

FV sistemlerde kısmi gölgeleme koşullarında maksimum güç noktası takibi için metasezgisel algoritmaların karşılaştırmalı performans analizi

Comparative performance analysis of metaheuristic algorithms for maximum power point tracking under partial shading conditions in PV systems

Emrah GÜRKAN^{1*} , Ahmet GÜNER² 

¹Yazarların Bölümü, Arapgir Meslek Yüksekokulu, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye.

emrah.gurkan@ozal.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye.
aguner@bingol.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.06.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 20.02.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 27.12.2023

doi: 10.5505/pajes.2024.61667
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Fotovoltaik sistemler, güneş ışınımını doğrudan elektriğe dönüştüren yenilenebilir enerji sistemlerinden birisidir. FV sisteme ait akım ile gerilim arasındaki ilişki doğrusal değildir ve güç verimliliğinin en büyük olduğu tek bir nokta bulunmaktadır. Güç verimliliği esas olarak güneş ışınımı ve sıcaklık gibi atmosferik koşullara bağlıdır. Bu nedenle literatürde, maksimum verimliliği elde etmek için çeşitli maksimum güç noktası takibi algoritmaları önerilmiştir. Önerilen geleneksel yöntemler tek tip ışınım ve sabit sıcaklık koşulları altında maksimum güç noktası takibinde yüksek performans göstermektedir. Fakat güç verimliliğini etkileyen diğer bir durum, kısmi gölgeli koşuldur ve kısmi gölgeli koşullarda, çıkış gücü eğrisi üzerinde birden fazla maksimum nokta bulunmaktadır. Bu sebeple, geleneksel yöntemler global maksimum güç noktalarına ulaşmak için yetersiz kalmaktadırlar. Bu sorunu çözebilmek için metasezgisel algoritmalar önerilmiştir. Bu çalışmada, önerilen metasezgisel algoritmalar içerisinde parçacık sürü optimizasyonu, gri kurt optimizasyonu ve balina optimizasyonu algoritmaları seçilerek kısmi gölgeli koşullarda yakınsama hızı ve verimlilik açısından karşılaştırmalı performans analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem grafiksel hem de sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Metasezgisel algoritmalar, Parçacık sürü optimizasyonu, Gri kurt optimizasyonu, Balina optimizasyonu, Kısmi gölgeli koşullar.

Abstract

Photovoltaic systems are one of the renewable energy systems that convert solar radiation directly into electricity. The relationship between current and voltage of PV system is nonlinear and it has only one point where power efficiency is greatest. Power efficiency mainly depends on atmospheric conditions such as irradiance and temperature. Therefore, various maximum power point tracking algorithms have been proposed in the literature to obtain maximum efficiency. The proposed traditional methods show high performance for maximum power point tracking under uniform irradiance and constant temperature. But another situation that affects the power efficiency is the partial shading condition and there are more maximum points on the output power curve in the partial shading conditions. For this reason, traditional methods are insufficient to reach global maximum power points. Metaheuristic algorithms have been proposed to solve this problem. In this paper, particle swarm optimization, gray wolf optimization and whale optimization algorithms were selected among the metaheuristic algorithms and comparative performance analysis were made in terms of convergence rate and efficiency under partial shading conditions. Obtained results were compared both graphically and numerically.

Keywords: Photovoltaic systems, Metaheuristic algorithms, Particle swarm optimization, Gray wolf optimization, Whale optimization, Partial shading conditions.

1 Giriş

Dünya nüfusundaki büyük artış nedeniyle elektrik enerjisi tüketimi önemli ölçüde yoğunlaşmıştır. Yenilenebilir enerjinin kullanımı ve uygulanması, küresel toplumun endişelerinden birini çözmektedir. Fosil yakıtların kullanımı artık yeterli olmadığından [1], tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında en iyi geleceğe güneş enerjisi sahiptir. Özellikle fotovoltaik (FV), hükümetlerin destekleyici politikaları ve son zamanlarda maliyetindeki büyük düşüş nedeniyle hızla genişlemektedir [2]. Aynı zamanda, neredeyse tüm dünya bölgelerinde önemli uzun vadeli büyüme potansiyeline sahip, güvenilir ve ticari olarak temin edilebilen bir teknolojidir. Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), 2050 yılına kadar FV sistemlerinin küresel elektrik üretiminin yaklaşık %12'sini sağlayabileceğini

ve her yıl atmosfere 2.3 Gigaton karbon dioksit salınımını engelleyebileceğini tahmin etmektedir [3].

Bununla birlikte FV sistemler, yüksek bir ilk kurulum maliyeti ve güneş enerjisinin sadece %12'sinden %25'ine kadarını elektriğe dönüştürebilmesinden [2] dolayı enerji üretiminde düşük performans gibi kayda değer dezavantajlar sunmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar, maksimum güç noktası takibi (MGNT) yöntemleriyle üretilen toplam elektrik enerjisi miktarını en üst düzeye çıkarmanın yollarını aramaktadırlar. FV sistemlerde MGNT kontrolörleri, temel bir özelliktir ve çıkış gücünün en yüksek seviyede olmasını sağlamaktadır. Yani MGNT ile FV sistemin genel verimliliği maksimize edilmektedir. Bir MGNT kontrolör, bir DA/DA dönüştürücü ve bir kontrol algoritmasına sahip gömülü bir elektronik sistem olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Tüm olası çevresel ve çalışma koşullarında mevcut olan maksimum enerji miktarını sağlamak

*Yazışılan yazar/Corresponding author

ve bunu gerçek zamanlı olarak yapmak için tüm FV kurulumlarına entegre edilmiştir. MGNT algoritmaları, uygulama kolaylığı, gerekli sensör sayısı, etkinlik aralığı, farklı güneş ışınımlarında ve sıcaklıklarda sürekli değişiklikleri takip edip edemedikleri, maliyet ve donanımsal olarak uygulanabilir olup olmadıkları gibi birçok açıdan sahip oldukları özelliklere göre değişiklikler göstermektedirler [4].

MGNT algoritmaları, temel olarak model tabanlı algoritmalar, eğitim tabanlı yöntemler ve arama yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Modele dayalı yöntemler, FV kaynağının özelliklerini temsil etmek ve MGN'nin tam veya doğru formülasyonunu bulmak için matematiksel bir modele bağlıdır. Eğitime dayalı yaklaşımlar, MGNT işlevini gerçekleştirmek için önceden eğitim bilgilerine ihtiyaç duyan yapay sinir ağı veya bulanık mantık denetleyicisi kullanır. Arama tekniklerinde, kontrol parametresini MGN'na yönlendirmek için FV kaynağının ölçülen voltajı ve/veya akımı kullanılır [5],[6]. Arama yöntemleri de kendi içerisinde geleneksel ve metasezgisel yöntemler olarak iki grup altında incelenmektedir.

FV sistemlerde MGNT kontrolü için en popüler algoritmalar Değiştir ve Gözle (DG) [7], Artımlı İletkenlik (Aİ) [8] ve Sabit Voltaj [9] algoritmalarıdır. Bu algoritmalar, aynı ışınım ve sıcaklık koşulları altında çok iyi çalışması ve uygulanması çok kolay olması gibi avantajlara sahiptirler. DG ve Aİ algoritmaları çoğunlukla FV sistemlerinden maksimum gücü elde etmek için kullanılır. [10]'da, DG ve Aİ teknikleri arasında yakın zamanda yapılan bir karşılaştırmalı analizi rapor edilmiştir. Her ikisinin de maksimum gücü elde etmek için kullanılabilirliği gösterilmektedir. Yapılan karşılaştırma sonucunda Aİ, DG algoritmasından daha hızlı bir yanıt ve Aİ algoritmasının MGN çevresinde daha az salınımlara sahip olduğu gösterilmektedir.

Birçok araştırmacı, geleneksel DG algoritmasının iyileştirilmesine odaklanmıştır. [11],[12]'de değişken bir gözlem adım boyutu amaçlanırken, [13]'de değiştirilmiş ve adaptif sabit gözlem adım boyutlu yöntemler sunulmuştur. Sabit adımlı bir DG algoritmasında adım büyüklüğü dikkatle seçilmelidir, çünkü büyük adım boyutu, izlenen maksimum noktasının gerçek MGN'dan uzak olmasına ve daha yüksek güç kaybına neden olmaktadır. Küçük adım boyutu kullanmak ise sistemin yavaş geçici tepki vermesine yol açmasına ve FV dizisinin genel performansını düşmesine neden olmaktadır [11].

Fakat, bu algoritmalar ortamdaki sürekli değişikliklere uyum sağlamak ve kısmi gölgeli durumlarda MGN'ni takip edebilme gibi durumlarda başarısız olmaktadır [14]. Yani global MGN (GMGN) ile yerel MPP (YMGN) arasında ayırım yapmazlar ve büyük olasılıkla yerel bir MGN olan ilk gelen MGN'na yakınsarlar. Bu durum, istenen optimal enerji verimliliğinde yaklaşık %70'e varan önemli bir kayba neden olmaktadır [15]. Bu nedenle literatürde farklı alternatif çözümler önerilmiştir. Örneğin, [16]'da, MGN'na hem düşük hem de yüksek güneş ışınımı koşullarında yüksek verimlilikle izlemek için bir sabit voltaj algoritmasını değiştirilmiş bir DG yöntemiyle birleştirilmektedir. Algoritma, FV çıkış voltajı panelin açık devre voltajına yakın olana kadar görev döngüsünü artırarak çalışır, bu daha sonra MGN izleyici için başlangıç koşulları olarak kullanılmaktadır. Benzetim sonuçları, FV panelinden genel olarak daha fazla enerjinin çekilebileceğini göstermektedir, fakat iki yöntemi birleştirmenin bir komplikasyonu dezavantaj olarak belirtilmektedir. [17]'de önerilen yöntem, koşulların değişmesinin neden olduğu güç

değişimi miktarını ölçmek için her değiştirme işleminde ışınımı değiştiren bir tahmin işlemi ekler. Sonuçlar, geleneksel DG yöntemine göre daha iyi performans sahip olduğunu göstermektedir. [18]'da, değişken adım boyutuna sahip bir Aİ tekniği önerilmiştir. Bu yaklaşım, adım boyutunu güneş paneli dizisinin çalışma noktasına göre otomatik olarak ayarlamaktadır. Çalışma noktasının MGN'dan uzak olduğuna karar verildiğinde, algoritmanın MGN'na doğru hızlı bir şekilde çalışma noktasına yaklaşmasını sağlamak için algoritma adım boyutunu artırmaktadır. Ancak çalışma noktası MGN'na yakın olduğunda adım boyutu küçültülür. Böylelikle basamak boyutunun varyasyonu sayesinde hem iyileştirilmiş doğruluk hem de hız elde edilmektedir.

