



Maximum power point tracker design for photovoltaic systems under partial shading conditions by using cheetah optimizer algorithm

Murat Çıkan*

Adana Organize Industrial Region of Vocational School Technical Sciences, Çukurova University, Adana, 01410, Türkiye

Highlights:

- Cheetah optimizer algorithm
- Maximum power point tracker
- 5 parameter PV cell model

Keywords:

- Partial shading
- Solar energy system
- Meta-heuristic algorithm
- MPPT design

Article Info:

Research Article

Received: 02.10.2022

Accepted: 01.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1183267

Correspondence:

Author: Murat Çıkan
e-mail: mcikan@cu.edu.tr
phone: +90 322 394 5234 /
119

Graphical/Tabular Abstract

The study focuses on the maximisation of power output in PV systems under varying radiation levels, utilising meta-heuristic algorithms, including PSO-GSA, GWO, and CO, to track the maximum power point. Statistical analyses demonstrate that the CO algorithm exhibits superior performance, achieving the maximum power point significantly faster than GWO and PSO-GSA algorithms. These results emphasise the significant potential of the CO algorithm in enhancing the efficiency of PV systems. A block diagram of the PV system is shown in Figure A.

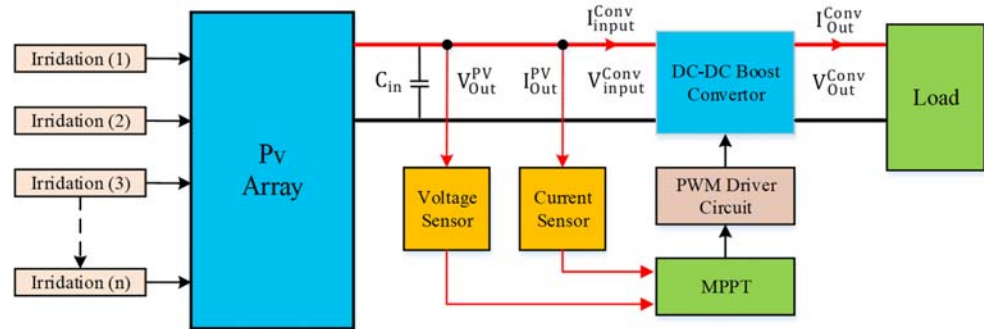


Figure A. Block diagram of the PV system

Purpose:

The purpose of this study is to optimize the power outputs of partially shaded PV arrays using meta-heuristic search algorithms. The CO algorithm, GWO, and PSO-GSA hybrid algorithms are preferred for MPPT design. Although CO is a relatively new meta-heuristic search algorithm, it is used for the first time in this article for solving the MPPT problem. The performances of the preferred algorithms are compared using over 15 statistical methods. All models used in the analysis are written as MATLAB scripts, providing a more flexible working structure for the test system.

Theory and Methods:

The mathematical models of PV cells and DC-DC converters are described in detail. A mathematical model of cheetah hunting strategies is presented. Matlab script codes based on the developed mathematical method and power outputs of series-connected PV panels under different irradiance values are also analysed. In addition, the real-time power output of the PV system is compared with the results obtained with theoretical approaches.

Results:

Algorithms are executed 1000 times according to the defined objective function. All algorithms reached the global value in different numbers. CO (994/1000) and GWO (256/1000) algorithms showed the best and worst performance respectively.

Conclusion:

This study evaluated the performance of three algorithms in partial shading conditions of photovoltaic (PV) systems. The analysis revealed that the CO algorithm outperformed the others, exhibiting lower error and standard deviation. The CO algorithm frequently captured global optimum points and swiftly reached the maximum power point (MPP) value. These findings indicate that the CO algorithm is a promising option for future maximum power point tracking (MPPT) studies. It is recommended that this algorithm be utilized in forthcoming experimental research and practical applications.



Çita optimizasyon algoritması kullanarak kısmi gölgelenme altındaki fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleyicisinin tasarlanması

Murat Çıkan*^{ID}

Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Adana, 01410, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Çita optimizasyon algoritması
- Maksimum güç noktasının izlenmesi
- PV hücrenin 5 parametrelili modeli

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.10.2022

Kabul: 01.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1183267

Anahtar Kelimeler:

Kısmi gölgelenme,
güneş enerji sistemleri,
çita arama algoritması,
maksimum güç noktası
izleyici tasarımı

ÖZ

Fotovoltaik (PV) sistemler ile enerji üretimi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir paya sahiptir. Panellerin enerji verimliliği %11-28 arasında değişmektedir. PV sistemler kullanılarak üretilen enerjinin maksimum verimi sağlanması istenir. Işınım (radyasyon) ve sıcaklık değerleri güneş enerji sistemlerinde (GES) üretilen enerjinin miktarını belirleyen baskın iki atmosferik faktördür. Panellerdeki kirlenme, gökyüzünde oluşan bulutlanma ve çevresel faktörler gibi çeşitli etmenler panellerin maruz kaldığı ışınım değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum genel olarak kısmi ya da parçalı gölgelenme (PSC) olarak adlandırılır. Farklı ışınım değerleri altında çalışan PV dizilerinde, bir tane global maksimum güç noktası (GMPP) ve birden fazla yerel maksimum güç noktası (LMPP) oluşmaktadır. PSC altında çalışan PV sistemlerde, maksimum güç çıkışının elde edilebilmesi için, PV dizilerinin GMPP'de çalıştırılması gerekmektedir. Bu amaç için, literatürde farklı maksimum güç noktası izleyici (MPPT) tasarımları ve optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir. Bu çalışmada maksimum güç noktasının takibi için farklı meta-sezgisel arama algoritmalarından yararlanılmıştır. Kullanılan arama algoritmaları sırasıyla parçacık sürü-yer çekimi optimizasyon algoritması (PSO-GSA), gri kurt algoritması (GWO) ve çita optimizasyon (CO) arama algoritmasıdır. Maksimum güç noktasının izlenmesi için gerekli olan matematiksel model Matlab ortamında kod olarak yazılmıştır. Sonuçlar Matlab/Simulink ve gerçek zamanlı ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. CO algoritmasının performansı ve üstünlüğü 15'ten fazla istatistiksel yöntem kullanılarak gösterilmiştir.

Maximum power point tracker design for photovoltaic systems under partial shading conditions by using cheetah optimizer algorithm

H I G H L I G H T S

- Cheetah optimizer algorithm
- Maximum power point tracker
- 5 parameter PV cell model

Article Info

Research Article

Received: 02.10.2022

Accepted: 01.11.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1183267

Keywords:

Partial shading,
solar energy systems,
cheetah optimizer algorithm,
maximum power point
tracker design

ABSTRACT

Energy production with photovoltaic (PV) systems has an essential share among renewable energy sources. The energy efficiency of the panels varies between 11-28 %. The energy produced using PV systems is expected to provide maximum efficiency. Radiation and temperature values are the dominant atmospheric factors determining the amount of energy produced in solar energy systems. Various factors such as pollution on the panels, clouding in the sky and environmental factors cause the radiation values to which the panels are exposed to decrease. This condition is called partial shading (PSC). In PV arrays operating under different radiation values, one global maximum power point (GMPP) and more than one local maximum power point (LMPP) are formed. PV arrays must be operated in GMPP in PV systems operating under PSC to obtain maximum power output. For this purpose, different maximum power point tracker (MPPT) designs and optimization algorithms have been developed in the literature. This study uses different meta-heuristic search algorithms to track the maximum power point. The applied search algorithms are particle swarm optimization-gravitational search algorithm (PSO-GSA), grey wolf algorithm (GWO) and cheetah optimizer (CO) search algorithm, respectively. The mathematical model required for monitoring the maximum power point is written as code in the Matlab environment. The results obtained are compared with Matlab/Simulink and real-time measurement data. The performance and superiority of the proposed cheetah optimizer algorithm over the other tested algorithms is demonstrated using more than 15 different statistical methods.

1. Giriş (Introduction)

Elektrik enerjisi, günümüz dünyasının vazgeçilmez bir parçasını oluşturmaktadır ve enerjiye duyulan gereksinim her geçen gün katlanarak artmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların doğadaki rezervleri sınırlıdır ve gün geçtikçe de tükenmektedir. Ayrıca, fosil yakıtların tüketiminde ortaya çıkan karbon monoksit, karbon dioksit, kükürt dioksit, azot dioksit gibi sera gazları doğa ve canlılar üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu gazların açığa çıkması ozon tabakasının delinmesine, asit yağmurlarının oluşmasına ve sera etkisine neden olmaktadır. Fosil yakıtlar birçok olumsuzluğu beraberinde getirmektedir ve bu etkiler iklim değişikliğinde önemli rol oynamaktadır [1]. Ülkeler enerji krizini aşmak ve doğal çevreyi korumak amacıyla güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedirler. Güneş enerji sistemleri, diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında; kurulabilir alanların daha fazla olması, daha az bakıma ihtiyaç duyulması, gürültü kirliliğinin az olması, güç üretimi esnasında düşük gaz emisyonuna sahip olması, herhangi bir hareketli aksamının olmamasından (rüzgâr türbinleri gibi) dolayı canlılara (kuşlar vb.) zarar vermemesi, güneş gibi sınırsız bir enerji kaynağına sahip olması nedenleriyle önemli avantajlara sahiptir [2-5]. Güneş enerji sistemleri, fotovoltaiik (PV) hücrelerin seri ve paralel şekilde bağlanması ile oluşturulur. PV hücreleri, güneşin yaydığı ışınları absorbe eden ve fotoelektrik etkisi ile elektrik akımına dönüştüren cihazlardır. Günümüzde çatı güneş enerji sistemleri (GES) ve tesislerinin sayısı, ekipman maliyetinin uygun hale gelmesi ve güneş hücre verimliliğinin artması nedeniyle artış göstermektedir. Günümüzdeki teknolojik ilerlemelere rağmen PV hücrelerin verimliliği yaklaşık %11-28 civarındadır [6]. Bu nedenle, PV sistemlerinden üretilen enerjinin verimliliğinin artırılarak maksimum seviyede olması gerekir. Elde edilen çıkış gücü, PV hücre verimliliği, ışınım değeri, hücre sıcaklığı ve yük empedansına bağlıdır. Bir PV hücresi için, mevcut durumdaki atmosfer koşullarında maksimum gücün elde edilmesi, sistemin maksimum güç noktasına yakın bir şekilde çalışabilme yeteneğine bağlıdır. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT), PV sistemlerin gerilim ve akım değerlerinin kısıyıcıları vasıtasıyla değiştirilmesi sayesinde gerçekleştirilir. Maksimum gücün izlenmesi sadece güç çıkışını artırmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin ömrünü de uzatır [7].

PV enerji üretiminin birçok avantajı olmasına rağmen, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan biri, kısmi gölgelemenin kaynaklanan enerji kaybıdır. Kısmi gölgeleme diziye ait belirli bölgelerin gölgelediği, diğer bölgelerin ise homojen bir şekilde ışınım altında olduğu durumlarda meydana gelir. Kısmi gölgeleme ile düşük ışınım seviyesinde çalışma koşullarının ayırt edilmesi gerekir. Çünkü düşük ışınım durumunda dizi içindeki tüm modüller düşük ancak homojen bir ışınım alırken, kısmi gölgeleme durumunda sadece belirli modüller gölgelebilir ve bu da belirli noktalarda düşük ışınım oluşmasına, geri kalan dizinin ise daha yüksek ışınım almasına neden olur. Kısmi gölgelemenin başlıca nedenleri PV sistemlerin yakınında mevcut bulunan yapılar (baca, direk, elektrik hatları, ağaçlar, vb.), hareket halindeki bulutlar, düşen yapraklar ve modül yüzeyinde kalan hayvan artıkları olabilir. PV dizi yüzeyinde %9'luk bir gölgeleme meydana gelmesi durumunda, sistem genelinde %50'den fazla bir enerji kaybına sebep olabileceği belirtilmiştir [8]. Kısmi gölgeleme, modül üzerinde sıcak noktalara (hot-spot) neden olabileceğinden, oluşabilecek hasarı önlemek için by-pass diyotları ile bağlantı yapılmaktadır. PV sistemlerde, panelleri kısmi gölgelemeye karşı koruma sağlamak için By-pass diyotları kullanılır. By-pass diyotları, gölgelenen hücreleri devre dışı bırakarak, diğer sağlıklı hücrelerin verimli şekilde çalışmasını sağlar. PV dizilerinin global maksimum güç noktasında (GMPP) ya da bu

noktaya yakın noktalarda çalışması istenir. Herhangi bir sebeple PV dizilerinin gölgelemeye maruz kalması durumunda, çıkış gücünde birden fazla güç noktası (tepe) oluşur. Oluşan bu güç tepeleri bir tane GMPP içerirken, birden fazla lokal güç noktaları (LMPP) içerirler [9]. Global ve Lokal Maksimum Güç Noktaları (GMP ve LMP), PV sistemlerinin verimli çalışması için önemli olan noktalardır. GMP, tüm modüllerin güç çıkışlarının maksimum olduğu noktayı ifade ederken, LMP ise bir veya birden fazla modülün güç çıkışının lokal maksimum olduğu noktayı ifade eder. MPPT algoritmaları, bu iki noktanın izlenmesi ve kontrol edilmesi yoluyla verimli enerji üretimi sağlar. Literatürde GMPP noktasının yakalanması için birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmalar geleneksel metotlar ve meta-sezgisel arama algoritmaları olarak iki kısma incelenebilir. Hill climbing (HC) [10], perturb & observe (P&O) [11], incremental conductance (INC) [12-14] ve ripple correlation (RC) [15] vb. gibi teknikler geleneksel MPPT algoritmaları arasındadır. Bu tarz teknikler, PV sistemlerin çıkış gücünün maksimize edilmesi için geliştirilmişlerdir [16]. Geleneksel yöntemler, tek tepenin olduğu ve LMPP'nin bulunmadığı durumlarda verimli şekilde çalışırlar. Algoritmaların çalışma mekanizmalarında stokastik bir yaklaşımın olmaması algoritmaların hızlı ve güvenilir bir şekilde GMPP noktasında ya da yakınlarında çalışmasına olanak sağlar. PV dizilerin farklı sıcaklık ve radyasyon miktarına maruz kalması durumunda ise çoklu LMPP [17] tepeleri oluşmaya başlayacaktır. Bu durum belirtilen algoritmaların lokal maksimum güç noktalarına takılıp kalmasına ve çoğu zamanda GMPP noktasını yakalayamamasına sebep olacaktır [18]. Bu tür algoritmaların kısmi parçalı gölgeleme koşullarında, GMPP noktasını yakalama başarısı istenilen hassasiyeti sağlamamaktadır.

