

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE GÜÇ NOKTASI TAKİBİ
ALGORİTMALARININ PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mervenur KUTLU ÇAKIR

Danışman

Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE GÜÇ NOKTASI TAKİBİ
ALGORİTMALARININ PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Mervenur KUTLU ÇAKIR

Danışman

Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Aralık 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Adı SOYADI tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca GG / AA / YYYY tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği / oy çokluğu** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ / DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Ünvanı Adı SOYADI

İkinci Danışman : Ünvanı Adı SOYADI

Başkan : Ünvanı Adı SOYADI

Üniversite adı, Fakültesi

..... İmza

Üye : Ünvanı Adı SOYADI

Üniversite adı, Fakültesi

..... İmza

Üye : Ünvanı Adı SOYADI

Üniversite adı, Fakültesi

..... İmza

Üye : Ünvanı Adı SOYADI

Üniversite adı, Fakültesi

..... İmza

Üye : Ünvanı Adı SOYADI

Üniversite adı, Fakültesi

..... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06 / 01 / 2026

İmza

Mervenur KUTLU ÇAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMALARININ PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Mervenur KUTLU ÇAKIR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL

Bu çalışmada, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamaları nedeniyle son yıllarda büyük bir ilgi gören yenilenebilir enerji sistemleri ele alınmıştır. Ancak bu sistemlerin doğasında bulunan değişken ve öngörülemeyen üretim karakteristiği, elektrik şebekelerinde gerilim dalgalanmalarına ve kararsızlıklara neden olarak enerji sürekliliğini olumsuz etkilemekte ve şebeke istikrarını tehdit etmektedir. Bu sorunun giderilmesi amacıyla, yenilenebilir enerji sistemlerine enerji depolama birimlerinin entegrasyonu, üretim-tüketim dengesizliğinin azaltılması ve sistem kararlılığının artırılması açısından önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Bu kapsamda, enerji depolama ünitesine sahip batarya depolamalı fotovoltaik (FV) enerji sistemi tasarlanmış ve sistemin maksimum verimlilikle çalışmasını sağlamak amacıyla farklı Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) algoritmalarının performansları incelenmiştir. Çalışmada hem deterministik hem de stokastik optimizasyon temelli yöntemler değerlendirilmiştir. Sistemin dinamik davranışı, tepki süresi, kararlılığı ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Böylece, FV sistemlerde farklı MGNI stratejilerinin sistem performansına olan katkısı ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur.

Tasarlanan sistemde, FV paneller bir DA/DA dönüştürücü aracılığıyla 96 V'luk bir DA

baraya bağlanmıştır. Baradaki gerilim kararlılığını artırmak ve üretilen fazla enerjiyi depolamak amacıyla, lityum tabanlı batarya paketi çift yönlü bir DA/DA dönüştürücü üzerinden sisteme entegre edilmiştir. Bu yapı sayesinde hem enerji sürekliliği hem de gerilim kararlılığı sağlanarak sistemin genel verimliliği artırılmıştır.

Maksimum Güç Noktası (MGN) takibi için dört farklı algoritma kullanılmıştır: Değişir ve Gözle (D&G), Artımlı İletkenlik (Aİ), Bulanık Mantık Tabanlı Değişir ve Gözle (BM-D&G) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO). Algoritmalar, yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşma oranı gibi performans kriterleri bakımından karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, BM-D&G algoritmasının 14,28 ms yükselme süresi, 51,6 ms yerleşme süresi ve %69,96'lık batarya doluluk oranı ile en yüksek performansı sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, bulanık mantık tabanlı yaklaşımın hızlı tepki süresi ve yüksek kararlılık sağlama açısından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim analizleri, önerilen sistemin değişken çevresel koşullar altında kararlı bir performans sergilediğini doğrulamaktadır. Ayrıca, sistemin gerçek çalışma koşullarına uyumunu değerlendirmek amacıyla bir günlük gerçek güneş ışınım verileri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, enerji depolamalı FV sistemlerinde yapay zekâ tabanlı MGNİ algoritmalarının geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk, hızlı tepki ve üstün kararlılık sunduğunu göstermektedir. Bu yaklaşımların gelecekteki enerji yönetim sistemlerinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

2025, ix + 57 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Güneş Enerjisi, Maksimum Güç Noktası Takibi, Bulanık Mantık Kontrolör, Artımlı İletkenlik, Parçacık Sürü Optimizasyonu.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PERFORMANCE COMPARISON OF POWER POINT TRACKING ALGORITHMS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Mervenur KUTLU ÇAKIR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Yüksel OĞUZ

Co-Supervisor: Asst. Prof. Ahmet KAYSAL

In this study, renewable energy systems, which have attracted significant attention in recent years due to their environmentally friendly nature and capability to provide sustainable energy production, are examined. However, the inherently variable and unpredictable generation characteristics of these systems can lead to voltage fluctuations and instabilities in electrical grids, thereby adversely affecting energy continuity and posing a threat to grid stability. To address this issue, the integration of energy storage units into renewable energy systems is considered an effective solution for mitigating production–consumption imbalances and enhancing overall system stability.

