



Particle swarm optimization based ultra fast renewable energy source optimization tool design

Cemil Altın*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Yozgat Bozok University, 66200, Yozgat, Türkiye

Highlights:

- The capacity shortage reliability parameter has been used for the first time in the optimization of renewable energy systems in a swarm-based optimization algorithm with a unique dispatch strategy.
- A faster system has been developed than HOMER commercial software.
- HOMER's difficult search space creation and precision problem is eliminated.

Keywords:

- HOMER
- Particle Swarm Optimization
- optimization
- renewable energy
- hybrid system

Article Info:

Research Article
Received: 24.02.2023
Accepted: 23.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1256203

Correspondence:

Author: Cemil Altın
e-mail:
cemil.altin@yobu.edu.tr
phone: +90 539 376 3556

Graphical/Tabular Abstract

In this study Particle Swarm Optimization (PSO) based very fast renewable energy source optimization tool was designed. The designed tool was compared with the commercial software HOMER. A unique dispatch strategy has been designed for the tool and it has been ensured to work in harmony with the PSO and economic calculations algorithm.

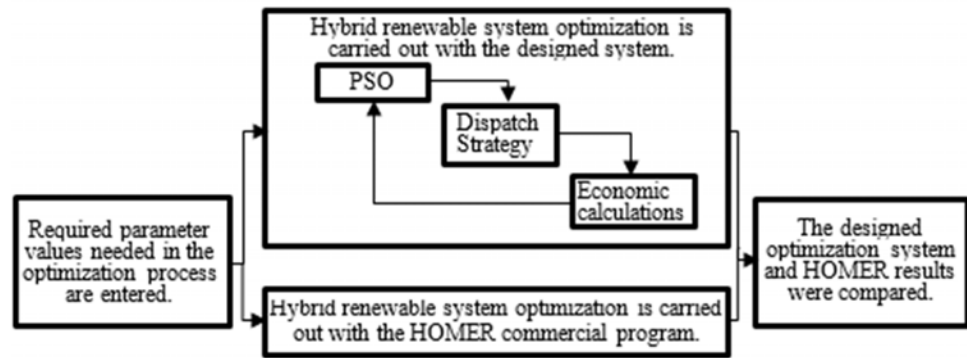


Figure A. Concept of the study

Purpose: The aim of this study is to design an alternative rapid optimization tool that eliminates the sensitivity, difficult search space and speed disadvantages of the HOMER software, which is widely used in the optimization of renewable energy resources. Thanks to this tool, it will also be easier to produce a large number of data by obtaining the necessary optimization outputs to train surrogate models, machine learning or deep learning-based systems very quickly.

Theory and Methods: PSO algorithm is preferred as an optimization algorithm because it is fast and easy. The capacity shortage parameter, which is not used much in the literature, is used as a reliability parameter. The capacity shortage parameter was used for the first time in the optimization of renewable energy sources with the swarm-based algorithm. Optimization with the capacity shortage parameter is more advantageous and provides more accurate system sizing. Because, when determining the capacity shortage, the simulation is made as if enough energy to meet the predetermined extra instant loads and even a part of the production is reserved for unpredictable loads. Cost of energy is used as the cost function. Battery charge-discharge processes are simulated realistically. Detailed information about the renewable energy source, parameters such as battery life, excess energy, unmet energy, served energy, battery autonomy are calculated for the user.

Results: The results were compared with the HOMER commercial hybrid system optimization program, and it was seen that both results were almost equivalent to each other. However, it is seen that the simulation time is much shorter than the HOMER in the proposed structure. These results show that the designed optimization system is superior to HOMER in terms of speed.

Conclusion: Comparing the tool designed with HOMER, it has proven that it can be used in optimization processes alone and is much faster than HOMER. However, if it is desired to work with the commercial software HOMER or to benefit from the plug-ins of HOMER, the search space of the HOMER program can be created with frequent values around this optimum by quickly finding the optimum values with the tool designed in this study. Thus, the solution is reached in a much shorter way.



Parçacık sürü optimizasyonu temelli ultra hızlı yenilenebilir enerji kaynağı optimizasyon aracı tasarımı

Cemil Altın*^{ID}

Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 66200, Yozgat, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Kapasite eksikliği güvenilirlik parametresi, ilk kez sürü tabanlı bir optimizasyon algoritmasında kullanılmıştır
- HOMER ticari yazılımından daha hızlı bir sistem geliştirilmiştir
- HOMER'in zorlu arama uzayı oluşturma ve hassasiyet sorunu ortadan kaldırılmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.02.2023

Kabul: 23.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1256203

Anahtar Kelimeler:

PSO,
optimizasyon,
yenilenebilir enerji,
hibrit sistem

ÖZ

Bu çalışmada, Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri optimizasyonunda kullanılmak üzere bu alanda en sık kullanılan HOMER programının olumsuz yönlerini bertaraf eden metasezgisel Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı optimizasyon aracı tasarımı yapılmıştır. İşlem hızı bakımından yapılan karşılaştırmada aynı sistemi optimize etmede, HOMER yazılımının 936 saniyede elde etmiş olduğu sonucu 17 saniyede elde ederek tasarlanan sistemin daha hızlı sonuca ulaştığı görülmüştür. Ekonomik yönden yapılan karşılaştırmada ise iki ayrı aracın yapmış olduğu optimizasyon sonucunda; Enerji maliyetinde %1,737, Toplam Net Bugün ki Maliyette %0,85 ve Başlangıç Sermayesinde ise %1,895'lik fark bulunmakta olup sonuçlar arasında önemli bir farkın bulunmadığı gözlenmiştir. Elektriksel sonuçların kıyasında ise Beslenen yüklerde %0,031, Beslenemeyen yüklerde %1,071'lik fark çıkmış olup elektriksel anlamda da sonuçların güvenilirliği ortaya konmuştur. Kapasite eksikliği parametresi ilk defa metasezgisel algoritma ile yenilenebilir enerji kaynaklarının optimizasyonunda kullanılmıştır. Maliyet fonksiyonu olarak Enerji Maliyeti kullanılmıştır. Kısacası HOMER programına alternatif çok daha hızlı sonuca ulaşabilen ve HOMER programındaki hassasiyet, hantallık ve zorlu arama uzayı oluşturma süreçlerini bertaraf eden özgün, güvenilir bir optimizasyon aracı tasarlanmıştır. Bu araç sayesinde ayrıca, vekil modelleri, makine öğrenmesi veya derin öğrenme tabanlı optimizasyon sistemlerini eğitmek için gerekli optimizasyon çıktıları çok hızlı bir şekilde elde edilerek fazla sayıda veri üretilmesi kolaylaşacaktır.

Particle Swarm Optimization Based Ultra Fast Renewable Energy Source Optimization Tool Design

H I G H L I G H T S

- The capacity shortage reliability parameter has been used for the first time in a swarm-based optimization algorithm
- A faster system has been developed than HOMER commercial software
- HOMER's difficult search space creation and precision problem is eliminated

Article Info

Research Article

Received: 24.02.2023

Accepted: 23.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1256203

Keywords:

HOMER,
PSO,
optimization,
renewable energy,
hybrid system

ABSTRACT

In this study, a metaheuristic Particle Swarm Optimization based optimization tool has been designed to be used in the optimization of Hybrid Renewable Energy Systems, which eliminates the negative aspects of the most frequently used HOMER software in this field. In the comparison made in terms of processing speed, it was seen that the designed system reached the result faster by obtaining the result in 17 seconds, which the HOMER software obtained in 936 seconds in optimizing the same system. In the economic comparison, as a result of the optimization made by two different tools; There is a difference of 1.737% in Energy cost, 0.85% in Total Net Present Cost and 1.895% in Initial Capital, and there is no significant difference between the results. In the comparison of the electrical results, there is a difference of 0.031% for the fed loads and 1.071% for the unmet loads, and the reliability of the results in electrical terms has been demonstrated. The capacity shortage parameter was used for the first time in the optimization of renewable energy sources with the metaheuristic algorithm. Energy Cost is used as the objective function. In short, a unique and reliable optimization tool has been designed as an alternative to the HOMER program that can achieve much faster results and eliminates the sensitivity, cumbersome and difficult search space generation processes in the HOMER program. This tool will also facilitate the generation of a large amount of data by obtaining the necessary optimization outputs very quickly to train surrogate models, machine learning or deep learning based optimization systems.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : cemil.altin@yobu.edu.tr / Tel: +90 539 376 3556

1. Giriş (Introduction)

Enerji insanoğlu için vazgeçilmez bir ihtiyaçtır. Günümüzde enerji ihtiyacı çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Dünyada ki fosil enerji kaynakları gün geçtikçe tükenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile kısıtlı olan fosil enerjiye ihtiyaç azaltılabilir [1]. Çünkü artan enerji tüketimi nedeniyle geleneksel enerji kaynaklarının önümüzdeki yıllarda yetersiz kalabileceği öngörülmektedir [2]. Rüzgar enerjisi ve Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. İkisi birlikte kullanılarak hibrit enerji kaynağı olarak kullanımı oldukça yaygındır. Son yıllarda hibrit yenilenebilir enerji kaynakları kurulumu önemli sayıda artmıştır ve birçok ülke bu konuda girişimcilere destekler sunmaktadır. Bu hibrit sistemlerin başında rüzgar ve güneş kaynaklı sistemler gelmektedir. Haliyle hibrit tasarımlarda optimizasyon ön plana çıkmaktadır. Optimizasyon sayesinde yüke ve bölgeye en uygun hibrit sistem tasarlanmıştır.

Hibrit Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (HYEK) optimizasyonunda en sık kullanılan yazılım HOMER yazılımıdır ve yüksek işlem yükü gibi bir dezavantaja sahiptir [3]. Hibrit yenilenebilir enerji kaynakları optimizasyonu oldukça zordur çünkü bu modeller doğrusal değildir ve geleneksel optimizasyon yöntemleriyle çözülemeyen karma tip değişkenlerden oluşmaktadır. Alternatif olarak, optimum HES'leri tasarlamak için tipik olarak iki tür yaklaşım kullanılır: HOMER'de olduğu gibi simülasyon tabanlı optimizasyon ve metasezgisel optimizasyon yöntemleri. Simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemleri insan müdahalesi açısından sınırlı, zaman alıcı ve hataya eğilimlidir. Metasezgisel yöntemler daha verimlidir çünkü bir dizi karmaşıklığın kolayca üstesinden gelebilir. "Metasezgisel algoritmalar" olarak bilinen bir optimizasyon algoritmaları sınıfı, sosyal veya doğal olayları taklit ederek zorlu optimizasyon problemlerinin üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Özellikle, çok amaçlı optimizasyon metasezgiselleri optimum HYEK için en uygun olanlardır. Çünkü HYEK modelleri maliyet, performans, güvenilirlik, sınırlılık gibi birden fazla kriteri aynı anda içermektedir [4]. Literatürde HYEK optimizasyonunda Genetik Algoritmalar (GA), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO), benzetimli tavlama (SA), Çiçek tozlaşması (FP), Sosyal Ömücek Optimizatörü(SSO), Denge Optimizatörü (EO), Çok Modlu Gecikmeli PSO (MDPSO), Doğrusal Programlama (LP), Yusufçuk (DF), Karga Arama (CS), Çok Amaçlı Karga Arama Algoritması (MPCS), Dinamik Programlama (DP), Runge Kutta (RK), Gri Kurt (GW), Harris Hawks Optimizer-Aritmetik Optimizasyon Algoritması (hHHO-AOA), Diferansiyel Evrim (DE) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar ayrıca enerji sistemlerinin lokasyon optimizasyonunda [5], Güç sistemlerinde risk değerlendirmede [6], Güç yönetimi ile şebekeden beslenen büyük ölçekli elektrikli araçların şarj optimizasyonu [7] gibi optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın kaynağı HOMER yazılımındaki dezavantajlar, eksiklikler veya zorluklardır. HOMER, optimum hibrit sistemi önerirken kullanıcının önceden belirlemiş olduğu arama uzayından en optimum sistemi tek tek deneyerek bulmaktadır. Bunun birtakım dezavantajları vardır. Bunlar;

i. Kullanıcı özellikle büyük güçteki tasarımlarda hangi güçte veya adette sistem elemanı (Pv panel, Rüzgar türbini, Dönüştürücü ve Batarya) gerekeceğini kestirememektedir. Dolayısıyla arama uzayını aslında deneme yanılma ile oluşturmaktadır. Eğer arama uzayında uygulanabilir bir sistem yoksa HOMER "search space error" yani arama uzayı hatası vermekte ve kullanıcıdan arama

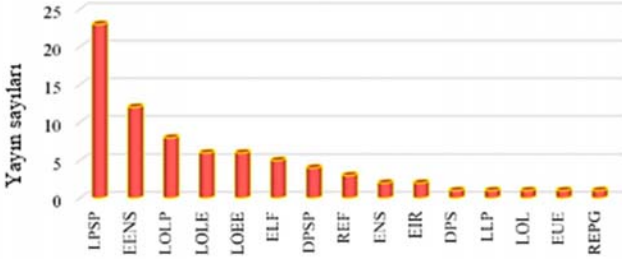
uzayında yeterli büyüklükte veya güçte olmayan sistem elemanının boyut yelpazesini genişletmesini istemektedir. Bu şekilde kullanıcı optimum sistemi bulmak için defalarca arama uzayını güncellemektedir. Dolayısıyla sonuçlar daha çok deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır.

ii. Kullanıcı arama uzayını oluştururken tek seferde çözüme ulaşmak isterse her bir sistem elemanı için çok geniş yelpazede güçler veya adetler girebilir. Ancak simülasyon süresinin arama uzayı içeriği ile orantılı olarak uzaması sebebiyle aslında dilediği yelpazede arama uzayı oluşturabilmesinin bir avantajı kalmamaktadır. Çünkü işlem süresi saatlerce, hatta günlerce olabilmektedir. Dolayısıyla kullanıcının arama uzayını önce kaba değerlerle oluşturduktan sonra optimizasyon ile yakınsanan sonuçlar etrafında arama uzayında birkaç güncelleme yaparak daha hassas değerlere ulaşması gerekmektedir.

