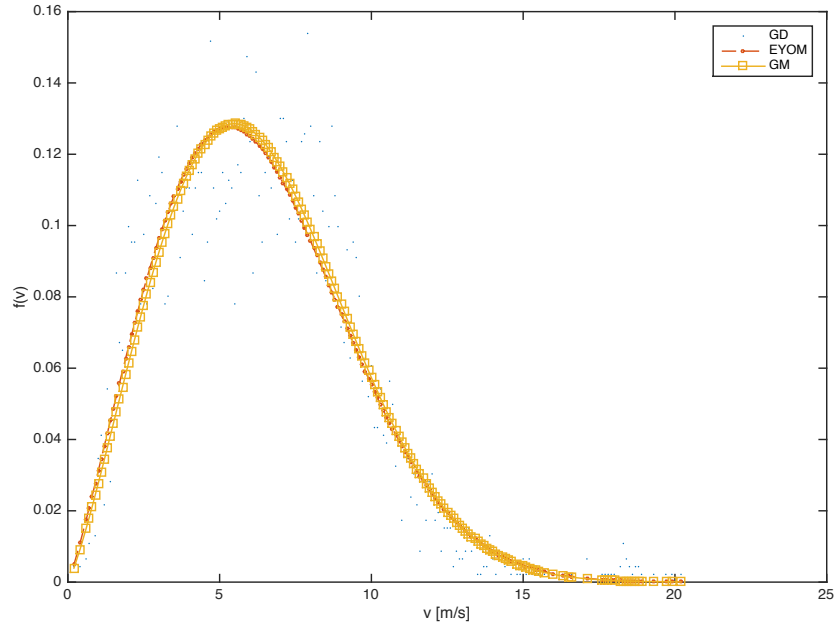
**Şekil 4.6:** EYOM ve MM karşılaştırması  
(Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).



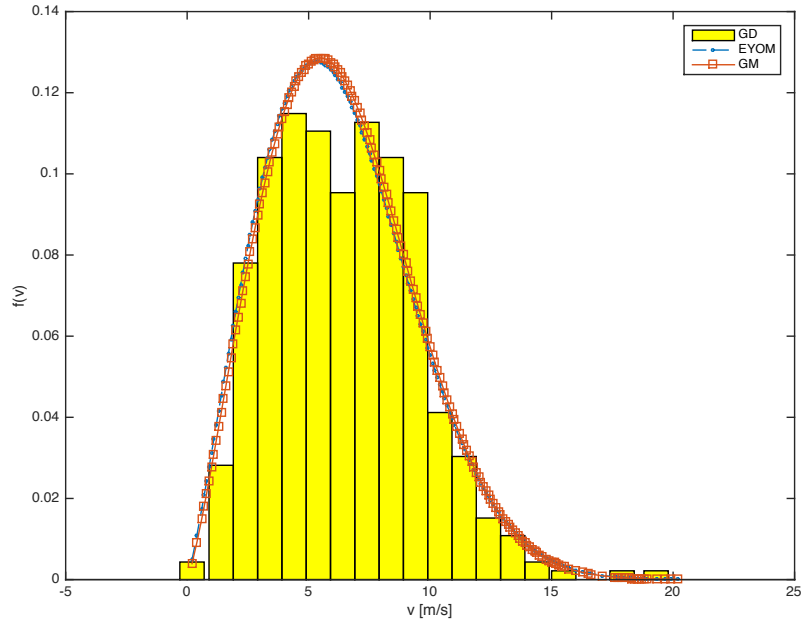
**Şekil 4.7:** EYOM ve L\_MM karşılaştırması  
(Noktasal veriler ile karşılaştırma).



