

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**TERMOELEKTRİK JENERATÖRLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI  
İZLEME YÖNTEMLERİNE METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN  
UYARLANMASI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ**

**Mehmet Ali ÜSTÜNER**

**Danışman  
Prof. Dr. Hayati MAMUR**

**İkinci Danışman  
Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**



**MANİSA-2023**

MEHMET ALİ  
ÜSTÜNER

TERMoeLEKTRİK JENERATÖRLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI  
İZLEME YÖNTEMLERİNE METAŞEZGİSEL ALGORİTMALARIN  
UYARLANMASI VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

2023

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Mehmet Ali ÜSTÜNER**



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                                                                                               | III  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                                                                                               | X    |
| TABLO DİZİNİ .....                                                                                                                                                 | XII  |
| TEŞEKKÜR.....                                                                                                                                                      | XIII |
| ÖZET.....                                                                                                                                                          | XIV  |
| ABSTRACT.....                                                                                                                                                      | XV   |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                                                                      | 1    |
| 1.1. Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Üzerine Yapılan Araştırmalar                                                                                           | 4    |
| 1.2. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar .....                                | 8    |
| 1.3. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Geliştirilmiş ve Değiştirilmiş Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar ..... | 13   |
| 1.4. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Analitik Çözüme Dayalı Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar.....                     | 16   |
| 1.5. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar .....                              | 20   |
| 1.6. Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Ancak Termoelektrik Jeneratör Sistemlerine Uyarlanmamış Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri .....                       | 26   |
| 2. GENEL BİLGİLER .....                                                                                                                                            | 37   |
| 2.1. Termoelektrik Malzemeler .....                                                                                                                                | 37   |
| 2.2. Termoelektrik Jeneratörler .....                                                                                                                              | 38   |
| 2.3. DC-DC Dönüştürücüler .....                                                                                                                                    | 41   |
| 2.3.1. Yükselten Dönüştürücü .....                                                                                                                                 | 42   |
| 2.4. Mikrodenetleyiciler .....                                                                                                                                     | 43   |
| 2.5. Termoelektrik Jeneratörden Maksimum Güç Elde Edilmesi .....                                                                                                   | 44   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER .....                                                                                                                                     | 49   |
| 3.1. Materyal.....                                                                                                                                                 | 49   |
| 3.1.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Jeneratör .....                                                                                                      | 49   |
| 3.1.2. Soğutma-Isıtma Blokları .....                                                                                                                               | 50   |
| 3.1.3. ATmega2560 Mikrodenetleyicisi .....                                                                                                                         | 51   |
| 3.1.4. National Instruments NI USB-6211 Veri Edinim Kartı.....                                                                                                     | 51   |
| 3.1.5. TEG Çıkışı Akım Algılama Sensörü.....                                                                                                                       | 52   |
| 3.1.6. Dönüştürücü Çıkışı Akım Algılama Sensörü.....                                                                                                               | 53   |
| 3.1.7. TEG Çıkışı ve Dönüştürücü Çıkışı Gerilim Algılama Sensörleri.....                                                                                           | 54   |
| 3.1.8. Sıcaklık Sensörleri .....                                                                                                                                   | 55   |
| 3.2. Yöntemler .....                                                                                                                                               | 56   |
| 3.2.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Modül Simulink® Modeli .....                                                                                         | 56   |
| 3.2.2. Maksimum Güç Noktası İzleme Prensibi .....                                                                                                                  | 64   |
| 3.2.3. DC-DC Yükselten Dönüştürücü Yük Bağlantısı.....                                                                                                             | 65   |
| 3.2.4. Maksimum Güç Noktası İzleme Algoritmaları.....                                                                                                              | 66   |
| 3.2.4.1. Geleneksel Değiştir ve Gözlemle Algoritması .....                                                                                                         | 68   |
| 3.2.4.2. Geleneksel Artımsal İletkenlik Algoritması .....                                                                                                          | 71   |
| 3.2.4.3. Kesirli Açık Devre Gerilimi Algoritması .....                                                                                                             | 74   |
| 3.2.4.4. Kesirli Kısa Devre Akımı Algoritması .....                                                                                                                | 76   |
| 3.2.4.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması.....                                                                                                              | 78   |
| 3.2.4.6. Gri Kurt Optimizasyonu Algoritması .....                                                                                                                  | 81   |

|          |                                                                                   |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.4.7. | Bal Porsuğu Optimizasyonu Algoritması .....                                       | 87  |
| 3.2.5.   | İzolesiz DC–DC Yükselten Dönüştürücü Modeli.....                                  | 91  |
| 3.2.6.   | DC–DC Yükselten Dönüştürücü Tasarımı .....                                        | 94  |
| 3.2.7.   | DC–DC Yükselten Dönüştürücü MATLAB/Simulink® Modellemesi                          | 98  |
| 3.2.8.   | Deneysel Çalışmadaki Güç Verilerinin Mikrodenetleyiciye<br>Gönderilmesi.....      | 99  |
| 3.2.9.   | TEG Sistemi Deneysel Kurulumları .....                                            | 101 |
| 4.       | ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....                                              | 103 |
| 4.1.     | Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Simülasyonları.                 | 104 |
| 4.2.     | TEG İç Direnci ve Seebeck Katsayılarının Simülasyonlardaki Etkisi .....           | 115 |
| 4.3.     | Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Simülasyon<br>Sonuçları ..... | 117 |
| 4.4.     | Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Deney<br>Sonuçları .....      | 125 |
| 5.       | SONUÇ VE ÖNERİLER.....                                                            | 135 |
|          | KAYNAKLAR .....                                                                   | 141 |
|          | ÖZGEÇMİŞ .....                                                                    | 172 |
|          | EKLER.....                                                                        | 174 |
|          | EK 1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 modülü üretici verileri .....                      | 174 |
|          | EK 2. HBO algoritması MATLAB kodları .....                                        | 175 |
|          | EK 3. GWO algoritması MATLAB kodları .....                                        | 176 |
|          | EK 4. PSO algoritması MATLAB kodları .....                                        | 177 |
|          | EK 5. P&O algoritması MATLAB kodları .....                                        | 178 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### KISALTMALAR

|                |                                                                                                                  |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABC</b>     | Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)                                                                       |
| <b>AC</b>      | Alternatif Akım (Alternating Current)                                                                            |
| <b>ACO</b>     | Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization)                                                         |
| <b>ACO-NPU</b> | Yeni Feromon Güncellemesi ile Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization with New Pheromone Update) |
| <b>ACS</b>     | Uyarlanabilir Pusulalı Arama (Adaptive Compass Search)                                                           |
| <b>ADG</b>     | Toplamlı İkili Bölütlenme ve Eğim (Aggregated Dichotomy and Gradient)                                            |
| <b>AI</b>      | Yapay Zeka (Artificial Intelligence)                                                                             |
| <b>ALU</b>     | Aritmetik Lojik Birimi (Arithmetic Logic Unit)                                                                   |
| <b>ANFIS</b>   | Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)                               |
| <b>ANN</b>     | Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)                                                                      |
| <b>BBO</b>     | Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (Biogeography-Based Optimization)                                              |
| <b>BJT</b>     | Bipolar Bağlantı Transistörü (Bipolar Junction Transistor)                                                       |
| <b>CCGPA</b>   | Cauchy Tercihli Çapraz tabanlı Küresel Tozlaşma (Cauchy Preferential Crossover-based Global Pollination)         |
| <b>CGSA</b>    | Kümelenmiş Yerçekimi Arama Algoritması (Clustered Gravitational Search Algorithm)                                |
| <b>C-Map</b>   | Kavramsal Harita (Conceptual Map)                                                                                |
| <b>CPU</b>     | Merkezi İşlem Birimi (Central Process Unit)                                                                      |
| <b>CS</b>      | Guguk Kuşu Arama (Cuckoo Search)                                                                                 |
| <b>DC</b>      | Doğru Akım (Direct Current)                                                                                      |
| <b>DCO</b>     | Dijital Kontrollü Osilatör (Digitally Controlled Oscillator)                                                     |
| <b>DFOA</b>    | Yusufçuk Optimizasyon Algoritması (Dragonfly Optimization Algorithm)                                             |
| <b>DPC</b>     | Doğrudan Güç Denetleyicisi (Direct Power Controller)                                                             |

|                |                                                                                                                                                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DSMO</b>    | Dinamik Vekil Model tabanlı Optimizasyon (Dynamic Surrogate Model based Optimization)                                                                                                 |
| <b>DWS</b>     | Azaltılmış Pencere Boyutu Tarama (Decrement Window-Size Scanning)                                                                                                                     |
| <b>ECU</b>     | Elektronik Kontrol Ünitesi (Electronic Control Unit)                                                                                                                                  |
| <b>EEPROM</b>  | Silinip Programlanabilir Salt Okunur Bellek (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)                                                                                     |
| <b>ELMVSGA</b> | Birleştirilmiş Aşırı Öğrenme Makinesi ve Değişken Dik Eğim Tırmanışı (Combined Extreme Learning Machine Variable Steepest Gradient Ascent)                                            |
| <b>EO</b>      | Denge Optimizasyonu (Equilibrium Optimizer)                                                                                                                                           |
| <b>ESC</b>     | Ekstremum Arayışı Kontrolü (Extremum Seeking Control)                                                                                                                                 |
| <b>FA</b>      | Ateş Böceği Algoritması (Firefly Algorithm)                                                                                                                                           |
| <b>FASO</b>    | Hızlı Atom Arama Optimizasyonu (Fast Atom Search Optimization)                                                                                                                        |
| <b>FFA</b>     | Füzyon Ateş Böceği Algoritması (Fusion Firefly Algorithm)                                                                                                                             |
| <b>FL</b>      | Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)                                                                                                                                                          |
| <b>FLC</b>     | Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control)                                                                                                                                          |
| <b>FLS</b>     | Bulanık Mantık Sistemi (Fuzzy Logic System)                                                                                                                                           |
| <b>FOCV</b>    | Kesirli Açık Devre Gerilimi (Fractional Open Circuit Voltage)                                                                                                                         |
| <b>FOINC</b>   | Kesirli Dereceli Kontrol tabanlı INC (Fractional Order Control based Incremental Conductance)                                                                                         |
| <b>FPA</b>     | Çiçek Tozlaşma Algoritması (Flower Pollination Algorithm)                                                                                                                             |
| <b>FPIDN</b>   | Filtre Tabanlı Uyarlanabilir Bulanık Oransal İntegral Türev (Filter-based Adaptive Fuzzy Proportional Integral Derivative)                                                            |
| <b>FPSOGSA</b> | Bulanık Mantık tabanlı Hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Yerçekimi Arama Algoritması (Hybrid Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm based on Fuzzy Logic) |
| <b>FSCC</b>    | Kesirli Kısa Devre Akımı (Fractional Short Circuit Current)                                                                                                                           |
| <b>FWA</b>     | Havai Fişek Algoritması (Fireworks Algorithm)                                                                                                                                         |
| <b>GA</b>      | Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)                                                                                                                                                 |
| <b>GCPV</b>    | Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik (Grid-Connected Photovoltaic)                                                                                                                           |
| <b>GMPP</b>    | Global Maksimum Güç Noktası (Global Maximum Power Point)                                                                                                                              |

|                 |                                                                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>GMPPT</b>    | Global Maksimum Güç Noktası İzleme (Global Maximum Power Point Tracking)                                                 |
| <b>GOA</b>      | Çekirge Optimizasyon Algoritması (Grasshopper Optimization Algorithm)                                                    |
| <b>GPR-Jaya</b> | Gauss Süreç Regresyonu-Jaya (Gaussian Process Regression-Jaya)                                                           |
| <b>GSA</b>      | Yerçekimi Arama Algoritması (Gravitational Search Algorithm)                                                             |
| <b>GSDD</b>     | Veri Odaklı Açgözlü Arama (Greedy Search based Data Driven)                                                              |
| <b>GWO</b>      | Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimization)                                                                          |
| <b>GWO-FLC</b>  | Bulanık Mantık Kontrol ile Birleştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer Combined with Fuzzy Logic Control) |
| <b>HBO</b>      | Bal Porsuğu Optimizasyonu (Honey Badger Algorithm)                                                                       |
| <b>HC</b>       | Tepe Tırmanma (Hill Climbing)                                                                                            |
| <b>HC-LOM</b>   | Tepe Tırmanma tabanlı Kilitleme Mekanizması (Hill Climbing based Lock-On Mechanism)                                      |
| <b>HFI</b>      | Yüksek Frekanslı Enjeksiyon (High Frequency Injection)                                                                   |
| <b>HGO</b>      | Henry Gaz Çözünürlük Optimizasyonu (Henry Gas Solubility Optimization)                                                   |
| <b>HHO</b>      | Harris Şahin Optimizasyonu (Harris Hawk Optimization)                                                                    |
| <b>HSA</b>      | Normal Harmonik Arama Algoritması (Normal Harmonic Search Algorithm)                                                     |
| <b>I/O</b>      | Giriş-çıkış                                                                                                              |
| <b>ICA</b>      | Emperyalist Rekabet Algoritması (Imperialist Competitive Algorithm)                                                      |
| <b>ICS</b>      | Geliştirilmiş Guguk Kuşu Arama (Improved Cuckoo Search)                                                                  |
| <b>IFA</b>      | Bağıışıklık Ateş Böceği Algoritması (Immune Firefly Algorithm)                                                           |
| <b>IGBT</b>     | İzole edilmiş Kapılı, İki Kutuplu Transistör (Insulated-Gate Bipolar Transistor)                                         |
| <b>IGSA</b>     | Geliştirilmiş Yerçekimi Arama Algoritması (Improved Gravitational Search Algorithm)                                      |
| <b>INC</b>      | Artımsal İletkenlik (Incremental Conductance)                                                                            |
| <b>IPC</b>      | Dolaylı Güç Denetleyicisi (Indirect Power Controller)                                                                    |
| <b>IRA</b>      | İç Direnç Uyarlamalı (Internal-Resistance-Adaptive)                                                                      |
| <b>IT2FLS</b>   | Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi (Interval Type-2 Fuzzy Logic System)                                               |

|                    |                                                                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>I-TLBO</b>      | Geliştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Improved Teaching–Learning-Based Optimization)  |
| <b>JayaDE</b>      | Jaya ile Diferansiyel Evrim (Differential Evolution with Jaya)                                      |
| <b>JAYA-LF</b>     | Lévy Uçuşuna dayalı Jaya (Jaya based on Lévy Flight)                                                |
| <b>LA</b>          | Öğrenme Otomatları (Learning Automata)                                                              |
| <b>LE</b>          | Doğrusal Ekstrapolasyon (Linear Extrapolation)                                                      |
| <b>LMPP</b>        | Lokal Maksimum Güç Noktası (Local Maximum Power Point)                                              |
| <b>LOM</b>         | Kilit Mekanizması (Lock-On Mechanism)                                                               |
| <b>MAPE</b>        | Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (Mean Absolute Percentage Error)                                       |
| <b>MBA</b>         | Mayın Patlatma Optimizasyonu (Mine Blast Optimization)                                              |
| <b>MCU</b>         | Mikrodenetleyici (Microcontroller Unit)                                                             |
| <b>MOSFET</b>      | Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) |
| <b>MPP</b>         | Maksimum Güç Noktası (Maximum Power Point)                                                          |
| <b>MPPT</b>        | Maksimum Güç Noktası İzleme (Maximum Power Point Tracking)                                          |
| <b>M-PSO</b>       | Mutasyonlu Parçacık Sürü Optimizasyonu (Mutation Particle Swarm Optimization)                       |
| <b>MRL</b>         | Memetik Pekiştirmeli Öğrenme (Memetic Reinforcement Learning)                                       |
| <b>NTD</b>         | Düzensiz Olmayan Sıcaklık Dağılımı (Non-Uniform Temperature Distribution)                           |
| <b>P&amp;O</b>     | Değiştir ve Gözlemle (Perturb & Observe)                                                            |
| <b>P&amp;O-LOM</b> | Değiştir ve Gözlemle tabanlı Kitleme Mekanizması (Perturb & Observe based Lock-On Mechanism)        |
| <b>PBIS</b>        | İlk Tarama ile Tepe Noktası Basamaklama (Peak Bracketing with Initial Scanning)                     |
| <b>PD</b>          | Güç Farklılıkları (Power Differentials)                                                             |
| <b>PHS</b>         | Pompa Hidro Depolama (Pumped Hydro Storage)                                                         |
| <b>PI</b>          | Oransal-İntegral (Proportional-Integral)                                                            |
| <b>PID</b>         | Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative)                                           |
| <b>PSC</b>         | Kısmi Gölgeleme Koşulları (Partial Shading Conditions)                                              |
| <b>PSO</b>         | Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)                                           |
| <b>PTH</b>         | Fotovoltaik Termoelektrik Hibrit (Photovoltaic Thermoelectric Hybrid)                               |

|                   |                                                                                                                                                         |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>PV</b>         | Fotovoltaik (Photovoltaic)                                                                                                                              |
| <b>PWM</b>        | Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)                                                                                                     |
| <b>QOCGWO-RFA</b> | Rastgele Orman Algoritması ile Yarı Muhalif Kaotik Gri Kurt Optimizasyonu (Quasi Oppositional Chaotic Grey Wolf Optimizer with Random Forest Algorithm) |
| <b>RAM</b>        | Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory)                                                                                                         |
| <b>RMO</b>        | Radyal Hareket Optimizasyonu (Radial Movement Optimization)                                                                                             |
| <b>S-Jaya</b>     | Doğal Kübik-Spline-tabanlı Jaya (Natural Cubic-Spline-guided Jaya)                                                                                      |
| <b>SMC</b>        | Kayan Mod Kontrolü (Sliding Mode Control)                                                                                                               |
| <b>SMPS</b>       | Anahtar Durumundaki Güç Beslemesi (Switch Mode Power Supply)                                                                                            |
| <b>SPP&amp;O</b>  | Kendi Kendini Tahmin Eden Değiştir ve Gözlemle (Self-Predictive Perturb and Observe)                                                                    |
| <b>SRAM</b>       | Durağan Rastgele Erişimli Bellek (Static Random Access Memory)                                                                                          |
| <b>TC</b>         | Termokupl (Thermocouple)                                                                                                                                |
| <b>TE</b>         | Termoeleman (Thermoelement)                                                                                                                             |
| <b>TEC</b>        | Termoelektrik Soğutucu (Thermoelectric Cooler)                                                                                                          |
| <b>TEG</b>        | Termoelektrik Jeneratör (Thermoelectric Generator)                                                                                                      |
| <b>TEM</b>        | Termoelektrik Modül (Thermoelectric Module)                                                                                                             |
| <b>TLBO</b>       | Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning-Based Optimization)                                                                             |
| <b>WDO</b>        | Rüzgâr Tahrikli Optimizasyon (Wind Driven Optimization)                                                                                                 |
| <b>WECS</b>       | Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi (Wind Energy Conversion System)                                                                                         |
| <b>WOA</b>        | Balina Optimizasyonu Algoritması (Whale Optimization Algorithm)                                                                                         |

## SİMGELER

|               |                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_n$    | n tipi materyallerin Seebeck katsayısı ( $\mu\text{V/K}$ )                               |
| $\alpha_p$    | p tipi materyallerin Seebeck katsayısı ( $\mu\text{V/K}$ )                               |
| $\alpha_{pn}$ | TE'yi oluşturan n ve p tipi materyallerin Seebeck katsayıları farkı ( $\mu\text{V/K}$ )  |
| $\rho_c$      | n ve p tipi materyallerin metalik temasının elektriksel öz direnci ( $\Omega.\text{m}$ ) |
| $\rho_n$      | n tipi materyallerin elektriksel öz direnci ( $\Omega.\text{m}$ )                        |

|                 |                                                                                       |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $\rho_p$        | p tipi materyallerin elektriksel öz direnci ( $\Omega.m$ )                            |
| $\eta$          | Verim                                                                                 |
| $\Delta I_L$    | Maksimum akım dalgalanması (A)                                                        |
| $\Delta V_o$    | MPP'deki maksimum gerilim dalgalanması (V)                                            |
| $\Delta T$      | Sıcaklık farkı ( $^{\circ}C$ )                                                        |
| $D$             | Görev döngüsü doluluk oranı                                                           |
| $f_s$           | Anahtarlama frekansı (kHz)                                                            |
| $I$             | Akım (A)                                                                              |
| $I_{o(max)}$    | Yükselten dönüştürücü maksimum çıkış akımı (A)                                        |
| $I_{SC}$        | TEG kısa devre akımı (A)                                                              |
| $I_{TEG}$       | TEG çıkış akımı (A)                                                                   |
| $I_{TEG/MAX}$   | MPP'deki (maksimum) TEG çıkış akımı (A)                                               |
| $I_{MPP}$       | MPP'deki (maksimum) TEG çıkış akımı (A)                                               |
| $L_C$           | n ve p tipi materyallerin metalik temasından ısı akışının geçtiği kol uzunlukları (m) |
| $L_n$           | n tipi materyallerden ısı akışının geçtiği kol uzunlukları (m)                        |
| $L_p$           | p tipi materyallerden ısı akışının geçtiği kol uzunlukları (m)                        |
| $N$             | Seri bağlı TE sayısı                                                                  |
| $P$             | Güç (W)                                                                               |
| $P_{TEG}$       | TEG'den elde edilen güç (W)                                                           |
| $P_{TEG\_MAX}$  | TEG'den elde edilen maksimum güç (W)                                                  |
| $P_{MPP}$       | TEG'den elde edilen maksimum güç (W)                                                  |
| $P_{conv}$      | Yükselten dönüştürücü gücü (W)                                                        |
| $P_{giriş}$     | TEG'den transfer edilen güç (W)                                                       |
| $P_{çıkış}$     | Yükün aldığı güç (W)                                                                  |
| $R_L$           | Yük direnci ( $\Omega$ )                                                              |
| $R_{PROG}$      | Dönüştürücünün oluşturduğu eşdeğer direnç ( $\Omega$ )                                |
| $R_{converter}$ | Dönüştürücünün oluşturduğu eşdeğer direnç ( $\Omega$ )                                |
| $R_{TEG}$       | TEG sisteminin toplam iç direnci ( $\Omega$ )                                         |
| $S_C$           | n ve p tipi materyallerin birleşim noktasının kesit alanı ( $m^2$ )                   |
| $S_n$           | n tipi materyallerin kesit alanı ( $m^2$ )                                            |
| $S_p$           | p tipi materyallerin kesit alanı ( $m^2$ )                                            |

|               |                                                   |
|---------------|---------------------------------------------------|
| $t_{off}$     | Anahtarlama elemanın kapalı kalma süresi (s)      |
| $t_{on}$      | Anahtarlama elemanın açık kalma süresi (s)        |
| $T_c$         | Soğuk yüzey sıcaklığı (°C)                        |
| $T_H$         | Sıcak yüzey sıcaklığı (°C)                        |
| $T_s$         | Anahtarlama periyodu (s)                          |
| $V$           | Gerilim (V)                                       |
| $V_{OC}$      | TEG'in açık devre gerilimi (V)                    |
| $V_{TEG}$     | TEG çıkış gerilimi (V)                            |
| $V_{TEG/MAX}$ | MPP'deki (maksimum) TEG çıkış gerilimi (V)        |
| $V_{MPP}$     | MPP'deki (maksimum) TEG çıkış gerilimi (V)        |
| $V_{in}$      | Yükselten dönüştürücü giriş gerilimi (V)          |
| $V_{o(max)}$  | Yükselten dönüştürücü maksimum çıkış gerilimi (V) |
| $V_{out}$     | TE'nin açık uçları arasındaki gerilim (V)         |

## BİRİMLER

|    |                  |
|----|------------------|
| °C | Derece santigrat |
| μ  | Mikro            |
| A  | Amper            |
| Hz | Hertz            |
| K  | Kelvin           |
| KB | Kilobayt         |
| M  | Mega             |
| V  | Volt             |
| W  | Watt             |
| k  | Kilo             |
| VA | Volt Amper       |
| s  | Saniye           |
| Ω  | Ohm              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 1.1. Farklı yılların kaynağına göre istatistiksel ve tahmini küresel enerji tüketimi.....                                                                                                        | 1   |
| Şekil 2.1. TE'nin temel yapısı.....                                                                                                                                                                    | 39  |
| Şekil 2.2. Tipik TEG temel çalışma prensibi .....                                                                                                                                                      | 40  |
| Şekil 2.3. TEG elektrik eşdeğer devresi.....                                                                                                                                                           | 41  |
| Şekil 2.4. DC-DC Yükselten dönüştürücü .....                                                                                                                                                           | 42  |
| Şekil 2.5. Termoelektrik jeneratör elektriksel eşdeğer devresi ve yük bağlantısı.....                                                                                                                  | 44  |
| Şekil 2.6. Yükün bir fonksiyonu olarak akım-gerilim ve güç eğrisi.....                                                                                                                                 | 46  |
| Şekil 2.7. Yük direncinin ve sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEG'in MPP değerleri .....                                                                                                        | 47  |
| Şekil 2.8. MPPT metodolojisi .....                                                                                                                                                                     | 48  |
| Şekil 3.1. Sistemde kullanılan soğutma-ısıtma blokları ve TEG yerleşimi .....                                                                                                                          | 50  |
| Şekil 3.2. INA169 Akım algılama sensörü ve bağlantı devresi .....                                                                                                                                      | 53  |
| Şekil 3.3. Dönüştürücü çıkışındaki akım algılama sensörü .....                                                                                                                                         | 54  |
| Şekil 3.4. TEG çıkışındaki ve dönüştürücü çıkışındaki gerilim sensörleri .....                                                                                                                         | 54  |
| Şekil 3.5. K tipi BRYMEN BKP-60 ölçü aleti termokupl probu .....                                                                                                                                       | 55  |
| Şekil 3.6. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Simulink® modeli ve modelin iç yapısı.....                                                                                                                         | 58  |
| Şekil 3.7. Üretici verileri ve eğri uydurma yöntemiyle elde edilen iç direnç değerleri .....                                                                                                           | 58  |
| Şekil 3.8. Bir PN çifti için belirli sıcak yüzey sıcaklıklarında hesaplanan Seebeck katsayıları .....                                                                                                  | 60  |
| Şekil 3.9. Modellenen TEG modülünün açık devre gerilimi ve kısa devre akımı testleri .....                                                                                                             | 62  |
| Şekil 3.10. Tasarlanan TEG modül modelinin V-I ve V-P karakteristikleri.....                                                                                                                           | 63  |
| Şekil 3.11. Modülün veri sayfasındaki güç verileri ile Simulink® modeli oluşturulan modülün simülasyon sonucunda üretilen güç verilerinin karşılaştırılması ve MAPE değerleri ile hata grafikleri..... | 63  |
| Şekil 3.12. Maksimum güç noktası izleme prensibi .....                                                                                                                                                 | 64  |
| Şekil 3.13. TEG güç grafiği .....                                                                                                                                                                      | 69  |
| Şekil 3.14. P&O algoritması akış şeması .....                                                                                                                                                          | 71  |
| Şekil 3.15. INC algoritması akış şeması .....                                                                                                                                                          | 74  |
| Şekil 3.16. FOCV algoritması akış şeması.....                                                                                                                                                          | 76  |
| Şekil 3.17. FSCC algoritması akış şeması .....                                                                                                                                                         | 77  |
| Şekil 3.18. PSO algoritması akış şeması.....                                                                                                                                                           | 81  |
| Şekil 3.19. Gri kurtların hiyerarşik zincir yapısı.....                                                                                                                                                | 83  |
| Şekil 3.20. GWO algoritması akış şeması.....                                                                                                                                                           | 86  |
| Şekil 3.21. HBO algoritması akış şeması.....                                                                                                                                                           | 90  |
| Şekil 3.22. Yükselten dönüştürücü.....                                                                                                                                                                 | 91  |
| Şekil 3.23. Yükselten dönüştürücü PCB tasarımı .....                                                                                                                                                   | 97  |
| Şekil 3.24. Yükselten dönüştürücü.....                                                                                                                                                                 | 97  |
| Şekil 3.25. Yükselten dönüştürücü Simulink® modeli.....                                                                                                                                                | 98  |
| Şekil 3.26. TEG sistemi, yükselten çevirici ve yük bağlantısı.....                                                                                                                                     | 99  |
| Şekil 3.27. TEG sistemi ölçüm ve bilgi akışı blok diyagramı .....                                                                                                                                      | 99  |
| Şekil 3.28. MATLAB/Simulink® NI USB-6211 kartı blok şeması .....                                                                                                                                       | 100 |
| Şekil 3.29. TEG sistemi deneysel kurulumu.....                                                                                                                                                         | 102 |
| Şekil 4.1. Paralel TEG sistemi .....                                                                                                                                                                   | 104 |
| Şekil 4.2. Geleneksel MPPT yöntemlerini karşılaştırmak için tasarlanan Simulink® modeli .....                                                                                                          | 105 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.3. MPPT algoritmalarının Simulink® modelleri .....                                                                  | 107 |
| Şekil 4.4. Algoritmalar için TEG gerilimi ve TEG akımı ölçümü.....                                                          | 108 |
| Şekil 4.5.1-9 Farklı yük değerleri için geleneksel algoritmaların TEG'den elde ettiği güç eğrileri .....                    | 112 |
| Şekil 4.6. Geleneksel algoritmaların sabit yükte farklı sıcak yüzey sıcaklığı değerleri için davranışı .....                | 113 |
| Şekil 4.7. Geleneksel algoritmaların anlık değişken sıcaklık farkındaki davranışları .....                                  | 114 |
| Şekil 4.8. TEG sisteminde sabit iç direnç ve sıcaklığa bağlı değişen iç direnç ile TEG'den elde edilen güçler .....         | 116 |
| Şekil 4.9. TEG sisteminde sabit Seebeck ve sıcaklığa bağlı değişen Seebeck katsayıları ile TEG'den elde edilen güçler ..... | 117 |
| Şekil 4.10. Metasezgisel MPPT yöntemlerini kıyaslamak için kullanılan Simulink modeli .....                                 | 118 |
| Şekil 4.11. HBO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri .....                                                           | 119 |
| Şekil 4.12. GWO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri .....                                                           | 120 |
| Şekil 4.13. PSO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri .....                                                           | 121 |
| Şekil 4.14. P&O algoritması simülasyon sonuçları grafikleri.....                                                            | 122 |
| Şekil 4.15. Simülasyonlarda MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri .....                                          | 123 |
| Şekil 4.16. Simülasyonlarda algoritmaların ürettiği görev döngüsü değerleri.....                                            | 123 |
| Şekil 4.17. HBO algoritması deney sonuçları grafikleri .....                                                                | 127 |
| Şekil 4.18. GWO algoritması deney sonuçları grafikleri .....                                                                | 128 |
| Şekil 4.19. PSO algoritması deney sonuçları grafikleri .....                                                                | 129 |
| Şekil 4.20. P&O algoritması deney sonuçları grafikleri .....                                                                | 130 |
| Şekil 4.21. Deneysel çalışmalarda MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri .....                                    | 131 |
| Şekil 4.22. Deneysel çalışmalarda algoritmaların ürettiği görev döngüsü değerleri                                           | 131 |

## TABLO DİZİNİ

|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo1.1. TEG'lere uygulanmış geleneksel MPPT algoritmalarının özeti.....                                                                                 | 12  |
| Tablo1.2. TEG'lere uygulanmış diğer MPPT yöntemlerinin özeti.....                                                                                         | 23  |
| Tablo1.3. GMPP arama kabiliyetine sahip algoritmalar.....                                                                                                 | 36  |
| Tablo 3.1. TEG modülü özellikleri .....                                                                                                                   | 49  |
| Tablo 3.2. Termokupl türleri ve çalıştıkları sıcaklık değerleri.....                                                                                      | 55  |
| Tablo 3.3. Soğuk yüzey sıcaklığına göre Seebeck katsayısı değerleri.....                                                                                  | 60  |
| Tablo 3.4. Sıcaklık farkına göre Seebeck katsayı değerleri .....                                                                                          | 61  |
| Tablo 3.5. P&O MPPT algoritma olasılıkları .....                                                                                                          | 69  |
| Tablo 3.6. P&O algoritması sözde kodu .....                                                                                                               | 70  |
| Tablo 3.7. INC algoritması sözde kodu .....                                                                                                               | 73  |
| Tablo 3.8. FOCV algoritması sözde kodu.....                                                                                                               | 75  |
| Tablo 3.9. FSCC algoritması sözde kodu .....                                                                                                              | 77  |
| Tablo 3.10. PSO algoritması sözde kodu .....                                                                                                              | 80  |
| Tablo 3.11. GWO algoritması sözde kodu.....                                                                                                               | 85  |
| Tablo 3.12. HBO algoritması sözde kodu.....                                                                                                               | 89  |
| Tablo 3.13. Yükselten dönüştürücü tasarım parametreleri .....                                                                                             | 95  |
| Tablo 3.14. Yükselten dönüştürücü bileşenleri.....                                                                                                        | 97  |
| Tablo 4.1. TEG modülü ve TEG sistemi özellikleri .....                                                                                                    | 105 |
| Tablo 4.2. Simülasyon çalışmalarında geleneksel algoritmaların farklı yüklerde<br>TEG'den elde ettiği güç değerleri .....                                 | 112 |
| Tablo 4.3. Sabit yükte farklı sıcaklıklarda geleneksel algoritmaların TEG'den elde<br>ettiği güç değerleri .....                                          | 114 |
| Tablo 4.4. Deneysel ölçümler ile elde edilen TEG modülü ve TEG sistemi<br>özellikleri.....                                                                | 118 |
| Tablo 4.5. HBO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri.....                                                                                    | 119 |
| Tablo 4.6. GWO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri .....                                                                                   | 120 |
| Tablo 4.7. PSO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri.....                                                                                    | 121 |
| Tablo 4.8. P&O algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri.....                                                                                    | 122 |
| Tablo 4.9. Simülasyon çalışmalarında kararlı hal durumda algoritmaların farklı<br>yüklerde TEG'den elde ettiği güçler ve verimleri .....                  | 124 |
| Tablo 4.10. Simülasyon çalışmalarında kararlı hal durumda algoritmaların farklı<br>yüklerde MPPT için ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri..... | 124 |
| Tablo 4.11. HBO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri .....                                                                                       | 127 |
| Tablo 4.12. GWO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri .....                                                                                       | 128 |
| Tablo 4.13. PSO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri .....                                                                                       | 129 |
| Tablo 4.14. P&O algoritması deney sonuçları nümerik değerleri .....                                                                                       | 130 |
| Tablo 4.15. Deneysel çalışmalarda kararlı hal durumda algoritmaların farklı<br>yüklerde TEG'den elde ettiği güçler ve verimleri .....                     | 132 |
| Tablo 4.16. Deneysel çalışmalarda kararlı hal durumda algoritmaların farklı<br>yüklerde MPPT için ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri.....     | 132 |

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni adım adım yönlendiren ve değerli bilgilerini paylaşan sürekli teşvikleri ve önerileri sayesinde, çalışmamı daha sağlam temeller üzerine inşa etme fırsatı bulmamı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hayati MAMUR'a ve bana değerli görüşlerini ve eleştirilerini sunan, deneyimli bakış açısı ve farklı perspektifleri ile çalışmamın zenginleşmesine katkı sağlayan ikinci danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sezai TAŞKIN'a her zaman yanımda oldukları için teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu süreçte sonsuz sevgisi, inancı ve desteği ile her zaman motivasyon kaynağım olan, her koşulda sabrını ve anlayışını eksik etmeyen ve beni her daim ileri taşıyan kıymetli eşim Betül'e yürekten teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışmamı 2022-012 numaralı "Termoelektrik Jeneratörlerde Maksimum Güç Noktası İzleme Verimliliğinin İyileştirilmesi" isimli proje ile destekleyen Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Ali ÜSTÜNER  
Manisa, 2023

## ÖZET

### Doktora Tezi

**Mehmet Ali ÜSTÜNER**

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Hayati MAMUR**

**İkinci Danışman: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**

Enerji ihtiyacının ana kaynağı olan fosil yakıtların yenilenemez yapıları ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, daha temiz daha sürdürülebilir enerji kaynakları arayışı ve enerjinin verimli kullanımı günümüzde büyük bir araştırma konusudur. Termoelektrik jeneratörler (TEG) atık ısıyı elektrik enerjisine çevirerek enerji verimliliğine katkıda bulunurlar. Ancak TEG sistemlerinin bir dezavantajı olan düşük verimliliği dikkate alındığında, TEG cihazının performansını iyileştirmek ve tam kapasitesine yakın çalışmasını sağlamak için TEG iç direnci ile yük direncinin empedans eşlemesi yapılarak TEG’i maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırmak gerekir. Yük değeri her zaman iç dirence eşit olamayacağı için empedans eşlemesi işlemi DC-DC dönüştürücüler ile yapılır. DC-DC dönüştürücüler maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmaları ile TEG’den hem kararlı bir gerilim alınmasını hem de MPP’nin yakalanmasını sağlarlar. Geleneksel MPPT yöntemleri ile global MPP’ye ulaşmada problemler yaşanmaktadır. Dolayısıyla geleneksel MPPT yöntemlerinin bu eksikliklerini gidermek amacıyla, günümüzde metasezgisel algoritmaların MPPT yöntemlerinde kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, ilk olarak, Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 TEG modülünün MATLAB/Simulink® modeli oluşturulmuştur. Sonra, geleneksel algoritmalarından olan ve geliştirilen algoritmalara bir referans teşkil eden Değiştir ve Gözlemle (P&O) MPPT algoritması ile çalışan bir DC-DC yükselten dönüştürücünün ve TEG sisteminin tasarımı ve modellemesi gerçekleştirilerek MPP yakalama eğrileri çıkarılmıştır. Daha sonra, metasezgisel algoritmalarından olan ve geleneksel algoritmalarda yaşanan lokal MPP’ye takılma sorununu azaltıcı etkilere sahip Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve daha önce MPPT yöntemi olarak TEG’lere uyarlanmamış Bal Porsuğu Optimizasyonu (HBO) algoritmaları kullanılmış ve gerçek TEG sistemine uygulanmıştır. Son olarak, simülasyon ve deneysel çalışmalarda yük değişimine bağlı olarak yöntemlerin çıktıları değerlendirilmiştir. Tüm algoritmalar MPP’yi izlemiş ve P&O algoritması ile kıyaslanmıştır. Farklı yükler altında en fazla güç sırasıyla HBO, GWO, PSO ve P&O algoritmaları ile elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Termoelektrik jeneratör, yükselten dönüştürücü, maksimum güç noktası izleme, bal porsuğu optimizasyonu, gri kurt optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu, değiştir ve gözlemle.

**2023, 178 sayfa**

## **ABSTRACT**

### **PhD Thesis**

**Mehmet Ali ÜSTÜNER**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Hayati MAMUR**

**Co-Supervisor: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**

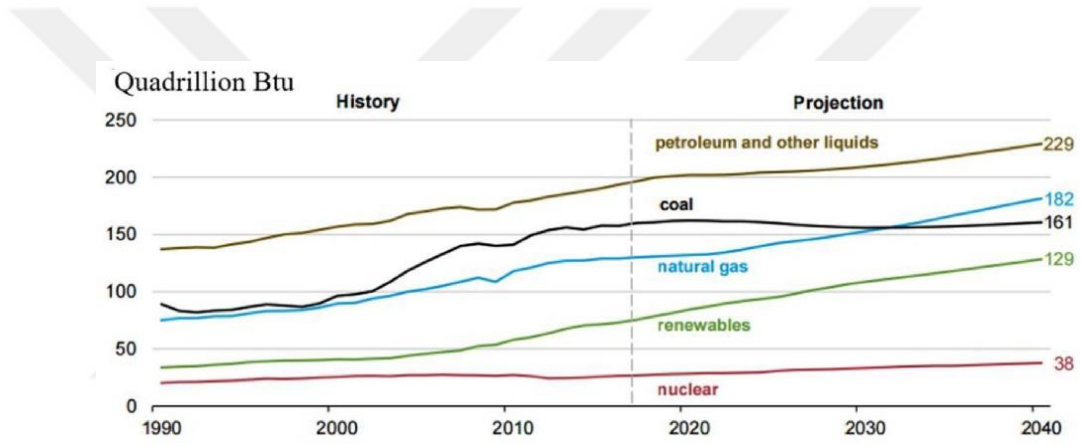
Fossil fuels are the main source of energy need, but due to their non-renewable nature and negative effects on the environment, the research for cleaner, more sustainable energy sources and efficient use of energy is a major research topic today. Thermoelectric generators (TEG) contribute to energy efficiency by converting waste heat into electrical energy. However, considering the low efficiency, which is a disadvantage of TEG systems, it is necessary to operate the TEG at the maximum power point (MPP) by providing impedance matching of the TEG internal resistance and the load resistor in order to improve its performance. Since the load value cannot always be equal to the internal resistance, DC-DC converters are assigned for impedance matching. DC-DC converters, together with maximum power point tracking (MPPT) algorithms, ensure both a stable voltage from the TEG and the tracking of the MPP. There are problems in reaching the global MPP with conventional MPPT methods. Therefore, it is seen that metaheuristic algorithms are used in MPPT methods today in order to eliminate these drawbacks of conventional MPPT methods. In this study, firstly, the MATLAB/Simulink® model of the Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 TEG module was created. Then, MPP tracking curves were derived by designing and modeling a DC-DC boost converter and TEG system working with the traditional Perturb and Observe (P&O) MPPT algorithm, which is a reference to the developed algorithms. Then, metaheuristic algorithms were adapted as the MPPT method and applied to the real TEG system to overcome the problem of conventional algorithms getting stuck in local MPP. Particle Swarm Optimization (PSO), Gray Wolf Optimization (GWO), and Honey Badger Optimization (HBO) algorithms were used as metaheuristic algorithms. HBO is an algorithm that has not been previously adapted to TEGs as an MPPT method. Finally, the outputs of the methods were evaluated depending on the load variation in simulation and experimental studies. All algorithms were able to follow MPP, and metaheuristic algorithms were compared with the P&O algorithm. The highest power under different loads was obtained by HBO, GWO, PSO, and P&O algorithms, respectively.

**Keywords:** Thermoelectric generator, boost converter, maximum power point tracking, honey badger optimization, grey wolf optimization, particle swarm optimization, perturb and observe

**2023, 178 pages**

## 1. GİRİŞ

Fosil yakıt kaynaklarının kullanımı, artan enerji maliyetleri ve daha temiz - daha sürdürülebilir enerji kaynakları arayışı, küresel ısınma nedeniyle sürekli büyüyen küresel bir endişedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, gelecekte olası bir enerji politikası için temel faktördür [2]. Fosil yakıtların yakılmasıyla enerji sağlamak sera ( $CO_2$ ) gazı salınımına ve dolayısıyla çevre kirliliğine neden olur. Ayrıca, bu enerjilerin neredeyse üçte ikisi atık ısı olarak kaybolur. Bu nedenle, günümüzde, çevre kirliliğinin üstesinden gelmeye, fosil yakıt tüketimini azaltmaya ve Şekil 1.1'deki  $CO_2$  emisyonları ile ilgili mevzuatı yerine getirmeye yönelik ilgi artmaktadır [3].



**Şekil 1.1.** Farklı yılların kaynağına göre istatistiksel ve tahmini küresel enerji tüketimi [3]

Endüstriyel atık ısı, proseslerde üretilen, pratik olarak kullanılmayan, kaybolan, israf edilen ve çevreye atılan enerjidir. Endüstriyel atık ısı geri kazanımı, genel enerji tüketimini azaltmak için çeşitli atık ısı geri kazanım teknolojileri aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Endüstride atık ısı geri kazanımı, endüstriyel proseslerde kaybedilen ısıнын toplanması ve yeniden kullanılması yöntemlerini kapsar. Daha sonra faydalı enerji sağlamak ve genel enerji tüketimini azaltmak için kullanılabilir [4].

Toplumların sosyal ve ekonomik gelişmeleri enerji tüketiminin artmasına dayanmaktadır. Her gelişme belirtisi artan enerji tüketimi anlamına gelir. Fosil yakıtlar, enerji ihtiyaçlarının ana kaynağıdır, ancak yenilenemez yapıları ve çevre üzerindeki yan etkileri nedeniyle yakıtların verimli bir şekilde uygulanmasını zorunlu

kılar [5]. Öte yandan petrol kaynakları hızla azalmıştır ve insanlığın enerji kullanımını optimize etmesi gerekmektedir [6]. Dünya enerji tüketiminin 1/3'ü ulaşım sektörüne aittir ve bu tüketimin %85'i karayolu taşımacılığı sektörü tarafından tüketilmektedir [7]. Bu sektördeki kıvılcım ateşlemeli ve sıkıştırılmalı ateşlemeli motorların, kullandığı enerjinin %30-40 kadarlık kısmını atık ısı olarak israf ettiği bilinmektedir [8]. Ayrıca bu tip motorların silindir içi teknikleri ile enerji verimliliği iyileştirmesi doygunluk seviyelerine ulaşmıştır. Bu nedenle, termoelektrik jeneratörler (TEG) gibi bir atık-ısı geri kazanım sistemini uygulamaya koymak, enerji israfını azaltmak için umut vericidir [9].

TEG'ler uçları arasındaki sıcaklık farkından elektrik üreten yarıiletken katı hal cihazlarıdır. Bu teknoloji ilk olarak 1821'de Thomas Johann Seebeck tarafından geliştirilmiştir. TEG'lerin avantajları arasında diğer güç üretim sistemlerinden daha uzun kullanım ömrü, hareketli parça olmaması, çalışma sırasında zararlı kirlenici emisyon olmaması, işletim ve bakım maliyetlerinin olmaması, çevre ile kimyasal reaksiyon olmaması (yani çevre dostu), güvenilir çalışma, katı hal çalışması ve düşük termal enerji potansiyelinin kullanılması yer alır [10].

Düşük verimlilik TEG sistemlerinin bir dezavantajıdır. TEG cihazının performansını iyileştirmek ve tam kapasitesine yakın çalışması için maksimum gücü çıkarmak gerekir. Bu nedenle TEG sistemlerinden maksimum gücü çıkarmak için güç koşullandırma yöntemleri kullanılır [11]. Güç koşullandırma yöntemi empedans eşleştirmesini ve DC-DC dönüştürücülerin uygulamasını içerir. Empedans uyumu, TEG sisteminin toplam iç direnci ile TEG sistemine bağlı harici yük direnci arasındaki dengeyi sağlamayı içerir. Uygun empedans uyumu maksimum gücün yüke aktarılmasını sağlamak için önemlidir. Maksimum gücün yüke aktarılmasını sağlamak için yükün elektriksel direncinin TEG modülün iç direncine eşit olması gerekir [12]. TEG'ler genellikle zamanla değişen sıcaklık farklılıklarının olduğu dinamik ortamlarda kullanılır ve TEG'in iç direnci, yüzeyler arası sıcaklık farkına bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişir [13]. Bu durumda TEG'den maksimum gücü almak için özel elektronik devrelere ihtiyaç vardır [14]. Bu nedenle TEG'den kararlı bir gerilim ve maksimum güç çıkışı elde etmek için maksimum güç noktası izleyicili (MPPT) bir DC-DC dönüştürücü kullanılır [15]. DC-DC dönüştürücülerin tasarımında verimlilik ve gerilim düzenlemesi olmak üzere iki ana kriter vardır. DC-DC

dönüştürücüler, giriş tarafındaki doğru akımı çıkış tarafındaki gerilime veya akıma dönüştürmek için yüksek frekanslı anahtarlamalar kullanarak enerji dönüşümü sağlayan elektronik devrelerdir.

Maksimum güç noktası izleme (MPPT), fotovoltaiik (PV) güç sisteminin çeşitli güneş ışığı yoğunlukları altında maksimum güç kapasitesinde çalışmasını sağlayabilen iyi bilinen bir kontrol yöntemidir. TEG sistemlerin güç karakteristik eğrileri ile PV sistemlerin güç karakteristik eğrileri benzerdir. Harici yükün empedansı özel bir değere sahip ise maksimum güç yüke aktarılır. Bu özel empedans değeri TEG'in tasarımına ve çalışma koşullarına göre değişir. TEG her zaman maksimum güç noktasında (MPP) çalışacak şekilde empedansı değiştirmek için MPPT kullanılır. TEG'in  $I$ - $V$  ve  $P$ - $V$  özellikleri PV ile aynı prensipleri takip ettiğinden, PV için uygulanan MPPT yöntemleri TEG için de kullanılabilir ya da geliştirilebilir. Bu sebeple, son yıllarda bu kontrol yöntemlerinin TEG sistemlerine de kullanımı ile ilgili çalışmalar artmıştır [16].

Alternatif enerji sistemlerinden maksimum güç çekme işlemi, ilk olarak PV ve rüzgâr enerjisi teknolojileri gibi sistemlere uygulanmıştır. Verimi arttırmak için, güç çıkışları MPPT yöntemleri ile optimize edilmiştir. MPPT yöntemleri güç çıkışını en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr türbinleri ve PV güneş sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca yakıt hücreleri, çıkış güçleri dahili sınırlamalar ve çalışma parametrelerinden etkilendiğinden, maksimum güç çıkarma için adaydır [17]. PV sistemler için yeni MPPT algoritmaları geliştirilmeye devam etmektedir. Sıcaklık farkının olduğu her yerde TEG cihazlar kullanılabildiğinden, son yıllarda TEG sistemleri ve termoelektrik cihaz uygulamalarında MPPT yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Literatür incelendiğinde TEG'lerin birçok alanda kullanıldığı görülmektedir. Termoelektrik cihazların endüstride, uzay uygulamalarında, tıbbi hizmetlerde, ulaşım araçlarında çevre dostu güç üretmek amacıyla kullanımı önerilmiştir [18]. TEG'ler ayrıca biyokütle gaz ayrıştırıcılarında atık ısıyı geri kazanma uygulamalarında da kullanılmıştır [19]. Termoelektrik modül (TEM) cihazları ya soğutma amacıyla ya da düşük ısı geri kazanım uygulamalarından güç üretimi için veya TEG modülleri ile pil şarj cihazı gibi bağımsız ısıyı elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır [20]. Tüm bu uygulamalarda, çeşitli sıcaklık değişimleri için maksimum güç sağlama yöntemleri kullanılmalıdır [21].

### 1.1.Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Üzerine Yapılan Araştırmalar

Literatürde MPPT yöntemleri ile ilgili çalışmalar geniş bir alana sahiptir. PV sistemler üzerinde daha çok çalışıldığı için, MPPT algoritmaları genellikle PV sistemler için tasarlanır ve geliştirilir. PV'lerdeki MPPT yöntemleri düzenlenerek TEG'lere rahatlıkla uygulanabildiği için, PV sistemler için yapılan çalışmalar oldukça önemlidir. Literatürde de PV sistemler için tasarlanan ve geliştirilen MPPT algoritmalarının karşılaştırmaları ve incelemeleri geniş alana sahiptir. MPPT algoritmalarının daha iyi anlaşılması açısından, bu çalışmaların da incelenmesi oldukça önemlidir.

Baba ve ark. uygulanan tüm MPPT yöntemlerinin sınıflandırmasını ve değerlendirmesini gerçekleştirdikleri kısa bir inceleme yapmışlardır. MPPT yöntemlerini; izleme yöntemleri, algılama uygulaması ve modernite gibi farklı normlara göre sınıflandırmaya gitmişlerdir. İzleme hızı, verimlilik, maliyet ve karmaşıklık gibi genel terimlere dayanan MPPT yöntemi verilmiştir [22]. Mao ve ark. PV sistemleri için ana MPPT yöntemlerini incelemiş ve özetlenmiştir. MPPT yöntemlerini kontrol, teorik ve optimizasyon ilkelerine göre üç gruba ayrılmıştır. Özellikle PV sistemi için MPPT yöntemlerinin kısmi gölgeleme koşullarındaki (PSC) avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca, MPPT yöntemlerinin gelecekteki olası araştırma yönlerinden bahsetmişlerdir [23]. Yang ve ark. PSC altında PV sistemlerin son teknoloji ürünü MPPT yöntemlerine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır. Modifikasyonları ile birlikte toplam 62 MPPT algoritmasını detaylandırılmışlar ve PSC altında PV sistemlerinde kullanılan çeşitli MPPT algoritmalarını sistematik olarak özetlemiş ve tartışmışlardır [24]. Motahhir ve ark. en çok kullanılan MPPT algoritmalarını kapsamlı olarak incelemişlerdir. Ayrıca, MPPT algoritmalarını doğrudan, dolaylı ve esnek hesaplama olarak üç gruba ayırmışlardır. Üç grupta inceledikleri her yöntemin çalışma ilkesini anlatmışlar, yararları ve olumsuz yönlerini tartışmışlardır [25]. Kayan mod kontrolü (SMC), doğrusal olmayan sistemlerde yaygın olarak kullanılır ve MPP izlemek için PV sistemlere uygulanmıştır. Ahmad ve ark. PV sistemlerden maksimum güç elde etmek için kullanılan SMC yöntemlerini sınıflandırmış ve incelemiştir [26]. Yap ve ark., simülasyon sonuçlarına dayalı olarak 6 ana yapay zekâ (AI) tabanlı MPPT yöntemi arasında sınıflandırma ve performansın ayrıntılı bir karşılaştırmasını yapmışlardır. Her

yöntem, algoritma yapısı, maliyeti, karmaşıklığı, platformu, girdi parametreleri, izleme hızı, salınım doğruluğu, verimliliği ve uygulamaları açısından karşılaştırılmıştır. AI tabanlı MPPT yöntemlerinin yararları, açık sorunları ve teknik uygulamaları değerlendirilmiştir [27]. Narendra ve ark. PV panellerin kullanımını iyileştiren MPPT yöntemlerini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. MPPT yöntemleri arasında karşılaştırma yapmışlar ve uygun MPPT seçimi hakkında fikir veren bir çalışma sunmuşlardır [28]. Kabalci, PV enerji santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonunda kullanılan MPPT yöntemlerini tablo haline getirilmiş özetler şeklinde sunmuştur [29]. Ali ve ark. son 2015-2020 tarihleri arasında çalışılan 71 farklı MPPT yöntemini incelemişlerdir. Her yöntemin kendi avantajları ve dezavantajları olduğu için uygun bir MPPT seçiminin önemine dikkat çekmişler ve neredeyse tüm iyi bilinen MPPT yöntemlerini tek makalede özetlemişlerdir [30]. Ahmad ve ark. PV literatüründe yakın zamanda tasarlanmış, simüle edilmiş ve/veya deneysel olarak doğrulanmış çeşitli MPPT yöntemlerine kapsamlı bir genel bakış sunmuşlardır. Bu çalışmanın, herhangi bir PV sistemi için uygun MPPT yöntemi seçimine yardımcı olabilecek bir MPPT yöntemi değerlendirme kriteri sağlayacağını bildirmişlerdir [31]. Podder ve ark. inceledikleri PV sistemlerde kullanılan 50 MPPT yönteminin temel özelliklerine ve 11 seçim parametresine odaklanmış ve MPPT algoritmalarını doğasına göre sekiz kategoriye ayırmışlardır. MPPT yöntemleri, bu çalışmada, artıları ve eksileri ile birlikte detaylandırılmıştır [32]. Belhachat ve ark. literatürde geliştirilen en önemli ve en yeni MPPT yöntemlerini tartışmışlar ve analiz etmişler, her yöntemin avantaj ve dezavantajlarını ortaya çıkarmışlardır. PV sistemlerde kullanılan MPPT yöntemlerini dört ana grupta incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın tasarımcıların önceliklerine göre uygun bir yöntemin seçilmesini sağlayacağını belirtmişlerdir [33]. Venkateswari ve ark. solar PV sistemler için geleneksel ve esnek hesaplamalı MPPT yöntemlerini karşılaştıran bir özeti yayınlamışlardır. MPPT yöntemlerinin avantajları ve sınırlamaları ile çeşitli topolojiler de tartışmışlardır [34]. Batarseh ve ark. hibrit MPPT yöntemleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. 20 hibrit kombinasyonu incelemişlerdir. Kavramsal Harita (C-Map) aracılığıyla, iki MPPT yöntemini bir hibrit MPPT sisteminde birleştiren model önermişlerdir. Ayrıca daha fazla potansiyel geliştirmeyi keşfetmek için araştırılmamış hibrit kombinasyonların bir listesi önerilmektedir [35]. Belhachat ve ark. kullanıcıların sistemlerini tasarlariken doğru seçimi yapmalarına yardımcı olmak için PSC'ye maruz kalan PV sistemlerin global maksimum güç noktası izleme (GMPPT) yöntemlerini incelemişlerdir. Seçilen MPPT

yöntemleri, optimizasyon, hibrit, matematiksel model tabanlı yöntemler ve diğer GMPPT yöntemleri olarak tartışılmış ve sınıflandırılmıştır [36]. Eltamaly ve ark. PV sistemlerde PSC koşullarında MPPT yöntemlerini geleneksel, esnek hesaplama ve hibrit olarak üç gruba ayırmışlardır. En ünlü ve etkili 17 MPPT yönteminin karşılaştırmalı ve kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Son olarak tüm MPPT yöntemlerinin avantajları, dezavantajları, teknik ve ekonomik karşılaştırmalarını tartışmış ve değerlendirilmişlerdir [37]. Danandeh ve ark. PV sistemlerde kullanılan 41'den fazla MPPT yöntemlerini incelemiş, bu yöntemlerin avantajlarını ve dezavantajlarını tartışmışlardır [38]. Li ve ark. PV sistemlerde GMPPT için kullanılan biyo-esinlenmiş algoritmaların kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Araştırmacıların PV sistemlerden maksimum güç elde etmek için biyo-esinlenmiş algoritmaların uygulanması hakkında kapsamlı bilgi edinmelerine yardımcı olacağını ve ayrıca PSC koşullarında PV sistemlerde GMPPT'nin verimli bir yolunu seçmelerine yardımcı olacağını bildirmişlerdir [39]. Chatterjee ve ark. farklı MPPT algoritmasının ayrıntılı incelemesi tartışmışlardır. Farklı biyo-esinlenmiş, esnek hesaplama tabanlı ve hibrit MPPT algoritmalarının, geleneksel yöntemlere kıyasla, yakınsama oranı, MPP yakınında elde edilen salınım, izleme verimliliği, denetleyici tasarımı, serbestlik derecesi, sağlamlık vb. açılarından daha iyi performans sağladığı sonucuna varmışlardır [40]. Kordestani ve ark., PV panellerinde gücü maksimize etmek için en son kontrol yöntemlerini gözden geçirmişlerdir. Avantajları ve dezavantajları ile yöntemlerin temel kavramlarını incelemişlerdir [41]. Choutapalli ve ark., kısmi gölgeleme koşullarının üstesinden gelmek için PV sistemlerin MPPT yöntemlerinde kullanılan beş farklı biyo-esinlenmiş metasezgisel algoritmayı incelemiş ve açıklamışlardır. Ayrıca gelişmiş yapay zeka tabanlı MPPT yöntemlerinin kısa bir incelemesini sunmuşlardır [42]. Karami ve ark. PV sistemlerinde uygulanan 40 MPPT yöntemini incelemişlerdir. Uygulama karmaşıklığını dikkate alarak izleme algoritmasına ve her yöntemin avantaj ve dezavantajlarına odaklanmışlardır [43]. Erdem, PV sistemlerde kısmi gölge koşullarında MPPT algoritmasının mantıklı bir seçimini yapmaları için rehberlik etmeyi amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Literatürdeki çalışmaları altı ana gruba ayırarak her yöntemin avantaj ve dezavantajlarını ortaya çıkarmıştır [44]. Sameeullah ve ark. tek tip güneşlenme ve kısmi gölgeleme koşulları için çeşitli MPPT yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Pratik olarak kabul edilen ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerin karşılaştırması, kontrol stratejisi, devre tipi, kontrol değişkenlerinin sayısı ve maliyet

gibi özelliklere göre analiz yapmışlardır [45]. El-Khozondar ve ark. maksimum gücün izlenmesinde kullanılan 62 farklı yöntemin literatür taramasına dayalı olarak karşılaştırılmasını yapmışlardır. Karşılaştırmada, sistemin karmaşıklığı, sensör sayısı, devre türü (dijital veya analog), ayarlama, yakınsama hızı ve parametrelerin bağımlılığı gibi çeşitli parametreler kullanarak tablo şeklinde sunmuşlardır [46]. Jordehi, PV sistemlerde kullanılan mevcut MPPT yöntemlerini iki ana kategoriye ayırmış ve her kategorinin yöntemlerini gözden geçirmiştir. Sistem bağımsızlığı, kısmi gölgeleme koşullarında etkili performans ve maksimum güç noktası etrafında salınımların olmaması gibi avantajlara bağlı olarak metasezgisel optimizasyon algoritmalarının MPPT için en iyi adaylar olduğu bulgusuna ulaşmıştır [47]. Tajuddin ve ark. hem geleneksel hem de esnek hesaplama yöntemlerini kullanarak, pertürbatif MPPT algoritmalarına dayalı yöntemlerin güncellenmiş bir incelemesini sunmuşlardır. Yöntemlerin çalışma prensipleri, parametre etkileri ve sınırlamaları tartışmışlar ve okuyucuları yapay zeka ve evrimsel hesaplama tekniklerini kullanarak MPPT'nin yeni yönüne yönlendirmişlerdir [48]. Bendib ve ark., değişen meteorolojik koşullar altında bir PV güç kaynağı sistemini analiz etmek, simüle etmek ve değerlendirmek için Değiştir ve Gözlemle (Perturb & Observe - P&O), artımsal iletkenlik (Incremental Conductance - INC) ve bulanık mantık tabanlı MPPT yöntemlerinin bir incelemesini sunmuşlardır [49].

MPPT yöntemleri yalnızca PV sistemlerde değil bunun yanı sıra diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında da kullanılmaktadır. Bunlardan biri de rüzgâr türbinleridir. Rüzgâr türbinlerinde MPPT yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur. Mousa ve ark. belirli bir uygulamaya uygun algoritmayı seçme yeteneğini geliştirmek için son teknoloji MPPT algoritmalarının kritik analizlerle kısa bir incelemesini sunmuşlardır. Yeterli çeşitlilikteki inceleme makalelerine göre, çalışmalarını dört kategoriye ayırırlar: dolaylı güç kontrolörü (IPC), doğrudan güç kontrolörü (DPC), hibrit ve akıllı algoritmalar. Her kategorinin avantajları ve dezavantajları vardır. Çalışmalarında P&O algoritmasının en son araştırma konularının kapsamlı bir incelemesi yapılmıştır. P&O algoritmalarındaki araştırma eğilimleri için uygun bir referans sunmaktadır [50]. Govinda ve ark., rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde (WECS) P&O, INC ve bulanık mantık tabanlı MPPT yöntemlerinin karşılaştırmalı bir incelemesini sunmuşlardır [51]. Sachan ve ark., WECS'de değişken rüzgârdan maksimum çıktı gücünü almak için kullanılan çeşitli

MPPT yöntemlerini beş kategoriye ayırarak incelemesini sunmuşlardır [52]. Kumar ve ark. WECS’de kullanılan farklı MPPT algoritmalarının kapsamlı bir incelemesini sunmuştur. Algoritmaları dolaylı güç denetleyicisi, doğrudan güç denetleyicisi ve hibrit denetleyici olarak üç grupta incelemişlerdir. Farklı MPPT algoritmalarının avantajları, dezavantajları ve kapsamlı karşılaştırması tartışılmıştır. Ayrıca algoritmalar maksimum enerji çıktısını elde etme becerisi açısından da vurgulanmıştır [53].

MPPT algoritmalarının uygulandığı diğer yeşil enerji kaynakları arasında yakıt hücreleri ve pompalı hidro depolama (Pumped Hydro Storage - PHS) sistemleri de vardır. Serra ve ark. mikrobiyal yakıt hücrelerinden maksimum güç çıkarma hakkında bugüne kadar konu ile en alakalı araştırmayı yapmışlardır. Farklı çalışma modlarında maksimum güç noktası izleme yöntemleri ve güç dönüştürücüleri kullanarak, pasif bileşenli tek hücrelerden hücre gruplarına ve aktif stratejilere kadar, güç iyileştirme cihazlarını ve güç iyileştirme stratejilerini ayrıntılı olarak ele almışlardır [54]. Vasudevan ve ark. değişken hızlı PHS için MPPT algoritmalarını incelemiş ve analiz etmişlerdir [55].

MPPT algoritmaları, yukarıda bahsedilen çalışmalarda da görüldüğü üzere geleneksel algoritmalar, yapay zekâ tabanlı algoritmalar, metasezgisel tabanlı algoritmalar ve hibrit algoritmalar gibi sınıflandırılabilirken, aynı zamanda algoritmalarla birlikte kullanılan kontrol yöntemlerine göre de sınıflandırma yapılabilmektedir.

## **1.2.Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar**

TEG sistemleri için bu zamana kadar pek çok algoritma kullanılmış ve uyarlanmıştır. TEG sistemlerinde MPPT için, kolaylığı ve basitliği nedeniyle geleneksel P&O algoritması sıklıkla kullanılmaktadır. Aynı zamanda P&O algoritması MPPT yöntemleri arasında ilk kullanılan algoritma olması sebebiyle, daha sonra geliştirilen, uyarlanan ve literatüre yeni kazandırılan algoritmalar genellikle P&O algoritması ile kıyaslanarak performans analizleri yapılır.