Geleneksel yöntemlerin barındırdığı avantajlara rağmen, düşük GMPP yakalama başarısından dolayı alternatif olarak meta-sezgisel arama algoritmaları geliştirilmiştir. Birçok araştırmacı farklı meta-sezgisel arama algoritmalarını kullanarak GMPP'nin bulunması için çalışmalar yapmıştır. Meta-sezgisel algoritmalar stokastik (rastgelelik) ilkesine dayandığı için her zaman benzer sonuçları üretmezler. Bununla birlikte her algoritmanın çalışma mekanizması birbirinden farklıdır ve GMPP'nin yakalanabilmesi için uygun arama algoritmasının tespit edilmesi oldukça önemlidir. [19]'de kısmi gölgeleme durumunda, SRA arama algoritmasının test edilen diğer algoritmalara göre %8 daha fazla güç üretimi yaptığı ve GMPP noktasının yakalanmasında ise sürenin %72 oranında azaldığı ifade edilmiştir. [20]'de ise tam-köprülü izoleli yükseltici tip kıyıcı kullanılarak geliştirilmiş gri kurt (IGWO) algoritması yardımıyla %98,54 verimlilik ile kısmi gölgeli durum için maksimum güç noktasının yakalanmasını sağlamıştır. Çıkan & Dogansahin [21], 20 farklı meta-sezgisel arama algoritmasını farklı senaryolar altında GMPP'nin tespiti için test etmişler ve RKO algoritmasının MPPT probleminin çözümünde iyi sonuçlar ürettiği söylemişlerdir. Ref. [22]'de, PSO ve SSO algoritmaları hibrit şekilde kullanılmış ve MPPT probleminin çözümünde başarılı şekilde uygulanmıştır. Gerçek zamanlı kurulan test sisteminin verimliliğinin %99,99 seviyelerinde olduğu ve en iyi koşulda maksimum güç noktasına 0,19 saniyede ulaşıldığı söylenmiştir. Literatürde MPP takibi konusunda yukarıda sayılan metotların dışında geliştirilmiş farklı yöntemler de mevcuttur. [23]'de MPPT'nin performansını artırmak amacıyla yeni bir adaptif kontrol çerçevesi sunulmuştur. Bu sayede sistem kontrolündeki karmaşıklığın azaltıldığı ve PV sistemindeki belirsizliklerin etkin bir şekilde yönetilebildiği makalede ifade edilmiştir. [24] ise düzensiz darbe yoğunluk modülasyon (PDM) tekniği kullanılarak farklı radyasyon seviyelerinde (rezonans frekansında), MPP takibi yapılarak çıkış gücünün maksimize edildiği söylenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda ise verimliliğin %99,93 seviyelerine ulaştığı belirtilmiştir. Bu çalışma da kısmi gölgelemeye maruz kalan PV dizilerin optimizasyonu, meta-sezgisel arama algoritmaları

yardımıyla gerçekleştirilmiştir. MPPT tasarımı için çita optimizasyon (CO) algoritması [25], gri kurt algoritması (GWO) [26] ve parçacık sürü-yer çekimi (PSO-GSA) [27] hibrit arama algoritmaları tercih edilmiştir. CO, oldukça yeni bir meta-sezgisel arama algoritması olmakla birlikte, MPPT probleminin çözümünde ilk kez bu makalede kullanılmıştır. Makalenin literatüre diğer katkısı ise, tercih edilen algoritmaların performanslarının, 15'ten fazla istatistiksel metot ile karşılaştırılmasıdır. Analizlerde kullanılan tüm modeller Matlab-kod (script) olarak yazılmıştır. Bu sayede test sistemi daha esnek bir çalışma yapısına kavuşmuştur.

2. Fotovoltaik Sistemlerin Blok Şeması (Block Diagram of Photovoltaic Systems)

PV sistemlerin temel blok yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, fotovoltaik sistemler PV paneller ve DC-DC kırıyıcıdan meydana gelir. Bölüm 2'de, PV hücrelerin ve DC-DC kırıyıcının matematiksel modelleri detaylı olarak açıklanmıştır. PV hücrelerin ürettikleri güç radyasyon (ışınım) ve panel sıcaklık değerlerine doğrudan bağlıdır. PV dizilerin ürettikleri çıkış gücü ise atmosferik hava değişkenlerinin yanı sıra, panellerin bağlantı şekline ve çıkış yükünün empedans değerine doğrudan bağlıdır. MPPT'nin görevi kısaca yük empedans değerini yükseltici-kırıyıcı yardımıyla, PV panelden maksimum güç çıkışı elde edecek şekilde empedansın panel tarafına indirgeme (uyumlaştırma) işlemini gerçekleştirmesi olarak özetlenebilir. MPPT kontrol cihazları, PV panellerin normal koşullarda ya da kısmi parçalı gölgelenme durumlarında, kurulu sistemlerin maksimum güçte çıkış üretmesi için tasarlanır. MPPT cihazına, PV panelin çıkışından algılayıcılar yardımıyla ölçülen akım ve gerilim değerleri giriş verisi olarak sağlanmaktadır. Arama algoritması ölçüm değerlerini kullanarak lojik olarak (0-1) anahtarlama doluluk sinyali (duty-cycle) üretir. Üretilen sinyal PWM sürme devresi vasıtasıyla, kırıyıcıda bulunan anahtarın (mosfet,

transistör vb.) tetiklenmesini sağlar. Böylece arama algoritmasının başarısına bağlı olarak, PV panelin GMPP/LMPP noktasında güç üretmesi sağlanır.

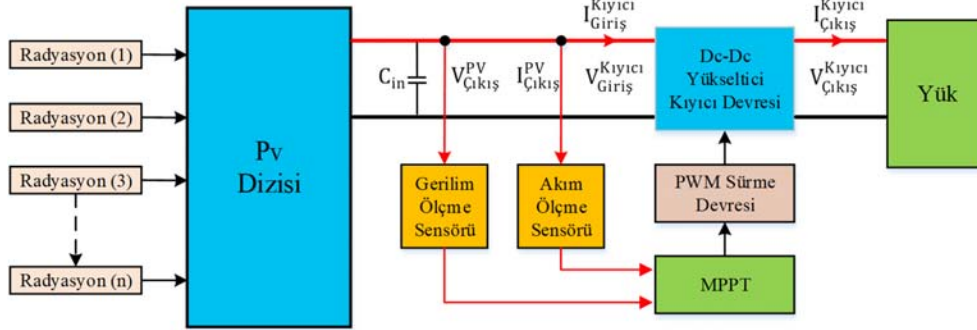
2.1. PV Hücresinin Matematiksel Modeli (Mathematical Model of PV Cell)

PV hücreler, lineer olmayan (non-linear) çıkış karakteristiğine sahip yapılardır. Hücrelerin kendi arasında seri ya da paralel bağlanması panellerin çıkış akımını, gerilimini ve güç değerlerini doğrudan etkiler. PV hücreler farklı sayıda diyot kullanılarak modellenmektedir. Bu çalışmada PV hücrenin modellenmesinde [28] tarafından sunulan tek diyot eşdeğer devre modeli kullanılmıştır. Bu modele ilişkin elektriksel devre şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Devre, bir akım kaynağı, ters-ve-paralel bağlı bir diyot, bir şönt (paralel) direnç ve bir seri dirençten oluşur. Paralel model, bağlantı noktalarından ve sızıntı akımlarından kaynaklanan kayıpları dikkate aldığı için diğer (ideal ve R_s) modellere göre daha gerçekçi bir yaklaşım sağlar. R_p -modeli, hassasiyetinin iyi olması ve basit şekilde modellenilebilmesi sayesinde literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, çalışmada yapılan analizler için paralel (R_p -model) PV hücresi modeli temel alınmıştır. PV hücreler solar radyasyon ve panel sıcaklığına bağlı olarak lineer olmayan akım-gerilim karakteristiği gösterirler. Şekil 2'de gösterilen değeri bilinmeyen akımların hesaplanabilmesi için Kirchhoff'un Akımlar Yasası'ndan (KCL) yararlanılmıştır.

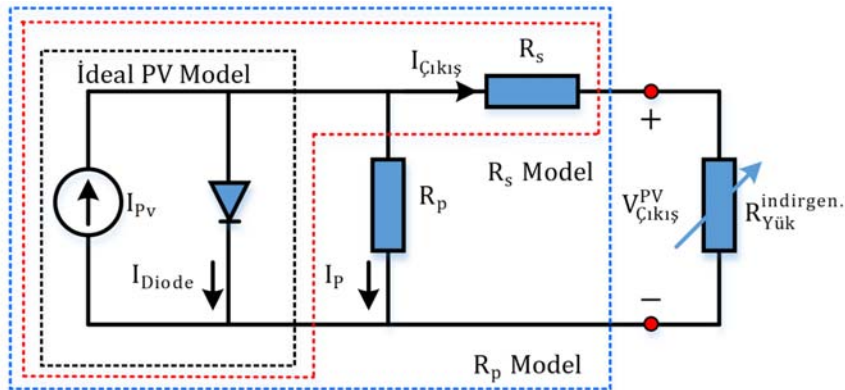
PV hücresine ait çıkış akım formülü Eş. 1'de ifade edilmiştir.

$$I_{\text{Çıkış}} = I_{PV} - I_{\text{Diyot}} - I_p \quad (1)$$

Eş. 1'de bulunan I_{PV} : PV hücresinin ışık akımını, I_{Diyot} : diyottan geçen akımı, I_p : R_p direncinden geçen şönt akım değerini ve $I_{\text{Çıkış}}$:



Şekil 1. PV sistemine ait blok şeması (Block diagram of the PV system)



Şekil 2. PV hücresinin tek diyotlu eş değer devre şeması (Single diode equivalent circuit diagram of PV cell)

çıkış akımını göstermektedir. $I_{Diodede}$ satürasyon akımına bağlı olarak Eş. 2'deki gibi ifade edilebilir [28].

$$I_{Diodede} = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{a} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

I_p değeri yerine ise $\frac{V+I.R_s}{R_p}$ yazılabilir. Bu ifadeler dikkate alındığında Eş. 1 ifadesi, Eş. 3'deki gibi tekrar düzenlenebilir.

$$I_{Çıkış} = I_{pv} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{a} \right)} - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (3)$$

Eş. 3'de yer alan 'a' değeri yaklaşık olarak Eş. 4'deki gibi hesaplanır.

$$a \cong \frac{N_s \cdot n_1 \cdot k \cdot T_c}{q} \quad (4)$$

Burada k: Boltzmann sabiti, q: elektron yükü, n_1 : ideallik faktörü, N_s : seri hücre sayısı ve T_c : hücrenin sıcaklığıdır. Bu çalışmada, literatürde sıkça kullanılan beş parametrelili devre modeli kullanılmıştır [28]. Modelde I_{pv} (fotovoltaik hücre akımı), I_0 (diyot satürasyon akımı), R_s (seri olarak modellenen iç direnç değeri), R_p (paralel kaçak akım direnci) ve a (ideallik faktörü) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Değerlerin hesaplanması için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar, çalışmanın amacı dışında olduğu için konu hakkında pek fazla detay verilmemiştir. Eş. 3, PV hücrenin genel matematiksel modelidir. Bu ifade PV hücrenin akım-gerilim karakteristiği, standart referans koşulları (SRC) altında tanımlanır. SRC ifadesi, PV hücre sıcaklığının 25°C ve radyasyon değerinin 1000 W/m² olduğu koşulları ifade etmektedir. Farklı sıcaklık ve ışınım seviyelerinde PV hücrenin I-V, P-V gibi karakteristik değerlerinin tanımlanmasında, standart koşullarda verilen parametre değerleri referans alınarak hesaplamalar gerçekleştirilir. Standart parametrelerin belirlenmesinde kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç durumunda akım ifadesi ve açık devre geriliminin sıcaklık çarpanı Eş. 5 ve Eş. 10 arasındaki ifadeler kullanılarak hesaplanır. Kısa devre akımının (I_{sc}) bulunabilmesi için $V = 0$ olmalıdır. Kısa devre akımı $I = I_{sc,ref}$ alınır Eş. 5 elde edilir [29].

$$I_{sc,ref} = I_{pv,ref} - I_{0,ref} \left[e^{\frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{p,ref}} \quad (5)$$

Açık devre gerilim (V_{oc}) değerinin hesaplanabilmesi için $I = 0$ olmalıdır ve V_{oc} değerinin bulunabilmesi için ise $V = V_{oc,ref}$ alınarak Eş. 6 elde edilir.

$$0 = I_{pv,ref} - I_{0,ref} \left[e^{\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{p,ref}} \quad (6)$$

Maksimum güç noktasında akım ve gerilim değerleri sırasıyla $I = I_{mp,ref}$ ve $V = V_{mp,ref}$ olarak tanımlanır. Yapılan değişiklikler Eş. 7'de gösterilmiştir.

$$I_{mp,ref} = I_{pv,ref} - I_{0,ref} \left[e^{\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{R_{p,ref}} \quad (7)$$

Maksimum güç noktasında, gücün türevi sıfıra eşit olacağından;

$$\frac{d(I \cdot V)}{dV} \Big|_{mp} = I_{mp} - V_{mp} \frac{d(I \cdot V)}{dV} \Big|_{mp} = 0 \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. $\frac{d(I \cdot V)}{dV} \Big|_{mp}$ ifadesi Eş. 9'da gösterilmiştir [30].

$$\frac{d(I \cdot V)}{dV} \Big|_{mp} = \frac{\frac{I_0}{a} e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a}} \frac{1}{R_s}}{1 + \frac{I_0 R_s}{a} e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{a}} + \frac{R_s}{R_p}} \quad (9)$$

Açık devre geriliminin sıcaklık çarpanı ise Eş. 10 ile ifade edilir.

$$\mu_{V_{oc}} = \frac{\partial V}{\partial T} \Big|_{mp} \approx \frac{V_{oc,ref} - V_{oc,T_c}}{T_{ref} - T_c} \quad (10)$$

Gerilim sıcaklık çarpanının bilinmesi için V_{oc,T_c} değerinin bilinmesi gereklidir. Bu değer standart koşullardaki referans sıcaklığına bağlı açık devre gerilimidir (V_{oc}). PV hücrenin çalışma koşulları altında ideallik faktörü hücre sıcaklığına bağlı lineer bir fonksiyon olarak Eş. 11'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (11)$$

Ters diyot satürasyon akımı ise Eş. 12'de verilmiştir.

$$I_0 = I_{0,ref} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{E_{g,ref}}{kT_{ref}} - \frac{E_g}{kT} \right] \quad (12)$$

Eş. 11 ve Eş. 12, E_g : malzemenin bant genişlik değeri, a_{ref} : ve T_{ref} : sırasıyla referans koşullarında modifiye edilmiş diyot ideallik faktörü ve hücre sıcaklığıdır. E_g değeri, silikon hücreler için 1,121 eV olarak alınır. E_g ve $E_{g,ref}$ arasındaki matematiksel ilişki sıcaklık değerine bağlıdır ve Eş. 13 ile ifade edilir.