Geleneksel MGNT teknikleri genellikle tek tip ışınım koşulları için kullanılır. Tek tip ışınım koşulları altında, tüm teknikler iyi performans gösterir. Ancak kısmi gölgeleme koşullarında performansları düşmektedir [19],[20]. Kısmi gölgeleme koşulları sırasında P-V eğrilerinde birden fazla tepe noktası görünür. Bununla birlikte, her eğride görünen tek bir MGN vardır ve bu global tepe noktası olarak bilinir, geriye kalan tepe noktaları ise yerel tepe noktası olarak adlandırılır. Ayrıca tek tip ışınım koşullarında yalnızca bir global tepe noktası vardır ve yerel tepe noktası yoktur. Ancak, kısmi gölgeleme koşulları kapsamında birçok yerel tepe noktası vardır ve yalnızca tek bir global tepe noktası vardır. Kısmi gölgeleme, ağaçların, binaların, kuşların veya tozların gölgesi vb. gibi birden fazla kaçınılmaz duruma bağlı olarak oluşur [21],[22]. Kısmi gölgeleme altında, birçok yerel maksimumdan global maksimumu tespit etmek için yeterince verimli olması için bir MGNT algoritması gereklidir [21]. Çoğu durumda, kısmi gölgeleme sorunları kaçınılmaz hale gelir. Örneğin, Almanya'da kurulan FV sistemlerinin neredeyse %41'i kısmi gölgeli FV sistemlerine sahiptir [23],[24]. Kısmi gölgelemeden kaçınmak için çok sayıda metasezgisel algoritmalara dayalı teknikler geliştirilmiştir [25]. Bu algoritmalar bazı şunlardır, karınca kolonisi [26],[27], guguk kuşu algoritması [28],[29], ateş böceği algoritması [30],[31], balina optimizasyonu [32],[33], gri kurt algoritması [34],[35] ve parçacık sürüsü algoritmasıdır [36],[37]. Bunlar, olası çözümleri birleştirerek veya rastgele değişkenler kullanarak global MGN'ni tespit edebildikleri için önerilmiştir. Bu algoritmalar, olası çözümü bulmak için her yinelemede birkaç parçacık uygulamakta ve çok sayıda parçacık, doğruluğu veya hızı artırabilmektedir. Ayrıca, bu teknikler evrim ilkesi altında çalışır ve optimum noktayı bulmak için çoklu yinelemeler kullanır [38],[39].

PSO'nun uygulanması basit olmasına ve optimal noktayı bulabilmesine rağmen, parçacıkların başlangıç pozisyonuna büyük ölçüde bağımlıdır, ayrıca hesaplama açısından yoğun ve zaman alıcıdır, bu da arama doğruluğunu kademeli olarak azaltmaktadır [37]. [40]'da, değiştirilmiş bir PSO yöntemi önerilmiştir. Bu algoritmada, rasgele sayıya sahip birçok değişkenin kullanılması nedeniyle, GMGN'ni mükemmel bir şekilde bulmak için daha fazla yineleme gerektirir ve bu durum GMGN'na yakınsama hızını PSO'dan daha düşük hale getirir.

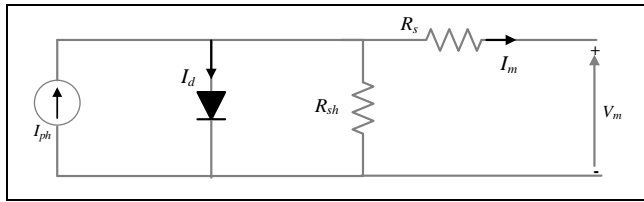
Balina optimizasyonu ve gri kurt optimizasyonu, FV sistemlerinde kısmi gölgeleme sorunlarını çözmek için son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından kullanılan metasezgisel yöntemlerin nispeten yeni üyeleridir. [32]-[35]'e bakıldığında, bu algoritmalar bir veya iki kontrol parametresi gerektirdiğinden ve GMGN'na yakınsaklıkları arama sürecinin başlangıç koşullarına bağlı olmamasından, her iki algoritmanın da basitliğini ve esnekliğini göstermektedir. Öte yandan literatürde, iki tekniğin faydalarını birlikte elde

etmek için bazı makalelerde hibrit teknikler önerilmiştir [41]. Bu hibrit tekniklerde, farklı çalışma koşulları altında iki farklı teknik bir arada kullanılmaktadır. Örneğin, GKO destekli DG (GKO-DG) [42] ve bulanık mantık denetleyicili GKO (GKO-BMD) [41] gibi bazı hibrit teknikler, kısmi gölgeleme durumunda GKO algoritmasının etkinliğini artırmak için önerilmiştir. Bu hibrit tekniklerin MGNT uygulamalarında kullanılması [43]'te değerlendirilmiştir. Ancak, metasezgisel tekniklerin doğasında var olan sorun, görev döngüsünün optimal başlangıç değerini belirleyememeleridir. Ayrıca, bu hibrit teknikler orijinal yöntemden daha iyi sonuçlar vermesine rağmen, tasarlanan MPPT kontrolörleri karmaşık ve zaman alıcıdır.

Bu çalışmada, kısmi gölgeleme koşulları altında FV sistemlerde MGNT'inde en çok kullanılan üç metasezgisel algoritmaların, MATLAB/SIMULINK platformunda tasarlanan benzetim sistemine uygulanmış ve birbirleriyle karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca geleneksel deistir ve gözle yöntemi karşılaştırma amacıyla dikkate alınmıştır. Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir; ikinci bölümde, FV sistemin ve DA/DA yükselten dönüştürücünün modellenmesi sunulmuş ve kısmi gölgeli durumların etkileri gösterilmiştir. Üçüncü bölümde, MGNT algoritmaları ayrıntılı bir şekilde ve akış diyagramlarıyla beraber sunulmuştur. Dördüncü bölümde, benzetimlerle elde edilen grafikler sunulmuş ve elde edilen veriler doğrultusunda karşılaştırılmaları yapılmış ve son olarak beşinci bölümde, sonuçlar ile çalışma sonlandırılmıştır.

2 Fotovoltaik panel modeli

FV panellerde tek veya çift diyotlu olmak üzere iki çeşit eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. Bu modellerden tek diyotlu eş değer devresi daha basit yapısıyla ve içeriğinde karmaşık hesapların olmaması sebebiyle daha sık tercih edilmektedir [44]. Bu çalışmada tek diyotlu eş değer devresi incelenmiştir. Bir FV panel akım kaynağı ve bu akım kaynağına paralel olacak şekilde bağlanan bir adet diyottan oluşmaktadır. Şekil 1'de tek diyotlu bir FV modülün eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 1. FV modülün eşdeğer devresi.

Figure 1. Equivalent circuit of PV module.

Burada I_{ph} ışık şiddetine bağımlı akım kaynağı, I_d diyottan akan akım, R_{sh} kaçak akımların aktarılmasını sağlayan paralel direnç, R_s ise panelin iç kayıplarını ifade eden seri dirençtir. Bu eş değer devre modeline Kirchhoff akım yasası uygulanarak FV hücreye ait genel akım-gerilim karakteristikleri Denklem 1 ve Denklem 2'de gösterilmiştir [45].

$$I_m = I_{ph} - I_d \quad (1)$$

$$I_m = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_m + IR_s)}{n \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_m + I_m R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

Denklem 2'de, n kalite faktörü, k Boltzmann sabiti, q elektron yükünü, T panel hücresi sıcaklığını, V_m panel hücresine düşen gerilim değerini, I_0 ise ters diyotun ters doyum akımını temsil etmektedir.

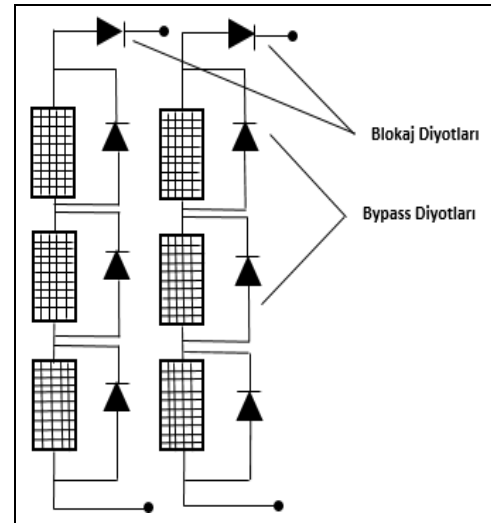
Işık şiddeti ve sıcaklık, fotoakımının değerini etkileyen önemli etkenlerdir. Denklem 3'te görüldüğü gibi ışık şiddetinin artışı fotoakım değerini artırırken, sıcaklığın artmasıyla fotoakım değeri azalmaktadır. Bunun sebebi denklemdeki K_1 katsayısı negatif işaretlidir. Dolayısıyla fotoakım değeri sıcaklıkla ters, ışık şiddeti ile doğru orantılıdır.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_1(T_c - T_{ref})] \frac{G}{1000} \quad (3)$$

I_{sc} kısa devre akımı, K_1 FV hücre kısa devre akımı sıcaklık katsayısı, T_c FV hücre sıcaklığı, T_{ref} referans FV hücre sıcaklığı, G ışınım miktarını temsil etmektedir.

3 Kısmi gölgeli koşullarda FV panellerin tepkisi

FV panellerin verimini en çok etkileyen faktörlerden birisi de kısmi gölgeli durumdur. Kısmi gölgeli durumlar bulut, bina, ağaçların gölgesi gibi çeşitli çevresel faktörlerden oluşmaktadır. Seri bağlanan panel hücreleri kısmi gölgelenmeden dolayı farklı ışınımlara maruz kalabilir. Bu durumda kısmen bazı panel hücrelerine daha az güneş ışınımı yansyacağından diğer panel hücrelerine kıyasla daha düşük akım elde edilme durumu olacaktır. Panelin üreteceği güç, akım değerine bağlı olduğundan panel gücünde düşüş meydana gelecektir. Gölgeleme oluşmayan panel hücrelerinde gölgelemeye maruz kalan kısımlara göre daha yüksek akım geçeceği için panellerde sıcak nokta denilen bir olay gerçekleşmektedir. Sıcak nokta panellerin aşırı ısınmasına bağlı olarak fiziksel yapılarına büyük zarar görmesine sebep olmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek için bypass diyotları olarak adlandırılan diyotlar panellere paralel olacak şekilde bağlanır. Şekil 2'de panellere bypass diyotunun paralel bağlantısının nasıl yapıldığı gösterilmektedir. Böylece bypass diyotu panelde oluşabilecek sıcak nokta ortaya çıkmasına karşı koruma sağlamaktadır. Bu diyotlar sistemde herhangi bir gölgeleme durumu yoksa pasif konumdadır.



Şekil 2. Bypass diyotların FV sisteme bağlantı şekli.

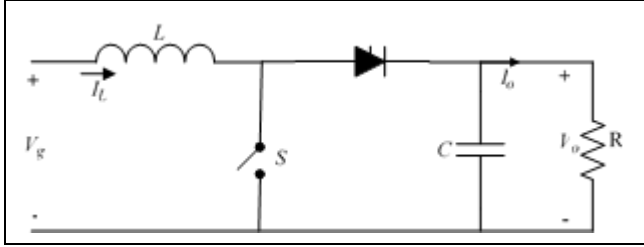
Figure 2. Connection of bypass diodes to PV system.

Bypass diyotlarının kullanımı oldukça önemli olsa da bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan en önemlisi bypass diyotu iletme geçtiğinde akım doğrudan diyot üzerinden akarak panellerde üretilen güçü kesmesidir.