Sonuç olarak kullanıcı HOMER ile optimizasyon yaparken birçok kez arama uzayını güncellemek zorunda kalmakta, zaman kaybına uğramakta ve sonuçları deneme yanılma yöntemi ile elde etmektedir. Bu dezavantajlar HOMER yazılımını kullanıcı dostu olmaktan uzağa taşımaktadır.

Bu çalışmanın amacı yenilenebilir enerji kaynakları optimizasyonunda çok yaygın kullanılmakta olan HOMER programının hassasiyet, zorlu arama uzayı oluşturma ve hız dezavantajlarını bertaraf eden alternatif metasezgisel tabanlı hızlı bir optimizasyon aracı tasarlamaktır. Ek olarak, söz konusu metasezgisel optimizasyon tabanlı araç ile kullanıcıya HOMER'in sunmakta olduğu detaylı ekonomik ve elektriksel sonuçları sunmaktır. Tasarlanan sistemde kullanıcı her bir sistem elemanı için arama uzayı oluşturmak yerine, sadece arama uzayının alt ve üst sınırlarını belirlemektedir. Sürü zekası tabanlı PSO algoritması ile belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki optimum değerler çok hızlı bir şekilde bulunmaktadır. Çünkü PSO algoritması arama uzayındaki değerleri tek tek denemek ele almak yerine her defasında sürü içerisindeki bireylerden en optimum çözümü bulmuş olan bireyin sonuçlarından hareket ederek optimum değerlere ulaşmaktadır.

Bu çalışmada Parçacık Sürü Algoritması (PSO) ile PV, rüzgar türbini, batarya ve invertör bileşenlerinin boyutları optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde maliyet fonksiyonu olarak enerji maliyeti(COE) parametresi kullanılmıştır. Optimizasyon probleminde, izin verilen maksimum kapasite eksikliğinin altında olan sistemlerin güvenilir bir sistem olduğu kabul edilir. Kapasite eksikliği parametresi güvenilir bir sistem oluşturmak ve sistemin gerekli enerjiyi ürettiğinden emin olmak için kullanılır. Kapasite eksikliği HOMER programında da aynı şekilde sistemlerin güvenilirlik parametresi olarak kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonu olarak enerji maliyeti(COE), seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE), toplam yıllık maliyet (TAC), toplam maliyet (TC), Net Bugün ki Değer (NPV) parametreleri birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [8]. Güvenilirlik parametresi olarak; güç kaynağı olasılığı kaybı (LPSP), Beklenen Sağlanmayan Enerji (EENS) [9, 10], Yük Kaybı Olasılığı (LOLP), Beklenen yük kaybı (LOLE), Beklenen Enerji Kaybı (LOEE), Eşdeğer Kayıp faktörü (ELF), Güç Eksikliği Tedarik Olasılığı (DPSP), Yenilenebilir Enerji Oranı (REF), Temin Edilmeyen enerji (ENS), Enerji Endeksi Oranı (EIR), Güç Kaynağı Eksikliği (DPS), Yük Kaybı Olasılığı (LLP) [11], Yük Kaybı (LOL), Beklenen Hizmet Almamış Enerji (EUE), parametreleri kullanılmaktadır. Güvenilirlik parametresi olarak birçok araştırmacı güç kaynağı olasılığı kaybı (LPSP), Göreceli Fazla Yük Üretimi (REPG)parametresini tercih etmektedir. Ancak LPSP parametresi sistemin doğru boyutlandırılmamasına ve özellikle saatlik yük artışlarında cevapsız kalmasına sebep olabilmektedir.



Şekil 1. Kullanılan güvenilirlik parametreleri ve kullanıldıkları çalışma sayıları [12]
(Reliability parameters used and number of studies in which they were used [12])

Gusain vd. tarafından 2023 yılında yapılan tarama çalışmasında [12], Bouaouda ile Sayouti tarafından 2022 yılında yapılan tarama çalışmasında [13], Agajie vd. tarafından 2023 yılında yapılan tarama çalışmasında [14], Mandelli vd. tarafından 2016 yılında yapılan tarama çalışmasında [15] ve tarafınca yapılan literatür taramalarında “kapasite eksikliği” parametresinin metasezgisel optimizasyon algoritmalarında güvenilirlik parametresi olarak kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır.

Oysaki kapasite eksikliği parametresi HOMER yazılımında var olan önemli bir güvenilirlik parametresidir. Optimizasyonun Kapasite eksikliği parametresi ile yapılması bu bakımdan daha avantajlıdır ve daha doğru sistem boyutlandırılmasını sağlar. Çünkü kapasite eksikliği belirlenirken önceden belirlenmiş fazladan saatlik yükleri karşılayacak kadar enerji ve hatta üretimin bir kısmı önceden bilinmeyen yükler için rezerve edilmiş gibi optimizasyon yapılır.

Literatürde kullanılan maliyet fonksiyonları ve güvenilirlik parametreleri ile ilgili detaylı bilgiler Tezer ve ekibinin yapmış olduğu çalışmadan incelenebilir [39]. LPSP güvenlik parametresi yükün tam beslenemediği zamanları toplayıp toplam zamana (8760 saat) bölerek güvenilirlik hesabı yapmaktadır. Ancak beslenmeyen zamanlarda yükün ne kadarının beslenmediği ile ilgili bilgi yoktur. Bu nedenle bu çalışmada LPSP güvenlik parametresine göre daha güvenilir ve anlamlı olan HOMER programı tarafından da tercih edilen Kapasite eksikliği parametresi kullanılmıştır. Kapasite eksikliği parametresinde ise yükün tam olarak beslenemediği durumlarda ne kadarının beslenemediği önemlidir. Çalışma “kapasite eksikliği” parametresinin metasezgisel optimizasyon algoritmalarında güvenilirlik parametresi olarak ilk kez kullanılması bakımından literatürde olan çalışmalardan ayrılmaktadır.

2. Materyal ve Yöntemler (Material and Methods)

2.1. Güneş ve Rüzgar Enerjisi Üretim Modelleri (Solar and Wind Energy Generation Models)

Tasarlanan optimizasyon aracında kullanılmak üzere gerekli olan güneş radyasyonu ve rüzgar hızı verileri HOMER’de olduğu gibi saatlik olarak düzenli ölçülmüş veriler veya aylık ortalama verilerden gerçeğe uygun sentetik olarak üretilmiş saatlik veriler olabilmektedir. Sentetik meteoroloji verilerini üretmek için çeşitli olasılık dağılım fonksiyonlarından faydalanılır örneğin sentetik saatlik rüzgar hızı Weibull olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak modellenmektedir [40]. Saatlik radyasyon verisi kullanılarak PV panel enerji üretimi Eş. 1 ile aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır.

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) \quad (1)$$

Kullanılacak PV panel sayısı ile bu değer çarpılarak da toplam üretim bulunmaktadır. Bu eşitliklerde:

Y_{PV} : Standart test koşullarındaki panel gücü [kW], f_{PV} : panel kayıp faktörü [%], \bar{G}_T : Saatlik ölçülmüş ortalama radyasyon [kW/m²], $\bar{G}_{T,STC}$: Standart test koşullarındaki radyasyon miktarı [1 kW/m²]

Rüzgar türbininin üreteceği enerji 3 adımda hesaplanmaktadır. İlk adımda saatlik olarak ölçülen rüzgar hızı türbin merkezi yüksekliğindeki hıza indirgenir. Çünkü ölçüm yapan anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızı ile türbin merkezi yüksekliğindeki rüzgar hızı birbirlerinden farklıdır. Bu çalışmada kullanılan yöntem rüzgar hızının yeryüzünden yükseldikçe logaritmik olarak arttığını varsaymaktadır. Eş. 2 türbin merkezi yüksekliğindeki rüzgar hızının anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızına oranını vermektedir.

$$\frac{v(Z_{hub})}{v(Z_{anem})} = \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \quad (2)$$

Rüzgar ekstrapolasyonu anemometre yüksekliğinde toplanan rüzgar hızı verisinin farklı türbin boylarındaki yüksekliklere indirgenmesinde kullanılmaktadır [41]. Rüzgar ekstrapolasyonu Eş. 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{v(Z_{hub})}{v(Z_{anem})} = \left(\frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^\alpha \quad (3)$$

Bu eşitliklerde:

Z_{hub} : Rüzgar türbininin hub yüksekliği [m], Z_{anem} : Anemometre yüksekliği [m], $v(Z_{hub})$: Rüzgar türbin merkezinin yüksekliğindeki rüzgar hızı [m/s], $v(Z_{anem})$: Anemometre yüksekliğindeki rüzgar hızı [m/s], α : Güç yasası exponenti Z_0 : Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu [m] Tablodan seçim yapılır [42],

Rüzgar türbininin ürettiği enerjiyi hesaplarken rakım önemli bir parametredir. Rakım deniz seviyesinden yüksekliği temsil eder. Rakım hava yoğunluğunu etkilediği için dolayısıyla rüzgar türbininin üretimi de bundan etkilenir. İdeal gaz yasasına göre hava yoğunluğu Eş. 4 ile hesaplanır.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

Rüzgar türbininin üretimi hesaplanırken hava yoğunluğu oranından faydalanılır. Bu oran gerçek hava yoğunluğunun standart şartlardaki (deniz seviyesi, 15 °C) hava yoğunluğuna bölünmesi ile bulunur. Belirli yükseklikteki rüzgar türbin çıkışı hesaplanırken türbin güç eğrisi ile hava yoğunluğu çarpılır. İdeal gaz yasası kullanılarak, hava yoğunluğu oranı Eş. 5 ile hesaplanır.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (5)$$

Rakım hem basıncı hem de sıcaklığı etkilemektedir. Sıcaklık, rakıma bağlı olarak doğrusal bir şekilde Eş. 6’ya göre azalmaktadır.

$$T = T_0 - Bz \quad (6)$$

Sıcaklığın rakıma bağlı doğrusal olarak azalacağı varsayımına dayanarak, hava basıncı ile rakım arasındaki ilişki Eş. 7 ile verilir.

$$P = P_0 \left(1 - \frac{Bz}{T_0} \right)^{g/RB} \quad (7)$$

P ve T denklemleri hava yoğunluğu oranı denkleminde yerine konursa Eş. 8 elde edilir.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{Bz}{T_0}\right)^{g/RB} \left(\frac{T_0}{T_0 - Bz}\right) \quad (8)$$

Eşitliklerdeki:

ρ : hava yoğunluğu [kg/m³], P : Basınç [Pa], R : gaz sabiti [287 J/kgK], T : sıcaklık [K], P_0 : standart basınç [101,325 Pa]
 T_0 : standart sıcaklık [288,16 K], B : yanılma oranı [0,00650 K/m], z : rakım [m], g : yerçekimi ivmesi

Rüzgar türbininin güç eğrisi standart basınç ve sıcaklık koşulları altında oluşturulması sebebiyle gerçek koşullarda üretimi hesaplayabilmek için hava yoğunluğu oranı ile o anki rüzgara karşılık gelen güç eğrisindeki değer çarpılır. Böylece rüzgar türbininin gerçek üretim miktarı bulunmuş olur.