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - 0.0002677(T - T_{ref}) \quad (13)$$

PV'nin ürettiği akım, radyasyon miktarına bağlı lineer bir fonksiyon olarak tanımlanır ve Eş. 14 ile ifade edilir.

$$I_{pv} = I_{pv,ref} \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) [1 + \alpha_T (T - T_{ref})] \quad (14)$$

$$\alpha_T = \alpha_T' I_{pv,ref}$$

G: değeri PV hücrenin çalışma sırasında ölçülen radyasyon değerini, T: hücre sıcaklığını, T_{ref} : 25°C'de sıcaklık değerini, α_T : kısa devre akım sıcaklık çarpanını gösterir. Nominal koşullardaki referans radyasyon değeri G_{ref} değeri 1000 $\frac{W}{m^2}$ 'dir. PV dizisinin herhangi bir çalışma anına ait maksimum akım ve gerilim değerleri Eş. 15 ile hesaplanır. Eşitlikte bulunan N_s : seri bağlı hücre sayısını ve N_p : paralel bağlı string sayısını ifade eder.

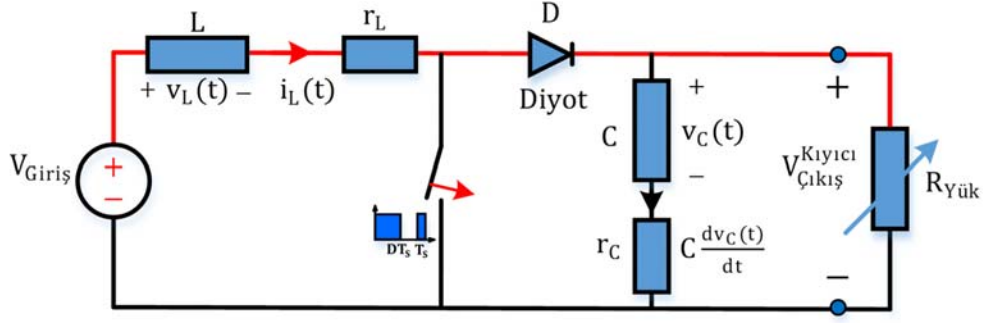
$$I_{mp} = N_p I_{pv} - N_p I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V_{mp} + I_{mp} \frac{N_s R_s}{N_p})}{N_s n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} \frac{N_s R_s}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}} \quad (15)$$

2.2. Yükseltici Tip Kıyıcı Modelinin Matematiksel İfadesi (Mathematical Model of Boost Converter)

Yükseltici tip kıyıcı, $V_{Çıkış}$ değerinin $V_{Giriş}$ değerinden daha büyük seviyede gerilim üretmesini sağlayan DC-DC dönüştürücü çeşididir. Yükseltici tip kıyıcının temel devre şeması Şekil 3'te gösterilmiştir. Kıyıcının çıkış gerilim değeri, anahtarlama elemanına gönderilen kontrol sinyalinin doluluk oranına bağlı olarak değişir.

Kıyıcı devrenin durum uzay denklemleri, anahtarlama elemanının üzerinde enerji varken (kapalı) ve enerji yokken (açık) olmak üzere iki farklı durum için ayrı yazılarak ifade edilir [31].

- Anahtarlama elemanı enerjili iken d. T_s durumu için:



Şekil 3. Yükseltici tip kıyıcıya ait devre şeması (Boost converter circuit schematic)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{Giriş} \quad (d \cdot T_s) \quad (16)$$

- d. T_s durumu için v_{Çıkış} denklemi ise:

$$v_{Çıkış} = \begin{bmatrix} 0 & R \\ R+r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \quad (d \cdot T_s) \quad (17)$$

- Anahtarlama elemanı enerjili değil iken (1 - d)T_s durumu için:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L + \frac{R r_C}{R+r_C}}{L} & -\frac{R}{L(R+r_C)} \\ \frac{R}{C(R+r_C)} & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} V_{Giriş} \quad (1-d) \cdot T_s \quad (18)$$

- (1 - d). T_s durumu için v_{Çıkış} denklemi ise:

$$v_{Çıkış} = \begin{bmatrix} \frac{R r_C}{R+r_C} & R \\ R+r_C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \quad (1-d) \cdot T_s \quad (19)$$

Anahtarın açık ve kapalı olduğu durumlar göz önüne alınarak yazılan eşitlikler yeniden düzenlenirse, geçici hal denklemleri elde edilir. Bu işlemler Eş. 20 ve Eş. 23 arasında verilmiştir.

$$\begin{aligned} A_{ort} &= A_1 \cdot d + A_2(1-d)T_s \\ B_{ort} &= B_1 \cdot d + B_2(1-d)T_s \\ C_{ort} &= C_1 \cdot d + C_2(1-d)T_s \end{aligned} \quad (20)$$

A geçiş matrisi düzenlenirse Eş. 21 denklemi elde edilir.

$$A_{ort} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L + \frac{R r_C}{R+r_C}(1-d)}{L} & -\frac{R(1-d)}{L(R+r_C)} \\ \frac{R(1-d)}{C(R+r_C)} & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Eş. 16 ve Eş. 18'de bulunan B matrisi her iki durum içinde benzer olduğu için B_{ort} matrisinin değeri Eş. 22'de görüleceği üzere aynı kalmıştır.

$$B_{ort} = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Eş. 17 ve Eş. 19'da bulunan C matrisi yeniden düzenlendiğinde Eş. 23'deki C_{ort} matrisi elde edilir.

$$C_{ort} = \begin{bmatrix} \frac{R r_C}{R+r_C}(1-d) & R \\ R+r_C & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Geçici rejim altında, yükseltici kıyıcının durum denklemleri kapalı formda Eş. 24'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{ort} \cdot x + B_{ort} \cdot V_{Giriş} \\ v_{Çıkış} &= C_{ort} \cdot x \end{aligned} \quad (24)$$

Eş. 24'de bulunan değişken değerlerinin ($\dot{x} = [i_L \ v_C]^T = [0 \ 0]^T$) sifıra eşitlenmesiyle sürekli hal altındaki (steady-state) durum denklemleri elde edilir. Sürekli hal (SH) altında çalışma durumunda devre elemanları herhangi bir 't' değişkenine bağlı olmadığı için küçük harflerle gösterilen ifadeler (d, i_L, v_C), büyük harflerle ifade edilebilir. Eş. 24 kullanılarak, 'x' ifadesi çekilir:

$$x = -A_{ort}^{-1} \cdot B_{ort} \cdot V_{Giriş} \quad (25)$$

X değerinin devre elemanlarına bağlı ifadesi Eş. 26'da gösterilmiştir.

$$x = \frac{1}{r_L + \frac{R r_C}{R+r_C}(1-d) + \frac{R^2(1-d)^2}{R+r_C}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot V_{Giriş} \quad (26)$$

Eş. 26 kullanılarak I_{Lort} ve V_{Cort} değerleri (Eş. 27) No'lu eşitlikte gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_{Lort} \\ V_{Cort} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{Giriş}(R+r_C)}{\sigma} \\ \frac{V_{Giriş} \cdot R \cdot (R+r_C)(d-1)}{\sigma} \end{bmatrix} \quad (27)$$

burada $\sigma = R^2 - 2R^2 \cdot d + R^2 \cdot d^2 - L \cdot R \cdot r_C + L \cdot R \cdot r_1 + L \cdot r_C \cdot r_1 + L \cdot R \cdot d \cdot r_C$ değişkenlerini ifade etmektedir. Ortalama bobin akımı ve kapasitör gerilim değerleri kullanılarak çıkış gerilimi hesaplanır. Eş. 24 ve Eş. 25 kullanılarak Eş. 28 hesaplanır.

$$v_{Çıkış} = C_{ort} \cdot x = -C_{ort} \cdot A_{ort}^{-1} \cdot B_{ort} \cdot V_{Giriş} \quad (28)$$

Çıkış geriliminin devre parametrelerine bağlı gösterimi, Eş. 29'da verilmiştir.

$$v_{Çıkış} = \frac{R \cdot (1-d) \cdot V_{Giriş}}{r_L + \frac{R r_C}{R+r_C}(1-d) + \frac{R^2(1-d)^2}{R+r_C}} \quad (29)$$

Çıkış ile giriş gerilimi arasında transfer fonksiyonu, sürekli hal için Eş. 30'daki gibidir.

$$\frac{v_{Çıkış}}{V_{Giriş}} = -C_{ort} \cdot A_{ort}^{-1} \cdot B_{ort} = \frac{1}{1-d} \left[\frac{R \cdot (1-d)^2}{r_L + \frac{R r_C}{R+r_C}(1-d) + \frac{R^2(1-d)^2}{R+r_C}} \right] \quad (30)$$

- Devredeki bobin ve kapasitörün parazitik direnç etkileri ihmal edildiğinde, v_{Çıkış} değeri Eş. 31'deki gibi hesaplanır.

$$V_{Çıkış} = \frac{V_{Giriş}}{1-D} \quad (31)$$

- I_{Lort} değeri ise Eş. 32'de gösterilmiştir.

$$I_{Lort} = I_{Giriş} = \frac{V_{Giriş}}{R(1-D)^2} \quad (32)$$

Bu çalışmada, devrenin parazitik direnç etkileri ihmal edilmeden analizler gerçekleştirilmiştir.

2.3. Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası için Çıkış Direncine Dayalı Yükseltici Tip Kıyıcı Tasarımı ve Parametre Seçimi

(Design and Parameter Selection of Output Resistance Based Boost Converter for Maximum Power Point in Photovoltaic Systems)

Bu bölümde MPPT uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir yükseltici kıyıcı modeli kullanılmıştır. Bu model maksimum güç noktası, gerilimi ve akımı üzerinden tanımlanan sabit çıkış direnç değerine dayanmaktadır [32]. Yükseltici kıyıcı için giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişkinin en sade hali ile Eş. 31'deki gibidir. Maksimum güç noktası direnci R_{mp} , yük (çıkış) direnci R , C_{in} & C_o devrenin giriş & çıkış kapasitör değerleri ve L ise bobin değerini göstermektedir. Devredeki elektriksel parametreler arasındaki ilişki Eş. 33 ile Eş. 39 arasındaki denklemlerde tanımlanmıştır.

$$R_{mp} = \frac{V_{mp}}{I_{mp}} \quad (33)$$

R_{mp} , R ve d arasındaki bağıntı Eş. 34'te verilmiştir.

$$R = \frac{R_{mp}}{(1-d)^2} \quad (34)$$

Kapasitans formülünden yararlanılarak, maksimum güç noktasındaki gerilim dalgalanması (ΔV_{mp}) ile elektriksel yükün (ΔQ) değişimi arasındaki ilişki Eş. 35'de verilmiştir.

$$\Delta V_{mp} = V_{mp} \cdot \gamma_{V_{mp}} = \frac{\Delta Q}{C_{in}} \quad (35)$$

Burada C_{in} : giriş kapasitesinin değeri ve $\gamma_{V_{mp}}$: maksimum güç noktası gerilim dalgalanma faktörüdür. C_{in} , değerinin hesaplanması için Eş. 36'dan yararlanılmıştır. V_{mp} 'deki küçük bir değişiklik I_{mp} 'de önemli bir değişikliğe neden olur. Kıyıcı devresinin MPP'ye yakın değerlerde çalışmasından emin olmak için $\gamma_{V_{mp}}$ küçük değerde seçilmelidir.

$$C_{in} = \frac{d}{8.f^2.L.\gamma_{V_{mp}}} \quad (36)$$

Çıkış kapasitörünün (C_o), doluluk oranı ve devrenin çalışma frekansı cinsinden ifadesi Eş. 37'deki gibidir. Bu ifade çıkış kondansatörü üzerindeki gerilim dalgalanmasından türetilmiştir.

$$C_o = \frac{d(1-d)^2}{R_{mp}.\gamma_{V_o}.f} \quad (37)$$

Burada, γ_{V_o} : çıkış geriliminin dalgalanma faktörüdür. Yükseltici kıyıcı için gereken minimum L bobin değerinin hesaplanması için Eş. 38'den yararlanılmıştır.

$$L_{(min, \text{sabit } R_o \text{ için})} = \frac{4.R_o}{27.\gamma_{L}.f} \quad (38)$$

Burada γ_{L} : bobin akımının dalgalanma faktörünü ve R_o : sabit değerli yük çıkış direncidir. 'd' değerinin dalgalanma aralığı Eş. 39'da verilmiştir.

$$d_{minimum} < d < d_{maksimum} \quad (39)$$

$d_{minimum}$ ve $d_{maksimum}$ kıyıcının anahtarlama doluluk oranını göstermektedir. Sırasıyla 0,2 ve 0,8 olarak seçilen değerler doluluk oranının alt ve üst sınırlarını göstermektedir. Çalışmada kullanılan DC-DC yükseltici tip kıyıcı devresine ait parametre değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Sabit 30 Ω çıkış direncine sahip DC-DC kıyıcı devresinin, farklı ışınım değerlerine karşılık gelen anahtarlama doluluk oran yüzdesi (% D), bobin akımı dalgalanma faktör yüzdesi ($\% I_L^{dalgalanma}$), giriş geriliminin dalgalanma faktör yüzdesi ($\% V_{C_{in}}^{dalgalanma}$), çıkış gerilim dalgalanma faktör yüzdesi ($\% V_{C_o}^{dalgalanma}$) değerleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere farklı ışınım değerlerine karşı yükseltici tip kıyıcı devresi tarafından üretilen parametre değerleri, dizayn aşamasında kabul edilen sınır değerler arasında kalmaktadır.

2.4. Amaç Fonksiyonu (Fitness Function)

MPPT probleminin çözümünde kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 40'da verilmiştir.