Bunun sonucunda panelin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristik eğrisinde tek bir maksimum tepe noktası oluşması yerine birçok tepe noktaları oluşmasına neden olmaktadır. Bu noktalardan maksimum çıkış gücüne ulaşılan noktaya global maksimum güç noktası (GMGN) olarak adlandırılmaktadır. Diğer tepe noktaları ise yerel maksimum güç noktası (YMGN) olarak isimlendirilir[46].

4 DA-DA yükselten dönüştürücü

Güneş panellerinin farklı hava koşullarında maksimum güç noktasında çalıştırılması istenir. Bu amaca yönelik güneş paneli ile yük arasında DA-DA dönüştürücü devreleri kullanılır. Bu DA-DA dönüştürücüler, yükselten dönüştürücü (boost), düşüren dönüştürücü (buck), düşüren-yükselten dönüştürücü (buck-boost) olmak üzere üç yapıdan oluşmaktadır. Bu çalışmada yükselten dönüştürücü devresi kullanılmıştır. Yükselten dönüştürücüler bir devrenin giriş gerilimini trafo olmadan daha yüksek çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayan elektronik devrelerdir. Şekil 3'te yükselten dönüştürücünün genel devre yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3. Yükselten dönüştürücü devre yapısı.

Figure 3. Circuit diagram of boost converter.

Devrede kullanılan elemanlar (L) indüktör, (S) anahtarlama elemanı (Mosfet, IGBT), diyot, (C) kapasitör, (V_g) giriş gerilimi, (V_o) çıkış gerilimi ve (R) yük direncinden oluşmaktadır. Yükselten dönüştürücü devresinin çalışma prensibi, S anahtarı kapatıldığında diyot ters kutuplanarak kesime girer ve devrenin giriş ile çıkışı ayrılır. Devrenin giriş tarafında gerilim kaynağının L indüktörü üzerinde akım dolaştırmaya başlar ve indüktörde enerji depolanır. Devrenin çıkış tarafında ise C kapasitörü önceden şarj edilen enerjisini R yükü üzerinden aktarmaktadır [47].

S anahtarı açıldığında indüktördeki depolanan enerji, giriş gerilim kaynağı ile aynı polaritede olmaktadır. Böylece devrede giriş gerilim kaynağı ile aynı polaritede olan indüktördeki depolanan enerji seri bağlı iki kaynak gibi davranmaktadır. Dolayısıyla elde edilen toplam bu gerilim kaynağı diyot üzerinden kapasitör ve yükü besler. Bu şekilde çıkış gerilimin seviyesini yükselterek diyotu da kesime götürmüş olur.

Bu yükseltici devrelerde genel prensip, bobin üzerinde depolanan enerjinin kontrollü bir şekilde devrenin çıkışına yarı iletken anahtarlar elemanları ile aktarmaktır. Bu yarı iletken anahtarlar elemanları Mosfet veya IGBT'dir. Devrede kullanılan bu yarı iletken elemanların anahtarlama sürelerinin (doluluk oranının) değiştirilmesi ile istenilen çıkış gerilimi elde edilir. Yükselten dönüştürücünün giriş gerilimi (V_g), çıkış gerilimi (V_o) ve doluluk oranı (D) arasındaki ilişki, Denklem 4 ile gösterilmektedir[47].

$$\frac{V_o}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

5 Maksimum güç noktası takip algoritmaları

FV dizilerde panel çıkışındaki gücü maksimize etmek için kullanılan optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu, genellikle güç izleme amacını yansıtır. MGNT, fotovoltaik panellerin maksimum güç noktasını takip ederek sistem verimliliğini artırmaya yönelik bir tekniktir.

Bu algoritmalar, güneş enerjisi sistemlerinde panelin çalışma noktasını dinamik olarak ayarlamak ve panelin anlık güç-gerilim-akım karakteristiklerini izleyerek, mevcut ışınım altında en uygun çalışma noktasını bulmak için tasarlanmıştır. Bu noktada, amaç fonksiyonu genellikle panelin çıkışındaki gücü maksimize etmeyi amaçlar.

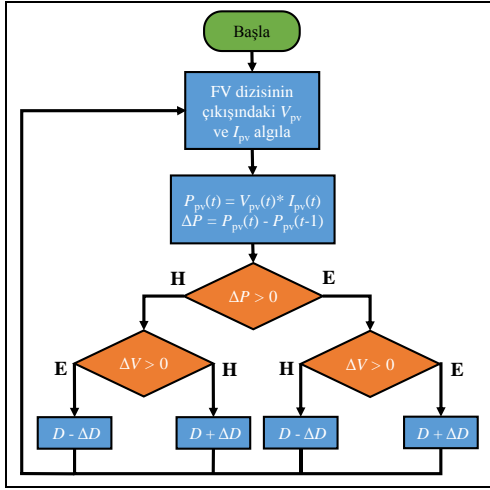
- Amaç fonksiyonunun maksimize edilmek istenilen büyüklükler, FV dizilerde panel çıkışındaki maksimum güç noktasını belirleyen gerilim ve akım değerleridir,
- FV sistemlerde kullanılan panellerin güç-gerilim ve akım-gerilim karakteristiklerinin değişiklik göstermesinden dolayı değişkenlerin sınır aralıkları için genel olarak güneş panellerinin çalışma gerilim ve akım aralığıdır diyebiliriz,
- Amaç fonksiyonunun maksimum değeri, belirlenen sınır aralıkları içinde gerilim ve akım değerlerini kullanarak elde edildiği için amaç fonksiyonu maksimize edildiğinde, güneş panelinin çıkışındaki maksimum güç noktasındaki gerilim ve akım değerleri elde edilir.

5.1 Değiştir ve gözle algoritması

Geleneksel MGNT algoritmalarından en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi DG algoritmasıdır. DG algoritmasının avantajı basit ve uygulanmasının kolay olmasıdır. DG, FV panel çıkış gücündeki değişimi gözlemleyerek yani çıkış gerilim ve akımın anlık ölçerek DA-DA dönüştürücünün doluluk oranını kontrol etmekle MGN'yi sağlamaktadır. Kontrol süreci şu işlem adımlarını içermektedir;

1. Kontrol sürecinin başlangıcında belirlenen çalışma noktasıyla FV panelin gerilim veya akım değerinde değişiklik gerçekleştirilerek FV sistemin çıkış gücü gözlemlenir.
2. Güncel çıkış gücü ile bir önceki çıkış güç değeri karşılaştırılır. Eğer güncel çıkış gücü büyükse, doluluk oranı değeri aynı yönde değiştirilir (arttırılır veya azaltılır). Eğer güncel çıkış gücü küçükse, değişiklik ters yönde yapılır.
3. DA-DA dönüştürücünün doluluk oranında yapılan değişiklik ile sürekli olarak FV panelin çıkış gücü gözlemlenir ve değiştirilir. Böylelikle FV panelin çıkış gücü MGN'ye yönlendirilmeye çalışılır.
4. MGN'ye ulaşıldığında, kontrol algoritması bu noktada salınmaya başlar. Yani, çıkış gücü etrafında küçük dalgalanmalar oluşmaya başlar.

MGNT için DG algoritmasının akış diyagramı Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. DG algoritmasının akış diyagramı.

Figure 4. P & O algorithm flowchart diagram.

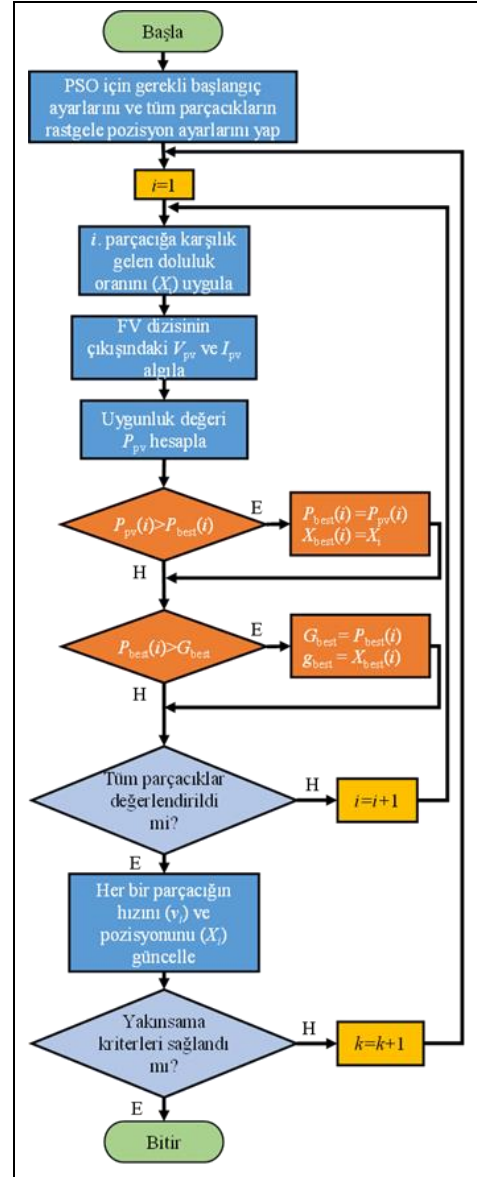
5.2 Parçacık sürü optimizasyon algoritması

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Eberhart ve Kennedy tarafından 1995 yılında kuş sürülerinin ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş bir sürü zekası optimizasyon algoritmasıdır [48]. PSO bir sorunun aday çözümünü gerçekleştirirken belirli bir kriter doğrultusunda aday bir çözümü tekrarlı olarak en iyi çözümü keşfetmesi için gerçekleştirilen bir optimizasyon yöntemidir. PSO ile bir problem aday çözümler popülasyonuna ayrılarak parçacıklar şeklinde temsil edilmektedir. Bu parçacıkların hız ve konum bilgileri matematiksel basit bir formül ile hesaplanarak hareket ettirilmekte ve çözüme ulaşılmaya çalışılmaktadır. Bu yöntemde çözüm bulunurken her bir parçacığın hareketi yerel en iyi bilinen konumdan etkilenmektedir. Parçacıklar diğer parçacıkların buldukları daha iyi konumlar güncellendikçe arama uzayındaki en iyi tespit edilmiş konuma doğru yönlendirilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi bu algoritmada birkaç işbirlikçi temsilci kullanılır ve her temsilci kendi içinde elde edilen bilgileri paylaşır. İlgili arama işlemi, parçacık olarak adlandırılan her temsilci basit iki kuralı takip etmektedir. Bunlar en iyi performansı takip etmek ve parçacık tarafından bulunan en iyi koşullara doğru hareket etmektir. Bu iki kural, iyi performans yakalayan her parçacığın nihayetinde bir sürü haline gelmesini sağlar ve sürüdeki her bir parçacık en iyi çözümdür. Bu çözümler içerisindeki global çözüme G_{best} , parçacığın yerel çözümüne de P_{best} olarak isimlendirilir. Yerel ve global çözümler kendi uygunluk değerlerine göre yinelenerek en iyi çözüme ulaşıldığında sonlandırılır. PSO algoritmasında kullanılan Denklem 5 ve Denklem 6'teki parçacıklar, uygunluk fonksiyonlarına göre güncellenir.

$$v_i(k+1) = w_i(k) + c_1 r_1 * (P_{best} - X_i(k)) + c_2 r_2 * (G_{best} - X_i(k)) \quad (5)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + v_i(k+1) \quad (6)$$

Burada, X_i i . parçacığının konumudur, v_i i . parçacığının hızıdır, k iterasyon sayısıdır, k_{max} maksimum iterasyon sayısıdır, w atalet ağırlığıdır, r_1 ve r_2 [0,1] arasında eşit olarak dağılmış rastgele değişkenlerdir, c_1 ve c_2 sırasıyla bilişsel ve sosyal katsayılarıdır. P_{best} , i . parçacığın şimdiye kadar bulduğu en iyi konumu depolamak için kullanılır ve G_{best} tüm parçacıkların en iyi konumunu depolamak için kullanılır [49].