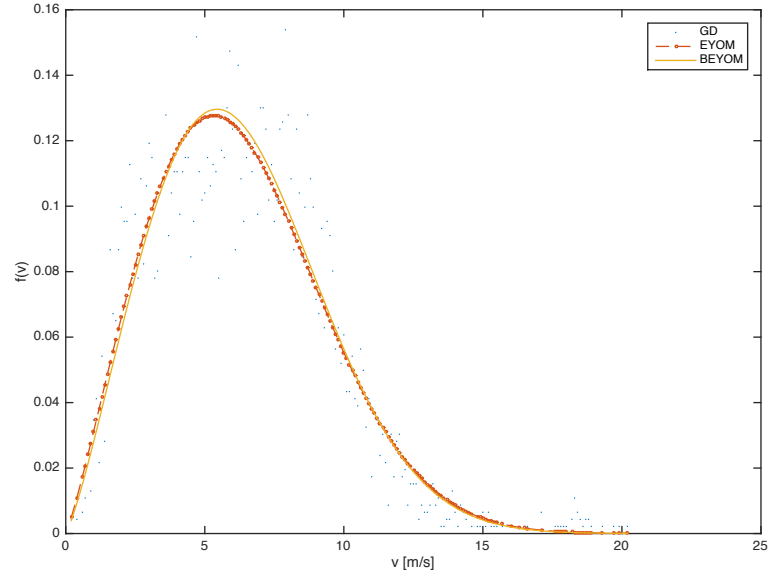
**Şekil 4.8:** EYOM ve L\_MM karşılaştırması  
(Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).



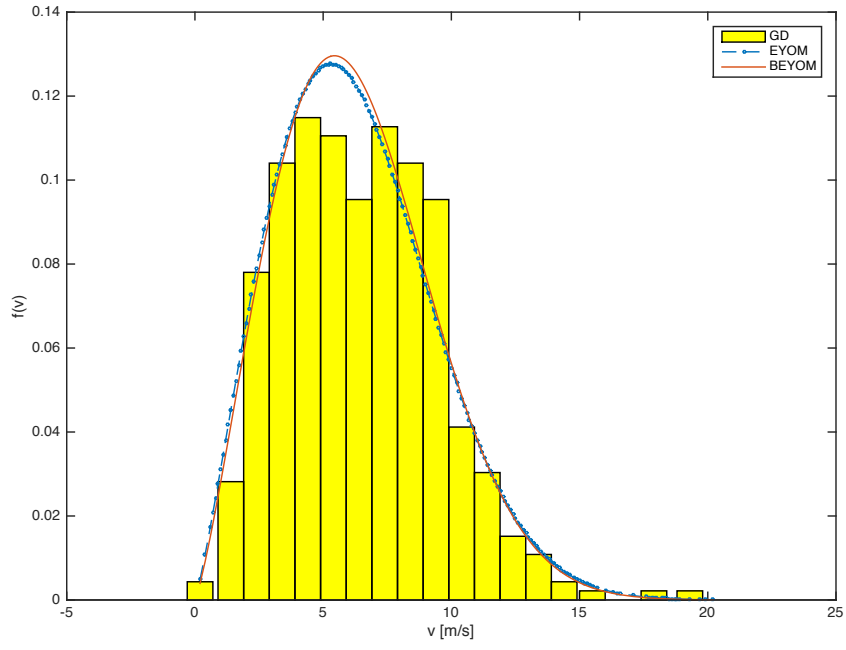
**Şekil 4.9:** EYOM ve GM karşılaştırması  
(Noktasal veriler ile karşılaştırma).



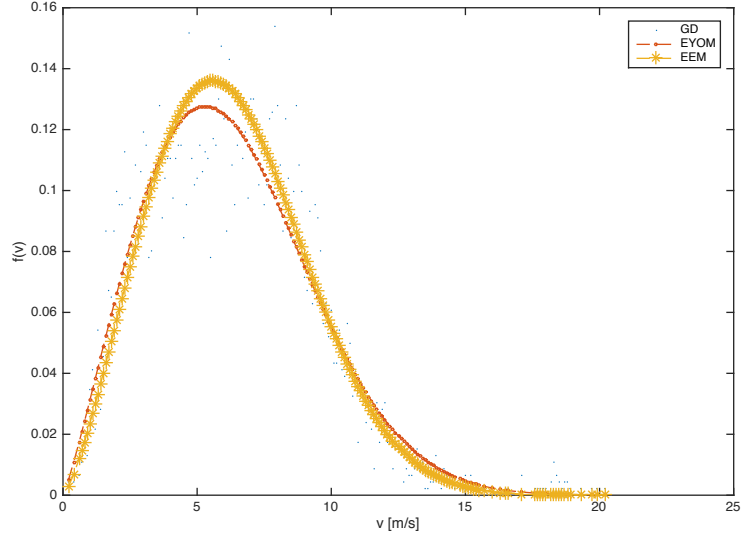
**Şekil 4.10:** EYOM ve GM karşılaştırması  
(Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).