Mamur ve ark. gerçek bir jeotermal TEG sisteminde bir pTEG pil grubunu şarj etmek için doğrudan şarj ve MPPT algoritmalı DC-DC güçlendirme dönüştürücü arasındaki şarj farklarını sunmuşlardır. PIC16F628A mikrodenetleyicisine P&O algoritmasını gömerek DC-DC yükselten dönüştürücü uygulaması gerçekleştirmişlerdir. pTEG doğrudan pil grubuna bağlandığında çalışma verimliliği %55 olarak ölçülmüştür. pTEG pil grubuna P&O algoritmalı bir DC-DC boost konvertör ile bağlandığında ise çalışma verimliliği %92 olmuştur [14]. Man ve ark. çeşitli uygulamalara entegre edilmiş TEG'ler için sıcaklık gradyanlarını değerlendiren bir çalışma yapmışlardır. TEG uygulamaları için deneysel olarak elde edilen en hızlı sıcaklık gradyanının  $5^{\circ}\text{C/s}$  olduğunu belirtmişlerdir. TEG sistemlerinin dinamik MPPT verimliliğini karakterize etmek için  $0,5^{\circ}\text{C/s}$ ,  $2^{\circ}\text{C/s}$  ve  $5^{\circ}\text{C/s}$  gradyanlı trapezoidal sıcaklık profili (trapezoidal temperature profile) kullanmışlardır. MPPT yöntemi olarak geleneksel P&O algoritmasını ile deneyler yapmışlardır. P&O algoritmasının düşük frekanslarda (2,5 Hz) ve hızla değişen sıcaklık koşullarında ( $5^{\circ}\text{C/s}$ ) izleme sorunları olduğunu, fakat genel sistem verimliliğinin 10 Hz MPPT frekansından yalnızca %0,94 daha az olduğunu bildirmişlerdir. Deneysel sonuçlardan yola çıkarak, TEG sistemleri için MPPT yöntemi olarak P&O algoritması kullanmanın genel sistem maliyetlerini azalttığını ve yine de yüksek MPPT verimliliğini koruduğunu bildirmişlerdir [56]. Verma ve ark. PV paneller ile TEG sistemlerini birlikte kullanarak daha verimli bir fotovoltaik termoelektrik hibrit (PTH) bir sistem modellemişlerdir. Bu modelde hem PV panel MPP'yi hem de PTH için TEG'i izlemek amacıyla P&O algoritmasını kullanmışlardır. PTH sisteminde P&O algoritmasını kullanarak, hibrit sistemin sıcak ve soğuk iklim koşullarına sahip herhangi bir yerde uygun verimlilikte kullanılabildiğini ifade etmişlerdir. Hibrit sistemin her mevsim uygulanabilir ve hem yaz hem de kış mevsimi için yaklaşık eşit verimlilikle çalıştığı sonucuna ulaşmışlardır [57]. Kwan ve ark. hem sıcaklık kontrolü hem de aktif kontrol gerekli olmadığında enerji hasadı olasılığını sağlamak için termoelektrik cihazın iki yönlü özelliklerinden yararlanan bir yakıt hücresi için termoelektrik jeneratör-termoelektrik soğutucu (TEG-TEC) kombinasyonlu bir termal yönetim sistemi önermektedir. Bu sistemin TEG modunda MPPT için P&O algoritmasını kullanmışlardır. TEC modunda geri kazanılan elektrik gücü TEG modunda geri kazanılan elektrik gücünden çok daha düşüktür. Bunun için, geri kazanılan elektrik enerjisini maksimize etmek için MPPT yöntemlerinin benimsendiği sistemlerin daha verimli olduğunu söylemişlerdir [58]. Torrecilla ve ark. bir TEG'in bir yük

değişikliğine geçici elektriksel ve termal tepkisinin bir analizini sunmuşlardır. Sabit ısı akışı koşulları altında çalışan bir TEG'in performansını daha fazla göstermesi için P&O algoritması tarafından kontrol edilen bir DC-DC dönüştürücü kullanmışlardır. P&O algoritmasının sabit ısı akışı koşullarında TEG'i MPP'ye çok yakın bir yerde çalıştırdığını göstermişlerdir ve salınımları ve izleme hatalarını en aza indirmeye yardımcı olduğunu kanıtlamışlardır [59]. Muralidhar ve ark. hibrit elektrikli araçlarda TEG'lerin öngörülen bir sürüş döngüsüne göre kullanılmasının faydalarını değerlendirmişlerdir. Egzoz sistemi üzerine yerleştirilen TEG'ler ile batarya şarj ederken, TEG tarafından üretilen gerilimi düzenlemek ve MPP için alçaltan-yükselten dönüştürücü ile birlikte P&O algoritmasını kullanmışlardır. Bu sistem ile termal verimlilik, yakıt tasarrufu ve buna bağlı olarak  $CO_2$  emisyonunda azalma gözlemlenmiştir [60]. Risseh ve ark. araçların egzoz sisteminden atık ısıya dönüşen enerjiyi geri kazanmak için TEG kullanmışlardır. P&O algoritması ile %98 verimliliğe sahip düşürücü dönüştürücü kullanarak deneyler yapmışlardır. TEG'lerden geri kazanılan ve aracın elektrik sistemine aktarılan elektrik enerjisi 1 kW'a ulaşmış ve aracın içten yanmalı motorunu rahatlatmıştır [61]. Zhang ve ark. PV-TE hibrit sisteminin elektriksel bağlantı yöntemlerini incelemek için bir model geliştirilmiştir. Geliştirdikleri bu modelde yükselten dönüştürücü ve MPPT yöntemi için P&O algoritmasını kullanmışlardır [62]. Bijukumar ve ark. şebeke bağlantılı PV (GCPV) invertörlerin güç kaynağı olarak TEG'ler ile uyarlanabilirliği üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmada doğrusal I-V karakteristikleri nedeniyle, sırasıyla inverterin nominal DC giriş gerilimine ve akımına eşit açık devre gerilimi ve kısa devre akımına sahip bir TEG için, çalışma noktasının güvenli çalışma alanı içinde olduğu bulunmuştur. Ancak, bu durum MPP'yi garanti etmediğinden, sistemde MPPT yöntemi olarak P&O algoritmasını kullanmışlardır [63].

Geleneksel MPPT algoritmaları arasında INC algoritması da bulunmaktadır. Bu algoritma, P&O algoritmasından sonra TEG'lerin performansını artırmak için geliştirilmiştir. TEG sistemleri için geleneksel INC algoritması ve bu algoritmanın geliştirilmiş versiyonları literatürde sıkça kullanılmaktadır.

Twaha ve ark. TEG'lerde kullanılan DC-DC dönüştürücünün performansını INC algoritması ile analiz etmiş ve P&O algoritması temelli MPPT yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, P&O algoritmasının daha iyi performans

gösterdiğini gözlemlemişlerdir [11]. Thankakan ve ark. 1,25 MW'lık bir rüzgâr türbininin çalışması sırasında, rüzgar jeneratörünün stator sargılarında oluşan ısıyı kullanan bir TEG sistemi sunmuşlardır. TEG sisteminin ürettiği güç, dalgalı rüzgâr hızı nedeniyle istikrarsızdır. Bu nedenle, MPP'yi sürekli olarak izlemek için INC algoritmasını kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre, daha istikrarlı bir çıkış gücü elde etmişler ve %91,35 verimlilik sağlamışlardır [64]. Literatürde INC algoritmasının adım boyutunu otomatik ayarlayan versiyonları [65], geliştirilmiş INC MPPT algoritması [66] gibi değiştirilmiş INC algoritması türevleri de bulunmaktadır.

Geleneksel MPPT yöntemleri arasında bulunan diğer algoritmalar ise kesirli açık devre gerilimi (Fractional Open Circuit Voltage - FOCV) [67] ve kesirli kısa devre akımı (Fractional Short Circuit Current - FSCC) [68] algoritmalarıdır. Montecucco ve ark. FOCV algoritması tabanlı, açık devre gerilimini ölçmek için pahalı sensörler gerektirmeyen ve düşük maliyetli mikrodenetleyiciler ile kullanılabilen yenilikçi bir yol sunmuşlardır. TEG'lerin doğrusal elektriksel karakteristiği için en uygun yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Önerdikleri bu yöntemin MPP'yi doğru bir şekilde izlediğini ve %99,85 izleme verimliliği ile bulunduğunu deneysel olarak kanıtlamışlardır [13]. Wu ve ark. verimli enerji depolama ve kullanımı elde etmek amacıyla TEG'ler için bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. Yüksek enerji taleplerini karşılamak için FOCV tabanlı MPPT algoritması uygulamışlardır [69]. Yoon ve ark. yüksek çıkış gerilime sahip TEG sistemleri için tasarlanmış basit bir termal enerji toplama devresi sunmuşlardır. Bu devre aktif/uyku modunda çalışır ve MPPT yöntemi olarak FOCV tekniğini kullanır. Tasarladıkları devre ile tepe güç verimliliğini %97,5 olarak ölçmüşler ve MPPT doğruluğunun %99'dan fazla olduğunu söylemişlerdir [70]. Deasy ve ark. TEG-fırın sistemi tasarımı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Gelişmekte olan ülkelerde elektriğe düzenli erişimi olmayan kullanıcılar için biyokütle pişirme fırını ile kullanılabilen bir elektrik jeneratörü geliştirmişlerdir. Tasarladıkları sistemde MPPT yöntemi olarak FOCV tekniğini kullanmışlardır [71]. Leoni ve ark. doğrudan insan vücudundan atılan ısıdan elektrik enerjisi elde eden giyilebilir duyuşal eldiven sistemi için yenilikçi bir enerji toplama sistemi sunmuşlardır. Çalışmada kullandıkları DC-DC dönüştürücü MPP'yi ayarlamak için FOCV algoritmasını kullanmaktadır [72]. Xu ve ark. iç direnç uyarlamalı (IRA) MPPT devresi tasarlamışlardır. IRA-MPPT devresindeki geleneksel MPPT devresinin yapısına dahili bir direnç uyarlamalı gecikme oluşturma devresi ve bir gecikme sentez

devresi eklenmesi sayesinde, direnç aralığı oldukça geniş olsa bile daha yüksek güç dönüştürme verimleri elde edilmiştir. Geleneksel MPPT devrelerine göre %23,23 daha verimli olan IRA MPPT devresinde MPP'yi izlemek için FOCV algoritması kullanılmıştır [73].

TEG'lerden maksimum gücü elde etmek amacıyla geleneksel algoritmaların kullanıldığı MPPT yöntemleri ani değişen çevre koşullarına uyum sağlayamadıkları, global maksimumu bulmada zorlandıkları ve lokal maksimuma takıldıkları pek çok çalışmada vurgulanmıştır. Geleneksel yöntemlerin dezavantajlarını aşmak için bu algoritmaların geliştirilmiş ya da modifiye edilmiş türevleri önerilmiştir. Bu yöntemler ani çevre koşulları değişiminde izleme hızı, izleme doğruluğu gibi iyileştirmeler sağlasalar da LMPP'ye takılma sorununa çözüm olamamışlardır. **Tablo 1.1**'de geleneksel algoritmaların avantajları ve dezavantajları kendi aralarında kıyaslandığı bir özet tablo sunulmuştur. Ayrıca tabloda yöntemler için gerekli sensör bilgileri de yer almaktadır.

**Tablo1.1.** TEG'lere uygulanmış geleneksel MPPT algoritmalarının özeti

| Referans | Algoritma                 | Sensör | Avantaj                                                                                                                                              | Dezavantaj                                                                                                                               |
|----------|---------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [14]     | P&O                       | V      | Basitlik                                                                                                                                             | 1. NTD altında bir LMPP'ye takılabilme<br>2. MPP etrafında salınım<br>3. Düşük hız                                                       |
| [66]     | INC                       | V, I   | 1. NTD altında P&O'dan daha iyi<br>2. MPP etrafında salınım yok<br>3. Adım boyutunu ayarlayabilir<br>4. MPP'yi daha yüksek doğrulukla takip edebilir | 1. NTD altında bir LMPP'ye takılabilme<br>2. Daha karmaşık<br>3. Hızlı sıcaklık değişimi altında salınım<br>4. Uygulanması zor ve pahalı |
| [66]     | Değişken adım boyutlu INC | V, I   | 1. INC'e göre daha hızlı<br>2. INC'den farkı, adım boyutu hesaplamasıdır                                                                             | 1. NTD altında bir LMPP'ye takılabilme                                                                                                   |
| [66]     | Değiştirilmiş INC         | V, I   | Hızlı sıcaklık değişimi altında salınımı ortadan kaldırır                                                                                            | 1. NTD altında bir LMPP'ye takılabilme                                                                                                   |
| [68]     | FOCV<br>FSCC              | V<br>I | Basit                                                                                                                                                | 1. Gerçek MPP'yi izleyememe<br>2. Ölçüm için periyodik olarak bağlantı kesilmesi                                                         |

### **1.3. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Geliştirilmiş ve Değiştirilmiş Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar**

Gün geçtikçe ilerleyen teknoloji ve doğal kaynakların azalması nedeniyle enerji verimliliği konusu gündeme gelmiştir. Geleneksel MPPT algoritmaları her ne kadar basit ve kullanışlı olsa da MPPT sırasında oluşan güç kaybını en aza indirme konusu önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu amaçla, MPPT algoritmalarının verimliliğini arttırmak için geleneksel MPPT algoritmaları üzerinde çalışmalar literatürde yerini almıştır ve almaya devam etmektedir. TEG'lerin verimleri düşük olduğundan, hem TEG'leri en verimli şekilde kullanmak hem de TEG'lerden elde edilen gücü en yüksek seviyeye çıkarmak için TEG'ler için uyarlanan MPPT algoritmaları geliştirilerek ya da değiştirilerek kullanılmaya başlanmıştır.

P&O basit ve güvenilir ve uygulaması kolaydır. Bununla birlikte, algoritma, terminal gerilimini sürekli değiştirerek MPP'yi izler. Bu durum kolayca çıkış gücü salınımına neden olabilir. Ayrıca, çevresel koşulların değişmesiyle, yöntem, sisteminde güç kaybına neden olabilir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, bu yöntemin birçok değiştirilmiş versiyonu önerilmiştir. Dalala ve ark. TEG'ler için açık devre gerilimi algılama ve kısa devre akımı tahmini yöntemlerinin uygulamasına dayalı yeni bir MPPT algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritmada iki işlem modu kullanılır: ince ayar için P&O yöntemi ve MPP'yi kabaca izlemek için geçici mod tekniğidir. Bu MPPT algoritması, MPP'ye ince ayar yapmak için P&O modunu ve yapı boyunca sıcaklık gradyanında ani bir değişiklik olduğunda çalışma noktasının yeni MPP'ye doğrudan taşınması için geçici modu kullanır. Böylece TEG minimum adımda MPP'ye ulaşır. [74]. Nakayama ve ark. daha az enerji sarfiyatı gerçekleştiren basit bir MPPT algoritması önermişlerdir. Bu yöntem ile optimum görev döngüsü giriş gerilimi ölçülerek hesaplanır. Dolayısıyla TEG'in açık devre gerilimini ölçmeden MPP izlenir. Böylece gerilimin sık sık ölçülmesine ve karşılaştırılmasına gerek yoktur. Bu sayede geleneksel MPPT yöntemlerine göre, bu yöntem ile mikrodenetleyici 0,67 mW daha az enerji tüketerek MPP'yi yaklaşık olarak izleyebilmiştir. Ancak bu teknik sabit yük altında çalışan sistemler için kullanışlıdır. [75]. Bond ve ark. daha az sensör kullanarak MPP'ye ulaşmak için akım sensörsüz güç tahmini ile görev döngüsü tabanlı bir MPPT yöntemi önermişlerdir. Geleneksel MPPT yöntemlerinin aksine, bu yöntem, akım veya

açık devre gerilimi ölçümü için kaynak ve yük bağlantısının kesilmesini gerektirmez ve bu dezavantajı ortadan kaldırır. MPPT kontrolörü, histerezis gerilim regülatörü ve P&O tabanlı referans gerilim jeneratöründen oluşur. Histerezis gerilim regülatörünün anahtarlama bilgisine dayalı olarak çalışır. Histerezis gerilim regülatörü, ortamdaki sıcaklık koşulu için MPP'nin yakalanacağı eğriyi bulur ve P&O algoritması MPP'yi aramaya devam eder. Güç üretimindeki değişiklik gerçek güç ölçümü olmadan tespit edildiği için, MPP'ye ulaşıldığında P&O tekniğindeki gibi güç salınımı olmaz. Bu yöntem basit, ucuz, düşük güç tüketimine sahip ve P&O'nun MPP'deki güç salınımı dezavantajını ortadan kaldırır [76]. Paraskevas ve ark. TEG'ler için uygulama açısından basit bir MPPT yöntemi önermişlerdir. TEG'ler için geçmişte önerilen MPPT yöntemleriyle karşılaştırmışlar ve önerdikleri yöntemin operasyonel ve tasarım basitliği avantajına sahip olduğunu söylemişlerdir. Bu MPPT yöntemi TEG güç kaynağının P-V eğrilerinin MPP'lerine yakın, önceden programlanmış bir çalışma noktası lokusunda çalışır. Operasyonel bir yöntemdir ve basit bir tasarımı vardır. Yüksek geliştirme maliyeti olan sinyal işleme birimlerine ve özel entegrelere ihtiyaç duymaz. Düşük güç tüketimi olan kullanıma hazır mikroelektronik bileşenleri kullanarak işlem yapar. Bu yöntem ile yapılan deneylerde, 1-17 mW aralığındaki TEG kaynağının MPP gücünden %1,87 sapma gözlemlenmiştir. MPP izleme verimliliği açısından geleneksel yöntemlerle kıyaslanabilir bir yöntemdir. Bu yöntemin bir dezavantajı olarak, 1-100°C aralığındaki sıcaklık farklarında TEG MPP'leri ile gerçek çalışma noktaları arasında %1,1'den az sapma uyumsuzluk vardır [77]. Fathabadi ve ark. PV modüllerin atık ısılarından enerji üretmek için kullandıkları bir TEG sisteminin MPP'sini izlemek için bir geliştirilmiş INC MPPT yöntemi tasarlamışlardır. Güç eğimlerini bulmak için gerilim sapması ve akım sapması kullanılan bu yöntem, çevrimiçi geometrik bir yöntemdir. Bu çalışmalar bir PV modülünün sıcaklık artışından kaynaklanan güç azalmasını telafi eder ve atık ısıdan kazanılan enerjinin maksimum olmasını sağlar [78]. Liu ve ark. P&O ve FOCV algoritmalarının avantajlarını bir araya getirerek TEG'ler için hibrit bir MPPT yöntemi önermişlerdir. Bu MPPT yöntemi P&O algoritmasının basitliğini ve FOCV algoritmasının hızlı izleme yeteneğini birleştirir. Bu yöntemin izleme hızı, ek devre gerektirmemesi ve geçici güç kaybı olmaması gibi avantajları vardır. Deneysel sonuçlar izleme hızının 60°C sıcaklık farkında %42,9 ve 180°C sıcaklık farkında %86,2 arttığını göstermiştir. Enerji kaybı ise 60°C sıcaklık farkında %24 ve 180°C sıcaklık farkında %87 oranında iyileştirilmiştir. Tüm koşullarda bu MPPT yönteminin izleme doğruluğu %99,9'un

üzerindedir [79]. Benzer şekilde Li ve ark. P&O ve FOCV tekniğini birleştiren bir MPPT yöntemi sunmuşlardır. Normal durumlarda, MPPT denetleyicisi, hassas ve hızlı izleme elde etmek için P&O algoritmasında çalışır. Dış koşullar keskin bir şekilde değiştiğinde, denetleyici FOCV algoritması moduna geçer. P&O algoritmasının doğasında bulunan salınımlardan kaçınmak için anahtarlama maksimum görev döngüsü kullanılır. Bu hibrit MPPT yöntemi, hem izleme hassasiyetini hem de sistem kararlılığını dikkate alır ve iyi bir dönüşüm verimliliği sağlar. Bu yöntemin en yüksek izleme verimliliği %99,1 olarak ölçülmüştür [80]. Quan ve ark. mevcut MPPT yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını dikkate alarak TEG'lerin çıkış özelliklerine uygun hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem P&O algoritmasını, ikinci dereceden interpolasyon ve sabit gerilim izleme algoritmalarını birleştirerek MPPT yapar. Birleştirilen algoritmaların avantajlarından tam olarak yararlanır ve dezavantajlarından kaçınır. Bu yöntemde öncelikle P&O algoritmaları ve ikinci dereceden interpolasyon yöntemi ile MPP aranır. Ardından TEG'i sabit gerilim takibi ile MPP'de çalışmaya zorlar. Simülasyon sonuçları, TEG'den alınan maksimum çıkış gücü P&O algoritması ve ikinci dereceden interpolasyon algoritmasına göre sırasıyla yaklaşık %3 ve %3,7 artmıştır. İzleme süresi ise 1,4 saniyedir. Bu süre P&O algoritması ve ikinci dereceden interpolasyon algoritmasına göre izleme süresinin yarı yarıya azaldığını göstermektedir [81]. Liu ve ark. bir TEG ve radyofrekans (RF) enerji kaynağını birlikte kullanarak hibrit bir enerji toplama sistemi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarında yeni bir dönüştürücü tasarımıyla birlikte güç kaybını ortadan kaldırmak ve ortalama verimliliği yükseltmek için bir geliştirilmiş FOCV MPPT yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem için her 16 saniyede bir 26 ms daha kısa örnekleme süresi ile birlikte, örnekleme kondansatörünü yenilemek için gereken uzun şarj kuyruğunu azaltarak sistemde %82,2'lik bir ortalama verimlilik artışı sağlamışlardır[82].

TEG sistemlerinde sıcaklık değişiminin olmadığı durumda, MPP için yük gerilimi açık devre geriliminin yarısına eşit olmalıdır. Gerçekte, TEG'den akım çekildikten sonra, sıcaklık farkı üssel olarak kararlı durum değerine düşer. Tipik bir termoelektrik sistemin uzun termal zaman sabiti nedeniyle, geçişin en az %90'ının tamamlanması birkaç saniye alabilir [83]. Torrecilla ve ark. bu durumu göz önünde bulundurarak, MPP'yi anlık açık devre geriliminin %50 ila %60'ı arasında arayan algoritma geliştirmişlerdir [84]. P&O algoritmasına dayanan bu yöntem örnekleme

hızında farklılıklar gösterir. Giriş ısı akışında değişikliğin olduğu durumlar için optimize edilmiştir. İzleme hızını arttıran uyarlanabilir bir adım uygular. TEG sabit ısı akışı altında çalışırken, bu algoritma P&O ve FOCV yöntemlerini sırasıyla %1,14 ve %2,08 geride bırakmıştır.

#### **1.4. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Analitik Çözüme Dayalı Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar**

Son yıllarda ilerleyen teknoloji ile birlikte işlem hızlarının artması, hesaplama yükü geleneksel MPPT algoritmalarından fazla olan optimizasyon ve/veya tahmine dayalı MPPT yöntemlerinin daha kolay uygulanmasını mümkün kılmıştır. Bu süreçte optimizasyon algoritmaları MPPT yöntemi olarak literatürde yerini almıştır. Geleneksel MPPT algoritmalarının yerine kullanılabilen bu algoritmaların, geleneksel algoritmaların performansını arttırmak amacıyla geleneksel MPPT algoritmalarıyla hibrit şekilde de kullanıldığı görülmektedir. Thankakan ve ark. rüzgar jeneratörü stator sargıları yoluyla dağıtılan atık ısıdan enerji elde etmek için TEG kullandıkları çalışmalarında, değişken rüzgar hızına bağlı değişen sıcaklık koşullarında TEG'den maksimum gücü almak için bulanık mantık (FL) tabanlı MPPT yöntemi kullanmışlardır. Bu yöntem diğer yöntemlerin aksine, sistemin tam modeline ihtiyaç duymaz. Sağlam ve uyarlanabilir bir yöntemdir. Yapılan çalışmada MPPT yöntemi, değişken sıcaklıklar altında %95,18 ile %99,24 arasında MPP doğruluğu göstermiştir [85]. Bir diğer çalışmalarında ise aynı sistem için uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tabanlı MPPT yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem hem bulanık mantık kontrolü hem de sinir ağının faydalarına sahip akıllı bir hesaplama yöntemidir. Yapay sinir ağı öğrenme yeteneğinin ve bulanık bir sistemin akıl yürütme yeteneğinin avantajını kullanır. Ayrıca bulanık çıkarım sistemi sinir ağının öğrenme algoritması kullanılarak eğitilir. Doğrusal olmayan sistemler için çözüm sağlayabilen etkili bir yöntemdir. ANFIS tabanlı MPPT denetleyicinin izleme doğruluğu, FL tabanlı MPPT denetleyiciden daha yüksektir. Değişken rüzgâr hızına bağlı değişen sıcaklık koşullarında neredeyse %99 izleme doğruluğuna sahiptir [86]. Shittu ve ark. geleneksel P&O algoritmasında karşılaşılan, yaygın olarak bilinen kararlı hal salınımlarını ortadan kaldırmak için kilitleme mekanizması (LOM) algoritmasını MPPT yöntemi olarak kullanmışlardır [87]. Kwan ve ark. bu algoritmayı geliştirerek P&O tabanlı LOM (P&O-LOM) yöntemini sunmuşlardır. LOM algoritmasının amacı

MPP konumuna bağılı olarak kontrol parametresinin pertürbasyon boyutunu uygun şekilde ölçeklendirmektedir. Geleneksel P&O algoritmasına göre görev döngüsü yanıtı büyük salınımlar içermeyen kararlı hal yanıtı elde eder. P&O-LOM yönteminin dezavantajı bazı parametrelerin keyfi seçilmesidir. Parametrelerde daha ayrıntılı bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilerek teknik geliştirilebilir [88]. Kwan ve ark. P&O-LOM yöntemini tepe tırmanma (HC) tabanlı LOM (HC-LOM) [89] yöntemine alternatif olarak geliştirmişlerdir. HC-LOM yöntemi görev döngüsü pertürbasyonunun mevcut ve önceki işaretini kontrol eder. İşaretlerde fark varsa salınım olduğu anlaşılır ve görev döngüsü sabit bir faktörle küçültülür. Bu yöntem ile kararlı durum salınımları ihmal edilebilir derecede azalır. P&O-LOM algoritmasının HC-LOM algoritmasından farkı kilit mekanizması görev döngüsü pertürbasyonuna uygulamak yerine P&O algoritmasının giriş referans gerilimine uygulamasıdır. TEG sistemlerinde MPP'yi izlemek için kullanılan MPPT yöntemlerinde görev döngüsü kullanılır. Görev döngüsü pertürbasyonunun yönü MPP'yi izlemek için önemlidir ve geleneksel HC veya INC algoritmaları ile rahatlıkla bulunabilir. Bu algoritmalar tam olarak aynı sonuçları verir. Doğası gereği ölçüm gürültüleri içeren HC tekniklerinin yerine, LOM yönteminde görev döngüsü pertürbasyonunun yönünü belirlemek için INC tekniğini kullanır. MPP bulunduktan sonra LOM, MPP ile ilgili istenmeyen kararlı hal salınımlarını kararlı hale getirmek ve ortadan kaldırmak için kullanılır. Mevcut ve önceki zaman adımlarındaki görev döngüsü pertürbasyonunun yönünü karşılaştırarak salınım tespit edilir. Salınımların tespit edilmesine yönelik bu yöntem, üç nokta ağırlıklandırma yöntemine benzemektedir ve HC algoritmalarına göre daha iyi sonuç verir [90].

P&O algoritması gibi iki nokta ağırlıklandırma yöntemleri basitliği nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerde karar vermedeki hatalar kaçınılmazdır. Bu kusuru ortadan kaldırmak için üç nokta ağırlıklandırma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler iki nokta ağırlıklandırma yöntemlerine kıyasla ek bir noktaya sahip olduğundan karar aşamasındaki hatalar nispeten azaltılabilir. Bunun nedeni iki ağırlıklandırma değerinin toplamı sıfır ise temel noktanın değişmeyeceğidir. Hwu ve ark. LED'ler ile yaptıkları çalışmada üç nokta ağırlıklandırma MPPT yöntemi kullanarak LED'lerin yanıp sönmeye eğilimlerini ortadan kaldırmışlardır. Yahya ve ark. TEG sistemlerinde MPP'yi bulmak için düşük maliyetli ve karmaşık olmayan güç farklılıkları (PD) algoritmasını önermişlerdir. PD algoritması kısa devre akımını veya açık devre gerilimini ölçerken TEG ile yük arasında bağlantı kopmasına gerek yoktur.

Dolayısıyla herhangi bir ekstra devre gerektirmez. Sistem bozulmalarını azaltmak ve güç eğrisini tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılır. PD algoritması, temel olarak karakteristik eğrinin ölçülen güç değerlerini karşılaştırır ve en büyük değeri seçer. STM32f429 mikro denetleyicisi kullanılarak yapılan deneylerde kararlı hal durumunda MPP izleme verimliliği %97,7'den yüksektir [91]. Samman ve ark. TEG'lerde MPP'yi izlemek için P&O metodolojisine dayalı beş tür MPPT yöntemi önermişlerdir. Hesaplama yükü düşük ve karmaşık olmayan bu yöntemler değişken adım boyutu ile yakınsama hızını arttırmaktadır. Bu yöntemlerde bir elektronik kontrol ünitesi (ECU) SEPIC konvertörün gerilimini ve akımını gözlemler ve çıkış gücünü hesaplar. ECU her P&O adımında güç değerlerini bir önceki adımla kıyaslar ve görev döngüsünü kaydeder. İterasyon adımları ile sonuçta MPP'ye ulaşır. Azaltılmış pencere boyutu tarama (DWS) tabanlı MPPT algoritmalarının uygulaması basittir. Her iterasyonda P&O taramasının alanı veya penceresi azaltılır. Böylece adım boyutu her taramada dinamik olarak değişir. Kolay türetilen bir algoritma olduğu için dört tür DWS-tabanlı MPPT algoritması önerilmiştir. Ayrıca kıyaslama yapmak için ilk tarama ile tepe noktası basamaklama (PBIS) MPPT algoritması da önerilmiştir. PBIS, MPP'yi yakalamak için bir sonraki adımda kullanılacak en yüksek üç basamaklama noktasını bulmak için başlangıçta güç noktalarını tarar. Yakalama mekanizması, en yüksek basamaklama noktalarının alanını adım adım yarıya indirerek yapılır. Farklı yük koşullarında yapılan deney sonuçlarına göre önerilen DWS tabanlı MPPT teknikleri MPP'ye yaklaşık 22 ila 29 P&O-adımında ulaşabilir. PBIS MPPT tekniği ise 19 P&O-adımında MPP'ye ulaşmaktadır [92]. Rodriguez ve ark. TEG'ler için MPP'yi hızlı ve doğru bir şekilde izlemesinde yüksek frekanslı enjeksiyon (HFI) yöntemini önermişler ve üç farklı deney yoluyla literatürde en yaygın kullanılan MPPT yöntemi olan P&O algoritması ile karşılaştırarak doğrulamışlardır. HFI yöntemi, TEG'in çalışmasına yüksek frekanslı bir sinyal ekleyerek çalışır. Bu da doğrudan TEG'in MPP'sine ulaşmak için kontrol edilebilen bir sapma ile sonuçlanır. Bu yöntemin bir avantajı, ek sensörlere ihtiyaç duymadan algoritmanın mevcut MPPT donanımına uygulanabilmesidir. Bu yöntemin yanıt süresi 2,4 ms'dir, yani literatürdeki tekniklerden 3 kat daha hızlıdır. Deneylerde P&O algoritması ile %90 olarak elde edilen izleme verimliliği, HFI tekniği ile kararlı durumda %99,73 olarak görülmüştür [93]. Fang ve ark. otomotivde kullanılan TEG'lerdeki MPP izleme doğruluğunu ve hızını iyileştirmek için toplamlı ikili bölütlenme ve eğim (ADG) MPPT yöntemini geliştirmişlerdir. İlk aşamada, ikili bölütleme algoritması, MPP'nin yaklaşık bölgesini

bulmak için hızlı bir arama yöntemi olarak kullanılır. Eğitim algoritması daha sonra MPP'nin hızlı ve doğru bir şekilde izlenmesi için uygulanır. Deneysel sonuçlar ADG yönteminin P&O algoritmasından daha üstün olduğunu göstermiştir [94]. Bijukumar ve ark. periyodik güç kesintisi gerektirmeyen doğrusal ekstrapolasyon (LE) tabanlı MPPT algoritması önermişlerdir. Bu yöntem, TEG'in I-V karakteristiğinin doğrusal olması sebebiyle, doğrusal ekstrapolasyon ilkesine dayanır. Bu yöntemin temel prensibi, MPP'nin koordinatlarının iki ölçülebilir çalışma noktasının ekstrapolasyonuna dayalı olarak hesaplandığı doğrusal ekstrapolasyondur. Yani, yeni MPP noktasını hesaplamak için iki rastgele çalışma noktasının I-V koordinatlarını kullanır. LE algoritması MPP'ye ulaşmak için sabit bir üç örnekleme periyodu süresi alır. Bu yöntem, deneme yanılma kontrolü kullanmadan, ekstrapolasyon yoluyla açık devre gerilimi ve kısa devre akımının hesaplanması ve elde edilen hesaplama sonuçlarını kullanarak görev döngüsünün hesaplanması olarak iki hesaplama sürecini içerir. Görev döngüsünü hesaplamak için ise TEG'in doğrusal I-V ilişkisi ve dönüştürücünün empedans eşleştirme özelliği kullanılır. Avantajlarından biri, açık devre geriliminin ölçüldüğü süre boyunca gücü kesmeye ihtiyaç duymamasıdır. Bu nedenle LE MPPT yöntemi kararlı hal salınımlarından muaftır ve güç kaybı önemli ölçüde azalır. Ayrıca, LE MPPT yöntemi, açık devre gerilimini bulmak için TEG terminallerini açıp kapatmaya yarayan ek anahtarlar gerektirmez ve düşük maliyetli bir mikro denetleyici kullanılarak kolayca uygulanabilir. Ek olarak sıcaklık ve yük koşullarındaki değişikliklerden etkilenmez. Test sonuçları, P&O algoritması ile harcanan sürenin %15'inden az sürede sonuçlar verdiğini göstermektedir [95]

TEG sistemlerinde MPPT için kullanılan bir başka yöntem de ekstremum arayışı denetleyicidir (ESC). ESC, kontrol edilen nesnenin giriş ve çıkışını kendi maksimum ve minimum noktalarına yönlendirebilen ve koruyabilen uyarlamalı bir kontrol yöntemidir. Maksimum ve minimum var olduğu sürece, herhangi bir giriş-çıkış bilgisi olmadan ESC çalışacaktır ki bu en büyük avantajıdır. Bu nedende ESC model-bağımsız bir kontrol şemasıdır [96]. ESC, lokal minimumu veya lokal maksimumu olan sistemlerdeki doğrusal olmama durumları için uygundur. Bu denetleyici, TEG'in çıkış gücünü MPP'de tutan bir ayar noktası bulur [97]. Twaha ve ark. yaptıkları çalışmada ESC yönteminin P&O algoritmasına göre dört kat daha hızlı olduğu bildirilmişlerdir. Daha küçük MPPT devresine sahip olan ESC yöntemi P&O algoritmasından daha iyi performans gösterir [98].

### **1.5. Termoelektrik Jeneratör Sistemlerinde Kullanılan Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri ile İlgili Çalışmalar**

Güç sistemlerindeki birçok alan, bir veya daha fazla doğrusal olmayan optimizasyon probleminin çözülmesini gerektirir. Analitik yöntemler, yavaş yakınsama ve boyutluluk sorunundan muzdarip olabilirken, sezgisel tabanlı algoritmalar etkili bir alternatif olabilir. Geleneksel MPPT algoritmalarının düzgün olmayan sıcaklık dağılımı (NTD) koşullarında lokal maksimum güç noktasına (LMPP) takılması, araştırmacıları GMPP bulma kabiliyetleri yüksek olan metasezgisel algoritmalarla yönlendirmiştir. Gelişen teknoloji ile paralel olarak işlem hızları artan mikroişlemciler sayesinde son yıllarda geleneksel ve hesaplama tabanlı algoritmaların yanı sıra, rastgele aramalar ile sonuca ulaşan ve daha ağır işlem yüküne sahip metasezgisel optimizasyon algoritmaları da TEG sistemlerinde MPPT yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Sürü zekâ ailesinin bir parçası olan parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini etkili bir şekilde çözdüğü bilinmektedir ve değişik varyasyonları mevcuttur [99]. Thankakan ve ark. NTD koşullarında TEG sistemi üzerinde yaptıkları çalışmada, P&O algoritmasının LMPP'ye takıldığı gözlemlenmiş ve GMPP'yi izlemek için bu sorunu PSO tabanlı MPPT yöntemi kullanılarak aşmışlardır [100]. Wang ve ark. PSO algoritmasının bir varyasyonu olan mutasyonlu parçacık sürüsü optimizasyonu (M-PSO) algoritması kullanarak yeni bir MPPT yöntemi geliştirmişlerdir [101]. Rastgele seçimlerin geliştirildiği bu yöntem GMPP'ye daha kolay yakınsamayı sağlamıştır.

Jing ve ark. NTD koşullarında ortaya çıkan birden fazla LMPP'nin üstesinden gelmek ve GMPP'yi bulmak için gri kurt optimizasyonu (GWO) tabanlı MPPT yöntemini kullanmışlardır. P&O ve PSO algoritmalarının kullanıldığı yöntemler ile karşılaştırıldığında, GWO, düşük kaliteli LMPP'lerden kaçabilmiş ve daha küçük güç dalgalanmaları ile NTD koşullarında GMPP'ye hızla yaklaşabilmiştir. NTD koşullarında GWO MPPT yöntemi P&O'ya göre %384,27 ve PSO'ya göre %105,31 daha fazla enerji açığa çıkarmıştır [102].

NTD koşulu altında TEG’lerde birden fazla MPP görünür. Yang ve ark. bu durumda GMPP’yi daha etkili bir şekilde aramak için uyarlanabilir pusulalı arama (ACS) algoritmasını MPPT yöntemi olarak kullanmışlardır [103]. ACS algoritmasının orijinal pusulalı arama [104] algoritmasından farkı, uyarlanabilir bir dizi keşif yönü ile pusulalı arama algoritmasının birleştirilerek global arama yeteneğinin geliştirilmesidir. Geleneksel P&O algoritması ile karşılaştırıldığında, ACS, kalıcı durum hali güç salınımları olmadan LMPP sıkışıp kalmayı etkili bir biçimde önleyebilir. Böylece enerji verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. ACS tekniği GMPP’ye ulaşmak için tek etken kullandığı için metasezgisel algoritmalarından daha hızlı ve daha yüksek yakınsama kararlılığı ile yüksek kaliteli bir GMPP elde edebilir. Simülasyon sonuçlarına göre NTD koşullarında ACS, rastgele sıcaklıkta P&O, PSO [105], GWO [106] ve pusulalı arama algoritmalarına göre sırasıyla %513,89, %151,95, %143,70 ve %113,15 daha fazla enerji üretmiştir. Bunun yanında, P&O haricinde, diğer yöntemlere göre çok küçük güç dalgalanmalarına neden olabilmektedir.

Yang ve ark. NTD koşulu altında TEG sistemlerinde karşılaşılan birden çok LMPP’lerden dolayı GMPP’ye daha hızlı yaklaşmak için hızlı atom arama optimizasyonu (FASO) algoritmasını kullanarak yeni bir yöntem tasarlamışlardır [107]. Yüksek kaliteli bir çözüm için yakınsamayı hızlandırmak amacıyla orijinal atom arama optimizasyonu (ASO) [108] algoritmasının Öklid mesafe oranı, dinamik optimizasyon sonuçlarının yanı sıra her bir atom için komşuların sayısına göre uyarlamalı olarak güncelleme yapmak için kullanılır. P&O algoritması gibi tek LMPP tabanlı yöntemlerin aksine, FASO güçlü bir global arama özelliğine sahiptir. Bu özelliği NTD koşullarında TEG sistemi için LMPP’ye takılmaktan kaçınabilir. FASO anlık optimizasyon sonuçlarına göre atomlar arasındaki itme ve çekim yoğunluklarını değiştirerek lokal arama ve global arama arasında dinamik bir denge sağlayabilir. Bu yönüyle NTD koşullarında MPPT için metasezgisel algoritmalarından daha yüksek bir olasılık ve daha hızlı, daha yüksek kaliteli bir optimal çözüme yaklaşabilir. Simülasyon sonuçlarına göre NTD koşullarında FASO, rastgele sıcaklıkta P&O, PSO, GWO ve ASO algoritmalarına göre sırasıyla %451,49, %133,50, %126,25 ve %101,64 daha fazla enerji üretmiştir. Ek olarak TEG sistemi için hafif bir güç dalgalanmasına neden olur.

Zhang ve ark. NTD koşulu altında TEG sistemlerinde karşılaşılan birden çok LMPP'lerden dolayı GMPP'ye daha hızlı yaklaşmak için dinamik vekil model tabanlı optimizasyon (DSMO) algoritmasını kullanarak MPPT yöntemi tasarlamışlardır. P&O algoritması gibi tek LMPP tabanlı yöntemlerin aksine, DSMO LMPP'leri ve GMPP'leri ayırt edebilir. Rastgele bir arama yerine verimli bir rehberli arama uygulayarak güç dalgalanmalarını önemli ölçüde azaltabilir. Simülasyon sonuçlarına göre NTD koşullarında DSMO, rastgele sıcaklıkta P&O, PSO ve GWO algoritmalarına göre sırasıyla %393,10, %116,24 ve %109,93 daha fazla enerji üretmiştir [109].

Zhang ve ark. TEG sistemlerinde NTD koşullarında MPPT için veri odaklı açgözlü arama (GSDD) algoritmasını kullanarak yeni bir MPPT yöntemi önermişlerdir. Yüksek kaliteli bir GMPP'yi hızla arayan bir yöntemdir. Hem enerji kaybı hem de güç dalgalanması bu yöntem ile azaltılabilir. GSDD tabanlı MPPT esas olarak sinir ağının çevrimiçi eğitimi ve açgözlü arama olarak iki süreci içerir. TEG sisteminin P-V eğrisi, NTD koşulu altında birden fazla LMPP ve bir GMPP'ye sahiptir. Eğri uydurma yöntemi olarak sinir ağı kullanılır ve hassas bir şekilde P-V eğrisi elde edilir. Daha sonra GMPP'ye yaklaşmak için bu eğriye göre tasarlanan açgözlü arama uygulanır. Bu yöntem P&O, PSO ve GWO'ya göre sırasıyla %391,34, %115,71 ve %109,43 daha fazla güç üretir. GSDD tabanlı MPPT yöntemi, çeşitli TEG uygulamalarında doğrudan uygulanabilir. Ancak sıcak taraf ve soğuk taraf sıcaklığını güvenilir bir şekilde ölçmek için doğru ve sağlam termometreler gereklidir. GSDD, TEG sistemi için hızlı bir şekilde yüksek kaliteli bir çözüm bulabilmesine rağmen, stokastik sıcaklık değişimi altında bir LMPP'ye yakalanabilir [110].

Görüldüğü üzere geleneksel yöntemlerin dezavantajlarından kurtulmak ve LMPP'ye takılmadan GMPP'ye ulaşmak için pek çok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler hibrit, matematiksel, bulanık mantık tabanlı ve sezgisel algoritmalar gibi değişik şekillerde literatürde yer almaktadır. Tablo 1.2'de bu yöntemlerde kullanılan algoritmalar, sensörler, dönüştürücüler ve yöntemlerin öne çıkan özelliklerini belirten bir özet sunulmuştur.

**Tablo1.2.** TEG'lere uygulanmış diğer MPPT yöntemlerinin özeti

| Referans | Yöntem                                                              | Sensör | Dönüştürücü        | Özel nitelik                                                                                                                                                                        |
|----------|---------------------------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [74]     | P&O + geçici mod                                                    | V, I   | Yükselten          | 1. Daha az sensör kullanır<br>2. Hesaplama yükü azdır                                                                                                                               |
| [75]     | Basit bir MPPT yöntemi                                              | V      | Yükselten          | 1. Hata %1'den azdır<br>2. Periyodik gerilim ölçümüne ihtiyaç yoktur<br>3. Daha az enerji tüketir<br>4. Değişken yükler için kullanışlı değildir                                    |
| [76]     | Görev döngüsü doluluk oranı tabanlı yöntem                          | V      | Yükselten          | 1. MPP çevresinde sabit durum salınımı yoktur<br>2. Ölçüm için kaynak ve yük bağlantısı kesilmez<br>3. Basit ve ucuzdur<br>4. Düşük güç tüketir                                     |
| [77]     | Basit bir MPP izleyici                                              | -      | Yükselten          | 1. Operasyonel ve tasarımı basittir<br>2. Düşük güç tüketir<br>3. Önceden programlanmış bir konum kullanır<br>4. $\Delta T=1-100^{\circ}\text{C}$ 'de %1,1'den az uyumsuzluk vardır |
| [78]     | Geliştirilmiş INC                                                   | V, I   | Yükselten          | 1. En kısa yakınsama süresi<br>2. En yüksek MPPT verimliliği<br>3. Yüksek performans<br>4. İzleme doğruluğu $\geq 99,6\%$                                                           |
| [79]     | Hibrit P&O ve FOCV                                                  | -      | Alçaltan           | 1. Ek devre gerektirmez<br>2. Geçici güç kaybı yok<br>3. Daha hızlı<br>4. İzleme doğruluğu $\geq 99,9\%$                                                                            |
| [80]     | Hibrit P&O ve FOCV                                                  | -      | Alçaltan-yükselten | 1. Minimum güç kaybı<br>2. Yüksek verimlilik<br>3. Daha az maliyet<br>4. İzleme doğruluğu $\geq 99,1\%$<br>5. Tepe güç verimliliği %92,1                                            |
| [81]     | Hibrit P&O, ikinci dereceden enterpolasyon ve sabit gerilim yöntemi | -      | Alçaltan           | 1. Tek yöntemin dezavantajlarını ortadan kaldırır<br>2. Yüksek çıkış gücü<br>3. Uygulanabilir ve verimli                                                                            |
| [82]     | Geliştirilmiş FOCV                                                  | -      | Yükselten          | 1. Daha kısa örnekleme ile verimliliği artırır                                                                                                                                      |
| [84]     | Uyarlanabilir adım boyutu P&O                                       | V      | Yükselten          | 1. Diğer son teknoloji yöntemlerden daha fazla güç üretir                                                                                                                           |
| [111]    | Zaman tabanlı yöntem                                                | V      | Yükselten          | 1. Daha az sensör gerekir<br>2. Yüksek verimlilik<br>3. Geleneksel yöntemlere göre %58 daha fazla güç                                                                               |
| [112]    | DCO                                                                 |        |                    | 1. Düşük güç tüketimi<br>2. %63 tepe verimliliği<br>3. Ultra düşük gerilimli termoelektrik enerji hasadı için kullanışlıdır                                                         |
| [85]     | FL                                                                  | V, I   | Yükselten          | 1. Güçlü ve değişen sıcaklık koşullarında hızlı yanıt verir<br>2. Sistemin kesin bir modeline ihtiyaç duymaz<br>3. İzleme doğruluğu %95,18-99,18                                    |

**Tablo 1.2.(devam)** TEG'lere uygulanmış diğer MPPT yöntemlerinin özeti

| Referans | Yöntem                                         | Sensör | Dönüştürücü        | Özel nitelik                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------|------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [86]     | ANFIS                                          | V, I   | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. TEG uygulamaları için iyi bir yöntem</li> <li>2. Verimlilik FL tabanlı yöntemden daha yüksektir</li> <li>3. İzleme doğruluğu <math>\approx 99\%</math></li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                     |
| [88]     | P&O-LOM                                        | V, I   | Alçaltan-yükselten | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gürültüye karşı çok dayanıklı</li> <li>2. Kararlı durum hatalarını ortadan kaldırabilir</li> <li>3. Algoritma, keyfi olarak seçilmiş bazı parametreler içerir.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                             |
| [89]     | Uyarlanabilir bir ölçek faktörü tabanlı yöntem | V, I   | SEPIC              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Basit, hızlı ve kararlı</li> <li>2. Minimum hesaplama yoğunluğu</li> <li>3. Yüksek izleme performansı</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| [91]     | PD                                             | V, I   | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ekstra devre gerektirmez</li> <li>2. Ölçüm için kaynak ve yük bağlantısı kesilmez</li> <li>3. Salınımı ortadan kaldırmak için Kalman filtresi kullanır</li> <li>4. Maliyetli değil ve daha az karmaşıklık</li> <li>5. MPPT verimliliği <math>&gt; 97,7\%</math>'dir</li> </ol>                                                                                                                        |
| [92]     | DWS                                            | V, I   | SEPIC              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Çok düşük veri işleme enerjisi ve karmaşıklığı</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| [93]     | HFI                                            | V, I   | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>99,73\%</math> sabit durumda izleme verimliliği</li> <li>2. Ek sensör yok</li> <li>3. Literatürde sunulan herhangi bir yöntemden 3 kat daha hızlı</li> <li>4. MPPT verimliliği <math>98,7\%</math>'dir</li> </ol>                                                                                                                                                                               |
| [94]     | ADG                                            | V, I   | -                  | P&O'dan daha iyi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| [95]     | LEMPPT                                         | V, I   | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. TEG terminallerini açmak için ek anahtar gerektirmez</li> <li>2. Açık devre geriliminin ölçüm süresi boyunca gücü kesmeye gerek yoktur</li> <li>3. Sabit durum salınımlarından bağımsızdır</li> <li>4. Sıcaklık ve yük koşullarındaki değişikliklerden etkilenmez</li> </ol>                                                                                                                          |
| [103]    | ACS                                            | V      | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tipik metasezgisel algorithmadan daha az hesaplama yükü</li> <li>2. NTD koşulunda GMPP için model tabanlı yöntemlerden daha uygun</li> <li>3. Kararlı durum salınımları olmadan GMPP'yi arayabilir</li> <li>4. modelden bağımsız</li> <li>5. Metasezgisel algoritmalarından daha hızlı ve daha yüksek yakınsama kararlılığı</li> <li>6. Bir dezavantaj olarak çok küçük güç dalgalanmaları</li> </ol> |
| [100]    | PSO                                            | V, I   | Yükselten          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Yüksek gerilim kazancı</li> <li>2. P&amp;O'ya göre daha yüksek MPPT izleme ve dönüştürücü verimliliği</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

**Tablo 1.2.(devam)** TEG'lere uygulanmış diğer MPPT yöntemlerinin özeti

| Referans | Yöntem                   | Sensör | Dönüştürücü | Özel nitelik                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [107]    | FASO                     | V, I   | Yükselten   | 1. Güçlü global arama yeteneği<br>2. NTD altında MPP'yi daha büyük olasılık ve daha yüksek hız ile bulma<br>3. Bir dezavantaj olarak hafif bir güç dalgalanmasıdır.                                                                                                                                                                                                      |
| [109]    | DSMO                     | V, I   | -           | 1. Metasezgisel yöntemlere kıyasla rastgele arama yerine etkili bir rehberli arama<br>2. Bir dezavantaj olarak çok küçük güç dalgalanmalarıdır.                                                                                                                                                                                                                          |
| [110]    | GSDD                     | V, I   | Yükselten   | 1. Daha yüksek hız ve daha yüksek kararlılık ile yüksek kaliteli bir optimuma yaklaşabilme<br>2. Akıllı enerji sisteminin diğer optimizasyon zorluklarına uyum sağlayabilme<br>Dezavantajlar:<br>1. Metasezgisel yöntemlerden daha az güç dalgalanması<br>2. Doğru ve sağlam termometrelere ihtiyaç olması<br>3. Stokastik sıcaklık değişimi altında bir LMPP'ye takılma |
| [113]    | Üç nokta ağırlıklandırma | -      | Yükselten   | 1. İki nokta ağırlıklandırma yönteminden daha iyi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| [102]    | GWO                      | V, I   | Yükselten   | 1. NTD koşulunda daha küçük güç dalgalanmaları ve daha yüksek kalite ile hızlı bir şekilde GMPP'ye yakınsayabilir                                                                                                                                                                                                                                                        |
| [98]     | ESC                      | V, I   | Yükselten   | 1. P&O'dan neredeyse dört kat daha hızlı<br>2. P&O'dan daha fazla güç çıkarır                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| [114]    | EO                       | V, I   | Yükselten   | 1. Basit<br>2. Yüksek izleme verimliliği<br>3. Daha hızlı yerleşme süresi<br>4. Düşük maliyetli<br>5. GMPP'yi NTD şartlarında takip edebilir                                                                                                                                                                                                                             |

## **1.6.Fotovoltaik Sistemlerde Kullanılan Ancak Termoelektrik Jeneratör Sistemlerine Uyarlanmamış Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri**

TEG sistemlerin güç karakteristik eğrileri ile PV sistemlerin güç karakteristik eğrileri benzerdir. Harici yükün empedansı özel bir değere sahip ise maksimum güç yüke aktarılır. TEG her zaman MPP'de çalışacak şekilde empedansı değiştirmek için MPPT yöntemleri kullanılır. TEG'in I-V ve P-V özellikleri PV ile aynı prensipleri takip ettiğinden, PV için uygulanan MPPT yöntemleri TEG için yeniden kullanılabilir ya da geliştirilebilir [16]. Bunun için, bu bölümde PV sistemler için önerilen, geliştirilen fakat TEG sistemlerinde henüz kullanılmamış MPPT yöntemlerine yer verilmiştir.

P&O algoritması MPPT yöntemleri arasında basit, uygun maliyetli ve en yaygın kullanılan MPPT algoritmasıdır. Ancak, MPP çevresindeki salınım sorunu ve ani değişen çevre koşullarından çabuk etkilenmesi, araştırmacıları bu yöntemi geliştirmeye yönlendirmiştir. TEG'ler için geliştirilen P&O algoritması türevlerinin yanı sıra, PV sistemler için geliştirilmiş ve henüz TEG sistemlere uygulanmamış P&O algoritması türevleri de mevcuttur. Killi ve ark. çevre koşullarının değişimiyle P&O algoritmasının karar sürecine, gerilim bilgisinin yanında akım bilgisinin de dahil ederek MPP'ye ulaşılmasını sağlamışlardır. Bu yöntem geleneksel P&O algoritmasına göre ekstra güç kazancı sağlar ve sistemin verimliliğini artırır [115]. Ahmed ve ark. salınım ve izleme yönü sorunlarının üstesinden gelmek için birkaç ek yazılım kodu ile geleneksel P&O algoritmasına sınır koşulları getiren ve dinamik pertürbasyon adım boyutu kullanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem MPPT verimliliğini yaklaşık %2 arttırmıştır [116]. Kamala Devi ve ark. kararlı hal salınımının üstesinden gelmek için P&O algoritmasında ufak değişiklikler yaparak %1-1,1 arasında verimlilik artışı sağlamışlardır [117]. Belkaid ve ark. ani değişen çevre koşullarını algılamak için P&O algoritmasına üçüncü bir parametre ekleyerek geliştirdikleri yöntem ile yakınsama hızını ve verimliliği arttırmışlardır. Ekstra donanım gerektirmeyen bu yöntem, değişen güneş radyasyonu koşullarında ortalama verimliliği %4 arttırmıştır [118]. Ghamrawi ve ark. P&O algoritmasına dayalı, gücün türev bilgisini kullanarak ikili modda çalışan ve böylece salınım oluşturmada yanıt süresini arttıran bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu türev değeri belirlenen eşik değerden küçük olduğunda birinci mod olan geleneksel P&O algoritması çalışırken, eşik değeri aştığında sistem başka bir adım boyutu ile

ikinci modda çalışarak salınımları azaltmaktadır [119]. Abdel-Salam ve ark. P&O algoritmasında değişiklik yaparak izleme süresi 35-52,5 ms arasında değişen, kararlı durum verimliliği %83,6-%98,5 arasında değişen ve verimliliği %83-%96,33 arasında değişen bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem ile, diğer 18 yönteme karşı izleme süresi 0,025 ms, kararlı durum verimliliği %99,48 ve verimliliği %98,03 geliştirilmiştir [120]. Ali ve ark. PV çalışma bölgesini dört parçaya bölerek işlem yapan değiştirilmiş P&O algoritması geliştirmişlerdir. Bu yöntem sistem verimliliğini %92,6'dan %95,4'e yükseltir ve kararlı durum salınımlarını %9,2 azaltır [121]. Abdel-Salam ve ark. P&O algoritmasının dezavantajlarını ortadan kaldırmak için algoritmayı yeniden formüle etmişlerdir. Bu yöntem salınımları geleneksel P&O algoritmasına göre %1,02, geliştirilmiş diğer yöntemlere göre %0,5 ve adaptif yöntemlere göre %0,8 azaltmaktadır. İşlem yükü diğer geliştirilmiş ve adaptif yöntemlerden daha azdır. Bu yöntem kullanılarak izleme verimliliği %99,98'e maksimum anlık verimlilik ise %99,99'a ulaşmıştır [122]. Piegari ve ark. MPPT performansını optimize etmek için en uygun pertürbasyon adımını ayarlayabilen bir adaptif P&O algoritması önermişlerdir. Bu yöntem geleneksel P&O algoritması ve INC algoritması kullanılarak yapılan MPPT yöntemlerinden daha yüksek verimliliğe sahiptir [123].

P&O algoritmasının dezavantajlarını ortadan kaldırmak için geliştirilmiş, değiştirilmiş P&O algoritmalarının yanı sıra P&O algoritmasıyla birlikte kullanılan hibrit MPPT algoritmalar da literatürde yer almaktadır. Sundareswaran ve ark. değişken çevre koşullarında P&O algoritmasının LMPP'lerden birine sıkışıp kalmasının ve GMPP'yi tanımda başarısız olmasının önüne geçmek için global arama kabiliyeti olan karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritması ile lokal arama yeteneğine sahip P&O algoritmasını birleştirerek hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem ek bir donanım gerektirmeden, daha düşük güç harcayarak, daha yumuşak ve daha hızlı izleme yeteneğine sahiptir [124]. Manickam ve ark. PSC altındaki PV panellerde GMPPT stratejileri için P&O algoritmasını havai fişek algoritması (FWA) ile zenginleştirerek hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, sabit ışıma altında FWA'ya göre daha düşük güç salınımları nedeniyle P&O algoritmasını kullanır. PSC'de ise global arama ve hızlı izleme yeteneği nedeniyle FWA kullanır. Bu yöntem dinamik izleme sırasındaki güç salınımı açısından PSO tabanlı GMPPT tekniğinden daha üstündür [125]. Sheik Mohammed ve ark. PV sistemlerde MPP'yi aramak için geleneksel P&O algoritması ve öğrenme otomatları (LA) optimizasyonunu birlikte

kullanarak hibrit bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem MPPT'nin izleme performansını önemli ölçüde iyileştirir. Geleneksel P&O ve değiştirilmiş edilmiş P&O algoritmalarına göre MPP çevresindeki salınımları azaltır [126]. Harrag ve ark. genetik algoritma (GA) tabanlı oransal-integral-türev (PID) denetleyici kullanarak adaptif görev döngüsü adımı ile MPP'yi izleyen P&O yöntemi önermişlerdir. Yükselten dönüştürücüyü çalıştırmak darbe genişlik modülasyonuna (PWM) ihtiyaç vardır. PWM'i görev döngüsü, görev döngüsünü de P&O algoritması ayarlar. P&O algoritmasının ihtiyaç duyduğu değişken adım boyutunu optimize etmek amacıyla PID denetleyici kullanılır ve PID denetleyicinin parametrelerini ayarlamak için ise bu yöntemde GA'dan yararlanılmıştır. Geleneksel P&O algoritması ile kıyaslandığında, GA ile birlikte P&O kullanılan bu yöntem dalgalanma, aşma ve tepki süresi açısından daha iyi sonuçlar verir. Özellikle hızlı değişen ortam koşullarında MPP noktasını takip etme becerisi daha yüksektir ve kaybedilen enerjide genel bir azalma sağlar [127].

Kumar ve ark. MPPT yöntemi olarak P&O algoritmasının başka bir versiyonu olan kendi kendini tahmin etme karar alma yeteneğine sahip kendi kendini tahmin eden Değiştir ve gözlemle (SPP&O) algoritmasını geliştirmişlerdir. Bu yöntemin çalışma prensibi P-V karakteristiğine ilişkin üç ardışık çalışma noktasına dayanmaktadır. Üç noktadan ilk iki nokta, dinamik durumu çok akıllıca algılar ve normal durumda MPP bölgesini hızlı bir şekilde arar. Bunun yanında dairesel bir benzetme kullanarak hızlı MPP takibinin yanı sıra bir sonraki yineleme için optimum çalışma konumuna karar verir. Algoritma karmaşıklığı hesaplama yükü düşük bir yöntemdir. Çok fazla veri gerektirmeden, salınım içermeyen sabit durum performansı sağlar. P&O, geliştirilmiş/değiştirilmiş P&O algoritmalarına göre daha iyi performans sağlar [128].

Geleneksel INC algoritması iyi bir performansa sahiptir. Ancak MPP'ye yavaş yakınsama, MPP çevresindeki PV gücünde salınımlar, hızla değişen atmosferik koşullarda başarısız olma ve MPP'yi yanlış yönde izleme gibi dezavantajları vardır. Daha büyük adım boyutuyla hızlı izleme elde edilebilir, ancak aşırı kararlı hal salınımları kaçınılmazdır. Daha küçük adım boyutu daha yavaş dinamiklerle salınımları azaltabilir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için geleneksel INC algoritması üzerinde geliştirmeler ve değişiklikler yapılmıştır. Loukrez ve ark. MPPT yöntemi olarak geleneksel INC algoritmasında değişken adım boyutu kullanan gelişmiş değişken adım boyutu INC algoritması önermişlerdir. Hız ve doğruluk

açısından geleneksel INC algoritmasına göre daha verimli bir yöntemdir [129]. Harrag ve ark. da bezer şekilde değişken adım boyutu ve ek olarak sinir ağı ve bulanık mantık kullanan INC tabanlı değişken adım boyutlu nöro-bulanık MPPT yöntemini önermişlerdir. Bu yöntemde ilk olarak bulanık tabanlı INC değişken adım boyutu verilerini kullanarak farklı sinir ağı mimarileri ve parametreleri kümesini test etmek için gereken çevrimdışı bir modda geliştirilmiştir. İkinci olarak, en uygun bulunan sinir ağı denetleyicisi daha sonra bir çevrimiçi modda PV sisteminin çıkış gücünü izlemek için kullanılmıştır. Sinir ağı denetleyicisi için giriş değişkenleri INC algoritmasının giriş değişkenleri ile aynıdır (I ve V). Bu yöntem değişken atmosferik koşullarda geleneksel INC algoritmasına göre güç kayıplarının azalmasını sağlamıştır ve daha iyi performans göstermiştir [130]. Al-Dhaifallah ve ark. geleneksel INC algoritmasının dezavantajlarını ortadan kaldırmak için kesirli dereceli kontrol tabanlı artımsal iletkenlik (FOINC) MPPT yöntemini önermişlerdir. Güçlü bir yöntem olan FOINC kesirli kontrolörün kazancı kök-yer eğrisi aracılığı ile bulunur. Ayrıca denetleyicinin optimal parametrelerini bulmak için araç olarak, hesaplamalar için küçük belleğe ihtiyaç duyan radyal hareket optimizasyonu (RMO) kullanılır. FOINC MPPT yöntemi geleneksel INC algoritmasına göre MPP'yi daha iyi performansla başarılı ve doğru bir şekilde bulur ve %41,67 daha hızlıdır [131].

Bulanık mantık kontrol (FLC) yanıt hızı açısından MPPT'de önemli ölçüde geliştirilmiş bir performans sağlayan ve MPP etrafında salınım olmayan popüler bir yöntemdir. Ancak geleneksel FLC tabanlı MPPT yöntemlerinin hızla değişen çevre koşullarında çok yönlülük eksikliği vardır. Kwan ve ark. buna çözüm olarak değişken öncülleri içeren değiştirilmiş FLC yöntemini önermişlerdir. Bu yöntem öncülleri ayarlama için karmaşık algoritmalar yerine basit formülleri kullanan adaptif ve alternatif bir tasarımıdır. Farklı ışınım altındaki hızlı ve kararlı yanıtlar elde eder. Çok yönlülüğünden muzdarip olan ve farklı koşullar altında performansı etkili bir biçimde düşen geleneksel FLC'ye göre daha avantajlıdır. Ayrıca çevresel koşullar değiştiğinde veya farklı bir güneş paneli kullanıldığında, manuel olarak değiştirilmesi gereken ve sabit bulanık mantık öncüllerini kullanan önceki tasarımlara kıyasla hızlı ve kararlı bir tekniktir [132]. Srinivasarao ve ark. bulanık mantık kullanarak iki blokta uygulanan filtre tabanlı uyarlanabilir bulanık orantılı integral türev (FPIDN) MPPT yöntemini önermişlerdir. İlk blok uyarlanabilir bir hesaplama bloğudur ve her MPP için referans gerilim üretir. İkinci blok ise FPIDN denetleyicisidir. 0,048 sn'de MPP'yi yakalayan

bu yöntem %99,45 ile %99,72 arasında verimlilik sunmaktadır. Geleneksel MPPT yöntemlerine göre çeşitli ışınlam ve sıcaklık koşulları altında daha iyi performans gösterir [133]. Hong ve ark. geleneksel FLC ve P&O yöntemlerinin eksiklerini gidermek amacıyla değişken çevre koşullarında maksimum güç optimizasyonu için tip-2 bulanık mantık tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem dönüştürücünün görev döngüsünü ayarlamak için bir aralıklı tip-2 bulanık mantık sistemi (IT2FLS) kullanır. Kontrol kazançları ve bulanık üyelik fonksiyonları yaklaşık eğim-iniş algoritması kullanılarak optimize edilir. Bu sayede gürültü ve belirsizlikle başa çıkmada geleneksel bulanık mantık sisteminden (FLS) daha güçlüdür. Ayrıca geleneksel P&O yöntemiyle elde edilene kıyasla daha yüksek ve daha istikrarlı bir güç üretimi sağlar [134].