Within this context, a photovoltaic (PV) energy system integrated with an energy storage unit has been designed, and the performances of various Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms have been investigated to ensure the system operates with maximum efficiency. Both deterministic and stochastic optimisation-based methods were evaluated, and their effects on the system's dynamic behaviour, response time, stability, and energy efficiency were analysed. Consequently, the contributions of different MPPT strategies to the overall performance of PV systems were comprehensively demonstrated.

In the proposed system, photovoltaic panels are connected to a 96 V DC bus through a DC/DC converter. To enhance voltage stability and store excess generated energy, a

lithium-based battery pack is integrated into the system via a bidirectional DC/DC converter. This configuration ensures both energy continuity and voltage stability, thereby improving the overall system efficiency.

Four different algorithms were employed for maximum power point tracking: Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (INC), Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe (FL-P&O), and Particle Swarm Optimisation (PSO). These algorithms were compared based on performance indicators such as rise time, settling time, and overshoot ratio. Simulation results revealed that the FL-P&O algorithm exhibited the best performance, achieving a rise time of 14.28 ms, a settling time of 51.6 ms, and a battery state-of-charge of 69.96%. These findings demonstrate that the fuzzy logic-based approach provides superior response speed and higher system stability.

Simulation analyses conducted in the MATLAB/Simulink environment confirmed that the proposed system maintains stable performance under varying environmental conditions. Furthermore, real solar irradiance data collected over a 24-hour period were utilised to evaluate the system's adaptability to real operating conditions. The results indicate that artificial intelligence-based MPPT algorithms offer greater accuracy, faster response, and enhanced stability compared to conventional methods in PV systems with energy storage, highlighting their potential significance in the development of future intelligent energy management systems.

2025, ix + 57 pages

Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, Maximum Power Point Tracking, Fuzzy Logic Controller, Incremental Conductance, Particle Swarm Optimisation.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yüksel OĞUZ'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL'a ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Ahmet ÇAKIR'a ve aileme teşekkür ederim.

Mervenur KUTLU ÇAKIR
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1. Tezin Kapsamı	3
2.2. Literatür Taraması.....	5
3. MATERYAL ve METOT	12
3.1. Fotovoltaik Sistem	12
3.2. Enerji Depolama Sistemleri	20
3.3. Fotovoltaik Sistem Uygulamalarında Verimi Etkileyen Faktörler	22
3.4. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmaları	24
3.4.1. Değiştir Gözle Algoritması	27
3.4.2. Bulanık Mantık Tabanlı Değiştir Gözle Algoritması.....	29
3.4.3. Artırımlı İletkenlik Algoritması	33
3.4.4. Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi	36
4. BULGULAR	40
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	49
6. KAYNAKLAR.....	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
AEF	Araç Entegre Fotovoltaik
AI	Artırımlı İletkenlik
BM	Bulanık Mantık
BM-D&G	Bulanık Mantık Tabanlı-Değiştir ve Gözle
BM-YAK	Bulanık Mantık Tabanlı-Yapay Arı Kolonisi
D&G	Değiştir ve Gözle
DC	Doğru Akım
FV	Fotovoltaik
ID	İşlemci Döngüsü
MGN	Maksimum Güç Noktası
MGNİ	Maksimum Güç Noktası İzleme
MYH	Mikrobiyal Yakıt Hücresi
MÖK	Model Öngörülü Kontrol
NSE	Net Sıfır Emisyon
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SG	Sabit Gerilim
SOC	Şarj Durumu
UPSO	Uyarlamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YZ	Yapay Zekâ