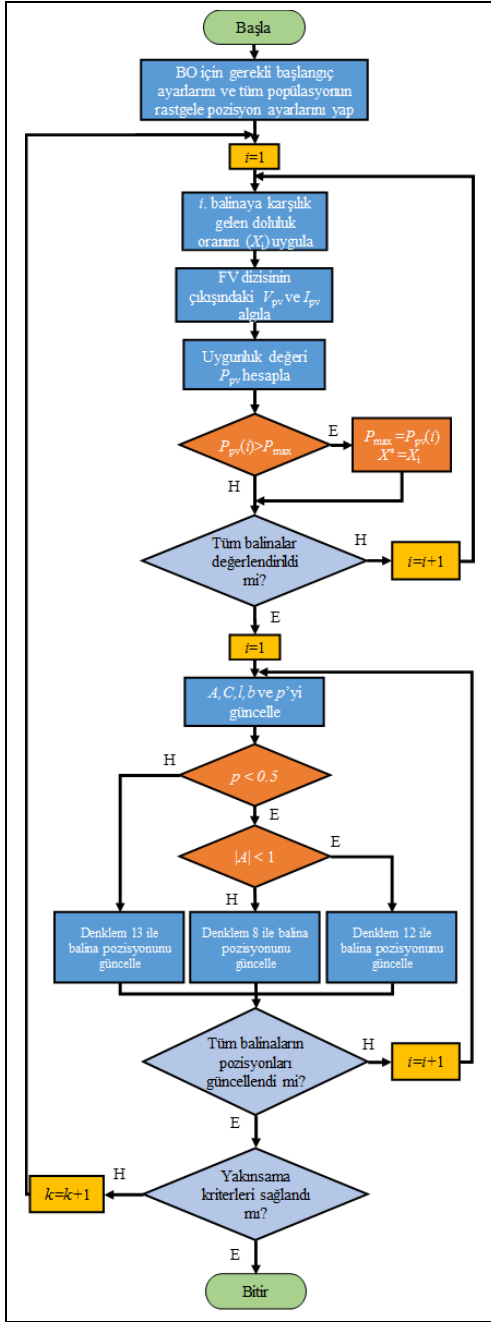
Şekil 5. PSO algoritmasının akış diyagramı.

Figure 5. PSO algorithm flowchart diagram.

5.3 Balina optimizasyon algoritması

Balina Optimizasyon Algoritması, Mirjalili ve Lewis (2016) tarafından tanıtılmıştır. Balina optimizasyon algoritması kambur balinanın yiyecek arama davranışları göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bu yöntemin en dikkat çekici noktası kambur balinaların yiyecek ararken kullandıkları kabarcık kapama yöntemi olmaktadır.

Kabarcık kapama yönteminde kambur balinalar 12 m'ye kadar dalış yaptıktan sonra toplanan bir grup küçük balığı avlamak için yüzeye çıkmaktadır. Kabarcık tuzakları ile avlanma olayının sadece kambur balinaların yaptığı benzersiz bir davranış olduğu görülmektedir. Balina optimizasyonu algoritmasında, genel matematiksel model üç alt bölüme ayrılmıştır. Bu bölümler, avı aramak (keşif), avı çevrelemek ve avı avlamak için sarmal kabarcık ağı oluşturmaktan esinlenerek oluşturulan matematiksel ifadelerden oluşmaktadır [50]. MGNT için balina optimizasyon algoritmasının akış diyagramı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Balina optimizasyon algoritmasının akış diyagramı.

Figure 6. Whale optimization algorithm flowchart diagram.

5.3.1 Küçülen çevreleme hareketi ve çevreleyen av denklemleri

Kambur balinalar avın yerini fark edebilir ve onları çevreleyebilir. Böylelikle, balinalar hedef avın mevcut en iyi çözüm olduğunu varsayar. Başlangıçta keşif aşamasında kambur balinalar, arama uzayında rastgele seçilen bir avın etrafında aşağıdaki matematiksel modelle arama yapar:

Burada, k geçerli iterasyonu, A ve C katsayı vektörlerini, X_{rand} avın rasgele konumu ve X konum vektörünü göstermektedir. Av arama aşamasında, A vektörünün değişimini dikkate alan bir yaklaşım kullanılır. Referans balınadan uzaklaşmak ve arama ajanını harekete geçirmek için A , 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele değerler ile

kullanılır. Ayrıca, bir arama ajanının konumu, şimdiye kadar bulunan en iyi arama ajanı yerine rastgele seçilen bir arama ajanı kullanılarak güncellenir. En iyi arama ajanı tanımlandıktan sonra, diğer arama ajanlarının konumları en iyi arama ajanına doğru güncellenmeye çalışılacaktır. Ayrıca A ve C katsayı vektörleri Denklem 9 ve 10 ile hesaplanmaktadır [50]

$$A = 2a \cdot r - a \quad (9)$$

$$C = 2 \cdot r \quad (10)$$

Burada, a hem kabarcık ağı avı hem de av arama aşamalarında iterasyon boyunca 2'den 0'a doğrusal olarak azalan bir değişkendir ve r [0, 1] arasında rastgele bir değere sahip değişkendir.

Ardından tanımlanan en iyi arama ajanına göre diğer arama ajanlarının konumları, başlangıçtan maksimum iterasyon sayısına kadar artan iterasyon sayısı boyunca en iyi arama ajanına doğru aşağıdaki denklemler aracılığıyla güncellenir [50]:

$$D = |CX^*(k) - X(k)| \quad (11)$$

$$X(k+1) = X^*(k) - A \cdot D \quad (12)$$

X^* şimdiye kadar elde edilen en iyi çözümün konum vektörünü göstermektedir. X^* 'den daha iyi bir çözüm varsa, her iterasyonda ajanların konumları güncellenmelidir.

5.3.2 Sarmal kabarcık ağı avı yöntemi

Kambur balinaların sarmal hareketinde, (X, Y) konumunda bulunan balina ile (X^*, Y^*) konumunda bulunan avın konumlarını güncellemek için bu yöntemde, kambur balinaların sarmal şeklindeki hareketini taklit etmek için Denklem 13 ile gösterilen bir spiral denklem kullanılır.

$$X(k+1) = D^l \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(k) \quad (13)$$

Burada, $D^l = |X^*(k) - X(k)|$ o anki balinanın ava olan mesafesini gösterir, b logaritmik spiralın şeklini tanımlamak için kullanılan bir sabit ve l [-1, 1]'de rastgele bir sayıdır.

Balinaların konumunu güncellemek için küçülen çevreleme veya sarmal model kullanılmaktadır. Bu iki modelin seçilme olasılığı %50'dir. Burada p [0, 1] arasındaki rastgele sayıyı ifade etmektedir.

$$X(k+1) = \begin{cases} X^*(k) - A \cdot D & p < 0.5 \\ D^l \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(k) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

5.4 Gri kurt optimizasyon algoritması

Gri kurt optimizasyon (GKO) algoritması [51], doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisi ve grup avı mekanizmasına dayalı olarak zamanda önerilen metasezgisel bir algoritmadır. GKO algoritması, metasezgisel algoritmaların içerisinde kullanımı basit, uygulama kolaylığı ve problemlerin optimum çözümünde hızlı cevap verme özelliğinden dolayı mühendislik, makine öğrenimi, tıp ve biyo-informatik gibi birçok alanda farklı optimizasyon problemlerinin çözümünde uygulanmıştır.

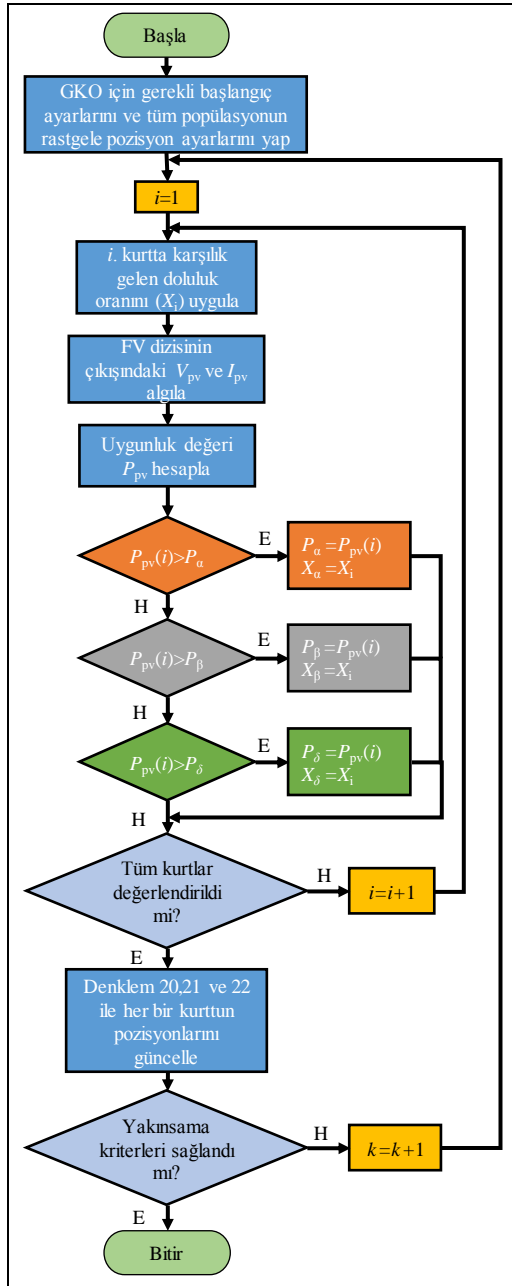
$$D = |CX_{rand}(k) - X(k)| \quad (7)$$

$$X(k+1) = X_{rand}(k) - A \cdot D \quad (8)$$

[52]. GKO algoritmasında arama süreci, her yinelemede en iyi üç kurt tarafından yönlendirilir ve bu kurtlara karşı güçlü bir

yakınsama gösterir. Gri kurtlar, dört seviyeden oluşan son derece katı bir baskın sosyal hiyerarşiye sahiptir.