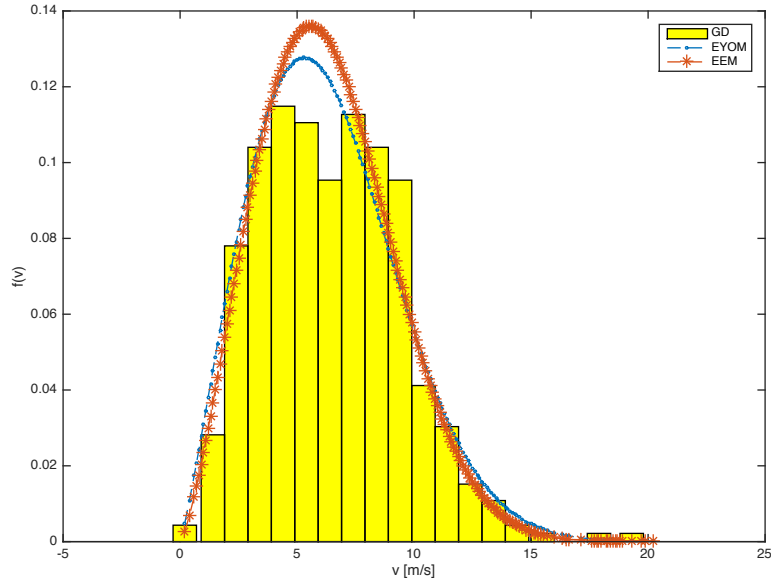
**Şekil 4.11:** EYOM ve BEYOM karşılaştırması  
(Noktasal veriler ile karşılaştırma).



**Şekil 4.12:** EYOM ve BEYOM karşılaştırması  
(Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma)



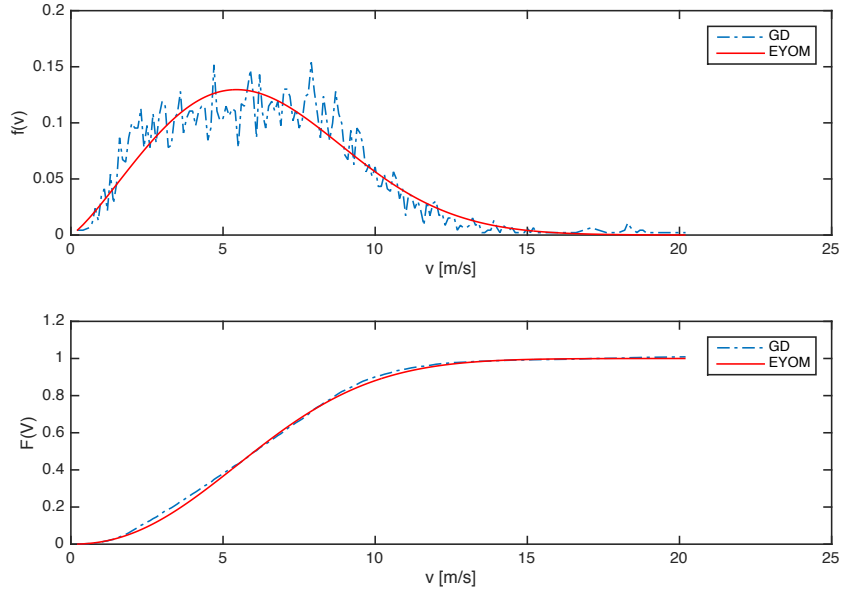
**Şekil 4.13:** EYOM ve EEM karşılaştırması  
(Noktasal veriler ile karşılaştırma).



**Şekil 4.14:** EYOM ve EEM karşılaştırması  
(Zaman aralıkları ortalaması ile karşılaştırma).

En iyi sonucu üreten EYOM yönteminin GD zaman serisi dağılımı ve kümülatif değişim karşılaştırması ise Şekil 4.15’de görülmektedir.