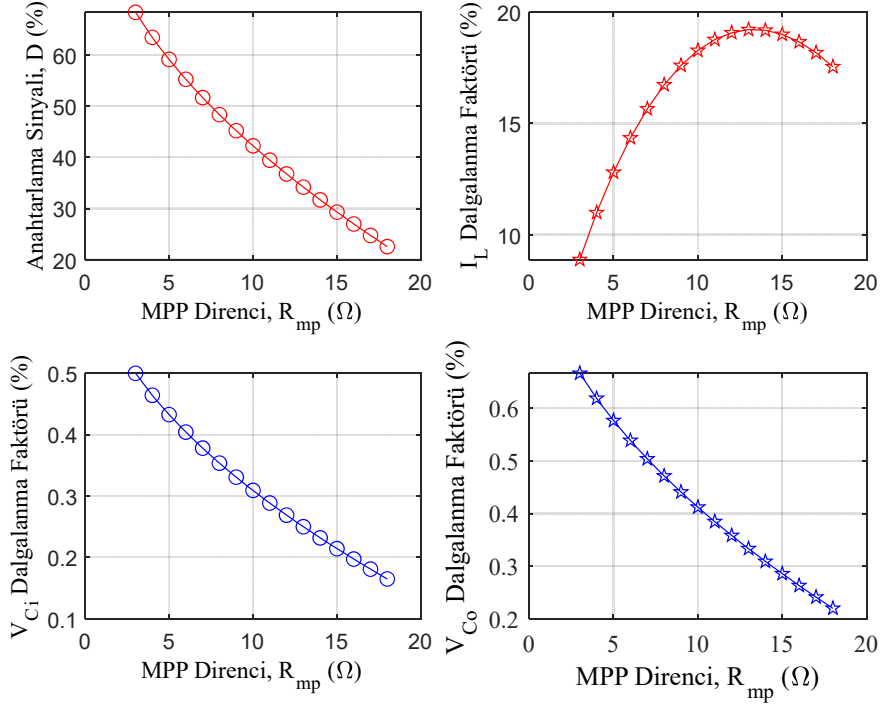
$$F_{fitness}^{maksimum} = f(I_{pv}^{çıkış}, V_{pv}^{çıkış}) = \text{maksimum} (P_{pv}^{çıkış}) \quad (40)$$

burada $I_{pv}^{çıkış}$, $V_{pv}^{çıkış}$ ve $P_{pv}^{çıkış}$ sırasıyla PV panelin çıkışına ait akım, gerilim ve güç değerlerini göstermektedir.

Tablo 1. Yükseltici tip kıyıcıya ait veriler (Parameters of boost converter)

Değişken Adı	Değerler	Değişken Adı	Değerler	Değişken Adı	Değerler
$C_{giriş} (C_1 = C_{in})$	30 μF	R_{max}^{MPP} MPP değeri	18 Ω	$C_{out}^{güvenlik}$ faktörü	1,5
$C_{çıkış} (C_o = C_{out})$	200 μF	$d_{minimum}$	20%	$L^{güvenlik}$ faktörü	1,3
L	5 mH	$d_{maksimum}$	80%	$R_{yük}$ aralığı (*)	$R_{0,min}^{yük} < R_0^{yük} < R_{0,mak}^{yük}$ $28 \Omega < R_{sabit}^{yük} < 75 \Omega$
$R_0^{yük} (R_o = R_{yük}^{sabit})$	30 Ω	$C_{in}^{dalgalanma}$ faktörü	1 %	$C_{giriş}$	> 24,6552 μF
f	30 kHz	$C_{out}^{dalgalanma}$ faktörü	1 %	$C_{çıkış}$	> 113,962 μF
Parazitik direnç, r_C	10 $\mu \Omega$	$L^{dalgalanma}$ faktörü	25 %	L_{min}	> 0,77031 mH
Parazitik direnç, r_L	10 $\mu \Omega$	$C_{in}^{güvenlik}$ faktörü	2		
R_{min}^{MPP} MPP değeri	3 Ω				

(*) Sabit çıkış direnç değerinin seçildiği uygulamalarda yükseltici tip kıyıcının hızlı cevap verebilmesi için $R_{yük}^*$ değeri $R_{0,min}^{yük}$ değerine yakın bir değerde seçilmelidir.



Şekil 4. Farklı ışınım değerleri için yükseltici tip kıyıcının parametre değişkenleri (Parameter variables of boost converter for different radiation)

3. Çita Optimizasyon Algoritması (Cheetah Optimizer Algorithm)

Çita optimizasyon (CO) algoritması, çitaların avlanma stratejilerinden esinlenilerek geliştirilmiş meta-sezgisel bir arama algoritmasıdır [25]. Çitaların avlanma stratejileri üç kısma ayrılmaktadır. Birinci kısımda avın aranması (araştırma safhası), ikinci kısımda avın gözetlenmesi (bekle ve gör safhası) ve son aşamada ise uygun zamanda ava saldırının gerçekleşmesi (saldırma safhası) olarak özetlenebilir.

3.1. Avın Aranması (Searching Prey)

Çitalar, avlarını bulmak için kendi bölgelerinde veya çevre bölgelerde aktif olarak arama yaparlar. Çitaların, avlarını aramasının matematiksel olarak ifadesi Eş. 41’de verilmiştir [25].

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot \alpha_{i,j}^t \quad (41)$$

Çitaların avlarını arama stratejisinin modellenmesinde kullanılan $X_{i,j}^t$ ifadesi, i.çitanın (i = 1, 2, ..., n) j.düzlemdeki (j = 1, 2, ..., D) mevcut konumunu gösterir. Burada ‘n’ çita popülasyon sayısını ve ‘D’ optimizasyon problemindeki değişken sayısını (boyutu) gösterir. Her çita saldırı esnasında farklı durumlarla karşılaşır. Seçilen yaklaşımda, her avın konumu en iyi çözüme karşılık gelen bir karar değişkenidir. Her düzlemdeki i.çitanın yeni konumu, mevcut konumlarına ve keyfi bir adım boyutuna göre güncellemek için rastgele katsayısı kullanılarak hesaplanır. Burada $X_{i,j}^{t+1}$ ve $X_{i,j}^t$ sırasıyla i.çitanın j.düzlemine ait bir sonraki ve şu anki mevcut konumlarını gösterir. T: ifadesi maksimum avlanma süresinin uzunluğunu, t: indisi ise mevcut avlanma süresini ifade eder. $\hat{r}_{i,j}^{-1}$ ve $\alpha_{i,j}^t$ değişkenleri sırasıyla j.düzlemdeki i.çita için rastgeleştirme parametresi ve adım uzunluğunu göstermektedir. Rastgeleştirme parametresi ($\hat{r}_{i,j}^{-1}$) standart normal dağılımdan gelen (0-1) arasında değişen rastgele sayılardır. Adım uzunluğu $\alpha_{i,j}^t > 0$ olmak üzere $\frac{t}{1000.T}$ olarak tercih

edilebilir. Diğer avcılarla (düşmanlarla) karşılaştıklarında çitalar hızlı bir şekilde kaçabilir veya yönlerini değiştirebilirler. Çitaların bu tür davranışlarının yanı sıra yakın/uzak hedef arama modunu yansıtmak için, farklı avlanma dönemlerinde her çita için rastgele sayı $\hat{r}_{i,j}^{-1}$ kullanılmıştır. Bazı durumlarda $\alpha_{i,j}^t$ ifadesi, i.çitanın komşu veya lider çita ile arasındaki mesafeye göre ayarlanabilir. Her düzlemdeki çitanın lider çita ile konumu, $\alpha_{i,j}^t$ ’nin $\frac{t}{1000.T}$ ’nin maksimum adım boyutuyla çarpımına eşit olduğu varsayımına dayanılarak güncellenir. Diğer üyeler için, her çitanın düzlemdeki $\alpha_{i,j}^t$, i.çitanın konumu ile rastgele seçilen bir çita arasındaki mesafenin çarpılmasıyla hesaplanır. Lider çita ile av arasında bir mesafe vardır (en iyi çözüm). Bu nedenle, liderin konumu en iyi çözümdeki bazı değişkenler değiştirilerek avın konumuna göre seçilir. Avlanma süresi sona ermedikçe lider ve avın zamanla daha yakın olması ve liderlik pozisyonunun güncellenmesi gerekir. Çitanın adım büyüklüğü rastgele bir şekilde seçilir. Algoritmanın çalışma mekanizmasında yer alan, rastgele seçime dayanan değişken parametresi ve adım boyutu ($\hat{r}_{i,j}^{-1}$ ve $\alpha_{i,j}^t$) değişkenleri kullanılarak optimizasyon probleminin lokal değerlere sıkışıp kalmasının önüne geçilir.

3.2. Avın Gözetlenmesi (Observing Prey)

Arama modu sırasında av çitanın görüş alanına girebilir. Çitanın her hareketi, avın kendisini fark etmesine ve avın kaçmasına neden olabilir. Bundan dolayı çita, avına yeterince yaklaşmak için pusuya yatması (yere yatarak veya çalıkların arasına saklanarak) gerekir. Dolayısıyla, bu durumda çita bulunduğu yerde kalır ve avın kendisine yaklaşmasını bekler. Bu davranış Eş. 42’deki gibi modellenir:

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t \quad (42)$$

burada $X_{i,j}^{t+1}$ ve $X_{i,j}^t$ sırasıyla j.düzlemdeki i.çitanın güncellenmiş ve şu anki mevcut konumlarıdır. Çita optimizasyon algoritmasının avlanma başarısını artırmak (daha iyi bir çözüm bulmak) için gruptaki tüm

çitaların pozisyonlarını aynı anda değiştirmemeleri gerekir. Böylece erken yakınsama ya da lokal noktalara takılıp kalmasının önüne geçilir.

3.3. Ava Saldırı (Hunting for Prey)

Çitalar avlarına saldırmak için hız ve esneklik gibi iki önemli faktörü kullanır. Bir çita saldırmaya karar verdiğinde, son hızla avına doğru koşar. Bir süre sonra av, çitanın saldırısını fark eder ve kaçmaya başlar. Çita, avın konumunu takip eder ve hareket yönünü, avın yolunu bir noktada kesecek şekilde ayarlar. Çita maksimum hızda avına doğru koşmaya başladığında (av ile arasındaki mesafe azaldığında) avın kaçması ve hayatta kalması için konumunu aniden değiştirmesi gerekir. Çita bu aşamada avını yakalamak için hızını ve esnekliğini kullanır. Grup halinde avlanma durumunda ise, her çita (kaçan avın ve liderin ya da komşu çitanın pozisyonuna göre) kendi pozisyonunu ayarlaması gerekir. Basitçe, çitaların tüm bu saldırı taktikleri matematiksel olarak Eş. 43'deki gibi tanımlanır:

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{\beta,j}^t + \check{r}_{i,j} \cdot \beta_{i,j}^t \quad (43)$$

Burada $X_{\beta,j}^t$, j.düzlemdeki avın mevcut konumudur. Başka bir deyişle, çita popülasyonu içerisindeki en iyi mevcut pozisyondur. $\check{r}_{i,j}$ ve $\beta_{i,j}^t$ sırasıyla j.düzlemdeki i.çitanın dönüş faktörü ve etkileşim faktör değerleridir. Eş.43'de $X_{\beta,j}^t$ terimi, saldırı modunda çitaların maksimum hız kullanarak avın konumuna kısa sürede mümkün olduğunca yaklaşmasına olanak sağlar. Bu nedenle, i.çitanın saldırı modundaki yeni konumu, avın mevcut konumuna göre hesaplanmaktadır. İkinci terimdeki dönüş faktörü çitalar arasındaki veya yakalama modundaki bir çita ile lider arasındaki etkileşimi yansıtır. Matematiksel olarak bu faktör, komşu çitanın konumu $X_{k,j}^t$ ($k \neq i$) ile i.çitanın konumu $X_{i,j}^t$ arasındaki fark olarak tanımlanır. Dönüş faktörü $\check{r}_{i,j}$, $|r_{i,j}|^{e(\frac{r_{i,j}}{2})} \cdot \sin(2 \cdot \pi r_{i,j})$ 'ye eşit olan rastgele bir sayıdır. $r_{i,j}$ standart normal dağılımdan gelen normal dağılımlı rastgele sayılardır. Bu faktör, çitaların yakalama modundaki keskin dönüşleri yansıtır.

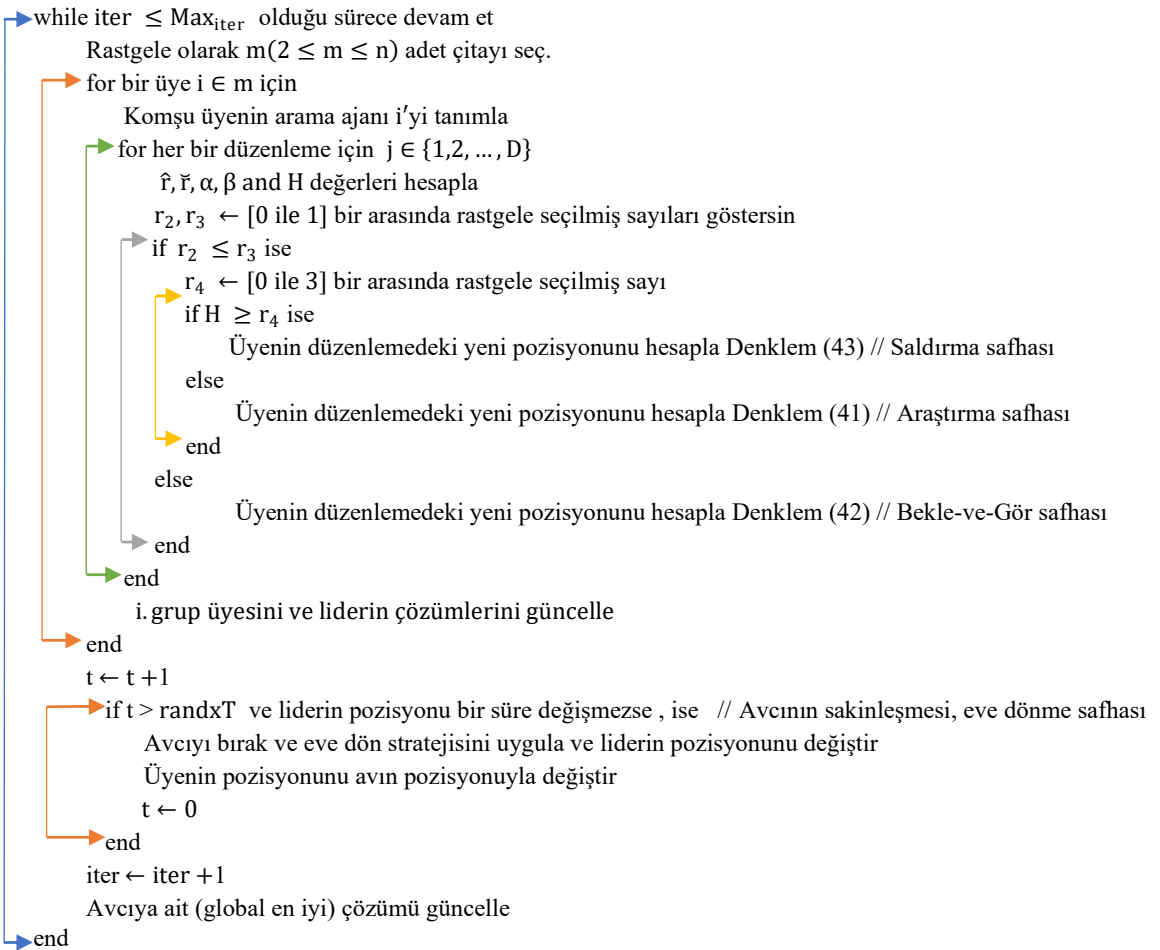
Problem verilerini, değişken sayısını (boyutu, D) ve başlangıç popülasyon büyüklüğünü (n) tanımla
Çitaların başlangıç popülasyonu X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) olacak şekilde oluştur ve her çitanın uygunluğunu değerlendir
Popülasyonun ilk durumu (ev), lideri ve avın çözümlerini başlat