Hiyerarşidebirinci seviyede avlanma stratejisini yöneten liderler vardır, bu liderler alfa (α) olarak adlandırılır. Liderlere yardımcı olan ast kurtlar beta (β) olarak adlandırılır ve gri kurtların hiyerarşisinin ikinci seviyesini temsil eder. Bu hiyerarşinin üçüncü seviyesi delta (δ) olarak adlandırılırken, kalan kurtlar omega (ω) olarak adlandırılır ve hiyerarşinin en alt seviyesini temsil etmektedirler. Bu algoritma, doğrudan doluluk oranı kontrolü ile birleştirilebilir bir yapıya sahiptir. Buradaki amaç, GMGN'daki görev döngüsünü sabitlemek ve kararlı durum salınımlarını en aza indirmektir. Maksimum güç noktası takibinde kullanılan GKO'nun akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Gri kurt optimizasyonu algoritmasının akış diyagramı.
Figure 7. Gray wolf optimization algorithm flowchart diagram.

5.4.1 Avı çevrelemek

Avlanma sürecinde gri kurtlar ilk olarak avın etrafını sararlar. Bu süreç Denklem 15 ve Denklem 16'da gösterildiği gibi matematiksel olarak modellenmektedir [51].

$$D = |CX^*(k) - X(k)| \quad (15)$$

$$X(k+1) = X^*(k) - A \cdot D \quad (16)$$

Burada k döngü içerisindeki iterasyon sayısını, D , A ve C katsayı vektörlerini, X^* ve X avın ve gri kurtun konum vektörünü göstermektedir. A ve C katsayı vektörleri Denklem 17 ve Denklem 18 ile hesaplanmaktadır.

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (17)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (18)$$

Burada, r_1 ve r_2 , [0,1] arasında rastgele seçilen değerlerdir. İterasyonlar boyunca Denklem 19 ile gösterilen a bileşeni 2'den 0'a doğru doğrusal olarak azaltılmaktadır.

$$a = 2 - \frac{2 \cdot k}{k_{max}} \quad (19)$$

Burada, k_{max} maksimum iterasyon değerini göstermektedir. Avın çevrelenmesi sürecinde gri kurtun konum vektörü A ve C katsayı vektörlerinin ayarlanmasıyla avın konum vektörüne göre Denklem 15 ve Denklem 16 kullanılarak güncellenmektedir.

5.4.2 Avlanmak

Kurtların avlanma hareketlerini matematiksel olarak modelleyebilmek için üç farklı sıralamaya sahip α , β ve δ kurtlarının, avın konumu hakkında daha fazla bilgiye sahip olduğu kabulü yapılmaktadır. Avlanma anındaki kurtların hareketleri Denklem 20, Denklem 21 ve Denklem 22 ile matematiksel olarak gösterilmektedir. Avlanma süreci genellikle α tarafından yönlendirilir. β ve δ 'da ara sıra avlanmaya katılabilir. Bu nedenle, elde edilen ilk üç en iyi çözüm seçilir ve diğer arama ajanlarının konumları, en iyi arama ajanlarının konumuna göre güncellenmektedir [52].

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X(k)|, \quad D_\beta = |C_2 X_\beta - X(k)|, \quad (20)$$

$$D_\delta = |C_3 X_\delta - X(k)|$$

Burada, C_1 , C_2 , ve C_3 katsayıları Denklem 18 ile hesaplanmaktadır.

$$X_1 = X_\alpha(k) - A_1 D_\alpha, \quad X_2 = X_\beta(k) - A_2 D_\beta, \quad (21)$$

$$X_3 = X_\delta(k) - A_3 D_\delta$$

Burada, A_1 , A_2 ve A_3 Denklem 17 ile hesaplanmaktadır.

$$X(k+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (22)$$

Burada, alfa (en iyi aday çözüm), beta ve delta bilgisi, diğer arama ajanlarının yukarıdaki matematiksel modeldeki Denklem 20 ile konumu belirlenir, Denklem 21 ile konumları güncellenir.

Özet olarak GKO algoritması, arama alanı içinde rastgele bir kurt popülasyonu oluşturulmasıyla başlar. Uygunluk fonksiyonuna göre kurtların pozisyonları değerlendirilir. Ardından, durdurma kriteri sağlanana kadar aşağıdaki adımlar

tekrarlanır. Durdurma kriteri, önceden tanımlanmış yineleme sayısına ya da önceden belirlenen sürünün ava olan yakınlığına ulaşmaktır. Her yinelemede, en iyi çözüme sahip ilk üç kurt α , β ve δ olarak kabul edilir. Bundan sonra, tüm kurtların konumları, avını çevreleyen, avlayan ve saldıran süreçlere göre güncellenir. Son olarak, bu adımları tekrarlayarak, ava en yakın konum olan α 'nın konumu en iyi konum olarak belirlenir.

FV sistemlerde maksimum güç noktasını takip etmek için GKO algoritması kullanılırken, gri kurtların pozisyonları, dönüştürücüyü kontrol eden doluluk oranlarıdır ve uygunluk fonksiyonu V_{pv} ve I_{pv} 'nin çarpımından elde edilen güç ifadesidir. Bu nedenle kontrolörün uygulanması V_{pv} ve I_{pv} değerlerinin alınması ile gerçekleştirilir.

6 Sonuçlar ve tartışma

6.1 Benzetim

Bu bölümde farklı senaryolar altında geleneksel ve metasezgisel optimizasyon algoritmalarıyla MGNT performans analizleri yapılmıştır. Bu sebeple, MATLAB/Simulink'te bir MGNT algoritması içeren bir blok ile FV sistem tabanlı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Yükselten dönüştürücü bir FV sistemin MATLAB/Simulink modeli Şekil 8'de gösterilmektedir.

Senaryolar, kısmi gölgelemenin olduğu yani her bir panele farklı ışınımlar geldiği durumda gerçekleştirilen analizleri içermektedir. Sonuçlar, karşılaştırmalı analizlerin sonucunda elde edilmiştir. Sonuçlar, izleme ve yerleşme süresi, maksimum güç noktası ve güç verimliliği açılarından analiz edilmiştir.

Şekil 8'de gösterilen MATLAB/Simulink modelinde kullanılan FV panele ilişkin parametre değerleri ve yükselten dönüştürücüde kullanılan devre elemanlarına ait değerler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

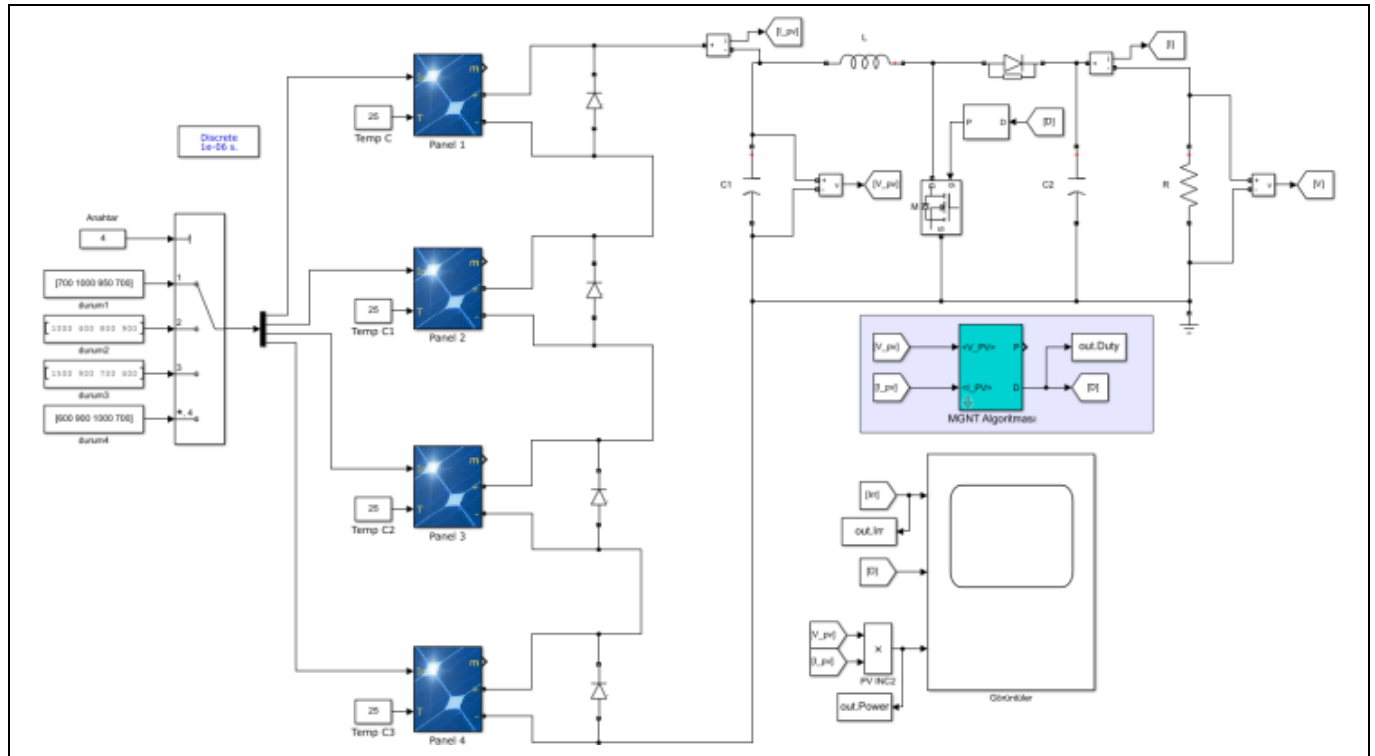
Tablo 1. FV panel parametre değerleri (Trina Solar TSM-260PA05.08).

Parametre	Birim	Değer
Maksimum güç	(W)	259.94
Maksimum güçteki akım	I_{mp} (A)	8.2
Maksimum güçteki gerilim	V_{mp} (V)	31.7
Kısa devre akımı	I_{sc} (A)	8.67
Açık devre gerilimi	V_{oc} (V)	37.9
Açık devre gerilimi sıcaklık sabiti	(%/°C)	-0.35
Kısa devre akımı sıcaklık sabiti	(%/°C)	0.06
Hücre sayısı	Adet	60

Tablo 2. Yükselten dönüştürücü parametre değerleri.

Parametre	Birim	Değer
İndüktör	(L)	0.7 mH
Giriş kapasitörü	(C1)	300 μ F
Çıkış kapasitörü	(C2)	300 μ F
Yük direnç	(R)	40 Ω
Anahtarlama frekansı	(Hz)	50 kHz

Ayrıca MGNT için yapılan analizlerde kullanılan geleneksel ve metasezgisel algoritmalara ait temel parametreler ve yeniden başlatma sürecinde kullanılan başlangıç değerleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 8. Fotovoltaik sistemin MATLAB/Simulink modeli.

Figure 8. MATLAB/Simulink model of the Photovoltaik system.

Tablo 3. Algoritmalarla ait parametre değerleri.

Table 3. Parameter values of the algorithms.