**Şekil 4.15:** EYOM ile gerçek değerlerin karşılaştırılması.

#### 4.4 Sonuç

Tezin bu bölümünde, rüzgar hızı modeli oluşturma ve rüzgar hızı tamini için, yaygın olarak kullanılan Weibull dağılımının parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Balıkesir-Balya Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan 02.02.2015 ile 31.08.2015 dönemine ait saatlik ortalama rüzgar hızlarının, iki parametrelili Weibull fonksiyonu modelini oluşturmak için kullanılan 6 farklı parametre bulma yönteminden, En Yüksek Olabilirlik Metodu ve Moment Metodunun yapılan çalışma sonucu en iyi yaklaşımı verdiği görülmüştür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezin ilk bölümünde, rüzgar ve termik santralden oluşan hibrit bir sistem üzerinde, enerji üretim maliyetine minimize etmeye amaçlayan statik ekonomik güç dağılım problemi (SED), üç sezgisel algoritmayı (BB-BC, PSO ve İHO) kullanarak incelenmiştir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin maliyeti ise, direk maliyet ve ceza maliyetleri başlıları altında incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında BB-BC ve PSO algoritmaları İHO algoritmasına göre daha başarılı bir performans sergilemiştir. Bulunan minimum maliyet değerleri açısından BB-BC ve PSO algoritmaları birbirine çok yakın değerlerde olup süre bakımından BB-BC algoritması PSO algoritmasına göre ortalama olarak 60 saniye daha az sürede algoritmayı tamamlayıp sonuca ulaşmıştır. Eğer büyük ve karmaşık bir problem üzerinde çalışılacaksa BB-BC bulunduğu optimum sonuçlar ve minimum çalışma zamanı avantajı ile PSO algoritmasının bir adım ötesine geçebilir. BB-BC algoritmasının ilk fazında yaptığı çözüm uzayı üzerindeki patlamalar nedeniyle büyük sıçramalar gözlenmiştir. Bunun nedeni ilk fazlarda sürekli değişen ağırlık merkezidir. Belli bir adım sonrasında BB-BC algoritmasının sıçramaları azalmış ve sınırlanmıştır. PSO ve İHO algoritmaları en iyi değerleri hep içerisinde tuttuğu için sıçrama yapmamış, direk olarak düşüşe geçmişlerdir.

Tezin ikinci bölümünde, rüzgar hızının modellenmesi ve iki parametrelili Weibull dağılımı üzerinde durulmuştur. Weibull dağılımını oluşturabilmek için geçmişe yönelik rüzgar hızının ortalama ve standart sapma değerlerinden yararlanılmıştır. Bu değerler ışığında Weibull dağılımının parametreleri altı zaman aralığı için belirlenmiştir. Oluşturduğumuz Weibull dağılımı ışığında rastgele anlık rüzgar hızı ve dolayısı ile rüzgar gücü değerlerine ulaşılmıştır. Termal santrallerden elde edilen güç ise, rüzgar gücünü elde ettikten sonra DED problemi sonucunda elde edilmiştir. Termal generatörlerin maliyeti, üretim maliyeti, valf nokta etkisi maliyeti ve gaz salınım ceza maliyeti olmak üzere üç grupta dikkate alınmıştır. DED problemi çözümü için kullanılan algoritmalar maliyet değerleri ve çalışma zamanı değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, BB-BC ve PSO algoritmaları VS ve İHO algoritmalarından daha iyi performans sergilemişlerdir. İHO algoritması ise VS algoritmasına göre

daha iyi sonuçlar vermiştir. Ortalama çalışma zamanı açısından BB-BC algoritması en iyi sonuç veren algoritma olmuştur.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için, problemin daha büyük boyuttaki sistemler üzerinde uygulanması ve algoritmalarda yapılacak iyileştirmeler ile, rüzgar santrallerinin yoğunlukla dahil olmaya başladığı enerji üretim pazarının, maliyet değeri açısından önemli kazanımlar elde edebileceği düşünülmektedir. Büyük ölçekli rüzgar tribünleri içeren hibrit güç sistemlerinde DED problemini irdelemek ve çözmek için, kısa çalışma zamanı açısından BB-BC ve minimum maliyet değeri açısından PSO algoritmaları kullanılabilir.

Tezin son bölümünde ise, rüzgar santrali kurulumu esnasında maliyet analizi ve ekonomik üretimin belirlenebilmesi için rüzgar hızının doğru şekilde modellenmesi ve tahmin edilmesi önemli olduğundan dolayı rüzgar hızının tahmini ve Weibull dağılımı üzerinde durulmuştur. Balıkesir-Balya Meteoroloji İstasyonu'ndan alınan 02.02.2015 ile 31.08.2015 dönemine ait saatlik ortalama rüzgar hızlarının, iki parametrelili Weibull fonksiyonu modelini oluşturmak için 6 farklı parametre bulma yönteminden yararlanılmıştır. Çalışmalar sonucunda, En Yüksek Olabilirlik Metodu ve Moment Metodunun yapılan çalışma sonucu en iyi yaklaşımı verdiği görülmüştür.