Mosaad ve ark. PV sistemlerde MPPT için hızlı yakınsamanın yanı sıra yüksek verimlilikle parametrelerin ayarlanması sürecinin az olması gibi çeşitli avantajları olan guguk kuşu arama (CS) algoritmasını önermiştir. CS algoritması, arama sürecinde Lévy uçuşuna göre rastgele yürüyüş kullanır. Sinir ağı ve INC yöntemine göre daha düşük güç kayıplarıyla farklı çalışma koşullarında MPP'yi izler ve daha büyük maksimum güç alınmasını sağlar [135]. Benzer şekilde, Shi ve ark. PSC altında ortaya çıkan birden fazla LMPP'ye çözüm olarak geliştirilmiş guguk kuşu arama (ICS) algoritmasını önermiştir. ICS algoritması, geleneksel CS algoritmasındaki rastgele adımı ortadan kaldırır. Uyarlanabilir adım ayarı ile düşük güçlü bölgelerde büyük adım ve yüksek güçlü bölgelerde küçük adım kullanarak arama süresini azaltır ve arama doğruluğunu artırır. ICS algoritması PSC altında GMPP'yi hemen ve doğru bir şekilde izleyebilir [136].

Hashim ve ark. gazların çözücülerde belirtilen sıcaklık ve basınç altında doğal çözünme davranışını kullanan Henry gaz çözünürlük optimizasyonu (HGO) algoritmasını literatüre kazandırmışlardır. Gazın çözünürlüğü büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık, gazın kısmi basıncını etkilediğinden, kısmi basınç doğrudan gazın sıcaklıktaki çözünürlüğü ile ilgilidir [137]. Mirza ve ark. HGO algoritmasını MPPT yöntemi olarak önermişlerdir. Geleneksel MPPT algoritmalarının neden olduğu salınımla ve PSC altındaki güç kaybı ile baş edebilen bir yöntemdir. Önerilen HGO-MPPT algoritması biraz karmaşıktır. Algoritmadaki rastgele sayılar ve parametreler tüm çalışma koşullarına göre optimize edilmiştir. Bu algoritma LMPP'lerden

kaçınarak GMPP'yi bulur. HGO-MPPT yöntemi sürü zekası tabanlı tekniklere göre güç verimliliğin %1-4 arasında iyileştirmede sağlam ve etkilidir. Geleneksel gradyan tabanlı yöntemlerle karşılaştırıldığında, HGO-MPPT yöntemi izleme süresini % 15-30, yerleşme süresini %20 ve salınımı %80 azaltır [138].

PSC'ye maruz kalan PV sistemlerdeki çoklu LMPP'lerden dolayı meydana gelen güç kaybını en aza indirmek için ateş böceği algoritması (FA) da kullanılmıştır [139]. FA algoritması orijinal haliyle GMPP'yi izleme süresini uzatabileceği ve MPPT performansını engelleyeceği için, geliştirilmiş ve değiştirilmiş FA algoritmaları önerilmiştir. Teshome ve ark. daha parlak ateş böceklerinin koordinatlarının ortalamasını temsili nokta olarak kullanmışlar ve GMPP'yi izleme süresinde %67 tasarruf sağlamışlardır [140]. Shi ve ark. GMPP'ye ulaşma süresinde etkili bir parametre olan ateş böceği nüfus sayısını uyarlamalı olarak ayarlayabilen başka bir değiştirilmiş FA algoritması önermişlerdir. Bu yöntem P&O, PSO ve FA algoritmalarından daha verimli izleme sunmuş ve daha iyi performans göstermiştir [141]. Benzer şekilde, Farzaneh ve ark. değiştirilmiş bir FA algoritması ile %99,98'den yüksek verimlilikle P&O, PSO ve FA algoritmalarına göre daha yüksek hızda ve daha yüksek verimlilikle MPPT yapabilmışlardır [142]. PSC'ye maruz kalan PV sistemlerde geleneksel FA algoritmasına göre daha yüksek performans gösteren P&O, INC ve GA algoritmaları ile hibrit versiyonları da mevcuttur [143–145].

PV sistemlerde PSC koşullarında LMPP'ye takılan geleneksel yöntemler yerine, GMPP'yi arayabilen metasezgisel MPPT yöntemleri arasında karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) algoritması da yer almaktadır. ACO, bazı karınca türlerinin yiyecek arama davranışlarından ilham alır. Bu karıncalar, koloninin diğer üyeleri tarafından izlenmesi gereken uygun bir yolu işaretlemek için yere feromon bırakırlar. Karınca kolonisi optimizasyonu, optimizasyon problemlerini çözmek için benzer bir mekanizmadan yararlanır [146]. ACO algoritması MPPT yöntemlerinde PV sistemlerde geliştirilerek ya da diğer yöntemlerle hibrit olarak kullanılmıştır. Bu yöntemler ACO algoritmasının yardımcı olduğu geliştirilmiş P&O yöntemi [124], yeni feromon güncellemesi ile karınca kolonisi optimizasyonu (ACO-NPU) yöntemi [147] ve azalan popülasyon ile ACO algoritması yöntemidir [148].

Karaboğa ve ark. tarafından önerilen yapay arı kolonisi (ABC) de zamanla MPPT yöntemlerinde kullanılmaya başlanmıştır [149]. ABC, çalışan arılar, izleyen arılar ve izci arılar olmak üzere üç temel gruptan oluşur. Koloninin yüzde ellisi çalışan arılara aittir ve diğer yüzde ellisi izleyen arılardan oluşur. ABC algoritmasında ilk rol, istihdam edilen arılar tarafından oynanır. İlk aşamada, çalışan bir arı nektar elde etmek için önceden bilinen besin kaynağı konumuna gider. Daha sonra komşuları ile görsel iletişimin yardımıyla yeni bir besin kaynağı lokasyonu seçer. Yeni lokasyonda önceki lokasyonlardan daha fazla nektar varsa, çalışan arı önceki lokasyonu unuttur ve sadece yeni lokasyonu ezberler. Sallantılı dans hareketleri yardımıyla, daha fazla nektara sahip yeni lokasyon izleyen arılara iletilir. Böylece kovanda bekleyen arılar en iyi besin kaynağı konumuna doğru hareket ederler. Bu aşamada besin kaynağı atılan çalışan arı, izci arı olarak dönüştürülür ve yeni bir yer aramaya başlar. ABC algoritması, geliştirilerek ve diğer MPPT yöntemleri ile hibrit olarak, PSC altındaki PV sistemlerin GMPP'sini bulmak için kullanılmıştır. Benyoucef ve ark. performansı PSO algoritmasından daha iyi olan ABC tabanlı bir MPPT yöntemi geliştirmişlerdir [150]. Oshaba ve ark. PI denetleyicinin parametrelerini ABC algoritmasıyla ayarlayan bir MPPT yöntemi önermiştir [151]. Motahhir ve ark. daha az sensör ile optimal görev döngüsü üretmek amacıyla ABC algoritmasını kullanan bir MPPT yöntemi geliştirmiştir [152]. Sundareswaran ve ark. ABC algoritmasındaki izci arı aşamasını uygun şekilde ortadan kaldırarak değiştirdikleri MPPT yöntemi ile GMPP'ye yakınsama süresini kısaltmışlardır [153]. Bu algoritmaların yanında geliştirilmiş P&O ve ABC algoritmalarının hibrit şekilde kullanıldığı MPPT yöntemleri de literatürde yer almaktadır [154,155].

PV sistemlerde MPPT yöntemi olarak çalışılan bir diğer algoritma da kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için basit ama güçlü bir optimizasyon algoritması olan Jaya algoritmasıdır [156]. Algoritmaya özgü parametreler içermeyen bu algoritma her zaman en iyi çözüme ulaşmaya ve en kötü çözümden uzaklaşmaya çalışır. Tatmin edici bir performans gösterdiği için PSC'ye maruz kalan PV sistemlerde MPPT yöntemi olarak kullanılmıştır. Huang ve ark. GMPP'yi bulmada PSO algoritmalarıyla Jaya algoritmasını kıyaslamışlar ve Jaya algoritmasının daha iyi dinamik performansa sahip olduğunu göstermişlerdir [157]. Huang ve ark. PSC altında PV sistemlerin MPPT problemini çözmek için modelsiz bir çözüm algoritması olan doğal kübik-spline-tabanlı Jaya algoritması (S-Jaya) önermişlerdir. Kübik spline,

verilerin düzgün bir eğri veya yüzey üzerinde temsil edilmesini sağlayan matematiksel yöntemlerdir. PSO ve Jaya algoritmaları ile kıyaslandığında S-Jaya algoritması daha yüksek bir genel izleme verimliliği sunmuştur [158]. Jaya algoritması ve türevlerinin kullanıldığı MPPT yöntemleri, literatürde genel olarak PSO tabanlı yöntemler ile kıyaslanmıştır. Jaya algoritması kullanılarak PSC altındaki PV sistemlerde MPP'yi izlemek için kullanılan yöntemler arasında Jaya ile Diferansiyel Evrim (JayaDE) algoritması [159], Gauss süreç regresyonu-Jaya (GPR-Jaya) algoritması [160] ve Lévy uçuşuna dayalı Jaya (JAYA-LF) algoritması [161] gibi MPPT yöntemleri de bulunmaktadır.

Rao ve ark. tarafından literatüre kazandırılan öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) algoritması [162] da MPPT yöntemi olarak PV sistemlerde kullanılan bir algoritmadır. Popülasyona dayalı bir yöntemdir ve global çözüme ulaşmak için çözüm popülasyonu kullanır. TLBO süreci, öğrenci aşaması ve öğretmen aşaması olarak adlandırılan iki aşamadan oluşur. Bu iki aşamada öğretmen, bilgiyi değiştirerek öğrencinin seviyesini yükseltmeye çalışır. İlk aşamada öğretmen bilgiyi öğrenciler arasında doğrudan aktarır ve grup içindeki ortalama sonucu bilgi açısından kendi seviyesine yükseltmeye çalışır [163]. Bilgi ikinci aşamada kendi aralarında etkileşim yoluyla öğrencilere aktarılır [164]. Her iki aşamada da öğrencilerin bilgisi geliştirilir. Rezk ve ark. TLBO tabanlı MPPT yöntemi ile FLC ve PSO yöntemlerine göre daha yüksek doğrulukla ve daha kararlı bir şekilde GMPP'yi bulmuşlar ve izleme süresini %23,8'den fazla azaltmışlardır [165]. Chao ve ark. PV sistemlerde PSC koşullarında GMPP'yi bulmak için geliştirilmiş bir versiyonu olan I-TLBO algoritması ile geleneksel TLBO, ACO ve PSO algoritmalarından daha kısa sürede GMPP'yi izlemişlerdir [166]. Farajdadian ve ark. FLC'nin bulanık üyelik fonksiyonlarını optimize etmek ve MPPT için uygun görev döngüsünü üretmek için TLBO, FA, biyocoğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) ve PSO algoritmaları kullanılmışlardır. Yapılan kıyaslamalar enerji kaybı ve bazı zamanlarda MPP'nin bulunamaması gibi sorunlar giderildiğini göstermiştir. Ayrıca TLBO ve FA tabanlı asimetric bulanık üyelik fonksiyonlarının yalnızca MPPT yakınsama hızını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda BBO ve PSO'ya dayalı simetric bulanık üyelik fonksiyonları ve asimetric bulanık üyelik fonksiyonları ile karşılaştırıldığında izleme doğruluğunu da geliştirdiğini göstermektedir [167].

Newton kütle çekimi "Evrendeki her parçacık, kütlelerinin çarpımı ile doğru orantılı ve aralarındaki mesafenin karesiyle ters orantılı bir kuvvetle diğer her parçacığı çeker" şeklinde ifade edilir. Uzayda çalışılan her bir kütlenin çözüm olması ve optimal çözüm olan en ağır kütlenin diğer kütleleri çekmesi prensibine dayanan yerçekimi arama algoritması (GSA) [168] da PV sistemlerindeki MPPT yöntemlerinde kullanılmıştır. Sundareswaran ve ark. önerdikleri GSA ile birleştirilmiş P&O yönteminde, izlemenin erken aşamalarında GSA, ardından P&O algoritması kullanmışlardır. Böylece iki algoritmanın da dezavantajlarından kurtulmuşlardır.[169]. Li ve ark. geliştirdikleri GSA (IGSA) algoritmasını kullandıkları MPPT yöntemi ile hem izleme süresini azaltmış hem de PSO'ya ve GSA'ya kıyasla izleme doğruluğunu iyileştirmişlerdir [170]. Giandrasekaran ve ark. önerdikleri kümelenmiş GSA (CGSA) algoritması GMPP'ye hızla yaklaşırken, izleme hızı ve salınım açısından PSO gibi algoritmalarından daha iyi performans göstermiştir [171]. Duman ve ark. bulanık mantık tabanlı hibrit PSO ve GSA (FPSOGSA) yöntemi önermişlerdir. Yapay sinir ağı (ANN) tabanlı bu MPPT yönteminde hibrit PSO ve GSA, bulanık mantık kullanılarak değiştirilmiş (FPSOGSA) ve ANN optimizasyonunda kullanılmıştır. P&O algoritması ile kıyaslandığında bu yöntemin MPP çevresindeki salınımları azalttığı ve sabit durumda PV sisteminin artan maksimum güç verimini sağladığı görülmüştür [172].

Saremi ve ark. tarafından literatüre kazandırılan çekirge optimizasyon algoritması (GOA) optimizasyon problemlerini çözmek için doğadaki çekirge sürülerinin davranışını matematiksel olarak modeller ve taklit eder [173]. Global çözüme ulaşabilmesi nedeniyle GOA tabanlı MPPT yöntemleri PSC koşullarındaki PV sistemlerde kullanılmıştır [174–176]. Ayrıca kısmi gölgeli PV sistemi için önerilen INC algoritması ile birleştirilen değiştirilmiş GOA yöntemi [177] ve üyelik fonksiyonlarının ölçeklendirme faktörleri GOA ile ayarlanan FLC yöntemi [178] gibi GOA tabanlı MPPT yöntemleri de literatürde yer almaktadır.

Son beş yılda, çok popüler olmasa da PV sistemlerde MPPT yöntemi olarak kullanılmış, fakat henüz TEG sistemlerine uygulanmamış algoritmalar literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları; balina optimizasyonu algoritması (WOA) [179,180], mayın patlatma optimizasyonu (MBA) [181], yusufçuk optimizasyon algoritması (DFOA) [182], emperyalist rekabet algoritması (ICA) [183], normal

harmonik arama algoritması (HSA) [184], çiçek tozlaşma algoritması (FPA) [185], rüzgar tahrikli optimizasyon (WDO) [186], öğrenme temelli HC [187], öğrenme temelli INC [188], FLC ile birleştirilmiş gri kurt optimizasyonu (GWO-FLC) [189], memetik pekiştirmeli öğrenme (MRL) [190], Cauchy tercihli çapraz tabanlı küresel tozlaşma (CCGPA) [191], harris şahin optimizasyonu (HHO) [192], birleştirilmiş aşırı öğrenme makinesi ve değişken dik eğim tırmanışı (ELMVSGA) [193], rastgele orman algoritması ile yarı muhalif kaotik gri kurt optimizasyonu (QOCGWO-RFA) [194] şeklindedir.

Tüm bu algoritmaların amacı, TEG'den elde edilen elektrik enerjisini maksimum düzeyde sağlamaktır. Ancak bu yöntemlerle çalışırken bazı sakıncalar da ortaya çıkmaktadır. Bu dezavantajlar, MPP etrafında salınımlar, MPP değerine ulaşmada gecikmeler ve bir LMPP değerine takılıp kalarak GMPP elde edilememesidir. TEG'ler için geliştirilen MPPT yöntemleri, PV sistemlerine göre daha azdır. Çalışmalar, genellikle PV sistemler için geliştirilen MPPT algoritmalarının daha sonra TEG sistemlerine uyarlandığını göstermektedir. TEG'ler için uyarlanmamış algoritmalar arasında, GMPP arama yeteneğine sahip MPPT algoritmalarının TEG'lere uygulama potansiyeli, kaliteli çalışmalar için daha yüksektir. İncelenen algoritmalar GMPP arama yeteneği ve MPPT algoritmaları ile yapılan çalışmalar Tablo 1.3'te verilmiştir.

TEG sistemlerinde MPPT yöntemi olarak metasezgisel algoritmaların kullanım alanı oldukça azdır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında bir TEG sisteminde MPPT yöntemi olarak metasezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Oluşturulan deney düzeneği ve simülasyon modeline uygun olarak metasezgisel algoritmalar kodlanmış, TEG sistemlerinde MPPT yöntemi olarak kullanıldığında, ani değişen koşulları altında lokal maksimum güç noktasına (LMPP) takılmadan global maksimum güç noktasını (GMPP) bulma verimliliği araştırılmıştır. Metasezgisel algoritmaların sonuçları, geleneksel algoritmalarla ve birbirleri ile kıyaslanmıştır.

**Tablo1.3.** GMPP arama kabiliyetine sahip algoritmalar

| Referans          | Yöntem                                                               |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| [103]             | Uyarlanabilir Pusulalı Arama                                         |
| [100,101]         | Parçacık Sürü Optimizasyonu tabanlı yöntemler                        |
| [107]             | Hızlı Atom Arama Optimizasyonu                                       |
| [109]             | Dinamik Vekil Model tabanlı Optimizasyon                             |
| [110]             | Veri Odaklı Açgözlü Arama                                            |
| [102,189]         | Gri Kurt Optimizasyonu                                               |
| [114]             | Denge Optimizasyonu                                                  |
| [124,147,148,195] | Karınca Kolonisi Optimizasyonu tabanlı yöntemler                     |
| [125]             | Havai Fişek Algoritması                                              |
| [126]             | Öğrenme Otomatları Optimizasyonu                                     |
| [136]             | Geliştirilmiş Guguk Kuşu Arama                                       |
| [138]             | Henry Gaz Çözünürlük Optimizasyonu                                   |
| [140,141]         | Geliştirilmiş Ateş Böceği Algoritması                                |
| [150–155]         | Yapay Arı Kolonisi tabanlı yöntemler                                 |
| [157–161]         | Jaya algoritması tabanlı yöntemler                                   |
| [165–167]         | Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon tabanlı yöntemler               |
| [169–172]         | Yerçekimi Arama Algoritması tabanlı yöntemler                        |
| [179,180]         | Balina Optimizasyonu Algoritması                                     |
| [181]             | Mayın Patlatma Optimizasyonu                                         |
| [182]             | Yusufçuk Optimizasyon Algoritması                                    |
| [183]             | Emperyalist Rekabet Algoritması                                      |
| [184]             | Normal Harmonik Arama Algoritması                                    |
| [185]             | Çiçek Tozlaşma Algoritması                                           |
| [186]             | Rüzgâr Tahrikli Optimizasyon                                         |
| [190]             | Memetik Pekiştirmeli Öğrenme                                         |
| [191]             | Cauchy Tercihli Çapraz tabanlı Küresel Tozlaşma                      |
| [192]             | Harris Şahin Optimizasyonu                                           |
| [193]             | Birleştirilmiş Aşırı Öğrenme Makinesi ve Değişken Dik Eğim Tırmanışı |

Bu tez çalışmasının amacı, TEG sistemlerinde MPPT yöntemi olarak kullanılan geleneksel algoritmaların yetersiz kaldığı durumlarda, MPPT yöntemi olarak kullanılan metasezgisel algoritmaların geleneksel MPPT algoritmalarla göre MPPT hızı, MPP bulma doğruluğu, gerçek MPP'yi bulabilme kabiliyeti, MPPT verimliliği ve TEG'den elde ettikleri maksimum güç açılarından üstünlüklerini, kurulacak deney düzeneği ile ispatlamak ve simülasyon sonuçları ile gerçek verileri doğrulamaktır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Termoelektrik Malzemeler

Termoelektrik malzemeler, TEG’lerde elektrik enerjisi üretmek için kullanılan özel malzemelerdir. Bu malzemeler, sıcaklık farklarından elektrik enerjisi üretebilen özelliklere sahiptir. Termoelektrik etkisi olarak bilinen Seebeck etkisi prensibi üzerine dayanarak, termoelektrik malzemeler farklı sıcaklıklara maruz kaldığında elektrik potansiyel farkı oluştururlar. Termoelektrik malzemelerin termodinamik performansı, birkaç önemli parametre ile tanımlanır. Bunlar Seebeck katsayısı, elektriksel direnç, termal iletkenlik ve termoelektrik güç faktörü (ZT) olarak adlandırılır. İyi bir termoelektrik malzeme için genellikle aşağıdaki parametre değerleri arzu edilir:

1. Yüksek Seebeck Katsayısı: Termoelektrik malzemenin yüksek bir Seebeck katsayısına sahip olması, sıcaklık farkına karşı daha yüksek bir elektrik potansiyel farkı üretebileceği anlamına gelir. İdeal olarak, yüksek Seebeck katsayısı pozitif veya negatif bir değere sahip olmalıdır.
2. Düşük Elektrik Direnci: Termoelektrik malzemenin düşük bir elektrik direncine sahip olması, elektrik akımının malzeme içinde daha verimli bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu da enerji kayıplarını azaltır ve termoelektrik verimliliği artırır.
3. Yüksek Termal İletkenlik: Termoelektrik malzemenin yüksek bir termal iletkenliğe sahip olması, sıcaklık farkının malzeme içinde daha hızlı ve etkili bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu, termoelektrik etkinliğini artırır ve termal enerjinin daha verimli bir şekilde dönüştürülmesini sağlar.
4. Yüksek Termoelektrik Güç Faktörü (ZT): Termoelektrik güç faktörü, malzemenin termoelektrik verimliliğini belirleyen bir parametredir. Yüksek ZT değeri, yüksek Seebeck katsayısı, düşük elektrik direnci ve yüksek termal iletkenlikle ilişkilidir. İdeal olarak, yüksek ZT değeri termoelektrik malzemenin yüksek performansını gösterir.

Bu parametrelerin kombinasyonu, bir malzemenin termoelektrik performansını belirler. İyi bir termoelektrik malzeme, yüksek Seebeck katsayısı, düşük elektrik direnci, yüksek termal iletkenlik ve yüksek ZT değerine sahip olmalıdır. Ancak, bu parametrelerin bir arada yüksek değerlere sahip olması zordur ve genellikle bir performans-değişim dengesi söz konusudur. Bu nedenle, termoelektrik malzemelerin geliştirilmesi sürecinde bu parametrelerin optimize edilmesi ve dengelenmesi önemlidir.

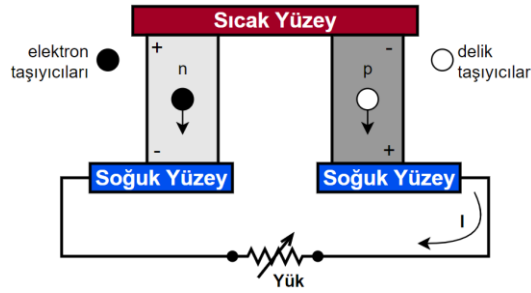
Geleneksel olarak, bismut tellürür ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) ve kurşun tellürür ( $\text{PbTe}$ ) gibi birçok malzeme termoelektrik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır [196]. Ancak, son yıllarda nanomalzemeler, yarıiletken nanokristaller ve kompleks oksitler gibi yeni malzeme sınıfları termoelektrik alanında dikkat çeken potansiyele sahip olmuştur. Malzeme bilimi ve nanoteknoloji araştırmalarındaki ilerlemeler, termoelektrik malzemelerin özelliklerini iyileştirme ve verimliliklerini artırma konusunda büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu gelişmeler, termoelektrik teknolojilerin daha geniş bir uygulama alanına yayılmasını ve enerji dönüşümünde daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir.

## **2.2.Termoelektrik Jeneratörler**

TEG'ler uçları arasındaki sıcaklık farkından elektrik üreten yarıiletken katı hal cihazlarıdır. Bu teknoloji ilk olarak 1821'de Thomas Johann Seebeck tarafından tanıtılmıştır. Termoelektrik etki olarak da bilinen "Seebeck etkisi" prensibi temel alınarak çalışırlar. Seebeck etkisi, farklı sıcaklıklara sahip iki farklı metalden oluşan bir devre üzerinde meydana gelen termodinamik bir fenomendir [197]. Bu etki, ısının bir metalden diğerine geçişinde elektrik potansiyel farkı oluşturduğunu gösterir. TEG'lerde genellikle farklı yarıiletken malzemelerden yapılan termoelektrik çiftler kullanılır. Bu çiftler, p tipi ve n tipi yarıiletkenlerin birleşiminden oluşur. p tipi yarıiletkenler, pozitif yüklü taşıyıcılar (delikler) içerirken, n tipi yarıiletkenler negatif yüklü taşıyıcılar (elektronlar) içerir. Bu farklı yarıiletkenlerin birleşimi, sıcak ve soğuk bölgeler arasında elektrik potansiyel farkı oluşturur. TEG'lerde kullanılan çiftler, genellikle seri ve paralel bağlantılarla bir araya getirilerek termoelektrik modüller oluşturulur. Bu modüller, sıcak ve soğuk yüzeylere sahip termal bir alanda yerleştirilir. Sıcak yüzey, yüksek sıcaklık kaynağına yakinken, soğuk yüzey ise daha düşük

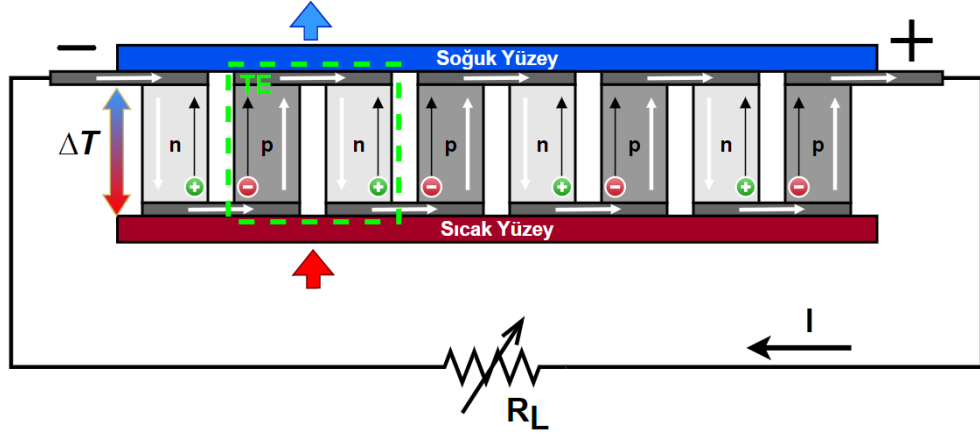
sıcaklığa sahip olan kısma temas eder. Sıcaklık farkı modül içindeki termoelektrik çiftlerde elektrik potansiyel farkı yaratır ve böylece elektrik akımı oluşur. Bu akım, dış devre üzerinde yükü hareket ettirerek elektrik enerjisi üretir. TEG'lerin verimi, kullanılan malzemelerin termoelektrik özellikleri ve sıcaklık farkının büyüklüğüne bağlıdır. TEG'lerin avantajları arasında diğer güç üretim sistemlerinden daha uzun kullanım ömrü, hareketli parça olmaması, çalışma sırasında zararlı kirletici emisyon olmaması, işletim ve bakım maliyetlerinin olmaması, çevre ile kimyasal reaksiyon olmaması (yani çevre dostu), güvenilir çalışma, katı hal çalışması ve düşük termal enerji potansiyelinin kullanılması yer alır [10].

TEG'lerin temel çalışma prensibi üretilen gerilimin sıcaklık gradyanı ile doğru orantılı olduğu termoelektrik malzemelerin Seebeck etkisi kavramına dayanmaktadır. TEG'ler, çıkış gücünü arttırmak için bir çok termoelemanın (TE) birbirine bağlanmasıyla yapılır [198]. TE'ler yarı iletken malzemelerdir ve termokupullar (TC) ile karıştırılmamalıdır. TE'lerin elektrik enerjisi üretim kapasiteleri TC'lere göre 19 kat fazladır [199]. Bu TE'ler gerilimin artırılması için birbirleri ile seri olarak bağlanırlar. Isı iletkenliğinin artırılması için de paralel olarak bağlanırlar. Şekil 2.1'de bir TE'nin temel yapısı görülmektedir.



**Şekil 2.1.** TE'nin temel yapısı

Bu birleşimden termoelektrik modül (TEM) oluşur. TEM'in uçları arasında bir yük bağlanır ve yüzeyleri arasında da bir sıcaklık farkı oluşturulur ise yük üzerinden bir güç alınır. TEM'in TEG modunda çalışması böylece sağlanmış olur. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Tipik TEG temel çalışma prensibi [200]

TE, ters Seebeck katsayısına sahip, birer uçları birleştirilen iki farklı malzemedir. TE'nin açık uçları arasındaki gerilim,  $\Delta T = T_H - T_C$  sıcaklık farkına bağlı olarak şu şekilde ifade edilir [201]:

$$V_{out} = N\alpha_{pn}\Delta T \quad (2.1)$$

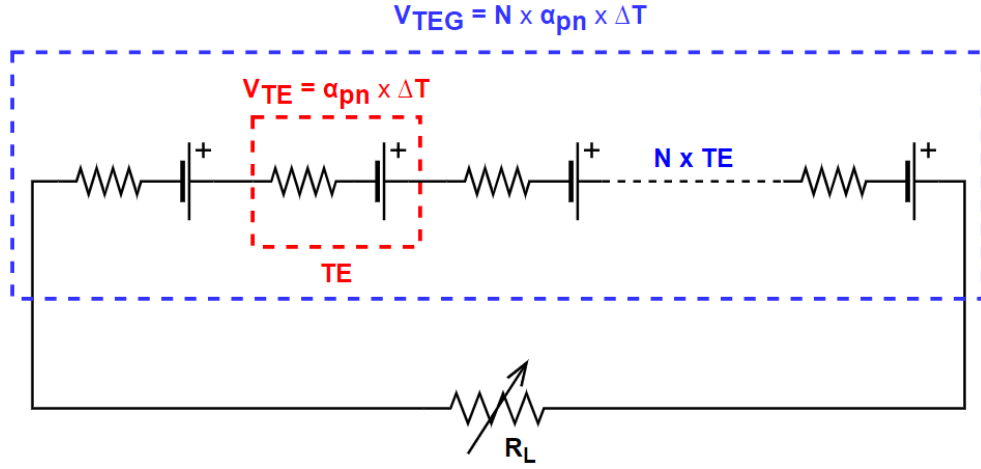
burada  $N$  seri bağlı TE sayısı,  $\alpha_{pn}$  TE'yi oluşturan n ve p tipi malzemelerinin Seebeck katsayıları ( $VK^{-1}$ ) ( $\alpha_{pn} = \alpha_n - \alpha_p$ ) ve  $\Delta T$ , K cinsinden TEG'in iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkıdır. TE'ler elektriksel olarak seri bağlandığında, TEG'ler tarafından sağlanan gerilim artsa da Şekil 2.3'te görüldüğü gibi toplam iç direnç de  $N$  ile doğru orantılı olarak artar. Dolayısıyla TEG'lerin iç direnci şu şekilde ifade edilir [201]:

$$R_{TEG} = \frac{\rho_n L_n}{S_n} + \frac{\rho_p L_p}{S_p} + 2 \frac{\rho_C L_C}{S_C} \quad (2.2)$$

burada  $\rho_n, \rho_p$  ve  $\rho_C$  sırasıyla, n, p ve metalik temasın elektriksel direncidir.  $L_n$  ve  $L_p$  TE'lerin ısı akışının geçtiği kol uzunlukları ve  $L_C$  temas uzunluğudur.  $S_n, S_p$  ve  $S_C$  sırasıyla, n ve p TE'lerinin ve birleşim yerinin kesit alanlarıdır. TEG'den elde edilen çıkış gücü ise şu şekildedir [201]:

$$P = V_{out}^2 \frac{R_L}{(R_{TEG} + R_L)^2} \quad (2.3)$$

burada  $R_L$  ve  $R_{TEG}$  sırasıyla dış yük ve iç dirençtir.



Şekil 2.3. TEG elektrik eşdeğer devresi [200]

### 2.3.DC-DC Dönüştürücüler

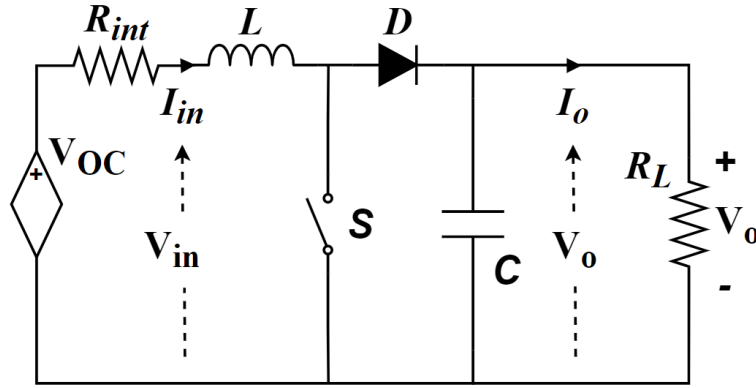
DC-DC dönüştürücüler bir doğru akım kaynağını bir gerilim seviyesinden diğer bir gerilim seviyesine dönüştüren elektronik devrelerdir. DC-DC dönüştürücülerin genel prensibi, elektrik enerjisinin kondansatörler ve bobinler gibi bileşenlere depolanmasını ve enerjinin yüklere salınmasını içerir. Enerji depolama ve bırakma süresi kontrol edilerek, dönüştürücü yükünde ortaya çıkan ortalama gerilim seviyesi kontrol edilebilir. Ortalama yük gerilim seviyesi güç kaynağının gerilim seviyesinden daha yüksek veya daha düşük olabilir. Bunun için ortalama DC çıkış gerilimi istenen bir seviyeye eşit olacak şekilde kontrol edilmelidir. Enerji depolama durumunun ve enerji salım durumunun dönüşü, BJT, IGBT ve MOSFET gibi yarıiletken anahtarlama elemanları ile gerçekleştirilir. Belirli bir giriş gerilimine sahip bir DC-DC dönüştürücüde, ortalama çıkış gerilimi, yarıiletken anahtarların açma ve kapama süreleri ( $t_{on}$  ve  $t_{off}$ ) ile belirlenir. Çıkış gerilimini kontrol etme yöntemlerinden biri, sabit bir frekansta anahtarlama (dolayısıyla, sabit bir anahtarlama periyodu  $T_s = t_{on} + t_{off}$ ) ve ortalama çıkış gerilimini kontrol etmek için anahtarın açık kalma süresini ayarlamayı kullanır. Bu yöntem darbe genişlik modülasyonu (PWM) anahtarlama olarak adlandırılır. Hemen hemen tüm modern DC-DC dönüştürücüler, yük gücü üzerinde doğrusal kontrol avantajı nedeniyle anahtarlama kontrol sinyali olarak PWM kullanır. Anahtarlama periyodu  $T_s$  ve

anahtarlama elemanının iletim süresi  $t_{on}$  ile ifade edilirse, PWM sinyalinin görev döngüsü aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.4)$$

### 2.3.1. Yükselten Dönüştürücü

Yükselten dönüştürücü DC gerilim seviyesini düşük gerilimden yüksek gerilim seviyesine çıkaran dönüştürücüler grubundadır. Yükselten dönüştürücü, çıkış gerilimini yükseltirken akımı düşüren bir DC-DC dönüştürücüdür. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, tipik olarak iki yarıiletken eleman, bir enerji depolama elemanı, bir kondansatör, bobin veya bu ikisinin kombinasyonunu içeren bir devreye sahiptir ve anahtar durumundaki güç beslemesi (SMPS) sınıfına girmektedir. Gerilim dalgalanmasını azaltmak için, dönüştürücünün girişine ve çıkışına kondansatörlerden ve/veya bobinlerden yapılan filtreler eklenir.



Şekil 2.4. DC-DC Yükselten dönüştürücü

Yükselten dönüştürücüyü çalıştıran temel ilke, bir bobinin, bobin manyetik alanında depolanan enerjiyi artırarak veya azaltarak akımdaki değişikliklere direnme eğilimidir. Yükselten dönüştürücüde çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha yüksektir.  $S$  anahtarı iletimdeyken, akım bobinden saat yönünde akar. Bobin bir manyetik alan oluşturur ve bir miktar enerji depolar. Bobinin sol tarafının polaritesi pozitifdir.  $S$  anahtarı iletimde değilken, empedans yükseldikçe akım azalır. Yüke doğru akımı korumak için önceden oluşturulan manyetik alan enerjisi azaltılır. Böylece bobinin polaritesi ters çevrilir. Sonuç olarak, iki kaynak seri halde olur ve

kondansatörün diyot üzerinden şarj edilmesi için daha yüksek bir gerilim oluşur. S anahtarı yeterince hızlı anahtarlanırsa, bobin şarj aşamaları arasında tam olarak boşalmaz ve yük, S anahtarı iletimde değilken her zaman tek başına giriş kaynağından daha büyük bir gerilim görülür. Ayrıca S anahtarı iletimde değilken yüke paralel kondansatör bu birleşik gerilime yüklenir. S anahtarı daha sonra iletime geçtiğinde, kondansatör yüke gerilim ve enerji sağlayabilir. Bu süre boyunca, engelleme diyotu, kondansatörün S anahtarı aracılığıyla deşarj olmasını engeller. S anahtarı, kondansatörün çok fazla deşarj olmasını önlemek için yeterince hızlı anahtarlanmalıdır. Yükselten dönüştürücünün transfer fonksiyonu şu şekildedir;

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.5)$$

## 2.4.Mikrodenetleyiciler

Mikrodenetleyiciler (MCU), gömülü sistemler olarak adlandırılan bilgisayar sistemlerinde kullanılan önemli bileşenlerdir. MCU'lar, merkezi işlem birimini (CPU), rastgele erişimli belleği (RAM), aritmetik lojik birimi (ALU) ve giriş-çıkış (I/O) birimini tek bir tümleşik devrede birleştiren entegre devrelerdir. Bu sayede, MCU'lar kendi içerisinde algoritmaları çalıştırarak giriş bilgilerine dayalı olarak çıkışları yönlendirebilirler. MCU'ların dönüştürücülerde kullanım amacı, anahtarlama elemanlarının darbe genişlik modülasyonu (PWM) yöntemiyle açma-kapama işlemlerini kontrol etmektir. PWM, belirli bir frekansta anahtarlama elemanının çalışmasını sağlar. Bu sayede, enerji dönüşümü ve güç kontrolü gibi uygulamalarda istenen çıkışı elde etmek mümkün olur. MCU'lar aynı zamanda MPPT algoritmalarını da içerebilir, bu da enerji üretiminde kullanılan sistemlerde verimliliği artırmak için önemlidir. MCU'ların PWM çıkışları genellikle doğrudan anahtar elemanına bağlanmaz. Bunun yerine, bir anahtar sürücü elemanı kullanılarak PWM sinyalleri anahtar elemanının kontrolünü sağlar. Anahtar sürücü elemanları, MCU'nun çıkış sinyallerini yükselterek ve/veya şekillendirerek anahtar elemanlarının doğru bir şekilde çalışmasını sağlar.

## 2.5. Termoelektrik Jeneratörden Maksimum Güç Elde Edilmesi

TEG'den maksimum gücün ( $P_{TEG\_MAX}$ ) çekilebilmesi için bağlanılan yük ( $R_L$ ) ile TEG iç direncinin ( $R_{TEG}$ ) eşit olması gerekir. Bu durum yük karşılaşması olarak isimlendirilir ve  $R_L = R_{TEG}$  eşitliği sağlandığı anda TEG gücü MPP'ye ulaşır. TEG'in elektriksel eşdeğer devresi sıcaklığa bağımlı bir gerilim kaynağı ve bir iç dirençten oluşur. Şekil 2.5'te TEG elektriksel eşdeğer devresi verilmiştir ve görüldüğü gibi TEG'den güç çekmek için TEG'in uçlarına bir yük bağlanır.

TEG'den alınan güç ( $P_{TEG}$ ):

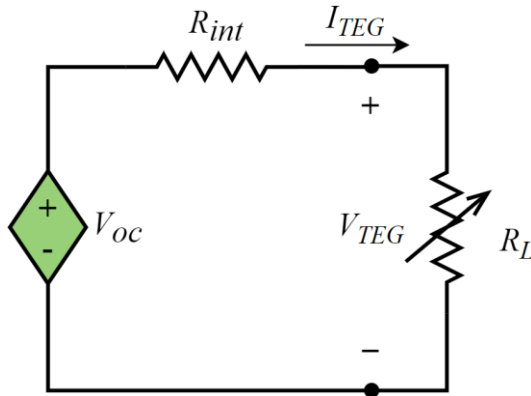
$$P_{TEG} = V_{TEG} I_{TEG} \quad (2.6)$$

burada  $I_{TEG}$ , TEG çıkış akımı ve  $V_{TEG}$ , TEG çıkış gerilimidir.  
TEG'in iç direnci  $R_{TEG}$ :

$$R_{TEG} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (2.7)$$

burada  $I_{SC}$  kısa devre akımı ve  $V_{OC}$  açık devre gerilimidir. TEG'e yük bağlı iken çıkış akımı aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

$$I_{TEG} = \frac{V_{OC} - V_{TEG}}{R_{TEG}} \quad (2.8)$$



Şekil 2.5. Termoelektrik jeneratör elektriksel eşdeğer devresi ve yük bağlantısı

TEG'den elde edilen güç  $P_{TEG}$  yalnızca gerilimler ve TEG iç direnci  $R_{TEG}$  cinsinden ifade edilirse:

$$P_{TEG} = \frac{V_{TEG}(V_{OC} - V_{TEG})}{R_{TEG}} \quad (2.9)$$

şeklinde olur. TEG'den alınan gücün MPP'deki türevi sıfırdır:

$$\frac{dP}{dV_{TEG}} \big|_{max} = \frac{V_{OC} - 2V_{TEG}}{R_{TEG}} = 0 \quad (2.10)$$

burada  $V_{OC}$  TEG'in açık devre gerilimini,  $V_{TEG}$  TEG'den elde edilen gerilimi ifade etmektedir. Bu nedenle, MPP'deki TEG çıkış gerilimi ( $V_{TEG/MAX}$ ) TEG açık devre geriliminin ( $V_{OC}$ ) yarısıdır. Maksimum çıkış gücü, yük direnci ve TEG'in iç direnci birbirine eşit olduğunda alınır:

$$V_{TEG/MAX} = \frac{V_{OC}}{2} \quad (2.11)$$

$$P_{TEG\_MAX} = \frac{V_{OC}^2}{4R_{TEG}} \quad (2.12)$$

Ayrıca, TEG'den elde edilecek maksimum güç ( $P_{TEG\_MAX}$ ) kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ) ve TEG iç direnci ( $R_{TEG}$ ) cinsinden de aşağıdaki gibi verilebilir:

$$P_{TEG\_MAX} = \frac{I_{SC}^2 R_{TEG}}{4} \quad (2.13)$$

TEG akımı  $I_{TEG}$  ve TEG gerilimi  $V_{TEG}$  yüke bağlı olarak doğrusal değişir. MPP kısa devre akımının ( $I_{SC}$ ) veya açık devre geriliminin ( $V_{OC}$ ) yarısının izlenmesiyle de elde edilebilir. Bu durumda MPP gerilimi  $V_{MPP}$  ve MPP akımı  $I_{MPP}$  aşağıdaki eşitlikle açıklanır:

$$V_{MPP} = V_{TEG/MAX} = \frac{V_{OC}}{2}$$

$$I_{MPP} = I_{TEG/MAX} = \frac{I_{SC}}{2}$$
(2.14)

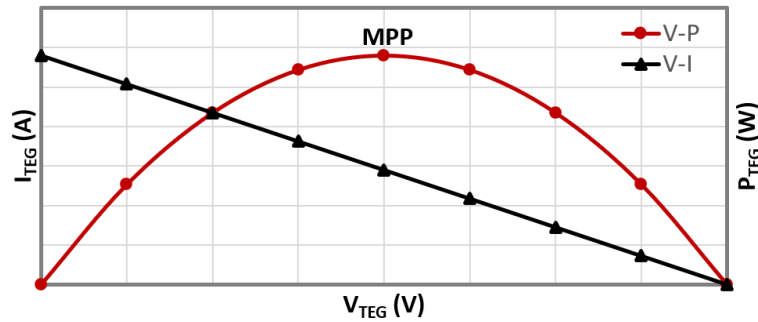
TEG maksimum çıkış gücü  $P_{TEG\_MAX}$  TEG kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ) ve açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ) cinsinden de yazılabilir:

$$P_{TEG\_MAX} = \frac{V_{OC} I_{SC}}{4}$$
(2.15)

Sistemin verimi ( $\eta$ ) yükün aldığı gücün ( $P_{çıkış}$ ) TEG'den verilen güce ( $P_{giriş}$ ) oranıdır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

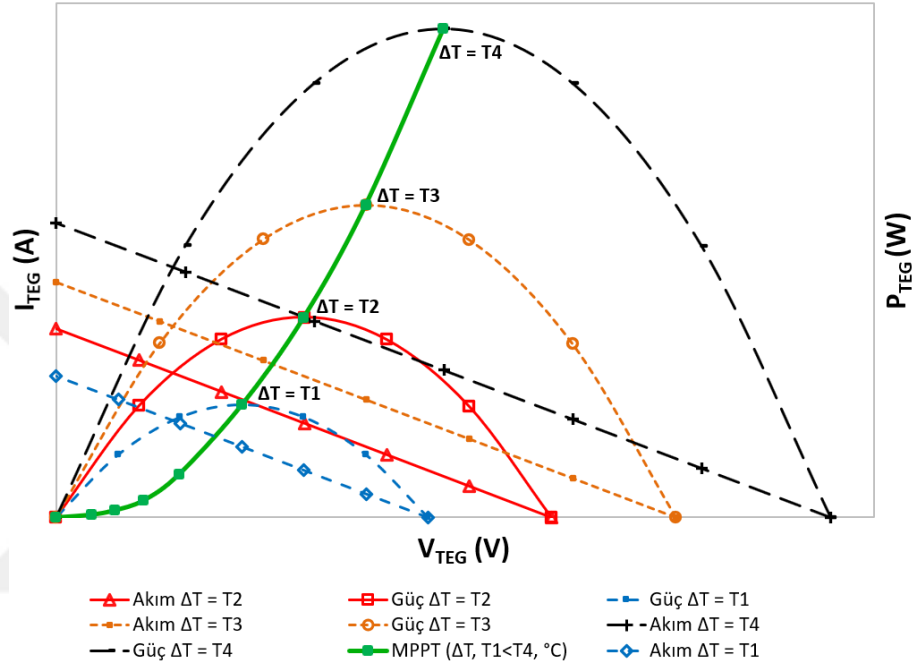
$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}}$$
(2.16)

MPPT yöntemlerinin uygulanabilmesi için, kullanılacak MPPT yöntemine göre izlenecek parametreler belirlenip sürekli izlenmelidir. Yük değeri değiştikçe alınan güç değeri de değişir. Bu yük sonsuz olduğunda TEG uçlarından açık devre gerilimi ölçülür. Benzer şekilde, yük sıfır olduğunda TEG uçları kısa devre olur ve kısa devre akımı TEG'den geçer. MPPT yöntemlerini uygulayabilmek için TEG'in yük direncinin bir fonksiyonu olarak gerilim-akım (V-I) ve gerilim-güç (V-P) karakteristiklerini de yorumlamak gerekir. Şekil 2.6'da tipik bir TEG'in V-I ve V-P karakteristikleri gösterilmiştir.



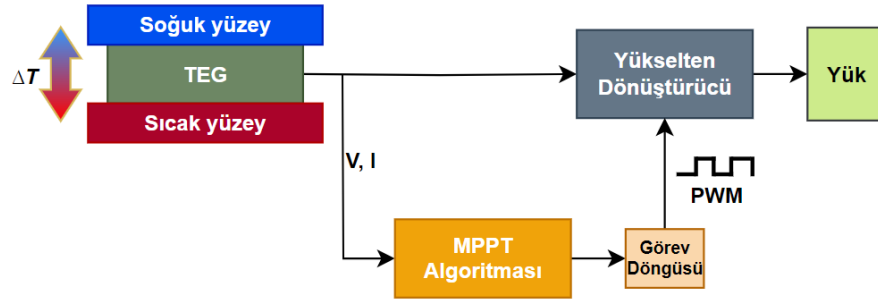
**Şekil 2.6.** Yükün bir fonksiyonu olarak akım-gerilim ve güç eğrisi

MPP noktasında TEG'den alınan güç maksimumdur. Bu güç yük değişimlerine duyarlılık gösterdiği gibi aynı zamanda TEG yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ile de doğru orantılıdır. Sıcaklık farkı arttıkça TEG'den alınan güç değeri de artar ve MPP değerinde değişme olur. Şekil 2.7'de değişik sıcaklık farkı değerleri için yük direncinin bir fonksiyonu olarak TEG'in  $V-I$  ve  $V-P$  eğrileri ile birlikte MPP değerinin de değiştiği gösterilmiştir.



**Şekil 2.7.** Yük direncinin ve sıcaklık farkının bir fonksiyonu olarak TEG'in MPP değerleri

TEG'lerden maksimum güç elde etmek için kullanılan metodoloji en basit haliyle Şekil 2.8'de yer almaktadır. Sıcaklık farkı ile TEG'lerin ürettiği gerilim ve akım değerleri ölçülerek MPPT algoritmasına gönderilir. MPPT algoritması bu verileri işleyerek uygun bir görev döngüsü doluluk oranı ayarlar. Görev döngüsü doluluk oranına göre elde edilen bir PWM sinyali ise yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanına gönderilerek dönüştürücünün çalışması sağlanır. Son olarak dönüştürücüye bağlı yük üzerinden maksimum güç elde edilmiş olur.



Şekil 2.8. MPPT metodolojisi

### 3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Jeneratör

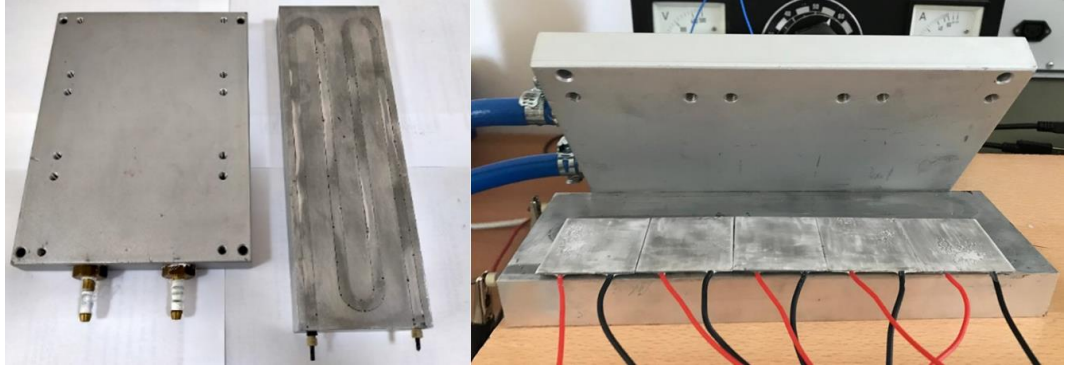
Bu tez çalışmasında kullanılan TEG sistemi kurulumunda Kyroterm marka TGM-199-1.4-0.8 modüller kullanılmıştır. Bu modüller düşük sıcaklık güç üretim modülleri olarak isimlendirilmektedir. Bunların sıcak yüzey sıcaklığı 220°C değerine kadar artırılabilmesine rağmen, üretici firma en yüksek 200°C sıcak yüzeye uygulanmasının daha iyi olacağını önermiştir. Ayrıca kullanılan yüzeyin düz ve pürüzsüz olmasına ve 12–15 kg/cm<sup>2</sup> değerine kadar bir basınç ile TEG modüllerinin sıcak ve soğuk yüzey plakaları ile sıkıştırılmasına özen gösterilmesini istemiştir. Kyroterm firması soğuk yüzey sıcaklığını 30°C, 50°C ve 80°C olmak üzere üç farklı değerde sabit tutarak sıcak yüzey sıcaklıklarını 200°C değerine kadar kademe kademe artırılmış bir şekilde TEG modüllerinin çıkış karakteristiklerini kullanım kitapçıklarında yayınlamıştır. Bu sıcaklıklarda %5 toleransın olabileceğini göz önünde bulundurulmasının iyi olacağını belirtmiştir. TEG modülünün özellikleri ve bu modül ile kurulan TEG sisteminin özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1.** TEG modülü özellikleri

| Özellikler                            | TGM-199-1.4-0.8 |
|---------------------------------------|-----------------|
| TE çifti                              | 199             |
| Termoelektrik modül                   | 1               |
| MPP’deki çıkış gücü ( $P_{MPP}$ )     | 11,4 W          |
| MPP’deki çıkış gerilimi ( $V_{MPP}$ ) | 4,1 V           |
| MPP’deki çıkış akımı ( $I_{MPP}$ )    | 2,8 A           |
| Açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ )      | 8,19 V          |
| Kısa devre akımı ( $I_{SC}$ )         | 5,61 A          |
| İç direnç ( $R_{TEG}$ )               | 1,46 $\Omega$   |
| Sıcak taraf sıcaklığı ( $T_{hot}$ )   | 200°C           |
| Soğuk taraf sıcaklığı ( $T_{cold}$ )  | 30°C            |

### 3.1.2. Soğutma-Isıtma Blokları

TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarını sağlamak için iki alüminyum blok kullanılmıştır. Soğutma bloğu içinde soğutma kanalları bulunmaktadır ve boyutları  $13 \times 20 \times 1,5$  cm'dir. İki giriş-çıkış bağlantısı, soğutma hortumlarının kolayca takılabilmesi için kanalların giriş ve çıkışlarına yerleştirilmiştir. Sistem, şehir şebeke suyu yardımıyla soğutulmuştur ve su sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Bu sayede TEG'lerin soğuk yüzey sıcaklığı, yaklaşık  $20^{\circ}\text{C}$ 'ye sabitlenmiştir. Soğutma suyunun debisi, musluğun açılması veya kapatılması ile ayarlanmıştır. Dört adet TEG'in sıcak yüzey sıcaklığı için  $8 \times 24 \times 2$  cm ebatlarındaki alüminyum bloklar kullanılmıştır. Bu blokların içinde kanallar açılarak,  $50\ \Omega$  değerinde krom-nikel tel ısıtıcı dirençleri yerleştirilmiştir. 220 V AC gerilim ile en yüksek yüzey sıcaklığı değeri  $250^{\circ}\text{C}$  olarak ölçülmüştür. Bu değer, TEG modülleri için önerilen sıcaklık değerinden yüksektir ve bu nedenle 1 kVA gücünde bir oto trafosu kullanılarak gerilim ayarlanmıştır. Çıkış gerilimi 140 V AC olduğunda, TEG modülleri için sıcak yüzey sıcaklığı yaklaşık  $170^{\circ}\text{C}$  olmuştur. Sonuç olarak, soğutma ve ısıtma bloklarının sıcaklık farkı yaklaşık  $150^{\circ}\text{C}$ 'dir. Şekil 3.1, soğutma-ısıtma bloklarının ve TEG yerleşimlerinin detaylarını göstermektedir.



Şekil 3.1. Sistemde kullanılan soğutma-ısıtma blokları ve TEG yerleşimi

### 3.1.3. ATmega2560 Mikrodenetleyicisi

Microchip firması tarafından üretilen ATmega2560 MCU, 8 bitlik kaydedicilere sahiptir ve sistemde National Instruments NI USB-6211 veri edinim kartından gelen görev döngüsü ( $D$ ) değerini 31,39 kHz değerindeki PWM değerine çevirerek 9 numaralı pininden TC4420 MOSFET sürücüsüne göndermek için kullanılmaktadır. ATmega2560 düşük güç tüketen bir MCU'dur ve toplamda 135 assembler komutu ile programlanabilir. Bu komutların işlenmesinin çoğunu tek komut saykılında gerçekleştirir. Ayrıca, 32 tane genel amaçlı çalışma saklayıcısına sahip olması ve tüm işlemlerin statik çalışma ile gerçekleşmesi de dikkat çekicidir. ATmega2560, 16 MHz'ye kadar osilatör girişine izin verir ve 64 KB program hafızası, 4 KB EEPROM hafızası ve 8 KB SRAM hafızası ile kullanıcılara geniş bir depolama alanı sunar. EEPROM hafıza 100 bin defa silinip yazılabilirken program hafızasına 10 bin defa program yüklenilip silinebilir. Ayrıca, yazılan programlara kod koruması konulabilmesi ve opsiyonel olarak 64 KB'lık harici hafıza takılabilmesi de mümkündür.

ATmega2560 MCU, çevresel donanımlar olarak birçok donanımı içinde barındırmaktadır. İki tane 8 bitlik frekans bölme ve karşılaştırma modlarına sahip zamanlayıcı/sayıcı, ek olarak yine 16 bitlik frekans bölme, karşılaştırma ve yakalama modlarına sahip zamanlayıcı/sayıcı bulunmaktadır. Gerçek zaman saati barındırmak için ayrı bir osilatör kullanır. 8 tane PWM kanal çıkış birimleri, altıncı ve on ikinci kanallarının çözünürlükleri 2 ve 16 bit olarak ayarlanabilen, PWM kanallarına ihtiyaç duyanlar için uygun bir seçenektir. Ayrıca, 16 adet analog giriş, 4 seri arayüz ve ana veya ikinci olarak çalıştırılabilen seri çevresel arayüz haberleşmesi de bulunmaktadır.

### 3.1.4. National Instruments NI USB-6211 Veri Edinim Kartı

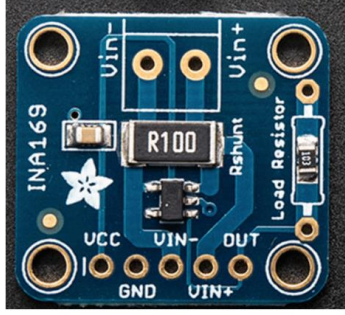
NI USB-6211, veri edinim kartları arasında yer alan bir üründür. Bu kart, taşınabilir bir şekilde kullanılarak sistemlerin giriş-çıkış işlemlerinin yapılmasına olanak sağlar. USB-6211, Windows, Linux ve Mac işletim sistemleri ile LabVIEW, Measurement Studio ve LabWindows/CVI programlarının altında kullanılabilir. Kart, 16 adet analog giriş kanalı ve 2 adet analog çıkış kanalı ile birlikte gelir. Örnekleme hızı ve yenileme oranı 250 kS/s olarak belirlenmiştir. Analog saklayıcılarının

           ise 16 bittir. USB-6211 ayrıca, 4 dijital giriş kanalı ve 4 tane dijital çıkış kanalına da sahiptir. Analog girişler için 2,69 mV değerinde doğruluk sa lar ve 32 bit           nde 2 tane sayaç içerir. USB 2.0 yüksek hızlı veya tam hızlı veri yolu arayüzü kullanır. Bağlantılar için çok işlevli vidalı terminaller kullanılmaktadır. Bu cihaz 4,5 V ile 5,25 V arasında bir giriş gerilimi ister. Cihazın fiziksel boyutları 16,9 × 9,4 × 3 cm'dir. Çalışma koşullarının 0-40 C arasında olması, 15 dk. ısınması ve yılda iki defa kalibrasyonunun yapılması  onerilmektedir.

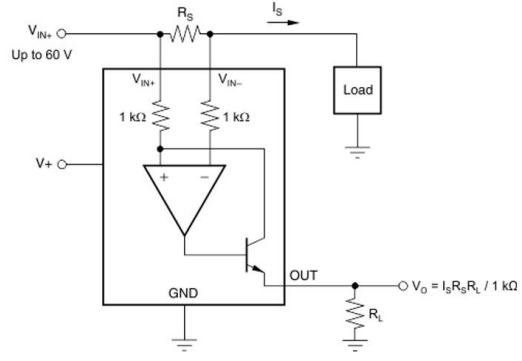
NI USB-6211 veri edinim kartı, MATLAB/Simulink  yazılımı ile kullanılarak verilerin alınmasını ve diğer  evre birimlerine gönderilmesini kolaylaştırmaktadır. MPPT algoritmalarının ürettiği görev döngüsü değeri, bu kart aracılığıyla MATLAB/Simulink  ortamından kart üzerine iletilmiştir. TEG'in ürettiği akım ve gerilim değerleri ise analog bir devre ile bu karta taşınmış ve kart aracılığıyla MPPT algoritmaları için MATLAB/Simulink  ortamına aktarılmıştır. TEG  ıkış akımı için NI USB-6211 veri edinim kartının analog giriş 4, TEG  ıkış gerilimi için analog giriş 5 numaralı kanalları kullanılmıştır. Ayrıca, y k üzerindeki akım ve gerilim değerleri de bu veri edinim kartı ile taşınmıştır. Analog giriş 2 ve 3 numaralı kanalları kullanarak 0-5V DC aralığına sınırlandırılan bu değerler, MATLAB/Simulink  ortamında işlenmek üzere karta ulaştırılmıştır. D değeri ise MATLAB/Simulink  yazılımından analog çıkış 0 kanalı ile ATmega2560 MCU'ya gönderilmiş ve burada 0-255 arasına çevrilmiştir.

### **3.1.5. TEG  ıkış Akım Algılama Sensörü**

INA169 sensörü TEG  ıkış akımının     lmesi için kullanılmıştır ve LM358 ile 11 kat artırılarak NI USB-6211 kartının AI4 kanalına ulaştırılmıştır. Bu akım algılama sensörü yüksek kenarlı, tek kutuplu, akım şönt monit r d r ve giriş ortak mod gerilim aralığı geniştir. INA169'un g   kaynağı gerilimi ve giriş ortak modu bağımsızdır ve 2,7 V ile 60 V arasında değişebilir. Durağan akımının 60  A olması, g   kaynağının minimum hata ile akım     m ş nt n n her iki tarafına ba lanması olarak sa lar. Cihaz, diferansiyel giriş gerilimini çıkış akımına dönüştürür. INA169, SOT23-5 paketinde mevcuttur ve -40 C ila +85 C endüstriyel sıcaklık aralığı için kullanılabilir. şekil 3.2a'da INA169 akım algılama sensörü ve şekil 3.2b'de bağlantı devresi gösterilmektedir.