Algoritma	Parametreler	Başlangıç Değerleri
Değiştir ve Gözle	$\Delta D = 0.001$	0.1
Parçacık Sürü Optimizasyonu	$N = 8,$ $c_1 = 0.1, c_2 = 0.3$ $k_{max} = 100$	Rastgele
Gri Kurt Optimizasyonu	$N = 8, a = 1.5$ $k_{max} = 100$	Rastgele
Balina Optimizasyonu	$N = 8, a = 1$ $k_{max} = 100$	Rastgele

6.2 Benzetim sonuçları

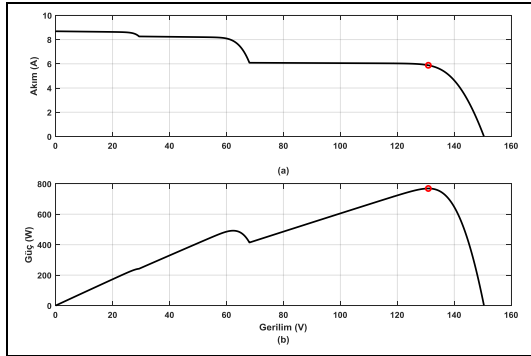
Kısmi gölgeli durum, FV panel dizilerine eşit ışınım seviyeleri gelmediğinde oluşmaktadır. Kısmi gölgeli durumlarda panellerin çıkışında oluşan uyumsuzluk ve neticesinde oluşan düşük performans Şekil 8'de gösterildiği gibi baypas diyotlarının kullanılmasıyla izole edilmektedir. Bu bölümde, Şekil 8'de gösterilen simulink modeli kullanılarak Tablo 4'te gösterilen FV panel dizisindeki panellere gelen farklı ışınım seviyelerine göre oluşturulan kısmi gölgeli durum senaryoları için MGNT yöntemlerinin nasıl davrandığı analiz edilmiştir.

Tablo 4. Farklı senaryolar için FV panel dizisindeki her bir panele gelen ışınım seviyeleri.

Table 4. Radiation levels to each panel in the PV array for different scenarios.

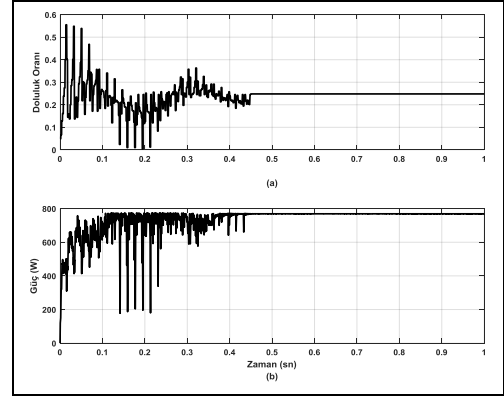
Senaryolar/Işınımlar (W/m^2)	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Panel 4
Senaryo 1	700	1000	950	700
Senaryo 2	1000	400	800	900
Senaryo 3	1000	900	700	400
Senaryo 4	600	900	1000	700

Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen farklı kısmi gölgeli durumlarda panel dizilerinin güç-gerilim eğrileri ve Parçacık sürü optimizasyonu, gri kurt optimizasyonu ve balina optimizasyonu algoritmaları ile zamana göre elde edilen FV panel dizisi çıkış güç değişimi ve yükselten dönüştürücünün doluluk oranı değişimini gösteren grafikler, sırasıyla senaryo 1 için Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de, Senaryo 2 için Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da, Senaryo 3 için Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de ve Senaryo 4 için Şekil 21, Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24'te gösterilmiştir.



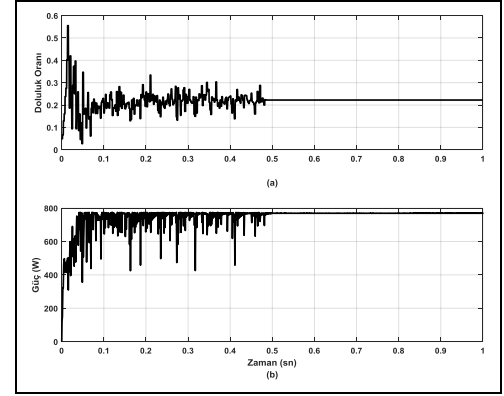
Şekil 9. Senaryo 1'e göre FV panel dizisi çıkışındaki; (a): Akım-gerilim ve (b): Güç-gerilim eğrileri.

Figure 9(a): Current-voltage and (b): Power-voltage curves at the output of the PV array according to scenario 1.



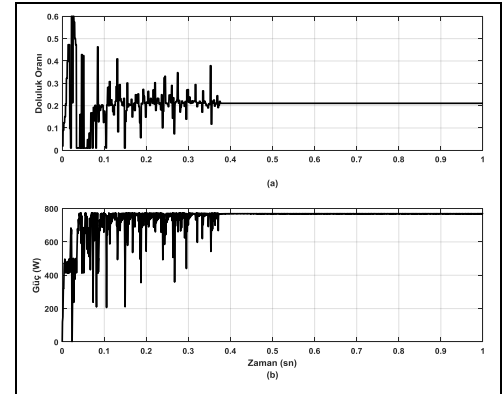
Şekil 10. Senaryo 1'e göre kısmi gölgeli durum için parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 10. According to scenario 1, (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by particle swarm optimization for partial shading conditions.



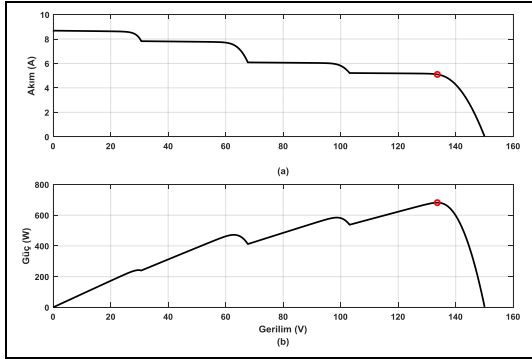
Şekil 11. Senaryo 1'e göre kısmi gölgeli durum için gri kurt optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 11. According to scenario 1, (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Gray Wolf Optimization for partial shading conditions.



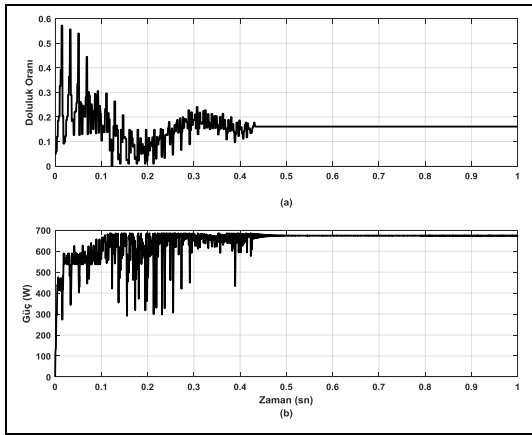
Şekil 12. Senaryo 1'e göre kısmi gölgeli durum için balina optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 12. According to scenario 1; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Whale Optimization for partial shading conditions.



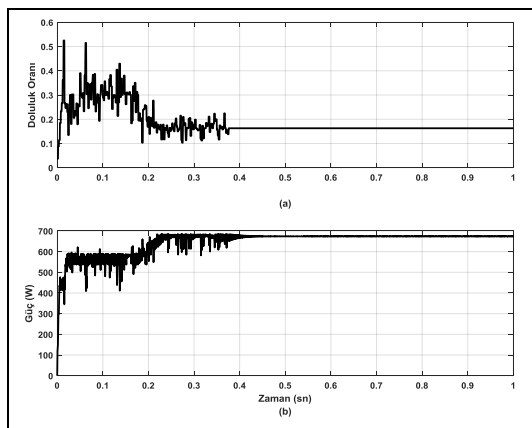
Şekil 13. Senaryo 2'e göre FV panel dizisi çıkışındaki; (a): Akım-gerilim ve (b): Güç-gerilim eğrileri.

Figure 13(a): Current-voltage and (b): Power-Voltage curves at the output of the PV array according to scenario 2.



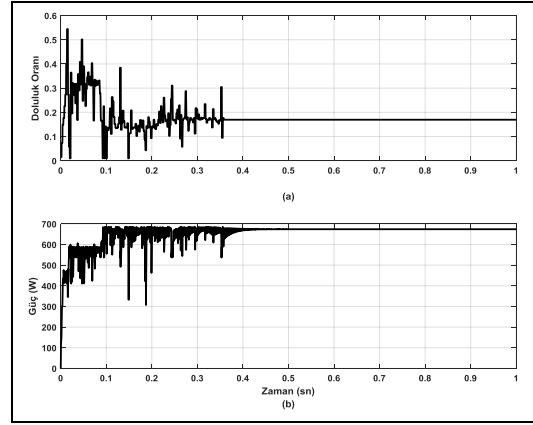
Şekil 14. Senaryo 2'e göre kısmi gölgeli durum için parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 14. According to scenario 2; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Particle Swarm Optimization for partial shading conditions.



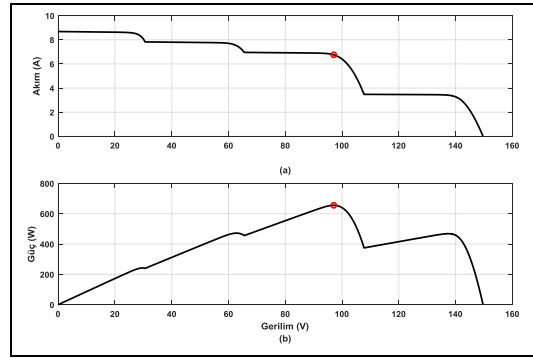
Şekil 15. Senaryo 2'e göre kısmi gölgeli durum için gri kurt optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 15. According to scenario 2; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Gray Wolf Optimization for partial shading conditions.



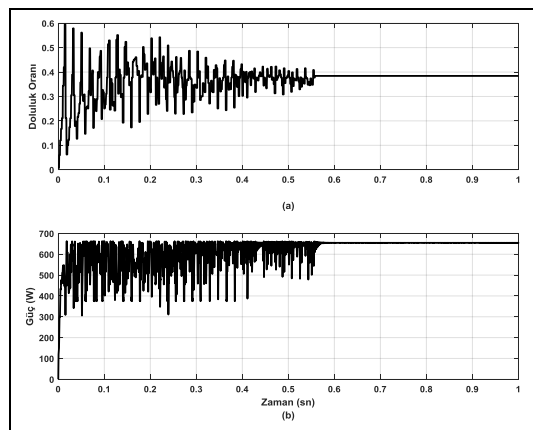
Şekil 16. Senaryo 2'e göre kısmi gölgeli durum için balina optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 16. According to scenario 2; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Whale Optimization for partial shading conditions.



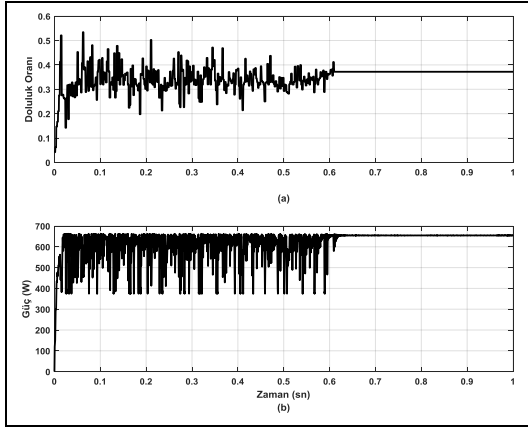
Şekil 17. Senaryo 3'e göre FV panel dizisi çıkışındaki; (a): Akım-gerilim ve (b): Güç-gerilim eğrileri.

Figure 17(a): Current-voltage and (b): Power-voltage curves at the output of the PV array according to scenario 3.