$t \leftarrow 0$

$t \leftarrow 1$

Maksimum iterasyon sayısı Max_{iter}

$T \leftarrow 60 \times 10 \times [D/10]$



Şekil 5. Çita Optimizasyon algoritmasına ait sözde-kod (Pseudocode of the Cheetah Optimization algorithm)

3.4. Çita Optimizasyon Algoritmasının Çalışma Mekanizması (Operating Mechanism of Cheetah Optimizer Algorithm)

Avlanma sürecinde, arama veya saldırı stratejisi rastgele uygulanır, ancak çitanın enerji seviyesinin azalması nedeniyle arama stratejisi zamanla daha olası hale gelir. Bazı durumlarda, ilk adımlar arama stratejisine ayrılırken, daha iyi çözümler elde etmek için büyük t değerleri için saldırı stratejisi seçilir. r_2 ve r_3 'ün $[0, 1]$ arasında rastgele sayılar olduğunu varsayalım. Eğer $r_2 \geq r_3$ durumu mevcut ise otur ve bekle stratejisi seçilir; aksi takdirde, r_1 'in $[0, 1]$ aralığında rastgele bir sayı olduğu varsayılarak, arama veya saldırı stratejilerinden bir tanesi rastgele bir şekilde $H = e^{2(1-\frac{t}{T})}(2r_1 - 1)$ formülü yardımıyla seçilir. Otur ve bekle stratejisi ile diğer iki strateji arasındaki geçiş oranı r_3 değerinin ayarlanmasıyla (tuning) kontrol edilebilir. Örneğin, amaç fonksiyonu bazı karar değişkenlerindeki değişikliklere çok duyarlıysa (bu, avın çitanın hareketine olan duyarlılığını yansıtabilir), r_3 değeri küçük rastgele sayılar olarak seçilebilir. Bu durum, bir çitanın seçeceği otur ve bekle modunu artırarak karar değişkenlerini değiştirme oranını azaltır. Dolayısıyla, avlanma (daha iyi çözümler bulma) başarı olasılığı artar. H fonksiyonunda t'nin artırılması, enerji sınırlaması nedeniyle bir çitanın saldırı stratejisini seçme şansını azaltır. Yine de bu olasılık sıfır değildir ve tamamen çitanın davranışından ilham alır. Bunun için, $H \geq r_4$ ise saldırı modu seçilir, aksi takdirde arama modu uygulanır. r_4 , (0 ile 3) arasında rastgele bir sayıdır. Burada, r_4 'ün daha yüksek değerleri sömürü (exploitation) aşamasını vurgularken, azaltılması keşif (exploration) sürecini artırır. Çita optimizasyon algoritmasına ait sözde-kod (pseudo-code) Şekil 5'te verilmiştir [25].

4. Modellenen PV Sistemindeki Devre Elemanlarının Çıkış Grafikleri (Plots of Circuit Elements in the Modeled PV System)

Bölüm 4'te, Bölüm 2'de matematiksel ifadeleri verilen PV sisteme ait devre elemanlarının modelleme sonuçları verilmiştir. İlk olarak çalışmada kullanılan Kyocera Solar KC200GT [33] modeli panelin benzetim sonuçları, gerçek zamanlı ölçüm değerleri ve Matlab/Simulink sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İkinci olarak, 3 adet seri bağlı PV panelin PSC çalışmasına ait matematiksel ifadesi verilmiştir. Son kısımda ise, kullanılan yükseltici devrenin giriş değerlerine karşılık elde edilen çıkış değerlerinin grafikleri (i_L ve v_C) verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan DC-DC kıyıcı devresine ait seçilen parametre değerleri ve değerlerin hesaplamasına ilişkin bağıntılar Bölüm 2.3'de Tablo 1'de gösterilmiştir.

4.1. Kyocera Gt200 PV Panel (Kyocera Gt200 PV Module)

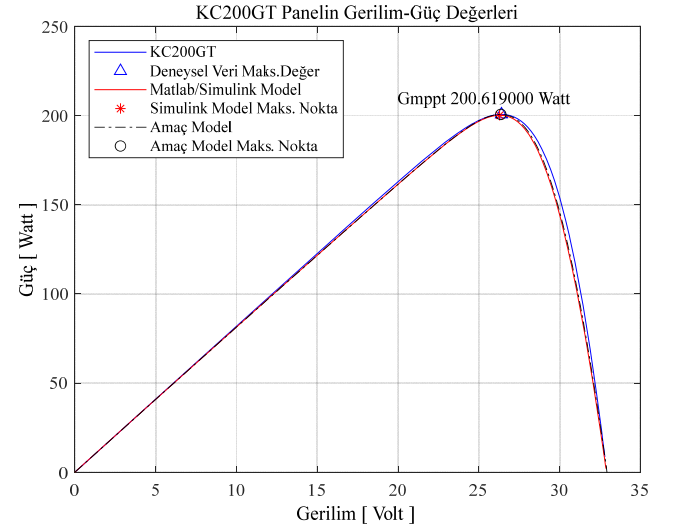
Çalışmada KC200GT PV panelinin [33] verileri referans alınmıştır. KC200GT PV panelinin modellenmesinde kullanılan parametreler (değişkenler) ve panele ait teknik detaylar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. PV modül için kullanılan değerler (Parameters of PV module)

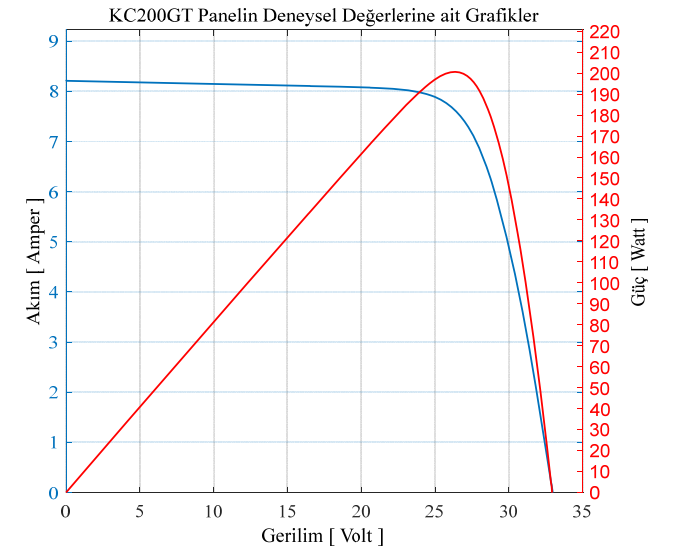
Değişken Adı	Sembol	Birimi	Değişkenin Değeri
Kısa devre akımı	I_{sc}	Amper	8,2099
Açık devre gerilimi	V_{oc}	Volt	32,990
Seri bağlı hücre sayısı	N_{cell}	-	54
Gerilim sıcaklık katsayısı	K_v	% /deg.C	-0,35502
Akim sıcaklık katsayısı	K_i	% /deg.C	0,06
İdeallik faktörü	a	-	0,97736
Seri direnç değeri	R_s	Ω	0,34483
Paralel direnç değeri	R_{sh}	Ω	170,37921

Matlab ortamında yazılan kod sonuçları, KC200GT PV panelin gerçek zamanlı ölçüm sonuçları ve Matlab/Simulink'ten elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'de

KC200GT PV panelin SRC altındaki ölçüm sonuçlarına karşılık gelen güç-gerilim ve akım-gerilim grafikleri görülmektedir. PV panelin parametre değerleri kullanılarak, Matlab/Simulink ve geliştirilen modelin kod-benzetim sonuçlarına ait güç-gerilim değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere ($\frac{dP}{dV} > 0$) olduğu sürece kod-benzetim ve Matlab/Simulink sonuçlarının gerçek ölçüm değerlerine oldukça yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Maksimum güç noktasının sağ tarafına geçildiğinde ise eğride ($\frac{dP}{dV} < 0$) az da olsa küçük farklar mevcuttur. Bunun nedeni, beş parametrelili model yaklaşımından, ideallik faktör katsayısı seçiminden ve yapılan çeşitli kabullerden kaynaklanmaktadır.



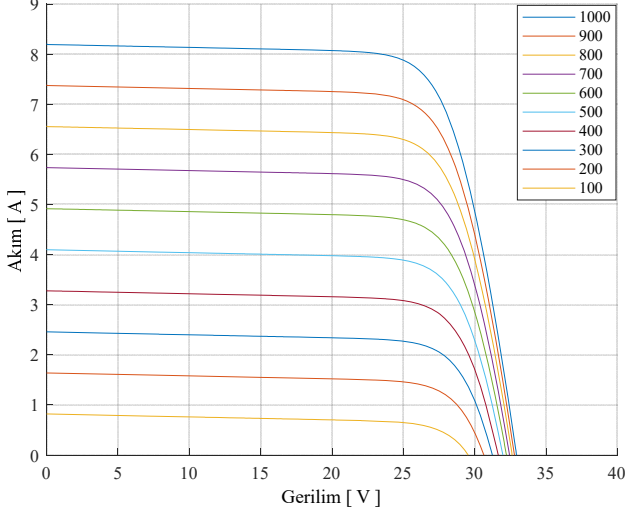
Şekil 6. Kod-benzetim, Matlab/Simulink ve gerçek zamanlı güç-gerilim ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması
(Comparison of written Matlab script results with the results of Matlab/Simulink and experimental PV panel data)



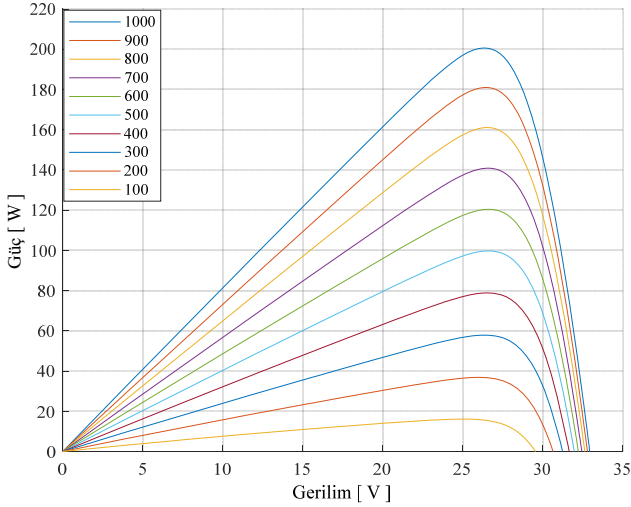
Şekil 7. KC200GT panelin deneysel değerlerine ait akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri
(Current-voltage and power-voltage plots of experimental Kyocera GT 200 PV panel data)

Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla, PV panelin farklı radyasyon değerlerine karşılık gelen akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V)

grafikleri görülmektedir. Şekillerden görüleceği üzere radyasyon değeri azaldıkça, kısa devre akım (I_{SC}) ve açık devre gerilim (V_{OC}) değerleri dramatik şekilde düşmektedir. Akım ve gerilim değerlerindeki değişimler, üretilen gücün (P_{max}) değerinin düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 8. Farklı radyasyon değerlerine karşılık gelen akım-gerilim grafiği
(Current-voltage graph corresponding to different radiation values)

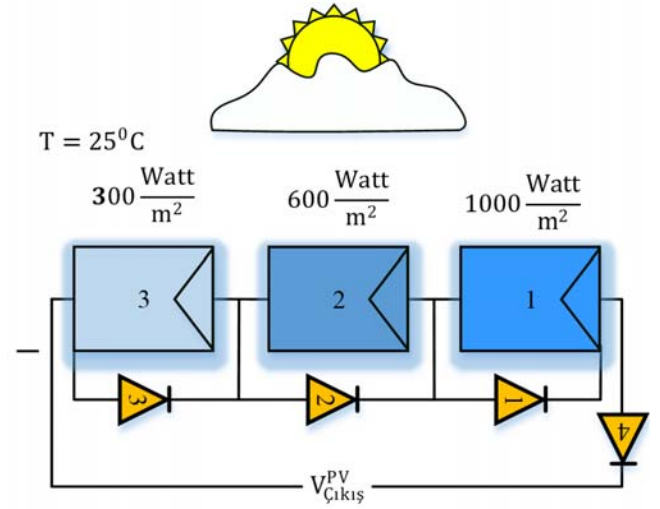


Şekil 9. Farklı radyasyon değerlerine karşılık gelen güç-gerilim grafiği
(Power-voltage graph corresponding to different radiation values)

4.2. PV Sistemlerde Kısmi Gölgeleme Durumunda Maksimum Güç Noktasının Bulunması (Determination of Maximum Power Point Under Partial Shading in PV Array)

PV panellerin, farklı radyasyon değerlerine ya da kısmi gölgelemeye maruz kaldığı durumlarda panel çıkış gücünün düştüğü görülmüştür. Şekil 10'daki gibi farklı ışınım değerleri altında çalışan PV panellerin bağımsız ve seri bağlı çalışması durumlarındaki güç çıkış değerleri kısım (i) ve kısım (ii)'deki gibi hesaplanır.