(a)

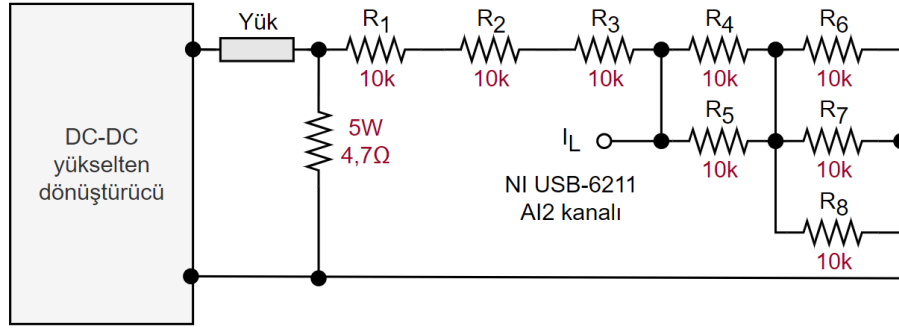


(b)

Şekil 3.2. (a) INA169 Akım algılama sensörü (b) bağlantı devresi

### 3.1.6. Dönüştürücü Çıkışı Akım Algılama Sensörü

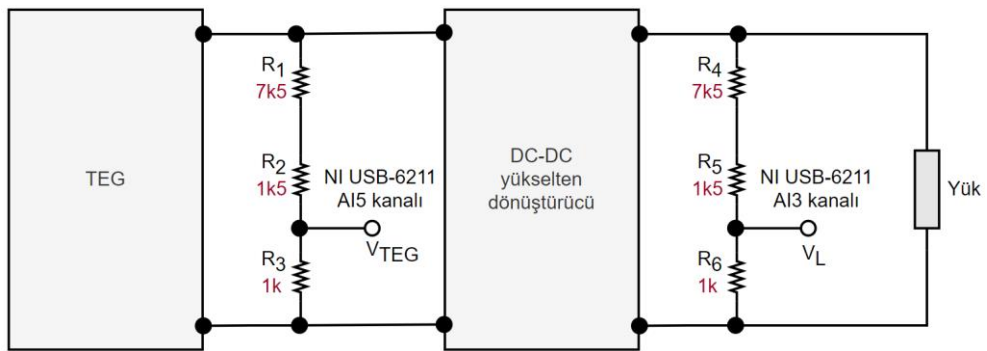
Dönüştürücü devresinin çıkışındaki akımı ölçmek için gerilim bölücü devre kullanılmıştır. Gerilim bölücü devresinin toplam direnci 38,3 k $\Omega$ 'dur ve bunun için sekiz adet 0,25 W gücündeki 10 k $\Omega$  direnç kullanılmıştır. Bu dirençler üç tanesi paralel, iki tanesi paralel bağlıdır. Bu iki paralel devre birleştirilerek 8,3 k $\Omega$ 'luk bir direnç elde edilmiştir. Seri olarak bağlanan üç adet 10 k $\Omega$  dirençle birlikte, 38,3 k $\Omega$ 'luk toplam direnç oluşturulmuştur ve ölçüm sinyali 8,3 k $\Omega$  üzerinden alınmıştır. Gerilim bölücü devre ile 8,3 k $\Omega$  direncinin toplam direnci 1/4,6 oranına sahip olduğundan, gerilim 4,6 kat azaltılmıştır. Bu azaltılmış gerilim, NI USB-6211 kartının AI2 kanalına ulaştırılmış ve MATLAB/Simulink®'te değeri 4,6 ile çarpılmıştır. Gerilim bölücü devresinin toplam direncine paralel bağlanan 4,7  $\Omega$ 'luk taş direnç kullanılmış ve gerilim bölücü devresi üzerinde düşen gerilim, aynı zamanda taş direnç üzerinde de düşmüştür. Bu gerilim değeri, MATLAB/Simulink®'te 4,6 ile çarpılarak gerçek gerilim değeri elde edilmiştir. Bu gerilim değeri 4,7  $\Omega$  üzerinde düşen gerilim değerine eşittir ve akım değeri bu değerin 4,7'ye bölünmesiyle bulunmuştur. INA169 yüksek taraf akım sensörü gerilim kaynağının yüksek tarafına bağlanması gerektiğinden, bu dönüştürücünün yüksek tarafında kullanılamamıştır. Şekil 3.3'te dönüştürücünün çıkışındaki akım algılama sensörü gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Dönüştürücü çıkışındaki akım algılama sensörü

### 3.1.7. TEG Çıkışı ve Dönüştürücü Çıkışı Gerilim Algılama Sensörleri

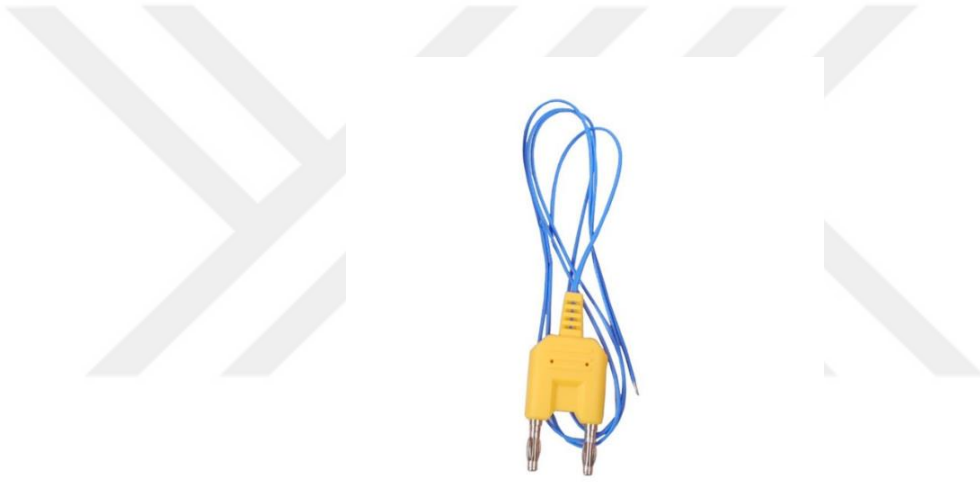
İki adet gerilim bölücü devre kullanılarak TEG ve dönüştürücü çıkışındaki gerilim değerleri ölçülmüştür. Gerilim bölücü devrelerinde kullanılan dirençlerin toplam değeri 10 kΩ'dur. TEG'in üretebileceği maksimum gerilim değeri 50 V olarak kabul edilmiştir. Bu durumda, TEG çıkışındaki gerilim değerini ölçmek için kullanılan gerilim bölücüsüne bağlı NI USB-6211 kartının AI5 kanalına gelen analog veri,  $50 \text{ V} \times 1 \text{ k}\Omega / (7,5 \text{ k}\Omega + 1,5 \text{ k}\Omega)$  eşitliği ile hesaplanmaktadır. Aynı şekilde, dönüştürücü çıkışındaki gerilim değeri de 50 V olduğunda, gerilim bölücü devresine bağlı olan NI USB-6211 kartının AI3 kanalına gelen analog veri 5 V olacaktır. TEG ve dönüştürücü çıkışındaki gerilim değerlerinin ölçülmesi için kullanılan gerilim bölücü devreleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. TEG çıkışındaki ve dönüştürücü çıkışındaki gerilim sensörleri

### 3.1.8. Sıcaklık Sensörleri

Termokupllar, iki farklı metal alaşımın kaynatılmasıyla oluşan sıcaklık sensörleridir. Birleştirilen uçlar ısıtıldığında açıkta kalan soğuk uçlarda sıcaklık farkından dolayı mV mertebesinde gerilim meydana gelir. Bu gerilim değeri kullanılan metal alaşımların sıcaklığa verdiği tepkiye göre değişir. Termokuplların maliyetleri oldukça düşük ve kullanım alanları geniştir. TEG'lerin sıcak ve soğuk yüzeylerinin sıcaklıklarının belirlenmesi için BRYMEN BKP-60 ölçü aleti ile kullanılabilen iki tane nokta uçlu K tipi Termokuplun probu mevcuttur. Bu probun yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir. TEG'lerin sıcaklık sensörü olarak kullanılabilecek tipleri ve sıcaklık değerleri Tablo 3.2'te verilmiştir.



Şekil 3.5. K tipi BRYMEN BKP-60 ölçü aleti termokupl probu

Tablo 3.2. Termokupl türleri ve çalıştıkları sıcaklık değerleri

| Tür          | Sıcaklık değeri °C<br>(sürekli) | Sıcaklık değeri °C (ani) |
|--------------|---------------------------------|--------------------------|
| K            | 0–1100                          | -180–1300                |
| J            | 0–750                           | -180–800                 |
| N            | 0–1100                          | -270–1300                |
| R            | 0–1600                          | -50–1700                 |
| S            | 0–1600                          | -50–1750                 |
| B            | 200–1700                        | 0–1820                   |
| T            | -185–300                        | -250–400                 |
| E            | 0–800                           | -400–900                 |
| Kromel-Au/Fe | -272–300                        | Uygulanabilir değil      |

### 3.2.Yöntemler

#### 3.2.1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Termoelektrik Modül Simulink® Modeli

TEG sistemlerinde kullanılan modüllerin verimliliği düşük olduğundan, güç koşullandırma yöntemleri kullanılarak TEG sistemlerinden maksimum güç elde etmek gerekmektedir. TEG'lerden gelen güç yük direnci aracılığıyla transfer edildiğinden, Denklem 2.3'te güç, iç direnç ve yük direnci cinsinden yazılmıştır. Maksimum güç transferi için yük direnci ve dahili direnç eşit olmalıdır ( $R_L = R_{TEG}$ ) [12].

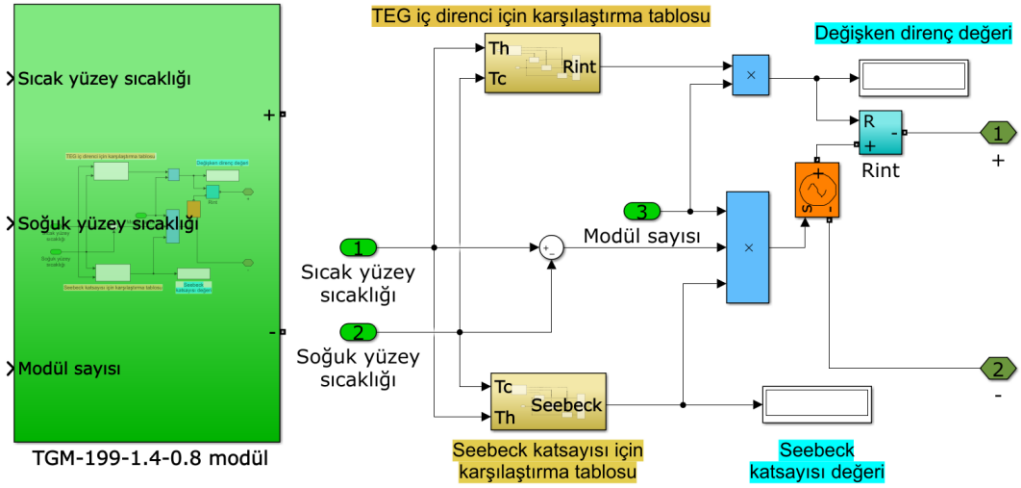
Seebeck fenomeni kullanılarak geliştirilen TEG'ler, atık ısıнын enerjiye dönüştürülmesini sağlar ve performansları doğrudan yüzey sıcaklıklarının farkına bağlı olarak değişir. TEG'ler genellikle sıcaklık farklarının doğrusal olmadığı bölgelerde kullanılır. TEG'in verimliliği de sıcaklık farkına doğrudan bağlı olduğundan, ikinci dereceden bir fonksiyon olarak ifade edilir ve doğrusal olmayan bir ilişkiye sahiptir. Bu nedenle, MPPT yöntemleri üzerinde çalışırken, TEG verimliliğinin sıcaklıkla doğrusal olmayan değişimini dikkate almak gereklidir. Sıcaklık değişimi, TEG'ler tarafından üretilen gücü değiştirmenin yanı sıra TEG'lerin iç direncini [13] ve Seebeck katsayılarını da [202] değiştirir.

TEG'lerden elde edilen güç genellikle sıcaklık farkına göre formüle edilir. Ayrıca, Denklem 2.1'den anlaşılabacağı gibi, çıktı gücünü doğrudan etkileyen diğer bir parametre de formülde yer alan Seebeck katsayısıdır. Seebeck katsayısı, sıcaklığa bağlı olarak değişen bir parametredir. Eğer Seebeck katsayısı her koşulda sabit kalsaydı, sıcaklık farkının aynı olduğu her sıcak yüzey-soğuk yüzey kombinasyonu için aynı gücü elde etmek mümkün olurdu. Ancak, bu durumun mümkün olmaması, Seebeck katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini kanıtlamaktadır. Ancak birçok simülasyon çalışmasında Seebeck katsayısı ya hiç belirtilmemekte ya da sabit bir Seebeck katsayısı kullanılarak simülasyonlar yapılmaktadır. TEG sistemlerinde kullanılan TEG modüllerinin Seebeck katsayıları ve iç dirençleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinde, sistemde kullanılan dönüştürücüler vasıtasıyla empedans eşleştirme işlemi yapılarak maksimum güç elde edilebilir. Bu, malzemelerin doğası gereği gerçek hayatta otomatik olarak gerçekleşir. Ancak sanal ortamdaki simülasyonlardan daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için doğada otomatik olarak gerçekleşen olayların

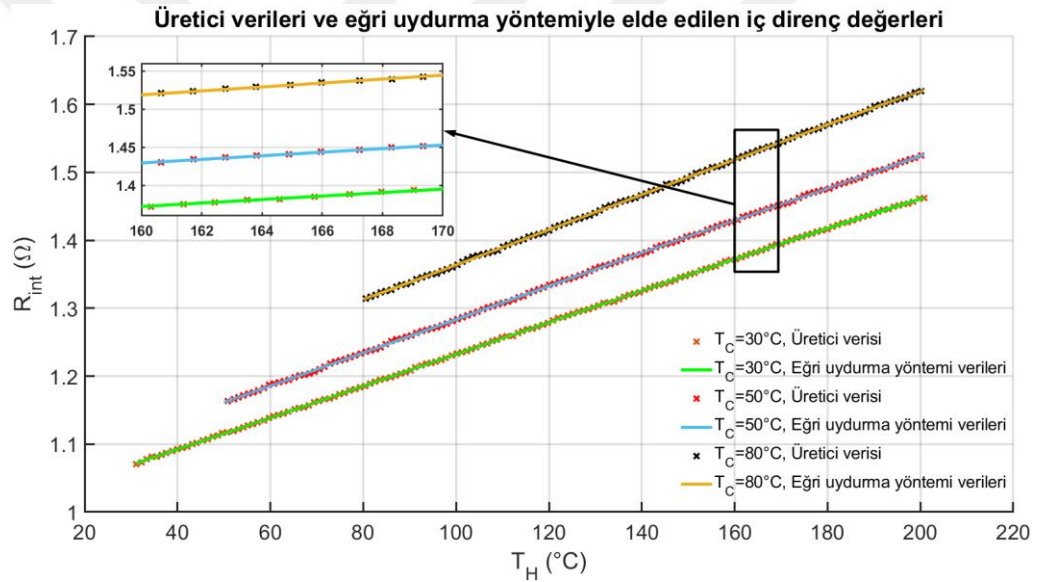
da modellenmesi gerekmektedir. Özetle, TEG'lerin yapısında yer alan TE malzemelerin sıcaklığa bağlı değişen iç direnç ve Seebeck katsayıları, gerçekçi ve doğru simülasyon sonuçları elde edebilmek için simülasyon ortamına da uyarlanmalıdır.

Tez çalışmasının deney aşamasında kullanılan Kyroterm marka TGM-199-1.4-0.8 termoelektrik modül, modülün üretici verileri kullanılarak MATLAB/Simulink®'te modellenmiştir. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 modülünün üretici verilerinin yer aldığı veri sayfası EK 1'de yer almaktadır. Birçok çalışma sabit sıcaklıkta gerçekleştirildiği için, sıcaklığa bağlı değişimlerinin göz önünde bulundurulmadığı TEG'in iç direnci ve Seebeck katsayısı, sıcaklığa bağlı değişecek şekilde modele dahil edilmiştir. Bu şekilde, TEG modülüyle kurulabilecek herhangi bir TEG sisteminin sonuçlarına en yakın simülasyon sonuçları elde edilir. Bu modelin önemi, gerçek hayatta TEG modülü tarafından üretilen sonuçlara en yakın sonuçları elde edebilen bir model olmasıdır. Mevcut birçok TEG modeli, MPPT algoritmalarının performans karşılaştırmalarına bir bakış sağlayabilir. Ancak değişken çalışma koşullarında veya modellemeyen farklı koşullarda, sabit tutulan değerler nedeniyle gözlemlenen sonuçlar gerçek sonuçlardan farklı olabilir.

Tasarlanan Simulink® modeli, TEG modülünün üretici verilerini kullanarak bu verilere uyumlu sonuçlar üretmektedir. İlk olarak, üretici verilerinde grafiksel olarak sunulan bilgiler, eğri uyurma yöntemleri ve grafikten veri elde etme yöntemleriyle MATLAB®'ta kullanılabilir verilere dönüştürülür. Bu veriler daha sonra Simulink® modelindeki karşılaştırma tablolarında kullanılır. Şekil 3.6, Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 modülünün Simulink® modelini ve modelin iç yapısını göstermektedir. Sıcaklık ve sıcaklık farkı bilgileri kullanılarak, gerçeğe en yakın iç direnç değerleri karşılaştırma tabloları aracılığıyla modele entegre edilir. Şekil 3.7, sıcak yüzey ve soğuk yüzey sıcaklıklarına göre TEG'in iç direncine ilişkin üretici verilerini ve bu verilere en yakın noktalardan geçen tahmin edilmiş eğrileri gösterir. Eğriler, en iyi sonuçlar için beşinci dereceden optimize edilmiştir. Optimizasyonun ardından, tahmin edilen denklem katsayılarıyla oluşturulan iç direnç eğrilerindeki veriler, Şekil 3.6'daki modelin iç yapısında görülen karşılaştırma tablolarına entegre edilir. Böylece, üretici verilerinde yer alan belirli sıcaklıklardaki iç direnç değerleri neredeyse aynı değerler olarak simülasyonlarda kullanılabilir.



Şekil 3.6. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 Simulink® modeli ve modelin iç yapısı



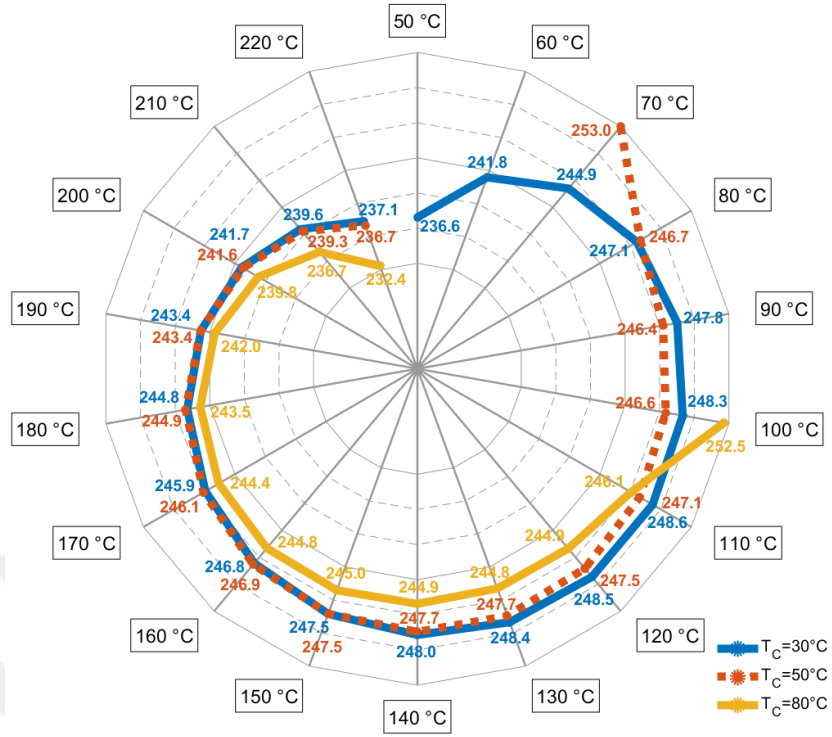
Şekil 3.7. Üretici verileri ve eğri uydurma yöntemiyle elde edilen iç direnç değerleri

Benzer şekilde, Seebeck katsayısı da sıcaklığa bağlı bir parametredir. Denklem 2.1'de görüldüğü gibi, doğrudan üretilen gerilimi etkilediği için sıcaklığa bağlı olarak değişen bu parametreyi modellerde sabit olarak kullanmak hata yapmaya neden olur. TEG modülünün üretici verilerinde Seebeck katsayısı hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bununla birlikte, Seebeck katsayısı Simulink® modelinde büyük öneme sahip olduğundan, hesaplanmalı ve modelde kullanılmalıdır. Denklem 2.1'de verilen bir TE'nin çıkış gerilimi formülünden, TEG modülündeki PN çiftlerinin Seebeck katsayıları Denklem 3.1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\alpha_{pn} = \frac{V_{out}}{N \Delta T} \quad (3.1)$$

burada,  $\alpha_{pn}$  PN çiftinin Seebeck katsayısıdır. Bir TEG modülünün Seebeck katsayısı  $N\alpha_{pn}$ 'dir. TEG modülündeki PN çiftlerinin sayısı N ile ifade edilir ve bu çalışmada kullanılan TEG modülünde 199 PN çifti bulunmaktadır.  $V_{out}$ ,  $\Delta T = T_H - T_C$  sıcaklık farkında modül tarafından üretilen gerilimi temsil eder ve üretici verileri bilgisayar ortamına aktararak elde edilir. Bu model, üretici verilerinde soğuk yüzey sıcaklıkları için 30°C, 50°C ve 80°C'ye karşılık gelen verileri içermektedir. Sıcak yüzey sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığının 20°C fazlasından başlayarak 220°C'ye kadar artırılmıştır. Soğuk yüzey sıcaklığının sabit tutulduğu modülün her PN çiftinin Seebeck katsayıları, 30°C, 50°C ve 80°C için hesaplamalar sonucunda Şekil 3.8'de verilen grafikteki gibi ortaya çıkar. Bu grafikteki veriler, eğri uydurma yöntemiyle düzenli verilere dönüştürülür. Bu veriler, PN çiftlerinin sayısı ile çarpılarak bir modülün Seebeck katsayısı hesaplanır ve Şekil 3.6'daki modelin iç yapısında görülen karşılaştırma tablolarına gömülür. Böylece, simülasyon ortamında kullanılan Seebeck katsayısı sıcaklık değiştikçe değişir ve daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

Şekil 3.8'deki grafikte farklı sıcaklık koşullarında verilen Seebeck katsayıları incelendiğinde, neredeyse hepsinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Simulink®'te TEG modüllerini modellerken dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biri olan Seebeck katsayısı, seri/paralel olarak bir araya getirilmiş birçok modülün bağlandığı TEG sistemlerinde büyük sapmalara neden olabilir. Tablo 3.3, Seebeck katsayısının soğuk yüzey sıcaklığına göre minimum, maksimum ve ortalama değerlerini sunmaktadır. Seebeck katsayısının ortalama değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ 'de  $T_H$  50°C ile 220°C arasında artırıldığında, Seebeck katsayısının 110°C'ye kadar arttığı ve maksimum değerini aldığı, ardından tekrar azaldığı görülmektedir.  $T_C = 50^\circ\text{C}$  'de  $T_H$  70°C ile 220°C arasında artırıldığında, 70°C'deki kararsızlık göz ardı edildiğinde, Seebeck katsayısının 140°C'ye kadar arttığı ve maksimum değerini aldığı, ardından tekrar azaldığı söylenebilir. Bununla birlikte,  $T_C = 80^\circ\text{C}$  'de  $T_H$  100°C ile 220°C arasında arttıkça Seebeck katsayısının sürekli olarak azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca, soğuk yüzey sıcaklığı arttıkça, Seebeck katsayısının maksimum değeri ile sıcak yüzey sıcaklığına göre minimum değeri arasındaki farkın arttığı görülmektedir.



**Şekil 3.8.** Bir PN çifti için belirli sıcak yüzey sıcaklıklarında hesaplanan Seebeck katsayıları ( $\mu\text{V/K}$ )

**Tablo 3.3.** Soğuk yüzey sıcaklığına göre Seebeck katsayısı değerleri

| $T_C$ ( $^\circ\text{C}$ ) | $\alpha_{pn}$ ( $\mu\text{V/K}$ ) |          |      |          |
|----------------------------|-----------------------------------|----------|------|----------|
|                            | Minimum                           | Maksimum | Fark | Ortalama |
| 30                         | 236,6                             | 248,6    | 12   | 242,6    |
| 50                         | 236,7                             | 253      | 16,3 | 244,85   |
| 80                         | 232,4                             | 252,5    | 20,1 | 242,45   |

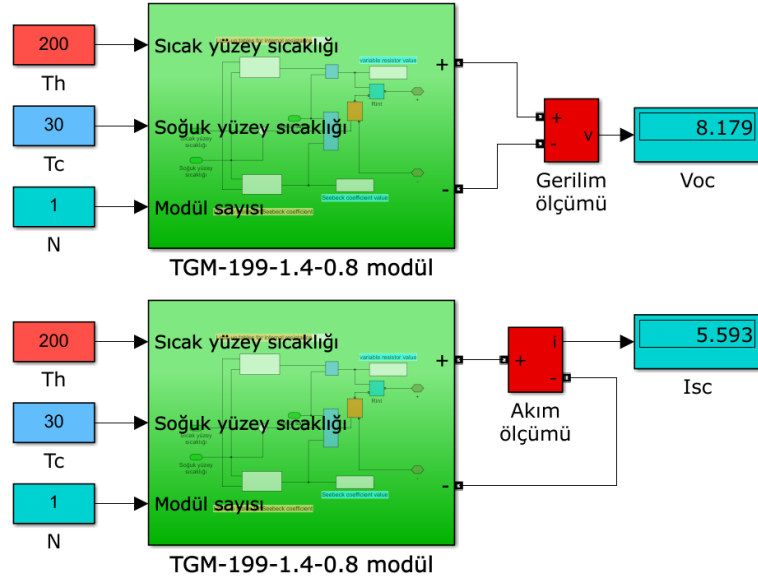
Diğer taraftan, Seebeck katsayısı dikkate alındığında, birçok çalışmada sıcaklık farkı kavramı ile TEG'den elde edilen güç arasında bir bağlantı kurulur. Ancak, Tablo 3.4'te görüldüğü gibi, sıcaklık farkı sabit olsa bile yüzey sıcaklıkları arasındaki fark nedeniyle Seebeck katsayısı farklıdır. Tablo 3.4'te, aynı sabit sıcaklık farkı koşullarında Seebeck katsayısı hiçbir durumda aynı değildir. Tablolarda verilen Seebeck katsayıları bir PN çifti için geçerlidir. Bu çalışmada ele alınan TEG modülünde 199 PN çifti bulunduğu için, TEG modülünün Seebeck katsayısı verilen katsayıların 199 ile çarpılmasıyla hesaplanabilir. Verilen Seebeck katsayıları birbirine yakın gibi görünse de yukarıda bahsedilen hesaplama nedeniyle sonuçlarda sapmalar

oluşur. Bir TEG sisteminde birden fazla modül kullanıldığını düşünürsek, sonuçlardaki hatalar modül sayısı arttıkça artacaktır.

**Tablo 3.4.** Sıcaklık farkına göre Seebeck katsayı değerleri

| $T_C(^{\circ}\text{C})$ | $T_H(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ | $\alpha_{pn} (\mu\text{V}/\text{K})$ |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 30                      | 80                      | 50                           | 247,1                                |
| 50                      | 100                     |                              | 246,6                                |
| 80                      | 130                     |                              | 244,8                                |
| 30                      | 110                     | 80                           | 248,6                                |
| 50                      | 130                     |                              | 247,7                                |
| 80                      | 160                     |                              | 244,8                                |
| 30                      | 130                     | 100                          | 248,4                                |
| 50                      | 150                     |                              | 247,5                                |
| 80                      | 180                     |                              | 243,5                                |
| 30                      | 170                     | 140                          | 245,9                                |
| 50                      | 190                     |                              | 243,4                                |
| 80                      | 220                     |                              | 232,4                                |

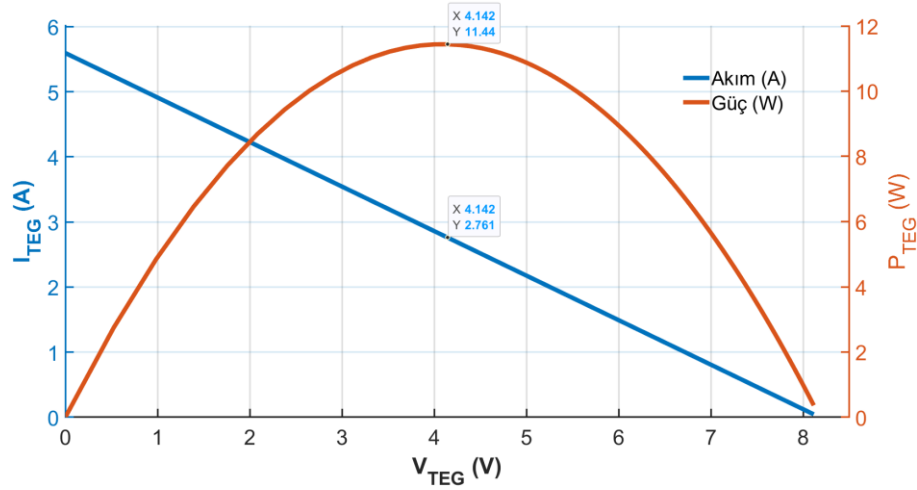
Şekil 3.9, TEG modülünün Simulink® modelinin açık devre gerilim ve kısa devre akımı ölçümlerini göstermektedir. Bu ölçümler, üretici verilerinde sayısal sonuçlar bulunduğu için  $T_C = 30^{\circ}\text{C}$  ve  $T_H = 200^{\circ}\text{C}$  koşullarında alınmıştır. Üretici verilerinde, empedans eşleşmesi anında, bu koşullar altında yük akımının 2,8 A, yük geriliminin 4,1 V ve çıkış gücünün 11,44 W olduğu belirtilmektedir. TEG modülü MPP'de bu değerlere ulaşır. MPP'de yük akımının kısa devre akımının yarısı, yük geriliminin ise açık devre geriliminin yarısı olduğu bilinmektedir. Buna göre, TEG modülünün kısa devre akımı 5,6 A ve açık devre gerilimi 8,2 V'dir. Şekil 3.9'da sunulan test sonuçlarına göre, kısa devre akımı ve açık devre gerilimi sırasıyla  $I_{SC} = 5,593 \text{ A}$  ve  $V_{OC} = 8,179 \text{ V}$  olarak ölçülmüştür. Üretici verileri ile simülasyon sonuçları arasındaki hata oranı, sırasıyla  $I_{SC}$  için %0,125 ve için %0,256'dır.



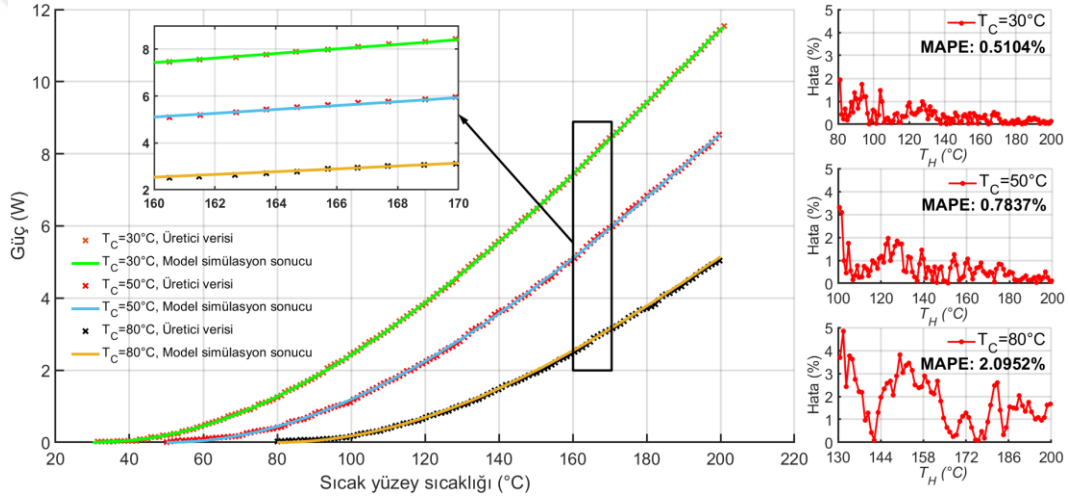
**Şekil 3.9.** Modellenen TEG modülünün açık devre gerilimi ve kısa devre akımı testleri

Tasarlanan TEG modül modelinin  $V-I$  ve  $V-P$  karakteristikleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Akım grafiğinin x eksenine kesiştiği nokta açık devre geriliminin değerini, y eksenine kesiştiği nokta ise kısa devre akımının değerini verir. Ayrıca, MPP noktasında gerilim açık devre geriliminin yarısı, akım ise kısa devre akımının yarısıdır. Modelin karakteristik eğrileri, Tablo 3.1'deki üretici verileriyle uyumlu olup, Şekil 3.9'da gösterilen test sonuçlarını karşılamaktadır.

Tasarlanan modül, farklı yüzey sıcaklıkları ve değişik sıcaklık farkı koşullarında simülasyon yapılarak test edilmiştir. Şekil 3.11,  $T_c$ 'nin sırasıyla 30°C, 50°C, 80°C olarak sabit tutulduğu ve  $T_h$ 'nin 200°C'ye kadar artırıldığı durumlarda, simülasyon sonuçlarının üretici verileriyle karşılaştırmasını göstermektedir. Simülasyon sonucunun neredeyse üretici verileriyle aynı olduğu açıkça görülebilir.



**Şekil 3.10.** Tasarlanan TEG modül modelinin V-I ve V-P karakteristikleri



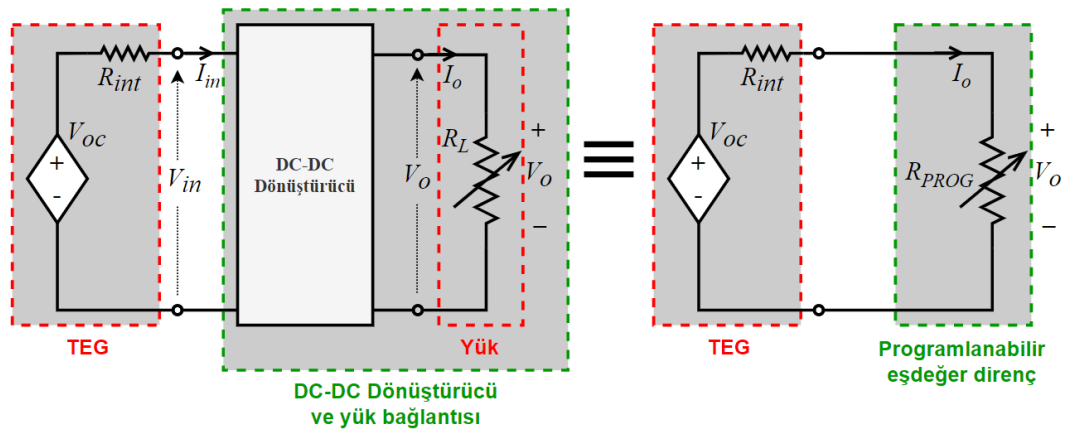
**Şekil 3.11.** Modülün veri sayfasındaki güç verileri ile Simulink® modeli oluşturulan modülün simülasyon sonucunda üretilen güç verilerinin karşılaştırılması ve MAPE değerleri ile hata grafikleri

Simülasyon sonuçları ile üretici verileri arasındaki hata değerleri, Şekil 3.11'in sağ tarafındaki grafiklerde verilmiştir. Bu grafiklerdeki veriler, Simulink® modelinin ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) değerlerini hesaplamak için kullanılır. MAPE, bir tahmin sisteminin doğruluğunu belirlemek için kullanılan bir ölçüttür. Gerçek veriler ve tahmini değerler kullanılarak MAPE hesaplanır. Modeli doğrulamak için, TEG MATLAB/Simulink® model verileri ticari olarak temin edilebilir TEG verileriyle farklı sıcaklıklarda karşılaştırılmış ve MAPE değerleri hesaplanmıştır.  $30^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  ve  $80^\circ\text{C}$  için MAPE değerleri sırasıyla %0,5104, %0,7837 ve %2,0952'dir. Tasarlanan

Simulink® modelinin en büyük MAPE değeri bile kabul edilebilir %5 değerinden oldukça düşüktür. Özellikle 30°C soğuk yüzey sıcaklığı ve 180°C'nin üzerindeki yüksek yüzey sıcaklığı olan simülasyonlarda hata çok küçüktür. Bu nedenle, bu hata grafikleri ve MAPE değerleri Simulink® modelini oldukça doğrulamaktadır [203].

### 3.2.2. Maksimum Güç Noktası İzleme Prensibi

MPPT prensibi TEG sistemlerinde MPP'yi yakalamak için kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu prensip, güç koşullandırma yöntemleri aracılığıyla uygulanır ve empedans eşleştirmesi ile DC-DC dönüştürücülerin kullanımını içerir. Empedans uyumu, TEG sisteminin toplam iç direnci ( $R_{TEG}$ ) ile TEG sistemine bağlanan harici yük direnci ( $R_L$ ) arasındaki dengeyi sağlamayı amaçlar. Ayrıca TEG'lerin verimliliğini artırmak için güç çıkışını optimize etmek ve enerji kaynaklarını en etkili şekilde kullanmak için de gereklidir. Benzer şekilde, bu yöntem doğrudan güç tüketen cihazlara enerji sağlamak veya enerji depolamak için kullanılan TEG sistemlerinin performansını da iyileştirebilir. Şekil 3.12'de MPPT prensibinin DC-DC dönüştürücü ile kullanımı gösterilmiştir. DC-DC dönüştürücü ve yük direnci eşdeğer bir direnç gibi davranır. DC-DC dönüştürücünün anahtarlama elemanına gönderilen görev döngüsü değerine göre bu eşdeğer direnç değiştiğinden dolayı programlanabilir bir direnç gibi davranmaktadır. Böylece TEG'in iç direnci ile eşdeğer bir direnç değeri elde edilerek empedans eşlemesi yapılır ve MPP'ye ulaşılır.



Şekil 3.12. Maksimum güç noktası izleme prensibi

MPPT, çeşitli yükler ve sıcaklık farkları altında TEG'lerin maksimum güç kapasitesinde çalışmalarını sağlar. Böylece TEG sisteminin verimliliğini artırmak için önemli bir rol oynar. Bu yöntemler genellikle mikrodenetleyiciler veya optimize edilmiş algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. MPPT yöntemi belirlendikten sonra, izlenecek parametreler belirlenir ve bu parametreler sürekli olarak izlenir. Örneğin, TEG sisteminin çalışma koşullarına göre sıcaklık, akım, gerilim gibi parametreler takip edilir ve MPPT algoritması bu verilere dayanarak TEG'in maksimum güç noktasını belirler.

TEG'in yük direnci değiştikçe alınan güç değeri değişir. Bu durumu gözlemlemek için farklı yük değerlerinde TEG'in gerilim-akım (V-I) ve gerilim-güç (V-P) karakteristikleri incelenir. Örneğin, yük değeri sonsuz olduğunda TEG'in açık devre gerilimi ölçülürken, yük sıfır olduğunda ise TEG'in kısa devre akımı belirlenir. Bu veriler, MPPT algoritmasının TEG'in güç çıkışını optimize etmek için kullanacağı bilgiler arasında yer alır. Sonuç olarak, MPPT yöntemleri TEG sistemlerinin en yüksek verimle çalışabilmesi için önemlidir. Bu yöntemler sayesinde TEG'in karakteristikleri ve çalışma koşulları dikkate alınarak güç çıkışı optimize edilir ve atık ısı geri kazanımından en etkili şekilde faydalanılır.

### 3.2.3. DC–DC Yükselten Dönüştürücü Yük Bağlantısı

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi yükselten DC–DC dönüştürücü TEG ile yük arasına bağlandığında TEG'in yük direncini, yükselten dönüştürücü oluşturmaktadır. TEG'in yük direnci değeri dönüştürücünün çalışmasına göre aldığı eşdeğer direnç değeri karşılığıdır. Bu eşdeğer direnç değeri  $R_{PROG}$  ile ifade edilir. Yani, Şekil 3.12'deki  $R_{PROG}$  değeri, dönüştürücünün çalışmasını sağlayan görev döngüsü doluluk oranı ( $D$ ) ve yük direncinin değerine göre hesaplanan bir eşdeğer direnç değerine eşittir. TEG'in yükü anlamına gelen bu eşdeğer direnç değeri görev döngüsü doluluk oranının değerine göre değiştirilebildiği için programlanabilir özellik taşımaktadır. Dönüştürücü tarafından oluşturulan bu eşdeğer direnç dönüştürücü direnci olarak da isimlendirilebilir ( $R_{converter} = R_{PROG}$ ). Sonuçta, MPPT yöntemlerinde kullanılan DC-DC dönüştürücülerin esas görevi, TEG'lerden maksimum güç elde etmek amacıyla maksimum güç transferi teoremi gereği, MPPT algoritmasının belirlediği görev döngüsü doluluk oranını kullanarak yük direnci ile birlikte TEG'in iç direncine

eşit bir empedans değeri oluşturmak, yani empedans eşlemesi yapmaktır. Yükselten dönüştürücü denklemi kullanılarak aşağıdaki denklemlere ulaşılır:

$$V_{in} = V_o(1 - D) \quad (3.2)$$

$$I_{in} = \frac{I_o}{1 - D} \quad (3.3)$$

Buradan dönüştürücünün oluşturduğu eşdeğer direnç değeri şu şekilde ifade edilir:

$$R_{converter} = R_{PROG} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_o(1 - D)}{I_o/(1 - D)} = \frac{V_o(1 - D)^2}{I_o} = R_L(1 - D)^2 \quad (3.4)$$

Denklem 3.4, TEG'in yükünü oluşturan yükselten DC–DC dönüştürücünün oluşturduğu  $R_{converter}$  değerinin  $D$  değeri ile belirli bir aralıkta programlanabilir bir şekilde değiştirilebileceğini gösterir.  $D$  değeri  $[0 \ 1]$  aralığında değerler alabileceği için  $R_{converter}$  değeri  $R_L$  ile 0 arasında olabilir. Yani TEG'e bağlanan yükün sınırları  $[0 \ R_L]$  arasındadır. Bu sınır aynı zamanda yükselten dönüştürücünün empedans eşleme kapasitesini de belirler. Dolayısıyla, empedans eşlemesi yükselten dönüştürücü ile yapılmak istendiğinde, yani  $R_{converter}$  değeri  $R_{TEG}$  değerine eşitlenmek istendiğinde,  $R_{converter}$  değerinin  $[0 \ R_L]$  aralığında kalabilmesi için  $R_L$  değerinin  $R_{TEG}$  değerinden büyük olması gerekir. Özetle, yükselten dönüştürücü kullanılan MPPT yöntemlerinde yük direncinin TEG'in iç direncinden büyük olması gerekmektedir [204].

#### 3.2.4. Maksimum Güç Noktası İzleme Algoritmaları

MPPT yöntemleri, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, TEG'ler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından maksimum güç elde etmek için kullanılan önemli yöntemlerdir. Bu yöntemler, enerji üretim sistemlerinin verimliliğini artırırken, enerji kaynaklarının en etkili şekilde kullanılmasını sağlar. MPPT yöntemleri ayrıca enerji depolama sistemlerinin performansını iyileştirebilir ve enerji dönüşümünde kayıpları minimize edebilir. MPPT yöntemleri, farklı algoritmalar kullanarak maksimum güç noktasını

bulmayı amaçlar. MPPT algoritmaları genellikle giriş gücünü, voltajını ve akımını izleyerek güç-gerilim (P-V) veya akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini analiz eder. Bu analizler, güç çıkışını maksimize etmek için optimum çalışma noktasını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. MPPT yöntemleri, sürekli olarak ölçümler yaparak güç çıkışındaki değişiklikleri takip eder ve bu değişikliklere yanıt olarak güç çıkışını optimize eder. Farklı algoritmalar ve yöntemler, farklı uygulamalara ve gereksinimlere uyacak şekilde tasarlanmıştır.

MPPT yöntemlerinde kullanılan algoritmalar, belirli uygulama gereksinimlerine ve sistem özelliklerine bağlı olarak seçilebilir. Farklı algoritmaların avantajları ve dezavantajları bulunur ve seçilen algoritma, verimlilik, hassasiyet, hızlı tepki süresi gibi faktörlere göre değerlendirilir. MPPT algoritmalarını geleneksel yöntemler, analitik yöntemler, yapay sinir ağları, bulanık mantık, metasezgisel yöntemler ve farklı algoritmaların birlikte kullanıldığı hibrit yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında simülasyonlarda ve deneylerde kullanılmak üzere kodlanan MPPT algoritmaları geleneksel ve metasezgisel algoritmalar. Geleneksel MPPT yöntemleri genellikle basit ve hesaplama açısından düşük maliyetli algoritmalar. Bu yöntemler, matematiksel denklemler, hesaplama tabanlı algoritmalar veya basit karar mekanizmaları kullanarak maksimum güç noktasını bulmayı hedefler. Metasezgisel MPPT yöntemleri, doğal yaşamdan esinlenen optimizasyon algoritmalarını kullanır. Bu yöntemler, popülasyon tabanlı arama ve adaptif algoritmalara dayanır. Metasezgisel yöntemler genellikle karmaşık matematiksel modellemeler ve optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. MPPT yöntemlerinde kullanılan algoritmalar, belirli uygulama gereksinimlerine ve sistem özelliklerine bağlı olarak seçilebilir. Farklı algoritmaların avantajları ve dezavantajları bulunur ve seçilen algoritma, verimlilik, hassasiyet, hızlı tepki süresi gibi faktörlere göre değerlendirilir. Bu tez çalışmasında da geleneksel ve metasezgisel algoritmalar incelenerek performans faktörleri karşılaştırılmıştır. Bunun için geleneksel yöntem olarak P&O, INC, FOCV ve FSCC algoritmaları, metasezgisel yöntem olarak da PSO, GWO ve daha önce MPPT yöntemi olarak kullanılmayan bal porsuğu algoritması (HBO) kodlanarak çeşitli simülasyon ve deneyler yapılmıştır.

### 3.2.4.1. Geleneksel Değiştir ve Gözlemle Algoritması

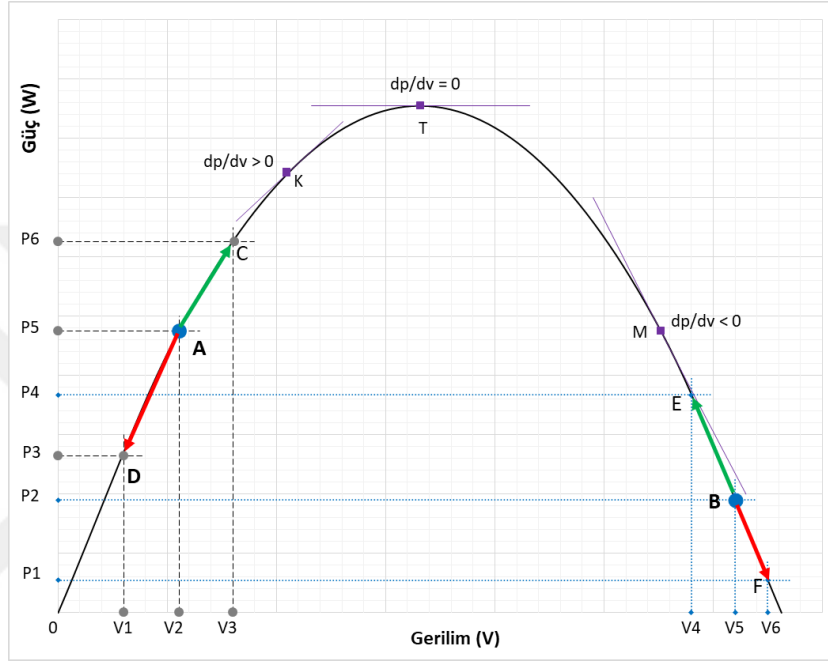
P&O algoritması kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmış temel bir algoritmadır. Diğer algoritmaların verimlilik değerlerinin kıyaslandığı bir yöntemdir. P&O algoritması, giriş gücünü sürekli olarak izler ve güç çıkışını maksimize edecek çalışma noktasını bulmaya çalışır. Algoritmanın çalışma prensibi basittir. İlk adımda, güç çıkışını artırmak için güç girişini hafifçe artıracak bir pertürbasyon (genellikle bir adım artışı) uygulanır. Daha sonra, giriş gücü bu yeni noktada ölçülür ve önceki ölçülen güçle karşılaştırılır. Bu süreçte dönüştürücünün anahtarlama elemanının görev döngüsü doluluk oranını ( $D$ ) sürekli ayarlayarak daha önce ölçülen giriş gücünü kontrol eder. Karşılaştırma sonucunda iki durum ortaya çıkar. Giriş gücü ve gerilim ölçümü, daha önce ölçülen giriş gücü ve geriliminden daha büyükse, pertürbasyonun doğru yönde olduğunu ve daha fazla güç elde etmek için aynı yönde hareket etmeye devam etmemiz gerektiğini gösterir. Bu durumda, bir sonraki adımda pertürbasyon aynı yönde bir adım daha artırılır. Giriş gerilimi daha önce ölçülen gerilimden düşükse ve daha fazla giriş gücüne sahipse pertürbasyonun ters yönde olduğunu ve maksimum güç noktasının geçildiğini gösterir. Bu durumda, bir sonraki adımda pertürbasyon ters yönde bir adım azaltılır [205].

P&O algoritmasının daha iyi anlaşılması için Şekil 3.13'te verilen TEG güç grafiğinden faydalanılabilir. Bu şekle göre TEG'in çalışmaya A ve B noktalarında başladığını varsayarak oluşabilecek durumları şu şekilde özetleyebiliriz;

- TEG, çalışmaya A noktasında başlar. Bu noktadaki gerilim  $V_2$  ve güç  $P_5$ 'tir. Gerilim değeri  $V_2$ 'den  $V_3$  noktasına artırılırsa, güç değeri  $P_5$ 'ten  $P_6$ 'ya yükselir ve yeni çalışma noktası C olur. A noktasındayken gerilim değeri  $V_2$ 'den  $V_1$ 'e azaltılırsa, güç değeri  $P_5$ 'ten  $P_3$ 'e düşer ve çalışma noktası D olur. A noktasından T noktasına ulaşabilmek için gerilimin sürekli artırılması gerekir. Yani, MPP'nin yakalanması için gerilim değeri artırılmalıdır, çünkü gücün türevi pozitifdir.
- TEG, çalışmaya B noktasında başladığında, gerilim  $V_5$ 'ten  $V_4$ 'e azaltılırsa güç değeri  $P_2$ 'den  $P_4$ 'e yükselir ve yeni çalışma noktası E oluşur. Ancak, B noktasındayken gerilim değeri  $V_5$ 'ten  $V_6$ 'ya artırılırsa güç değeri  $P_2$ 'den  $P_1$ 'e

düşer ve yeni çalışma noktası F oluşur. Bu durumda gücün türevi negatif olduğu için gerilim değeri düşürülmelidir.

Sonuç olarak, MPP'nin yakalanması için gerilime göre gücün türevinin pozitif olduğu bölgede gerilim değeri artırılmalı ve negatif olduğu bölgede ise düşürülmelidir. Bu olasılıklar Tablo 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.13. TEG güç grafiği

Tablo 3.5. P&O MPPT algoritma olasılıkları

| Gerilim değişimi<br>$\Delta V$ | Güç değişimi<br>$\Delta P$ | P&O MPPT<br>yönü |
|--------------------------------|----------------------------|------------------|
| +                              | +                          | +                |
| +                              | -                          | -                |
| -                              | +                          | -                |
| -                              | -                          | +                |

Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken P&O algoritmasının sözde kodu Tablo 3.6’da ve akış şeması Şekil 3.14’te yer almaktadır. Güç ve gerilim değerlerini ölçer, güç ve gerilim değişimlerini hesaplar ve buna göre gerilim değerini ayarlar. Sürekli bir döngü içinde yeni ölçümler yapılır ve MPP değeri yakalanana kadar süreç devam eder [206].

**Tablo 3.6.** P&O algoritması sözde kodu

---

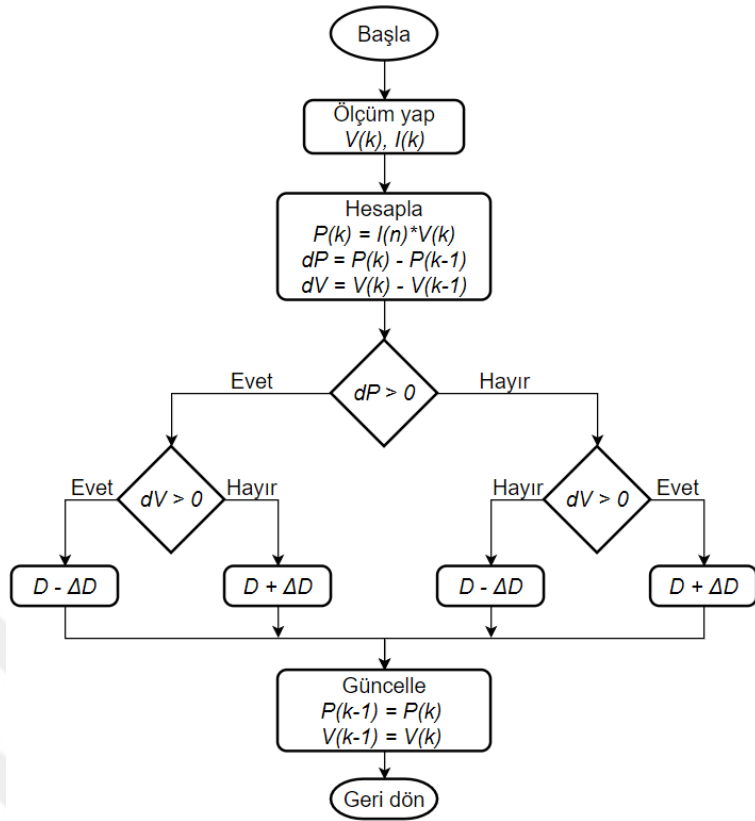
*Ölçüm yap (akım, gerilim)*  
*Güç hesapla (güç = akım \* gerilim)*

*Sürekli döngü:*  
*Güç değişimi sorgula:*  
*Eğer güç değişimi > 0 ise:*  
*Gerilim değişimi sorgula:*  
*Eğer gerilim değişimi > 0 ise:*  
*D değerini ΔD kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )*  
*Eğer gerilim değişimi < 0 ise:*  
*D değerini ΔD kadar artır ( $D = D + \Delta D$ )*  
*Eğer güç değişimi < 0 ise:*  
*Gerilim değişimi sorgula:*  
*Eğer gerilim değişimi > 0 ise:*  
*D değerini ΔD kadar artır ( $D = D + \Delta D$ )*  
*Eğer gerilim değişimi < 0 ise:*  
*D değerini ΔD kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )*

*Yeni ölçüm yap (akım, gerilim)*  
*Yeni güç hesapla (güç = akım \* gerilim)*  
*Yeni güç değişimi = güç - önceki\_güç*  
*Yeni gerilim değişimi = gerilim - önceki\_gerilim*

*Önceki güç = güç*  
*Önceki gerilim = gerilim*

---



**Şekil 3.14.** P&O algoritması akış şeması [14]

P&O algoritması çok sayıda MPPT yöntemi arasında en popüler olanıdır. Düşük maliyetli mikroişlemciler ile yaygın olarak kullanılır. Basit ve güvenilir bir algoritma olmasına rağmen iki ana dezavantajı vardır. Birincisi, izleme MPP'ye yaklaştığında çalışma noktası MPP etrafında ileri geri gitmeye zorlanır. Bu da çıkış gücünde salınım neden olur. Dolayısıyla enerji verimi azalır ve verimlilikte düşüş olur. İkincisi ise, P&O algoritması çevre koşullarındaki değişiklik ile baş edemez ve çalışma noktasının MPP'den sapmasına neden olur. Bu sapma aynı zamanda enerji kaybına yol açar [116].

### 3.2.4.2. Geleneksel Artımsal İletkenlik Algoritması

INC algoritması P–V eğrisinin eğimini tespit eder. MPP, P–V eğrisinin tepe noktasını arayarak izlenir. İstenen çalışma noktasını bulmak için kaynak gerilim ve akım bilgilerini kullanır. Bu yöntem P&O algoritmasına dayanmaktadır; ancak, farklı olarak her adım için güç gradyan değerlerini hesaplar ve adım boyutunu ayarlayabilir. Bu algoritma MPPT için anlık iletkenlik ( $I/V$ ) ve artımlı iletkenlik ( $dI/dV$ ) kullanır.

Bu iki değeri kullanarak, algoritma, çalışma noktasının P–V eğrisindeki konumunu belirler. Bu konum Denklem 3.5’te verilen ifadeler kullanılarak MPP’nin durumuna göre belirlenmektedir.

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, & \text{MPP'nin solunda ise} \\ \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, & \text{MPP'ye ulaşılmışsa} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, & \text{MPP'nin sağında ise} \end{cases} \quad (3.5)$$

Adımlama, algoritma MPP'nin durumunu saptadığında P–V eğrisinin eğimi Denklem 3.6’da gösterildiği gibi sıfırdır.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.6)$$

Denklem 3.6 düzenlenirse;

$$\frac{dP}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} \quad (3.7)$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3.8)$$

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (3.9)$$

Geleneksel INC algoritmasında MPP’yi tespit etmek için Denklem 3.9 kullanılır. Gerilim ve akım değerleri algılanır ve Denklem 3.5’e göre görev döngüsü doluluk oranı arttırılır, azaltılır veya değişiklik olmaz. Denklem 3.9 sağlanırsa görev döngüsü doluluk oranında değişiklik olmaz [66]. Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken INC algoritmasının sözde kodu Tablo 3.7’de ve akış şeması Şekil 3.15’te yer almaktadır.

INC algoritması P&O algoritmasına göre avantajlara sahiptir. P&O MPP çevresinde salınma neden olur fakat INC algoritması MPP’ye ne zaman ulaştığını

belirleyebilir. INC algoritması ani değişen çevre koşullarında P&O algoritmasında göre MPP'yi daha yüksek doğrulukla izleyebilir. Bu algoritmanın P&O algoritmasına göre bir dezavantajı, akımı ve gerilimi ölçmek için iki sensör kullanmasından dolayı daha karmaşık olmasıdır. P&O algoritması sadece gerilimi ölçmek için bir sensör kullanır. Hızlı değişen çevre koşulları altında MPP'yi izlemek için P&O algoritmasının dezavantajı INC algoritması ile aşılr.

**Tablo 3.7.** INC algoritması sözde kodu

---

*Ölçüm yap (akım, gerilim)*

*Sürekli döngü:*

*Gerilimdeki değişimi sorgula:*

*Eğer gerilim değişimi = 0 ise:*

*Akım değişimini sorgula*

*Eğer akım değişimi = 0 ise:*

*D değerini değiştirme ( $D = D$ )*

*Eğer akım değişimi varsa:*

*Eğer akım değişimi  $> 0$  ise:*

*D değerini  $\Delta D$  kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )*

*Eğer akım değişimi  $< 0$  ise:*

*D değerini  $\Delta D$  kadar arttır ( $D = D + \Delta D$ )*

*Eğer gerilim değişimi varsa:*

*Eğer  $dI/dV = -I/V$  ise:*

*D değerini değiştirme ( $D = D$ )*

*Eğer  $dI/dV = -I/V$  değil ise:*

*Eğer  $dI/dV > -I/V$  ise:*

*D değerini  $\Delta D$  kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )*

*Eğer  $dI/dV < -I/V$  ise:*

*D değerini  $\Delta D$  kadar arttır ( $D = D + \Delta D$ )*

*Yeni ölçüm yap (akım, gerilim)*

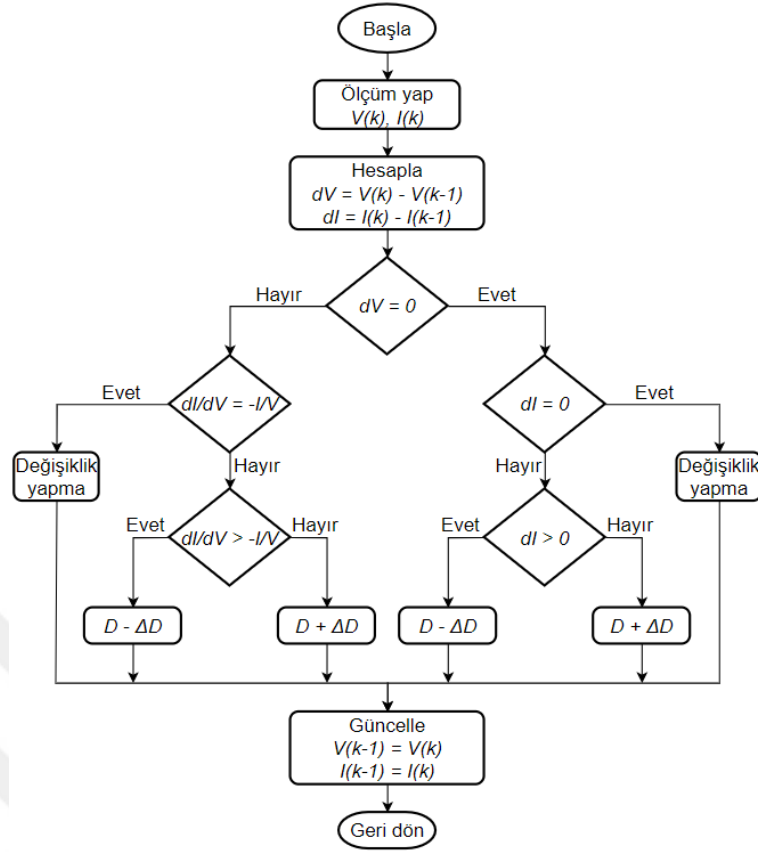
*Yeni gerilim değişimi = gerilim - önceki\_gerilim*

*Yeni akım değişimi = akım - önceki\_akım*

*Önceki gerilim = gerilim*

*Önceki akım = akım*

---



Şekil 3.15. INC algoritması akış şeması [66]

### 3.2.4.3. Kesirli Açık Devre Gerilimi Algoritması

FOCV algoritması, yenilenebilir enerji kaynaklarının açık devre gerilimini ( $V_{OC}$ ) ve karakteristik eğrilerini kullanarak MPP'yi yakalamayı hedefler. Algoritmanın amacı gerilim-karakteristik eğrisindeki bir noktayı bulmaktır. Bu nokta, açık devre geriliminin bir kesir veya yüzdesi olarak belirlenir. Algoritmanın temel prensibi, gerilim-karakteristik eğrisindeki bu noktanın, sistemin MPP'sine en yakın nokta olmasını sağlamaktır.

FOCV algoritması  $V_{OC}$  ve maksimum çalışma gerilimi  $V_{MPP}$  arasındaki ilişkinin neredeyse doğrusal olduğu gerçeğini kullanır [67]. Algoritma sürekli olarak çıkış gerilimini ölçer ve bu değeri açık devre gerilimiyle karşılaştırır. Ardından, çıkış gerilimi ve açık devre gerilimi arasındaki farkın bir kesir veya yüzdesini hesaplar. Bu oran ( $k_1$ ),  $V_{MPP}$ 'yi bulmak, dolayısıyla da güç çıkışını MPP'ye yaklaştırmak için kullanılır. Denklem 3.10'da  $V_{MPP}$  değerinin açık devre geriliminin  $k_1$  oranında olduğu görülmektedir.

$$V_{MPP} \approx k_1 V_{OC} \quad (3.10)$$

burada  $k_1$  orantılı bir sabittir. Bir TEG'in I-V karakteristiği neredeyse doğrusal olduğundan genellikle  $k_1 = 0,5$ 'tir [68]. Algoritma, TEG'i güç dönüştürücünden periyodik olarak ayırır ve  $V_{OC}$ 'yi ölçerek çalışır. Daha sonra Denklem 3.10 kullanılarak  $V_{MPP}$  hesaplanır ve güç dönüştürücü, buna uyacak şekilde çalışma gerilimini değiştirir.  $V_{OC}$  kontrol edilirken yüke güç akışı olmaz, bu nedenle ölçüm frekansı, kabul edilebilir bir güç kaybı üretecek şekilde seçilmelidir. Gerçekte,  $V_{OC}$  ve  $V_{MPP}$  arasındaki ilişki tam olarak doğrusal değildir. Bu nedenle gerçek  $V_{MPP}$  izlenmez, bunun yerine ona yakın bir noktadır. Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken FOCV algoritmasının sözde kodu Tablo 3.8'de ve akış şeması Şekil 3.16'da yer almaktadır.

**Tablo 3.8.** FOCV algoritması sözde kodu

---

*Ölçüm yap (açık devre gerilimi,  $V_{OC}$ , çıkış gerilimi  $V_{out}$ )*  
 $V_{MPP} \text{ değeri} = k_1 * V_{OC}$

*Sürekli döngü:*

*Eğer  $V_{out} > V_{MPP}$  ise:*

*$D$  değerini  $\Delta D$  kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )*

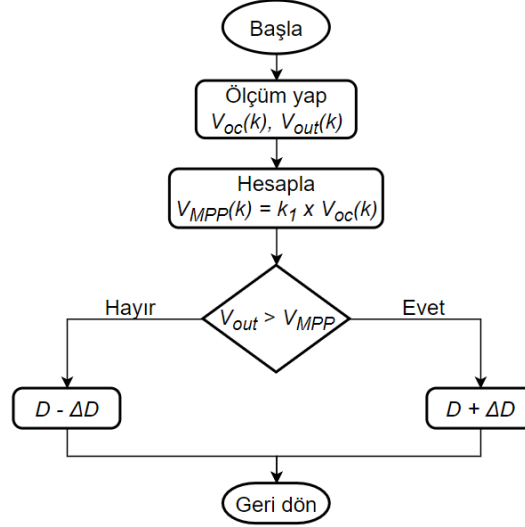
*Eğer  $V_{out} < V_{MPP}$  ise:*

*$D$  değerini  $\Delta D$  kadar artır ( $D = D + \Delta D$ )*

---

FOCV algoritması, güç kaybını en aza indirmek için sürekli olarak çalışır. TEG sistemlerinin çıkış gücü, gerilim-karakteristik eğrisinin eğimine bağlı olarak değişir. Algoritma, bu eğimi sürekli olarak takip eder ve gerilimdeki değişimleri izleyerek MPP'yi yakalar. FOCV algoritması, basit bir hesaplama yöntemi kullanır ve genellikle düşük maliyetli ve kolay uygulanabilen bir MPPT yöntemidir. Ancak, bu algoritmanın bazı sınırlamaları vardır. Özellikle, çevresel değişimlere ve çalışma koşullarındaki dalgalanmalara karşı hassas olabilir. Ayrıca, bazı durumlarda hızlı güç değişimlerine uyum sağlamakta zorluklar yaşayabilir. Ayrıca açık devre gerilimini ölçmek için

periyodik güç kesintilerine ihtiyaç duyduğundan hem fazladan elektronik devre gerektirmekte hem de güç genel güç kaybı fazla olmaktadır.