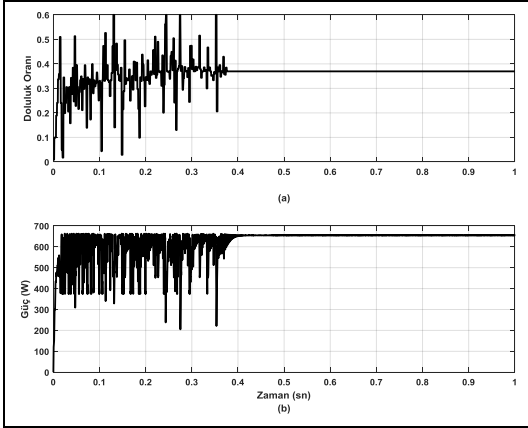
Şekil 18. Senaryo 3'e göre kısmi gölgeli durum için parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 18. According to scenario 3; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Particle Swarm Optimization for partial shading conditions.



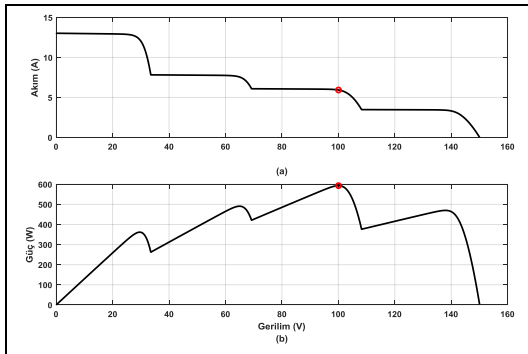
Şekil 19. Senaryo 3'e göre kısmi gölgeli durum için gri kurt optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 19. According to scenario 3; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Gray Wolf Optimization for partial shading conditions.



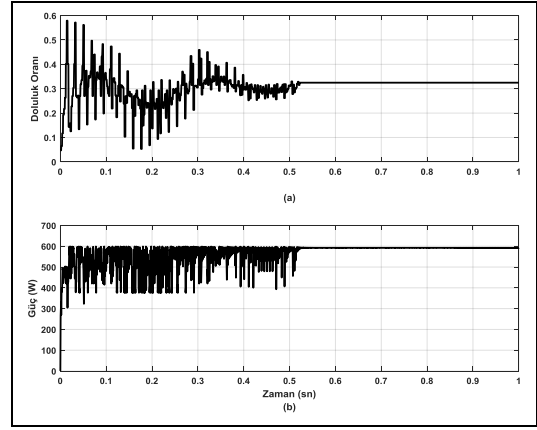
Şekil 20. Senaryo 3'e göre kısmi gölgeli durum için balina optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 20. According to scenario 3; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Whale Optimization for partial shading conditions.



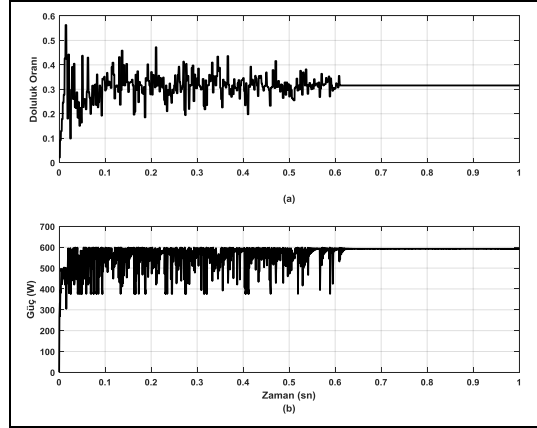
Şekil 21. Senaryo 4'e göre FV panel dizisi çıkışındaki; (a): Akım-gerilim ve (b): Güç-gerilim eğrileri.

Figure 21(a): Current-voltage and (b): Power-voltage curves at the output of the PV array according to scenario 4.



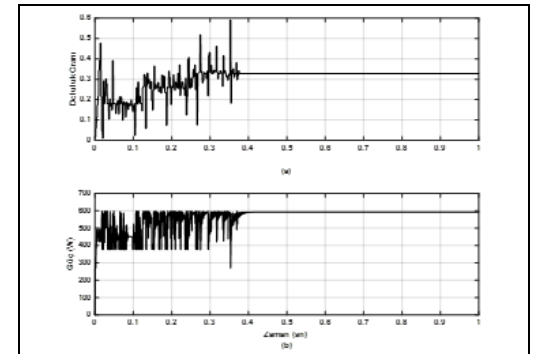
Şekil 22. Senaryo 4'e göre kısmi gölgeli durum için parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 22. According to scenario 4; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by particle swarm optimization for partial shading conditions.



Şekil 23. Senaryo 4'e göre kısmi gölgeli durum için gri kurt optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 23. According to scenario 4; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Gray Wolf Optimization for partial shading conditions.



Şekil 24. Senaryo 4'e göre kısmi gölgeli durum için Balina Optimizasyonu ile elde edilen; (a): Doluluk oranı ve (b): FV panel dizisi çıkış gücünün değişimi.

Figure 24. According to scenario 4; (a): Duty-cycle and (b): PV array output power variation obtained by Whale Optimization for partial shading conditions.

Değişim eğrilerinden de görülmektedir ki kısmi gölgeli durumlarda MGNT yöntemlerinin daha karmaşık yapılara sahip olmalarına neden olan çoklu tepe güç noktaları oluşmaktadır. Bu tepe noktaları, yerel ve global maksimumlar olarak adlandırılır. Geleneksel MGNT yöntemleri, yerel ve global maksimumlar arasında ayırım yapamadıkları için başarımlarının düşmesine neden olmaktadır. Örneğin kısmi gölgeli durum senaryolarına ait eğriler üç yerel maksimum ve bir global maksimum içermektedir. Her bir eğri üzerindeki yerel maksimumların ve global maksimumun güç değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

Yapılan analizlerde metasezgisel yöntemlerin kısmi gölgeli durumlarda kullanılmasının asıl sebebini daha iyi anlayabilmek için geleneksel yöntemlerden en popüler olan değiştir ve gözle yöntemi kullanılmıştır. Değiştir ve yöntemi ile elde edilen değişimlerde hep ilk yerel maksimum noktasında kaldıkları için değiştir ve gözle yöntemiyle elde edilen sonuçlar sadece Tablo 6'de gösterilmiştir.

Kısmi gölgeli durum altında senaryo 1'e göre DG, PSO, GKO ve BO ile elde edilen maksimum güç değerleri sırasıyla 236.5 W, 769 W, 768.9 W ve 769 W'dır. Verimlilik olarak incelendiği zaman meta-sezgisel algoritmalarla elde edilen sonuçlar hemen hemen yakın yüzdelik değerlere (%99.9) sahiptir. En düşük verimlilik ise DG yöntemi ile elde edilen %30.75 değeridir.

PSO, GKO ve BO algoritmalarını takip süreleri, sırasıyla 0.47sn, 0.51sn ve 0.39sn'dir. DG yönteminin takip süresi, ilk yerel maksimum noktada kaldıkları ve global maksimum noktaya ulaşamadığı için ihmal edilmiştir. Takip süresi sonuçları karşılaştırıldığında metasezgisel algoritmalar içerisinde en hızlı yaklaşan balina optimizasyon algoritması olduğu anlaşılmıştır.

MGNT yöntemlerinin genel performansları analiz etmek ve karşılaştırmalı bir çalışma için seçilen senaryolara göre elde edilen tüm sonuçlar Tablo 6'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, metasezgisel yöntemlerin yüksek oranda FV sistemlerine adapte edilebilir, sağlam ve yüksek performanslara sahip oldukları görülmektedir. Değiştir ve gözle yöntemi, sabit dağılımlı ışınım durumlarında hızlı bir şekilde yakınsamakta ancak yüksek verime sahip olmasına rağmen kısmi gölgeli durumlarda başarısız olmaktadır.

Güç ve doluluk oranı değişimlerini gösteren şekiller incelendiğinde, sürü tabanlı tekniklerin global maksimum noktayı başarılı bir şekilde bulabildiği, ancak çözüm optimizasyonundan kaynaklanan rastgele değişim nedeniyle, daha düşük takip sürelerine sahiptirler ve rasgele salınımlar gözlenmektedir.

7 Sonuçlar

Bu çalışmada, FV panel dizisinin maksimum gücünde kullanılmasını sağlamak için bir güç elektroniği dönüştürücüsü olan yükselten dönüştürücü dahil edilerek, bağımsız bir fotovoltaik güç elektrik üretim sisteminin modellenmesi, benzetimi ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

FV sistemlerin maksimum güç noktası, çevre koşullarının değişmesiyle farklılık göstermektedir. Bu nedenle, FV sistemlerde maksimum güç elde etmek için maksimum güç noktası izleme teknolojisi gereklidir. Bu çalışmada, kısmi gölgeli durumlar için FV sistemin MGNT için literatürdeki çalışmalarda öne çıkan geleneksel ve metasezgisel yöntemler kullanılarak performans karşılaştırılması yapılmış ve güç-gerilim karakteristikleri sunulmuştur.

Tablo 5. Senaryolardaki güç-gerilim eğrileri üzerindeki yerel ve global tepe noktaları.

Table 5. Local and global peaks on the power-voltage curves in the scenarios.

Senaryolar/Güç değeri (W)	YTN-1	YTN-2	YTN-3	GTN
Senaryo 1	237.8	491.9	602	769.1
Senaryo 2	240.4	471.7	584.3	681.5
	YTN-1	YTN-2	GTN	YTN-3
Senaryo 3	242.3	472.1	655.6	467.8
Senaryo 4	361.3	490.8	593.2	469.8

Tablo 6. Kısmi gölgeli durumlar için güç, DG, PSO, GKO ve BO algoritmalarının karşılaştırılması.

Table 6. Comparison of P&O, PSO, GWO and WO algorithms for partial shading conditions.

MGNT Yöntemleri	Senaryo	Takip süresi (sn.)	İterasyon sayısı	MGN Ulaşma	MGN'da Güç Değeri (W)	Elde Edilen Güç (W)	Verimlilik (%)
DG	Senaryo 1	-	-	Hayır	769.1	236.5	30.75
	Senaryo 2	-	-	Hayır	681.5	240.1	35.23
	Senaryo 3	-	-	Hayır	655.6	241.9	36.89
	Senaryo 4	-	-	Hayır	593.2	361	60.85
PSO	Senaryo 1	0.47	65	Evet	769.1	769	99.98
	Senaryo 2	0.5	69	Evet	681.5	676.5	99.26
	Senaryo 3	0.58	80	Evet	655.6	655.2	99.93
	Senaryo 4	0.54	75	Evet	593.2	592.6	99.89
GKO	Senaryo 1	0.51	71	Evet	769.1	768.9	99.97
	Senaryo 2	0.45	63	Evet	681.5	676.6	99.28
	Senaryo 3	0.64	89	Evet	655.6	655.1	99.92
	Senaryo 4	0.64	89	Evet	593.2	592.6	99.89
BO	Senaryo 1	0.39	54	Evet	769.1	769	99.98
	Senaryo 2	0.42	58	Evet	681.5	676.3	99.23
	Senaryo 3	0.42	58	Evet	655.6	655	99.90
	Senaryo 4	0.42	58	Evet	593.2	592.4	99.86

Parçalı gölgeli durum altında güç-gerilim karakteristiği biri global maksimum ve diğerlerinin tümü yerel maksimum güç noktaları olan birden fazla MGN'na sahiptir. Karakteristiklerin oldukça doğrusal olmadığı ve kısmi gölgeli koşullar altında global maksimum güç noktayı izlemenin karmaşık olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile metasezgisel yöntemlerin farklı kısmi gölgeli koşullar altında global maksimum güç noktasını izlemek için etkin olarak kullanılabilirdiği gösterilmiştir. Global MGNT sürecinde, geleneksel yöntemlere kıyaslandığında bu yöntemlerin yüksek doğruluğa ve daha az takip süresine sahip olduğu yine elde edilen sonuçlarla gösterilmiştir. Ayrıca kısmi gölgeli koşullar için BO algoritmasının doğruluk ve izleme süresi açısından GKO ve PSO algoritmalarına göre üstün olduğu görülmüştür.