Üreticiler tarafından rüzgar türbininin rüzgar hızına bağlı üretebildiği güç miktarı belli rüzgar hızı değerleri için verilmektedir. Ancak gerçek ortamdaki saatlik rüzgar verisinde türbin üreticisi tarafından verilen değerlerin dışında rüzgar hızları da vardır. Dolayısıyla rüzgar hızı-güç tablosunda olmayan değerlerin karşılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. İnterpolasyon yöntemi gibi yöntemler kullanılarak ara veriler bulunabilir. Bu çalışmada verilen rüzgar hızları ve üretim değerleri kullanılarak Matlab fit fonksiyonu ile parçalı kübik interpolasyon uygulanarak rüzgar hızının bütün değerleri için üretim değerleri belirlenmiştir. Uygulanan interpolasyon ve gerçek değerlere göre veriler Şekil 2'de çizdirilmiştir.

Daha önce sentetik olarak üretilen saatlik rüzgar hızı değerlerinin (8760 elemanlı sayı dizisi) her biri için öncelikle denklem 2 kullanılarak türbin merkezi yüksekliğine göre rüzgar hızı değeri hesaplanır. Daha sonra hesaplanan yeni rüzgar hızının karşılığı olan güç değeri uydurulan güç eğrisinden bulunur. Son olarak güç eğrisinden bulunan üretim değeri denklem 8 kullanılarak hesaplanan hava yoğunluk oranı ile çarpılarak gerçek üretim değeri bulunur. Çünkü güç eğrileri standart koşullar altında çıkarılmaktadır. Standart koşullar dışındaki güç değerleri hava yoğunluk oranı ile çarpılarak bulunmaktadırlar. Böylece anlık rüzgar hızına göre anlık 1 adet rüzgar türbininin üretimi hesaplanmış olur. Kullanılacak türbin sayısı ile bu değer çarpılarak da toplam üretim bulunur.

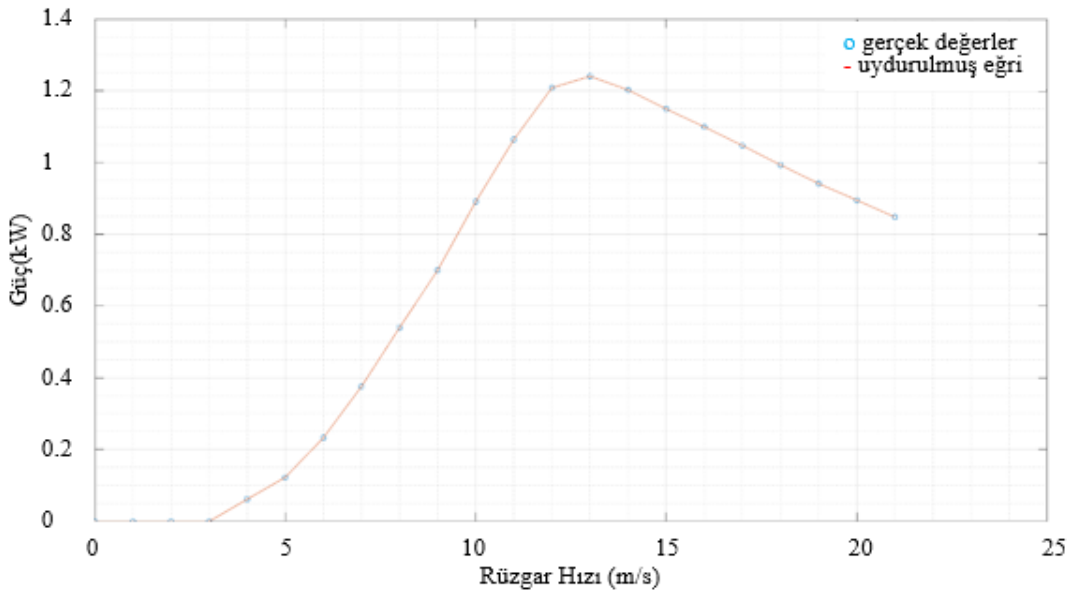
2.2. Optimizasyon (Optimisation)

Yük için gerekli olan rüzgar türbini sayısı, güneş paneli sayısı, invertör gücü ve batarya sayısının optimum büyüklüklerde seçilmesi hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde işletilmesi için oldukça önemlidir. Bu optimizasyon sürecinde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılmıştır [43]. Parçacık sürü optimizasyonu, çok çeşitli işlevleri optimize etmek için etkili ve son derece basit bir algoritmadır. Hayvanlar aleminde sosyal davranışların modellenmesi prensibine dayalı bir algoritmadır. Kavramsal olarak, genetik algoritmalar ile evrimsel programlama arasında bir optimizasyon algoritmasıdır. Evrimsel programlama gibi stokastik süreçlere oldukça bağlıdır. Parçacık sürü algoritması tarafından p_{best} (kendi en iyi pozisyonu) ve g_{best} (global en iyi pozisyon)'e yönelik ayarlama, kavramsal olarak genetik algoritmalar tarafından kullanılan çaprazlama işlemine benzerdir. Parçacık sürü optimizasyonu konseptine özgü olan şey, potansiyel çözümleri hiper uzayda uçurarak "daha iyi" çözümlere doğru hızlanmaktır. Hızlanma ve konum değiştirme işlemleri sırasıyla Eş. 9 ve Eş. 10 yardımıyla olmaktadır.

$$V_{i,j}(t+1) = V_{i,j}(t) + c_1 * rand * (p_{best_{i,j}}(t) - X_{i,j}(t)) + c_2 * rand * (g_{best}(t) - X_{i,j}(t)) \quad (9)$$

$$X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + V_{i,j}(t+1) \quad (10)$$

Bu eşitliklerdeki c_1 , bireysel hızlandırma katsayısı, c_2 ise global hızlandırma katsayısıdır. PSO bireyleri rastgele konumlandırarak optimizasyon sürecine başlamaktadır [44]. PSO algoritması optimizasyon için bir maliyet fonksiyonu kullanır. Bu çalışmada maliyet fonksiyonu güvenilirlik parametresine bağlı olarak Enerji Maliyeti-Cost of Energy (COE) dir. Yani birim kWh başına düşen minimum tutardır. Birimi \$/kWh tır. COE değeri güvenilirlik parametresinin sağlanması ile hesaplanmaktadır. Yani kullanıcı tarafından yükün beslenmesine dair güvenilirlik parametresi değeri belirlenir. Güvenilirlik parametresini sağlayan sistemler elektriksel anlamda güvenilir sistemlerdir. Yani güvenilir sistemler kullanıcının yükünü besleyebilen yeterli sistemler anlamına gelir. Güvenilirlik parametresi literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada Kapasite eksikliği parametresidir. Kapasite eksikliği



Şekil 2. BWCXL.1 rüzgar türbininin güç eğrisi ve uydurulan eğri (BWCXL.1 power curve of wind turbine and fitted curve)

parametresi sayesinde beslenemeyen yükler ve sağlanamayan çalışma rezervi toplanarak sistemin güvenilirliği hakkında bilgi edinilmiş olur. Tablo 1 de görüldüğü üzere literatürdeki birçok çalışmada Loss of Power Supply Probability (LPSP) parametresi kullanılmaktadır. LPSP hesabı Eş. 11 ile hesaplanmaktadır.

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} \text{süre}(eğer E_{mevcut}(t) < E_{yük}(t))}{8760} \quad (11)$$

$$E_{mevcut}(t) = E_{pv}(t) + E_{rüzgar}(t) + E_{bat}(t) \quad (12)$$

Bu parametrenin güvenilir hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarımında sıklıkla kullanılmasının sebebi uygulayışının kolay olmasından dolayıdır. LPSP parametresi sistemin güvenilirliği anlamında bir ölçüt olsa da 2 tane eksikliği vardır. Bu eksiklerden ilki LPSP parametresinde saatlik olarak yükün tamamen beslenmesine bakılmaktadır. Eğer yük tamamen beslenebiliyorsa besleniyor kabul edilmekte tamamen beslenmiyorsa beslenemiyor kabul edilmektedir. Yani 100kW olan bir yük için hibrit sistem tarafından 100kW ve üzerinde saatlik üretim varsa sistem besleniyor kabul edilir. Ancak çok az bir kısmı beslenemediği zaman ise beslenemiyor kabul edilir. Yani hibrit sistem saatlik olarak 99.9kW dahi üretse sistem beslenemiyor anlamına gelmektedir. Dolayısıyla yükün ne kadarının beslenemediğinin bir önemi yoktur. Dolayısıyla hassas tasarımlarda bunun doğru olmayacağı açıktır. LPSP parametresinin ikinci eksikliği ise çalışma rezervine yer verilmemektedir. Dolayısıyla sisteme olağan dışı gelen fazla yükler için bir rezerv bulunmamaktadır. Bundan dolayı sistemlerin güvenilirliği kısıtlanmaktadır. Ancak kapasite eksikliği parametresi kullanılırsa hem yükün ne kadarının beslenip beslenmediği göz önünde bulundurulur hem de rezerve güç sayesinde fazladan gelebilecek yükler içinde bir emniyet sağlanmış olur. Optimizasyon sırasında güvenilir sistemler için COE değeri hesaplanmakta olup güvenilir olmayan sistemler için COE=sonsuz kabul edilerek algoritmanın bu sistemleri pas geçmesi sağlanmaktadır. Şekil 1'de hibrit yenilenebilir enerji kaynakları optimizasyonu için kullanılan PSO algoritmasının akış diyagramı Tablo 2'de ise PSO parametreleri ve değerleri verilmiştir.

Tablo 2. PSO parametreleri ve seçilen değerler (PSO parameters and selected values)

Parametreler	Seçilen Değerler
Popülasyon büyüklüğü (Np)	5
Döngü sayısı (D)	100
Bireysel hızlandırma katsayısı (c_1)	1,5
Global hızlandırma katsayısı (c_2)	2,0

Tablo 2'de PSO için ayarlanması gereken parametreler optimize edilecek problemden probleme değişen parametrelerdir. Bu parametreler hız ve doğruluk açısından uygun seçilmelidir. Popülasyon büyüklüğü artırıldıkça her döngüde hesap sayısı da fazla olacağından hız düşerken her döngüde daha optimum sonuçlar elde edilmektedir. Döngü sayısı yetersiz seçilirse en optimum çözümlere ulaşılamazken fazla seçilirse algoritma boştan yere yeni değerler deneyerek zaman kaybına neden olur. c_1 ve c_2 değerleri ise optimize edilecek sisteme çok daha bağlı olan parametrelerdir. Seçilirken belirli bir kurala göre seçim yapılamamaktadır. Doğru ayarlandıklarında çözüme çok daha hızlı şekilde ulaşılmaktadır (Şekil 3-Şekil 4).