Rüzgar hızı dahil olan problemlerde, literatürde genellikle santral yatırım maliyetinin belirlenmesi için rüzgar güç yoğunluğu belirlenmesine yönelik mevsimlik ve yıllık hesaplamalar yapılsa da, gelecek gün ve saatlerde enerji sistemine aktarabileceği aktif gücün belirlenebilmesi için saatlik olarak modellemeler ve tahminler enerji sisteminin güvenilir ve kararlı çalışması için büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden, saatlik rüzgar hızı tahmininde kullanabileceğimiz Weibull dağılımının parametrelerinin belirlenmesi ve sonucunda dağılımın doğru bir şekilde elde edilebilmesi için, çalışmalarımızda en iyi sonuçları veren En Yüksek Olabilirlik Metodu ve Moment Metodu kullanılabilir ve büyük ölçekli sistemlere entegre edilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] EWEA, “<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>,” 2015.
- [2] Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin kanun, “<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/01/20110108-3.htm>,” 2015.
- [3] TUREB, “<http://www.tureb.com.tr/en/component/content/article/36-yayinlar-yeni/542-turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-temmuz-201>,” 2015.
- [4] TEİAŞ, “<http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx>,” 2015.
- [5] A. Hepbaşlı and Ö. Özgener, “A review on the development of wind energy in Turkey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 8, 257–276, 2004.
- [6] Yüksek Planlama Kurulu Elektrik Enerji Piyasası Arz Güvenliği Strateji Belgesi, “[http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FBelge%2FArz\\_Guvenligi\\_Strateji\\_Belgesi.pdf](http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FBelge%2FArz_Guvenligi_Strateji_Belgesi.pdf),” 2015.
- [7] X. Xia and M. Elaiw, “Optimal dynamic economic dispatch of generation: A review,” *Electr. Power Syst. Res.*, 80, 8, 975–986, 2010.
- [8] Z. L. Gaing, “Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 18, 3, 1187–1195, 2003.
- [9] C. D. Tran, T. T. Dao, V. S. Vo, and T. T. Nguyen, “Economic Load Dispatch with Multiple Fuel Options and Valve Point Effect Using Cuckoo Search Algorithm with Different Distributions,” *Int. J. Hybrid Inf. Technol.*, 8, 1, 305–316, 2015.
- [10] M. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. New York: CRC PRESS, 1999.
- [11] Özgönenel and D. W. P. O Thomas, “Short-term Wind Speed Estimation on Weather Data,” *Turk J Elec Eng Comp Sci*, 3, 335–346, 2012.
- [12] T. Arslan, Y. Bulut, and A. Yavuz, “Comperative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential,” *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 40, 820–825, 2014.
- [13] İ. Mert and C. Karakuş, “A Statistical Analysis of Wind Speed Data Using Burr, Generalized Gamma, and Weibull Distributions in Antakya,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 23, 1571–1586, 2015.

- [14] E. P. D. ve U. Yönetmeliği, “<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/03/20150328-7.htm>,” 2015.
- [15] J. Hetzer, D. C. Yu, and K. Bhattarai, “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 23, 2, 603–611, 2008.
- [16] X.S. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Frome, UK: Luniver press, 2010.
- [17] C. Peng, H. Sun, J. Guo, and G. Liu, “Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 42, 1, 119–126, 2012.
- [18] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: PSA Pub., 2010.
- [19] T. A. A. Victoire and a. E. Jeyakumar, “Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 20, 3, 1273–1282, 2005.
- [20] M. Abuella, *Particle Swarm for Optimal Power Flow Including Wind-Power*. Germany: LAP LAMBERT, 2012.
- [21] J. D. Weber, *Implementaiont of a Newton based Optimal Power Flow into a Power System Simulation Environment*. University Of Illinois, Electrical Engineering: Master, 1997.
- [22] O. K. Erol and I. Eksin, “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch,” *Adv. Eng. Softw.*, 37, 2, 106–111, 2006.
- [23] Z. Tabrizian, E. Afshari, G. G. Amiri, M. H. Ali Beigy, and S. M. P. Nejad, “A new damage detection method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) algorithm,” *Shock Vib.*, 20, 4, 633–648, 2013.
- [24] C. V Camp, “Design of Space Trusses Using Big Bang–Big Crunch Optimization,” *J. Sturactural Eng.*, 133, July,999–1008, 2007.
- [25] J. Kennedy and R. Eberhart, *Swarm intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.
- [26] M. S. Silberberg, *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change*. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [27] B. Javidy, A. Hatamlou, and S. Mirjalili, “Ions motion algorithm for solving optimization problems,” *Appl. Soft Comput.*, 32, 72–79, 2015.
- [28] S. Roy and S. Member, “Market Constrained Optimal Planning for Wind