- Her panel bağımsız çalışıyorsa ve her panel ayrı MPPT cihazı tarafından kontrol ediliyorsa:



Şekil 10 Seri bağlı 3-PV panel bağlantı şekli
(Connection type of 3-PV panel connected in series)

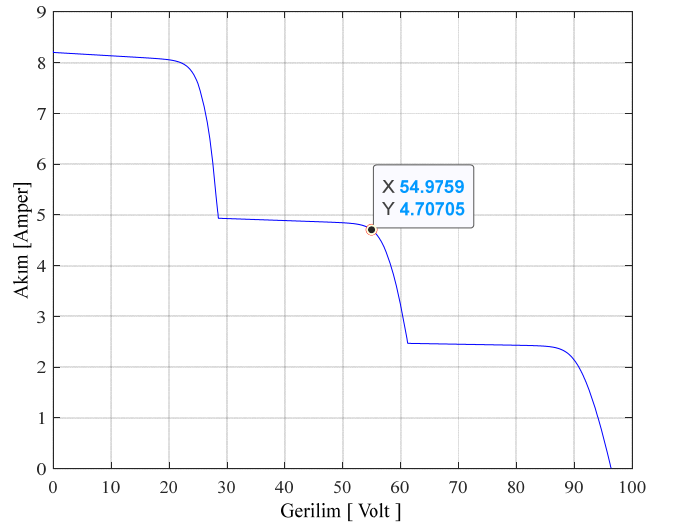
Üretilen güç değeri Eş. 44 ile hesaplanır.

$$P_{Toplam} = \sum_{i=1}^{Panel\ No} P_{max}^{SRC} \cdot \frac{G_i}{G_{ref}} \quad (44)$$

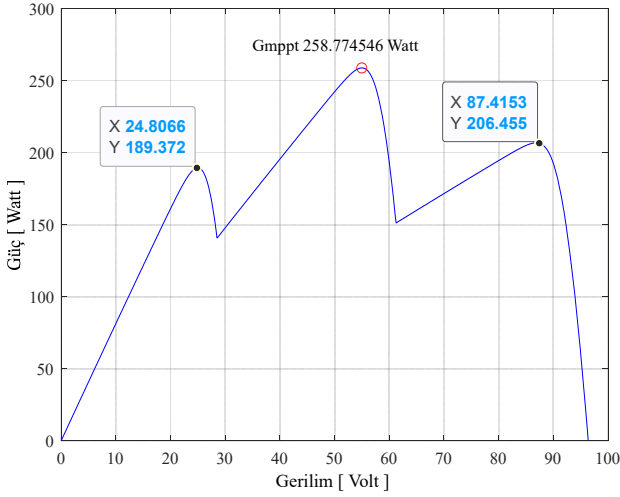
Şekil 10'dakine benzer radyasyon değerine sahip ve bağımsız olarak çalışan KC200GT PV panellerin üreteceği maksimum güç değeri Eş. 44'den yararlanılarak, $P_{Toplam} \cong 200 \cdot (1 + 0,6 + 0,3) = 380$ Watt olarak hesaplanır.

- PV paneller Şekil 10'dakine benzer atmosferik koşullar altında ve seri bağlı olarak çalışıyorsa:

Kısmi gölgeleme altında çalışan seri bağlı PV sisteminin üreteceği akım, gerilim ve maksimum güç değeri I-V eğri (curve) izleme cihazı ile ölçülür. I-V ve P-V grafikleri sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir. KC200GT PV dizisi, ortak MPPT cihazı tarafından kontrol edilirse üretilen maksimum güç değeri 258,774 Watt olarak hesaplanır.



Şekil 11. Parçalı gölgeleme durumunda PV sisteme ait akım-gerilim grafiği
(Current-voltage graph of the PV system in case of partial shading)



Şekil 12. Parçalı gölgeleme durumunda PV sisteme ait çıkış gücü-gerilim grafiği
(Output power-voltage graph of the PV system in case of partial shading)

3 adet KC200GT PV panelin çıkışının tek MPPT tarafından kontrol edilmesine karşın, her panel için ayrı MPPT bağlanması durumunda üretilen güçte yaklaşık %32'lik ($\approx \% \left[1 - \frac{258,7}{380} \right]$) bir düşüş söz konusudur. Maliyet analizi yapılarak MPPT sayısının belirlenmesi enerji verimliliği yönünden önem arz etmektedir.

4.2.1. Parçalı çalışma durumunda maksimum güç noktasının analitik olarak bulunması (Analytic analysis of maximum power point under partial shading condition)

PV dizisinin ortak MPPT tarafından kontrol edildiği sistemlerde parçalı gölgeleme durumu mevcut ise, PV'nin çıkış gücünün hesaplanması Eş. 44'deki gibi kolaylıkla hesaplanamaz. Çıkış gücünün hesaplanması için bir takım kompleks matematiksel ifadenin bir arada düşünülmesini gerekir. Her PV panelin bypass diyotuna sahip olduğu varsayılarak, hesaplamalar aşağıdaki işlem sırası gözetilerek yapılabilir [34].

- Her PV panelin maruz kaldığı ışınım değerlerini göz önüne alarak, ışınım matrisini oluşturunuz.
- Her panel için I_{PV} değerini ışınım değerine bağlı olarak hesaplayınız.

$$I_{PV_1} = I_{PV}(G_1), I_{PV_2} = I_{PV}(G_2), I_{PV_3} = I_{PV}(G_3), \dots, I_{PV_N} = I_{PV}(G_N)$$

- $I_{PV,N}$ değerini büyükten küçüğe sıralayınız.
- PV dizisinin çıkış akımı I_{PV}^{panel} ve çıkış gerilimi V_{PV}^{panel} olarak gösterilsin. 'i'.modülün çıkış değerleri ise $I_{PV}^{(i)}$ ve $V_{PV}^{(i)}$ olsun. I_{PV}^{panel} ve V_{PV}^{panel} değerinin, seri bağlı 'i.' PV modülünün $I_{PV}^{(i)}$ ve $V_{PV}^{(i)}$ cinsinden bağıntısı ise Eş. 45'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} I_{PV}^{panel} &= I_{PV}^i & I_{PV}^{panel} &\geq I_{PV(i+1)} \\ V_{PV}^{panel} &= \sum V_{PV}^i \end{aligned} \quad (45)$$

Şekil 10'a ait PV dizisinin çıkış akım ve gerilimini veren sözde (pseudo) kod aşağıdaki gibidir.

PSC altında çalışan PV dizisinin akım-gerilim grafiği Şekil 14'de verilmiştir. Görüldüğü üzere akım-gerilim ifadesinin 3 farklı bölgeden oluştuğu görülmektedir. Şekil 15'de ise, PV panellerin ilettime geçme durumuna göre panellerin gerilim değişimini göstermektedir.

if $I_{PV}^{1000} > I_{PV}^{600}$

$$I_{PV} = I_{PV}^{1000} \text{ ve } V_{PV} = V_{PV}^{1000}$$

elseif $I_{PV}^{600} > I_{PV}^{300}$

$$I_{PV} = I_{PV}^{600} \text{ ve } V_{PV} = V_{PV}^{1000} + V_{PV}^{600}$$

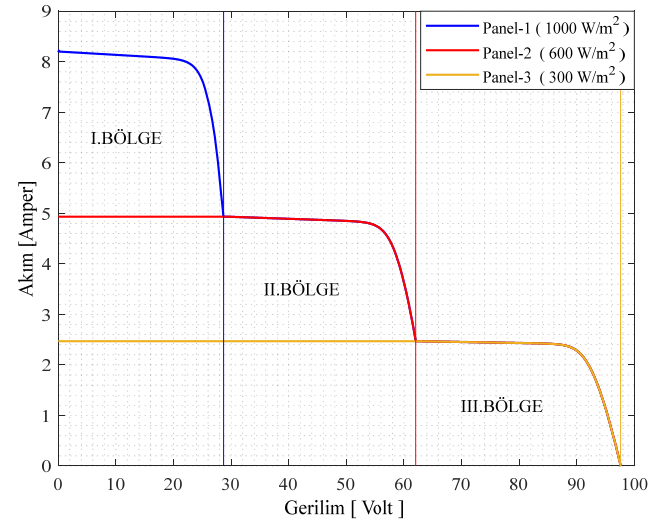
else

$$I_{PV} = I_{PV}^{300} \text{ ve } V_{PV} = V_{PV}^{1000} + V_{PV}^{600} + V_{PV}^{300}$$

end

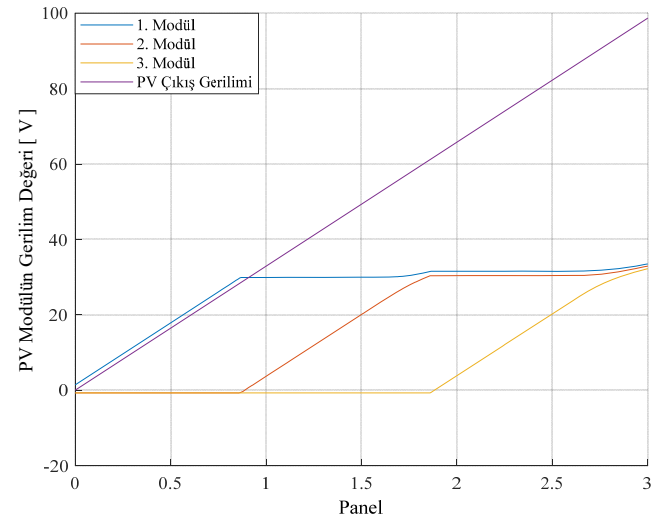
Şekil 13. Kısmi gölgeleme durumu için solar panelin çıkış değerlerinin sözde kodu

(Pseudo-code of solar panel output values for partial shading condition)



Şekil 14. PV modüllerin üzerinden geçen akım ve PV dizisinin çıkış akımı

(Current flowing through PV modules and output current of PV array)



Şekil 15. PV modüllerin ilettime geçtiği andaki gerilim değişimi ve PV dizisinin çıkış gerilimi (Variation of voltage when PV modules turn on and output voltage of PV array)

- Birinci bölgede: 1-nolu-PV-modül tarafından üretilen akım ve gerilim değeri, PV dizisinin çıkış akım ve geriliminin kendisidir.

Bu bölgede, 2 ve 3-nolu modüller bypass diyotu tarafından köprülenir. PV dizisinin çıkış akımı, en büyük değere sahip kısmi gölgeli modülün (2-nolu-PV-modül) ürettiği akım ile aynı değere ulaşana kadar (ikinci bölgeye girene kadar) 1-nolu-modül tarafından üretilen akım ile eşdeğer olacaktır.

- İkinci bölgeye ulaşıldığı andan itibaren 2-nolu-PV-modül, 1-nolu-PV-modülün güç üretimine katkı vermeye başlayacaktır. Çıkış akımı, 1 ve 2-nolu PV panellerin üzerinden geçen akım ile aynıdır. Gerilim değeri ise, 1.Bölgenin sonlandığı ve 3.Bölgenin başladığı noktalar arasında bir değerde gezinecektir.
- Benzer şekilde çıkış akım değeri 3-nolu-PV-modül tarafından üretilen akım değerine düştüğü andan itibaren 3-nolu-PV-modül devreye girecektir. Bu sırada PV dizisinden, en küçük PV panele ait akım değeri geçerken, gerilim değeri ise 2. ve 3.Bölgenin sonlandığı noktalar arasında bir değerde gezinecektir.

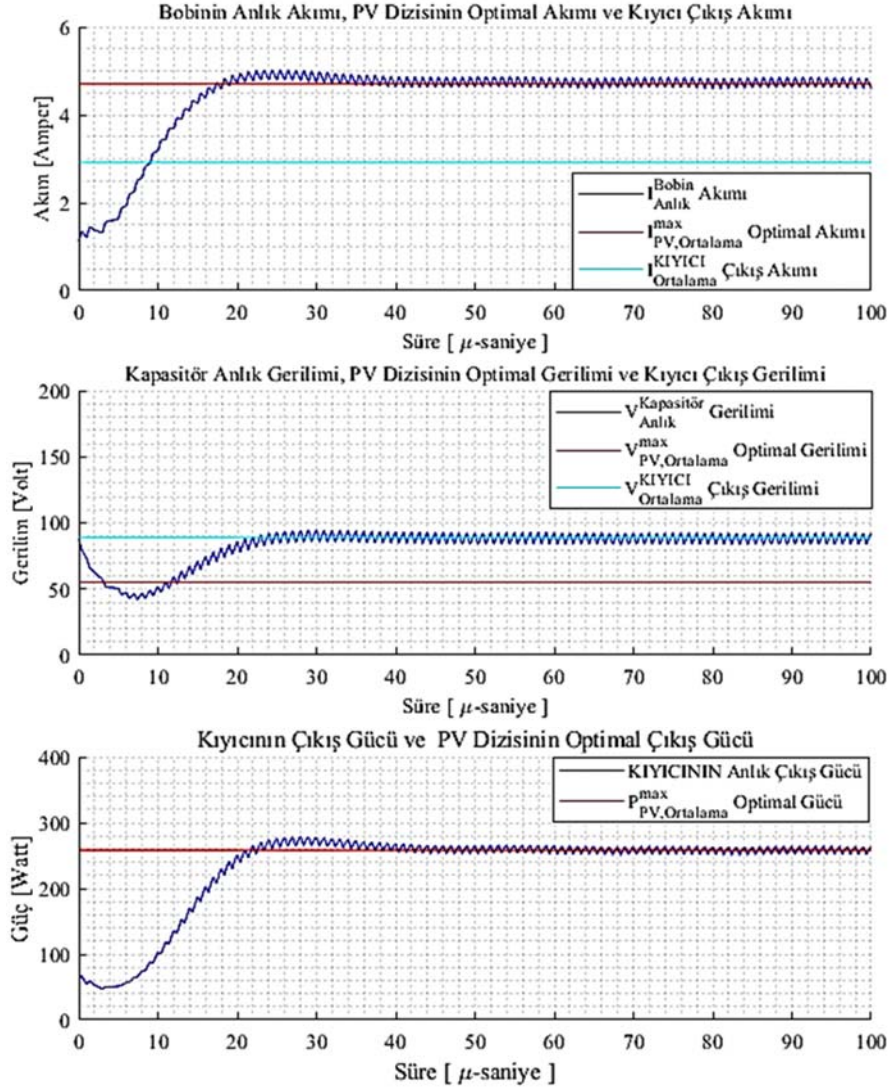
Böylece seri bağlı PV paneller için farklı ışınım değerleri kadar bölgeler (tepeler) oluşacaktır. MPPT cihazı anahtarlama elemanı yardımıyla, oluşan bu bölgelerde en yüksek güç değerini yakalayınca kadar arama işlemini tekrarlayacaktır. 1-nolu-modül en yüksek radyasyon değerine sahip olmasından dolayı, iletme geçtiği anda (güç üretmeye başladığında) çıkış gerilim değeri 2 ve 3-nolu-

modüllerin bypass diyotlarının iletme geçmelerinden dolayı 1,4 voltluk bir gerilim düşümüne maruz kalmaktadır. Benzer şekilde 2-nolu modül iletme geçtiği anda ise 3-nolu bypass diyotundan dolayı sistemde 0,7 voltluk gerilim düşümü oluşmaktadır.