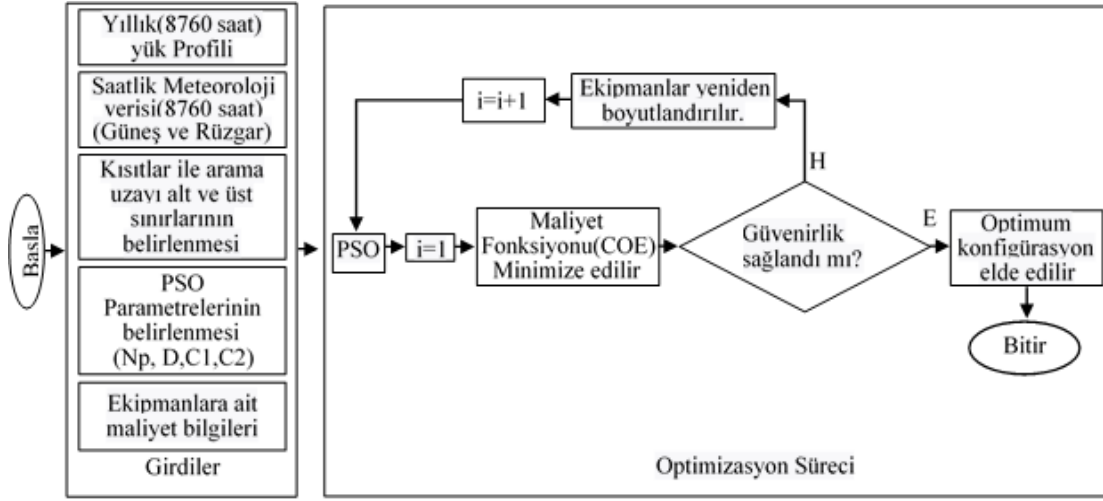
2.3. Sevk Stratejisi (Dispatch Strategy)

Sevk stratejisi hibrit yenilenebilir enerji kaynağı sisteminin bileşenleri arasındaki enerji akışlarının kontrolü ile ilgilidir. Yükü beslemek için yenilenebilir enerji kaynakları tarafından üretilen elektrik enerjisinin bataryaya, yüke veya bataryada depolanan enerjinin yüke nakledilmesi ile ilgili kurallar dizisidir. Bu çalışmada sevk stratejisinin nasıl olduğu ile ilgili akış diyagramı Şekil 5'te sunulmuştur.

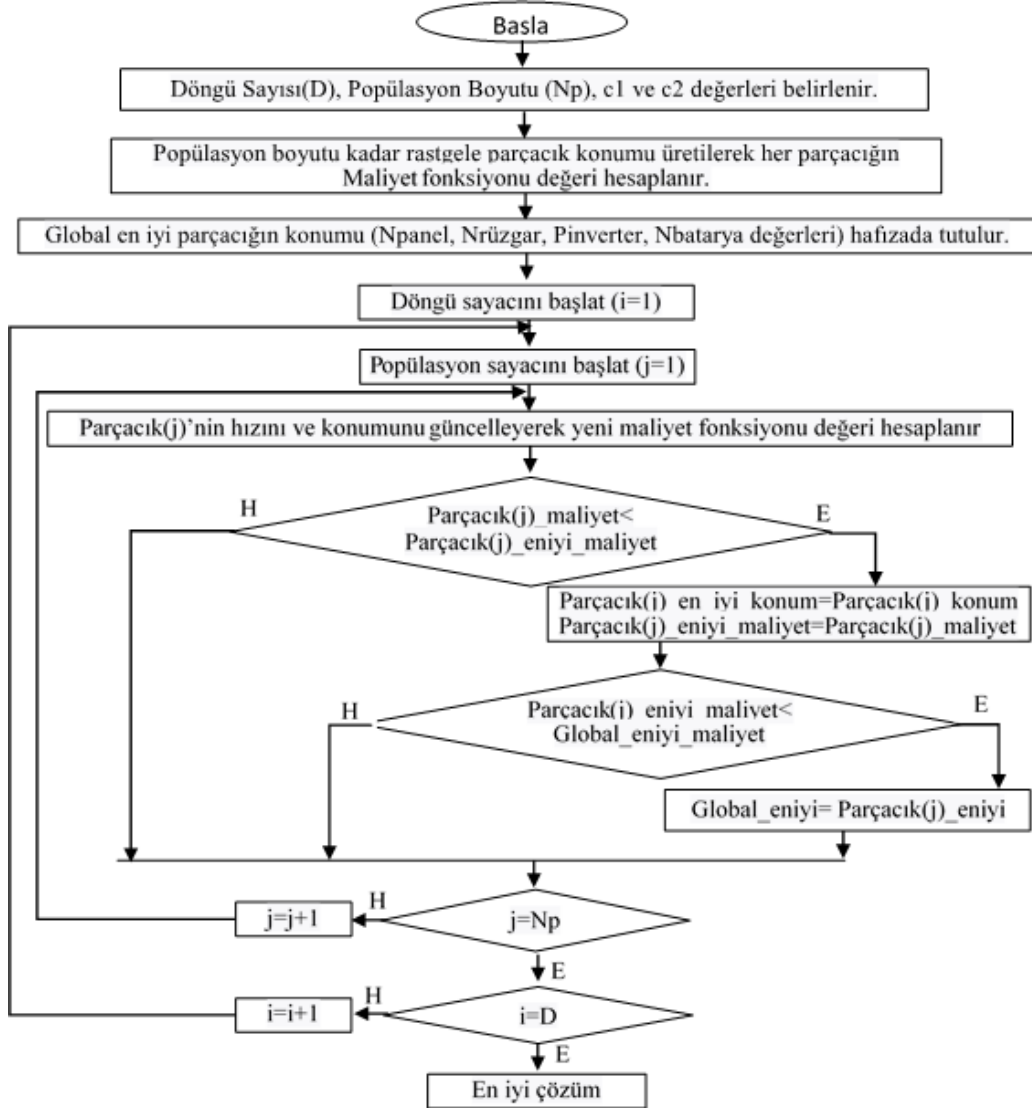
Sevk stratejisinde en başta batarya gurubundan çekilebilecek net enerjinin (kayıplar çıkarıldıktan sonra) bilinmesi gereklidir. Bataryada ki enerji ve PV paneller ile rüzgar türbini tarafından üretilen enerji yükü beslemek için kullanılacaktır. Batarya gurubundan çekilebilecek net enerji Eş. 16 yardımıyla hesaplanır.

Tablo 1. Literatürde metasezgisel algoritmalarla yapılan çalışmalar ve kullandıkları parametreler (Works in the literature and the parameters they use)

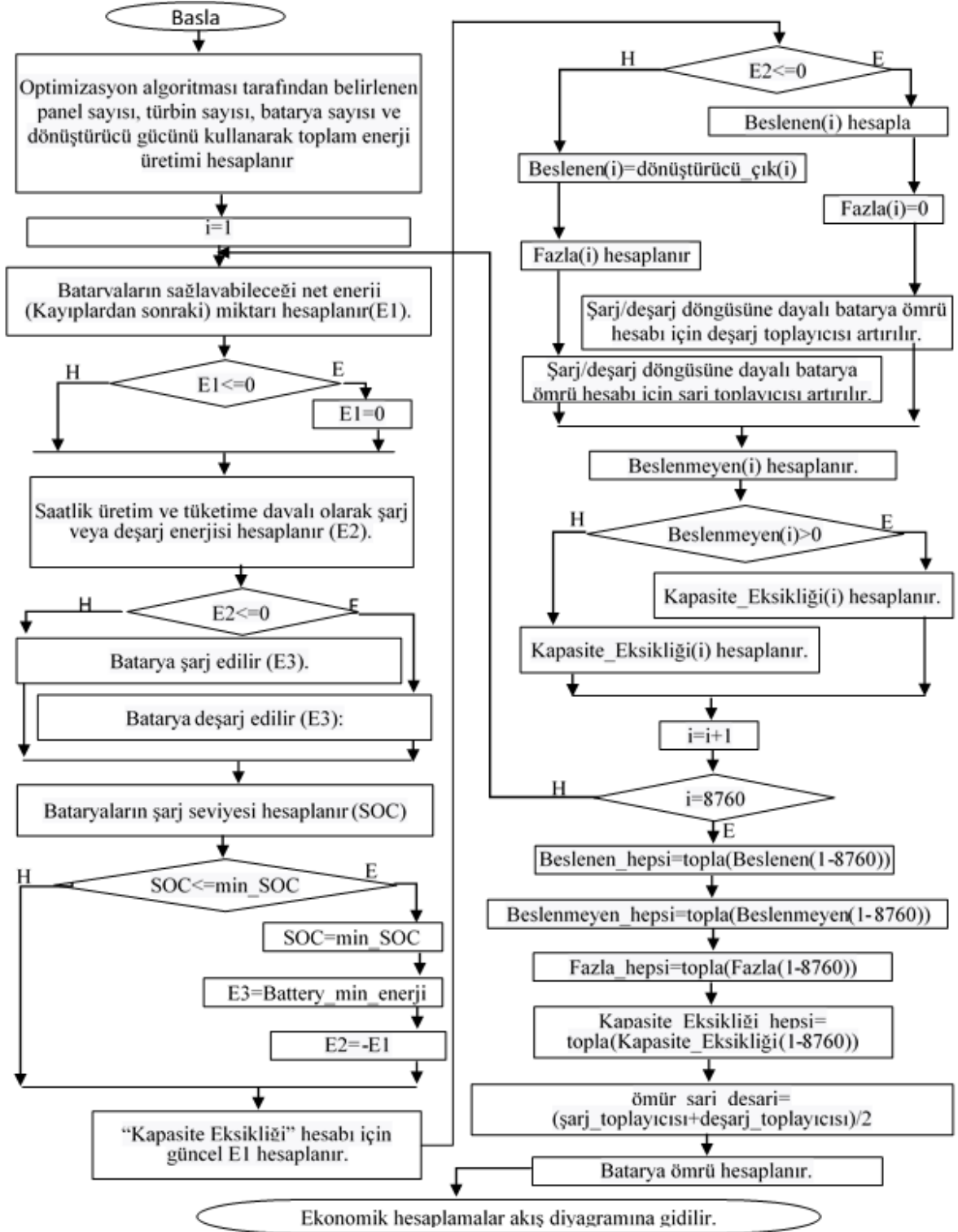
Optimizasyon Algoritması	Optimize edilen bileşenler	Maliyet Fonksiyonu	Güvenilirlik parametresi	Referanslar
GW	PV-WT-BM	LCOE	LPSP	[16]
	PW-WT	ACS	LPSP	[17]
ACO	PV-WT-BAT-HY	TAC	LPSP	[18]
GA	PV-WT-BAT	COE	LPSP	[19]
	PV-WT-BAT	COE	LPSP	[20]
FP	PV-FC	TAC	LPSP	[21]
SSO	PV-WT-DG	COE	LPSP	[22]
EO	PV-WT-BAT-DG	NPC	LPSP	[23]
	PV-PS	NPC	LPSP	[24]
MDPSO	PV-WT-BAT-DG	LCOE	LPSP	[25]
LP	PV-BAT	TC	LPSP	[26]
MPSO/GA	PV-WT-BAT	TNPC	LPSP	[27]
DF	PV-WT-FC	NPC	LPSP	[28]
WS	PV-FC	TAC	LPSP	[29]
MPCS	PV-FC-DG	TNPC	LPSP	[30]
DP	PV-WT-BAT-DG	LCC	---	[31]
RK	PV-BM-BAT	COE	LPSP	[32]
ABC	PV-WT-FC	TAC	LPSP	[33]
	PV-WT-BAT	TAC	LPSP	[34]
hHHO-AOA	PV-WT-BAT-DG	COE	LPSP,REF	[35]
PSO	PV-WT-BAT-DG	COE	REF	[36]
DE	MHP-BG-PV-WT-BAT	COE	DPSP	[37]
Monte Carlo	MHP-PV-WT	-----	EUS-LOLP	[38]
PSO	PV-WT-BAT-INV	COE	Kapasite Eksikliği	Bu çalışma



Şekil 3. Bütün sistemin akış diyagramı (Flowchart of the system)



Şekil 4. PSO algoritmasının akış diyagramı (PSO Algorithm flowchart)



Şekil 5. Sevk stratejisi akış diyagramı (Dispatch strategy flowchart)

$$E_{bat} = N_{bat} * V_{nom} * Q_{max} \quad (13)$$

$$E_{min} = SOC_{min} * E_{bat} \quad (14)$$

$$\eta_{bat} = \sqrt{\eta_{rt}} \quad (15)$$

$$E_{net} = (E_{bat} - E_{min}) * \eta_{bat} \quad (16)$$

Daha sonra toplam üretim ve toplam tüketim göz önünde bulundurularak şarj veya deşarj enerjisi miktarı Eş. 19 ile hesaplanır.