8 Conclusions

In this paper, modeling, simulation and control of the standalone photovoltaic power electricity generation system has been performed by including the boost converter, which is a power electronics converter, in order to ensure that the PV panel array is used at its maximum power.

The maximum power point of PV systems differs with the change of environmental conditions. Therefore, maximum power point tracking technology is required to obtain maximum power in PV systems. In this paper, performance comparisons were made and power-voltage characteristics were presented by using traditional and metaheuristic methods, which are prominent in the literature for the MPPT of the PV system for partial shading conditions.

The power-voltage characteristic has multiple MPPs, one of which is the global maximum and the others are all local maximum power points under the partial shading condition. It has been observed that the characteristics are highly non-linear and it is complex to track the global maximum power point under partial shading conditions. The results show that metaheuristic methods can be effectively used to track the global maximum power point under different partial shading conditions. In the process of global MPPT, the results have shown that these methods have high accuracy and less tracking time compared to traditional methods. In addition, it has been seen that the WO algorithm is superior to the GWO and PSO algorithms under partial shading conditions in terms of accuracy and tracking time.

9 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Emrah GÜRKAN, tasarımın ve benzetimlerin yapılması, literatür taraması başlıklarında; Ahmet GÜNER elde edilen sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

10 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

11 Kaynaklar

[1] Walker HA, Desai JD, Heimiller DM. "Performance of Photovoltaic Systems Recorded by Open Solar Performance and Reliability Clearinghouse (oSPARC)". National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO, USA, 2020.

- [2] Sulukan E. "İstanbul'da bir fotovoltaik sistemin tekno-ekonomik ve çevresel analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 127-132, 2020.
- [3] Amalathas AP, Alkaisi MM "Nanostructures for light trapping in thin film solar cells". *Micromachines*, 10(9), 1-18, 2019.
- [4] Kurtz S, Newmiller J, Kimber A, Flottesmesch R, Riley E, Dierauf T, McKee J, Krishnani P. "Analysis of Photovoltaic System Energy Performance Evaluation Method". National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO, USA, 2013.
- [5] Eltawil MA, Zhao Z. "MPPT techniques for photovoltaic applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 793-813, 2013.
- [6] Elgendy MA, Zahawi B, Atkinson DJ. "Analysis of the performance of DC photovoltaic pumping systems with maximum power point tracking". in *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, York, England, 02-04 April 2008.
- [7] Elgendy MA, Zahawi B, Atkinson DJ. "Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), 21-33, 2012.
- [8] Suwannatrai P, Liutanakul P, Wipasuramontong P. "Maximum power point tracking by incremental conductance method for photovoltaic systems with phase shifted full-bridge dc-dc converter". in *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand- Conference*, Thailand , 17-19 May 2011.
- [9] Lasheen M, Rahman AKA, Abdel-Salam M, Ookawara S. "Performance enhancement of constant voltage based MPPT for photovoltaic applications using genetic algorithm". *Energy Procedia*, 100, 217-222, 2016.
- [10] Saxena AR, Gupta SM. "Performance analysis of P&O and incremental conductance MPPT algorithms under rapidly changing weather conditions". *Journal of Electrical Systems*, 10(3), 292-304, 2014.
- [11] Kahoul N, Mekki M. "Adaptive P&O MPPT Technique for photovoltaic buck-boost converter system". *International Journal of Computer Applications*, 112(12), 23-27, 2015.
- [12] Yüksek G, Mete AN. "A P&O based variable step size MPPT algorithm for photovoltaic applications". *Gazi University Journal of Science*, 36(2), 608-622, 2023.
- [13] Belkaid A, Colak I, Kayisli K. "Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions". *Electrical Engineering*, 99, 839-846, 2017.
- [14] Patel H, Agarwal V. "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(4), 1689-1698, 2008.
- [15] Ji YH, Jung DY, Won CY, Lee BK, Kim JW. "Maximum power point tracking method for PV array under partially shaded condition". *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, USA, 20-24 September 2009.
- [16] Dorofte C, Borup U, Blaabjerg F. "A combined two-method MPPT control scheme for grid-connected photovoltaic systems". *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 11-14 September 2005.
- [17] Yafoui A, Wu B, Cheung R. "Implementation of maximum power point tracking algorithm for residential photovoltaic systems". *2nd Canadian Solar Buildings Conference*, Calgary, 10-14 June 2007.

- [18] Lee JH, Bae H, Cho BH. "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size". *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, Slovenia, 30 August-01 September 2006.
- [19] Ahmed J, Salam Z. "A maximum power point tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability". *Applied Energy*, 119, 118-130, 2014.
- [20] Yang B, Zhong L, Zhang X, Shu H, Yu T, Li H, Jiang L, Sun L. "Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition". *Journal of Cleaner Production*, 215, 1203-1222, 2019
- [21] Patel H, Agarwal V. "MATLAB-Based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 302-310, 2008.
- [22] Shi J, Zhang W, Zhang Y, Xue F, Yang T. "MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm". *Electric Power Systems Research*, 123, 100-107, 2015.
- [23] Koutroulis E, Blaabjerg F. "A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions". *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2), 184-190, 2012.
- [24] Spertino F, Ahmad J, Ciocia A, Di Leo P, Murtaza AF, Chiaberge M. "Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems". *Solar Energy*, 119, 461-473, 2015.
- [25] Álvarez-Alvarado JM, Ríos-Moreno JG, Obregón-Biosca SA, Ronquillo-Lomelí G, Ventura-Ramos E, Trejo-Perea M. "Hybrid techniques to predict solar radiation using support vector machine and search optimization algorithms: a review". *Applied Sciences*, 11(3), 1-16, 2021.
- [26] Nivetha V, Gowri GV. "Maximum power point tracking of photovoltaic system using ant colony and particle swarm optimization algorithms". *2nd International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, Coimbatore, India, 26-27 February 2015.
- [27] Sundareswaran K, Vigneshkumar V, Sankar P, Simon SP, Nayak PSR, Palani S. "Development of an Improved P&O algorithm assisted through a colony of foraging ants for MPPT in PV System". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), 187-200, 2016.
- [28] Nugraha DA, Lian KL, Suwarno. "A novel MPPT method based on cuckoo search algorithm and golden section search algorithm for partially shaded PV system". *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 42(3), 173-182, 2019.
- [29] Eltamaly AM. "An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions". *Energies*, 14(4), 1-25 2021.
- [30] Zhang M, Chen Z, Wei L. "An immune firefly algorithm for tracking the maximum power point of PV array under partial shading conditions". *Energies*, 12(16), 1-15, 2019.
- [31] Teshome DF, Lee CH, Lin YW, Lian KL. "A Modified firefly algorithm for photovoltaic maximum power point tracking control under partial shading". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(2), 661-671, 2017.
- [32] Kumar C, Rao R. "A novel global MPP tracking of photovoltaic system based on whale optimization algorithm". *International Journal of Renewable Energy Development*, 5(3), 225-232, 2016.
- [33] Mohamed AA, Haridy AL, Hemeida AM. "The Whale Optimization Algorithm based controller for PMSG wind energy generation system". *International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, Aswan, Egypt, 02-04 February 2019.
- [34] 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.
- [35] Motamarri R, Bhookya N, Chitti Babu B. "Modified grey wolf optimization for global maximum power point tracking under partial shading conditions in photovoltaic system". *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(7), 1884-1901, 2021.
- [36] Singh Chawda G, Prakash Mahela O, Gupta N, Khosravy M, Senjyu T. "Incremental conductance based particle swarm optimization algorithm for global maximum power tracking of solar-PV under nonuniform operating conditions". *Applied Sciences*, 10(13), 1-16, 2020.
- [37] Calvino G, Pombo J, Mariano S, Calado MR. "Design and implementation of MPPT system based on PSO Algorithm". *International Conference on Intelligent Systems (IS)*, Funchal, Portugal, 25-27 September 2018.
- [38] Ishaque K, Salam Z. "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 475-488, 2013.
- [39] Salam Z, Ahmed J, Merugu BS. "The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review". *Applied Energy*, 107, 135-148, 2013.
- [40] Efendi MZ, Murdianto FD, Setiawan RE. "Modeling and simulation of MPPT sepie converter using modified PSO to overcome partial shading impact on DC microgrid system". *International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Surabaya, Indonesia, 26-27 September 2017.
- [41] Priyadarshi N, Padmanaban S, Kiran Maroti P, Sharma A. "An extensive practical investigation of FPSO-based MPPT for grid integrated PV system under variable operating conditions with anti-islanding protection". *IEEE Systems Journal*, 13(2), 1861-1871, 2019.
- [42] Mohanty S, Subudhi B, Ray PK. "A grey wolf-assisted perturb & observe MPPT algorithm for a PV system". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(1), 340-347, 2017.
- [43] Eltamaly AM, Farh HMH, Al-Saud MS. "Grade point average assessment for metaheuristic GMPP techniques of partial shaded PV systems". *IET Renewable Power Generation*, 13(8), 1215-1231, 2019.
- [44] Jiang L, Maskell DL. "A simple hybrid MPPT technique for photovoltaic systems under rapidly changing partial shading conditions". *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Denver, USA 08-13 June 2014.
- [45] Özdemir A, Pamuk N. "Kısmi gölgelenme şartları altındaki kompleks yapılı fotovoltaik enerji sistemlerinde maksimum güç noktası takibinin metasezgisel algoritmalar kullanılarak incelenmesi". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 31, 157-164, 2021.
- [46] Karafil A. "Kısmi gölgelenme durumundaki seri bağlı fotovoltaik (FV) panellerde bypass diyotunun kullanılmasının sistem gücü üzerine etkisi". *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(68), 621-630, 2021.

- [47] Eltamaly AM, Abdelaziz AY. *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*. 1st ed. Switzerland, Springer Cham, 2020.
- [48] Özsağlam MY, Çunkaş M. "Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması". *Politeknik Dergisi*, 11(4), 299-305, 2008.
- [49] Liu YH, Huang SC, Huang JW, Liang WC. "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.
- [50] Mirjalili S, Lewis A. "The whale optimization algorithm". *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67, 2016.
- [51] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. "Grey wolf optimizer". *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61, 2014.
- [52] Ghalambaz M, Yengejeh R, Davami AH. "Building energy optimization using Grey Wolf Optimizer (GWO)". *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 1-16, 2021.