4.3. Yükseltici Tip Kıyıcı Modeline Ait Çıkış Grafikleri (Boost Converter Plots)

Yükseltici tip DC-DC kıyıcının matematiksel modeli Bölüm 2.2’de sunuldu. Elde edilen diferansiyel denklemlerin ($\dot{x} = [i_L \ v_C]^T$) çözümünde Matlab ‘ode-23tb’ komutu ve Runge-Kutta yaklaşımlarından yararlanıldı [35]. Yapılan çalışmanın anlaşılır olması için Şekil 10’da sunulan PV dizisinin çalışma şartları, bağlantı şekli ve optimum durumdaki performansı göz önüne alınarak gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlar Şekil 16’da gösterilmiştir.

Diferansiyel denklem çözümü geçici (transient) ve kararlı hal (steady-state) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Geçici çözüm süresi (oturma zamanı), seçilen kapasitör ve endüktans değeri ile doğrudan etkilidir. ‘L ve C’ değeri seçimi PV panel ve kıyıcının çıkışlarındaki dalgalanma miktarının artıp/azalmasında önemli rol oynamaktadır. MPPT tasarımında, oturma süresi ve dalgalanma miktarı göz önüne



Şekil 16. Bobin, kapasitör ve PV panelin çıkış grafikleri (Output plots of inductor, capacitor and PV panel)

alındığında kıyıcıya ait uygun parametrelerin seçilmesi oldukça önem arz etmektedir. Çalışmada kullanılan DC-DC kıyıcı devresine ait seçilen parametre değerleri ve değerlerin hesaplamasına ilişkin bağıntılar Bölüm 2.3'te gösterilmiştir. Tablo 3 kararlı-hal çalışma durumu göz önüne alındığında elde edilen sonuçlardır. Tabloda, PSC anında ve sistemin optimal anahtarlama konumunda DC-DC yükseltici tip kıyıcı ve PV dizisinin çıkış değerleri görülmektedir.

PV dizisinin çıkış gücü ile kıyıcının çıkış gücü arasında farkın oluşmasının sebepleri:

- Kıyıcıya ait devre elemanlarının çalışmasının ideal kabul edilmemesi ve devre elemanlarının küçüğe olsa iç direncinin olduğunun hesaplara ilave edilmesi.
- Kıyıcının giriş ve çıkış terminallerinde, akım ya da gerilim sınımlarının mevcut olması.
- Güç hesaplamalarının, ortalama salınım değerleri üzerinden hesaplanması olarak özetlenebilir.

Matlab 'ode-23tb' komutu diferansiyel denklem çözümünde değişken adım aralığını kullanmaktadır. Bu yüzden ortalama değer hesaplaması, sistemin kararlı hale geçtikten sonra uygun değerlerin seçilmesi ile bulunmaktadır. Tablo 3'de yazılan ortalama değer sonuçları, bahsedilen bu hesaplama tekniği göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

PV dizilerinin parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktasının izlenmesi için, 3 (üç) farklı meta-sezgisel algoritma kullanılarak güç takibi gerçekleştirilmiştir. KC200GT modeli panel verileri göz önüne alınarak MPPT optimizasyon problemi çözülmüştür. PV panel, yükseltici tip kıyıcı, kısmi gölgelenme durumunda panelin davranışı ve optimizasyon algoritması dahil tüm modeller Matlab ortamında kod olarak (Matlab-script) yazılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulan parametre değişkenleri ve Şekil 10'daki panel dizisinin bağlantı şekli kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatürde birçok arama algoritması bulunmaktadır. Herhangi bir optimizasyon probleminin çözümünde, literatürde bulunan birçok optimizasyon algoritması kullanılmaktadır.

The-no-free-lunch (NFL) teoremi, bütün optimizasyon problemlerini çözmek için her meta-sezgisel arama algoritmasının en iyi performansı gösteremeyeceği temeline dayanır. Başka bir deyişle, herhangi bir meta-sezgisel yaklaşım bir dizi problem üzerinde çok umut verici sonuçlar gösterebilir, fakat aynı arama algoritması farklı soru setinde düşük performans sergileyebilir [36-38]. Bu nedenle problem çözümünde, bir optimizasyon algoritması değil birden fazla arama algoritması benzer problemin çözümünde çalıştırılması gerekmektedir. Böylece arama algoritmalarının problem çözümündeki performansları karşılaştırılabilir. PV sistemlerde MPPT problemini çözmek için literatürde çok sayıda optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, CO güncel bir arama algoritması olması ve daha önce MPPT probleminin çözümüne uygulanmamış olması nedeni ile tercih edilmiştir. Sunulan algoritmanın uygunluğunu test etmek ve performansını karşılaştırmak için daha önce MPPT probleminin çözümünde uygulanmış ve literatürde çok sayıda atıf almış olan GWO ve PSO-GSA algoritmaları tercih edilmiştir. Algoritmaların performanslarını eşit koşullar altında analiz edebilmek için her meta-sezgisel algoritmanın üye sayısı (population number) 3 (üç), maksimum iterasyon sayısı ise 25 (yirmi beş) olarak sınırlanmıştır. Algoritmaların başlangıç koşullarına ait seçilen parametre değerleri Tablo 4'de sunulmuştur.

Algoritmaların gerçek performanslarını sergileyebilmeleri için ise tüm arama algoritmaları bağımsız şekilde 1000 (bin) kez koşurulmuştur. Yapılan çalışmanın akış şeması (flowchart) Şekil 17'de gösterilmiştir.

5.1. Test Edilen Algoritmaların Performansının Karşılaştırılması (Comparing the Performances of the Tested Algorithms)

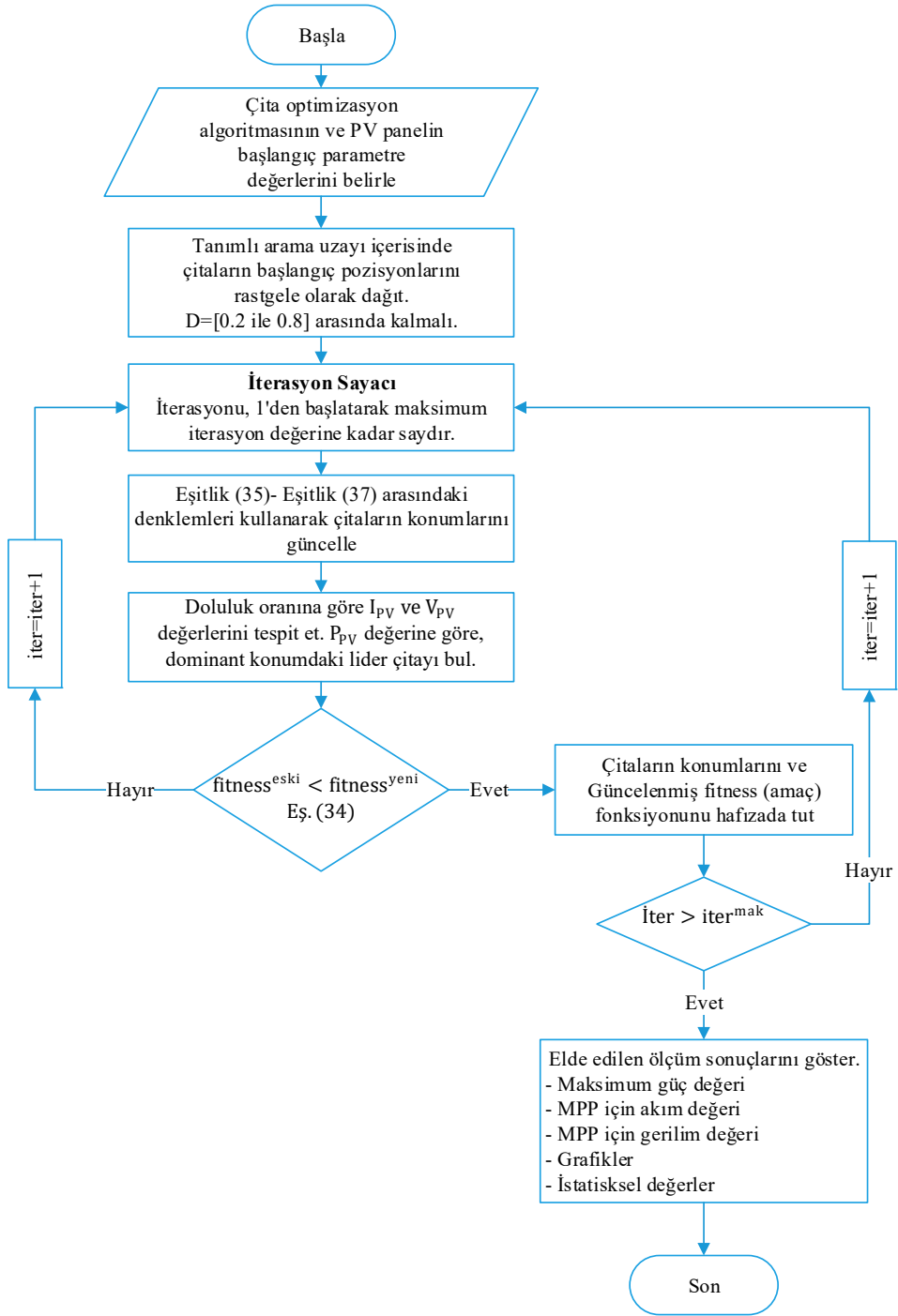
Eş. 40'da çalışmanın amaç (objective) fonksiyonu matematiksel olarak verilmiştir. Fonksiyonun temel amacı PV dizininin maksimum gücün elde edilmesi olarak tasarlanmıştır. Tüm algoritmalar belirlenen amaç fonksiyonuna uygun olarak 1000'er kez koşurulmuştur. Tablo 5, algoritmalar tarafından üretilen, anahtarlama elemanının doluluk oranına göre PV dizininin güç çıkış değerlerini göstermektedir. Tüm algoritmalar farklı sayılarda global değere başarılı şekilde ulaşmışlardır. Global değere ulaşmada en iyi ve en kötü performansı sırasıyla CO (994/1000) ve GWO (256/1000) algoritmaları göstermiştir.

Tablo 3. Optimal çalışma durumu için PV ve Kıyıcının çıkış değerleri (Output values of PV and Boost converter for optimal operating condition)

	Değişken Adı	Minimum Değer	Maksimum Değer	Dalgalanma (%)	Ortalama Değer
Kıyıcı Çıkışı	Gerilim (Volt)	88,00153653	88,04874854	0,02681	88,0248596
	Akım (Amper)	2,93338455	2,93495828	0,02701	2,9341619
	Güç (Watt)	258,14234772	258,41940399	0,05363	258,2792072
PV Çıkışı	Gerilim (Volt)	54,93280637	54,93898827	0,00562	54,9350719
	Akım (Amper)	4,69540749	4,71193336	0,17566	4,7037063
	Güç (Watt)	257,85294269	258,76107535	0,17578	258,3984477
	Doluluk Oranı	-	-	-	0,3761991

Tablo 4. Algoritmalara ait parametre değerleri (Parameters of algorithms)

Algoritma Adı	Üye Sayısı	İterasyon Sayısı	Başlangıç Parametre Değerleri			
CO	3	25	m = 1	-	-	-
PSO-GSA	3	25	C ₁ = 2,05	C ₂ = 2,05	G ₀ = 3	α = 19
GWO	3	25	α = ∞	β = ∞	δ = ∞	-



Şekil 17. MPPT Algoritmasının Yük Akış Şeması (Flowchart diagram of MPPT Algorithm)

Tablo 5. En iyi/kötü anahtarlama durumlarında güç üretimi ve global değerin yakalanması (Best/worst case switch statuses for power generation and reaching global optima)

Algoritma Adı	En İyi Durumda Üretilen Güç $P_{Güç}^{Maks.} (W)$	En Kötü Durumda Üretilen Güç $P_{Güç}^{Mini.} (W)$	Ortalama Üretilen Güç $P_{Güç}^{Orta} (W)$	Global Değeri Yakalama Sayısı	Verimlilik $\eta = \frac{P_{ortalama}}{P_{global}}$
GWO	258,398447795	257,918993316	258,388816643	256 / 1000	0,999962727518
PSO-GSA	258,398447795	258,389440300	258,398401133	958 / 1000	0,999999819421
CO	258,398447795	258,397671445	258,398443136	994 / 1000	0,999999981973

Çıta optimizasyon algoritmasının en kötü anahtarlama durumunda dahi ürettiği güç çıkış değeri global değerden %3e-4 daha düşüktür. PV panellerde verimlilik, ortalama üretilen güç değerinin global değere bölünmesi ile hesaplanır. Tablodan görüldüğü üzere her algoritmanın verimliliği 0,999 değerinden büyüktür. Tablo 6’da algoritmaların lokal ya da global değere ulaşmak için iterasyon sayılarını göstermektedir. CO algoritması ortalama yakınsama iterasyon sayısı (14,264) bakımından en iyi performansı göstermiştir. Buna rağmen, yakınsama hızı algoritmaların performansını göstermek açısından yeterince uygun bir kriter değildir.

5.2. Meta-Sezgisel Algoritmaların İstatiksel Açından Değerlendirilmesi
(Statistical Evaluation of the Meta-Heuristic Algorithms)

Bu bölümde algoritmalar, farklı istatistiksel yaklaşımlar göz önüne alınarak test edilmiştir. Bu değerlendirme algoritmaların performanslarının test edilmesi için oldukça önemlidir. Tablo 7, test edilen algoritmaların istatistiksel sonuçlarını göstermektedir. Tablodan görüldüğü üzere, her durumda (medyan ve mod hariç) en küçük istatistiksel değeri CO arama algoritması üretmiştir. Bu yönü ile karşılaştırılan algoritmalar arasında en iyi performansı sergilediği görülmektedir.