$$E_{mevcut} = E_{PV} + E_{rüzgar} + E_{net} \quad (17)$$

$$E_{tüketim} = E_{yük} + E_{dönüştürücü_kaybı} + E_{şarj_deşarj_kaybı} \quad (18)$$

$$E_{\text{şarj,deşarj}} = E_{\text{mevcut}} - E_{\text{tüketim}} \quad (19)$$

Eğer $E_{\text{şarj,deşarj}_i} \geq 0$ ise batarya grubu şarj edilmelidir. Ancak bataryaların şarjı vedeşarjı esnasında batarya tarafından emilebilen veya çekilebilen enerji miktarı birtakım kurallar çerçevesinde olmaktadır. Yani her zaman yükü besledikten sonra kalan fazla enerjinin tamamı batarya grubu tarafından şarj amaçlı emilememektedir. Aynı şekilde yükü beslemekte panel ve rüzgar türbininin ürettiği enerji yetersiz kaldığında yükü beslemek için eksik kalan enerjinin tamamı anlık olarak batarya grubundan çekilememektedir. Bu nedenle saatlik olarak batarya grubunun emebileceği maksimum güç miktarı hesaplanır. Bu çalışmanın diğer bir orijinalliği ise burasıdır. Önceki çalışmalarda batarya şarj vedeşarj işlemlerinin hangi kurallar çerçevesinde yapıldığı ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Oysaki bataryaların şarj vedeşarj stratejisi hibrit sistem tasarımlarında oldukça yüksek öneme sahiptir. Maksimum şarj gücü, batarya grubunun şarj durumuna göre saatlik olarak değişmektedir. Maksimum şarj gücü hesaplanırken üç farklı yöntemden faydalanılır. Bu yöntemler; Kinetik Batarya Modeli [45], bataryaya has olan A/Ah oranı ile ilgili olan batarya “maksimum şarj oranı” ve batarya “maksimum şarj akımındır”. Bu üç değer hesaplandıktan sonra en küçük olan değer batarya grubunun maksimum şarj gücü olarak kabul edilir. Sırayla bu üç parametre Eş. 20, Eş. 21 ve Eş. 22 ile hesaplanmaktadır.

$$P_{\text{kbm,şarj}} = \frac{-kcQ_{\text{max}} + kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (20)$$

$$P_{\text{mşo}} = \frac{(1 - e^{-a_c \Delta t})(Q_{\text{max}} - Q)}{\Delta t} \quad (21)$$

$$P_{\text{mşa}} = \frac{N_{\text{bat}} I_{\text{max}} V_{\text{nom}}}{1000} \quad (22)$$

Maksimum şarj gücü hesaplanan bu üç parametreden en küçük olanından şarj kayıpları çıkarıldıktan sonra belirlenmiş olur ve Eş. 23 ile hesaplanır.

$$P_{\text{max,şarj}} = \frac{\text{MIN}(P_{\text{kbm,şarj}}, P_{\text{mşo}}, P_{\text{mşa}})}{\eta_{\text{bat,şarj}}} \quad (23)$$

Şarj işleminde olduğu gibideşarj işlemi de belirli kurallar çerçevesinde gerçekleştirilir. Saatlik olarak batarya grubunun verebileceği maksimum güç miktarı belirlenir. Maksimumdeşarj gücü olarak ifade edilen bu parametre kinetik batarya modeli vasıtasıyla Eş. 24 ile hesaplanır.

$$P_{\text{kbm,deşarj}} = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (24)$$

Maksimumdeşarj gücüdeşarj kayıpları bertaraf edildikten sonra belirlenmiş olur ve Eş. 25 ile hesaplanır.

$$P_{\text{max,deşarj}} = \eta_{\text{bat,deşarj}} P_{\text{kbm,deşarj}} \quad (25)$$

Şarj veyadeşarj işleminin ardından sonraki adımlarda veya döngülerde kullanılmak üzere şarj seviyesi (state of charge (SOC)) hesaplanmalıdır. Kullanılan bataryaların minimum SOC değeri $SOC_{\text{min}} = 0,3$ yani %30 dur. SOC Eş. 26 ile hesaplanır.

$$SOC = \frac{E_{\text{bat,şarj-deşarj,sonrası}}}{N_{\text{bat}} * V_{\text{nom}} * Q_{\text{max}}} \quad (26)$$

Bu adımlardan sonra saatlik olarak toplam enerji üretimi ve tüketimi değerleri göz önünde bulundurularak hibrit enerji sistemine ait diğer parametreler hesaplanır. Bu parametreler, “beslenen” (served) enerji, “fazla” (exceeds) enerji, “beslenmeyen” (unmet) enerji ve en önemlisi

bu hesaplamalar vasıtasıyla elde edilen, güvenilirlik parametresi olan “kapasite eksikliği” (capacity shortage) parametresidir.

Bu parametrelerin hesabına geçmeden önce bu çalışmada dönüştürücü optimizasyonu da yapıldığını hatırlatmak yararlı olacaktır. Dönüştürücü hem PV ve batarya gibi elemanların sağladığı DC enerjiyi AC yükler için DC den AC ye dönüştüren hem de jeneratör ve rüzgar türbini gibi AC enerji üreten elemanların sağladığı AC enerjiyi batarya şarjı veya DC yükler için DC enerjiye dönüştüren bir elemandır. Dönüştürücü elemanında DC→AC veya AC→DC dönüştürme işlemlerinde kayıplar söz konusudur. Dolayısıyla bu kayıpların tasarımlarda veya simülasyonlarda göz ardı edilmemesi gereklidir. Hibrit sistem tasarımında Dönüştürücü gücünün optimum seçilmesi enerji maliyetlerini düşürecektir. Dönüştürücü gücü yıl boyunca en yüksek çekilen güçten fazla olmamalı ve aynı şekilde yıl içinde çekilen yüklerin yeteri düzeyde miktarını besleyebilecek güçten düşük güçte olmamalıdır. Dönüştürücü gücünden düşük güçler için beslenen (served) enerji hesaplanırken doğrudan yük gücü ile hesap yapılırken büyük güçler için beslenen enerji hesaplanırken dönüştürücünün gücü kadar beslenen enerji kabul edilirken geri kalan kısım beslenmeyen enerji olarak kabul edilir.

Bu bilgidan sonra sırasıyla bahsi geçen parametrelerin nasıl hesaplandığı aşağıdaki eşitliklerde sunulmuştur. Öncelikle beslenen enerjiden bahsedilirse, beslenen enerji yıl boyunca (8760 saat) hibrit enerji sistemi tarafından yüklere verilebilen enerjinin toplamıdır. Beslenen enerji Eş. 27 ile hesaplanır.

$$E_{\text{beslenen}} = \begin{cases} E_{\text{yük}} & (\text{Eğer } E_{\text{mevcut}} \geq E_{\text{tüketim}}) \\ E_{\text{mevcut}} - E_{\text{dönüştürücü,kayıbı}} - E_{\text{deşarj,kayıbı}} & (\text{Eğer } E_{\text{mevcut}} < E_{\text{tüketim}}) \end{cases} \quad (27)$$

Fazla enerji, üretilen enerjinin yükü beslemek veya batarya gurubunu şarj etmek için kullanılmadığı durumlarda oluşan kullanılmayan artık enerjidir. Genelde üretimin tüketimden fazla olduğu ve bataryaların dolu olduğu veya bataryaların maksimum şarj gücünün aşıldığı durumlarda bataryanın gönderilen enerjinin tamamını emememesi sonucu artan enerjidir. Dolayısıyla iki farklı durumda incelenmelidir. Birinci durum üretimin tüketimden büyük olduğu ve bataryaların tamamen dolu olduğu durumdur. Bu durumda fazla enerji Eş. 28 ile hesaplanır.

$$E_{\text{fazla,1}} = (E_{\text{PV}} + E_{\text{rüzgar}}) - (E_{\text{yük}} + E_{\text{dönüştürücü,kayıbı}}) \quad (28)$$

İkinci durumda ise üretimin tüketimden büyük olduğu ve bataryaların tamamen dolu olmadığı ancak fazla enerjinin batarya gurubunun maksimum şarj gücü $P_{\text{max,şarj}}$ değerini aşması durumudur. Bu durumda fazla enerji Eş. 29 ile hesaplanır.

$$E_{\text{fazla,2}} = E_{\text{fazla,1}} - P_{\text{max,şarj}} * 1hr \quad (29)$$

Burada $P_{\text{max,şarj}}$ ifadesinin 1hr (1 saat) ile çarpılmasının sebebi güç ifadesini enerjiye çevirmek içindir. Simülasyonlar 1 saat aralıklarla yapıldığı için 1hr ile çarpılmıştır.

Beslenmeyen enerji, üretilen enerjinin yükün talep ettiği enerjiden küçük olması durumunda ortaya çıkar ve Eş. 30 ile hesaplanır.

$$E_{\text{beslenmeyen}} = E_{\text{yük}} - E_{\text{beslenen}} \quad (30)$$

Hesaplanması gereken diğer parametre batarya “şarj-deşarj döngü hacmi” (throughput) parametresidir. Batarya şarj-deşarj döngü hacmi bir yıl boyunca batarya gurubunda dolaşan enerji miktarıdır. Şarj-deşarj döngü hacmi, şarj kayıplarından önce vedeşarj kayıplarından

önce ölçülür. Batarya grubunun enerji seviyesindeki değişimlerdir. Bu parametre sayesinde batarya grubunun ömrü hesaplanır. Şarj-deşarj döngü hacmi şarjdan sonra bataryanın enerji seviyesindeki pozitif yönlü değişimler iledeşarjdan sonra bataryanın enerji seviyesindeki değişimlerin ayrı ayrı toplanarak 2 ye bölünmesi ile elde edilir. 2 ye bölünmesinin sebebi şarj-deşarj döngü hacmi hesabında birim enerjinin şarj edilipdeşarj edilmesi gerekliliğinden dolayıdır yani birim enerji döngüsü(şarj-deşarj) ile hesaplanmaktadır. Şarj-deşarj döngü hacmi Eş. 33 ile hesaplanır.

$$Q_{\text{şarj döngü hacmi}} = \sum E_{\text{şarj}} \quad (31)$$

$$Q_{\text{deşarj döngü hacmi}} = \sum E_{\text{deşarj}} \quad (32)$$

$$Q_{\text{şarj-deşarj döngü hacmi}} = \frac{Q_{\text{şarj döngü hacmi}} + Q_{\text{deşarj döngü hacmi}}}{2} \quad (33)$$

Bu adımdan sonra batarya grubu ömrü hesaplanabilmektedir. $Q_{\text{şarj-deşarj döngü hacmi}}$ İfadesi batarya grubunun tasarlanan sistemde şarj-deşarj döngüsü ile hesaplanmış olan şarj-deşarj döngü hacmi ifadesi idi. Her bir bataryanın ayrıca ömürlük şarj-deşarj döngü hacmi (Q_{lifetime}) değeri vardır. Bu değer, batarya üreticisi tarafından sunulan bir değerdir ve batarya kataloğunda yazılıdır. Bu çalışmada kullanılan batarya bilgisi Tablo 4. de sunulmuştur. Batarya grubunun ömrü Eş. 34 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{\text{şarj-deşarj}} = \frac{N_{\text{batt}} Q_{\text{lifetime}}}{Q_{\text{şarj-deşarj döngü hacmi}}} \quad (34)$$

Optimizasyonda bataryaların takvim ömrü şarj-deşarj ömründen daha kısa ise değişim süreler takvim ömrü temel alınarak yapılmalıdır. Bu nedenle batarya ömrü Eş. 35'te verildiği gibi hesaba katılmalıdır.

$$R_{\text{bat}} = \begin{cases} R_{\text{şarj-deşarj}} & \text{Eğer } R_{\text{şarj-deşarj}} \leq R_{\text{takvim}} \\ R_{\text{takvim}} & \text{Eğer } R_{\text{şarj-deşarj}} > R_{\text{takvim}} \end{cases} \quad (35)$$

2.4. Kısıtlar ve Güvenilirlik (Constraints and Reliability)

Bütün bu hesaplamalardan sonra güvenilirlik parametresi olan kapasite eksikliği parametresi hesaplanabilir. Kapasite eksikliği optimizasyon sürecindeki kısıtlar yerine geçmektedir. Kısıtlar kısıtlar sistemlerin karşılaması gereken koşullardır yani güvenilirlik parametresidir. Belirlenen kısıtları karşılamayan sistemler optimizasyon sürecinde yer almazlar. Kapasite eksikliğinin hesaplanabilmesi için işletme rezervleri önceden belirlenmelidir. İşletme rezervi, ani yük artışlarında veya ani üretim azalışlarında bile enerji sağlayabilen fazla işletme kapasitesidir [46]. Simülasyonlarda enerji üreten elemanların boyutları işletme rezervini gerekli rezerve eşit ya da yüksek tutacak şekilde boyutlandırılır. İşletme rezervindeki eksiklik kapasite eksikliği olarak ele alınır. İşletme rezervi elektrik yüküne ve yenilenebilir enerji üretimine bağlı olmak üzere 2 parametre ile tanımlanır. Tablo 3'te özetle incelenebilir.