- Energy Conversion Systems Over Multiple Installation Sites,” *Energy*,17, 1, 124–129, 2002.
- [29] D. C. Walters and G. B. Sheble, “Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading,” *IEEE Trans. Power Syst.*, 8, 3, 1325–1332, 1993.
- [30] D. B. Das and C. Patvardhan, “New multi-objective stochastic search technique for economic load dispatch,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, 145, 6, 747, 1998.
- [31] B. Doğan and T. Ölmez, “A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex Search algorithm,” *Inf. Sci. (Ny).*, 293, 125–145, 2015.
- [32] U. Yıldırım, Y. Gazibey, and A. Güngör, “Niğde İli Rüzgar Enerjisi Potansiyeli,” *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*,1, 37–47, 2012.
- [33] M. . Korukçu, “Türkiye’de Dört Yerleşim Yeri İçin Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, 16, 1, 117–125, 2011.
- [34] A. Uçar and F. Balo, “A Seasonal Analysis of Wind Turbine Characteristics and Wind Power Potential in Manisa,” *Int. J. Green Energy*, 466–479, 2008.
- [35] M. Bilgili and B. Şahin, “Statistical Analysis of Wind Energy Density in the Western Region of Turkey,” *Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 32, 1224–1235, 2010.
- [36] B. Dursun and B. Albozacı, “An Evaluation of Wind Energy Characteristics for Four Different Locations in Balıkesir, Energy Sources,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 33, 1086–1103, 2011.
- [37] T. Gülersoy and N. S. Çetin, “Menemen Bölgesinde Rüzgar Türbinleri için Rayleigh ve Weibull Dağılımlarının Kullanılması, Using the Weibull and Rayleigh Distributions for the Wind Turbines in Menemen , Turkey,” 1, 209–213, 2010.
- [38] M. Bilgili, B. Şahin, and E. Şimşek, “Türkiye’nin Güney, Güneybatı ve Batı Bölgelerindeki Rüzgar Enerjisi Potansiyeli,” *Isı Bilim. ve Tek. Derg.*, 30, 1–12, 2010.
- [39] İ. Mert and C. Karakuş, “Antakya Bölgesinde Rüzgâr Gücü Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Dağılımı Parametrelerinin İstatistiksel Analizi, A Statistical

- Analysis of the Wind Speed Distribution Parameters and Wind Power Density in Antakya Region,” 18, 1, 35–42, 2015.
- [40] Rüzgar Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularının Teknik Değerlendirilmesi Hakkında Yönetmelik, “<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/11/20081109-3.htm>,” 2015.
- [41] EİE, “<http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar.aspx>,” 2015. .
- [42] WASP, “<http://www.wasp.dk>,” 2015.
- [43] T. P. Chang, “Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application,” *Appl. Energy*, 88, 1, 272–282, 2011.
- [44] A. Dinler and S. A. Akdag, “A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications,” *Energy Convers. Manag.*, 50, 1761–1766, 2009.
- [45] C. G. Justus, W. R. Hargraves, and A. Yalcin, “Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators,” *J. Appl. Meteorol.*, 15, 7, 673–678, 1976.
- [46] J. R. Hosking, “L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics,” *J. R. Stat. Soc.*, 52, 105–124, 1990.
- [47] A. C. Cohen, “Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based On Complete and On Censored Samples,” *Technometrics*, 7, 4, 579–588, 1965.
- [48] R. D. Christofferson and D. A. Gillette, “A simple estimator of the shape factor of the two-parameter Weibull distribution,” *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26, 2, 323–325, 1987.