Şekil 3.16. FOCV algoritması akış şeması [207]

#### 3.2.4.4. Kesirli Kısa Devre Akımı Algoritması

FSCC algoritması, FOCV algoritmasına benzer bir mantıkla çalışır. FSCC algoritması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kısa devre akımını ( $I_{SC}$ ) ve karakteristik eğrilerini kullanarak MPP'yi yakalamayı hedefler. Algoritmanın amacı akım-karakteristik eğrisindeki bir noktayı bulmaktır. Bu nokta, kısa devre akımının bir kesir veya yüzdesi olarak belirlenir. Algoritmanın temel prensibi, akım-karakteristik eğrisindeki bu noktanın, sistemin MPP'sine en yakın nokta olmasını sağlamaktır. Algoritma sürekli olarak çıkış akımını ölçer ve bu değeri kısa devre akımıyla karşılaştırır. Ardından, çıkış akımı ve kısa devre akımı arasındaki farkın bir kesir veya yüzdesini hesaplar. Bu oran ( $k_1$ ),  $I_{MPP}$ 'yi bulmak, dolayısıyla da güç çıkışını MPP'ye yaklaştırmak için kullanılır. Denklem 3.11'de  $I_{MPP}$  değerinin kısa devre akımının  $k_2$  oranında olduğu görülmektedir.

$$I_{MPP} \approx k_2 I_{SC} \quad (3.11)$$

burada  $k_2$  orantılı bir sabittir. Bir TEG'in I-V karakteristiği neredeyse doğrusal olduğundan FOCV algoritmasındaki gibi genellikle  $k_2 = 0,5$ 'tir [68]. FSCC algoritması, TEG'i güç dönüştürücüden periyodik olarak ayırır ve  $I_{SC}$ 'yi ölçerek çalışır.

Daha sonra Denklem 3.11 kullanılarak  $I_{MPP}$  hesaplanır ve güç dönüştürücü, buna uyacak şekilde çalışma akımını değiştirir.  $I_{SC}$  kontrol edilirken yüke güç akışı olmaz, bu nedenle ölçüm frekansı, kabul edilebilir bir güç kaybı üretecek şekilde seçilmelidir. Gerçekte,  $I_{SC}$  ve  $I_{MPP}$  arasındaki ilişki tam olarak doğrusal değildir. Bu nedenle gerçek  $I_{MPP}$  izlenmez, bunun yerine ona yakın bir noktadır. Sistemin MPP noktasında çalıştırılması için oluşturulması gereken FSCC algoritmasının sözde kodu Tablo 3.9’da ve akış şeması Şekil 3.17’de yer almaktadır.

**Tablo 3.9.** FSCC algoritması sözde kodu

Ölçüm yap (kısa devre akımı,  $I_{SC}$ , çıkış akımı  $I_{out}$ )  
 $I_{MPP}$  değeri =  $k_2 * I_{SC}$

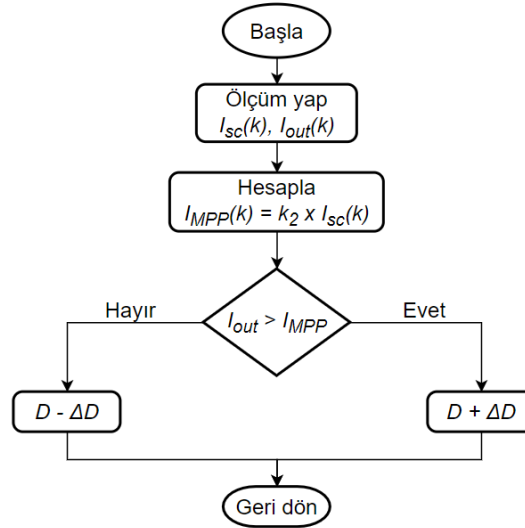
Sürekli döngü:

Eğer  $I_{out} > I_{MPP}$  ise:

$D$  değerini  $\Delta D$  kadar azalt ( $D = D - \Delta D$ )

Eğer  $I_{out} < I_{MPP}$  ise:

$D$  değerini  $\Delta D$  kadar artır ( $D = D + \Delta D$ )



**Şekil 3.17.** FSCC algoritması akış şeması [207]

### 3.2.4.5.Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

PSO, doğal bir optimizasyon yöntemi olarak bilinen bir sürü zekâ temelli algoritmadır. Sürü halinde hareket eden kuş, balık, böcek gibi hayvanların davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Bu algoritma, MPPT yöntemi olarak kullanıldığında, bir sürü (partikül) halinde hareket eden ve eniyileme problemlerinde MPP'yi yakalamayı hedefleyen parçacıklardan oluşur.

PSO algoritması, parçacıkların hareket ederek olası çözüm alanını aradığı bir optimizasyon süreci kullanır. Sürü halinde hareket eden hayvanların yiyecek ve güvenlik gibi durumlarda rastgele hareket etmeleri amaçlarına daha kolay ulaşabilmelerini sağlamaktadır. PSO bireyler arasındaki sosyal bilgi paylaşımını esas alır. Her bireye parçacık denir. Her parçacık, bir çözümün temsil ettiği bir konumda bulunur ve bir hız vektörü ile hareket eder. Parçacıklar, hızlarını ve konumlarını, kendi deneyimleri ve sürü içindeki en iyi deneyimlerden elde edilen bilgilerle günceller. PSO, temel olarak sürüde bulunan bireylerin pozisyonunun, sürünün en iyi pozisyona sahip olan bireyine yaklaştırılmasına dayanır. Bu yaklaşma hızı rasgele gelişen durumdur ve çoğu zaman sürü içinde bulunan bireyler yeni hareketlerinde bir önceki konumdan daha iyi konuma gelirler ve bu süreç hedefe ulaşınca kadar devam eder [208].

PSO algoritması, iteratif bir süreç olarak çalışır. Her iterasyonda parçacıkların konumları ve hızları güncellenir. Parçacıklar, çıkış gücünü maksimize etmek için çeşitli konumlar ve hızlar arasında hareket eder. Her parçacık, kendi deneyimine dayalı olarak en iyi konumu ve en iyi performansı elde etmeye çalışır. Bu güncelleme, en iyi konumları ve en iyi performansı elde eden parçacıklardan elde edilen bilgilerle yapılır. MPPT uygulamasında, PSO algoritması güç-gerilim karakteristik eğrilerini kullanarak MPP'yi yakalamak için optimize edilmiştir. Parçacıklar, MPP'ye ulaşmak için çözüm alanında dolaşırken birbirlerinden etkilenir ve en iyi çözümleri paylaşırlar. PSO algoritması, sistemlerde kullanılan birçok diğer MPPT algoritmasından farklıdır. Bu algoritma, hızlı bir şekilde yakınsama sağlayabilir ve çeşitli çalışma koşullarında etkili olabilir. Ayrıca, genellikle daha karmaşık matematiksel modellere dayanır ve daha yüksek hesaplama gücü gerektirebilir.

Sosyal hayvanların davranışlarını yapay yaşam teorisi ile incelerken, bilgisayar tarafından işbirlikçi davranışlı sürü yapay yaşam sistemlerinin nasıl oluşturulacağı konusundaki temel ilkeler şu şekildedir:

1. Yakınlık: sürü, basit uzay ve zaman hesaplamalarını gerçekleştirebilmelidir.
2. Kalite: Sürü, çevredeki kalite değişimini algılayabilmeli ve buna tepki verebilmelidir.
3. Farklı tepki: sürü, kaynakları dar bir kapsamda elde etme yolunu sınırlamamalıdır.
4. Kararlılık: Sürü, her çevresel değişiklikte davranış modunu değiştirmemelidir.

Algoritma temel olarak aşağıdaki basamaklardan oluşur;

- i. Rasgele üretilen başlangıç pozisyonları ( $x_k$ ) ve hızları ( $v_k$ ) ile başlangıç sürüsü oluşturulur. Pozisyon ve hızların sınır değerleri probleme özgü olan  $x_{min}$  ve  $x_{max}$  parametreleri ile sınırlandırılır.
- ii. Sürü içerisindeki tüm parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanır.
- iii. Her bir parçacık için mevcut jenerasyondan yerel en iyi ( $p_k^i$ ) bulunur. Sürü içerisinde en iyilerin sayısı parçacık sayısı kadardır.
- iv. Mevcut jenerasyondaki yerel eniyiler içerisinde küresel en iyi ( $p_k^g$ ) seçilir.
- v. Pozisyon ve hızlar Denklem 3.12 ve Denklem 3.13'teki gibi yenilenir.

$$x_k^i = x_{min} + r(x_{max} - x_{min}) \quad (3.12)$$

$$v_{k+1}^i = wv_k^i + c_1r_1(p_k^i - x_k^i) + c_2r_2(p_k^g - x_k^i) \quad (3.13)$$

Denklemlerde görülen  $w$  ağırlık faktörüdür. PSO algoritmasının hız güncellemesi için kullanılan bir parametredir. Bu faktör, parçacığın hareketini dengelemek ve hızını kontrol etmek için kullanılır. Değerinin 0 ile 1 arasında olması tavsiye edilir. Daha yüksek bir  $w$  değeri parçacığın global en iyi konuma daha hızlı yaklaşmasını sağlar, ancak aşırı değerlerde dengesizliklere neden olabilir.  $r_1$  ve  $r_2$  [0,

1] aralığında rastgele değerler alır ve parçacığın hızına etki eder. Bu rastgele değerler, keşif yeteneğini artırmak ve farklı konumları keşfetmek için kullanılır.  $c_1$  ve  $c_2$  güven parametreleridir. Parçacıkların hızını güncelleme sürecinde kendi deneyimlerini ve sürü içindeki en iyi deneyimleri nasıl kullanacaklarını belirler.  $c_1$ , parçacığın kendi en iyi konumunu güncellemede ne kadar önem verileceğini temsil ederken,  $c_2$ , sürü içindeki en iyi konumun etkisini belirler. Bu faktörler, parçacığın konumunu güncellerken bilişsel ve sosyal bilgileri dengeler. Bu parametreler, PSO algoritmasının performansını ve yakınsama hızını etkileyebilir. Optimal değerler genellikle probleme ve uygulama alanına bağlı olarak deneylerle belirlenir. Farklı parametre ayarları, PSO algoritmasının farklı optimizasyon problemlerindeki performansını etkileyebilir. PSO algoritmasının sözde kodu Tablo 3.10'da ve akış şeması Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.10.** PSO algoritması sözde kodu

---

*Başlangıç pozisyonları ve hızlarıyla başlangıç sürüsü oluştur:*

- Her bir parçacık için:
  - Rastgele pozisyon ( $x_k^i$ ) üret:  $x_k^i = x_{min} + r * (x_{max} - x_{min})$
  - Hızı hesapla ve ata:  $v_k^i = (x_{min} + r * (x_{max} - x_{min}))$

*Tüm parçacıkların uygunluk değerlerini hesapla.*

*Her bir parçacık için yerel en iyiyi ( $p_b$ ) bul:*

- Sürü içerisindeki en iyi uygunluk değerini ( $p_b$ ) başlangıçta parçacığın kendi uygunluk değeri olarak ata.
- Sürü içerisindeki diğer parçacıkların uygunluk değerleriyle karşılaştır ve daha iyi bir uygunluk değeri bulunursa yerel en iyiyi güncelle.

*Küresel en iyiyi ( $g_b$ ) seç:*

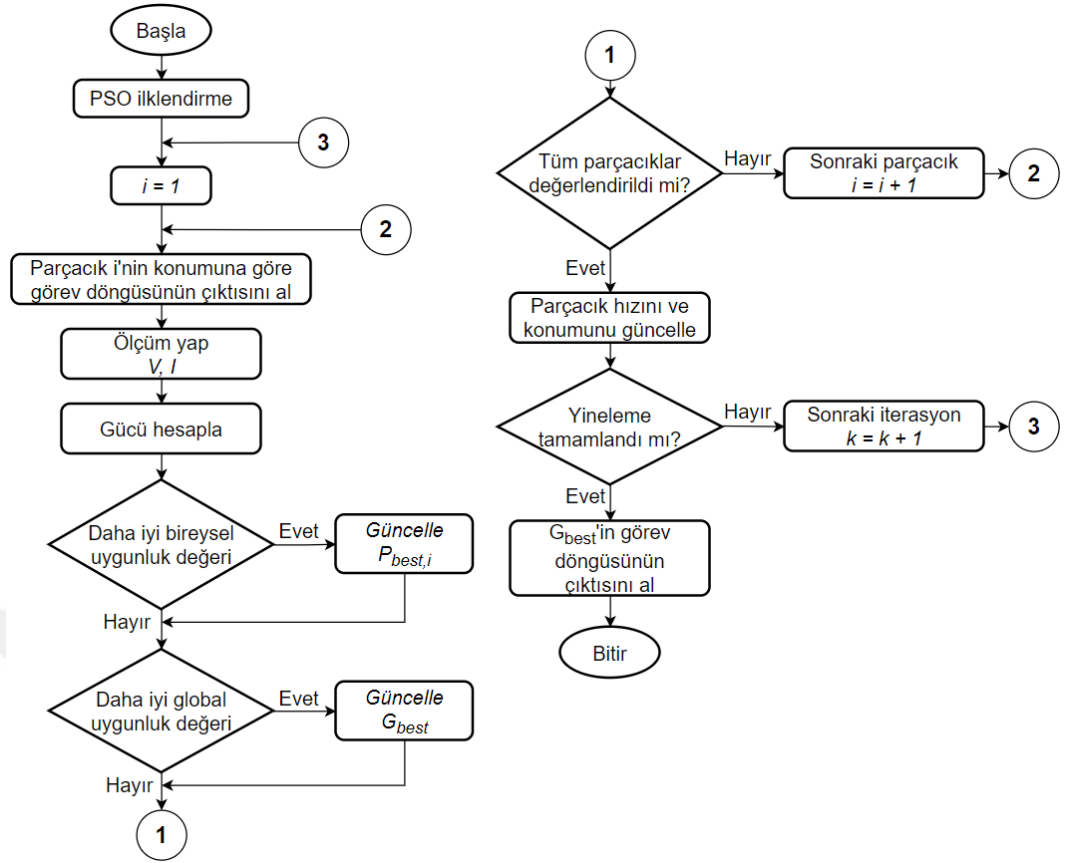
- Mevcut jenerasyondaki parçacıkların yerel en iyi değerleri arasından en iyi uygunluk değerini seç.

*Pozisyon ve hızları güncelle:*

- Her bir parçacık için:
  - Yeni hızı hesapla ve ata:  $v_{k+1}^i = v_k^i + c_1 * r_1 * (p_b - x_k^i) + c_2 * r_2 * (g_b - x_k^i)$
  - Yeni pozisyonu hesapla ve ata:  $x_{k+1}^i = x_k^i + v_k^i$

*Belirli bir durma kriterine ulaşıncaya kadar adımları tekrarla*

---



Şekil 3.18. PSO algoritması akış şeması [209]

### 3.2.4.6. Gri Kurt Optimizasyonu Algoritması

GWO algoritması, gri kurtların doğadaki yaşam ve avlanma stratejilerinden esinlenilerek geliştirilmiş bir meta sezgisel optimizasyon algoritmasıdır [210]. GWO algoritması, bir kurt sürüsünün liderlik hiyerarşisi ve sosyal davranışını taklit eder. Her bir kurt, bir çözümün potansiyel bir çözümü temsil ettiği bir konumda bulunur. GWO, lider kurtlar (alfa, beta ve delta) ve diğer takipçi kurtlar arasındaki iş birliği ve rekabeti kullanarak çözüm alanında dolaşır ve en iyi çözümü arar. MPPT yöntemi olarak kullanılan GWO algoritması, güç-gerilim karakteristiğini ve çevresel koşulları kullanarak optimum güç noktasını takip etmeyi hedefler. Lider kurtlar, panelin çalışma noktasını en iyi şekilde yakalamak için birbirleriyle etkileşime girer ve takipçi kurtlar da bu lider kurtlardan etkilenir. Kurt sürüsünün sosyal davranışından ilham alarak tasarlanmış olması, geniş bir arama alanında gezinmeyi sağlar ve çeşitli çalışma koşullarında iyi performans gösterebilir.

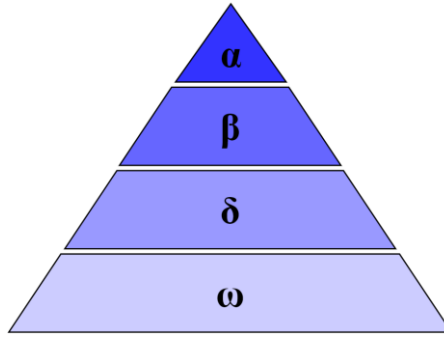
GWO algoritması MPPT yöntemi olarak kullanıldığında, algoritmasının temel mantığını kullanarak TEG'lerin optimum güç noktasını bulur. Algoritma aşağıdaki adımları içerir:

1. Başlangıçta, kurtların rastgele bir konuma yerleştirilmesi ve her bir kurdun uygunluk değerinin hesaplanması.
2. Alfa, beta ve delta olarak adlandırılan lider kurtların belirlenmesi. Bu lider kurtlar, uygunluk değeri en yüksek olan kurtlardır.
3. Her bir takipçi kurt için yeni bir pozisyonun hesaplanması. Bu hesaplama, lider kurtların pozisyonu, takipçi kurtların pozisyonu ve bir denge faktörü kullanılarak gerçekleştirilir.
4. Yeni pozisyonlara göre uygunluk değerlerinin hesaplanması ve lider kurtların güncellenmesi.
5. Çalışma noktasının güncellenmesi ve güç çıkışının ölçülmesi.
6. Belli bir durma koşulunu sağlayana kadar 3, 4 ve 5 adımlarını tekrar etme.

Gri kurtların sürü yapılarında en üstte alfa kurtların yer aldığı ve sırasıyla beta, delta ve omega kurtların sıralandığı bir zincir bulunmaktadır. Alfa kurtlar, Şekil 3.19'da verilen hiyerarşik zincir yapısından görüldüğü üzere, en baskın ve sürüye hakim kurtları temsil etmektedir. Beta kurtlar, alfa kurtların yardımcılığı görevini üstlenirler ve alfa kurtlar ile diğer kurtlar arasındaki iletişim ağını yürütürler. Omega kurtlar, alfa kurtlar tarafından seçilen ve en alt seviyede bulunan kurtlardır. Avlanma esnasında en son beslenme sırası gelen kurtlardır. Alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) veya omega ( $\omega$ ) kurtlar sınıfına dahil olmayan kurtlar delta kurtlar olarak adlandırılır. Delta ( $\delta$ ) kurtlar, omega kurtlardan baskın olarak alfa ve beta kurtlar tarafından seçilmektedir [106].

Gri kurtlar aşağıda belirtildiği gibi üç aşamada avlanırlar;

- İzleme, takip ve ava yaklaşma
- Avı çevreleme ve av yorulup duruncaya kadar avı hareket ettirme
- Ava saldırma



**Şekil 3.19.** Gri kurtların hiyerarşik zincir yapısı [210]

GWO algoritmasında alfa kurtlar en iyi çözümü ifade etmektedir. Beta ve delta kurtlar ise sırasıyla ikinci ve üçüncü en iyi çözümleri ifade etmektedirler. Son olarak omega kurtlar da aday çözümleri temsil etmektedirler.

$$D = |C * X_p(t) - X(t)| \quad (3.14)$$

$$(t + 1) = X_p(t) - A * D \quad (3.15)$$

GWO algoritmasında Denklem 3.14 ve 3.15, avın çevrenmesini ifade etmekte kullanılan denklemlerdir.  $t$  anlık iterasyon sayısını,  $X_p$  avın konumunu,  $X$  bir gri kurdun konum vektörünü tutmaktadır.  $A$  ve  $C$  vektör katsayılarını ifade etmektedirler ve Denklem 3.16 ve 3.17’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$A = a * (2 * r_1 - 1) \quad (3.16)$$

$$C = 2 * r_2 \quad (3.17)$$

burada,  $r_1$  ve  $r_2$   $[0,1]$  arasında rasgele sayıyı,  $a$  ise 2’den 0’a doğru iterasyon ilerledikçe doğrusal olarak azalan katsayıyı ifade etmektedir.

Bundan sonraki süreç arama işlemi ile devam eder. Arama işlemi rasgele olarak başlar. Daha sonra maliyet fonksiyonuna göre her bir kurdun uygunluk değeri hesaplanır. En iyi uygunluk değerini veren ilk üç konum, sırasıyla, alfa, beta ve delta kurtlar olarak temsil edilir. Avlanma işlemi alfa kurt tarafından koordine edilir ve

gerektiğinde beta ve delta kurtlar da katılabilir. Alfa, beta ve delta kurtların pozisyonları, Denklem 3.18, 3.19 ve 3.20’de gösterildiği gibi güncellenmektedir.

$$\begin{aligned} D_{\alpha} &= |C_1 * X_{\alpha} - X(t)| \\ D_{\beta} &= |C_2 * X_{\beta} - X(t)| \\ D_{\delta} &= |C_3 * X_{\delta} - X(t)| \end{aligned} \quad (3.18)$$

burada,  $X_{\alpha}$ ,  $X_{\beta}$  ve  $X_{\delta}$  sırasıyla alfa, beta ve delta kurtların pozisyonlarını temsil etmektedir. Her iterasyonda en iyi üç kurt sürekli güncellenmektedir.

$$\begin{aligned} X_1 &= |X_{\alpha} - a_1 D_{\alpha}| \\ X_2 &= |X_{\beta} - a_2 D_{\beta}| \\ X_3 &= |X_{\delta} - a_3 D_{\delta}| \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$X(t + 1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (3.20)$$

burada,  $X(t + 1)$ , avın yeni konumunu ifade etmektedir.

GWO’da avın yeri belirlendikten sonra ava saldırı işlemi gerçekleştirilir. Ava saldırı işlemi, avın yorulup, hareketini durdurduktan sonra gerçekleşir. Matematiksel olarak modelleme işlemi dikkate alındığında, Denklem 3.16’da belirtilen  $A$  değerine göre saldırı işlemi gerçekleşir.  $A$  değeri 2’den 0’a doğru  $r_1$  rasgele değişkenine bağlı olarak azalır. Bu durumda  $A$  değişkeni  $[-2a, 2a]$  aralığında değerler alır.  $A$  değeri 1’den büyükse gri kurtlar avdan uzaklaşır ve daha uygun bir av aramaya başlarlar. Eğer 1’den küçükse gri kurtlar ava saldırmaya zorlanır. Bu işlem lokal minimumlara takılmaları engeller. GWO’da avlanma işlemi durdurma kriteri sağlanıncaya kadar veya belirlenen iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam ettirilir [211]. GWO algoritmasının sözde kodu Tablo 3.11’de ve akış şeması Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.11.** GWO algoritması sözde kodu [210]

---

*Başlangıç değerlerini belirle:*

*Popülasyonunun değişkenini ata:  $X_i = x_{min} + r * (x_{max} - x_{min})$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )*

*a, A ve C parametrelerinin başlangıç değerlerini ata*

*Her bir arama ajanının uygunluk değerini hesapla*

*- $X_\alpha$  = en iyi arama ajanı*

*- $X_\beta$  = ikinci en iyi arama ajanı*

*- $X_\delta$  = üçüncü en iyi arama ajanı*

*t < maksimum iterasyon sayısı iken*

*Her bir arama ajanı için*

*Geçerli arama ajanının pozisyonunu güncelle:  $X(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3)/3$*

*a, A ve C'yi güncelle:  $A = a * (2 * r_1 - 1)$ ,  $C = 2 * r_2$*

*Tüm arama ajanlarının uygunluk değerini hesapla*

*Eğer arama ajanlarının uygunluk değeri alfa kurttan iyiye*

*Alfa kurdun pozisyonunu güncelle ( $X_\alpha$ )*

*Eğer arama ajanlarının uygunluk değeri beta kurttan iyiye*

*Beta kurdun pozisyonunu güncelle ( $X_\beta$ )*

*Eğer arama ajanlarının uygunluk değeri delta kurttan iyiye*

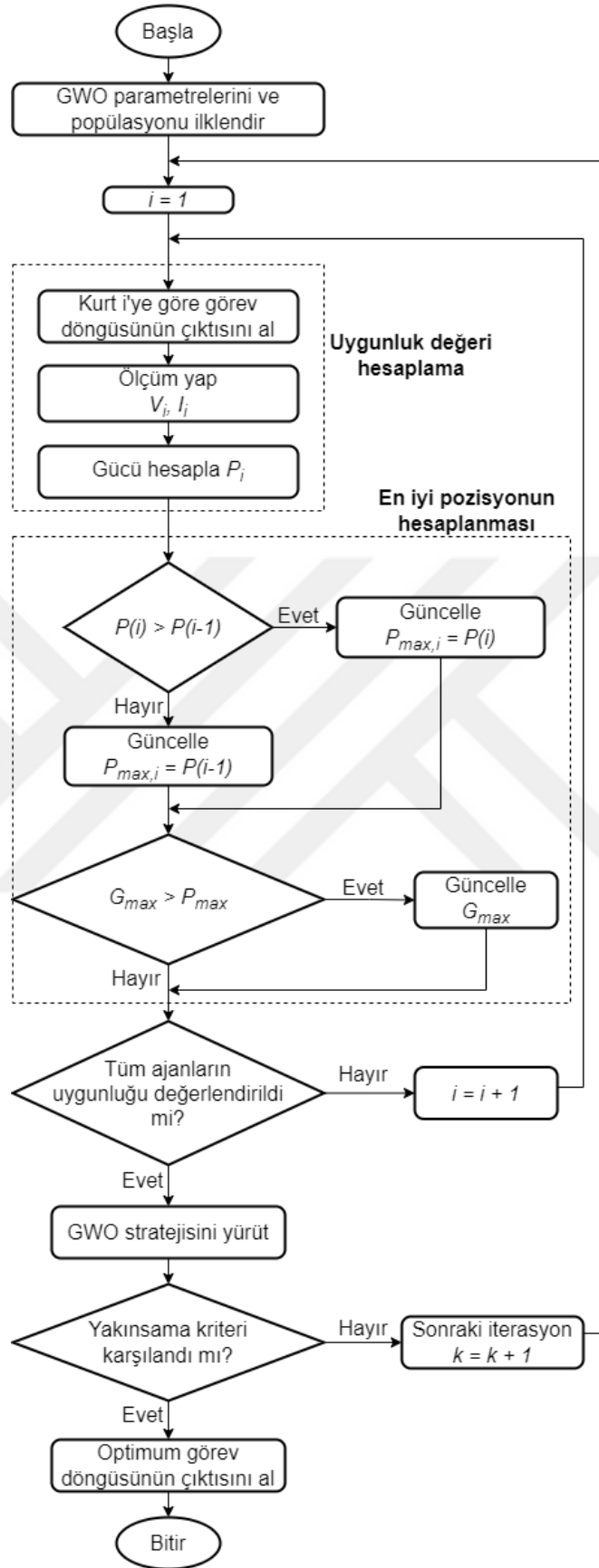
*Delta kurdun pozisyonunu güncelle ( $X_\delta$ )*

*t = t + 1*

*Belirli bir durma kriterine ulaşıncaya kadar adımları tekrarla*

*Durma kriteri sağlandığında  $X_\alpha$  'yı döndür*

---



Şekil 3.20. GWO algoritması akış şeması [102]

### 3.2.4.7. Bal Porsuğu Optimizasyonu Algoritması

Bal porsuğu, Güneybatı Asya, Hindistan Yarımadası ve Afrika'da yaygın olarak dağılmış bir memelidir. Bal porsuğu, Afrika'daki en büyük varlıklardır. Balı sever, sık sık ağaca tırmanır ve bal aramak için arı kovanlarına saldırırlar. Bal porsuğu avlanmak için hedeflerini koku alma ve yürüme duyularını kullanarak bulur. Balı çok sevmelerine rağmen bal arısı kovanlarını kolayca bulamadıkları için kovanlara rehber kuşu tarafından yönlendirilirler. Bu durumda bal porsuğu uzun pençelerini kullanarak kovanı açar ve hem kendisi hem de rehber kuş bal alır.

HBO algoritması, doğal bir yaşam formunun davranışını taklit ederek karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir metasezgisel algoritmadır. HBO algoritması, genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu gibi diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Bunlar arasında hızlı yakınsama, iyi çözüm kalitesi, basit uygulama ve düşük hesaplama maliyeti bulunur. Genellikle karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. Özellikle mühendislik, ekonomi, enerji sistemleri, yapay zekâ gibi çeşitli alanlarda uygulanabilir. MPPT yöntemi olarak kullanılabilen HBO algoritması diğer MPPT yöntemleriyle karşılaştırıldığında güç çıkışını hızlı bir şekilde optimize edebildiği için hızlı yakınsama, daha yüksek güç çıkışı sağlayabildiği için daha iyi güç verimliliği, değişken koşullara daha iyi adapte olabildiği için yüksek adaptasyon kabiliyeti ve daha basit bir yapıya sahip olduğu için daha kolay uygulanabilirlik gibi avantajları vardır. HBO algoritması, bal porsuğunun doğadaki yiyecek arama davranışını taklit ederek en iyi sonuca ulaşmayı hedefleyen metasezgisel bir algoritmadır [212]. Bal porsuğu besin kaynağını koklayarak, kazarak ya da rehber kuşu takip ederek besin bulur. İlk duruma kazma modu, ikinci duruma bal modu denilmektedir. Önceki modda, avın konumunu tahmin etmek için koku alma yeteneğini kullanır; oraya ulaştığında, avın etrafında hareket ederek kazmak ve yakalamak için uygun yeri seçer. İkinci modda, bal porsuğu arı kovanını doğrudan bulmak için rehber kuşu takip eder. Algoritma ilk olarak alt ve üst sınırlar dahilinde popülasyon kadar başlatılır.

$$x_i = lb_i + r_1 * (ub_i - lb_i) \quad (3.21)$$

İkinci adım yoğunluğun tanımlanmasıdır. Yoğunluk avın gücü ve av ile arasındaki mesafedir. Ters kare yasası ile ifade edilmiştir [213].

$$I_i = r_2 * \frac{S}{4\pi d_i^2} \quad (3.22)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (3.23)$$

$$d_i = x_{prey} - x_i \quad (3.24)$$

burada  $i$ , bal porsuğunu,  $I_i$  avın koku yoğunluğunu belirtir. Koku yüksekse hareket hızlı olacaktır.

Üçüncü adım yoğunluğun güncellenmesidir. Keşiften kullanıma sorunsuz geçişi sağlamak için zamanla değişen rastgeleleştirmeyi kontrol eder.

$$\alpha = C * \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right) \quad (3.25)$$

burada  $t_{max}$  maksimum iterasyon sayısı,  $\alpha$  arama faktörü,  $C \geq 1$  ve genellikle 2 alınır.

Dördüncü adımda yerel optimumdan kaçmak için pozisyon güncellemesi yapılır. Pozisyon güncellemesi ‘Kazma aşaması’ ve ‘Bal aşaması’ olmak üzere iki aşamadan oluşur. Kazma aşamasında bal porsuğu denklemi şöyledir:

$$x_{new} = x_{prey} + F * \beta * I * x_{prey} + F * r_3 * \alpha * d_i * |\cos(2\pi r_4) * [1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (3.26)$$

burada  $x_{prey}$  şu ana kadar bulunan avın en iyi konumudur.  $\beta$  genellikle 6 alınır ve bal porsuğunun yiyecek alabilme yeteneğidir.  $d_i$ . porsuk ve av arasındaki mesafedir.  $i$  bal porsuğunu  $r$  değerleri de  $[0 \ 1]$  arasında rastgele sayıyı temsil etmektedir. Denklem 3.27’de verilen  $F$  arama yönünü değiştiren fonksiyon olarak çalışır. Kazma aşamasında, bal porsuğu büyük ölçüde koku yoğunluğuna bağlıdır.

$$F = \begin{cases} 1, & r_6 < 0,5 \text{ ise} \\ -1, & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.27)$$

Bal aşaması ise bir bal porsuğunun arı kovanına ulaşmak için bal rehber kuşunu takip etmesi durumudur.

$$x_{new} = x_{prey} + F * r_7 * \alpha * d_i \quad (3.28)$$

burada  $x_{new}$  bal posuğunun yeni yeri,  $x_{prey}$  avın konumu,  $\alpha$  arama faktörüdür. HBO algoritmasının sözde kodu Tablo 3.12’de ve akış şeması Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.12.** HBO algoritması sözde kodu [214]

---

*$t_{max}$ ,  $N$ ,  $\beta$  ve  $C$  parametrelerini ayarla.*

*Popülasyonu rastgele değişken ata:  $x_i = x_{min} + r * (x_{max} - x_{min})$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ )*

*Her bir bal porsuğunun uygunluğunu hesapla*

*En iyi pozisyonu  $x_{prey}$ , en iyi sonucu  $f_{prey}$  olarak sakla.*

*$t < \text{maksimum iterasyon sayısı}$  iken*

*Arama faktörünü güncelle:  $\alpha = C * \exp((-t)/t_{max})$*

*Tüm popülasyonun koku yoğunluğunu hesapla:  $I_i = r_2 * S / (4\pi d_i^2)$*

*$r < 0,5$  ise pozisyonu şu şekilde güncelle:*

$$x_{new} = x_{prey} + F * \beta * I * x_{prey} + F * r_3 * \alpha * d_i * |\cos(2\pi r_4) * [1 - \cos(2\pi r_5)]|$$

*değilse pozisyonu şu şekilde güncelle:*

$$x_{new} = x_{prey} + F * r_7 * \alpha * d_i$$

*Yeni pozisyona göre uygunluğunu hesapla ve  $f_{new}$  değişkenine ata*

*$f_{new} \leq f_i$  ise*

*$x_i = x_{new}$  ve  $f_i = f_{new}$  olarak ata*

*$f_{new} \leq f_{prey}$  ise*

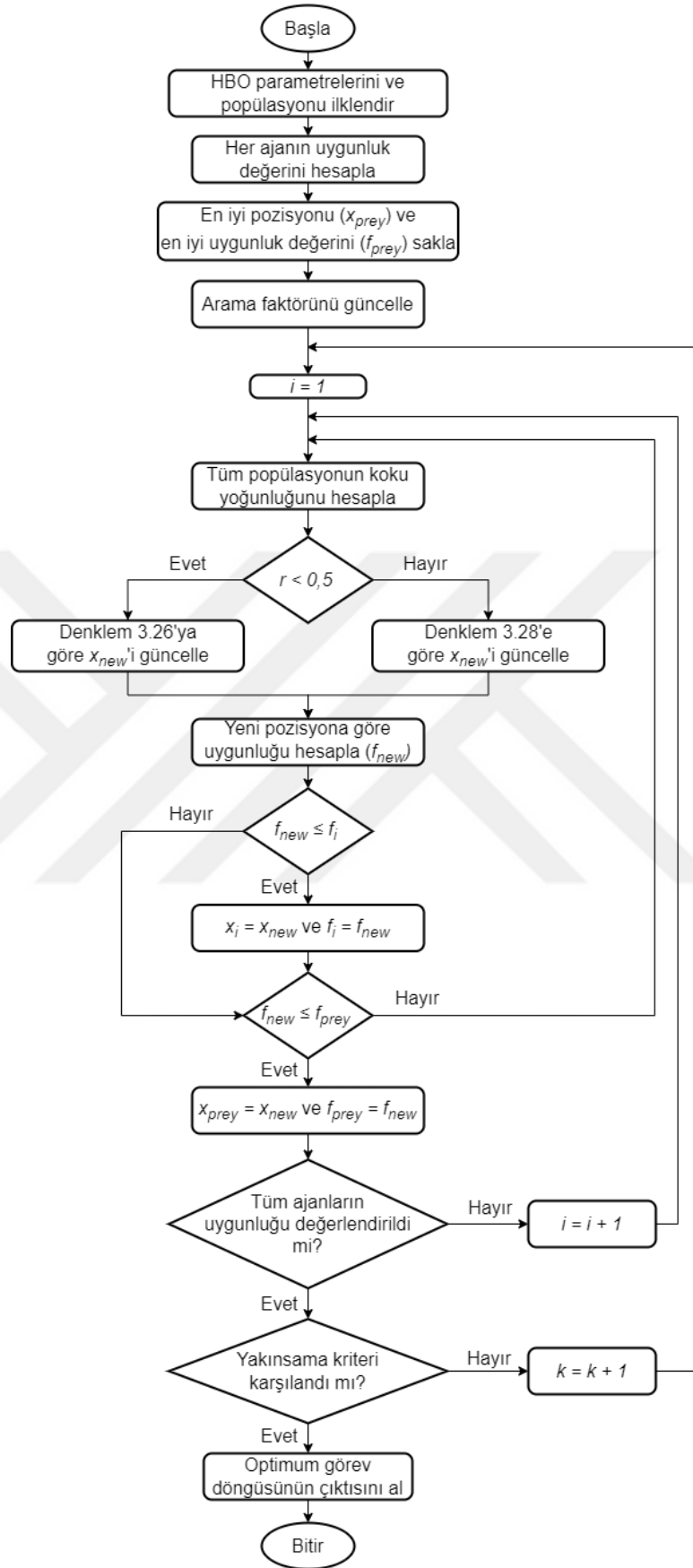
*$x_{prey} = x_{new}$  ve  $f_{prey} = f_{new}$  olarak ata*

*$t = t + 1$*

*Belirli bir durma kriterine ulaşıncaya kadar adımları tekrarla*

*Durma kriteri sağlandığında  $x_{prey}$  'i döndür*

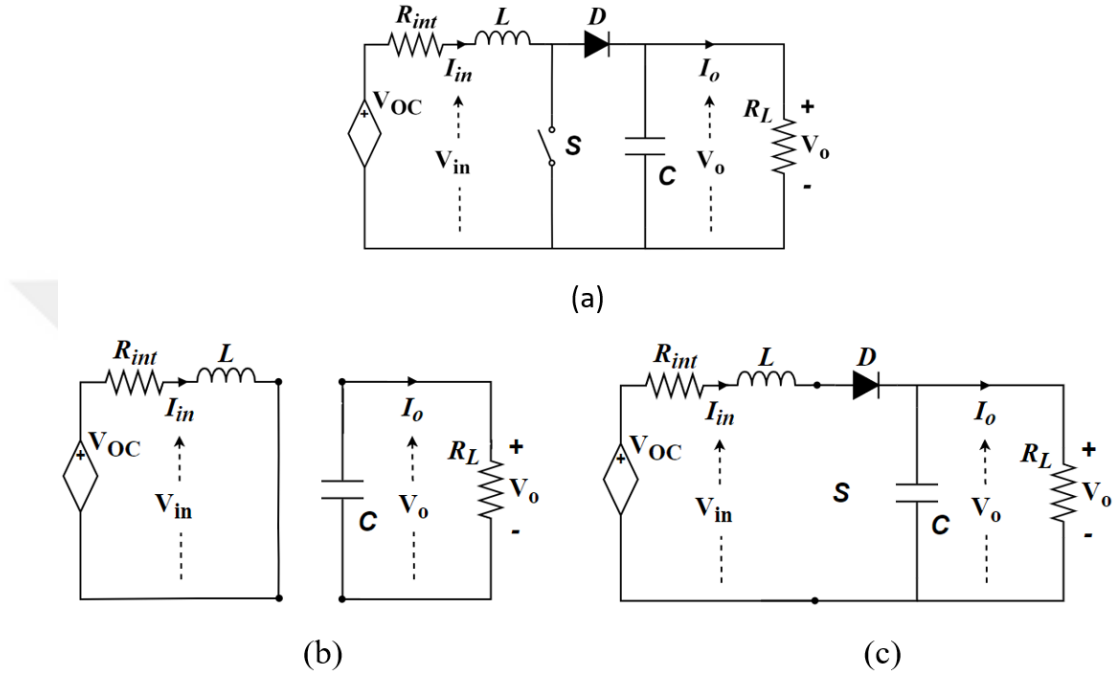
---



Şekil 3.21. HBO algoritması akış şeması [215]

### 3.2.5. İzolesiz DC-DC Yükselten Dönüştürücü Modeli

Yükselten dönüştürücüler çıkış gerilimini yükseltirken akımı düşüren bir DC-DC dönüştürücüdür. Yükselten dönüştürücüde çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha yüksektir. Mod1 ve Mod2 olmak üzere iki modda incelenebilirler.



Şekil 3.22. Yükselten dönüştürücü (a) şeması (b) Mod1 (c) Mod2

S anahtarı iletimdeyken, dönüştürücü Mod1’de çalışır ve akım bobinden saat yönünde akar. Bobin bir manyetik alan oluşturur ve bir miktar enerji depolar. Bobinin sol tarafının polaritesi pozitifdir.

S anahtarı iletimde değilken dönüştürücü Mod2’de çalışır, yani akım diyot ve kondansatör üzerinden akar. Empedans yükseldikçe akım azalır. Yüke doğru akımı korumak için önceden oluşturulan manyetik alan enerjisi azaltılır. Böylece bobinin polaritesi ters çevrilir. Yani bobin depoladığı enerjiyi diyot üzerinden kondansatöre ve yüke aktarır. Sonuç olarak, kaynak ve bobin seri halde olur ve kondansatörün diyot üzerinden şarj edilmesi için daha yüksek bir gerilim oluşur [216].

S anahtarı yeterince hızlı anahtarlanırsa, bobin şarj aşamaları arasında tam olarak boşalmaz ve S anahtarı açıldığında çıkışta her zaman tek başına giriş

kaynağından daha büyük bir gerilim görülür. Ayrıca S anahtarı iletimde değilken yüke paralel kondansatör bu birleşik gerilime yüklenir. S anahtarı daha sonra ilettime geçtiğinde, kapasitör yüke gerilim ve enerji sağlayabilir. Bu süre boyunca, engelleme diyotu, kapasitörün S anahtarı aracılığıyla deşarj olmasını engeller. Yük, anahtar iletim konumundayken kondansatörden, kesim durumundayken kaynak ve bobinden beslenir. Böylece düşük seviyeli bir DC gerilim daha yüksek seviyeli bir DC gerilime dönüşmüş olur. İdeal yükselten dönüştürücünün transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.29)$$

Yükselten dönüştürücü tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar vardır. Genel olarak bunlar giriş ve çıkış gereksinimlerinin belirlenmesi, anahtar ve aktif eleman seçimi, bobin ve kondansatör seçimi, kontrol devresi tasarımı gibi temel konulardır. Bu tez çalışması kapsamında, kullanılan TEG sisteminin özelliklerine göre yükselten dönüştürücü tasarlanmıştır. Tasarım hesaplamaları Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4 ile birlikte aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmıştır.

Yükselten dönüştürücü tasarlanırken, dönüştürücüden alınmak istenen verim de transfer fonksiyon ile birlikte düşünülmelidir. Dönüştürücünün görev döngüsü doluluk oranı, dönüştürücü verimi ile birlikte şu şekilde hesaplanır:

$$D = 1 - \frac{V_{in(min)} \times \eta}{V_o} \quad (3.30)$$

burada,  $V_{in(min)}$  dönüştürücünün minimum giriş gerilimi ve  $\eta$  dönüştürücünün verimidir. Bobinin dalgalanma akımı aşağıdaki eşitlikte gösterilir:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in(min)} \times D}{f_s \times L} \quad (3.31)$$

burada,  $\Delta I_L$  bobinin dalgalanma akımı (A),  $f_s$  anahtarlama frekansı (Hz) ve  $L$  bobinin endüktansdır (H). Dönüştürücünün çıkış akımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = \frac{D \times (1 - D) \times V_{in}}{2 \times L \times f_s} + (1 - D) \times I_{min} \quad (3.32)$$

Dönüştürücünün maksimum izin verilen çıkış akımı iki farklı eşitlikle hesaplanabilir. Bunlar aşağıda verilmiştir:

$$I_{o(max)} = \left( I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \times (1 - D) \quad (3.33)$$

$$I_{o(max)} = \sqrt{P_{TEG\_MAX} / R_L} \quad (3.34)$$

burada,  $I_{o(max)}$  ve  $I_{LIM(min)}$ , sırasıyla, dönüştürücünün maksimum izin verilen çıkış akımı (A), izin verilen minimum anahtarlama akımıdır (A). Diğer taraftan, dönüştürücünün maksimum izin verilen çıkış gerilimi aşağıda verilmiştir:

$$V_{o(max)} = \sqrt{P_{TEG\_MAX} \times R_L} \quad (3.35)$$

burada,  $V_{o(max)}$  dönüştürücünün maksimum çıkış gerilim değeridir (V). Denklem 3.34 ve 35'te  $I_{o(max)}$  ve  $V_{o(max)}$  değerleri yük direncine bağlı olarak değiştiğinden, dönüştürücünün tasarım aşamalarında her yük direnci için bu değerler bulunmuştur. Maksimum anahtarlama akımı aşağıdaki eşitlikle verilmiştir:

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{o(max)}}{1 - D} \quad (3.36)$$

burada,  $I_{SW(max)}$  maksimum anahtarlama akımıdır. Dönüştürücünün bobin endüktans denklemini aşağıda verilmiştir:

$$L = \frac{V_{in} \times (V_o - V_{in})}{\Delta I_L \times f_s \times V_o} \quad (3.37)$$

burada,  $L$  bobin endüktasıdır (H). Denklem 3.37'de  $\Delta I_L$  değeri bilinmediğinden bobin değeri hesaplanamaz. Bu yüzden, aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$\Delta I_L = (0,2 \sim 0,4) \times I_{o(max)} \times \frac{V_o}{V_{in}} \quad (3.38)$$

$\Delta I_L$  değeri çıkış akımının %20-%40'ı arasında dalgalanır ve bu değerler arasında alınır. Diğer taraftan yükselten dönüştürücüde kullanılacak olan gerekli kondansatörün minimum değeri aşağıdaki eşitlikle bulunur:

$$C_{out(min)} = \frac{I_{o(max)} \times (1 - D)}{f_s \times \Delta V_o} \quad (3.39)$$

burada,  $C_{out(min)}$  çıkış kondansatörüdür (F). Yükselten dönüştürücünün çıkış dalgalanma gerilimi aşağıda verilmiştir:

$$\Delta V_o = ESR \times \frac{I_{o(max)}}{1 - D} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.40)$$

burada,  $\Delta V_o$  ve  $ESR$ , sırasıyla, çıkış dalgalanma gerilimi (V) ve kullanılan çıkış kondansatörünün eşdeğer seri direncidir.

### 3.2.6. DC-DC Yükselten Dönüştürücü Tasarımı

Yükselten dönüştürücü tasarımı yapılırken, TEG modülünün üretici verileri kullanılmıştır. Sıcak yüzey sıcaklığı 40°C - 220°C arasındaki maksimum güç ( $P_{max}$ ) ve maksimum güç noktasındaki gerilim ( $V_{MPP}$ ) değerleri kaydedilmiştir. Maksimum çıkış gerilimi ve maksimum çıkış akımı yük direnci  $R_L$ 'ye bağlı değerler şeklinde değişken olarak kullanılmıştır. Böylece her yük değeri için daha doğru bobin ve kondansatör değerleri hesaplanabilmektedir.  $L$  ve  $C$  değerlerini hesaplamak için Tablo 3.13'teki tasarım parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak Denklem 3.30-3.40 arasındaki formüller yardımıyla her sıcaklık farkı için ayrı ayrı  $L$  ve  $C$  değerleri bulunmuştur. Yük değeri değişken olduğu için çıkış gerilimi ve akım değerleri de değişken olarak kullanılmıştır ve her yük değeri için  $L$  ve  $C$  değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır.

**Tablo 3.13.** Yükselten dönüştürücü tasarım parametreleri

| Parametre    | Değer                 | Açıklama                                           |
|--------------|-----------------------|----------------------------------------------------|
| $P_{MPP}$    | 57 W                  | MPP'deki güç                                       |
| $P_{conv}$   | 60 W                  | Konvertör gücü                                     |
| $V_{in}$     | 20,5 V                | Giriş gerilimi<br>(TEG'in MPP'deki çıkış gerilimi) |
| $R_L$        | 1-60 $\Omega$         | Yük direnci                                        |
| $V_{o(max)}$ | $\sqrt{P_{MPP}R_L}V$  | Maksimum çıkış gerilimi                            |
| $I_{o(max)}$ | $\sqrt{P_{MPP}/R_L}A$ | Maksimum çıkış akımı                               |
| $\Delta I_L$ | 30% of $I_o$          | Maksimum akım dalgalanması                         |
| $\Delta V_o$ | 2% of $V_o$           | MPP'deki maksimum gerilim dalgalanması             |
| $\eta$       | 0,9                   | Konvertör verimi                                   |
| $f_s$        | 20 kHz                | Anahtarlama frekansı                               |

Tüm hesaplamalar MATLAB programı yardımı ile yapılmış ve tüm olasılıklar için bulunan  $L$  ve  $C$  değerlerinden tasarım parametrelerinin hepsini karşılayanlar bu değerlerin maksimum olanlarıdır. Hesaplama süreci şu şekilde işlemektedir;

$$V_o = \sqrt{P_{MPP}R_L} \quad (3.41)$$

$$I_o = \sqrt{P_{MPP}/R_L} \quad (3.42)$$

$$D = 1 - \frac{\eta V_{in}}{V_o} = 1 - \frac{\eta V_{in}}{\sqrt{P_{MPP}R_L}} \quad (3.43)$$

$$\Delta I_L = 0,3I_{o(max)} \frac{V_o}{V_{in}} = 0,3I_{o(max)} \frac{\sqrt{P_{MPP}R_L}}{V_{in}} \quad (3.44)$$

burada  $\Delta I_L$  tasarım kriteri çıkış akımının %30'u seçilmiştir.

$$\Delta V_o = V_o \times \frac{2}{100} \quad (3.45)$$

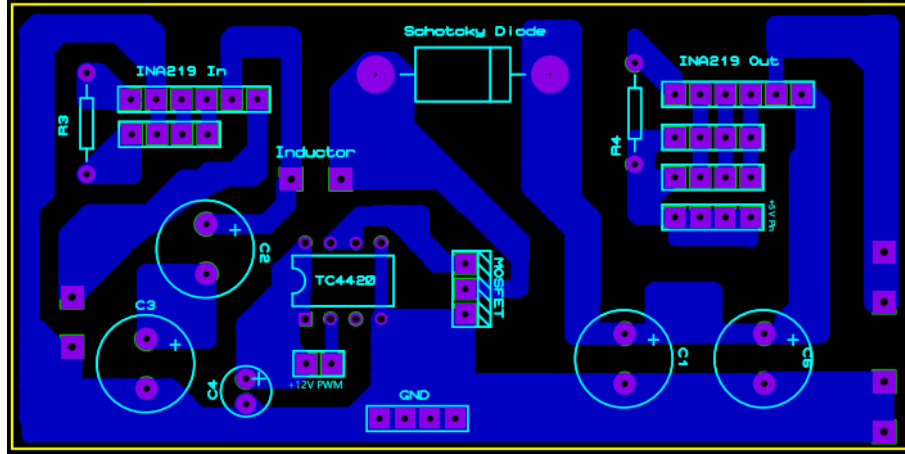
burada çıkış dalgalanma gerilimi çıkış geriliminin %2'si kadar seçilmiştir.

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{\Delta l_L f_s V_o} = \frac{V_{in}(\sqrt{P_{MPP} R_L} - V_{in})}{\Delta l_L f_s \sqrt{P_{MPP} R_L}} \quad (3.46)$$

$$C = \frac{D I_{o(max)}}{f_s \Delta V_o} = \frac{D \sqrt{P_{MPP}/R_L}}{f_s \Delta V_o} \quad (3.47)$$

Yapılan işlemler sonucunda her yük değerinde kullanılabilecek  $L$  ve  $C$  değerleri hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacağı için, gerçekte var olan ve kolay temin edilebilecek, tasarım sonuçlarından büyük ve en yakın bobin ve kondansatör değerleri  $L = 220 \mu H$  ve  $C = 2200 \mu F$  olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 3.13'teki tasarım parametrelerine sahip yükselten dönüştürücü simülasyonlarda kullanılmış, breadboard üzerinde kurulup güç kaynağı ile testleri yapılmış ve MPPT algoritmaları ile birlikte denenmiştir. Anahtarlama elemanı olarak devrede N kanal IRFZ44N MOSFET kullanılmıştır. IRFZ44N MOSFET'i 12 V gerilimde çalıştırmak için TC4420 MOSFET sürücü kullanılmıştır. Tasarlanan devreye ek olarak, dönüştürücüde giriş kondansatörü kullanılmıştır. Kondansatör, yüksek frekanslı parazitleri emer ve giriş gerilimindeki ani değişiklikleri pürüzsüzleştirir. Bu, dönüştürücünün istikrarlı bir şekilde çalışmasını ve istenen çıkış gerilimini elde etmesini sağlar. Ayrıca, kondansatör, anahtarın anahtarlama anında ani bir akım çekmesini engelleyerek anahtar üzerindeki gerilim dalgalanmalarını azaltır. Girişte kullanılan kondansatör, aynı zamanda dönüştürücünün emniyetini de sağlar. Ani giriş gerilimi dalgalanmaları veya geçici rejim durumunda, kondansatör enerji depolar ve dönüştürücüye düzgün bir şekilde beslemeyi sağlar. Bu, bileşenlerin aşırı gerilimden korunmasına yardımcı olur ve dönüştürücünün sağlam ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Tasarlanan dönüştürücünün düzgün çalıştığı gözlemlendikten sonra Şekil 3.23'te gösterilen PCB tasarımı yapılmış ve Şekil 3.24'te görüldüğü gibi bakır plaket üzerine baskı devresi çıkarılmıştır. Yükselten dönüştürücü devresinde kullanılan bileşenler Tablo 3.14'te ayrıca verilmiştir.



Şekil 3.23. Yükselten dönüştürücü PCB tasarımı

Tablo 3.14. Yükselten dönüştürücü bileşenleri

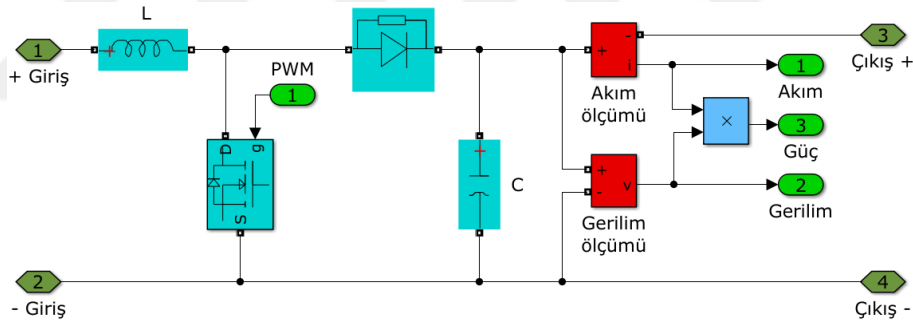
| Bileşen       | Değer / Seri                  | Açıklama                                             |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| Kondansatör   | 110 $\mu$ F (2x220 $\mu$ F)   | Giriş kondansatörü (35V)                             |
| MOSFET        | IRFZ44n                       | Anahtarlama elemanı                                  |
| MOSFET sürücü | TC4420                        | MOSFET'i anahtarlayan PWM sinyalinin güçlendirilmesi |
| Bobin         | 220 $\mu$ H                   | 4A                                                   |
| Diyot         | Schotky                       | 3A                                                   |
| Kondansatör   | 2000 $\mu$ F (2x1000 $\mu$ F) | Çıkış kondansatörü (50V)                             |



Şekil 3.24. Yükselten dönüştürücü

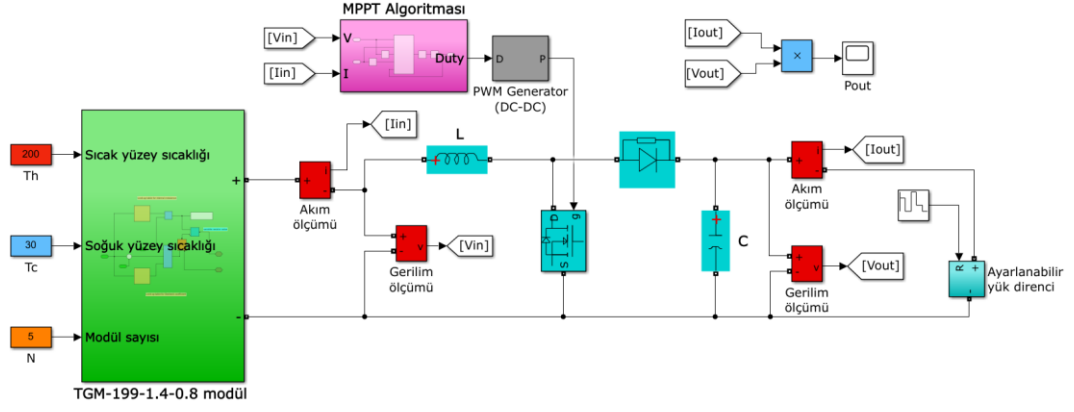
### 3.2.7. DC-DC Yükselten Dönüştürücü MATLAB/Simulink® Modellemesi

Yükselten dönüştürücünün simülasyonunun yapılması için MATLAB/Simulink® ortamında bir TEG sistemi geliştirilmiştir. TEG Simulink® modeli olarak Bölüm 3.2.1’de detayları verilen model kullanılmıştır. Bu TEG sisteminde istenildiği kadar TEG modülleri seri ve paralel olarak bağlanabilmektedir. Seri ve paralel bağlantıya göre elde edilen güç miktarları değişmektedir. Uygulamalarda TEG modüllerinin sıcaklığa bağlı olarak iç direnç değerleri değiştiği için modellenen sisteme de bu özellik kazandırılmıştır. İstenilen sıcaklık aralıkları giriş değerleri ile verilebilmektedir. Yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanına gönderilen görev döngüsü doluluk oranı değerleri P&O, INC, FOCV, SCC, PSO, GWO ve HBO algoritmaları kullanılarak oluşturulan MPPT yöntemleri ile ayarlanmıştır. TEG’den elde edilen güç, dönüştürücüler vasıtası ile yük direnci üzerinden ölçülmüştür. Bölüm 3.2.6’da tasarlanan yükselten dönüştürücünün Simulink® modeli Şekil 3.25’te yer almaktadır.



**Şekil 3.25.** Yükselten dönüştürücü Simulink® modeli

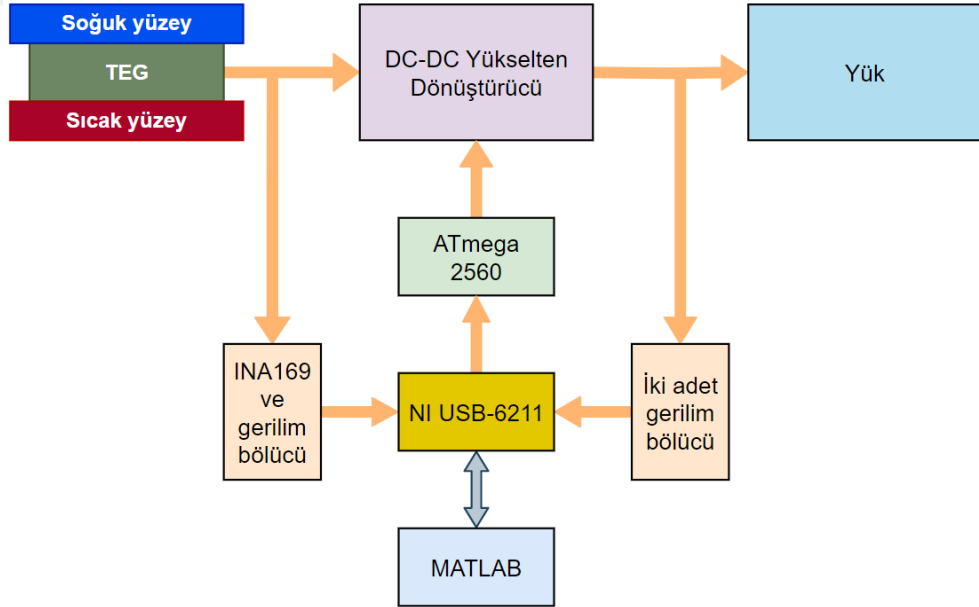
MATLAB/Simulink® ortamındaki TEG sisteminde, TEG'in sıcak yüzey sıcaklığı  $T_h = 200^\circ C$  ve soğuk yüzey sıcaklığı  $T_c = 30^\circ C$  olmak üzere sabit tutulmuştur. İstenildiğinde bu değerler rahatlıkla kullanılacak TEG'in markasına göre değiştirilebilmektedir. Maksimum ve minimum sıcaklık değerleri ayarlanabilmektedir. MATLAB/Simulink® ortamında modellenen TEG sisteminin iç direnci  $T_c = 30^\circ C$  ve  $T_h = 200^\circ C$  koşullarında  $7,3 \Omega$ 'dur. Bölüm 3.2.1'de detayları verilen TEG modeli ve Şekil 3.25'te yer alan yükselten dönüştürücü kullanılarak oluşturulan TEG sistemi Simulink® modeli Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3.26. TEG sistemi, yükselten çevirici ve yük bağlantısı

### 3.2.8. Deneysel Çalışmadaki Güç Verilerinin Mikrodenetleyiciye Gönderilmesi

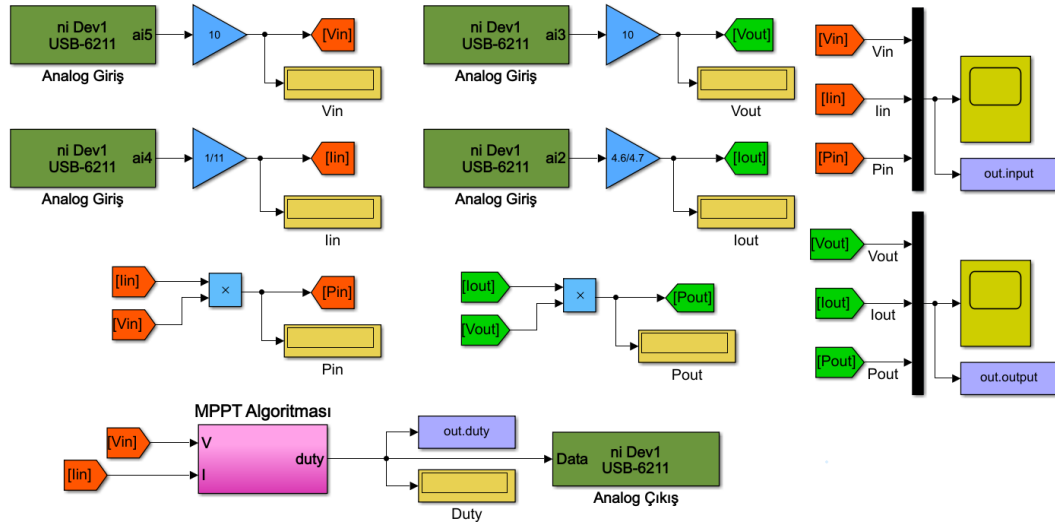
MPPT algoritmalarını uygulayabilmek için TEG'in çıkışındaki akım ve gerilim değerleri ile yükün veya dönüştürücünün çıkışındaki akım ve gerilim değerleri ölçülmeli ve dijitale çevrilmelidir. Bu sayede, iletilen güç miktarı da hesaplanabilir. Güç elde etmek amacıyla kurulan TEG sisteminde ölçümlerin ve bilgi akışının yer aldığı detaylı blok diyagramı Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. TEG sistemi ölçüm ve bilgi akışı blok diyagramı

INA169 akım sensörü TEG'in çıkışındaki akımı belirlemek için kullanılmıştır. Gerilim bölücü devresi ise TEG'in çıkışındaki gerilim değerini belirlemek için kullanılmıştır. Yükün üzerindeki veya çeviricilerin çıkışındaki akım ve gerilim değerleri iki adet gerilim bölücü ile ölçülmüştür. TEG çıkışındaki akım bilgisi, NI USB-6211 kartının AI4 kanalına, gerilim bilgisi ise AI5 kanalına gönderilmiştir. Yükün veya çeviricinin çıkışındaki gerilim değeri, NI USB-6211 kartının AI3 kanalına, akım değeri ise AI2 kanalına iletilmiştir.

National Instruments NI USB-6211 veri toplama kartı, MATLAB/Simulink® yazılımından verileri kolaylıkla alabilir ve diğer çevresel birimlere gönderebilir. Bu sistemde, MATLAB/Simulink® ortamında oluşturulan MPPT algoritmaları tarafından üretilen  $D$  değeri, NI USB-6211 veri edinim kartının AO0 kanalı aracılığıyla ATmega2560 MCU'ya iletilmiştir. Ayrıca, TEG'in ürettiği akım ve gerilim değerleri de bu veri toplama kartı ile MATLAB/Simulink® ortamına taşınmıştır. Akım ve gerilim değerleri 0-5 V DC aralığında ölçülmüştür. MATLAB/Simulink® yazılımından gelen  $D$  değeri de NI USB-6211 veri toplama kartının analog çıkış AO0 kanalı ile ATmega2560 MCU'ya gönderilmiştir. NI USB-6211 kartındaki bağlantılar ve Simulink® ortamında kullanılan bloklar Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



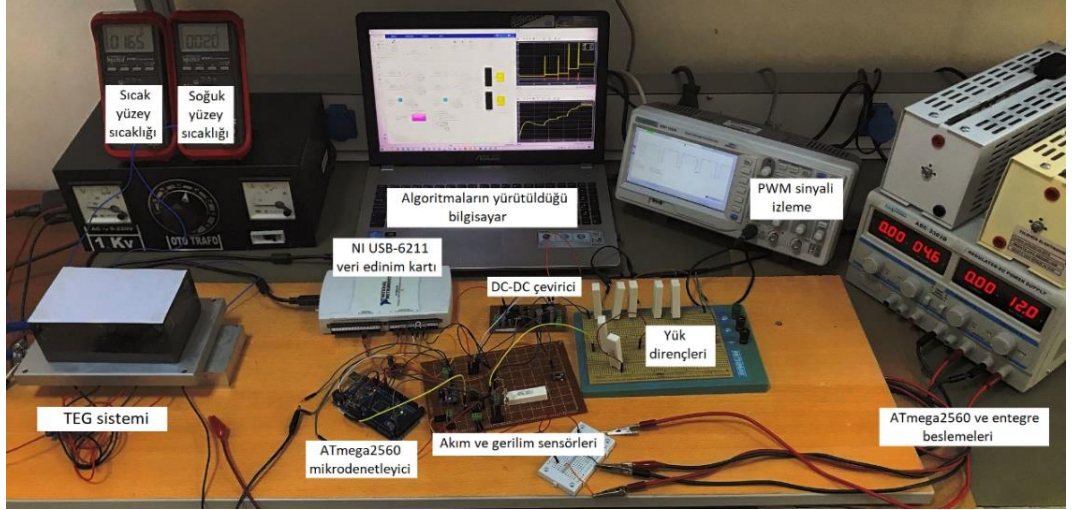
Şekil 3.28. MATLAB/Simulink® NI USB-6211 kartı blok şeması

MATLAB/Simulink® NI USB-6211 kartı blok şeması kullanılarak veri akışları detaylı bir şekilde görülebilir. MPPT algoritmaları kullanılarak üretilen bir  $D$  değeri, kazançla birlikte NI USB-6211'e gönderilir. Bu analog veri 0-1 V aralığında bir değerdir. Bu analog veri ATmega2560 denetleyicisine gönderildiğinde, 31,39 kHz frekansında 8 bit çözünürlüklü bir PWM sinyaline dönüştürülür. Bu PWM sinyali, MOSFET sürücülerine iletilir ve böylece MOSFET'in tetiklenmesi sağlanır. NI USB-6211'in AI5 kanalından gelen veri, 10 kazançla çarpılarak MATLAB/Simulink®'teki  $V_{in}$  oluşturulur. Benzer şekilde NI USB-6211'in AI4 kanalından gelen veri, 1/11 kazançla çarpılarak  $I_{in}$  girişi elde edilir.