Tablo 3. İşletme rezervinin bileşenleri ve yüzdeleri, (Operating reserve componenets and percentages)

Bileşenler	Rezerve Bileşenleri	Rezerve edilecek oran
Yük	Saatlik yük (%)	10
Üretim	Solar üretim (%)	25
	Rüzgar üretim (%)	50

Tablo 3 te ki üç bileşenin her biri o saat için yapılan simülasyonlarda seçilen ilgili değerlerin saatlik yük ile ve yenilenebilir enerji elemanlarının çıkışları ile çarpılıp toplanarak o saatteki mevcut yüke eklenmesi ile simülasyonlar gerçekleştirilir. Seçilen sayısal değerlerin böyle olmasının sebebi HOMER programında çoğu sistem için uygun

olduğu belirtildiği içindir. Kapasite eksikliği hesaplanırken beslenmeyen enerjiye bakmak yeterlidir. Eğer beslenmeyen enerji sıfırdan büyüğe kapasite eksikliğinin de olacağı kesindir. Beslenmeyen enerji sıfırdan küçük olduğunda da kapasite eksikliği söz konusu olabilir. Çünkü beslenmeyen enerji sadece yükün beslenmesi ile ilgili olup işletme rezervleri dahil edilmez. Oysaki beslenmeyen enerji sıfır olduğu durumlarda üretilen ve batarya grubundaki enerjinin işletme rezervlerini karşılayamadığı durumlarda olabilmektedir. Dolayısıyla kapasite eksikliği bu iki farklı durum için Eş. 36 ile hesaplanır. Diğer durumlar için kapasite eksikliği sıfırdır.

$$E_{\text{kapasite eksikliği}} = \begin{cases} E_{\text{beslenmeyen}} + (E_{\text{rüzgar rez}} + E_{\text{pv rez}} + E_{\text{yük rez}}) * \eta_{\text{dönüştürücü}} & \text{Eğer } E_{\text{beslenmeyen}} > 0 \\ (E_{\text{rüzgar rez}} + E_{\text{pv rez}} + E_{\text{yük rez}} - \frac{E_{\text{net}}}{\eta_{\text{bat}}}) * \eta_{\text{dönüştürücü}} & \text{Eğer } E_{\text{beslenmeyen}} \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

2.5. Maliyet Fonksiyonun Elde Edilişi (Cost Function Formulation)

Daha önce belirtildiği üzere bu çalışmada kullanılan maliyet fonksiyonu COE'dir. COE'nin elde edilişi Şekil 6'daki akış diyagramında gösterilmektedir.

COE hesabı için öncelikle PSO algoritması tarafından önce rastgele belirlenen ve sonra optimize edilmeye çalışılan PV panel sayısı (N_{pv}), rüzgar türbini sayısı ($N_{\text{rüz}}$), batarya sayısı (N_{bat}) ve dönüştürücü gücü ($P_{\text{dön}}$) ve bu elemanların proje başlangıcındaki birim ücretleri ile başlangıç sermayesi hesaplanır. Başlangıç sermayesi Eş. 37 ile hesaplanır.

$$C_{\text{başlangıç}} = N_{\text{pv}} * \text{birim fiyat}_{\text{pv}} + N_{\text{rüzgar}} * \text{birim fiyat}_{\text{rüzgar}} + N_{\text{bat}} * \text{birim fiyat}_{\text{bat}} + P_{\text{dön}} * \text{birim fiyat}_{\text{dön}} \quad (37)$$

Daha sonra işletme ve bakım maliyeti (i&B) hesaplanır. İşletme ve bakım maliyeti bileşenin çalıştırılması ve bakımıyla ilgili maliyettir. Her bileşene ait işletme ve bakım maliyetleri birim maliyet ile eleman büyüklükleri çarpılarak hesaplanır. Daha sonra bütün elemanların işletme ve bakım maliyetleri toplanarak bütün sistemin işletme ve bakım maliyeti bulunmuş olur. İşletme ve bakım maliyetleri yıllık giderlerdir. İşletme ve bakım maliyeti Eş. 38 ile hesaplanır.

$$C_{\text{i\&B}} = N_{\text{pv}} * i\&B_{\text{pv}} + N_{\text{rüzgar}} * i\&B_{\text{rüzgar}} + N_{\text{bat}} * i\&B_{\text{bat}} + P_{\text{dön}} * i\&B_{\text{dön}} \quad (38)$$

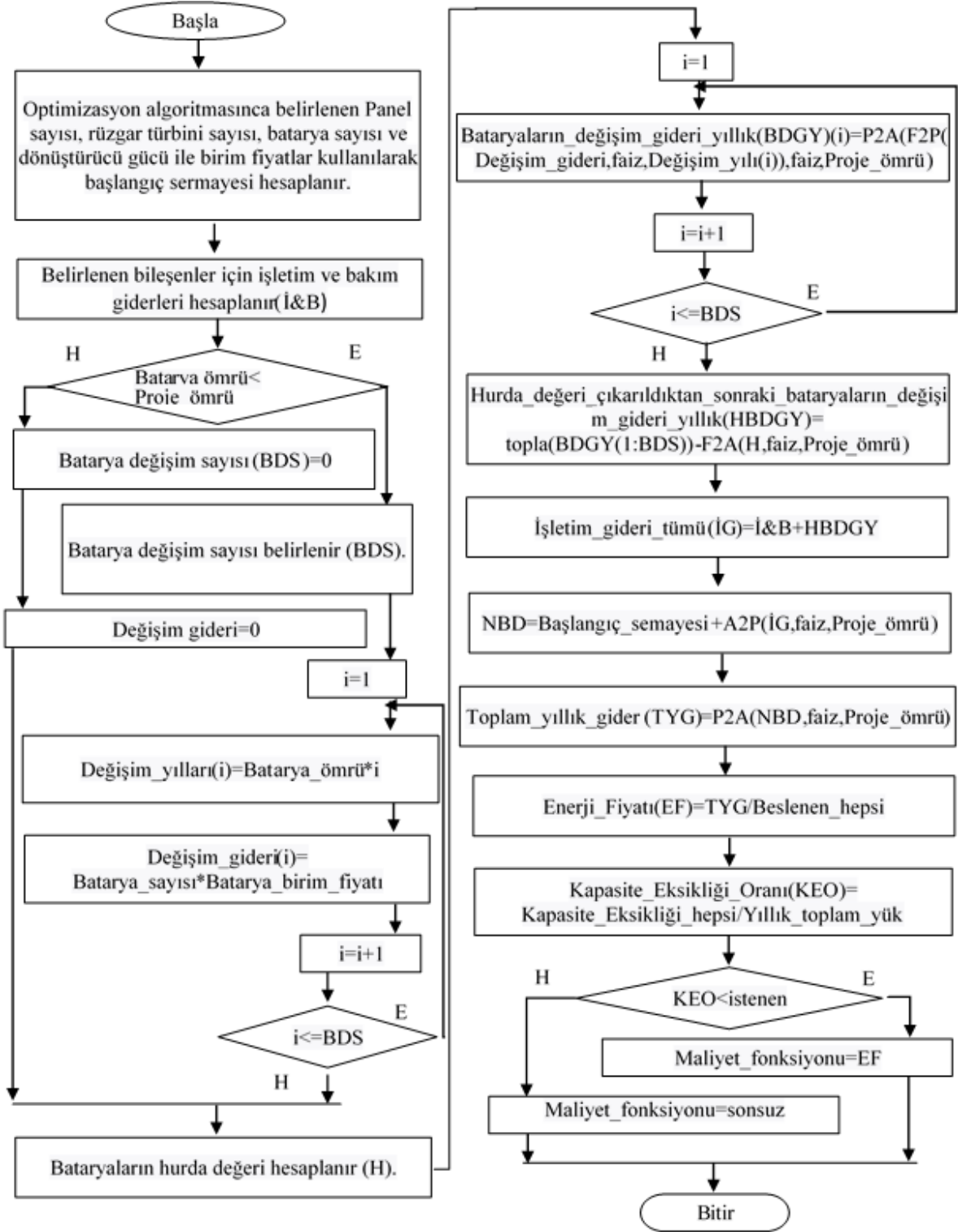
İşletme ve bakım maliyeti hesaplandıktan sonra proje ömrü ($R_{\text{proj}} = 25$ yıl) boyunca kaç kez batarya değişimi yapılacağı basit bir matematik hesabı ile yapılır. Batarya değişim sayısı Eş. 39 ile hesaplanır.

$$N_{\text{değişim}} = \text{yukarı_yuvarla} \left(\frac{R_{\text{proj}} - R_{\text{bat}}}{R_{\text{bat}}} \right) \quad (39)$$

Kaç kez batarya değişimi ve hangi yıllarda batarya değişimi yapılacağı hesaplandıktan sonra bir bataryanın değişim maliyeti $değişim_{\text{bat}}$ dikkate alınarak toplam değişim maliyeti Eş. 40 ile hesaplanır.

$$C_{\text{değişim}} = N_{\text{değişim}} N_{\text{bat}} deşim_{\text{bat}} \quad (40)$$

Bataryaların son değiştikleri yıldan proje ömrü sonuna kadar ki sürede ömürleri tam olarak bitmemesi durumunda bataryaların kalan



Şekil 6. Ekonomik hesaplamalar ve Maliyet fonksiyonunun elde edilmesi (Economic calculations and obtaining the cost function)

ömürleri ile hurda değerleri hesaplanmalıdır. Kalan ömür Eş. 41 ve hurda değeri Eş. 43 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{kalan} = R_{bat} - (R_{proj} - R_{değişim}) \quad (41)$$

$$R_{değişim} = R_{bat} \text{INT} \left(\frac{R_{proj}}{R_{bat}} \right) \quad (42)$$

$$\text{Hurda_değeri} = C_{değişim} \left(\frac{R_{kalan}}{R_{bat}} \right) \quad (43)$$

Batarya amortismanı doğrusal kabul edilmiş olup, hurda değeri kalan ömürle doğru orantılı olarak hesaplanmıştır. Bu adımdan sonra bataryaların yıllık yenileme maliyeti hesabı yapılmalıdır. Yıllık yenileme maliyeti, proje ömrü boyunca ortaya çıkan toplam yenileme

Tablo 4. Simülasyonda kullanılan ekipmanlar ve değerler (Equipments and values used in simulation)

Parametre	Değer
Faiz Oranı (i)	%19
Proje ömrü(n)	25 yıl
Kapasite eksikliği oranı (KEO)	%30
PV panel fiyatı (1kw)	\$500
PV İ&B price (1kw)(\$/yıl)	\$2
Seçilen Rüzgar Türbini	BWCXL.1
Rüzgar Türbini fiyatı (1kw)	\$1100
Rüzgar Türbini İ&B fiyatı (1kw)(\$/yıl)	\$2
Seçilen Batarya	Hoppecke 24 OPzS 3000
Batarya Birim Fiyatı	\$660
Batarya İ&B fiyatı (1kw)(\$/yıl)	\$2
Batarya ömrü	10 yıl

Tablo 5. Güneş, rüzgar ve yük verisi (Solar, wind and load data)

Günlük radyasyon (kWh/m ² /d)											
Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
2,012	2,708	4,110	5,300	6,302	6,788	6,812	6,088	4,825	3,371	2,426	1,867
Rüzgar hızı (m/s)											
Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
8,30	4,80	5,00	3,00	6,25	2,60	10,00	7,37	4,00	6,75	7,75	5,00
Yük karakteristiği											
Yıllık ortalama(kWh/d)				Yıllık ortalama(kWh/hr)				En büyük yük (kW)			
7427				309				539			

maliyetlerinden proje ömrü sonundaki hurda değeri çıkarılarak maliyetlerin yıllık değeri hesaplanarak bulunur. Buradan sonraki hesaplamalarda kullanılan 4 adet ekonomi bilimi terimleri ve kısa isimleri aşağıdaki gibidir. Bu formüllerdeki i =faiz oranı (%19), n =yıl, A =yıllık ödeme (taksit), F =Gelecek değer, P =şimdiki(bugün ki) değerdir.