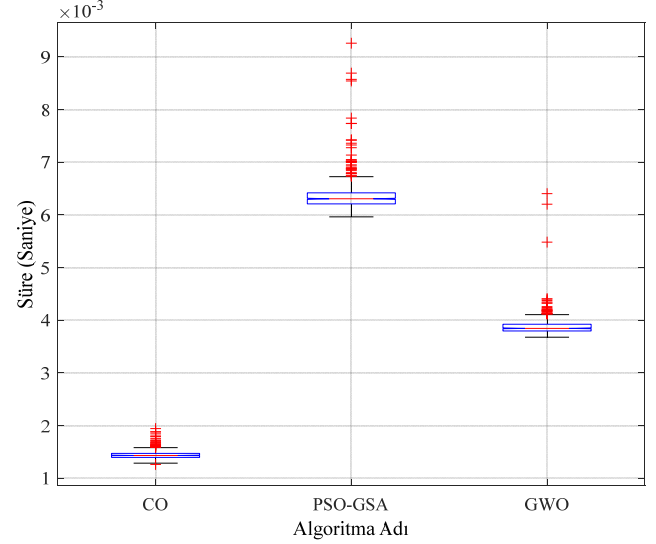
Tablo 5 ve Tablo 7 detaylı şekilde analiz edildiğinde; en fazla global değeri yakalaması, istatistiksel olarak en düşük standart sapma ve hata değerlerine sahip olması ve en kötü anahtarlama durumunda dahi global değere en yakın değeri üretmesi açısından çıta optimizasyon algoritması karşılaştırılan algoritmalar arasında en başarılı meta-sezgisel arama algoritması olarak söylenebilir.

5.3. Algoritmaların Döngüyü Tamamlama Süreleri
(Algorithms' Elapsed Time in a Loop)

Test edilen algoritmaların döngüyü (iterasyonu) tamamlama sürelerine ait detaylar Tablo 8’de verilmiştir. Görüleceği üzere algoritmaların koşturulması sırasında geçen maksimum, minimum ve

ortalama süre değerlerinde en küçük değeri her durumda CO algoritması üretmiştir. Bununla birlikte Tablo 8’teki en düşük süre değerlerinin üretilmesi, CO algoritmasının gücünü bir kez daha ortaya koymaktadır.

Algoritmaların döngülerini tamamlamak için harcadıkları süre grafik olarak Şekil 18’de gösterilmiştir. Burada ‘+’ olarak gösterilen değerler aykırı değerleri ifade etmektedir.



Şekil 18. Döngüyü tamamlamak için geçen süre (Elapsed time to complete the loop)

Test edilen algoritmalar yardımıyla, PV panelin ürettiği ortalama çıkış gücü, ortalama akım değeri ve ortalama gerilim değerinin değişimi Şekil 19’da gösterilmiştir. Şeklin en alt satırında ise anahtarlama elemanının doluluk oranındaki anlık değişimi görülmektedir.

Tablo 6. Algoritmaların lokal ya da global değere yakınsama hızları
(Convergence characteristics of algorithms to detect local or global value)

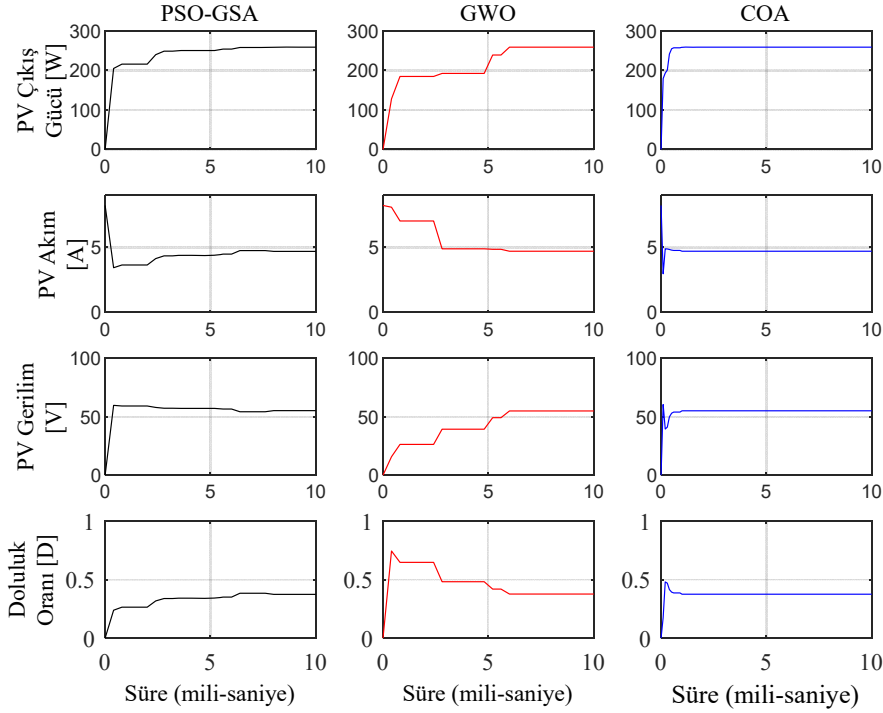
Algoritma Adı	Maksimum iter. değeri	Minimum iter. değeri	Ortalama iter. değeri
GWO	25	1	18,324
PSO-GSA	25	1	16,447
CO	23	1	14,264

Tablo 7. Her algoritmanın performansının istatistiksel olarak değerlendirilmesi
(Statistical evaluation of the performance of each algorithm)

Algoritma Adı	STD (σ)	SE	% RE	MAE	MSE	RMSE	RMSLE	Medyan	Mod
GWO	3,5233e-4	1,1142e-5	1,8058e-5	4,6661e-5	1,2619e-7	3,5524e-4	5,9476e-7	258,4	258,4
PSO-GSA	2,6649e-2	8,4272e-4	3,7274e-3	9,6312e-3	8,0223e-4	2,8324e-2	4,7444e-5	258,4	258,4
CO	5,9981e-5	1,8973e-6	1,8032e-6	4,6581e-6	3,6165e-9	6,0147e-5	1,0079e-7	258,4	258,4

Tablo 8. Algoritmaların iterasyonu tamamlama süreleri (Algorithms' elapsed time to complete iteration)

Algoritma Adı	Geçen Süre (second)						
	Maksimum değer	Minimum değer	Ortalama değer	Medyan değer	Üst yakın değer	Alt yakın değer	Aykırlık sayısı
GWO	0,006405	0,003680	0,003875	0,003847	0,004106	0,003680	27/1000
PSO-GSA	0,009258	0,005965	0,006348	0,006306	0,006727	0,005965	34/1000
CO	0,001944	0,001262	0,001441	0,001434	0,001581	0,001289	27/1000



Şekil 19. PV dizisinin çıkış değerleri ve kıyıcının doluluk oranı (Output values of PV array and duty ratio of Boost converter)

Şekilden görüleceği üzere test edilen meta-sezgisel arama algoritmaları, farklı sürelerde GMPP değerini yakalamışlardır.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, PV dizilerin kısmi gölgeleme durumunda maksimum güç noktasının izlenmesi için, PSO-GSA, GWO ve CO olmak üzere 3 (üç) farklı meta-sezgisel arama algoritması kullanılmıştır. CO algoritması, literatüre yeni girmiş bir meta-sezgisel arama algoritma olup, MPPT probleminin çözümünde ilk defa uygulanmıştır. Kullanılan algoritmaların performansları 15 (on beş)'ten fazla istatistiksel yaklaşımla ayrıntılı olarak test edilmiştir. Analizlerde kullanılan tüm modeller Matlab-kod olarak yazılmıştır. Test sisteminin daha esnek bir şekilde çalıştırılması sağlanmıştır. Böylece koşutlanan her algoritmanın performansı kolaylıkla analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- CO, PSO-GSA ve GWO algoritmaları sırasıyla 994, 958 ve 256 kez (1000 kez üzerinden) global optimum noktasını başarıyla yakalamıştır.
- Karşılaştırılan 3 algoritma arasında global optimum noktasını en fazla yakalayan, standart sapma değeri ve hata analiz değerleri en az olan CO algoritmasıdır. Bu yönüyle karşılaştırılan algoritmalar arasında en iyi performansı CO algoritması göstermiştir.
- CO algoritmasının ortalama lokal/global maksimum güç noktasını yakalama süresi, GWO ve PSO-GSA algoritmalarına göre sırasıyla 2,91 ve 5,03 kat daha hızlı olduğu belirlenmiştir.
- Ayrıca, CO algoritmasının 1000 kez koşutlanması sonucunda MPP değerine ulaşması ortalama 1,44 ms (mili-saniye) civarında olduğu görülmüştür.

Bu yönü ile yapılacak MPPT çalışmalarında, CO'nun ümit vadeden bir arama algoritması olduğu görülmektedir. Son yıllarda, mikrodenetleyici teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, pratik MPPT uygulamalarında kullanılan donanımlar hala bilgisayarlar kadar yüksek hesaplama gücüne sahip

değildir. Bu nedenle, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel bir çalışma, meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının pratikteki kullanımıyla ilgili daha güvenilir bilgiye ulaşmaya olanak sağlayacaktır. Bu çalışmada elde edilen bilgi ve bulgular, konuyla ilgili kapsamlı bir teorik altyapı sağlamaktadır. İleride planlanan pratik çalışmalar için önemli bir referans kaynağı olması beklenmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Alkan S., Ates Y., Pilot Scheme Conceptual Analysis of Rooftop East–West-Oriented Solar Energy System with Optimizer, *Energies (Basel)*, 16 (5), 2396, 2023.
2. Gosumbonggot J., Nguyen D.-D., Fujita G., Partial Shading and Global Maximum Power Point Detections Enhancing MPPT for Photovoltaic Systems Operated in Shading Condition, *53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, UK, 1–6, 2018.
3. Ishaque K., Salam Z., Amjad M., Mekhilef S., An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (8), 3627–3638, 2012.
4. Rezk H., A comprehensive sizing methodology for stand-alone battery-less photovoltaic water pumping system under the Egyptian climate, *Cogent Engineering*, 3 (1), 1-12, 2016.
5. Rezk H., Dousoky G. M., Technical and economic analysis of different configurations of stand-alone hybrid renewable power systems – A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 941–953, 2016.
6. Aygül K., Cikan M., Demirdelen T., Tumay M., Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45 (3), 1–19, 2019.
7. Ponkarthik N., Kalidasa Murugavel K., Performance enhancement of solar photovoltaic system using novel Maximum Power Point Tracking, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 60, 1–5, 2014.
8. Ramli M. Z., Salam Z., Analysis and experimental validation of partial shading mitigation in photovoltaic system using integrated DC-DC converter with maximum power point tracker, *IET Renewable Power Generation*, 13 (13), 2356–2366, 2019.

9. Liu Y.-H., Huang S.-C., Huang J.-W., Liang W.-C., A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (4), 1027–1035, 2012.
10. Xiao W., Dunford W. G., A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems, *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Aachen, Germany, 1957-1963, 2004.
11. Üzmuş H., Genç N., Çelik M. A., DSP based hybrid control method for PV systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (4), 2251–2260, 2023.
12. Liu F., Duan S., Liu F., Liu B., Kang Y., A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (7), 2622–2628, 2008.
13. Safari A., Mekhilef S., Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4), 1154–1161, 2011.
14. Mei Q., Shan M., Liu L., Guerrero J. M., A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (6), 2427–2434, 2011.
15. Kimball J. W., Krein P. T., Discrete-Time Ripple Correlation Control for Maximum Power Point Tracking, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (5), 2353–2362, 2008.
16. Chen K., Tian S., Cheng Y., Bai L., An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5 (3), 978–985, 2014.
17. Thakkar N., Cormode D., A. Lonij V. P., Pulver S., Cronin A. D., A simple non-linear model for the effect of partial shade on PV systems, *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu, HI, USA, 2321–2326, 2010.
18. Refaat A., Khalifa A. E., Elsakka M. M., Elhenawy Y., Kalas A., Elfar M. H., A novel metaheuristic MPPT technique based on enhanced autonomous group Particle Swarm Optimization Algorithm to track the GMPP under partial shading conditions - Experimental validation, *Energy Conversion and Management*, 287, 117124, 2023.
19. Hamza Zafar M., Noman M.K., Mirza A.F., Mansoor M., Akhtar N., Qadir M.U., Khan N.A., Moosavi S.K.R., A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101367, 2021.
20. Guo K., Cui L., Mao M., Zhou L., Zhang Q., An Improved Gray Wolf Optimizer MPPT Algorithm for PV System with BFBIC Converter Under Partial Shading, *IEEE Access*, 8, 103476–103490, 2020.
21. Cikan M., Dogansahin K., A Comprehensive Evaluation of Up-to-Date Optimization Algorithms on MPPT Application for Photovoltaic Systems, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45 (4), 10381–10407, October 2023.
22. Dagal I., Akin B., Akboy E., MPPT mechanism based on novel hybrid particle swarm optimization and salp swarm optimization algorithm for battery charging through simulink, *Scientific Reports*, 12 (1), 2664, 2022.
23. Manna S., Singh D.K., Akella A.K., Kotb H., AboRas K.M., Zawbaa H.M., Kamel S., Design and implementation of a new adaptive MPPT controller for solar PV systems, *Energy Reports*, 9, 1818–1829, 2023.
24. Karafil A., Comparison of the various irregular pulse density modulation (PDM) control pattern lengths for resonant converter with photovoltaic (PV) integration, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1595–1611, 2021.
25. Akbari M. A., Zare M., Azizpanah-abarghooe R., Mirjalili S., Deriche M., The cheetah optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems, *Scientific Report*, 12 (1), 10953, 2022.
26. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A., Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61, 2014.
27. Mirjalili S., Hashim S. Z. M., A new hybrid PSO-GSA algorithm for function optimization, *International Conference on Computer and Information Application*, Tianjin, China, 374–377, 2010.
28. De Soto W., Klein S. A., Beckman W. A., Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Solar Energy*, 80(1), 78–88, 2006.
29. Tian H., Mancilla-david F., Ellis K., Jenkins P., Muljadi E., A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems Preprint, *Solar Energy Journal*, 2012.
30. Hejri M., Mokhtari H., Azizian M. R., Söder L., An analytical-numerical approach for parameter determination of a five-parameter single-diode model of photovoltaic cells and modules, *International Journal of Sustainable Energy*, 35 (4), 396–410, 2016.
31. Ioinovici A., Modeling DC-DC Converters, *Power Electronics and Energy Conversion Systems*, 161–368, 2013.
32. Ayop R., Tan C. W., Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications, *Solar Energy*, 160, 322–335, 2017.
33. Kyocera, High-efficiency multi-crystal photovoltaic module KC200GT, *PV datasheet*, 2, 2009.
34. Seyedmahmoudian M., Mekhilef S., Rahmani R., Yusof R., Renani E. T., Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems, *Energies*, 6 (1), 128–144, 2013.
35. Shaffer R. A., *Fundamentals of Power Electronics with MATLAB*, Laxmi Publications, 2013.
36. Nacar Cikan N., Cikan M., Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796, 2024.
37. Cikan M., Nacar Cikan N., Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 144, 108564, 2022.
38. Cikan M., Kekezoglu B., Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration, *Alexandria Engineering Journal*, 61 (2), 991–1031, 2022.