NI USB-6211 AI3 ve AI2 kanallarından gelen veriler, sırasıyla, 10 ve 4,6/4,7 kazançları ile çarpılıp  $V_{out}$  ve  $I_{out}$  oluşturulmuştur. Bu değerler matematiksel hesaplamalara tabi tutulup ekrandan sürekli izlenmesi ve kayıt altına alınarak analizlerinin yapılması sağlanmıştır.

### 3.2.9. TEG Sistemi Deneysel Kurulumları

Deneysel kurulumlar laboratuvar imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurulumlarda dört tane TEG'in sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarının elde edilmesi için, sırasıyla, 50  $\Omega$  değerinde krom-nikel telden yapılma bir ısıtıcı dirençli plaka ve yine soğuk suyun geçirildiği diğer bir alüminyum plaka kullanılmıştır. Bu TEG'ler birbirine seri bağlanarak gerilim değerleri yükseltilmiştir. Deneyler sırasında TEG sıcak yüzey sıcaklığı en çok 185°C'ye kadar ısıtılmış ve soğuk yüzey sıcaklığı 20°C değerinde sabit tutulmuştur. Sıcak yüzey sıcaklığının sıcaklık değeri bir oto trafosu ile ayarlanarak istenilen sıcaklık değerine getirilebilmiştir. Soğuk yüzey sıcaklığının sabit tutulmasında kullanılan şebeke suyu etkili olmuştur. Bu alüminyum plakaların TEG yüzeylerine tam temaslarının sağlanması için yüzeylerinde termal macun kullanılmıştır. Ayrıca üzerine koyulan bir ağırlık sayesinde yüzey temasının artırılması sağlanmıştır. Şekil 3.29'da TEG sisteminden güç elde etmek için kurulan deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 3.29. TEG sistemi deneysel kurulumu

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında TEG sistemleri için uygulanan MPPT yöntemlerinde kullanılan geleneksel ve metasezgisel algoritmalar için simülasyonlar ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Simülasyonlar P&O, INC, FOCV ve FSCC olmak üzere dört geleneksel algoritma ve metasezgisel olarak HBO, GWO ve PSO algoritmaları için yapılmıştır. HBO algoritması yeni ve daha önce MPPT yöntemlerinde kullanılmayan bir algoritmadır. Bu tez çalışması kapsamında HBO algoritması ilk defa MPPT yöntemlerinde kullanılmak üzere uyarlanmıştır.

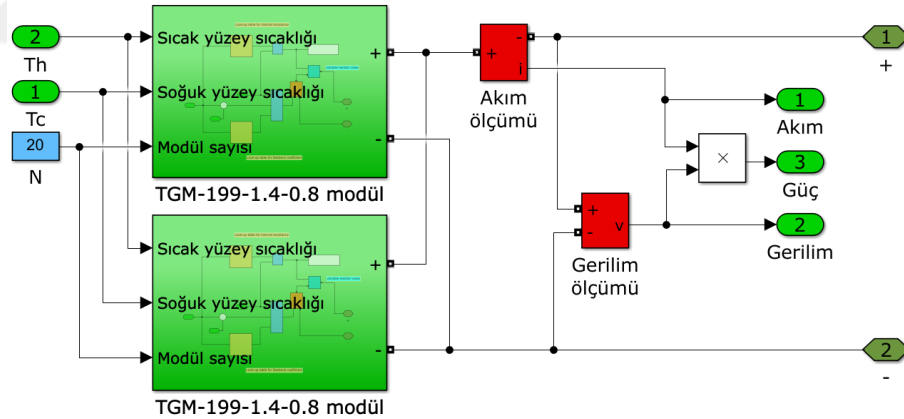
Deneysel çalışmalar için kurulan TEG sisteminde kullanılan TGM-199-1.4-0.8 TEG modülünün üretici verileri ile birebir sonucu üreten bir MATLAB/Simulink® modeli oluşturulmuştur. İlk aşamalarda yapılan simülasyon çalışmalarında geleneksel yöntemler birbirleri ile kıyaslanmış ve deneysel olarak literatürde en çok kullanılan P&O algoritmasının metasezgisel algoritmalar ile kıyaslanmasına karar verilmiştir. Bu aşamada aynı zamanda TEG modüllerinin iç direnç ve Seebeck katsayılarının elde edilen güç üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Bu çalışmalar tamamlandıktan sonra metasezgisel algoritmalar MPPT yöntemi olarak uyarlanmış ve simülasyon çalışmaları ile deneysel çalışmalar bir arada ilerletilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan TEG modüllerinin kararlı çalıştığı ancak üretici verileri ile deneysel verilerin birbiri ile örtüşmediği saptanmıştır. Simülasyonlarda tutarsızlığa neden olacak bu durum, TEG modülünden deneysel olarak elde edilen veriler ile yeni bir MATLAB/Simulink® modeli oluşturularak aşılmıştır.

Bu bölümde geleneksel algoritmaların farklı yükler altındaki simülasyon çalışmaları, TEG iç direnci ve Seebeck katsayılarının simülasyonlardaki etkisi, metasezgisel algoritmaların simülasyon çalışmaları ve metasezgisel algoritmaların hem simülasyon hem de deneysel olarak farklı yüklerde geleneksel P&O algoritması ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen veriler ve çıkarımlar paylaşılmıştır.

#### 4.1. Geleneksel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Simülasyonları

Tez çalışmasının ilk aşamasında, tasarlanan TEG modeli ve yükselten dönüştürücü kullanılarak bir TEG sistemi oluşturulmuş ve geleneksel MPPT yöntemleri sınıfında yer alan P&O, INC, FOCV ve FSCC algoritmaları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bölüm 3.2.1’de detayları verilen TEG modeli ve Bölüm 3.2.6’da tasarım detayları verilen Şekil 3.25’teki yükselten dönüştürücü kullanılarak oluşturulan TEG sistemi ile farklı yükler kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu aşamadaki simülasyonlarda Şekil 4.1’de görülen ve Tablo 4.1’de özellikleri verilen “TEG sistemi 1” kullanılmıştır. Bu sistem her birinde 20 adet seri bağlı TEG modülü bulunan iki paralel gruptan oluşmaktadır. TEG sistemi bünyesinde toplamda 40 modül barındırmaktadır. TEG sistemindeki her modülün iç direnci  $1,46 \Omega$  ‘dur. Dolayısıyla paralel TEG sisteminin toplam iç direnci  $1,46 \times 20/2 = 14,6 \Omega$ ’dur. TEG sisteminden güç elde etmek için yükselten dönüştürücü kullanıldığından, Bölüm 3.2.3’te de bahsedildiği gibi yük direnci olarak  $14,6 \Omega$ ’dan daha yüksek direnç değerleri kullanılmalıdır.



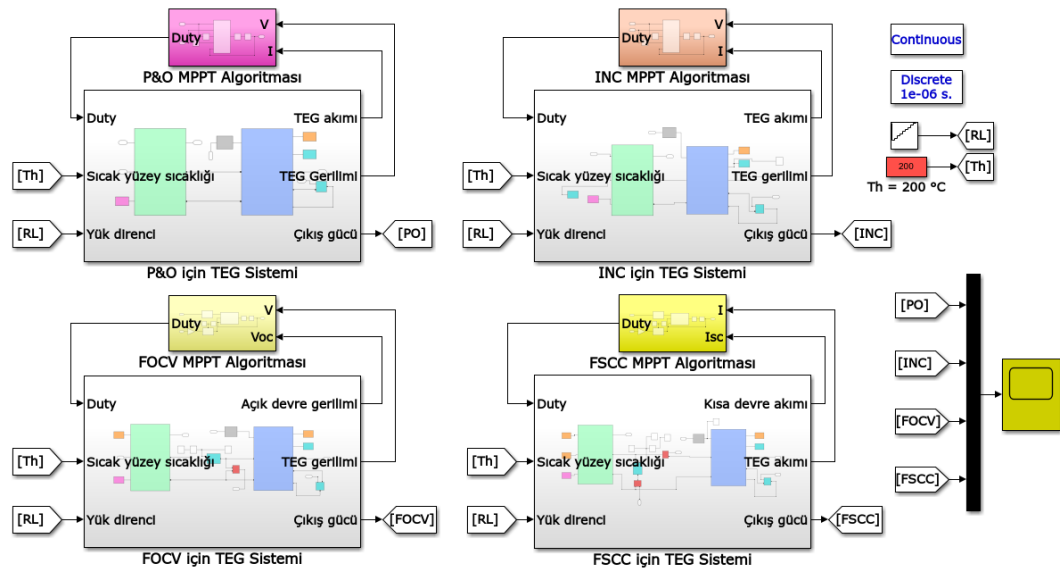
Şekil 4.1. Paralel TEG sistemi

Simülasyonlar Şekil 4.2’de görülen Simulink® modeli aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Dört geleneksel MPPT algoritması, soğuk yüzey sıcaklığı  $30^\circ\text{C}$ , sıcak yüzey sıcaklığı  $200^\circ\text{C}$  olmak üzere farklı yükler altında çalıştırılmıştır. Simülasyonlarda görev döngüsü adım büyüklüğü ( $\Delta D$ ) tüm algoritmalarda 0,001 olarak kullanılmıştır. Bu şartlar altında bir TEG modülünden 11,44 W güç alınmaktadır. Dolayısıyla 20 adet seri bağlı iki paralel TEG grubundaki toplam 40 modülünden  $11,44 \times 40 = 457,6 \text{ W}$  güç alınması planlanmaktadır. Algoritmaların

TEG'den ortaya çıkardığı güç, bu değerle kıyaslanarak algoritmaların performansları kıyaslanmaktadır.

**Tablo 4.1.** TEG modülü ve TEG sistemi özellikleri

| Özellikler                            | TGM-199-1.4-0.8 | TEG Sistemi 1 | TEG Sistemi 2  |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|----------------|
| TE çifti                              | 199             | 40 × 199      | 5 × 199        |
| Termoelektrik modül                   | 1               | 20 // 20      | 5 (seri bağlı) |
| MPP'deki çıkış gücü ( $P_{MPP}$ )     | 11,44 W         | 457,6 W       | 57,2 W         |
| MPP'deki çıkış gerilimi ( $V_{MPP}$ ) | 4,142 V         | 82,84 V       | 20,71 V        |
| MPP'deki çıkış akımı ( $I_{MPP}$ )    | 2,761 A         | 5,522 A       | 2,761 A        |
| Açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ )      | 8,179 V         | 163,58 V      | 40,895 V       |
| Kısa devre akımı ( $I_{SC}$ )         | 5,593 A         | 11,186 A      | 5,593 A        |
| İç direnç ( $R_{TEG}$ )               | 1,46 $\Omega$   | 14,6 $\Omega$ | 7,3 $\Omega$   |
| Sıcak taraf sıcaklığı ( $T_{hot}$ )   | 200°C           | 200°C         | 200°C          |
| Soğuk taraf sıcaklığı ( $T_{cold}$ )  | 30°C            | 30°C          | 30°C           |

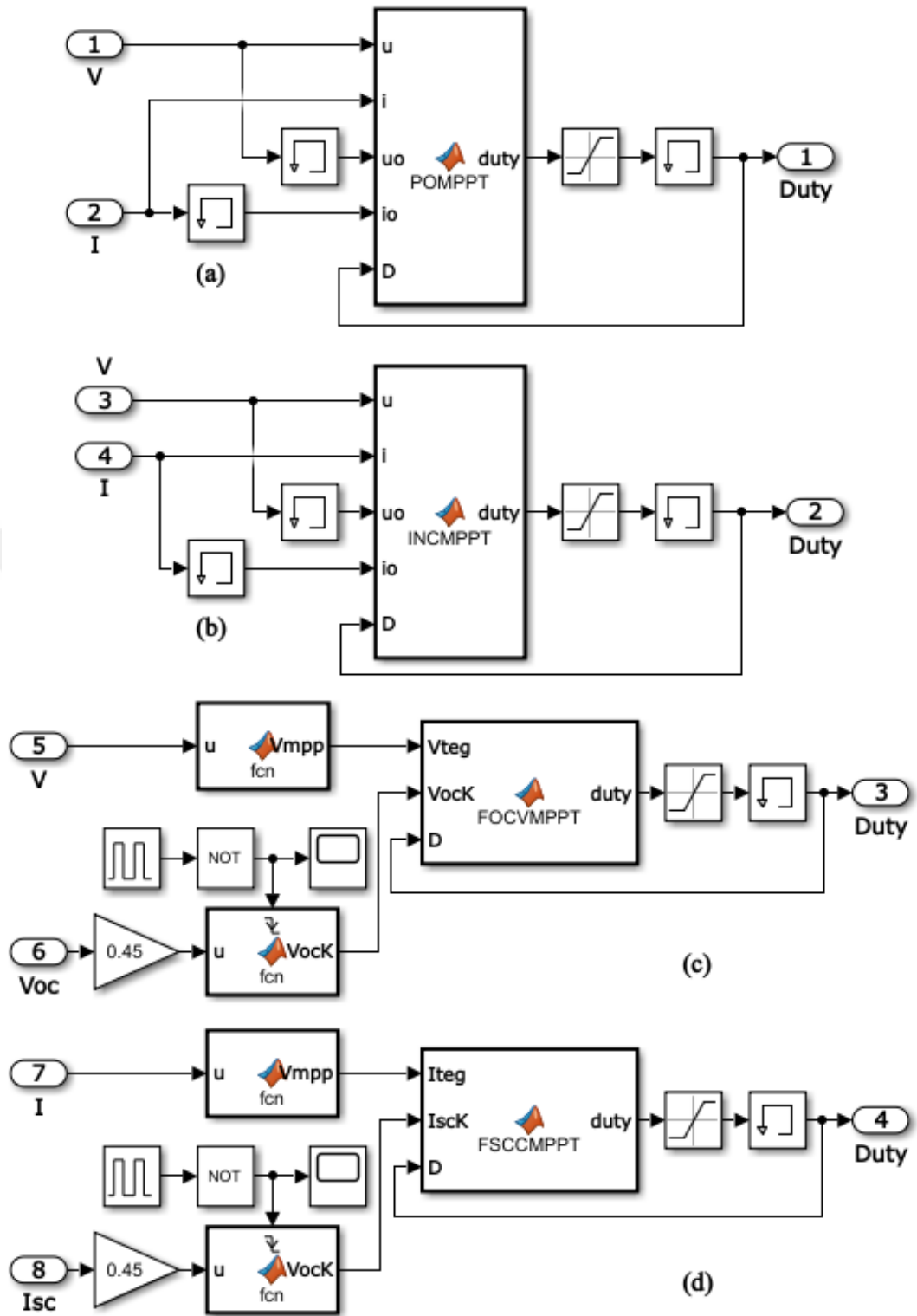


**Şekil 4.2.** Geleneksel MPPT yöntemlerini karşılaştırmak için tasarlanan Simulink® modeli

Şekil 4.2’de görülen her MPPT bloğunun içerisinde, algoritmaların kendine özgü bağlantıları ve MATLAB® kodları yer almaktadır. Şekil 4.3’te her algoritmanın Simulink® modeli verilmiştir. Şekil 4.3a’da P&O algoritmasının Simulink® modeli görülmektedir ve Şekil 3.14’te gösterilen akış şemasına göre yazılmış kodlar POMPT isimli MATLAB® fonksiyonu bloğu içerisinde yer almaktadır. Şekil 4.3b’de INC algoritmasının Simulink® modeli görülmektedir ve Şekil 3.15’te gösterilen akış şemasına göre yazılmış kodlar INCMPT isimli MATLAB® fonksiyonu bloğu içerisinde yer almaktadır. Şekil 4.3c’de FOCV algoritmasının Simulink® modeli görülmektedir ve Şekil 3.16’te gösterilen akış şemasına göre yazılmış kodlar FOCVMPPT isimli MATLAB® fonksiyonu bloğu içerisinde yer almaktadır. Şekil 4.3d’de FSCC algoritmasının Simulink® modeli görülmektedir ve Şekil 3.17’de gösterilen akış şemasına göre yazılmış kodlar FSCC MPPT isimli MATLAB® fonksiyonu bloğu içerisinde yer almaktadır.

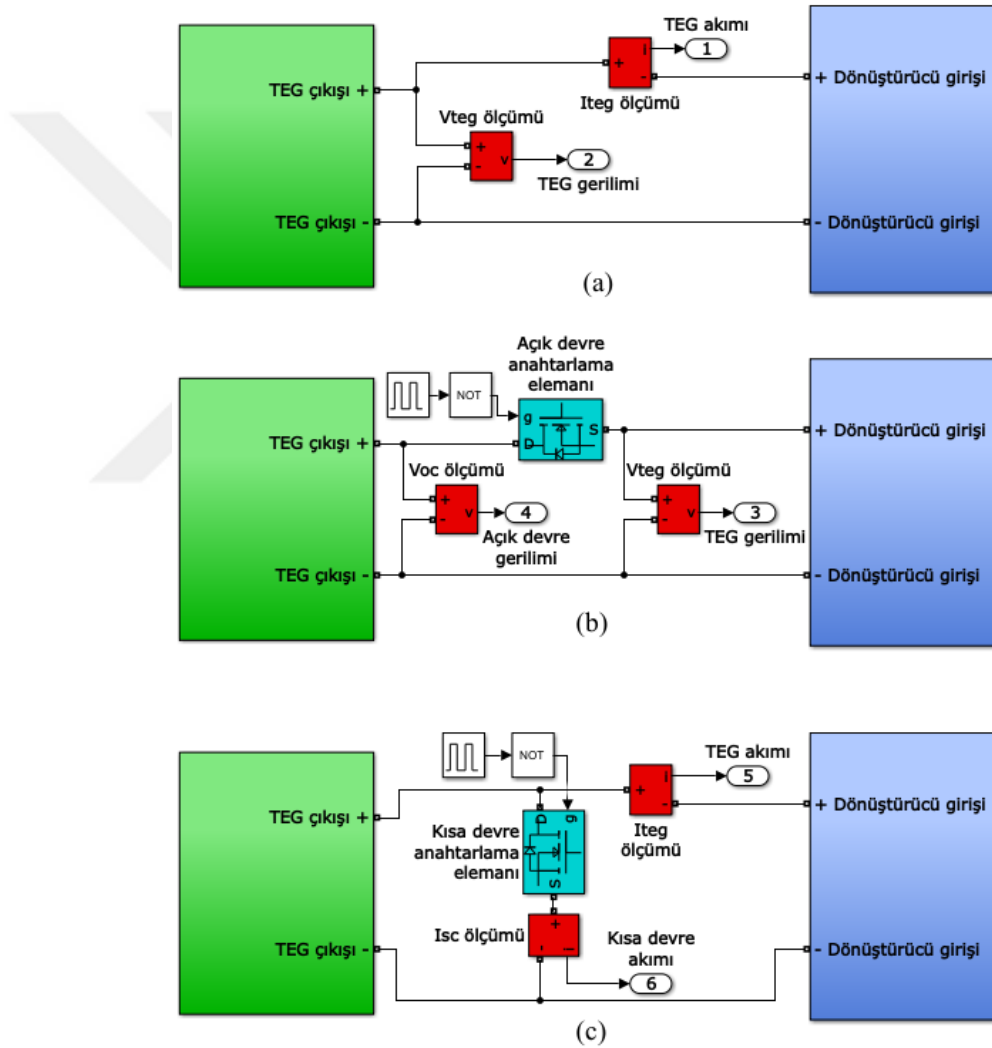
FOCV ve FSCC algoritmalarının kullanıldığı MPPT yöntemlerinde, teoride I-V karakteristiğinin doğrusallığından dolayı açık devre geriliminin ve kısa devre akımının yarısında alınan maksimum güç değeri, Simulink®’te modellenen TEG modülünün üretici verileri ile yapılan hesaplama sonuçlarına göre  $0,45V_{OC}$  ve  $0,45I_{SC}$  olduğunda en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bunun için Denklem 3.10 ve 11’deki  $k_1$  ve  $k_2$  sabit katsayılar benzetim çalışmalarında 0,45 olarak kullanılmıştır.

Simulink® modelleri incelendiğinde P&O ve INC algoritmaları MPPT için TEG gerilimi ve TEG akımı bilgilerine, FOCV algoritması TEG gerilimi ve TEG açık devre gerilimi bilgilerine, benzer şekilde ve FSCC algoritması TEG akımı ve TEG kısa devre akımı bilgilerine ihtiyaç duymaktadırlar. Sistem çalıştığı süre boyunca TEG gerilimi ve TEG akımı bilgileri sürekli mevcut olduğundan P&O ve INC algoritmaları sürekli MPP’yi bulmak için çalışmaktadırlar. Ancak FOCV ve FSCC algoritmaları sırasıyla açık devre gerilimi ve kısa devre akımı bilgilerini alması gerektiğinden, periyodik olarak FOCV için TEG uçlarını açık devre ve FSCC için TEG uçlarını kısa devre yapmak gerekmektedir. Sonuçta FOCV ve FSCC yöntemlerinde açık devre gerilimi ve kısa devre akımı bilgilerinin alınması için ekstra elektronik devre gerekmektedir.



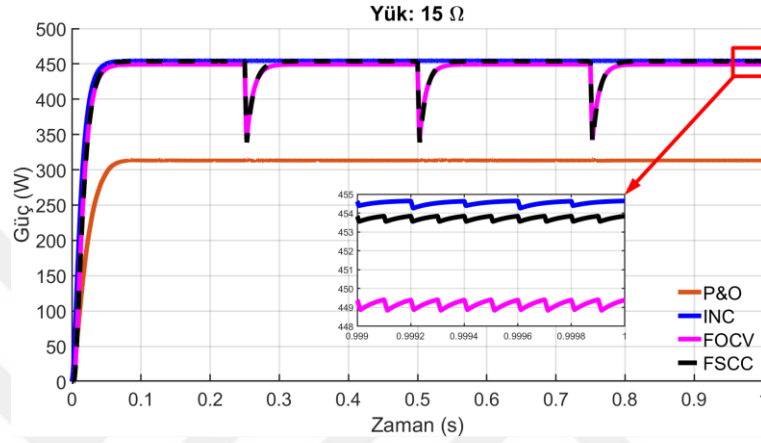
Şekil 4.3. MPPT algoritmalarının Simulink® modelleri (a) P&O (b) INC (c) FOCV (d) FSCC

Simülasyonlar için TEG ve yükselten dönüştürücü arasında kullanılmak üzere tasarlanan bu devreler Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4(a)'da sadece akım ve gerilim sensörü yeterli iken, Şekil 4.4(b) ve (c)'de görüldüğü üzere sensörler ile birlikte devreyi açık devre/kısa devre yapmak için bir anahtarlama elemanına ihtiyaç vardır. Simülasyonlarda sadece anahtarlama elemanı görünse de deneysel çalışmalarda bu işlemi yapabilmek için anahtarlama elemanı, anahtarlama elemanı sürücüsü, sırayla ölçüm yapabilmek için anahtarlama elemanının devrede olma süresini ayarlayan darbe üretici ve frekansının ayarlanması ve bu işlemler için ekstra enerjiye ihtiyaç vardır.

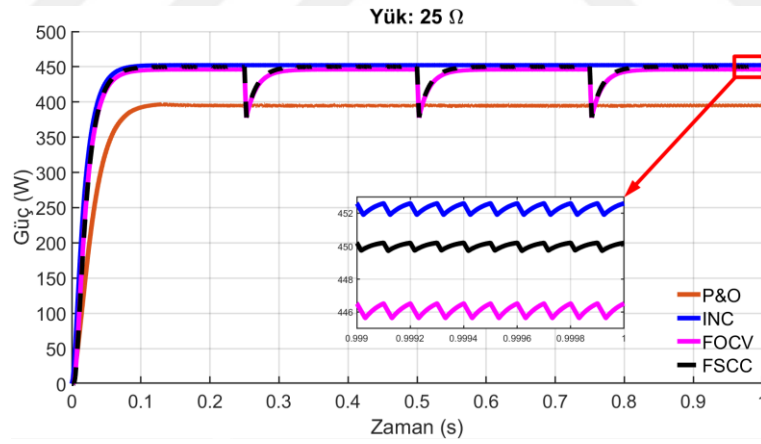


**Şekil 4.4.** (a) P&O ve INC algoritmaları için TEG gerilimi ve TEG akımı ölçümü (b) FOCV algoritması için TEG gerilimi ve TEG açık devre gerilimi ölçümü (c) FSCC algoritması TEG akımı ve TEG kısa devre akımı ölçümü

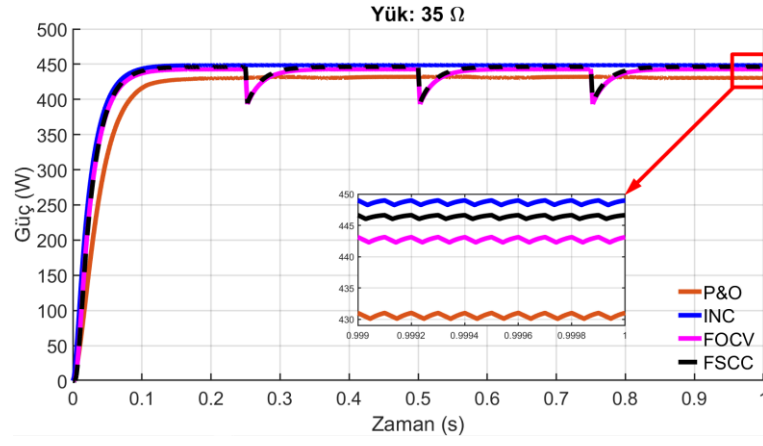
Geleneksel MPPT yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmalarından ilki, P&O, INC, FOCV ve FSCC algoritmaları ile modellenen TEG sistemi ve yükselten dönüştürücü ile değerleri  $15 \Omega$ ,  $25 \Omega$ ,  $35 \Omega$ ,  $45 \Omega$ ,  $55 \Omega$ ,  $65 \Omega$ ,  $75 \Omega$ ,  $85 \Omega$  ve  $95 \Omega$  olan dokuz farklı yük değeri için  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$  koşullarında 1 sn süreyle yapılmıştır. Şekil 4.5.1-9’da farklı yük değerleri için dört algoritmanın TEG’den elde ettiği güç değerleri görülmektedir.



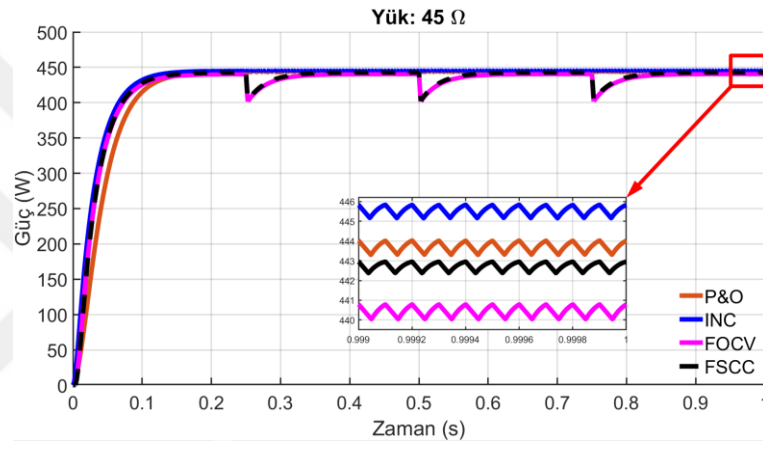
Şekil 4.5.1  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 15 \Omega$



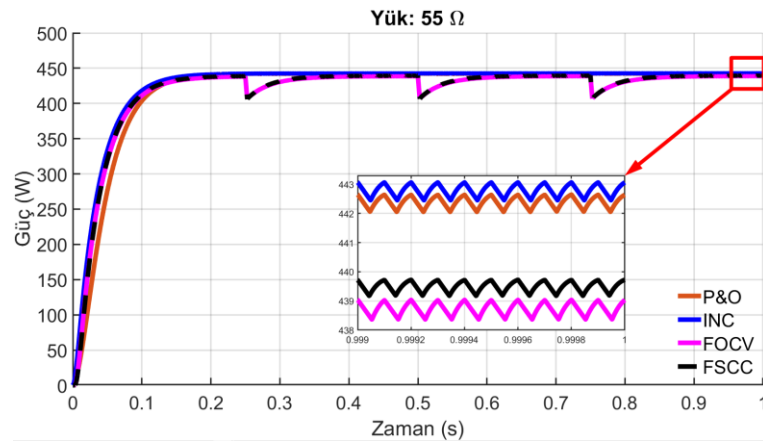
Şekil 4.5.2.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 25 \Omega$



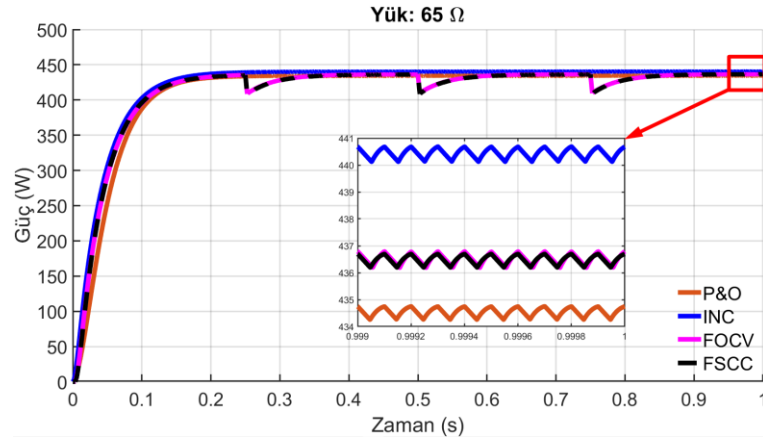
Şekil 4.5.3.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 35 \Omega$



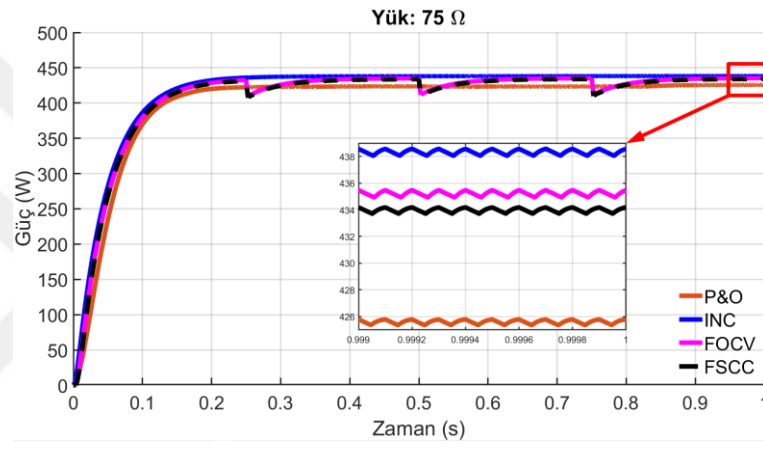
Şekil 4.5.4.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 45 \Omega$



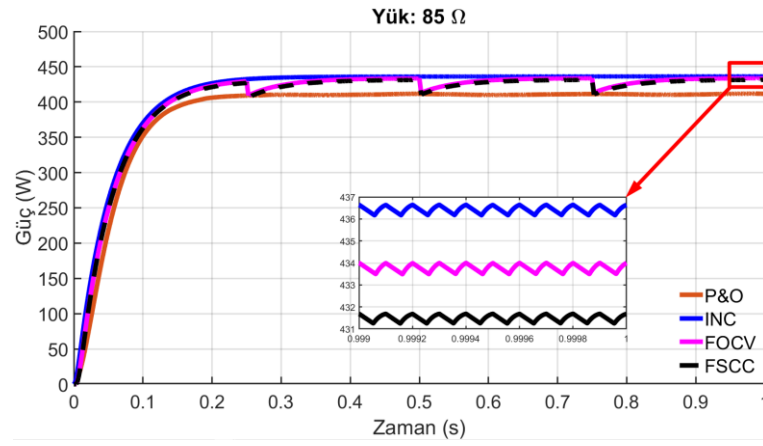
Şekil 4.5.5.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 55 \Omega$



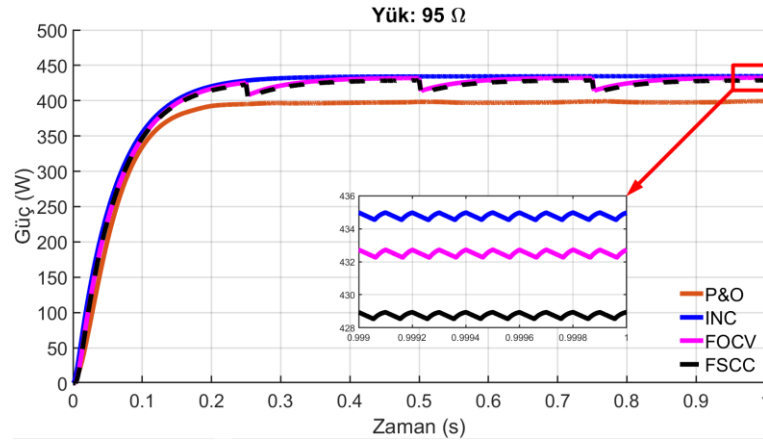
Şekil 4.5.6.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 65 \Omega$



Şekil 4.5.7.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 75 \Omega$



Şekil 4.5.8  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 85 \Omega$



**Şekil 4.5.9**  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 95 \Omega$

FOCV ve FSCC algoritmaları açık devre gerilimi ve kısa devre akımı bilgilerine ihtiyaç duydukları için, her 0,25 sn’de devre FOCV için açılarak ve FSCC için kısa devre yapılarak açık devre gerilimi ve kısa devre akımı bilgileri elde edilmiştir. FOCV ve FSCC algoritmalarının bu bilgiye ihtiyaç duymalarından dolayı yapılan devre kesintileri güç kaybına neden olmaktadır. Genel olarak TEG’den elde edilen gücün yük direnci ile bağlantılı olduğu gözlemlenmiştir. Yük değeri arttıkça INC, FOCV ve FSCC algoritmaları ile elde edilen güçlerin azaldığı görülmektedir. Tablo 4.2’de simülasyon çalışmalarının nümerik sonuçları da verilmiştir.

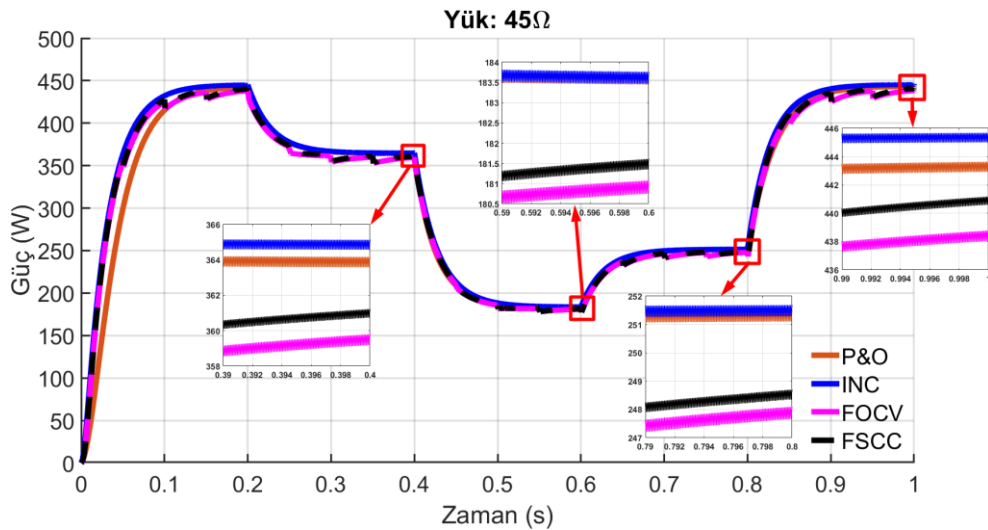
**Tablo 4.2.** Simülasyon çalışmalarında geleneksel algoritmaların farklı yüklerde TEG’den elde ettiği güç değerleri (W)

| Algoritma | Yük değerleri ( $T_C = 30^\circ\text{C}$ , $T_H = 200^\circ\text{C}$ ) |             |             |             |             |             |             |             |             |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|           | 15 $\Omega$                                                            | 25 $\Omega$ | 35 $\Omega$ | 45 $\Omega$ | 55 $\Omega$ | 65 $\Omega$ | 75 $\Omega$ | 85 $\Omega$ | 95 $\Omega$ |
| INC       | 454                                                                    | 452,2       | 448,6       | 445,4       | 442,6       | 440,2       | 438         | 436         | 434,2       |
| P&O       | 313,2                                                                  | 394,8       | 432         | 443,6       | 442,2       | 434,4       | 423,6       | 410         | 396,8       |
| FOCV      | 449,1                                                                  | 446         | 446,3       | 440,3       | 438,5       | 436,2       | 434,7       | 433,3       | 432,1       |
| FSCC      | 453,7                                                                  | 450         | 442,5       | 442,6       | 439,3       | 436,1       | 433,6       | 431,2       | 428,3       |

TEG sisteminin toplam gücü 457,6 W ve iç direnci 14,6  $\Omega$ ’dur. Yükselten dönüştürücünün empedans eşlemesi yapabilmesi için yük direncinin TEG iç direncinden yüksek olması gerekmektedir. Bundan dolayı yük dirençleri 15  $\Omega$  ile 95  $\Omega$  arasında seçilmiştir. Algoritmalar, ürettikleri  $D$  değeri neticesinde yük üzerinden alınan güçlere göre kıyaslanmışlardır. P&O algoritması ile en yüksek güç 45  $\Omega$ ’da elde edilirken, 45  $\Omega$ ’dan yüksek ya da düşük yük değerlerinde elde edilen güç azalmaktadır. Genel olarak her yük değerinde en fazla güç INC algoritması ile elde edilmiştir. P&O

algoritması MPP'ye ulaşma hızı diğer algoritmalarla göre yavaştır ve yüke karşı hassas olmasından dolayı yüke özel uygulamalarda kullanılması daha uygundur.  $65 \Omega$  yük değerinde FOCV ve FSCC algoritmaları TEG'den aynı gücü elde etmeye imkân sağlarken,  $65 \Omega$ 'dan yüksek yük değerlerinde FOCV, düşük yük değerlerinde ise FSCC algoritması daha iyi performans göstermektedir. Genel olarak yük değeri arttıkça tüm algoritmaların kararlı hal durumuna ulaşma süreleri artmış ve alınan güç azalmıştır. Ayrıca yük değeri arttıkça, empedans eşlemesi yapabilmek için algoritmaların ürettiği  $D$  değeri de artmaktadır.  $D$  değerinin artması neticesinde anahtarlama elemanının harcadığı güç artacağı için genel güç kaybı da artmıştır. Bundan dolayı yük direncinin artması TEG'den çekilen maksimum gücün azalmasına sebep olmaktadır.

Geleneksel MPPT yöntemleri ile yapılan simülasyon çalışmalarından ikincisi sabit yükte ve farklı sıcak yüzey sıcaklıklarında algoritmaların kıyaslanmasıdır.  $T_C = 30^\circ\text{C}$ 'de sabit iken  $T_H$  değeri 0,2 sn aralıklarla  $200^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ ,  $130^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  ve tekrar  $200^\circ\text{C}$  olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.6'da simülasyon sonucu ve Tablo 4.3'te simülasyonun nümerik sonuçları yer almaktadır. Sıcaklık değişimine karşı FOCV ve FSCC algoritmaları ile, devre kesintilerinden dolayı daha düşük güç elde edilmiştir.  $130^\circ\text{C}$ 'de P&O ve INC algoritmaları ile benzer güçler elde edilirken, INC algoritması en iyi performansı göstermiştir.

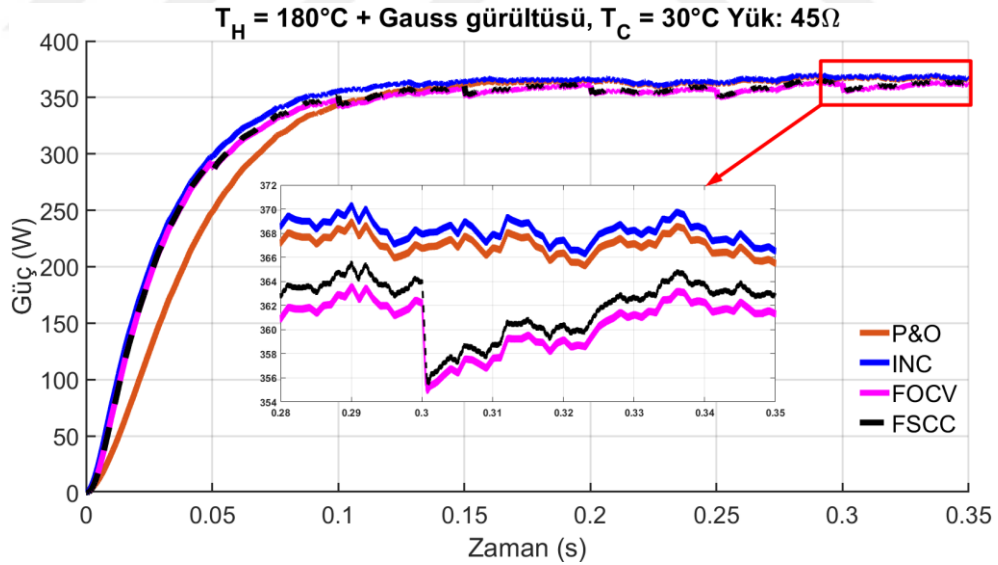


**Şekil 4.6.** Geleneksel algoritmaların sabit yükte farklı sıcak yüzey sıcaklığı değerleri için davranışı  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = [200^\circ\text{C} \ 180^\circ\text{C} \ 130^\circ\text{C} \ 150^\circ\text{C} \ 200^\circ\text{C}]$ ,  $R_L=45 \Omega$

**Tablo 4.3.** Sabit yükte farklı sıcaklıklarda geleneksel algoritmaların TEG’den elde ettiği güç değerleri (W)

| Algoritma | Sıcak yüzey sıcaklığı ( $T_C = 30^\circ\text{C}$ , $R_L = 45\ \Omega$ ) |       |       |       |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|           | 200°C                                                                   | 180°C | 130°C | 150°C |
| INC       | 445,4                                                                   | 364,9 | 183,6 | 251,5 |
| P&O       | 443,6                                                                   | 363,9 | 183,6 | 251,3 |
| FOCV      | 440,3                                                                   | 361   | 181,5 | 248,5 |
| FSCC      | 442,6                                                                   | 359,5 | 180,9 | 247,9 |

Şekil 4.7’de gösterilen simülasyon çalışmasında, yük sabit  $45\ \Omega$ ,  $T_C = 30^\circ\text{C}$  ve  $T_H = 180^\circ\text{C}$ ’dir. Bu simülasyon çalışmasında algoritmaların anlık değişken sıcaklık farkındaki davranışlarını analiz etmek amacıyla, sıcak yüzey sıcaklığına Gauss gürültüsü eklenmiştir. Böylece sıcak yüzey sıcaklığı  $180 \pm 14^\circ\text{C}$  aralığında sürekli değişmektedir. Simülasyon sonucuna göre FOCV ve FSCC algoritmaları devre kesintilerinin etkisi ile düşük performans göstermektedir. INC ve P&O algoritmaları MPP’ye yaklaştıktan sonra benzer karakteristik göstermelerine rağmen, INC algoritması ile daha kısa sürede daha fazla güç elde edilmiştir. Diğer çalışmalara benzer şekilde en yavaş algoritma yine P&O algoritması olmuştur.

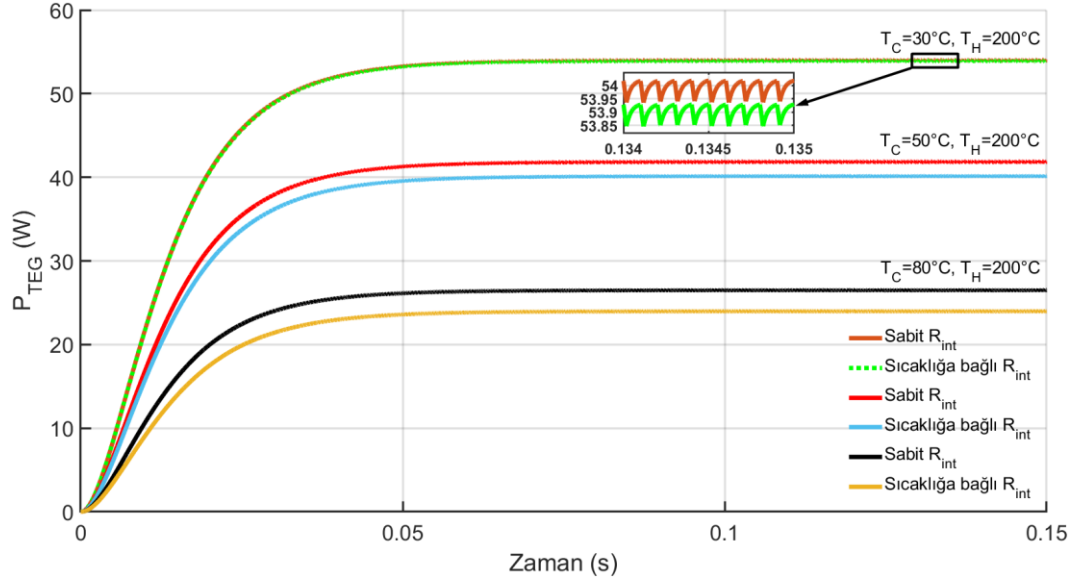


**Şekil 4.7.** Geleneksel algoritmaların anlık değişken sıcaklık farkındaki davranışları

#### 4.2.TEG İç Direnci ve Seebeck Katsayılarının Simülasyonlardaki Etkisi

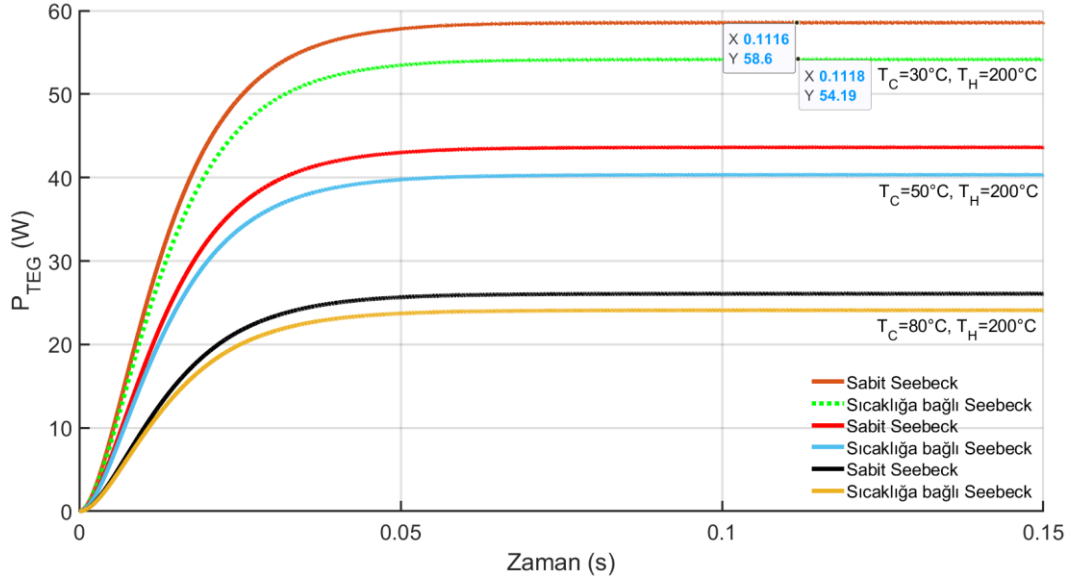
Bu bölümde özellikleri Tablo 4.1'de verilen seri bağlı beş TEG modülünden oluşan “TEG sistemi 2” kullanılarak TEG'in iç direncinin ve Seebeck katsayısının TEG sistemine sisteme etkisi incelenmiştir. Bölüm 3.2.1’de detayları verilen TEG modeli ve Bölüm 3.2.6’da tasarım detayları verilen Şekil 3.25’teki yükselten dönüştürücü kullanılarak oluşturulan TEG sistemi ile sabit katsayılar ve değişken katsayılar kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Yükselten dönüştürücü çıkış uçlarına sabit bir 15  $\Omega$  yük bağlanarak, yük üzerinden TEG'den güç elde edilmiştir. Yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanının görev döngüsü doluluk oranı, sistemden maksimum güç elde etmek için P&O algoritması ile ayarlanmıştır.

Şekil 4.8'de sabit iç direnç ( $R_{TEG}$ ) değeri ile sıcak yüzey sıcaklığı 200°C'de sabit ve soğuk yüzey sıcaklığı 30°C, 50°C, 80°C iken sıcaklığa bağlı olarak modellenen  $R_{TEG}$  değeri kullanılarak sistemden elde edilen güçler karşılaştırılmıştır. Sabit  $R_{TEG}$  değeri, üretici verilerinde  $T_C = 30^\circ\text{C}$  ve  $T_H = 200^\circ\text{C}$  için verilen değerdir ve 1,46  $\Omega$ 'dur. Bu nedenle,  $T_C = 30^\circ\text{C}$  için simülasyon sonuçları her iki  $R_{TEG}$  koşulunda da aynıdır. Ancak  $T_C$  değeri 50°C veya 80°C olduğunda  $R_{TEG}$  değeri sıcaklığa bağlı olarak değişeceğinden sabit bir  $R_{TEG}$  değeri ile elde edilen sonuçlar, gerçek sonuçlardan oldukça farklıdır. Beş seri modüllü simülasyonda, TEG sisteminden elde edilen gücün bir modülden elde edilen gücün beş katı olması beklenmektedir. Yani Şekil 3.11'de grafiği verilen güç değerlerinin beş katı elde edilebilmektedir. Şekil 4.8 incelendiğinde sıcaklığa bağlı  $R_{TEG}$  değerleri ile elde edilen güçlerin Şekil 3.11’de verilen güç eğrilerine beş kat daha yakın olduğu görülmektedir. Yani sıcaklığa bağlı  $R_{TEG}$  değerleri kullanılarak yapılan simülasyonlar gerçek sistemden elde edilebilecek güce oldukça yakındır. Buradan TEG'in iç direncinin sıcaklığa bağlı olarak modellenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bir modül için hata miktarı ihmal edilebilir gibi görünse bile çok daha fazla TEG modülü kullanılarak tasarlanan sistemlerde kayıplar ile hata payı çok daha fazla artmaktadır.



**Şekil 4.8.** TEG sisteminde sabit iç direnç ve sıcaklığa bağlı değişen iç direnç ile TEG'den elde edilen güçler

Benzer şekilde, sabit Seebeck katsayısı ve sıcaklığa bağlı değişen Seebeck katsayısının sistem üzerindeki etkisini görmek için de bir simülasyon yapılmıştır. Şekil 4.9'da sabit Seebeck katsayısı ve sıcak yüzey sıcaklığı  $200^\circ\text{C}$ 'de sabit ve soğuk yüzey sıcaklığı  $30^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$  olduğunda sıcaklığa bağlı olarak modellenen Seebeck katsayısı kullanılarak sistemden elde edilen güçler karşılaştırılmıştır. Sabit Seebeck katsayısı olarak ortalama bir değer kullanılmıştır. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi,  $T_C = 30^\circ\text{C}$  için Seebeck katsayısı sıcak yüzey sıcaklığı arttıkça önce artar, sonra azalır. Bu nedenle  $T_H = 200^\circ\text{C}$  için sabit Seebeck katsayısı daha yüksek olacak ve sistemden elde edilen güç gerçekte olması gerekenden daha yüksek olacaktır. TEG sisteminin tasarım kriterleri ve kapasitesi incelendiğinde TEG'den alınabilecek maksimum güç  $57,2\text{ W}$  olmasına rağmen sabit Seebeck katsayısı nedeniyle sistemden  $58,5\text{ W}$  elde edildiği Şekil 4.9'da görülmektedir. Gerçekte bu mümkün olmayacağı için Seebeck katsayısının en uygun değerinin kullanılması çok önemlidir. Benzer sapmalar  $T_C = 50^\circ\text{C}$  ve  $80^\circ\text{C}$  için de geçerlidir. Ayrıca Şekil 4.9'da gözlemlenen bir diğer sonuç da sıcaklık farkı arttıkça hatanın artmasıdır. Sıcaklık farkı arttığında ve özellikle çok fazla modülün kullanıldığı TEG sistemlerinde Seebeck katsayısının etkisi katlanarak arttığı için Simulink modelinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biridir.



**Şekil 4.9.** TEG sisteminde sabit Seebeck ve sıcaklığa bağlı değişen Seebeck katsayıları ile TEG’den elde edilen güçler

TEG’ler yüzey sıcaklıklarına göre farklı iç direnç değerlerine ve Seebeck katsayılarına sahiptir. Bu nedenle, birçok aynı sıcaklık farkı kombinasyonunda TEG’lerden farklı güçler elde edilir. TEG’lerin yapısındaki TE malzemelerinin doğası gereği, gerçekçi ve doğru sonuçlar elde edebilmek için sıcaklıkla değişen iç dirençleri ve Seebeck katsayılarının simülasyon ortamına uyarlanması gerekmektedir.

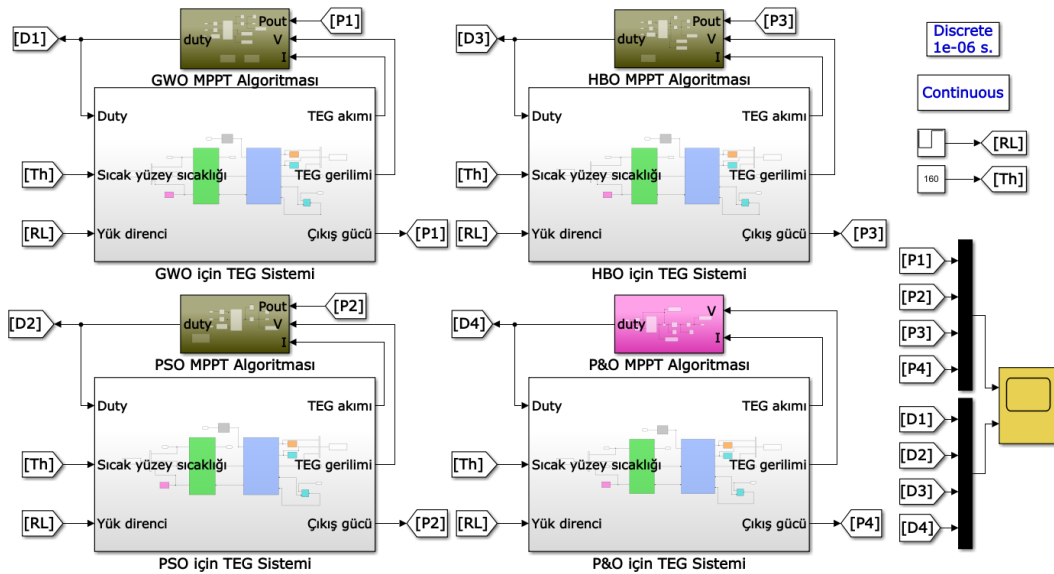
#### 4.3. Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde metasezgisel algoritmaların MPPT yöntemi olarak kullanıldığı simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Bu aşamaya geçilmeden önce TEG modüllerinden deneysel olarak veri alınmış, üretici verileri ile uygunluğu gözlemlenmiş ve TEG modüllerinin üretici verilerini karşılamadığı anlaşılmıştır. Bundan dolayı TEG modüllerinden deneysel olarak alınan veriler kullanılarak simülasyonlarda kullanılmak üzere yeni bir TEG MATLAB/Simulink® modeli oluşturulmuştur. Deneysel ölçümler ile elde edilen TEG modülü ve Simulink® modeli oluşturulan TEG sistemi özellikleri Tablo 4.4’te verilmiştir. Oluşturulan bu model Şekil 4.10’da gösterilen metasezgisel algoritmaları P&O ile kıyaslamak için tasarlanan Simulink® modellerinde kullanılmıştır.

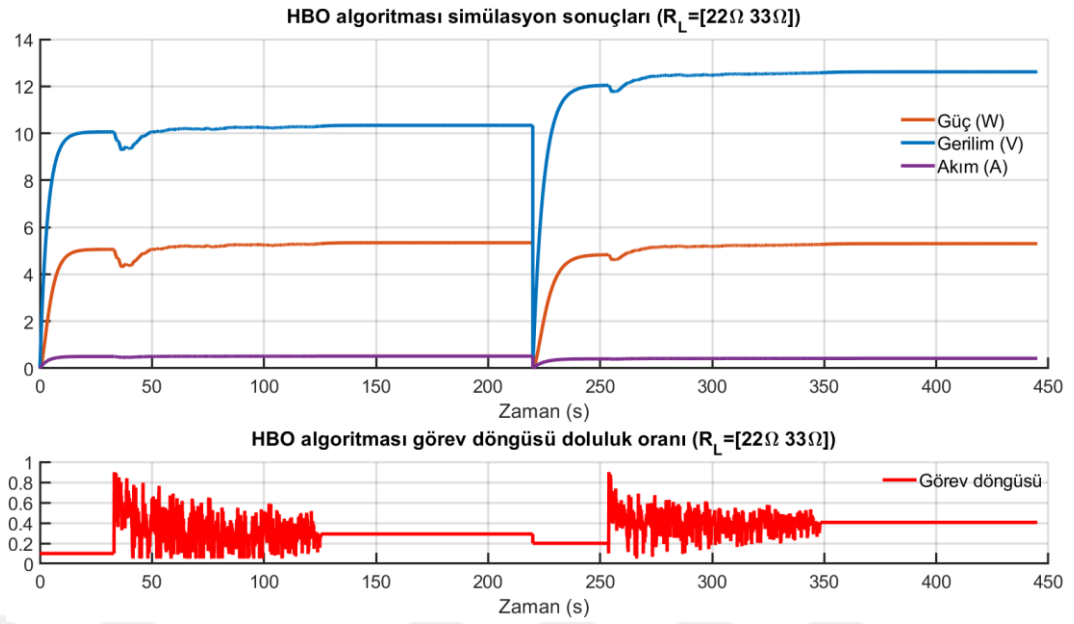
Simülasyonlarda kullanılan sıcak yüzey sıcaklığı  $160^{\circ}\text{C}$  ve soğuk yüzey sıcaklığı  $21^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu değerler deneysel çalışmalar yürütülürken kullanılan sıcaklık değerleridir. TEG sisteminin  $T_C = 21^{\circ}\text{C}$  ve  $T_H = 160^{\circ}\text{C}$  koşullarında maksimum üretebileceği güç  $5,76\text{ W}$ 'tır. TEG sisteminin iç direnci  $13,22\ \Omega$  olup, sistemde yük olarak TEG iç direncinden büyük olan  $22\ \Omega$  ve  $33\ \Omega$  değerleri tercih edilmiştir. Simülasyonlar öncelikle  $22\ \Omega$  yük ile başlatılıp, sistem kararlı durum haline ulaştıktan sonra yük değeri  $33\ \Omega$ 'a yükseltilmiştir.

**Tablo 4.4.** Deneysel ölçümler ile elde edilen TEG modülü ve TEG sistemi özellikleri

| Özellikler                           | TGM-199-1.4-0.8       | TEG Sistemi           |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| TE çifti                             | 199                   | $5 \times 199$        |
| Termoelektrik modül                  | 1                     | 5 (Seri)              |
| MPP'deki çıkış gücü ( $P_{MPP}$ )    | 1,152 W               | 5,76 W                |
| Açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ )     | 3,49 V                | 17,45 V               |
| Kısa devre akımı ( $I_{SC}$ )        | 1,32 A                | 1,32 A                |
| İç direnç ( $R_{TEG}$ )              | 2,644 $\Omega$        | 13,22 $\Omega$        |
| Seebeck                              | 0,025108              | 0,025108              |
| Sıcak taraf sıcaklığı ( $T_{hot}$ )  | $160^{\circ}\text{C}$ | $160^{\circ}\text{C}$ |
| Soğuk taraf sıcaklığı ( $T_{cold}$ ) | $21^{\circ}\text{C}$  | $21^{\circ}\text{C}$  |
| Sıcaklık farkı ( $\Delta T$ )        | $139^{\circ}\text{C}$ | $139^{\circ}\text{C}$ |



**Şekil 4.10.** Metasezgisel MPPT yöntemlerini kıyaslamak için kullanılan Simulink modeli

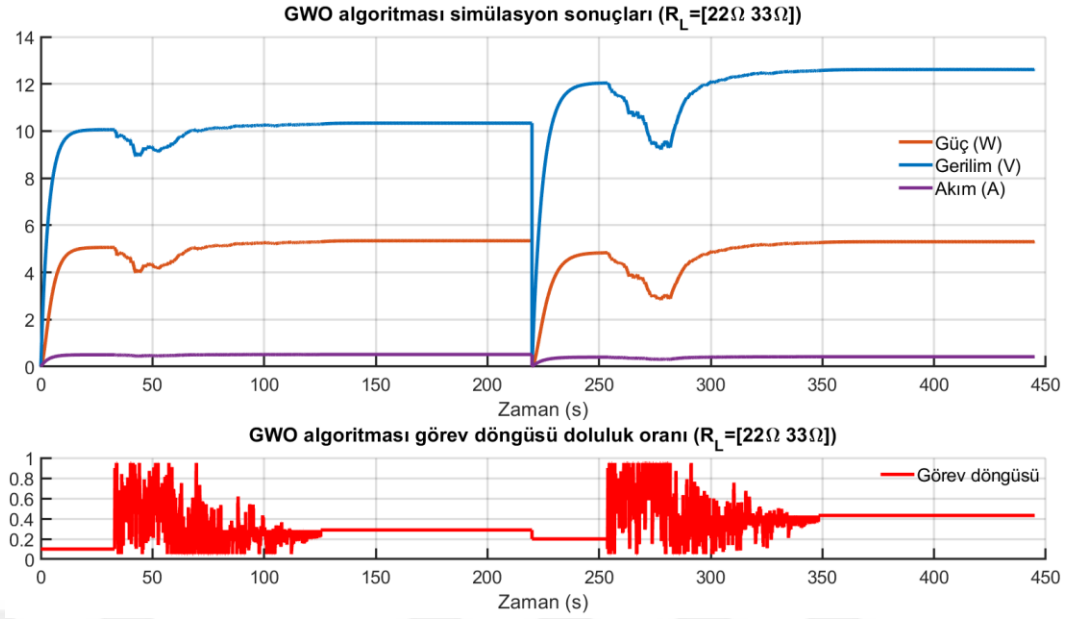


Şekil 4.11. HBO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri

Tablo 4.5. HBO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                    |         |         |                    |         |         |
|---------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Sonuç                                             | $R_L = 22\ \Omega$ |         |         | $R_L = 33\ \Omega$ |         |         |
|                                                   | Tepe               | Min.    | Ort.    | Tepe               | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                        | 10,3385            | 10,3346 | 10,3368 | 12,6168            | 12,6121 | 12,6148 |
| Akım(A)                                           | 0,51692            | 0,51673 | 0,51684 | 0,42056            | 0,42040 | 0,42049 |
| Güç(W)                                            | 5,34420            | 5,34022 | 5,34252 | 5,30613            | 5,30214 | 5,30441 |
| Görev Döngüsü                                     | 0,2913             | 0,2913  | 0,2913  | 0,4055             | 0,4055  | 0,4055  |

Şekil 4.11’de HBO algoritmasının simülasyon sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.5’te bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,2913, ortalama güç 5,34252 W ve  $33\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4055, ortalama güç 5,30441 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22\ \Omega$  yük altında 0,0039 V ve  $33\ \Omega$  yük altında 0,0047 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan HBO algoritmasının MATLAB kodları EK 2’de sunulmuştur.