Gelecekteki ödemenin bugün ki değeri [$F2P(F, i, n)$]

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (44)$$

Bugün ki ödemenin yıllık taksitleri [$P2A(P, i, n)$]

$$A = \frac{P i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (45)$$

Gelecekteki ödemenin yıllık taksitleri [$F2A(F, i, n)$]

$$A = \frac{F i}{(1+i)^n - 1} \quad (46)$$

Yıllık taksitlerin bugün ki değeri [$A2P(A, i, n)$]

$$P = \frac{A ((1+i)^n - 1)}{i(1+i)^n} \quad (47)$$

Yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla bataryaların yıllık yenileme maliyeti Eş. 48 ile hesaplanır.

$$C_{yillik_yenileme}(k) = P2A(F2P(C_{degisim}(k), i, yil_{degisim}(k)), i, R_{proj}) \quad (48)$$

Hurda değerinden sonraki yıllık yenileme maliyeti ise Eş. 49 ile hesaplanır.

$$C_{hurda_sonrasi_yillik_yenileme} = \sum_{j=1}^{N_{degisim}} C_{yillik_yenileme}(j) - F2A(Hurda_degeri, i, R_{proj}) \quad (49)$$

Bulunan hurda değerinden sonraki yıllık yenileme maliyeti daha önce hesaplanan yıllık bakım ve işletme maliyeti ile toplanarak toplam işletme maliyeti bulunur. Toplam işletme maliyeti, yıllık işletme ve bakım maliyetleri ($C_{i\&B}$) ve hurda değerinden sonraki yıllık yenileme maliyetinin ($C_{hurda_sonrasi_yillik_yenileme}$) toplamıdır ve Eş. 50 ile hesaplanır.

$$C_{toplam_isletme} = C_{i\&B} + C_{hurda_sonrasi_yillik_yenileme} \quad (50)$$

Daha sonra sistemin toplam bugün ki maliyeti hesaplanır. Net bugün ki değer (NBD) sisteme ömrü boyunca yapılan maliyetleri içerir. Bu maliyetler, yatırım maliyetlerini, yenileme maliyetlerini, işletme ve bakım maliyetlerini ve hurda getirilerini içerir. Buna göre sistemin toplam bugün ki maliyeti Eş. 51 ile hesaplanır.

$$C_{NBD} = C_{baslangic} + A2P(C_{toplam_isletme}, i, R_{proj}) \quad (51)$$

Bu adımdan sonra toplam yıllık maliyet Eş. 52 ile hesaplanır.

$$C_{yillik_toplam} = P2A(C_{NBD}, i, R_{proj}) \quad (52)$$

Son olarak PSO algoritması için maliyet fonksiyonu görevi yapan Enerji maliyeti (COE) hesaplanır. COE sistem tarafından servis edilen elektrik enerjisinin kWh başına ortalama maliyeti olarak tanımlanır. COE Eş. 53 ile hesaplanır.

$$COE = \frac{C_{yillik_toplam}}{\sum_{j=1}^{8760} E_{bestenen}(j)} \quad (53)$$

Güvenilirlik parametresi olan kapasite eksikliği oranı(KEO) parametresi ise Eş. 54 ile hesaplanmaktadır.

$$KEO = \frac{\sum_{j=1}^{8760} E_{kapasite_eksikligi}(j)}{\sum_{j=1}^{8760} E_{yuk}(j)} \quad (54)$$

Burada anlatılan adımlar Şekil 6 ile paralel takip edilirse algoritma daha iyi anlaşılacaktır.

Tablo 6. Çalışmada kullanılan bilgisayar, program ve programlama dili (Computer, program and programming language used in the study)

İşlemci:	Pentium® Dual-Core CPU T4500 2,30 GHz
RAM:	2 GB
Hard Disk Boyutu:	256 GB SSD
İşletim Sistemi:	Windows 10 Home 64 bit
Program:	MATLAB R2019a
Programlama Dili:	Matlab programlama dili

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

4 elemandan oluşan HYEK(PV-WT-BAT-INV), HOMER ve PSO algoritması ile ayrı ayrı optimize edilmiştir. Optimizasyon, aynı yük ve sistem elemanı koşulları altında HOMER yazılımı ve PSO algoritması kullanılarak bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Elektriksel güvenilirlik, ekonomi ve işlem süresi bakımından optimizasyon sonuçları ayrı ayrı elde edilmiş ve önemli değerler arasındaki farklılıklar HOMER sonuçları baz alınarak yüzde olarak Tablo 7’de verilmiştir. HOMER ve PSO için arama uzayları Tablo 8’de görülebilir.

Tablo 7 incelendiğinde optimizasyon süresi bakımından PSO’nun HOMER’den çok daha hızlı sonuca ulaştığı görülmektedir. PSO’nun HOMER’den çok daha kısa sürede sonuca ulaşması Batista ve

ekibinin 2023 yılında yapmış olduğu çalışmayla [3] benzerlik göstermiştir. Bu anlamda birkez daha metasezgisel algoritmaların HYEK optimizasyonunda simülasyon tabanlı yazılımlara göre daha avantajlı olduğu kanıtlanmıştır. HOMER’in ise metasezgisel algoritmalara göre çok daha yavaş kaldığı gözlenmiştir. Arama uzayı problemi ve hataları ortadan kaldırılmış, kullanıcının deneme yanılmalar yerine tek seferde sonuca ulaşması sağlanmıştır. Ayrıca kullanıcı bakımından arama uzayı oluşturulmaması nedeniyle PSO kullanılarak yapılan optimizasyonun HOMER’e göre daha kolay yapılabildiği görülmüştür. Bu anlamda PSO daha kullanıcı dostudur ve sonuçların elde edilmesi daha otomatiktir. Benzer şekilde Katsigiannis vd. tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada da [47] metasezgisel GA ve TS algoritmalarının HOMER’den daha hızlı sonuca ulaştıkları bahsedilmektedir. Ayrıca çalışmada HOMER’i kullanmadan önce metasezgisel algoritmalarla hızlıca optimizasyon yapıp yakınsanan değerlere göre HOMER’in arama uzayı oluşturulmuştur. Singh ve ekibinde çalışmalarında aynı şekilde ABC ve PSO metasezgiselleri ile HOMER’i kıyaslamışlardır [48]. Her iki algoritmanında işlem süresi bakımından HOMER’den üstün olduklarından bahsedilmektedir. Javed vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada GA ile HOMER’i kıyaslayarak GA’nın 60 iterasyonda gerçekleştirdiği optimizasyonu HOMER’in saatlerce sürede gerçekleştirdiğinden bahsetmişlerdir [49]. GA ile elde edilen sonuçların HOMER kadar doğru olduğunda bahsedilmiştir. Aynı şekilde bu çalışmanın bulgularında yapılan çalışmayı destekler niteliktedir. Hoarca vd. tarafından 2023 yılında yapılmış olan çalışmada da metasezgisel GA’nın optimizasyonda HOMER’den daha üstün olduğunda bahsedilmektedir [50].

Tablo 7. Karşılaştırmalı Optimizasyon sonuçları (Comparative simulation results)

Ekonomik Sonuçlar						
	Başlangıç Sermayesi (\$)	İşletme Maliyeti(\$/yr)	Toplam NBD(\$)	Toplam Yıllık Sermaye(\$/yr)	Toplam İ&B Maliyeti(\$/yr)	Enerji Maliyeti(\$/ kWh)
HOMER	1700500	18651	1797395	327325	5500	0,164
PSO	1733350	17049	1812900	333650	5614	0,1669
Fark	+%1,895		+%0,085			+%1,737
Elektriksel Sonuçlar						
	PV Üretimi (kWh/yıl)	Rüzgar Üret. (kWh/yıl)	Toplam Üret. (kWh/yıl)	Beslenen (kWh/yıl)	Beslenmeyen (KWh/yıl)	Fazla (kWh/yıl)
HOMER	1422371	1837531	3259902	2108154	602691	834111
PSO	1343500	2015200	3358700	2101600	609220	947140
Fark				+%0,031	+%1,071	
	Kapasite Eksikliği (kWh/yıl)	Batarya şarj-deşarj hacmi (kWh/yıl)	Batarya Ömrü(yıl)	Batarya Otonomisi(saat)	Kapasite Eksikliği Oranı (%)	
HOMER	807455	573780	10,70	8,14	30	
PSO	821490	526170	11,06	7,74	30	
Boyutlandırma Sonuçları						Optimizasyon Süreleri (sn)
	PV Gücü (kW)	Rüz. Türbini (sayı)	Batarya (sayı)	Dönüştürücü (kW)		
HOMER	1100	600	600	450		936
PSO	1039	658	571	539		17

Tablo 8. Arama uzayları (Search Spaces)

HYEK TİPİ (PV-WT-BAT-DÖN)				
	PV	WT	BAT	DÖN
HOMER	0:50:2000 (41 farklı değer)	0:50:1000 (21 farklı değer)	0:50:1000 (21 farklı değer)	0:50:600 (13 farklı değer)
	Bütün farklı kombinasyon sayısı:41*21*21=235053			
PSO	0-2000 (sadece alt ve üst sınırlar)	0-1000 (sadece alt ve üst sınırlar)	0-1000 (sadece alt ve üst sınırlar)	0-600 (sadece alt ve üst sınırlar)
	Bütün farklı kombinasyon sayısı:sonsuz			

Çalışmanın literatürdeki metasezgisel algoritmalarla yapılan HYEK çalışmalarından farkının “kapasite eksikliği” güvenilirlik parametresinin metasezgisel bir algoritma ile ilk kez kullanılmış olmasıdır. Bu anlamda yapılan literatür taramaları ayrıca son yıllarda yapılmış olan tarama makaleleri ile desteklenmiştir. Son yıllarda HYEK optimizasyonunda kullanılan metasezgisel optimizasyon çalışmaları hakkında yapılmış olan kapsamlı tarama çalışmaları “kapasite eksikliği” parametresinin daha önce hiçbir metasezgisel çalışma ile birlikte kullanılmadığını göstermektedir. Bu tarama çalışmaları Agajie vd. tarafından 2023 yılında yapılmış olan çalışma [14], Rathod ve Subramanian tarafından 2022 yılında yapılmış olan çalışma [51], Akorede vd. tarafından 2020 yılında yapılmış olan çalışma [52], Iweh vd. tarafından 2022 yılında yapılmış olan çalışma [53], Bouaouda ve Sayouti tarafından 2022 yılında yapılmış olan çalışma [13], Gusain vd. tarafından 2023 yılında yapılmış olan çalışma [12], Mandelli ve ekibinin 2016 yılında gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarıdır [15]. Dolayısıyla bu çalışmalardan elde edilen bulgular neticesinde “kapasite eksikliği” parametresinin metasezgisel algoritmalarla birlikte HYEK optimizasyonunda ilk kez kullanılmış olması çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

Ayrıca metasezgisel tabanlı önceki çalışmalarda detaylı hesaplamalara yer verilmediği görülmektedir. Örneğin bataryaların nasıl şarj-deşarj edildiği ile ilgili çalışmalar yapılmamıştır. Oysaki bataryaların şarj-deşarj kuralı çok önemli bir parametredir. Çünkü bu kuralın, batarya ömrü, fazla enerji, beslenmeyen enerji, beslenen enerji ve dolayısıyla enerji maliyeti üzerinde önemli etkisi vardır. Ayrıca önceki çalışmalarda batarya ömrü, fazla enerji, beslenmeyen enerji, beslenen enerji gibi parametreler hesaplanmamıştır. Oysaki bu parametreler sistem hakkında önemli bilgiler içeren ve sistemin eksik-güçlü yönlerini yansıtan önemli parametrelerdir. Zaten HOMER bu parametrelerin hepsini bu yüzden hesaplamaktadır.

HOMER ile tasarlanan araç test edildiğinde tek başına optimizasyon süreçlerinde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Yine de ticari yazılım olan HOMER ile çalışmak veya HOMER’in sahip olduğu eklentilerden faydalanmak isteniyorsa bu çalışmada tasarlanan araç ile hızlı bir şekilde optimum değerler bulunarak HOMER programının arama uzayı bu optimum çevresinde sık değerlerle oluşturulabilir. Böylece çözüme çok daha kısa yoldan ulaşılmış olunur.

4. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada HOMER yazılımının olumsuzluklarını bertaraf edip daha hızlı, daha pratik ve özgün bir optimizasyon aracı oluşturulmuştur. Sonuçlara göre, PSO algoritması ve tasarlanan sevk stratejisi hibrit sistem optimizasyonunda çok başarılı sonuçlar üretmiştir. Sonuçlar ekonomik ve elektriksel yönlerden HOMER ticari hibrit sistem optimizasyon aracının sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, Enerji maliyetinde %1,737, Toplam Net Bugün ki Maliyette %0,85, Başlangıç Sermayesinde %1,895, Beslenen yüklerde %0,031 ve Beslenemeyen yüklerde %1,071’lik fark çıkmış olup sonuçların güvenilirliği ortaya konmuştur. Sevk stratejisinin bu anlamda kullanılabilir, etkili ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır. İşlem hızı bakımından yapılan karşılaştırmada aynı sistemi optimize etmede, HOMER yazılımının 936 saniyede elde etmiş olduğu sonucu 17 saniyede elde ederek tasarlanan sistemin daha hızlı sonuca ulaştığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ve literatürdeki destekleyici araştırmalar, hedeflenen amaca ulaşıldığını göstermektedir. Gelecekte, aylık ortalama meteoroloji ile yük verilerinden optimizasyon süreçlerinde kullanılmak üzere sentetik olarak saatlik gerçekçi yük, rüzgar hızı ve radyasyon verilerini üretebilen ve bu verileri kullanarak optimizasyon gerçekleştirebilen bir araç oluşturulabilir. Derin öğrenme veya makine öğrenimi optimizasyonu için gereken büyük miktarlarda girdi ve optimize edilmiş çıktı verisi çok hızlı olan ve kendi verisini üretebilen araç sayesinde elde edilerek

derin öğrenme veya makine öğrenimi algoritmaları HYEK optimizasyonu süreçlerine dahil edilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Hoseinzadeh S., Astiaso Garcia D., Techno-economic assessment of hybrid energy flexibility systems for islands’ decarbonization: A case study in Italy , Sustainable Energy Technologies and Assessments, 51, 101929, 2022.
2. Can Ö., Eroğlu H., Öztürk A., Automatic generation controller based on whale optimization algorithm in PV-thermal power systems, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (2), 915–926, 2022.
3. Batista N. E., Carvalho P. C. M., Fernández-Ramírez L. M., Braga A. P. S., Optimizing methodologies of hybrid renewable energy systems powered reverse osmosis plants , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 182, 113377, 2023.
4. Bourennani F., Rahnamayan S., Naterer G. F., Optimal Design Methods for Hybrid Renewable Energy Systems , 12 (2), 148–159, 2014.
5. Oladeji I., Zamora R., Lie T. T., Security constrained optimal placement of renewable energy sources distributed generation for modern grid operations , Sustainable Energy, Grids and Networks, 32, 100897, 2022.
6. Gjorgiev B., Li, B., Sansavini G., Calibration of cascading failure simulation models for power system risk assessment , Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL), 1911–1918, 2019.
7. Karimi D., Hajizadeh A., Kene R. O., Olwal T. O., Energy Management and Optimization of Large-Scale Electric Vehicle Charging on the Grid , World Electric Vehicle Journal 14 (4), 95, 2023.
8. Zheng S., Fu S., Pu Y., Li D., Arıcı M., Wang D., Yıldız Ç., Energy-saving microgrid system for underground in-situ heating of oil shale integrating renewable energy source: An analysis focusing on net present value , Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 104717, 2023.
9. Bapin Y., Bagheri M., Zarikas V., Optimal Allocation of Spinning Reserves in Interconnected Energy Systems with Demand Response Using a Bivariate Wind Prediction Model , Energies 12 (20), 3816, 2019.
10. Bapin Y., Application Of Probabilistic Methods For Effective And Reliable Operation Of Electrical And Electromechanical Systems , Nazarbayev University School of Engineering and Digital Sciences, 2021.
11. Shahhoseini A., Azimi-Shaghghi A., Yazdanipour S., Techno-Economic Study and Sensitivity Analysis of an On-Grid Photovoltaic-Battery-Diesel Hybrid System Under Blackouts Conditions: A Case Study on an Industrial Unit in Iran , SSRN Electronic Journal, 2022.
12. Gusain C., Mohan Tripathi M., Nangia U., Study of Meta-heuristic Optimization Methodologies for Design of Hybrid Renewable Energy Systems , Thermal Science and Engineering Progress, 39, 101711, 2023.
13. Bouaouda A., Sayouti Y., Hybrid Meta-Heuristic Algorithms for Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy System: A Review of the State-of-the-Art , Archives of Computational Methods in Engineering, 29 (6), 4049–4083, 2022.
14. Agajie T.F., Ali A., Fopah-Lele A., Amoussou I., Khan B., Velasco C.L.R., Tanyi E., A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage Systems, Energies 16 (2), 642, 2023.
15. Mandelli S., Barbieri J., Mereu R., Colombo E., Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 1621–1646, 2016.
16. Tabak A., Kayabasi E., Guneser M. T., Ozkaymak M., Grey wolf optimization for optimum sizing and controlling of a PV/WT/BM hybrid energy system considering TNPC, LPSP, and LCOE concepts, <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1668880>, 44 (1), 1508–1528, 2019.
17. Wei H., Chen S., Pan T., Tao J., Zhu M., Capacity configuration optimisation of hybrid renewable energy system using improved grey wolf optimiser , International Journal of Computer Applications in Technology, 68 (1), 1–11, 2022.
18. Dong W., Li Y., Xiang J., Optimal Sizing of a Stand-Alone Hybrid Power System Based on Battery/Hydrogen with an Improved Ant Colony Optimization , Energies, 9 (10), 785, 2016.

19. Javed M. S., Ma T., Techno-economic assessment of a hybrid solar-wind-battery system with genetic algorithm , *Energy Procedia*, 158, 6384–6392, 2019.
20. Hlal I. M., Ramachandaramurthy V. K., Hafiz Nagi F., Bin Tuan Abdullah T. A. R., Optimal Techno-Economic Design of Standalone Hybrid Renewable Energy System Using Genetic Algorithm , *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 268 (1), 12012, 2019.
21. Samy M. M., Barakat S., Ramadan H. S., A flower pollination optimization algorithm for an off-grid PV-Fuel cell hybrid renewable system , *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (4), 2141–2152, 2019.
22. Fathy A., Kaaniche K., Alanazi T. M., Recent Approach Based Social Spider Optimizer for Optimal Sizing of Hybrid PV/Wind/Battery/Diesel Integrated Microgrid in Aljouf Region , *IEEE Access*, 8, 57630–57645, 2020.
23. Kharrich M., Kamel S., Abdeen M., Mohammed O. H., Akherraz M., Khurshaid T., Rhee S. B., Developed approach based on equilibrium optimizer for optimal design of hybrid PV/Wind/Diesel/Battery Microgrid in Dakhla, Morocco , *IEEE Access*, 9, 13655–13670, 2021.
24. Al-Akayshe A. S., Kuznetsov O. N., Sultan H. M., Application of Equilibrium Optimization Algorithm for Optimal Design of PV/Hydroelectric Pumped Storage Energy system, Case Study-Iraq , *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*, 1354–1359, 2021.
25. Mouachi R., Jallal M. A., Gharnati F., Raoufi M., Multiobjective Sizing of an Autonomous Hybrid Microgrid Using a Multimodal Delayed PSO Algorithm: A Case Study of a Fishing Village , *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2020, 2020.
26. Taslimi M., Ahmadi P., Ashjaee M., Rosen M. A., Design and mixed integer linear programming optimization of a solar/battery based Conex for remote areas and various climate zones , *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101104, 2021.
27. Rahmani N., Mostefai M., Multi-Objective MPSO/GA Optimization of an Autonomous PV-Wind Hybrid Energy System , *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12 (4), 8817–8824, 2022.
28. Bo G., Cheng P., Dezhi K., Xiping W., Chaodong L., Mingming G., Ghadimi N., Optimum structure of a combined wind/photovoltaic/fuel cell-based on amended Dragon Fly optimization algorithm: a case study, <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2105453>, 44 (3), 7109–7131, 2022.
29. Xu Y. P., Ouyang P., Xing S. M., Qi L. Y., Khayatnezhad M., Jafari H., Optimal structure design of a PV/FC HRES using amended Water Strider Algorithm , *Energy Reports*, 7, 2057–2067, 2021.
30. Jamshidi M., Askarzadeh A., Techno-economic analysis and size optimization of an off-grid hybrid photovoltaic, fuel cell and diesel generator system , *Sustainable Cities and Society*, 44, 310–320, 2019.
31. Lee K., Kum D., Complete design space exploration of isolated hybrid renewable energy system via dynamic programming , *Energy Conversion and Management*, 196, 920–934, 2019.
32. El-Sattar H. A., Kamel S., Hassan M. H., Jurado F., Optimal sizing of an off-grid hybrid photovoltaic/biomass gasifier/battery system using a quantum model of Runge Kutta algorithm , *Energy Conversion and Management*, 258, 115539, 2022.
33. Maleki A., Askarzadeh A., Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept , *Solar Energy*, 107, 227–235, 2014.
34. Ayan S., Toylan H., Size optimization of a stand-alone hybrid photovoltaic/wind/battery renewable energy system using a heuristic optimization algorithm , *International Journal of Energy Research*, 46 (11), 14908–14925, 2022.
35. Cetinbas I., Tamyurek B., Demirtas M., The Hybrid Harris Hawks Optimizer-Arithmetic Optimization Algorithm: A New Hybrid Algorithm for Sizing Optimization and Design of Microgrids , *IEEE Access*, 10, 19254–19283, 2022.
36. Mokhtara C., Negrou B., Settou N., Settou B., Samy M. M., Design optimization of off-grid Hybrid Renewable Energy Systems considering the effects of building energy performance and climate change: Case study of Algeria , *Energy*, 219, 119605, 2021.
37. Kamal M. M., Ashraf I., Fernandez E., Optimal sizing of standalone rural microgrid for sustainable electrification with renewable energy resources , *Sustainable Cities and Society*, 88, 104298, 2023.
38. Rateele T. N., Thamae L. Z., An optimization approach for the economic dispatch incorporating renewable energy resources into Lesotho power sources portfolio , *Heliyon*, 9 (4), e14748, 2023.
39. Tezer T., Yaman R., Yaman G., Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 840–853, 2017.
40. Köse B., Aygün H., Pak S., Parameter estimation of the wind speed distribution model by dragonfly algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (3), 1747–1756, 2023.
41. Wadi M., Elmasry W., Tamyigit F.A., Important considerations while evaluating wind energy potential, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 947–962, 2022.
42. Saheb D., Koussa M., Hadji S., Technical and economical study of a stand-alone wind energy system for remote rural area electrification in Algeria , *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1 (12), 638–643, 2014.
43. Kennedy J., Eberhart R., Particle swarm optimization , *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948.
44. Altunbey Özbay F., Özbay E., A new approach for gender detection from voice data: Feature selection with optimization methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (2), 1179–1192, 2022.
45. Manwell J. F., McGowan J. G., Lead acid battery storage model for hybrid energy systems , *Solar Energy*, 50 (5), 399–405, 1993.
46. Dimitrios G., Interdepartmental Master Program in Business Administration , Interdepartmental Master Program in Business Administration, 2019.
47. Katsigiannis Y.A., Kanellos F.D., Papaefthimiou S., A software tool for capacity optimization of hybrid power systems including renewable energy technologies based on a hybrid genetic algorithm—tabu search optimization methodology , *Energy Systems*, 7 (1), 33–48, 2016.
48. Singh S., Singh M., Kaushik S. C., Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system , *Energy Conversion and Management*, 128, 178–190, 2016.
49. Javed M. S., Song A., Ma T., Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm , *Energy*, 176, 704–717, 2019.
50. Hoarcă I. C., Bizon N., Şorlei I. S., Thounthong P., Sizing Design for a Hybrid Renewable Power System Using HOMER and iHOGA Simulators , *Energies* 16 (4), 1926, 2023.
51. Rathod A. A., Subramanian B., Scrutiny of Hybrid Renewable Energy Systems for Control, Power Management, Optimization and Sizing: Challenges and Future Possibilities , *Sustainability*, 14 (24), 16814, 2022.
52. Akorede M. F., Oladeji A. S., Ariyo B. O., Omeiza I. O. A., Marzband M., Review of Researches on Techno-Economic Analysis and Environmental Impact of Hybrid Energy Systems , *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 6 (2), 78–108, 2020.
53. Iweh C. D., Clarence S. G., Roger A. H., The Optimization of Hybrid Renewables for Rural Electrification: Techniques and the Design Problem , *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70 (9), 222–239, 2022.