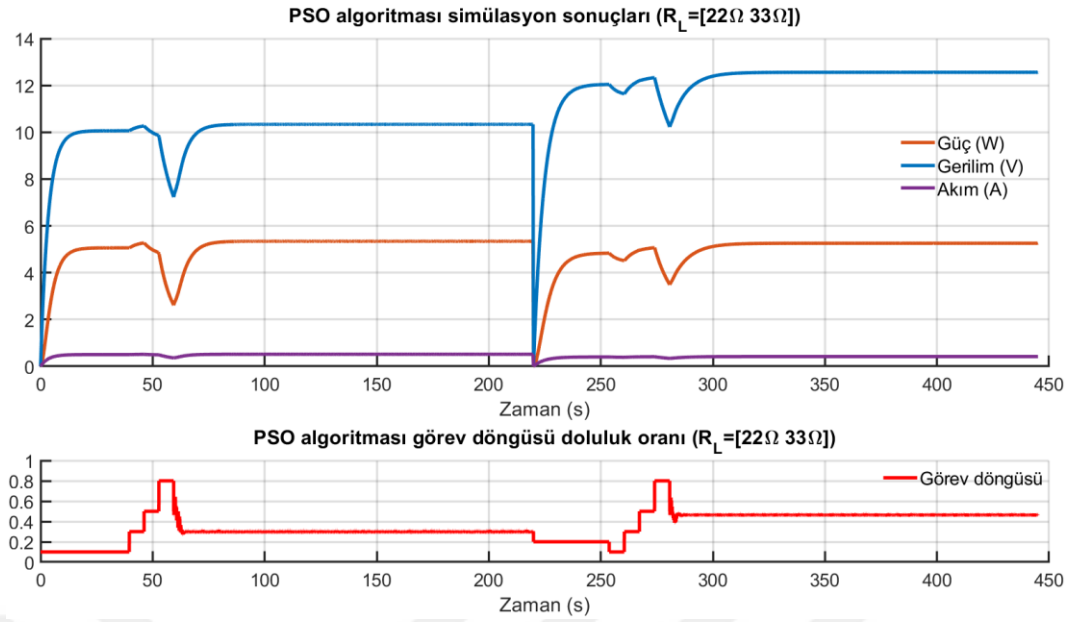


Şekil 4.12. GWO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri

Tablo 4.6. GWO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}$ , $T_H = 160^\circ\text{C}$ |                    |         |         |                    |         |         |
|------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Sonuç                                                | $R_L = 22\ \Omega$ |         |         | $R_L = 33\ \Omega$ |         |         |
|                                                      | Tepe               | Min.    | Ort.    | Tepe               | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                           | 10,3385            | 10,3346 | 10,3368 | 12,6144            | 12,6093 | 12,6122 |
| Akım(A)                                              | 0,51692            | 0,51673 | 0,51684 | 0,42048            | 0,42031 | 0,42041 |
| Güç(W)                                               | 5,34418            | 5,34019 | 5,34249 | 5,30408            | 5,29984 | 5,30223 |
| Görev Döngüsü                                        | 0,2883             | 0,2883  | 0,2883  | 0,4319             | 0,4319  | 0,4319  |

Şekil 4.12’de GWO algoritmasının simülasyon sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.6’da bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,2883, ortalama güç 5,34249 W ve  $33\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4319, ortalama güç 5,30223 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22\ \Omega$  yük altında 0,0039 V ve  $33\ \Omega$  yük altında 0,0051 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan GWO algoritmasının MATLAB kodları EK 3’te sunulmuştur.

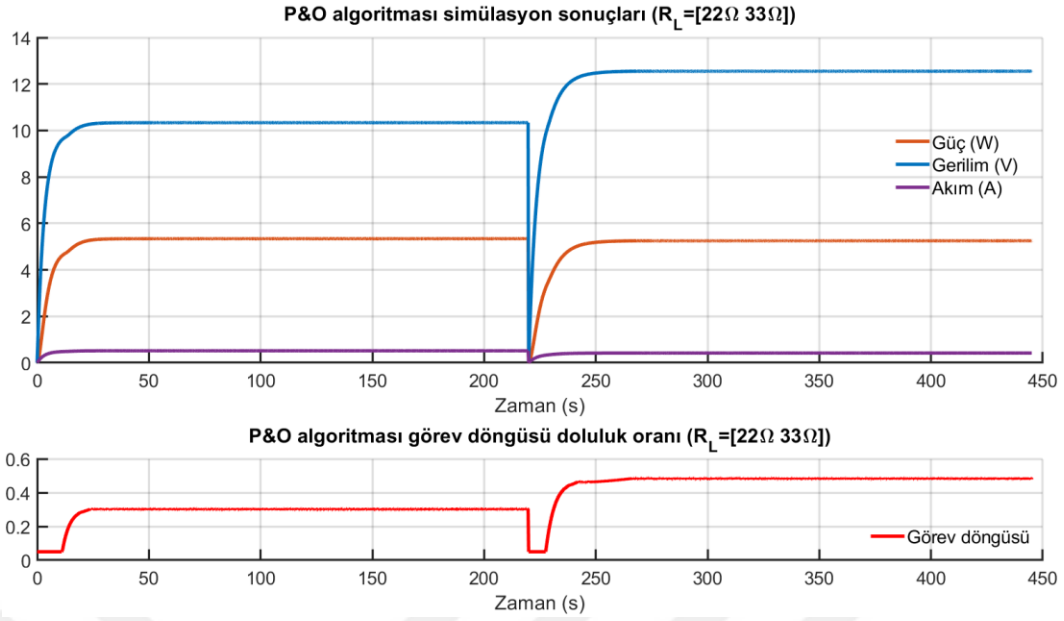


Şekil 4.13. PSO algoritması simülasyon sonuçları grafikleri

Tablo 4.7. PSO algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |         |         |                   |         |         |
|---------------------------------------------------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
| Sonuç                                             | $R_L = 22 \Omega$ |         |         | $R_L = 33 \Omega$ |         |         |
|                                                   | Tepe              | Min.    | Ort.    | Tepe              | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                        | 10,338            | 10,3333 | 10,336  | 12,5613           | 12,5553 | 12,5586 |
| Akım(A)                                           | 0,5169            | 0,51667 | 0,5168  | 0,41871           | 0,41851 | 0,41862 |
| Güç(W)                                            | 5,3437            | 5,33887 | 5,34167 | 5,25953           | 5,25449 | 5,25726 |
| Görev Döngüsü                                     | 0,3188            | 0,2896  | 0,2983  | 0,4766            | 0,4592  | 0,4643  |

Şekil 4.13'te PSO algoritmasının simülasyon sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.7'de bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22 \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,2983, ortalama güç 5,34167 W ve  $33 \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,4643, ortalama güç 5,25726 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22 \Omega$  yük altında 0,0047 V ve  $33 \Omega$  yük altında 0,006 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan PSO algoritmasının MATLAB kodları EK 4'te sunulmuştur.



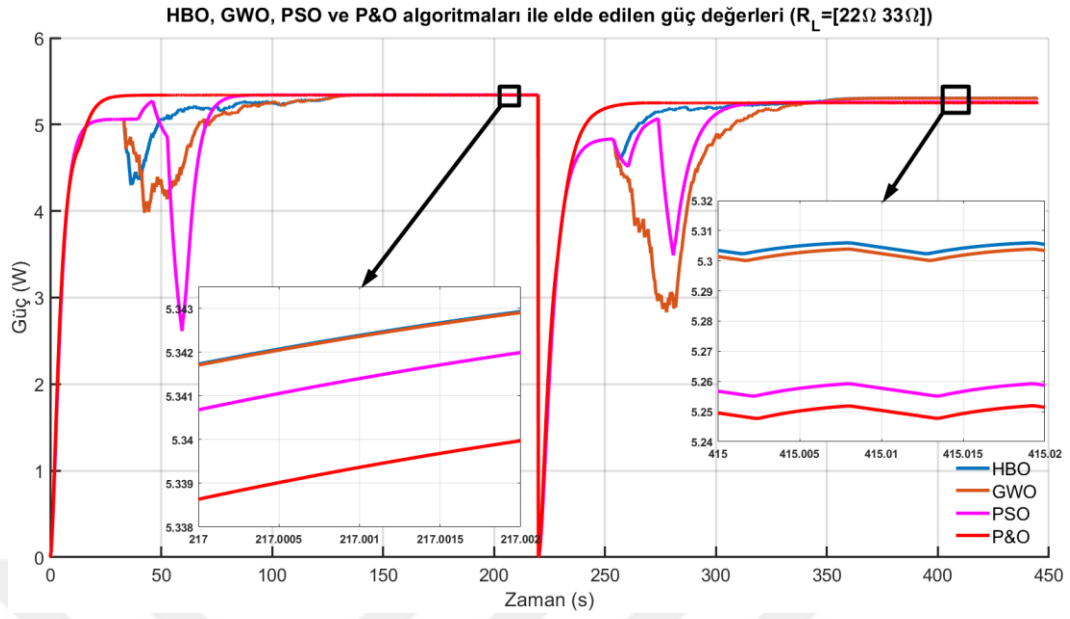
Şekil 4.14. P&O algoritması simülasyon sonuçları grafikleri

Tablo 4.8. P&O algoritması simülasyon sonuçları nümerik değerleri

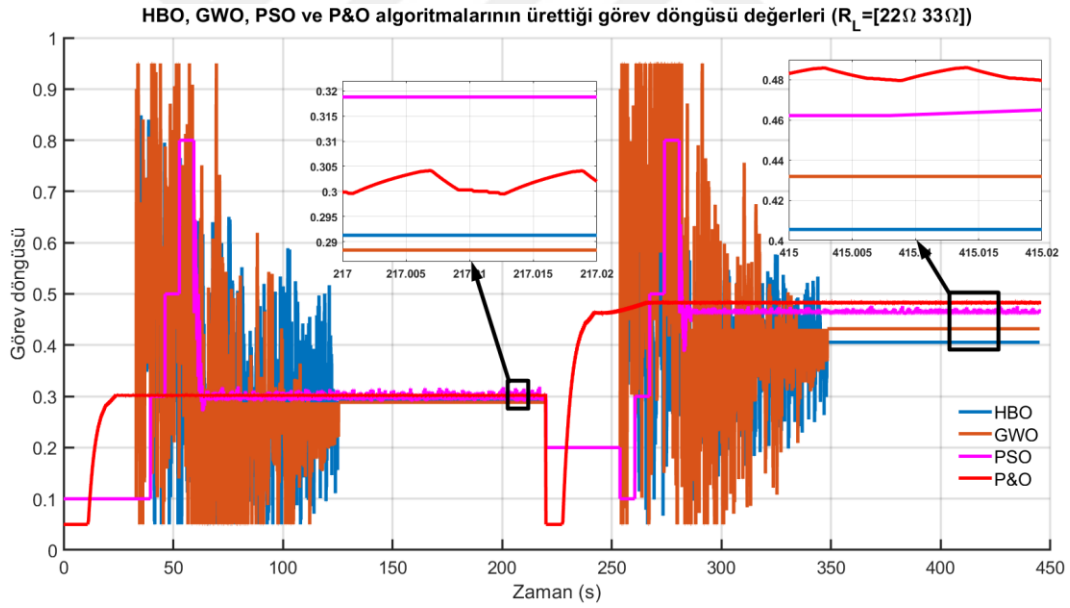
| $T_C = 21^\circ\text{C}$ , $T_H = 160^\circ\text{C}$ |                    |         |         |                    |         |         |
|------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Sonuç                                                | $R_L = 22\ \Omega$ |         |         | $R_L = 33\ \Omega$ |         |         |
|                                                      | Tepe               | Min.    | Ort.    | Tepe               | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                           | 10,3359            | 10,3313 | 10,3340 | 12,5525            | 12,5459 | 12,5495 |
| Akım(A)                                              | 0,51679            | 0,51657 | 0,5167  | 0,41842            | 0,41820 | 0,41832 |
| Güç(W)                                               | 5,34154            | 5,33682 | 5,33954 | 5,25218            | 5,24667 | 5,24970 |
| Görev Döngüsü                                        | 0,3043             | 0,2607  | 0,3012  | 0,4862             | 0,4796  | 0,4826  |

Şekil 4.14'te P&O algoritmasının simülasyon sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.8'de bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22\ \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,3012, ortalama güç 5,33954 W ve  $33\ \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,4826, ortalama güç 5,24970 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22\ \Omega$  yük altında 0,0046 V ve  $33\ \Omega$  yük altında 0,0066 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan P&O algoritmasının MATLAB kodları EK 5'te sunulmuştur.

Simülasyon çalışmalarında MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri ve algoritmaların ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16'da görülmektedir. Ayrıca bu grafik verileri ve algoritmaların verimleri tablo şeklinde sırasıyla Tablo 4.9 ve 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.15. Simülasyonlarda MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri



Şekil 4.16. Simülasyonlarda algoritmaların ürettiği görev döngüsü değerleri

Tablolar incelendiğinde simülasyonlarda en iyi performans gösteren algoritmanın HBO olduğu görülmektedir. HBO algoritması  $22\ \Omega$  yük altında 0,2913 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,7521 verim ile 5,34252 W,  $33\ \Omega$  yük altında 0,4055 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,0905 verim ile 5,30441 W güç transferi yapmayı başarmıştır. HBO'dan sonra en fazla güç üretebilen algoritma GWO'dur.

GWO algoritması 22  $\Omega$  yük altında 0,2883 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,7516 verim ile 5,34249 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,4319 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,0526 verim ile 5,30223 W güç transferi yapabilmektedir. PSO algoritması 22  $\Omega$  yük altında 0,2983 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,7373 verim ile 5,34167 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,4643 görev döngüsü doluluk oranı ve %91,2719 verim ile 5,25726 W güç transferi yapabilmektedir. P&O algoritması 22  $\Omega$  yük altında 0,3012 görev döngüsü doluluk oranı ve %92,7003 verim ile 5,33954 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,4826 görev döngüsü doluluk oranı ve %91,1406 verim ile 5,24970 W güç transferi yaparak en düşük performansa sahip algoritmadır.

**Tablo 4.9.** Simülasyon çalışmalarında kararlı hal durumunda algoritmaların farklı yüklerde TEG'den elde ettiği güçler (W) ve verimleri (%)

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |                   |                   |                   |
|---------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Algoritma                                         | $R_L = 22 \Omega$ |                   | $R_L = 33 \Omega$ |                   |
|                                                   | Güç (W)           | Verim (% $\eta$ ) | Güç (W)           | Verim (% $\eta$ ) |
| HBO                                               | 5,34252           | 92,7521           | 5,30441           | 92,0905           |
| GWO                                               | 5,34249           | 92,7516           | 5,30223           | 92,0526           |
| PSO                                               | 5,34167           | 92,7373           | 5,25726           | 91,2719           |
| P&O                                               | 5,33954           | 92,7003           | 5,24970           | 91,1406           |

**Tablo 4.10.** Simülasyon çalışmalarında kararlı hal durumunda algoritmaların farklı yüklerde MPPT için ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |        |        |                   |        |        |
|---------------------------------------------------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| Algoritma                                         | $R_L = 22 \Omega$ |        |        | $R_L = 33 \Omega$ |        |        |
|                                                   | Tepe              | Min.   | Ort.   | Tepe              | Min.   | Ort.   |
| HBO                                               | 0,2913            | 0,2913 | 0,2913 | 0,4055            | 0,4055 | 0,4055 |
| GWO                                               | 0,2883            | 0,2883 | 0,2883 | 0,4319            | 0,4319 | 0,4319 |
| PSO                                               | 0,3188            | 0,2896 | 0,2983 | 0,4766            | 0,4592 | 0,4643 |
| P&O                                               | 0,3043            | 0,2607 | 0,3012 | 0,4862            | 0,4796 | 0,4826 |

Genel olarak simülasyon sonuçlarına bakıldığında, tüm algoritmalar MPP noktasına yakınsayabilmektedir. Metasezgisel algoritmalar belli bir süre boyunca rastgele arama işlemi yaptıktan sonra en iyi görev döngüsü doluluk oranına karar verirler. Bundan dolayı simülasyonlarda yakınsama hızları geleneksel P&O algoritmasına göre düşük görülmüştür. Ancak deneysel çalışma aşamasında bu algoritmaların hız kıyaslamaları daha iyi görülmüştür. P&O algoritması çalışmaya başladıktan sonra doğrudan görev döngüsü doluluk oranı üreterek MPP'ye ulaşmaya başlamıştır. PSO algoritması yapısı gereği önce 0,1, 0,3, 0,5 ve 0,8 görev döngüsü değerleriyle güç

ölçümü yapmış ve hızlı bir şekilde MPP için gerekli görev döngüsü değerinin yakınlarına ulaşabilmiştir. HBO ve GWO algoritmaları, yapıları gereği önce rastgele aramalar yaparlar ve sonra karar verdikleri en iyi değeri kullanırlar. Dolayısıyla karar verme aşamasında yapıları gereği MPP noktasına yakınsamaları mümkün değildir, ancak MPP civarında rastgele arama yaptıkları sınır değerlerini daraltabilirler. Simülasyonlarda da görüldüğü üzere HBO ve GWO algoritmaları bu şekilde çalışmış ve en iyi değere karar vermişlerdir. Ek olarak, simülasyonlarda yük değeri arttığında gerilim dalgalanmasının da arttığı görülmüştür. Sonuçta MPPT algoritması olarak performansları incelenen bu algoritmalar TEG'den en fazla gücü sırasıyla HBO, GWO, PSO ve P&O şeklinde elde etmişlerdir.

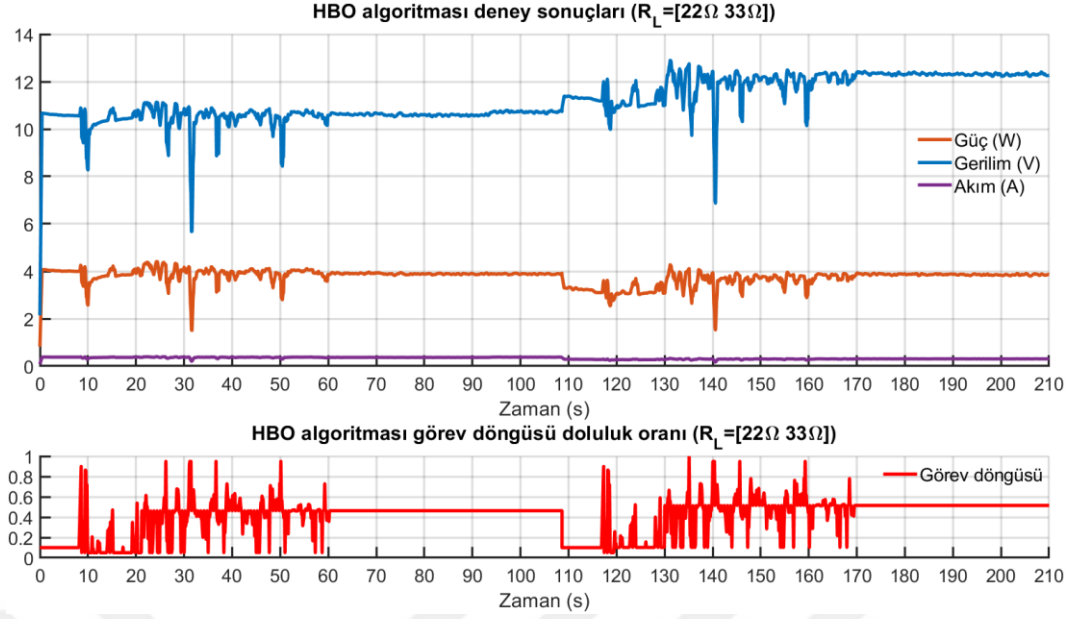
#### **4.4. Metasezgisel Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemleri Deney Sonuçları**

Bu bölümde metasezgisel algoritmaların MPPT yöntemi olarak kullanıldığı deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Deneylerde TEG modülü olarak üretici verileri daha kapsamlı ve anlaşılır olan TGM-199-1.4-0.8 modülü tercih edilmiştir. MPPT algoritmalarının performanslarını karşılaştırmak için bu modülden beş adet seri bağlı bir TEG sistemi kurulmuştur. Tablo 4.4'te modülün ve TEG sisteminin özellikleri yer almaktadır. EK 1'de TGM-199-1.4-0.8 modülünün üretici verileri olmasına rağmen, deneylerde kullanılan modüller bu verileri karşılamadığı için Tablo 4.4 deneysel ölçümlerle hazırlanmıştır. Simülasyonlarda da bu veriler kullanılarak oluşturulan TEG modeli kullanılmıştır. Üçüncü bölümde detayları verilen TEG sistemi, yükselten dönüştürücü, sensörler ve kaynaklar kullanılarak kurulan deney düzeneği Şekil 3.29'da gösterilmiştir. Deneyler  $T_C = 21^{\circ}\text{C}$  ve  $T_H = 160^{\circ}\text{C}$  koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri modüllerin alüminyum bloklara temas ettiği noktanın hemen bitişiğine termokupllar yerleştirilerek yapılmıştır. Deneysel çalışmalar öncesinde yapılan testlerde, alüminyum blokların döküm olması sayesinde tüm noktalarının aynı sıcaklığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu test, modüllerin temas ettiği yüzeylerin sıcaklık ölçümlerindeki hata oranının minimum olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca tüm deneylerin aynı koşullarda yapıldığını garantilemek için, sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra TEG'lerin ürettiği açık devre gerilimi de gözlemlenerek deneylere başlanmıştır. Ek olarak bloklar arasına yerleştirilen modüllerin her iki yüzeyine, termal iletkenliği ve ısı transferini arttırmak amacıyla ince tabak şeklinde termal macun sürülmüştür.

TEG sisteminin iç direnci  $13,22 \Omega$  olup, yükselten dönüştürücü kullanıldığı için sistemde yük olarak TEG iç direncinden büyük olan  $22 \Omega$  ve  $33 \Omega$  değerleri tercih edilmiştir. Simülasyonlar öncelikle  $22 \Omega$  yük ile başlatılıp, sistem kararlı durum haline ulaştıktan sonra yük değeri  $33 \Omega$ 'a yükseltilmiştir. Deney başlangıcında  $22 \Omega$  direnç aktif durumda iken  $33 \Omega$  direnç kısa devre edilmiştir. Yük değişimi yapılırken  $22 \Omega$  direnç kısa devre yapılarak  $33 \Omega$  direnç devreye alınmıştır. Yük değişimi sırasında gücün aniden düşmesi bu yük değişimi aşamasında oluşmaktadır.

TEG sisteminin  $139^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık farkı koşullarında maksimum üretebileceği güç  $5,76 \text{ W}$ 'tır. Bu değer doğrudan TEG sisteminden alınan ölçümler ile yapılan hesaplamalar neticesinde bulunmuştur. Ancak simülasyonlardan farklı olarak deneysel çalışmalarda DC-DC dönüştürücü ve diğer bileşenlerin sebep olduğu güç kayıpları göz önünde bulundurulmalıdır. Algoritmaların verimlerini kıyaslamak için sistemdeki tüm bileşenler aktif iken TEG'den çekilen maksimum güç üzerinden algoritmaların verimlerini kıyaslamak gerekmektedir. Bunun için DC-DC dönüştürücünün anahtarlama elemanına sistematik şekilde ve manuel olarak farklı görev döngüleri ile oluşturulan PWM sinyalleri gönderilerek sistemden elde edilen güçler ölçülmüştür. Bu deneyler neticesinde TEG sisteminden çekilen maksimum güç %25,52 kayıpla  $4,29 \text{ W}$  olarak ölçülmüştür. Algoritmaların ürettiği görev döngüleri ile sistemden elde edilen maksimum güçler bu değer ile kıyaslanarak algoritmaların verimleri hesaplanmıştır. Sistemde DC-DC dönüştürücü ve diğer bileşenlerin harcadığı enerjiler neticesinde %25,52 güç kaybı vardır.

Deneysel çalışmaların tamamı eşit koşullarda başlatılmış, eşit sürelerde deneyler yapılmış ve aynı zamanlarda yük değişimi yapılarak tüm ölçümler alınmıştır. Böylece deneysel çalışmalardan alınan verilerdeki hata oranı en aza indirilerek algoritmalar kıyaslanmış ve analiz edilmiştir.

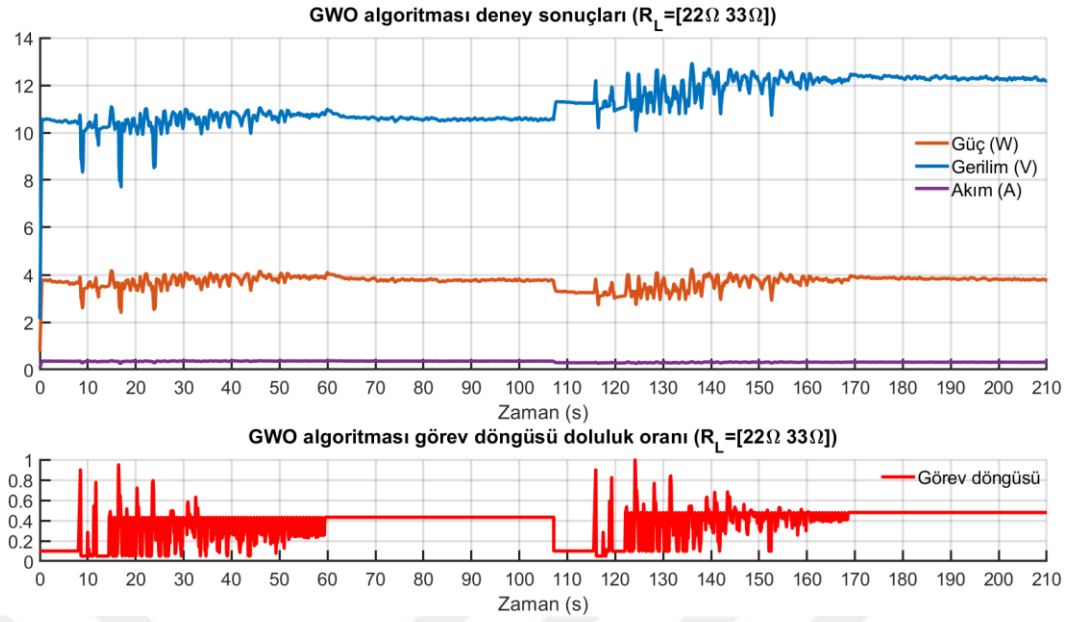


Şekil 4.17. HBO algoritması deney sonuçları grafikleri

Tablo 4.11. HBO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ C, T_H = 160^\circ C$ |                   |         |         |                   |         |         |
|---------------------------------------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
| Sonuç                                 | $R_L = 22 \Omega$ |         |         | $R_L = 33 \Omega$ |         |         |
|                                       | Tepe              | Min.    | Ort.    | Tepe              | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                            | 10,7897           | 10,5063 | 10,6400 | 12,4319           | 12,1234 | 12,3112 |
| Akım(A)                               | 0,38202           | 0,36306 | 0,37039 | 0,30947           | 0,30135 | 0,30542 |
| Güç(W)                                | 3,97274           | 3,81443 | 3,89165 | 3,92965           | 3,75729 | 3,86006 |
| Görev Döngüsü                         | 0,4631            | 0,4631  | 0,4631  | 0,5147            | 0,5147  | 0,5147  |

Şekil 4.17’de HBO algoritmasının deney sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.11’de bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22 \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4631, ortalama güç 3,89165 W ve  $33 \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,5147, ortalama güç 3,86006 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22 \Omega$  yük altında 0,2834 V ve  $33 \Omega$  yük altında 0,3085 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan HBO algoritması kodları ile deneylerde kullanılan kodlar aynıdır.

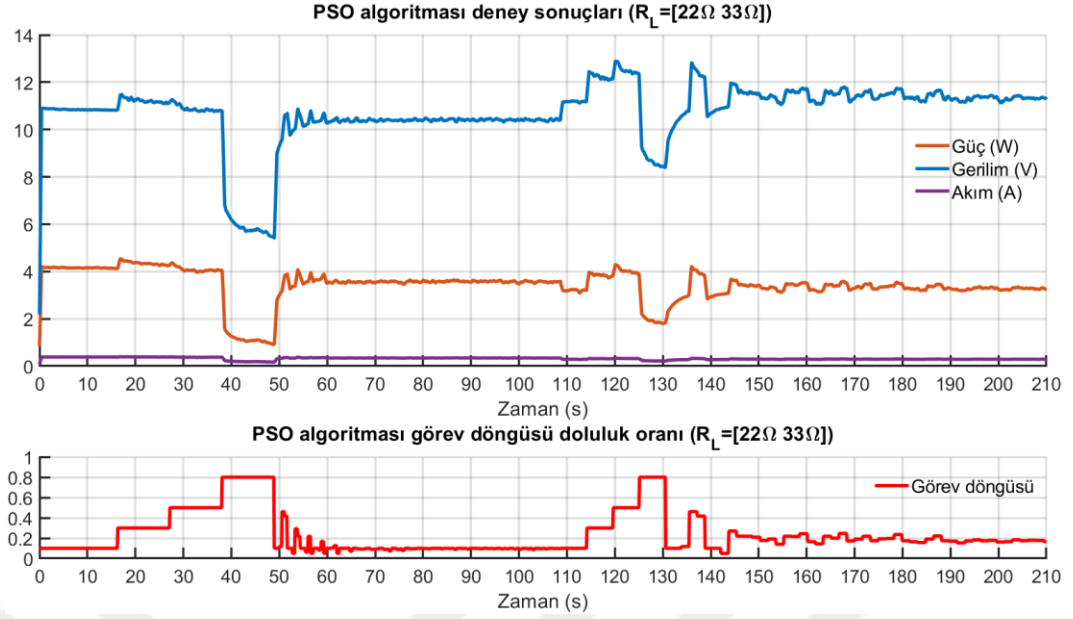


Şekil 4.18. GWO algoritması deney sonuçları grafikleri

Tablo 4.12. GWO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}$ , $T_H = 160^\circ\text{C}$ |                    |         |         |                    |         |         |
|------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| Sonuç                                                | $R_L = 22\ \Omega$ |         |         | $R_L = 33\ \Omega$ |         |         |
|                                                      | Tepe               | Min.    | Ort.    | Tepe               | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                           | 10,6601            | 10,4846 | 10,5705 | 12,4253            | 12,0965 | 12,2790 |
| Akım(A)                                              | 0,36201            | 0,35019 | 0,35693 | 0,31646            | 0,30625 | 0,31077 |
| Güç(W)                                               | 3,84124            | 3,69312 | 3,77296 | 3,90205            | 3,71808 | 3,81598 |
| Görev Döngüsü                                        | 0,4324             | 0,4324  | 0,4324  | 0,4795             | 0,4795  | 0,4795  |

Şekil 4.18’de GWO algoritmasının deney sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.12’de bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4324, ortalama güç 3,77296 W ve  $33\ \Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4795, ortalama güç 3,81598 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22\ \Omega$  yük altında 0,1755 V ve  $33\ \Omega$  yük altında 0,3288 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan GWO algoritması kodları ile deneylerde kullanılan kodlar aynıdır.

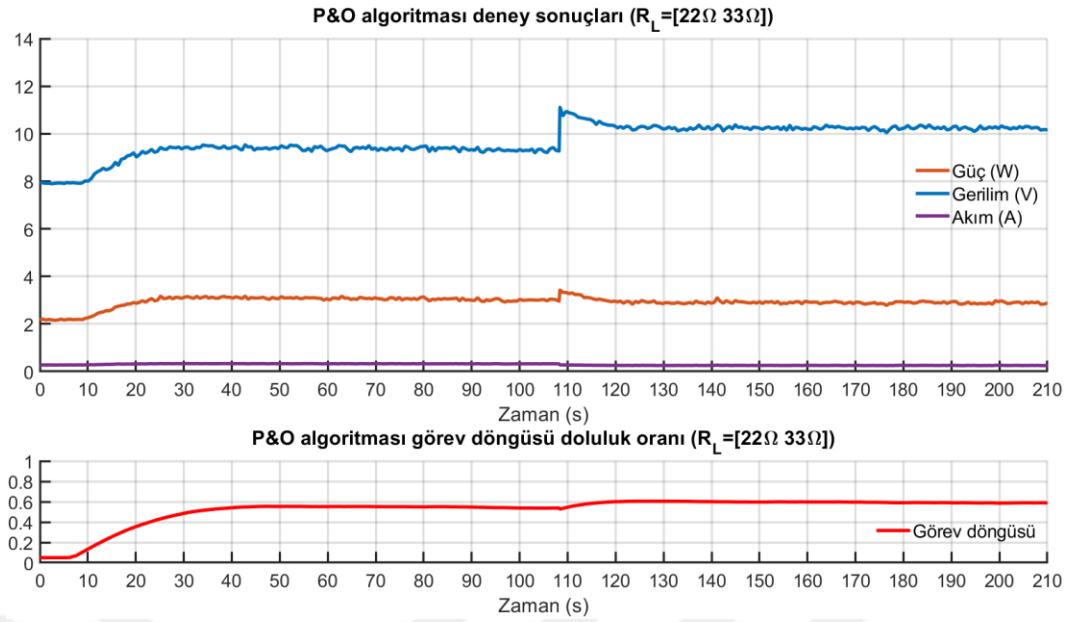


Şekil 4.19. PSO algoritması deney sonuçları grafikleri

Tablo 4.13. PSO algoritması deney sonuçları nümerik değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}$ , $T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |         |         |                   |         |         |
|------------------------------------------------------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
| Sonuç                                                | $R_L = 22 \Omega$ |         |         | $R_L = 33 \Omega$ |         |         |
|                                                      | Tepe              | Min.    | Ort.    | Tepe              | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                           | 10,4859           | 10,3182 | 10,4094 | 11,5184           | 11,1185 | 11,3477 |
| Akım(A)                                              | 0,35173           | 0,3334  | 0,34332 | 0,29331           | 0,28442 | 0,28933 |
| Güç(W)                                               | 3,64477           | 3,46773 | 3,57375 | 3,35979           | 3,19920 | 3,28335 |
| Görev Döngüsü                                        | 0,1007            | 0,0868  | 0,0978  | 0,1925            | 0,1617  | 0,1754  |

Şekil 4.19’da PSO algoritmasının deney sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.13’te bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22 \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,0978, ortalama güç 3,57375 W ve  $33 \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,1754, ortalama güç 3,28335 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22 \Omega$  yük altında 0,1677 V ve  $33 \Omega$  yük altında 0,3999 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan PSO algoritması kodları ile deneylerde kullanılan kodlar aynıdır.



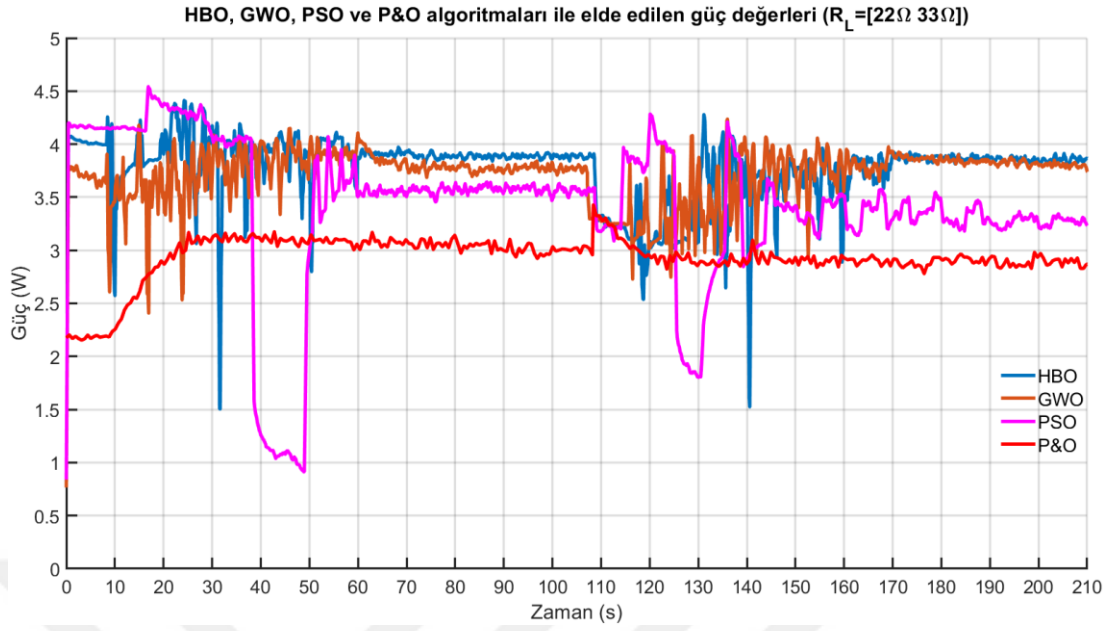
Şekil 4.20. P&O algoritması deney sonuçları grafikleri

Tablo 4.14. P&O algoritması deney sonuçları nümerik değerleri

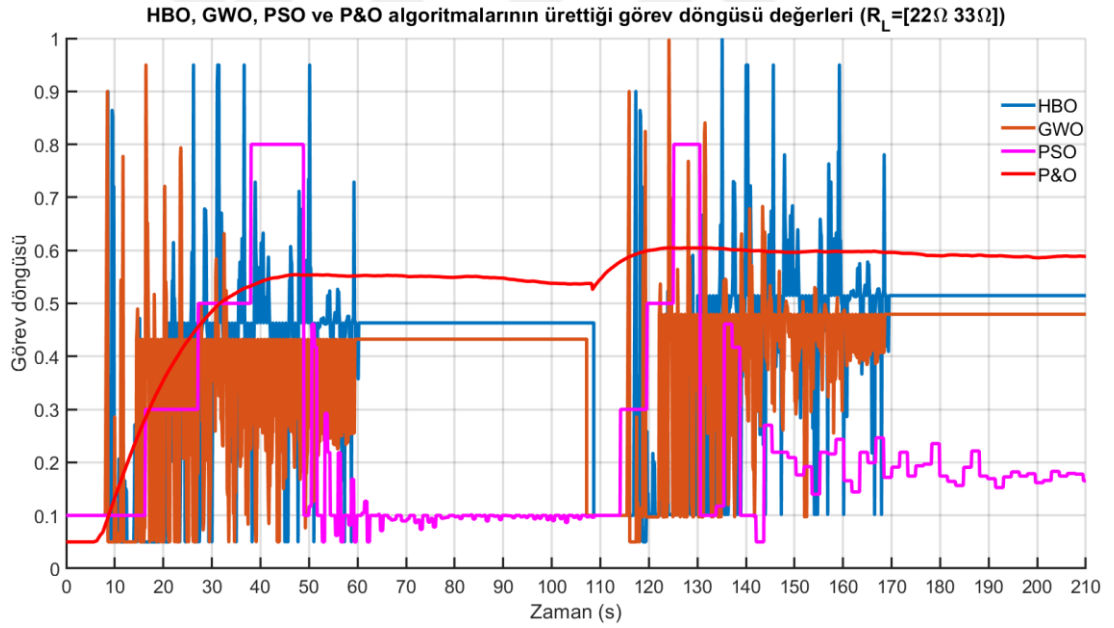
| $T_C = 21^\circ\text{C}$ , $T_H = 160^\circ\text{C}$ |                     |         |         |                     |         |         |
|------------------------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|
| Sonuç                                                | $R_L = 22 \ \Omega$ |         |         | $R_L = 33 \ \Omega$ |         |         |
|                                                      | Tepe                | Min.    | Ort.    | Tepe                | Min.    | Ort.    |
| Gerilim(V)                                           | 9,50270             | 9,21330 | 9,36280 | 10,3754             | 10,0943 | 10,2391 |
| Akım(A)                                              | 0,33437             | 0,31479 | 0,32492 | 0,26064             | 0,24867 | 0,25399 |
| Güç(W)                                               | 3,16976             | 2,92195 | 3,04230 | 2,98071             | 2,81983 | 2,88963 |
| Görev Döngüsü                                        | 0,5529              | 0,5378  | 0,5483  | 0,5915              | 0,5861  | 0,5890  |

Şekil 4.20’de P&O algoritmasının deney sonuçlarını gösteren grafikler ve ayrıca Tablo 4.14’te bu grafikteki verilerin nümerik değerleri sunulmuştur.  $22 \ \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,5483, ortalama güç 3,0423 W ve  $33 \ \Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,5890, ortalama güç 2,88963 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise  $22 \ \Omega$  yük altında 0,2894 V ve  $33 \ \Omega$  yük altında 0,2811 V olarak ölçülmüştür. Simülasyonlarda kullanılan PSO algoritması kodları ile deneylerde kullanılan kodlar aynıdır.

Deneyisel çalışmalarda MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri ve algoritmaların ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri sırasıyla Şekil 4.21 ve 4.22’de görülmektedir. Ayrıca bu grafik verileri ve algoritmaların verimleri tablo şeklinde sırasıyla Tablo 4.15 ve 4.16’da sunulmuştur.



**Şekil 4.21.** Deneysel çalışmalarda MPPT algoritmaları ile elde edilen güç değerleri



**Şekil 4.22.** Deneysel çalışmalarda algoritmaların ürettiği görev döngüsü değerleri

Tablolar incelendiğinde deneysel çalışmalarda en iyi performans gösteren algoritmanın HBO olduğu görülmektedir. HBO algoritması  $22 \Omega$  yük altında 0,4631 görev döngüsü doluluk oranı ve %90,7037 verim ile 3,89119 W,  $33 \Omega$  yük altında 0,5147 görev döngüsü doluluk oranı ve %89,9780 verim ile 3,86006 W güç transferi yapmayı başarmıştır. HBO'dan sonra en fazla güç üretebilen algoritma GWO'dur. GWO algoritması  $22 \Omega$  yük altında 0,4324 görev döngüsü doluluk oranı ve %87,9478

verim ile 3,77296 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,4795 görev döngüsü doluluk oranı ve %88,9506 verim ile 3,81598 W güç transferi yapabilmektedir. PSO algoritması 22  $\Omega$  yük altında 0,0978 görev döngüsü doluluk oranı ve %83,3042 verim ile 3,57375 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,1754 görev döngüsü doluluk oranı ve %76,5350 verim ile 3,28335 W güç transferi yapabilmektedir. P&O algoritması 22  $\Omega$  yük altında 0,5483 görev döngüsü doluluk oranı ve %70,9161 verim ile 3,04230 W, 33  $\Omega$  yük altında 0,5890 görev döngüsü doluluk oranı ve %67,3573 verim ile 2,88963 W güç transferi yaparak en düşük performansa sahip algoritmadır.

**Tablo 4.15.** Deneysel çalışmalarda kararlı hal durumunda algoritmaların farklı yüklerde TEG'den elde ettiği güçler (W) ve verimleri (%)

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |                   |                   |                   |
|---------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Algoritma                                         | $R_L = 22 \Omega$ |                   | $R_L = 33 \Omega$ |                   |
|                                                   | Güç (W)           | Verim (% $\eta$ ) | Güç (W)           | Verim (% $\eta$ ) |
| <b>HBO</b>                                        | <b>3,89119</b>    | <b>90,7037</b>    | <b>3,86006</b>    | <b>89,9780</b>    |
| <b>GWO</b>                                        | 3,77296           | 87,9478           | 3,81598           | 88,9506           |
| <b>PSO</b>                                        | 3,57375           | 83,3042           | 3,28335           | 76,5350           |
| <b>P&amp;O</b>                                    | 3,04230           | 70,9161           | 2,88963           | 67,3573           |

**Tablo 4.16.** Deneysel çalışmalarda kararlı hal durumunda algoritmaların farklı yüklerde MPPT için ürettiği görev döngüsü doluluk oranı değerleri

| $T_C = 21^\circ\text{C}, T_H = 160^\circ\text{C}$ |                   |        |        |                   |        |        |
|---------------------------------------------------|-------------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|
| Algoritma                                         | $R_L = 22 \Omega$ |        |        | $R_L = 33 \Omega$ |        |        |
|                                                   | Tepe              | Min.   | Ort.   | Tepe              | Min.   | Ort.   |
| <b>HBO</b>                                        | 0,4631            | 0,4631 | 0,4631 | 0,5147            | 0,5147 | 0,5147 |
| <b>GWO</b>                                        | 0,4324            | 0,4324 | 0,4324 | 0,4795            | 0,4795 | 0,4795 |
| <b>PSO</b>                                        | 0,1007            | 0,0868 | 0,0978 | 0,1925            | 0,1617 | 0,1754 |
| <b>P&amp;O</b>                                    | 0,5529            | 0,5378 | 0,5483 | 0,5915            | 0,5861 | 0,5890 |

Genel olarak deney sonuçlarına bakıldığında, simülasyondaki performans sırası deneylerde de benzer şekilde ortaya çıkmıştır. Ancak TEG'den çekilen güç değerlerinin simülasyonlara kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum

Diğer yandan algoritmaların görev döngüsü doluluk oranlarına bakıldığında, PSO ve P&O algoritmalarının MPP noktasına yakınsayacak değeri bulma konusunda başarılı olamadığı görülmüştür. Simülasyonlarda metasezgisel ve geleneksel algoritmaların yapılarından dolayı çalışma hızları kıyaslanamasa da deneysel olarak algoritmaların kararlı durum haline ulaşma süreleri kıyaslanabilmektedir. HBO ve GWO algoritmaları belli bir süre arama yaptıktan sonra en iyi değeri buldukları için aynı anda sonuç vermişlerdir. Ancak grafikler incelendiğinde HBO algoritmasının MPP çevresine daha yakın arama yaptığı ve rastgele aramalarının en iyi değer çevresinde daha az salınım yaptığı gözlemlenmiştir. Ayrıca HBO, GWO'ya göre daha yüksek güç üreten görev döngüsü değerini bulmuştur.

PSO algoritmasının yapısı HBO ve GWO algoritmaları gibi rastgele arama süreci içermez. PSO çalışmaya başladığında öncelikle daha önceden belirlenen görev döngüsü değerleri ile alınan güç değerlerine bakarak en iyi sonuç veren görev döngüsü değeri çevresinde MPP noktasını arar. Önceden belirlenen değerlerin sonuçlarının alınma süresi kullanıcıya ve sisteme göre değişiklik gösterir. PSO bu yönüyle en iyi yakınsama hızını elde edebilecek potansiyele sahiptir. Ancak MPPT yöntemlerinde, özellikle deneysel sistemlerde hızlı yakınsama özelliği MPP'yi bulamama sorunlarına neden olabilmektedir. Bundan dolayı PSO algoritması deneyin 22  $\Omega$  yük kullanılan aşamasında en iyi gücün alındığı görev döngüsü değerini 0,1 olarak algıladığı için MPP'yi bu değer çevresinde aramayı tercih etmiştir. Dolayısıyla ortalama 0,0978 görev döngüsü değeri ile MPP'yi bulamamıştır. Yük değeri 33  $\Omega$  olarak değiştirildiğinde benzer şekilde 0,3 görev döngüsü değeri çevresinde MPP'yi bulmayı hedeflemiş, ancak ortalama 0,1754 görev döngüsü değeri ile MPP'yi bulamamıştır.

P&O algoritması MPPT yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan basit bir algoritmadır. Ancak homojen olmayan sıcaklık dağılımı koşullarında ve yük değişimine karşı eksikliklerinin olduğu bilinmektedir. Deneylerde P&O algoritması olması gerektiği gibi çalışmış ancak diğer algoritmalar karşısında başarılı olamamıştır. Deney düzeneğinde homojen olmayan sıcaklık farkı gibi veya farklı özelliklere sahip

bir modül kullanma gibi özel bir durum bulunmamasına rağmen, deneysel çalışmalarda P&O algoritmasının lokal noktaya takıldığı anlaşılmıştır.

Genel olarak tüm algoritmalar yük arttığında görev döngüsü doluluk oranı değerini arttırarak elde edilen gücü maksimumda tutma eğilimlerini başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Ancak P&O algoritmasının lokal noktaya takılması, PSO algoritmasının yük değişimine karşı başarısız olması ve arama sürecini düzgün yapamaması en düşük güçleri elde etmelerine sebep olmuştur. HBO ve GWO algoritmalarının hem en yüksek güçleri verdiği hem de yük değişimine karşı arama süreçlerini başarılı şekilde tamamladıkları görülmüştür. Sonuçta MPPT algoritması olarak performansları incelenen bu algoritmalar TEG'den en fazla gücü ve algoritma verimleri sırasıyla HBO, GWO, PSO ve P&O şeklinde elde etmişlerdir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, TEG sistemleri için uygulanan MPPT yöntemlerinde kullanılan geleneksel ve metasezgisel algoritmaların simülasyonlarını ve deneysel çalışmalarını içermektedir. Dört geleneksel algoritma olan P&O, INC, FOCV ve FSCC için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca HBO, GWO ve PSO algoritmaları için de simülasyonlar yapılmıştır. HBO algoritması, MPPT yöntemlerinde daha önce kullanılmayan yeni bir algoritmadır ve bu tez çalışması kapsamında MPPT yöntemi olarak uyarlanmıştır.

Tez çalışmasının ilk aşamasında MPPT yöntemlerinde kullanılan geleneksel algoritmalar sınıfında yer alan P&O, INC, FOCV ve FSCC algoritmaları MATLAB®'da kodlanmıştır. Bu algoritmaların performanslarını değerlendirmek için Simulink®'te bir TEG sistemi modeline ihtiyaç duyulmuştur. TEG sisteminde TEG modülleri ve yükselten dönüştürücü yer almaktadır. Dolayısıyla TEG modülü Simulink modeli oluşturulmuş ve dönüştürücü modeli için yükselten dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. 40 modülden oluşan TEG sistemi Simulink modeli kullanılarak dört geleneksel MPPT algoritması, soğuk yüzey sıcaklığı 30°C, sıcak yüzey sıcaklığı 200°C olmak üzere farklı yükler altında çalıştırılmıştır. Simülasyonlarda görev döngüsü adım büyüklüğü tüm algoritmalarda 0,001 olarak kullanılmıştır. Simülasyonlar TEG sistemi ve yükselten dönüştürücü ile değerleri 15  $\Omega$ , 25  $\Omega$ , 35  $\Omega$ , 45  $\Omega$ , 55  $\Omega$ , 65  $\Omega$ , 75  $\Omega$ , 85  $\Omega$  ve 95  $\Omega$  olan dokuz farklı yük değeri için  $T_C = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_H = 200^\circ\text{C}$  koşullarında 1 sn süreyle yapılmıştır. TEG sisteminin toplam gücü 457,6 W'dir ve iç direnci 14,6  $\Omega$ 'dur. Yük direncinin TEG iç direncinden yüksek olması gerektiği için yük dirençleri 15  $\Omega$  ile 95  $\Omega$  arasında seçilmiştir. Algoritmalar, ürettikleri  $D$  değeri ile yük üzerinden alınan güçleri karşılaştırılmıştır. P&O algoritması, en yüksek gücü 45  $\Omega$ 'da elde etmiştir; 45  $\Omega$ 'dan daha yüksek veya düşük yük değerlerinde ise güç azalmıştır. Genel olarak, her yük değerinde en yüksek güç INC algoritması ile elde edilmiştir. 65  $\Omega$  yük değerinde FOCV ve FSCC algoritmaları aynı gücü TEG'den elde etme imkânı sağlarken, yük değeri 65  $\Omega$ 'dan yüksek olduğunda FOCV, düşük yük değerlerinde ise FSCC algoritması daha iyi performans göstermiştir. Genel olarak, yük değeri arttıkça tüm algoritmaların kararlı duruma ulaşma süresi artmış ve alınan güç azalmıştır.

Simülasyon çalışmalarının ikinci aşaması, geleneksel MPPT yöntemlerinin sabit yükte ve farklı yüzey sıcaklıklarında karşılaştırılmasıdır.  $T_C = 30^\circ\text{C}$  olarak sabit tutulurken,  $T_H$  değeri 0,2 sn aralıklarla  $200^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ ,  $130^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  ve tekrar  $200^\circ\text{C}$  olarak değiştirilmiştir. FOCV ve FSCC algoritmaları devre kesintileri nedeniyle sıcaklık değişimi altında daha düşük güç elde etmiştir.  $130^\circ\text{C}$ 'de P&O ve INC algoritmaları benzer güçler sağlarken, INC algoritması en iyi performansı göstermiştir. Bu aşamada yapılan bir diğer çalışma da anlık değişken sıcaklık farkındaki davranışların analizidir. Bu amaçla sıcak yüzey sıcaklığına Gauss gürültüsü eklenmiştir.  $180 \pm 14^\circ\text{C}$  aralığında sürekli değişen sıcak yüzey sıcaklığı koşullarında, simülasyon sonucuna göre FOCV ve FSCC algoritmaları devre kesintilerinin etkisi ile düşük performans göstermişlerdir. INC ve P&O algoritmaları MPP'ye yaklaştıktan sonra benzer karakteristik göstermelerine rağmen, INC algoritması ile daha kısa sürede daha fazla güç elde edilmiştir. Diğer çalışmalara benzer şekilde en yavaş algoritma yine P&O algoritması olmuştur.

Simülasyon çalışmalarının üçüncü aşamasında TEG'in iç direncinin ve Seebeck katsayısının TEG sistemine sisteme etkisi incelenmiştir. Simülasyonlarda yükselten dönüştürücü çıkış uçlarına sabit bir  $15\ \Omega$  yük bağlanarak, yük üzerinden TEG'den güç elde edilmiştir. Yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanının görev döngüsü doluluk oranı, sistemden maksimum güç elde etmek için P&O algoritması ile ayarlanmıştır. TEG'in iç direnci ve Seebeck katsayısı sıcaklığa bağlı olarak değerleri değişen parametrelerdir. Gerçekte sıcaklıklar değiştikçe bu parametrelerin değeri değişse bile MPPT için kullanılan dönüştürücü empedans eşlemesini yapabilir. Ancak gerçek hayatta sorun olmayan bu durum simülasyonlarda hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Sıcaklığa bağlı  $R_{TEG}$  değerleri kullanılarak yapılan simülasyonlar gerçek sistemden elde edilebilecek güce oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Buradan TEG'in iç direncinin sıcaklığa bağlı olarak modellenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Bir modül için hata miktarı ihmal edilebilir gibi görünse bile çok daha fazla TEG modülü kullanılarak tasarlanan sistemlerde kayıplar ile hata payı çok daha fazla artmaktadır. Benzer şekilde sabit Seebeck katsayısı kullanıldığında simülasyon sonuçları olması gerekenden daha yüksek değerler üretmiştir. Gerçekte bu mümkün olmayacağı için Seebeck katsayısının en uygun değerinin kullanılması çok önemlidir. Sıcaklık farkı arttığında ve özellikle çok fazla modülün kullanıldığı TEG sistemlerinde

Seebeck katsayısının etkisi katlanarak arttığı için Simulink® modelinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biridir.

Simülasyon çalışmalarının dördüncü aşamasında metasezgisel algoritmalar MPPT yöntemi olarak uyarlanmıştır. Bu aşamada TEG modüllerinden deneysel olarak elde edilen verilerin üretici verileri ile uyuşmadığı anlaşılmış ve simülasyonlarda kullanılmak üzere deneysel veriler kullanılarak yeni bir Simulink® modeli oluşturulmuştur. Simülasyonlarda kullanılan TEG sisteminin  $T_C = 21^\circ\text{C}$  ve  $T_H = 160^\circ\text{C}$  koşullarında maksimum üretebileceği güç 5,76 W olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarla TEG sisteminin iç direnci 13,22  $\Omega$  bulunmuştur. Yük olarak da TEG iç direncinden büyük olan 22  $\Omega$  ve 33  $\Omega$  değerleri kullanılmıştır. Simülasyonlar öncelikle 22  $\Omega$  yük ile başlatılıp, sistem kararlı durum haline ulaştıktan sonra yük değeri 33  $\Omega$ 'a yükseltilmiştir. HBO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,2913, MPPT verimliliği %92,7521, ortalama güç 5,34252 W ve 33  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4055, MPPT verimliliği %92,0905, ortalama güç 5,30441 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,0039 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,0047 V olarak ölçülmüştür. GWO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,2883, MPPT verimliliği %92,7516, ortalama güç 5,34249 W ve 33  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4319, MPPT verimliliği %92,0526, ortalama güç 5,30223 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,0039 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,0051 V olarak ölçülmüştür. PSO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,2983, MPPT verimliliği %92,7373, ortalama güç 5,34167 W ve 33  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,4643, MPPT verimliliği %91,2719, ortalama güç 5,25726 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,0047 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,006 V olarak ölçülmüştür. P&O algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,3012, MPPT verimliliği %92,7003, ortalama güç 5,33954 W ve 33  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,4826, MPPT verimliliği %91,1406, ortalama güç 5,24970 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,0046 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,0066 V olarak ölçülmüştür. Genel olarak simülasyon sonuçları tüm algoritmaların MPP noktasına yakınsayabildiğini göstermiştir. Simülasyonlarda yük değeri arttığında gerilim dalgalanmasının da arttığı

görülmüştür. Sonuçta uygulanan MPPT algoritmaları ile TEG'den en fazla güç ve MPPT verimliliği sırasıyla HBO, GWO, PSO ve P&O şeklinde elde edilmiştir. Literatürde en sık kullanılan P&O algoritması ile kıyaslandığında, HBO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %0,056 ve 33  $\Omega$  yük altında %1,001, GWO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %0,055 ve 33  $\Omega$  yük altında %1,001, PSO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %0,04 ve 33  $\Omega$  yük altında %0,144 daha fazla güç elde etmiştir.

Simülasyon çalışmalarının son aşaması tez çalışmasının esas amacına karşılık gelmektedir. Bu aşamada metasezgisel algoritmalar P&O algoritması ile kıyaslanmıştır. Aynı amaca yönelik simülasyonlara benzer prosedür kullanılarak deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Deneylerde TEG modülü olarak üretici verileri daha kapsamlı ve anlaşılır olduğu için modellenerek simülasyonlarda da kullanılan TGM-199-1.4-0.8 modülü tercih edilmiştir. Bu modüllerle beş adet seri bağlı bir TEG sistemi kurularak MPPT algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler  $T_C = 21^\circ\text{C}$  ve  $T_H = 160^\circ\text{C}$  koşullarında gerçekleştirilmiştir. TEG sisteminin bu  $139^\circ\text{C}$ 'lik sıcaklık farkı koşullarında maksimum üretebileceği güç 5,76 W olarak hesaplanmıştır. Ancak sistemdeki güç kayıplarından dolayı manuel olarak farklı PWM sinyalleri ile yapılan deneylerde %25,52 kayıpla en fazla 4.29 W güç elde edilebilmiştir. Bundan dolayı algoritmaların MPPT verimliliği hesaplanırken bu değer kullanılmıştır. Hesaplamalarla TEG sisteminin iç direnci 13,22  $\Omega$  bulunmuştur. Yükselten dönüştürücü kullanıldığı için sistemde yük olarak TEG iç direncinden büyük olan 22  $\Omega$  ve 33  $\Omega$  değerleri tercih edilmiştir. Simülasyonlar öncelikle 22  $\Omega$  yük ile başlatılıp, sistem kararlı durum haline ulaştıktan sonra yük değeri 33  $\Omega$ 'a yükseltilmiştir. HBO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4631, MPPT verimliliği %90,7037, ortalama güç 3,89165 W ve 33  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,5147, MPPT verimliliği %89,9780, ortalama güç 3,86006 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,2834 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,3085 V olarak ölçülmüştür. GWO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4324, MPPT verimliliği %87,9478, ortalama güç 3,77296 W ve 33  $\Omega$  yük altında görev döngüsü doluluk oranı 0,4795, MPPT verimliliği %88,9506, ortalama güç 3,81598 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,1755 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,3288 V olarak ölçülmüştür. PSO algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,0978, MPPT verimliliği

%83,3042, ortalama güç 3,57375 W ve 33  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,1754, MPPT verimliliği %76,5350, ortalama güç 3,28335 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,1677 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,3999 V olarak ölçülmüştür. P&O algoritması ile sonuçlar; 22  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,5483, MPPT verimliliği %70,9161, ortalama güç 3,0423 W ve 33  $\Omega$  yük altında ortalama görev döngüsü doluluk oranı 0,5890, MPPT verimliliği %67,3573, ortalama güç 2,88963 W olarak elde edilmiştir. MPP çevresindeki gerilim dalgalanması ise 22  $\Omega$  yük altında 0,2894 V ve 33  $\Omega$  yük altında 0,2811 V olarak ölçülmüştür. P&O algoritması ile kıyaslandığında, HBO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %27,918 ve 33  $\Omega$  yük altında %33,583, GWO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %24,017 ve 33  $\Omega$  yük altında %32,058, PSO algoritması 22  $\Omega$  yük altında %17,469 ve 33  $\Omega$  yük altında %13,625 daha fazla güç elde etmiştir.

Simülasyon ve deneysel çalışmalarının birbirini desteklediği görülmüştür. MPPT algoritması olarak performansları incelenen bu algoritmalar ile hem simülasyon çalışmasında hem de deneysel çalışmada, TEG'den en fazla güç sırasıyla HBO, GWO, PSO ve P&O algoritmaları elde edilmiştir. Deneylerde P&O algoritmasının global maksimuma yakınsayamama eksikliğinden dolayı daha az güç elde ettiği görülmektedir. Metasezgisel yöntemler global arama yeteneklerinden dolayı MPPT için uygun adaylardır. Ancak her metasezgisel algoritmanın kendisine özgü rastgele arama süreci olduğundan her sistemde her algoritma aynı performansı gösteremez. Bu tez çalışmasında kurulan deney düzeneği için PSO algoritmasından iyi performans alınamaması buna örnek gösterilebilir. Ayrıca metasezgisel algoritmalarda yer alan sabit katsayıların çoğunlukla kullanılacak sisteme göre ayarlanması gerekir. Çoğu zaman keyfi seçilen bu parametreler üzerinde çalışmak metasezgisel algoritmaların bir dezavantajıdır. Buna rağmen metasezgisel algoritmalar ani yük ve sıcaklık değişimlerinin olduğu sistemlerde kullanılabilecek en iyi seçimlerden biri olmaya adaydır. Ayrıca algoritmaların ürettiği görev döngüleri incelendiğinde P&O ve PSO algoritmalarının sürekli değişken görev döngüsü ürettikleri ancak HBO ve GWO algoritmalarının sabit görev döngüsü ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durum yükselten dönüştürücüde kullanılan anahtarlama elemanının çalışması açısından avantaj oluşturmaktadır.

Daha önce MPPT yöntemi olarak kullanılmayan ve literatüre yeni kazandırılan HBO algoritması, bu tez çalışması kapsamında MPPT yöntemi olarak uyarlanmıştır. HBO algoritmasının performansı genel olarak diğer metasezgisel algoritmalarından daha iyi sonuç vermektedir. Ancak bir optimizasyon algoritmasının performansı problemlerin yapısına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu bağlamda, yapılan literatür çalışmalarında HBO'nun MPPT uyarlamasına yatkın olduğu düşünülmüş ve bu tez çalışmasında MPPT yöntemi olarak uyarlanarak performansı değerlendirilmiştir. Bu yöntem geleneksel P&O, PSO ve GWO algoritmalarının kullanıldığı MPPT yöntemleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak hem simülasyon çalışmalarında hem de deneysel çalışmalarda MPPT yöntemi olarak kullanılan HBO algoritması en iyi performansı göstermiştir.

Bu çalışmanın ilerleyen aşamalarında, dönüştürücülerdeki kayıpları azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir. Elektronik yükler kullanılarak, dönüştürücüye bağlanan yüklerin hassasiyeti artırılabilir. Ayrıca, batarya sistemleri yerleştirilerek, batarya şarjında HBO algoritmasının performansı test edilebilir. Geliştirilen TEG sistemi, elektrik şebekesinden uzak bölgeler için tasarlanarak kullanım alanı genişletilebilir. PV sistemlerin elektrik üretimi sırasında ısınması yaygın bir sorundur. Bu durumda, PV sisteminin yüzeyindeki sıcaklık farkını azaltmak ve elektrik enerjisine dönüştürmek için bir PV-TEG sistemi üzerinde çalışılabilir. Ayrıca hem PV sistemi bir enerji kaynağı hem de TEG sistemi başka bir enerji kaynağı olarak değerlendirilip şebekeden uzak alanlarda konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayan sistemler olarak kullanılabilir. Hatta bu hibrit sistemlere mikro rüzgar türbinleri ve mikro hidroelektrik santraller eklenerek bir yenilenebilir enerji kaynağı dönüştürücü sistemi kurulabilir. Bunların her birinde aynı P&O MPPT algoritması kullanılarak MPP izlemeleri değerlendirilebilir. Bu sistemlerde kullanılan dönüştürücüler ve invertörlerin anahtarlama kabiliyetleri geliştirilerek sistem verimliliği artırılabilir. Dahası bunlara uzaktan erişim sağlamak ve üretilen enerjinin değerlendirmesini yapmak için mobil ağ enerji üretim izleme ve kontrol programları yazılabilir. Son olarak, metasezgisel algoritmalar geliştirilmeye her zaman açık olduğundan, literatüre yeni kazandırılan algoritmalar hızlı bir şekilde MPPT yöntemlerine uyarlanabilirler.

## KAYNAKLAR

- [1] Hamid Elsheikh, M., Shnawah, D.A., Sabri, M.F.M., Said, S.B.M., Haji Hassan, M., Ali Bashir, M.B., Mohamad, M., (2014). A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 337-355. doi:10.1016/j.rser.2013.10.027.
- [2] Omer, A.M., (2008). Focus on low carbon technologies: The positive solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2331-2357. doi:10.1016/j.rser.2007.04.015.
- [3] Li, C., Jiang, F., Liu, C., Liu, P., Xu, J., (2019). Present and future thermoelectric materials toward wearable energy harvesting. *Applied Materials Today*, 15, 543-557. doi:10.1016/j.apmt.2019.04.007.
- [4] Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., Tassou, S.A., (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268-289. doi:10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [5] Ma, Y., Fazilati, M.A., Sedaghat, A., Toghraie, D., Talebizadehsardari, P., (2020). Natural convection energy recovery loop analysis, part I: energy and exergy studies by varying inlet air flow rate. *Heat and Mass Transfer*, 56(5), 1685-1695. doi:10.1007/s00231-019-02766-z.
- [6] Yan, S.-R., Fazilati, M.A., Samani, N., Ghasemi, H.R., Toghraie, D., Nguyen, Q., Karimipour, A., (2020). Energy efficiency optimization of the waste heat recovery system with embedded phase change materials in greenhouses: A thermo-economic-environmental study. *Journal of Energy Storage*, 30, 101445. doi:10.1016/j.est.2020.101445.
- [7] Rodrigue, J.-P., *The Geography of Transport Systems*, 5. bs, Routledge, London, 2020. doi:10.4324/9780429346323.

- [8] Hoang, A.T., (2018). Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*, 231, 138-166. doi:10.1016/j.apenergy.2018.09.022.
- [9] Hewawasam, L.S., Jayasena, A.S., Afnan, M.M.M., Ranasinghe, R.A.C.P., Wijewardane, M.A., (2020). Waste heat recovery from thermo-electric generators (TEGs). *Energy Reports*, 6(2), 474-479. doi:10.1016/j.egyr.2019.11.105.
- [10] He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G., Zhao, X., (2015). Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, 143, 1-25. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.075.
- [11] Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B., Huang, K., (2017). Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking. *Energy for Sustainable Development*, 37, 86-98. doi:10.1016/j.esd.2017.01.003.
- [12] Remeli, M.F., Tan, L., Date, A., Singh, B., Akbarzadeh, A., (2015). Simultaneous power generation and heat recovery using a heat pipe assisted thermoelectric generator system. *Energy Conversion and Management*, 91, 110-119. doi:10.1016/j.enconman.2014.12.001.
- [13] Montecucco, A., Knox, A.R., (2015). Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 828-839. doi:10.1109/TPEL.2014.2313294.
- [14] Mamur, H., Ahiska, R., (2015). Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 97, 265-272. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.068.

- [15] Yamada, H., Kimura, K., Hanamoto, T., Ishiyama, T., Sakaguchi, T., Takahashi, T., (2013). A Novel MPPT Control Method of Thermoelectric Power Generation with Single Sensor. *Applied Sciences*, 3(2), 545-558. doi:10.3390/app3020545.
- [16] Yu, C., Chau, K.T., (2009). Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking. *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1506-1512. doi:10.1016/j.enconman.2009.02.015.
- [17] Luta, D.N., Raji, A.K., (2019). Comparing fuzzy rule-based MPPT techniques for fuel cell stack applications. *Energy Procedia*, 156, 177-182. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.124.
- [18] Zheng, X.F., Yan, Y.Y., Simpson, K., (2013). A potential candidate for the sustainable and reliable domestic energy generation–Thermoelectric cogeneration system. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 305-311. doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.03.020.
- [19] Ma, H.-K., Lin, C.-P., Wu, H.-P., Peng, C.-H., Hsu, C.-C., (2015). Waste heat recovery using a thermoelectric power generation system in a biomass gasifier. *Applied Thermal Engineering*, 88, 274-279. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.09.070.
- [20] Eakburanawat, J., Boonyaroonate, I., (2006). Development of a thermoelectric battery-charger with microcontroller-based maximum power point tracking technique. *Applied Energy*, 83(7), 687-704. doi:10.1016/j.apenergy.2005.06.004.
- [21] Twaha, S., Zhu, J., Yan, Y., Li, B., (2016). A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 698-726. doi:10.1016/j.rser.2016.07.034.

- [22] Baba, A.O., Liu, G., Chen, X., (2020). Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods. *Sustainable Futures*, 2, 100020. doi:10.1016/j.sftr.2020.100020.
- [23] Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., Huang, H., (2020). Classification and summarization of solar photovoltaic MPPT techniques: A review based on traditional and intelligent control strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327. doi:10.1016/j.egyr.2020.05.013.
- [24] Yang, B., Zhu, T., Wang, J., Shu, H., Yu, T., Zhang, X., Yao, W., Sun, L., (2020). Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition. *Journal of Cleaner Production*, 268, 121983. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121983.
- [25] Motahhir, S., El Hammoumi, A., El Ghzizal, A., (2020). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118983. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118983.
- [26] Ahmad, F.F., Ghenai, C., Hamid, A.K., Bettayeb, M., (2020). Application of sliding mode control for maximum power point tracking of solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *Annual Reviews in Control*, 49, 173-196. doi:10.1016/j.arcontrol.2020.04.011.
- [27] Yap, K.Y., Sarimuthu, C.R., Lim, J.M.-Y., (2020). Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(6), 1043-1059. doi:10.35833/MPCE.2020.000159.
- [28] Narendra, A., Venkataramana Naik, N., Panda, A.K., Tiwary, N., (2020). A Comprehensive Review of PV Driven Electrical Motors. *Solar Energy*, 195, 278-303. doi:10.1016/j.solener.2019.09.078.

- [29] Kabalcı, E., (2020). Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods. *Solar Energy*, 198, 247-274. doi:10.1016/j.solener.2020.01.063.
- [30] Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, Md.H., Shafiullah, Md., Malik, M.Z., (2020). Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition–A Retrospection. *IEEE Access*, 8, 127368-127392. doi:10.1109/ACCESS.2020.3007710.
- [31] Ahmad, R., Murtaza, A.F., Sher, H.A., (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 82-102. doi:10.1016/j.rser.2018.10.015.
- [32] Podder, A.K., Roy, N.K., Pota, H.R., (2019). MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1615-1632. doi:10.1049/iet-rpg.2018.5946.
- [33] Belhachat, F., Larbes, C., (2019). Comprehensive review on global maximum power point tracking techniques for PV systems subjected to partial shading conditions. *Solar Energy*, 183, 476-500. doi:10.1016/j.solener.2019.03.045.
- [34] Venkateswari, R., Sreejith, S., (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376-394. doi:10.1016/j.rser.2018.11.012.
- [35] Batarseh, M.G., Za'ter, M.E., (2018). Hybrid maximum power point tracking techniques: A comparative survey, suggested classification and uninvestigated combinations. *Solar Energy*, 169, 535-555. doi:10.1016/j.solener.2018.04.045.
- [36] Belhachat, F., Larbes, C., (2018). A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92, 513-553.  
doi:10.1016/j.rser.2018.04.094.

- [37] Eltamaly, A.M., Farh, H.M.H., Othman, M.F., (2018). A novel evaluation index for the photovoltaic maximum power point tracker techniques. Solar Energy, 174, 940-956. doi:10.1016/j.solener.2018.09.060.
- [38] Danandeh, M.A., Mousavi G., S.M., (2018). Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(3), 2743-2767. doi:10.1016/j.rser.2017.10.009.
- [39] Li, G., Jin, Y., Akram, M.W., Chen, X., Ji, J., (2018). Application of bio-inspired algorithms in maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81(1), 840-873. doi:10.1016/j.rser.2017.08.034.
- [40] Chatterjee, S., Kumar, P., Chatterjee, S., (2018). A techno-commercial review on grid connected photovoltaic system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81(2), 2371-2397. doi:10.1016/j.rser.2017.06.045.
- [41] Kordestani, M., Mirzaee, A., Safavi, A.A., Saif, M. (2018). Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic Power Systems-A Systematic Literature Review, European Control Conference (ECC), 2018: ss. 40-45. doi:10.23919/ECC.2018.8550117.
- [42] Choutapalli, H., Bharath, K.R., Kanakasabapathy, P., (2018). A Review on Advanced MPPT methods for SPV system under Partial Shaded Conditions, International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT), ss. 305-310. doi:10.1109/ICCPCT.2018.8574290.
- [43] Karami, N., Moubayed, N., Outbib, R., (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68(1), 1-18. doi:10.1016/j.rser.2016.09.132.

- [44] Erdem, Z., (2017). A Review of MPPT Algorithms for Partial Shading Conditions. *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 1128-1133. doi:10.12693/APhysPolA.132.1128.
- [45] Sameeullah, M., Swarup, A., (2016). MPPT Schemes for PV System under Normal and Partial Shading Condition: A Review. *International Journal of Renewable Energy Development*, 5(2), 79-94. doi:10.14710/ijred.5.2.79-94.
- [46] El-Khozondar, H.J., El-Khozondar, R.J., Matter, K., Suntio, T., (2016). A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 3(1), 3. doi:10.1186/s40807-016-0022-8.
- [47] Jordehi, A.R., (2016). Maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems: A review of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1127-1138. doi:10.1016/j.rser.2016.07.053.
- [48] Tajuddin, M.F.N., Arif, M.S., Ayob, S.M., Salam, Z., (2015). Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review. *International Journal of Energy Research*, 39(9), 1153-1178. doi:10.1002/er.3289.
- [49] Bendib, B., Belmili, H., Krim, F., (2015). A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648. doi:10.1016/j.rser.2015.02.009.
- [50] Mousa, H.H.H., Youssef, A.R., Mohamed, E.E.M., (2021). State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 126(A), 106598. doi:10.1016/j.ijepes.2020.106598.

- [51] Govinda, C.V., Udhay, S.V., Rani, C., Wang, Y., (2018). Busawon, K., A Review on Various MPPT Techniques for Wind Energy Conversion System, 2018 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), 310-326. doi:10.1109/ICCPEIC.2018.8525219.
- [52] Sachan, A., Gupta, A.K., Samuel, P., (2016). A Review of MPPT Algorithms Employed in Wind Energy Conversion Systems. Journal of Green Engineering, 6(4), 385-402. doi:10.13052/jge1904-4720.643.
- [53] Kumar, D., Chatterjee, K., (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 957-970. doi:10.1016/j.rser.2015.11.013.
- [54] Serra, P.M.D., A, E.-S., (2021). Sourcing power with microbial fuel cells: A timeline. Journal of Power Sources, 482, 228921. doi:10.1016/j.jpowsour.2020.228921.
- [55] Vasudevan, K.R., Ramachandaramurthy, V.K., Venugopal, G., Ekanayake, J.B., Tiong, S.K., (2021). Variable speed pumped hydro storage: A review of converters, controls and energy management strategies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110156. doi:10.1016/j.rser.2020.110156.
- [56] Man, E.A., Sera, D., Mathe, L., Schaltz, E., Rosendahl, L., (2016). Dynamic Performance of Maximum Power Point Trackers in TEG Systems Under Rapidly Changing Temperature Conditions. Journal of Electronic Materials, 45, 1309-1315. doi:10.1007/s11664-015-4015-y.
- [57] Verma, V., Kane, A., Singh, B., (2016). Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 1017-1026. doi:10.1016/j.rser.2015.12.212.

- [58] Kwan, T.H., Wu, X., Yao, Q., (2018). Bidirectional operation of the thermoelectric device for active temperature control of fuel cells. *Applied Energy*, 222, 410-422. doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.016.
- [59] Torrecilla, M.C., Montecucco, A., Siviter, J., Strain, A., Knox, A.R., (2018). Transient response of a thermoelectric generator to load steps under constant heat flux. *Applied Energy*, . doi:10.1016/j.apenergy.2017.12.010.
- [60] Muralidhar, N., Himabindu, M., Ravikrishna, R.V., (2018). Modeling of a hybrid electric heavy duty vehicle to assess energy recovery using a thermoelectric generator. *Energy*, 212, 293-303. doi:10.1016/j.energy.2018.02.023.
- [61] Risseh, A.E., Nee, H.-P., Goupil, C., (2018). Electrical Power Conditioning System for Thermoelectric Waste Heat Recovery in Commercial Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(2), 548-562. doi:10.1109/TTE.2018.2796031.
- [62] Zhang, J., Xuan, Y., (2019). The electric feature synergy in the photovoltaic - Thermoelectric hybrid system. *Energy*, 181, 387-394. doi:10.1016/j.energy.2019.05.155.
- [63] Bijukumar, B., Raam, A.G.K., Ilango Ganesan, S., Nagamani, C., (2020). Adaptability of grid connected PV inverters with thermoelectric generator as power source: a performance comparison. *IET Power Electronics*, 13(5), 981-990. doi:10.1049/iet-pel.2019.0646.
- [64] Thankakan, R., Samuel Nadar, E.R., (2019). Analysis of Bi-Te Based Thermoelectric Modules Connected to Square Series–Parallel Configuration with Isolated Power Electronics Converter for DC Micro-grid Applications. *Journal of Electronic Materials*, 48, 5497–5509. doi:10.1007/s11664-019-07021-z.

- [65] Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B., Kang, Y., (2008). A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(7), 2622-2628. doi:10.1109/TIE.2008.920550.
- [66] Tey, K.S., Mekhilef, S., (2014). Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level. *Solar Energy*, 101, 333-342. doi:10.1016/j.solener.2014.01.003.
- [67] Esram, T., Chapman, P.L., (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449. doi:10.1109/TEC.2006.874230.
- [68] Laird, I., Lovatt, H., Savvides, N., Lu, D., Agelidis, V.G., (2008). Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators, 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, 2008, 1-6.
- [69] Wu, S., Wang, S., Yang, C., Xie, K., (2018). Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking. *Energy Conversion and Management*, 177, 55-63. doi:10.1016/j.enconman.2018.09.040.
- [70] Yoon, E.-J., Park, J.-T., Yu, C.-G., (2018). Thermal energy harvesting circuit with maximum power point tracking control for self-powered sensor node applications. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 19(2), 285-296. doi:10.1631/FITEE.1601181.
- [71] Deasy, M.J., O'Shaughnessy, S.M., Archer, L., Robinson, A.J., (2018). Electricity generation from a biomass cookstove with MPPT power management and passive liquid cooling. *Energy for Sustainable Development*, 43, 162-172. doi:10.1016/j.esd.2018.01.004.
- [72] Leoni, A., Ulisse, I., Pantoli, L., Errico, V., Ricci, M., Orengo, G., Giannini, F., Saggio, G., (2019). Energy harvesting optimization for built-in power

replacement of electronic multisensory architecture. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 107, 170-176. doi:10.1016/j.aeue.2019.05.002.

- [73] Xu, W., Wang, A., Lin, S., Li, J., Wei, B., Duan, J., Sun, X., Liu, J., (2020). An internal-resistance-adaptive MPPT circuit for energy harvesting. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 127, 153464. doi:10.1016/j.aeue.2020.153464.
- [74] Dalala, Z.M., Saadeh, O., Bdour, M., Zahid, Z.U., (2018). A New Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Thermoelectric Generators with Reduced Voltage Sensors Count Control †. *Energies*, 11(7), 1826. doi:10.3390/en11071826.
- [75] Nakayama, S., Kimura, K., Kushino, Y., Koizumi, H., (2015). A simple MPPT control method for thermoelectric energy harvesting, 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015, 6455-6460. doi:10.1109/ECCE.2015.7310564.
- [76] Bond, M., Park, J.-D., (2015). Current-Sensorless Power Estimation and MPPT Implementation for Thermoelectric Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5539-5548. doi:10.1109/TIE.2015.2414393.
- [77] Paraskevas, A., Koutroulis, E., (2016). A simple maximum power point tracker for thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 108, 355-365. doi:10.1016/j.enconman.2015.11.027.
- [78] Fathabadi, H., (2016). Novel fast dynamic MPPT (maximum power point tracking) technique with the capability of very high accurate power tracking. *Energy*, 94, 466-475. doi:10.1016/j.energy.2015.10.133.
- [79] Liu, Y.-H., Chiu, Y.-H., Huang, J.-W., Wang, S.-C., (2016). A novel maximum power point tracker for thermoelectric generation system. *Renewable Energy*, 97, 306-318. doi:10.1016/j.renene.2016.05.001.

- [80] Li, Y., Tang, Z., Zhu, Z., Yang, Y., (2018). A novel MPPT circuit with 99.1% tracking accuracy for energy harvesting. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 94(1), 105-115. doi:10.1007/s10470-017-1079-z.
- [81] Quan, R., Zhou, W., Yang, G., Quan, S., (2017). A Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for Automobile Exhaust Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials*, 46(5), 2676-2683. doi:10.1007/s11664-016-4875-9.
- [82] Liu, Z., Hsu, Y.-P., Hella, M.M., (2020). A Thermal/RF Hybrid Energy Harvesting System With Rectifying-Combination and Improved Fractional-OCV MPPT Method. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(10), 3352-3363. doi:10.1109/TCSI.2020.2982403.
- [83] Montecucco, A., Siviter, J., Knox, A.R., (2015). Constant heat characterisation and geometrical optimisation of thermoelectric generators. *Applied Energy*, 149, 248-258. doi:10.1016/j.apenergy.2015.03.120.
- [84] Compadre Torrecilla, M., Montecucco, A., Siviter, J., Knox, A.R., Strain, A., (2019). Novel model and maximum power tracking algorithm for thermoelectric generators operated under constant heat flux. *Applied Energy*, 256, 113930. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113930.
- [85] Thankakan, R., Samuel Nadar, E.R., (2020). Application of fuzzy logic-based MPPT technique for harvesting the heat energy dissipated by the wind generator stator windings to power single-phase AC grid systems. *Neural Computing and Applications*, 32(18), 15155-15170. doi:10.1007/s00521-020-04865-z.
- [86] Thankakan, R., Samuel Nadar, E.R., (2021). ANFIS-Based MPPT Controller of the Thermoelectric Energy Harvesting System for DC Micro-grid Applications. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(2), 1137-1154. doi:10.1007/s13369-020-04942-4.

- [87] Shittu, S., Li, G., Akhlaghi, Y.G., Ma, X., Zhao, X., Ayodele, E., (2019). Advancements in thermoelectric generators for enhanced hybrid photovoltaic system performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 24-54. doi:10.1016/j.rser.2019.04.023.
- [88] Kwan, T.H., Wu, X., (2017). High performance P&O based lock-on mechanism MPPT algorithm with smooth tracking. *Solar Energy*, 155, 816-828. doi:10.1016/j.solener.2017.07.026.
- [89] Kwan, T.H., Wu, X., (2017). An adaptive scale factor based MPPT algorithm for changing solar irradiation levels in outer space. *Acta Astronautica*, 132, 33-42. doi:10.1016/j.actaastro.2016.12.010.
- [90] Kwan, T.H., Wu, X., (2017). The Lock-On Mechanism MPPT algorithm as applied to the hybrid photovoltaic cell and thermoelectric generator system. *Applied Energy*, 204, 873-886. doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.036.
- [91] Yahya, K., Alomari, O., (2021). A new maximum power point tracking algorithm based on power differentials method for thermoelectric generators. *International Journal of Energy Research*, 45(5), 7476-7486. doi:10.1002/er.6329.
- [92] Samman, F.A., Piarah, W.H., Djafar, Z., (2019). Power transfer maximization of thermoelectric generator system using peak trapping and scanning-based mppt algorithms. *ICIC Express Letters*, 13(7), 539-546. doi:10.24507/icicel.13.07.539.
- [93] Rodriguez, R., Guo, J., Preindl, M., Cotton, J.S., Emadi, A., (2019). High frequency injection maximum power point tracking for thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, 198, 111832. doi:10.1016/j.enconman.2019.111832.

- [94] Fang, W., Quan, S.H., Xie, C.J., Tang, X.F., Wang, L.L., Huang, L., (2016). Maximum Power Point Tracking with Dichotomy and Gradient Method for Automobile Exhaust Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*, 45(3), 1613-1624. doi:10.1007/s11664-015-4130-9.
- [95] Bijukumar, B., Raam, A.G.K., Ganesan, S.I., Nagamani, C., (2018). A Linear Extrapolation-Based MPPT Algorithm for Thermoelectric Generators Under Dynamically Varying Temperature Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(4), 1641-1649. doi:10.1109/TEC.2018.2830796.
- [96] Wang, L., Chen, S., Ma, K., (2016). On stability and application of extremum seeking control without steady-state oscillation. *Automatica*, 68, 18-26. doi:10.1016/j.automatica.2016.01.009.
- [97] Phillip, N., Maganga, O., Burnham, K.J., Ellis, M.A., Robinson, S., Dunn, J., Rouaud, C., (2013). Investigation of Maximum Power Point Tracking for Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*, 42(7), 1900-1906. doi:10.1007/s11664-012-2460-4.
- [98] Twaha, S., Zhu, J., Maraaba, L., Huang, K., Li, B., Yan, Y., (2017). Maximum Power Point Tracking Control of a Thermoelectric Generation System Using the Extremum Seeking Control Method. *Energies*, 10(12), 2016. doi:10.3390/en10122016.
- [99] Del Valle, Y., Venayagamoorthy, G.K., Mohagheghi, S., Hernandez, J.-C., Harley, R.G., (2008). Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(2), 171-195. doi:10.1109/TEVC.2007.896686.
- [100] Thankakan, R., Nadar, E.R.S., (2020). Investigation of the double input power converter with N stages of voltage multiplier using PSO-based MPPT technique for the thermoelectric energy harvesting system. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 48(3), 435-448. doi:https://doi.org/10.1002/cta.2741.

- [101] Wang, X., Ting, D.S.-K., Henshaw, P., (2020). Mutation particle swarm optimization (M-PSO) of a thermoelectric generator in a multi-variable space. *Energy Conversion and Management*, 224, 113387. doi:10.1016/j.enconman.2020.113387.
- [102] Jing, L., Song, B., Zhu, Y., Yang, B., Shu, H., (2020). Grey Wolf Optimizer based MPPT Control of Centralized Thermoelectric Generator Applied in Thermal Power Stations, 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 127-132. doi:10.1109/AEEES48850.2020.9121416.
- [103] Yang, B., Wang, J., Zhang, X., Zhang, M., Shu, H., Li, S., He, T., Yang, L., Yu, T., (2019). MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search under non-uniform temperature distribution condition. *Energy Conversion and Management*, 199, 111991. doi:10.1016/j.enconman.2019.111991.
- [104] Kolda, T.G., Lewis, R.M., Torczon, V., (2003). Optimization by direct search: New perspectives on some classical and modern methods. *SIAM Review*, 45(3), 385-482. doi:10.1137/S003614450242889.
- [105] Li, H., Yang, D., Su, W., Lü, J., Yu, X., (2019). An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 265-275. doi:10.1109/TIE.2018.2829668.
- [106] Mohanty, S., Subudhi, B., Ray, P.K., (2016). A New MPPT Design Using Grey Wolf Optimization Technique for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(1), 181-188. doi:10.1109/TSTE.2015.2482120.
- [107] Yang, B., Zhang, M., Zhang, X., Wang, J., Shu, H., Li, S., He, T., Yang, L., Yu, T., (2020). Fast atom search optimization based MPPT design of centralized thermoelectric generation system under heterogeneous temperature

difference. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119301. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119301.

- [108] Zhao, W., Wang, L., Zhang, Z., (2019). Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem. *Knowledge-Based Systems*, 163, 283-304. doi:10.1016/j.knosys.2018.08.030.
- [109] Zhang, X., Yang, B., Yu, T., Jiang, L., (2020). Dynamic Surrogate Model Based Optimization for MPPT of Centralized Thermoelectric Generation Systems Under Heterogeneous Temperature Difference. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(2), 966-976. doi:10.1109/TEC.2020.2967511.
- [110] Zhang, X., Tan, T., Yang, B., Wang, J., Li, S., He, T., Yang, L., Yu, T., Sun, L., (2020). Greedy search based data-driven algorithm of centralized thermoelectric generation system under non-uniform temperature distribution. *Applied Energy*, 260, 114232. doi:10.1016/j.apenergy.2019.114232.
- [111] Bandyopadhyay, S., Chandrakasan, A.P., (2012). Platform Architecture for Solar, Thermal, and Vibration Energy Combining With MPPT and Single Inductor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 47(9), 2199-2215. doi:10.1109/JSSC.2012.2197239.
- [112] Wang, C., Li, Z., Zhao, K., Guo, Q., (2016). Efficient self-powered convertor with digitally controlled oscillator-based adaptive maximum power point tracking and RF kick-start for ultralow-voltage thermoelectric energy harvesting. *IET Circuits, Devices & Systems*, 10(2), 147-155. doi:10.1049/iet-cds.2015.0058.
- [113] Hwu, K.I., Yau, Y.T., (2019). Thermoelectric Conversion System With Dimmable LED Lighting. *IEEE Access*, 7, 42396-42407. doi:10.1109/ACCESS.2019.2907217.
- [114] Mansoor, M., Mirza, A.F., Duan, S., Zhu, J., Yin, B., Ling, Q., (2021). Maximum energy harvesting of centralized thermoelectric power generation

systems with non-uniform temperature distribution based on novel equilibrium optimizer. *Energy Conversion and Management*, 246, 114694. doi:10.1016/j.enconman.2021.114694.

- [115] Killi, M., Samanta, S., (2015). Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5549-5559. doi:10.1109/TIE.2015.2407854.
- [116] Ahmed, J., Salam, Z., (2015). An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 150, 97-108. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.006.
- [117] Kamala Devi, V., Premkumar, K., Bisharathu Beevi, A., Ramaiyer, S., (2017). A modified Perturb & Observe MPPT technique to tackle steady state and rapidly varying atmospheric conditions. *Solar Energy*, 157, 419-426. doi:10.1016/j.solener.2017.08.059.
- [118] Belkaid, A., Colak, I., Kayisli, K., (2017). Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electrical Engineering*, 99(3), 839-846. doi:10.1007/s00202-016-0457-3.
- [119] Ghamrawi, A., Gaubert, J.-P., Mehdi, D., (2018). A new dual-mode maximum power point tracking algorithm based on the Perturb and Observe algorithm used on solar energy system. *Solar Energy*, 174, 508-514. doi:10.1016/j.solener.2018.09.013.
- [120] Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M.-T., Goda, M., (2018). An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels. *Solar Energy*, 171, 547-561. doi:10.1016/j.solener.2018.06.080.
- [121] Ali, A.I.M., Sayed, M.A., Mohamed, E.E.M., (2018). Modified efficient perturb and observe maximum power point tracking technique for grid-tied PV

system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 192-202. doi:10.1016/j.ijepes.2017.12.029.

- [122] Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M.Th., El-Ghazaly, M., (2020). An Efficient Tracking of MPP in PV Systems Using a Newly-Formulated P&O-MPPT Method Under Varying Irradiation Levels. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15(1), 501-513. doi:10.1007/s42835-019-00283-x.
- [123] Piegari, L., Rizzo, R., Spina, I., Tricoli, P., (2015). Optimized Adaptive Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Generation. *Energies*, 8(5), 3418-3436. doi:10.3390/en8053418.
- [124] Sundareswaran, K., Vigneshkumar, V., Sankar, P., Simon, S.P., Nayak, P.S.R., Palani, S., (2016). 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. doi:10.1109/TII.2015.2502428.
- [125] Manickam, C., Raman, G.P., Raman, G.R., Ganesan, S.I., Chilakapati, N., (2017). Fireworks Enriched P O Algorithm for GMPPT and Detection of Partial Shading in PV Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(6), 4432-4443. doi:10.1109/TPEL.2016.2604279.
- [126] Sheik Mohammed, S., Devaraj, D., Imthias Ahamed, T.P., (2016). A novel hybrid Maximum Power Point Tracking Technique using Perturb & Observe algorithm and Learning Automata for solar PV system. *Energy*, 112, 1096-1106. doi:10.1016/j.energy.2016.07.024.
- [127] Harrag, A., Messalti, S., (2015). Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1247-1260. doi:10.1016/j.rser.2015.05.003.

- [128] Kumar, N., Hussain, I., Singh, B., Panigrahi, B.K., (2018). Framework of Maximum Power Extraction From Solar PV Panel Using Self Predictive Perturb and Observe Algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(2), 895-903. doi:10.1109/TSTE.2017.2764266.
- [129] Loukriz, A., Haddadi, M., Messalti, S., (2016). Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems. *ISA Transactions*, 62, 30-38. doi:10.1016/j.isatra.2015.08.006.
- [130] Harrag, A., Messalti, S., (2019). IC-based Variable Step Size Neuro-Fuzzy MPPT Improving PV System Performances. *Energy Procedia*, 157, 362-374. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.201.
- [131] Al-Dhaifallah, M., Nassef, A.M., Rezk, H., Nisar, K.S., (2018). Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system. *Solar Energy*, 159, 650-664. doi:10.1016/j.solener.2017.11.040.
- [132] Kwan, T.H., Wu, X., (2016). Maximum power point tracking using a variable antecedent fuzzy logic controller. *Solar Energy*, 137, 189-200. doi:10.1016/j.solener.2016.08.008.
- [133] Srinivasarao, P., Peddakapu, K., Mohamed, M.R., Deepika, K.K., Sudhakar, K., (2021). Simulation and experimental design of adaptive-based maximum power point tracking methods for photovoltaic systems. *Computers & Electrical Engineering*, 89, 106910. doi:10.1016/j.compeleceng.2020.106910.
- [134] Hong, Y.-Y., Buay, P.M.P., (2020). Robust design of type-2 fuzzy logic-based maximum power point tracking for photovoltaics. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100669. doi:10.1016/j.seta.2020.100669.
- [135] Mosaad, M.I., abed el-Raouf, M.O., Al-Ahmar, M.A., Banakher, F.A., (2019). Maximum Power Point Tracking of PV system Based Cuckoo Search

Algorithm; review and comparison. *Energy Procedia*, 162, 117-126. doi:10.1016/j.egypro.2019.04.013.

- [136] Shi, J.-Y., Xue, F., Qin, Z.-J., Zhang, W., Ling, L.-T., Yang, T., (2016). Improved Global Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System via Cuckoo Search under Partial Shaded Conditions. *Journal of Power Electronics*, 16(1), 287-296. doi:10.6113/JPE.2016.16.1.287.
- [137] Hashim, F.A., Houssein, E.H., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W., Mirjalili, S., (2019). Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm. *Future Generation Computer Systems*, 101, 646-667. doi:10.1016/j.future.2019.07.015.
- [138] Mirza, A.F., Mansoor, M., Ling, Q., (2020). A novel MPPT technique based on Henry gas solubility optimization. *Energy Conversion and Management*, 225, 113409. doi:10.1016/j.enconman.2020.113409.
- [139] Yang, X.-S., He, X., (2013). Firefly algorithm: recent advances and applications. *International Journal of Swarm Intelligence*, 1(1), 36-50. doi:10.1504/IJSI.2013.055801.
- [140] Teshome, D.F., Lee, C.H., Lin, Y.W., Lian, K.L., (2017). 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. doi:10.1109/JESTPE.2016.2581858.
- [141] Shi, J.-Y., Xue, F., Qin, Z.-J., Ling, L.-T., Yang, T., Wang, Y., Wu, J., (2016). Tracking the global maximum power point of a photovoltaic system under partial shading conditions using a modified firefly algorithm. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(3), 033501. doi:10.1063/1.4948524.
- [142] Farzaneh, J., Keypour, R., Khanesar, M.A., (2018). A New Maximum Power Point Tracking Based on Modified Firefly Algorithm for PV System Under

Partial Shading Conditions. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 3(1), 9. doi:10.1007/s40866-018-0048-7.

- [143] Safarudin, Y.M., Priyadi, A., Purnomo, M.H., Pujiantara, M., (2015). Combining Simplified Firefly and modified P&O algorithm for Maximum Power Point Tracking of photovoltaic system under Partial Shading Condition, 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 181-186. doi:10.1109/ISITIA.2015.7219976.
- [144] Shi, J.-Y., Ling, L.-T., Xue, F., Qin, Z.-J., Li, Y.-J., Lai, Z.-X., Yang, T., (2017). Combining incremental conductance and firefly algorithm for tracking the global MPP of PV arrays. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(2), 023501. doi:10.1063/1.4977213.
- [145] Huang, Y.-P., Chen, X., Ye, C.-E., (2018). A Hybrid Maximum Power Point Tracking Approach for Photovoltaic Systems under Partial Shading Conditions Using a Modified Genetic Algorithm and the Firefly Algorithm. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 1-13. doi:10.1155/2018/7598653.
- [146] Dorigo, M., Blum, C., (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2), 243-278. doi:10.1016/j.tcs.2005.05.020.
- [147] Priyadarshi, N., Ramachandramurthy, V.K., Padmanaban, S., Azam, F., (2019). An Ant Colony Optimized MPPT for Standalone Hybrid PV-Wind Power System with Single Cuk Converter. *Energies*, 12(1), 167. doi:10.3390/en12010167.
- [148] Krishnan G, S., Kinattingal, S., Simon, S.P., Nayak, P.S.R., (2020). MPPT in PV systems using ant colony optimisation with dwindling population. *IET Renewable Power Generation*, 14(7), 1105-1112. doi:10.1049/iet-rpg.2019.0875.

- [149] Karaboga, D., Akay, B., (2011). A modified Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems. *Applied Soft Computing*, 11(3), 3021-3031. doi:10.1016/j.asoc.2010.12.001.
- [150] Benyoucef, A. soufyane, Chouder, A., Kara, K., Silvestre, S., sahed, O.A., (2015). Artificial bee colony based algorithm for maximum power point tracking (MPPT) for PV systems operating under partial shaded conditions. *Applied Soft Computing*, 32, 38-48. doi:10.1016/j.asoc.2015.03.047.
- [151] Oshaba, A.S., Ali, E.S., Abd Elazim, S.M., (2017). PI controller design using ABC algorithm for MPPT of PV system supplying DC motor pump load. *Neural Computing and Applications*, 28(2), 353-364. doi:10.1007/s00521-015-2067-9.
- [152] Motahhir, S., Chouder, A., Hammoumi, A.E., Benyoucef, A.S., Ghzizal, A.E., Kichou, S., Kara, K., Sanjeevikumar, P., Silvestre, S., (2021). Optimal Energy Harvesting From a Multistrings PV Generator Based on Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE Systems Journal*, 15(3), 4137-4144. doi:10.1109/JSYST.2020.2997744.
- [153] Sundareswaran, K., Sankar, P., Nayak, P.S.R., Simon, S.P., Palani, S., (2015). Enhanced Energy Output From a PV System Under Partial Shaded Conditions Through Artificial Bee Colony. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(1), 198-209. doi:10.1109/TSTE.2014.2363521.
- [154] Pilakkat, D., Kanthalakshmi, S., (2019). An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions. *Solar Energy*, 178, 37-47. doi:10.1016/j.solener.2018.12.008.
- [155] Pilakkat, D., Kanthalakshmi, S., (2020). Single phase PV system operating under Partially Shaded Conditions with ABC-PO as MPPT algorithm for grid connected applications. *Energy Reports*, 6, 1910-1921. doi:10.1016/j.egyr.2020.07.019.

- [156] Venkata Rao, R., (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7, 19-34. doi:10.5267/j.ijiec.2015.8.004.
- [157] Huang, C., Zhang, Z., Wang, L., Song, Z., Long, H., (2017). A novel global maximum power point tracking method for PV system using Jaya algorithm, 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 1-5. doi:10.1109/EI2.2017.8245345.
- [158] Huang, C., Wang, L., Yeung, R.S.-C., Zhang, Z., Chung, H.S.-H., Bensoussan, A., (2018). A Prediction Model-Guided Jaya Algorithm for the PV System Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(1), 45-55. doi:10.1109/TSTE.2017.2714705.
- [159] Kumar, N., Hussain, I., Singh, B., Panigrahi, B.K., (2017). Rapid MPPT for Uniformly and Partial Shaded PV System by Using JayaDE Algorithm in Highly Fluctuating Atmospheric Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), 2406-2416. doi:10.1109/TII.2017.2700327.
- [160] Huang, C., Wang, L., Long, H., Luo, X., Wang, J.-H., (2019). A hybrid global maximum power point tracking method for photovoltaic arrays under partial shading conditions. *Optik*, 180, 665-674. doi:10.1016/j.ijleo.2018.11.158.
- [161] Motamarri, R., Bhookya, N., (2021). JAYA Algorithm Based on Lévy Flight for Global MPPT Under Partial Shading in Photovoltaic System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(4), 4979-4991. doi:10.1109/JESTPE.2020.3036405.
- [162] Rao, R.V., Savsani, V.J., Vakharia, D.P., (2011). Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. doi:10.1016/j.cad.2010.12.015.

- [163] Rao, R.V., Patel, V., (2013). An improved teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems. *Scientia Iranica*, 20(3), 710-720. doi:10.1016/j.scient.2012.12.005.
- [164] Črepinšek, M., Liu, S.-H., Mernik, L., (2012). A note on teaching-learning-based optimization algorithm. *Information Sciences*, 212, 79-93. doi:10.1016/j.ins.2012.05.009.
- [165] Rezk, H., Fathy, A., (2017). Simulation of global MPPT based on teaching-learning-based optimization technique for partially shaded PV system. *Electrical Engineering*, 99(3), 847-859. doi:10.1007/s00202-016-0449-3.
- [166] Chao, K.-H., Wu, M.-C., (2016). Global Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a Photovoltaic Module Array Constructed through Improved Teaching-Learning-Based Optimization. *Energies*, 9(12), 986. doi:10.3390/en9120986.
- [167] Farajdadian, S., Hosseini, S.M.H., (2019). Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(47), 25457-25472. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.08.037.
- [168] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S., (2009). GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248. doi:10.1016/j.ins.2009.03.004.
- [169] Sundareswaran, K., Vigneshkumar, V., Simon, S.P., Nayak, P.S.R., (2016). Gravitational search algorithm combined with P O method for MPPT in PV systems, 2016 IEEE Annual India Conference (INDICON), 1-5. doi:10.1109/INDICON.2016.7838956.
- [170] Li, L.-L., Lin, G.-Q., Tseng, M.-L., Tan, K., Lim, M.K., (2018). A maximum power point tracking method for PV system with improved gravitational search

algorithm. *Applied Soft Computing*, 65, 333-348.  
doi:10.1016/j.asoc.2018.01.030.

- [171] Giandrasekaran, K., Venkadesan, A., Mohanty, M., Sankar, S., (2017). Tracking the global maximum operating point under a PSC using cluster gravitational search algorithm, 2017 International Conference on Innovative Research In Electrical Sciences (IICIRES), 1-6.  
doi:10.1109/IICIRES.2017.8078314.
- [172] Duman, S., Yorukeren, N., Altas, I.H., (2018). A novel MPPT algorithm based on optimized artificial neural network by using FPSOGSA for standalone photovoltaic energy systems. *Neural Computing and Applications*, 29(1), 257-278. doi:10.1007/s00521-016-2447-9.
- [173] Saremi, S., Mirjalili, S., Lewis, A., (2017). Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application. *Advances in Engineering Software*, 105, 30-47. doi:10.1016/j.advengsoft.2017.01.004.
- [174] Fathy, A., (2018). Recent meta-heuristic grasshopper optimization algorithm for optimal reconfiguration of partially shaded PV array. *Solar Energy*, 171, 638-651. doi:10.1016/j.solener.2018.07.014.
- [175] Mansoor, M., Mirza, A.F., Ling, Q., Javed, M.Y., (2020). Novel Grass Hopper optimization based MPPT of PV systems for complex partial shading conditions. *Solar Energy*, 198, 499-518. doi:10.1016/j.solener.2020.01.070.
- [176] Subramanian, A., Raman, J., (2021). Grasshopper optimization algorithm tuned maximum power point tracking for solar photovoltaic systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(9), 8637-8645. doi:10.1007/s12652-020-02593-9.
- [177] Wijaya, B.H., Subroto, R.K., Lian, K.L., Hariyanto, N., (2020). A Maximum Power Point Tracking Method Based on a Modified Grasshopper Algorithm

Combined with Incremental Conductance. *Energies*, 13(17), 4329. doi:10.3390/en13174329.

- [178] Bhukya, L., Nandiraju, S., (2020). A novel photovoltaic maximum power point tracking technique based on grasshopper optimized fuzzy logic approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(16), 9416-9427. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.01.219.
- [179] Kumar, C.S., Rao, R.S., (2016). A Novel Global MPP Tracking of Photovoltaic System based on Whale Optimization Algorithm. *International Journal of Renewable Energy Development*, 5(3), 225-232. doi:10.14710/ijred.5.3.225-232.
- [180] Ebrahim, M.A., Osama, A., Kotb, K.M., Bendary, F., (2019). Whale inspired algorithm based MPPT controllers for grid-connected solar photovoltaic system. *Energy Procedia*, 162, 77-86. doi:10.1016/j.egypro.2019.04.009.
- [181] Fathy, A., Rezk, H., (2016). A novel methodology for simulating maximum power point trackers using mine blast optimization and teaching learning based optimization algorithms for partially shaded photovoltaic system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(2), 023503. doi:10.1063/1.4944971.
- [182] Raman, G., Raman, G., Manickam, C., Ganesan, S.I., (2016). Dragonfly Algorithm Based Global Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems, *Advances in Swarm Intelligence*, Springer International Publishing, Cham, 211-219. doi:10.1007/978-3-319-41000-5\_21.
- [183] Fathy, A., Rezk, H., (2017). Parameter estimation of photovoltaic system using imperialist competitive algorithm. *Renewable Energy*, 111, 307-320. doi:10.1016/j.renene.2017.04.014.
- [184] Kumar, N., Hussain, I., Singh, B., Panigrahi, B.K., (2018). Normal Harmonic Search Algorithm-Based MPPT for Solar PV System and Integrated With Grid

Using Reduced Sensor Approach and PNKLMS Algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6343-6352. doi:10.1109/TIA.2018.2853744.

- [185] Shang, L., Zhu, W., Li, P., Guo, H., (2018). Maximum power point tracking of PV system under partial shading conditions through flower pollination algorithm. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1), 38. doi:10.1186/s41601-018-0111-3.
- [186] Abdalla, O., Rezk, H., Ahmed, E.M., (2019). Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance. *Solar Energy*, 180, 429-444. doi:10.1016/j.solener.2019.01.056.
- [187] Kumar, N., Singh, B., Panigrahi, B.K., (2019). PNKLMF-Based Neural Network Control and Learning-Based HC MPPT Technique for Multiobjective Grid Integrated Solar PV Based Distributed Generating System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(6), 3732-3742. doi:10.1109/TII.2019.2901516.
- [188] Kumar, N., Singh, B., Panigrahi, B.K., Xu, L., (2019). Leaky-Least-Logarithmic-Absolute-Difference-Based Control Algorithm and Learning-Based InC MPPT Technique for Grid-Integrated PV System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), 9003-9012. doi:10.1109/TIE.2018.2890497.
- [189] Eltamaly, A.M., Farh, H.M.H., (2019). Dynamic global maximum power point tracking of the PV systems under variant partial shading using hybrid GWO-FLC. *Solar Energy*, 177, 306-316. doi:10.1016/j.solener.2018.11.028.
- [190] Zhang, X., Li, S., He, T., Yang, B., Yu, T., Li, H., Jiang, L., Sun, L., (2019). Memetic reinforcement learning based maximum power point tracking design for PV systems under partial shading condition. *Energy*, 174, 1079-1090. doi:10.1016/j.energy.2019.03.053.

- [191] Sundararaj, V., Anoop, V., Dixit, P., Arjaria, A., Chourasia, U., Bhambri, P., M R, R., Sundararaj, R., (2020). CCGPA-MPPT: Cauchy preferential crossover-based global pollination algorithm for MPPT in photovoltaic system. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(11), 1128-1145. doi:10.1002/pip.3315.
- [192] Mansoor, M., Mirza, A.F., Ling, Q., (2020). Harris hawk optimization-based MPPT control for PV systems under partial shading conditions. *Journal of Cleaner Production*, 274122857. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122857.
- [193] Behera, M.K., Saikia, L.C., (2020). A new combined extreme learning machine variable steepest gradient ascent MPPT for PV system based on optimized PI-FOI cascade controller under uniform and partial shading conditions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100859. doi:10.1016/j.seta.2020.100859.
- [194] Arther Jain, A., Rabi, B.J., Darly, S.S., (2020). Application of QOCGWO-RFA for maximum power point tracking (MPPT) and power flow management of solar PV generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4122-4136. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.071.
- [195] Titri, S., Larbes, C., Toumi, K.Y., Benatchba, K., (2017). A new MPPT controller based on the Ant colony optimization algorithm for Photovoltaic systems under partial shading conditions. *Applied Soft Computing*, 58, 465-479. doi:10.1016/j.asoc.2017.05.017.
- [196] Bhuiyan, M.R.A., Mamur, H., Dilmaç, Ö.F., Üstüner, M.A., (2022). Opportunities for thermoelectric generators in supporting a low carbon economy. *Nanomaterials and Energy*, 11(1-2), 8-26. doi:10.1680/jnaen.22.00033.
- [197] Siddique, A.R.M., Mahmud, S., Heyst, B.V., (2017). A review of the state of the science on wearable thermoelectric power generators (TEGs) and their

existing challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 730-744. doi:10.1016/j.rser.2017.01.177.

- [198] Markowski, P.M., (2016). Multilayer thick-film thermoelectric microgenerator based on LTCC technology. *Microelectronics International*, 33(3), 155-161. doi:10.1108/MI-05-2016-0038.
- [199] Mamur, H., Ahiska, R., (2014). A Review: Thermoelectric Generators in Renewable Energy. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 4(1), 128-136. doi:https://doi.org/10.20508/ijrer.v4i1.1040.g6256.
- [200] Ahiska, R., Ahiska, K., (2010). New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 338-345. doi:10.1016/j.enconman.2009.09.030.
- [201] Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., Ismail, M., (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6(7), 264-287. doi:10.1016/j.egy.2019.12.011.
- [202] Burnete, N.V., Mariasiu, F., Moldovanu, D., Depcik, C., (2021). Simulink Model of a Thermoelectric Generator for Vehicle Waste Heat Recovery. *Applied Sciences*, 11(3), 1340. doi:10.3390/app11031340.
- [203] Üstüner, M.A., Mamur, H., Taşkın, S., (2022). Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(7), 2688-2706. doi:10.55730/1300-0632.3963.
- [204] Mamur, H., Üstüner, M.A., Bhuiyan, M.R.A., (2022). Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101824. doi:10.1016/j.seta.2021.101824.

- [205] Dorji, S., Wangchuk, D., Choden, T., Tshewang, T., (2020). Maximum Power Point Tracking of solar photovoltaic cell using Perturb & Observe and fuzzy logic controller algorithm for boost converter and quadratic boost converter. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1224-1229. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.144.
- [206] Sarbu, I., Sebarchievici, C., (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 10(1), 191. doi:10.3390/su10010191.
- [207] Ebrahim, M.A., Mohamed, R.G., Ebrahim, M.A., Mohamed, R.G., (2019). Comparative Study and Simulation of Different Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Using Fractional Control & Grey Wolf Optimizer for Grid Connected PV System with Battery, *Electric Power Conversion*, IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.82302.
- [208] Juneja, M., Nagar, S.K., (2016). Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review, 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), 1-5. doi:10.1109/ICCCCM.2016.7918233.
- [209] Wang, D., Tan, D., Liu, L., (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, 22(2), 387-408. doi:10.1007/s00500-016-2474-6.
- [210] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A., (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [211] Şenel, F.A., Yüksel, A.S., Gökçe, F., Yiğit, T., (2018). Gri kurt optimizasyon algoritması ile iki boyutlu dizilim yazılımının geliştirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 293-306. doi:10.25092/baunfbed.433321.
- [212] Han, E., Ghadimi, N., (2022). Model identification of proton-exchange membrane fuel cells based on a hybrid convolutional neural network and

extreme learning machine optimized by improved honey badger algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102005. doi:10.1016/j.seta.2022.102005.

- [213] Kapner, D.J., Cook, T.S., Adelberger, E.G., Gundlach, J.H., Heckel, B.R., Hoyle, C.D., Swanson, H.E., (2007). Tests of the Gravitational Inverse-Square Law below the Dark-Energy Length Scale. *Physical Review Letters*, 98(2), 021101. doi:10.1103/PhysRevLett.98.021101.
- [214] Hashim, F.A., Houssein, E.H., Hussain, K., Mabrouk, M.S., Al-Atabany, W., (2022). Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 192, 84-110. doi:10.1016/j.matcom.2021.08.013.
- [215] Ashraf, H., Abdellatif, S.O., Elkholy, M.M., El-Fergany, A.A., (2022). Honey badger optimizer for extracting the ungiven parameters of PEMFC model: Steady-state assessment. *Energy Conversion and Management*, 258, 115521. doi:10.1016/j.enconman.2022.115521.
- [216] Taghvaei, M.H., Radzi, M.A.M., Moosavain, S.M., Hizam, H., Hamiruce Marhaban, M., (2013). A current and future study on non-isolated DC–DC converters for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 216-227. doi:10.1016/j.rser.2012.09.023.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Ali ÜSTÜNER

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

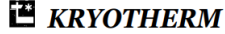
## Yayınları

- [1] Mamur, H., Akyıldız, Ç., Üstüner, M.A., (2023). Simulation of Load Behavior Based on Perturb-Observation Method in Non-Isolated Boost Converter for Maximum Power Point Tracking of Thermoelectric Generators. Bilge International Journal of Science and Technology, 7(1), 70-77. <https://doi.org/10.30516/bilgesci.1201697>
- [2] Üstüner, M.A., Mamur, H., Taşkın, S., (2022). Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 30(7), 2688-2706., Doi: 10.55730/1300-0632.3963
- [3] Mamur, H., Üstüner, M.A., Bhuiyan M.R.A. (2022). Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, 101824, Doi: 10.1016/j.seta.2021.101824
- [4] Mamur, H., Akyıldız, Ç., Üstüner, M.A., (2022). Investigation of load dependent behavior of boost converter with perturb and observe maximum power point tracking for thermoelectric generators. ICONST–EST–2022, Bildiriler Kitabı 88-92, Budva.

- [5] Akyıldız, Ç., Üstüner, M.A., Mamur, H., (2023). Termoelektrik jeneratörler için izolesiz alçaltan yükselten çevirici ile maksimum güç noktası izlemedeki yük değişimlerinin etkisi. ICFAR 2023, Bildiriler Kitabı 1, 150-154, Konya.
- [6] Akyıldız, Ç., Üstüner, M.A., Mamur, H., (2023). Termoelektrik jeneratörlerde kullanılan izolesiz alçaltan çeviricinin yük değişimlerinde maksimum güç noktası izleme davranışının incelenmesi. ICFAR 2023, Bildiriler Kitabı 1, 145-149, Konya.
- [7] Gölen Onur Emre, Üstüner, M.A., Mamur, H., (2023). Termoelektrik jeneratörlerde maksimum güç noktası izlemek için güç ölçüm izleme sistemi tasarımı ve uygulaması. Avrasya 7. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Bildiriler Kitabı, 165-171, Budapeşte.
- [8] Üstüner, M.A., Mamur, H., Taşkın, S., (2022). Maximum power point tracking based on perturb and observation algorithm combined with aquilia optimizer algorithm for thermoelectric generators. UNITECH 2022 Bildiriler Kitabı, 120-123, Gabrovo.
- [9] Üstüner, M.A., Mamur, H., Taşkın, S., (2022). Effect of load variations on maximum power point tracking with incremental conductance method for non-isolated boost converters in thermoelectric generators. UNITECH 2022, Bildiriler Kitabı, 124-127. Gabrovo.
- [10] Mamur, H., Üstüner, M.A., (2021). Simulink model of seebeck thermoelectric module for power generation. UNITECH 2021 Bildiriler Kitabı, 127-130 Gabrovo.
- [11] Mamur, H., Üstüner, M.A., (2021). Improved perturb and observe maximum power point tracking method with thermoelectric generator model. UNITECH 2021 Bildiriler Kitabı, 123-126, Gabrovo.

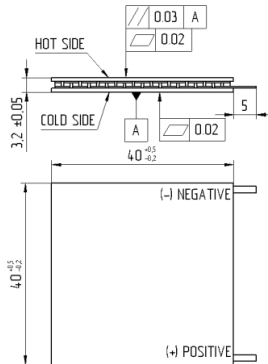
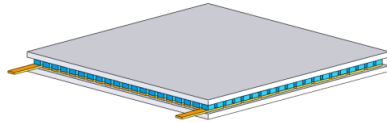
# EKLER

## EK 1. Kyroterm TGM-199-1.4-0.8 modülü üretici verileri



6 Aerodromnaya street, Saint-Petersburg, 197348 Russia  
Tel: +7 812 394-13-10, fax: +7 812 394-12-67, E-mail: info@kryotherm.ru, http://www.kryothermtec.com

### SPECIFICATION OF GENERATING THERMOELECTRIC MODULES TGM-199-1.4-0.8

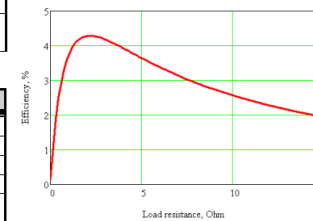
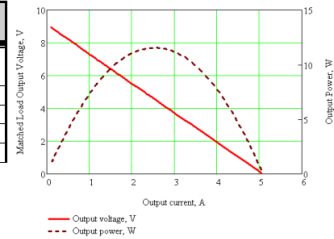


| Thermoelectric parameters                                                     | Unit | Value |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|-------|
| Output power, $P^*$<br>(at $T_h=200^\circ\text{C}$ , $T_c=30^\circ\text{C}$ ) | W    | 11,4  |
| $I_{load}^*$                                                                  | A    | 2,80  |
| $U_{load}^*$                                                                  | V    | 4,10  |
| $R_{ac}$ (at $200^\circ\text{C}$ ), $\pm 10\%$                                | Ohm  | 1,46  |
| $R_t$                                                                         | K/W  | 0,57  |

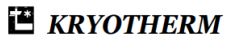
\* for  $R_{load}=R_{ac}$   
 $R_{ac}$  - internal TGM resistance at working temperature;  
 $R_{load}$  - load resistance;  
 $R_t$  - heat resistance.

| Operation parameters        | Unit             | Value |
|-----------------------------|------------------|-------|
| Working temperature         | $^\circ\text{C}$ | 200   |
| Max. processing temperature | $^\circ\text{C}$ | 220   |

| Additional options            | Notations                     |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Height tolerance up to, mm    | $\pm 0,015$                   |
| Flatness up to, mm;           | 0,01                          |
| Parallelism up to, mm;        | 0,01                          |
| Sealants: epoxy, urethane     | E, U                          |
| Type and length of lead wires | Up to customer's requirements |
| Assembling into arrays        |                               |

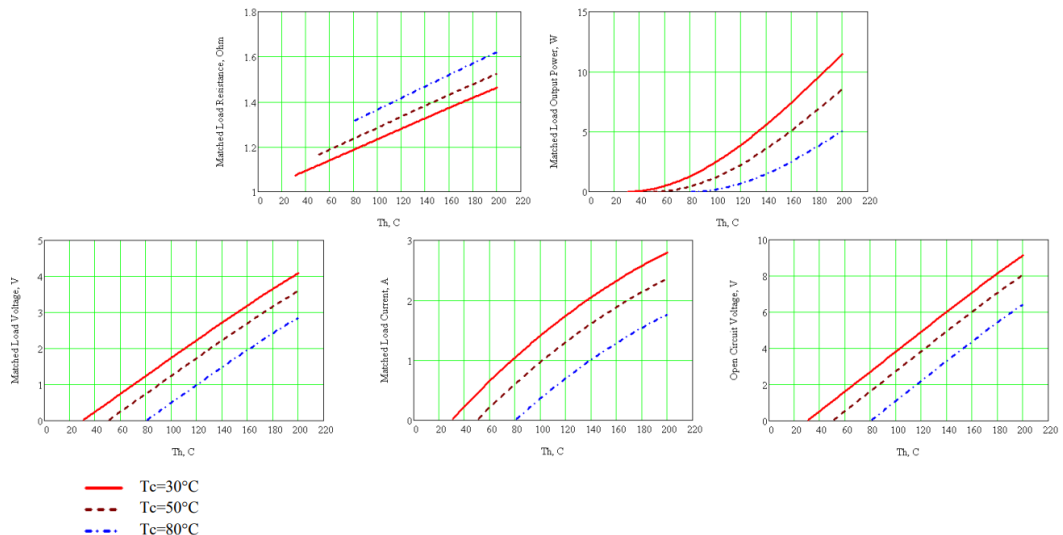


Please refer to our standard assembling recommendations at our [site](http://www.kryothermtec.com)



6 Aerodromnaya street, Saint-Petersburg, 197348 Russia  
Tel: +7 812 394-13-10, fax: +7 812 394-12-67, E-mail: info@kryotherm.ru, http://www.kryothermtec.com

### SPECIFICATION OF GENERATING THERMOELECTRIC MODULES TGM-199-1.4-0.8



Kryotherm

Customer

## EK 2. HBO algoritması MATLAB kodları

```

function [D,iteration1,s] = HBO(Vteg,Iteg, Change)
dim = 1; m = 5; Maxit = 350;
persistent dc fitness D_new Xprey Food_Score
iteration
persistent i counter counter2
if isempty(iteration))
    iteration=0; counter = 0; counter2 = 0; i=0;
    D_new = 0.5; Food_Score=0;
    Xprey=zeros(1,dim);
end
if isempty(dc) || (Change == 1)
    dc=zeros(m,1);

    dc(1)=0.1; dc(2)=0.3; dc(3)=0.5; dc(4)=0.7;
    dc(5)=0.9;
    iteration = 0; counter = 0; counter2 = 0;
    D_new = 0.5; Food_Score=0;
    Xprey=zeros(1,dim);
end
iteration1 = 0;
if counter<1500
    D = D_new;
    s = counter;
    counter = counter+1;
    return;
end
s = 0;
if (iteration < Maxit )
    iteration1=iteration;
    if counter2<2
        D = D_new;
        s = counter2;
        counter2 = counter2+1;
        return;
    end
    s = 0;
    counter2 = 0;
    if i<m
        i = i+1;
        Flag4ub=dc(i,:)>0.95;
        Flag4lb=dc(i,:)<0.05;

        dc(i)=(dc(i).*(~(Flag4ub+Flag4lb)))+1.*Flag4ub;
        fitness=Vteg*Iteg;
        if fitness>Food_Score
            Food_Score=fitness;
            Xprey=dc(i);
        end
        D_new =dc(i);
        D = dc(i);
        return;
    end
    iteration = iteration+1;
    i = 0;
    dc = HBA_up(dc,Xprey,iteration,Maxit);
end
D = Xprey;
end

function dc = HBA_up(X1,Xprey,t,tmax)
beta = 6;
C = 2;
vec_flag= [-1 1];
N = 5;
X = (rand(5,1)*(0.95-0.05)+0.05);
alpha=C*exp(-t/tmax);
I=Intensity(N,Xprey,X);
r =rand();
F=vec_flag(floor(2*rand()+1));
di=abs((Xprey-X));
if r<.5
    r3=rand; r4=rand; r5=rand;
    Xnew=Xprey +F*beta*I*
    Xprey+F*r3*alpha*(di)...
        *abs(cos(2*pi*r4)*(1-
        cos(2*pi*r5)));
else
    r7=rand;
    Xnew=Xprey+F*r7*alpha*di;
end
dc = Xnew;
end

function I=Intensity(N,Xprey,X)
di = zeros(N,1);
S = zeros(N,1);
I = zeros(N,1);
for i=1:N-1
    di(i) =( abs((X(i,:)-Xprey+eps))).^2;
    S(i)=( abs((X(i,:)-X(i+1,:)+eps))).^2;
end
di(N)=( abs((X(N,:)-Xprey+eps))).^2;
S(N)=( abs((X(N,:)-X(1,:)+eps))).^2;
r2=rand;
I=r2*S./(4*pi*di);
end

```

### EK 3. GWO algoritması MATLAB kodları

```

function [D,iteration1,s] = GWO(Vteg,Iteg,
Change)
dim = 1; m = 5; Maxit = 350;
persistent dc fitness D_new
persistent alpha alpha_pos Beta_pos
persistent i iteration counter counter2
persistent Beta_score Delta_score Delta_pos

if(isempty(iteration))
    iteration=0; counter = 0; counter2 = 0;
    D_new = 0.5; alpha=0;
    alpha_pos=zeros(1,dim);
    Beta_pos=zeros(1,dim);
    Delta_pos=zeros(1,dim);
    Beta_score=0; Delta_score=0;
end

if(isempty(dc)) || (Change == 1)
    dc=zeros(m,1);
    dc(1)=0.1; dc(2)=0.3; dc(3)=0.5;
    dc(4)=0.7; dc(5)=0.9;
    iteration = 0; counter = 0; counter2 = 0;
    D_new = 0.5; alpha=0;
    alpha_pos=zeros(1,dim);
    Beta_pos=zeros(1,dim);
    Delta_pos=zeros(1,dim);
    Beta_score=0; Delta_score=0;
end

iteration1 = 0;

if counter<1500
    D = D_new;
    s = counter;
    counter = counter+1;
    return;
end
s = 0;

if (iteration < Maxit )
    iteration1=iteration;
    if counter2<2
        D = D_new;
        s = counter2;
        counter2 = counter2+1;
        return;
    end
    s = 0;
    counter2 = 0;
    if i<m
        i = i+1;
        Flag4ub=dc(i,:)>0.95;
        Flag4lb=dc(i,:)<0.05;

        dc(i)=(dc(i).*(~(Flag4ub+Flag4lb)))+1.*Flag4ub;
        fitness=Vteg*Iteg;
        if fitness>alpha
            alpha=fitness;
            alpha_pos=dc(i);
        end
        if fitness<alpha && fitness>Beta_score
            Beta_score=fitness;
            Beta_pos=dc(i);
        end

        if fitness<alpha &&
        fitness<Beta_score...
            && fitness>Delta_score
            Delta_score=fitness;
            Delta_pos=dc(i);
        end
        D_new =dc(i);
        D = dc(i);
        return;
    end
    iteration = iteration+1;
    i = 0;
    dc = pos_up(dc,alpha_pos,Beta_pos,...
        Delta_pos,Maxit,iteration);

    D = alpha_pos;
end

function dc =
pos_up(position,alfa_position,...
beta_position,delta_position,Maxit,iteration)

new_position = rand(5,1)*(0.95-
0.05)+0.05;
a=2-iteration*(2/Maxit);
r1 = rand(); r2 = rand();
A1=2*a*r1-a;
C1= 2*r2;
r1 = rand(); r2 = rand();
D_alfa_position = ...
    abs(C1*alfa_position-new_position);
X1=alfa_position-A1*(D_alfa_position);

A2=2*a*r1-a;
C2= 2*r2;
r1 = rand();
r2 = rand();
D_beta_position = ...
    abs(C2*beta_position-new_position);
X2=beta_position-A2*(D_beta_position);

A3=2*a*r1-a;
C3= 2*r2;
D_delta_position = ...
    abs(C3*delta_position-new_position);
X3=delta_position-A3*(D_delta_position);

dc = (X1+X2+X3)/3;
end

```

## EK 4. PSO algoritması MATLAB kodları

```

function D = PSO(Vteg,Iteg, Change)
persistent u dcurrent pbest gbest p dc v
persistent cmax counter counter2;

if isempty(counter)
    counter=0;
    dcurrent=0.1;
    gbest=0.5;
    p=zeros(4,1);
    v=zeros(4,1);
    pbest=zeros(4,1);u=0;
end

if(isempty(dc)) || (Change==1)
    dc=zeros(4,1);
    dc(1)=0.1; dc(2)=0.3; dc(3)=0.5;
    dc(4)=0.8;
    cmax = 300; u=0; counter=0; counter2
    = 0;
    pbest=zeros(4,1); v=zeros(4,1);
    p=zeros(4,1);
end

if(counter>=1 && counter<cmax)
    D=dcurrent;
    counter=counter+1;
    return;
end
counter=0;

if counter2<1500
    D = dcurrent;
    counter2 = counter2+1;
    return;
end

if(u>=1 && u<=4)
    if((Vteg*Iteg)>p(u))
        p(u)=Vteg*Iteg;
        pbest(u)=dcurrent;
    end
end
u=u+1;
if(u==6)
    u=1;
end
if(u==1)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==2)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==3)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==4)
    D=dc(u);
    dcurrent=D;
    counter=1;
    return;
elseif(u==5 )
    [m,i]=max(p);
    gbest=pbest(i);
    D=gbest;
    dcurrent=D;
    counter=1;

    v(1)=updatevelocity(v(1),pbest(1),dc(1),gbest);
    v(2)=updatevelocity(v(2),pbest(2),dc(2),gbest);
    v(3)=updatevelocity(v(3),pbest(3),dc(3),gbest);
    v(4)=updatevelocity(v(4),pbest(4),dc(4),gbest);

    dc(1)=updateduty(dc(1),v(1));
    dc(2)=updateduty(dc(2),v(2));
    dc(3)=updateduty(dc(3),v(3));
    dc(4)=updateduty(dc(4),v(4));

    cmax = 5;
    return;
end
end

function
vfinal=updatevelocity(velocity,pobest,d,gwbest)

w=0.4; c1=1.2; c2=2;

vfinal = (w*velocity)+(c1*rand(1)*(pobest-d))+...
(c2*rand(1)*(gwbest-d));
end
function dfinal=updateduty(d,velocity)
dup=d+0.5*velocity;
if(dup>0.95)
    dfinal=0.95;
elseif(dup<0.05)
    dfinal=0.05;
else
    dfinal=dup;
end
end
end

```

## EK 5. P&O algoritması MATLAB kodları

```
function Vref = RefGen(Vteg,Iteg,Voc)

Vrefmax = Voc/2;
Vrefmin = Vrefmax*0.4;
Vrefinit = Vrefmax*0.2;
deltaVref = 0.001;

persistent Vold Pold Vrefold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold = 0; Pold = 0; Vrefold = Vrefinit;
end

P = Vteg*Iteg;
dV = Vteg - Vold;
dP = P - Pold;

if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        end
    else
        if dV < 0
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        end
    end
else
    Vref = Vrefold;
end

if Vref > Vrefmax
    Vref = Vrefmax;
end

if Vref < Vrefmin
    Vref = Vrefmin;
end

Vrefold = Vref;
Vold = Vteg;
Pold = P;
```