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tasarımı Gerçekleştirilen Sistemin Genel Blok Diyagramı.....	4
Şekil 3.1 Charles Fritts, 1884'te New York şehrinde çatıya ilk güneş panellerini kurmuştur.....	13
Şekil 3.2 2019 ve 2050 yılındaki enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları.	14
Şekil 3.3 FV Hücre, Modüller ve Dizilim	15
Şekil 3.4 PV Hücre ile Tek Diyot Eşdeğer Devresi	16
Şekil 3.5 FV Dizinin Gerilim-Akım ve Gerilim-Güç Grafikleri	18
Şekil 3.6 FV Dizinin Gerilim-Akım ve Gerilim-Güç Grafikleri	19
Şekil 3.7 FV hücrenin fiziksel yapısı.	20
Şekil 3.8 MGNİ Sistem Genel Yapısı	25
Şekil 3.9 Depolamalı FV sistem Simulink benzetim modeli	26
Şekil 3.10 D&G Algoritması iş akış şeması	27
Şekil 3.11 MATLAB/Simulink'te D&G algoritmasının modeli	29
Şekil 3.12 Bulanık çıkarım sistemi arayüzünde Mamdani yöntemi	30
Şekil 3.13 Bulanık çıkarım sistemi blok diyagramı	32
Şekil 3.14 Artırımlı İletkenlik Algoritması Akış Şeması	35
Şekil 3.15 MATLAB/Simulink'te Aİ algoritmasının modeli.....	36
Şekil 3.16 Parçacık Sürü Optimizasyon Akış Şeması	38
Şekil 3.17 MATLAB/Simulink'te PSO algoritmasının modeli	39
Şekil 4.1 Depolamalı FV sistemine ait senaryoların zamana bağlı değişimi	41
Şekil 4.2 Depolamalı FV sistemi güçlerindeki değişim	42
Şekil 4.3 FV panel çıkış geriliminin farklı algoritmalar için karşılaştırmalı grafikleri..	44
Şekil 4.4 Değişken yük koşullarında SOC seviyelerindeki değişim	47
Şekil 4.5 Gerçek güneş verileri ile Yük1 ve Yük2'nin zamana bağlı değişimi.	47
Şekil 4.6 Fotovoltaik sistem ve enerji depolama birimindeki güç değişimi.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Çalışmanın Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması	4
Çizelge 3.1 SunPower SPR-30E-WHT-D modül bilgileri	18
Çizelge 3.2 Lityum-iyon batarya teknik verileri	21
Çizelge 3.3 FV sistem verimi etkileyen faktörler.....	22
Çizelge 3.4 Değişir gözle algoritmasının karar verme adımları	28
Çizelge 3.5 Bulanık çıkarım sistemi kural tablosu	33
Çizelge 4.1 Depolamalı FV sistemde farklı MGNİ algoritmalarının DA bara başlangıç gerilimleri	43
Çizelge 4.2 MGN takibi algoritmalarının performans karşılaştırması	46

1. GİRİŞ

Son yıllarda güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyoyakıt gibi kaynaklar en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, gezegenimiz için verimli bir yenilenebilir enerji kaynağı sağlar. Bu gelen güneş enerjisi, daha sonra kullanılmak üzere güç üretmek amacıyla fotovoltaik (FV) hücreler aracılığıyla yakalanabilir. Güneş enerjisi, güneşten elde edilen enerjiye verilen isimdir ve yıl boyunca kırsal alanların büyük bir kısmı yeterli güneş ışıını aldğı için en güvenilir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir(Salau & Alitasb, 2024).

Geleneksel enerji üretim ve tüketim süreçlerinden kaynaklanan çevresel kirlilik, küresel ısınma olgusunu tetiklemiş ve bu durum, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda yeşil ve temiz enerji kaynaklarına yönelik bilimsel araştırmaların ivme kazanmasına neden olmuştur. Bu kapsamda, güneş enerjisi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji dönüşümü alanlarında öncelikli araştırma odağı haline gelmiştir (Xiao & Dong, 2026). Yenilenebilir enerji kaynakları, artan enerji talebi ve iklim değışikliği sorunları göz önüne alındığında büyük ilgi görmüş, bu kaynaklar arasında güneş enerjisi, bol bulunabilirliği sayesinde tercih edilen bir seçenek olarak öne çıkmıştır (Kumaraswamy & Naik, 2025)

Paris Anlaşması'nın iklim hedefleri doğrultusunda, sanayileşmiş ülkelerin ulusal sera gazı stratejileri, enerji sistemlerinin tam kapsamlı bir yeniden yapılandırılmasını içermektedir. Genel olarak, küresel ısınmayı yeterince sınırlayabilecek tek yolun 2050 yılına kadar Net Sıfır Emisyon (NSE) senaryosu olduğu kabul edilmektedir. NSE senaryosu, küresel enerji sektörünün 2050 yılına kadar net sıfır CO₂ emisyonuna ulaşabilmesi için bir yol haritası sunmaktadır ve hedeflerine ulaşmak için enerji sektörü dışındaki emisyon azaltımlarına bağımlı değildir. Dünya çapında elektrik sektörü için NSE senaryosu, yenilenebilir enerji kaynaklarının payında büyük bir artışı öngörmekte olup, bu durum FV ve rüzgâr kapasitesinin kitlesel olarak genişletilmesi ile mümkün hale gelmektedir(Frison vd., 2023).

Artan dünya nüfusu ile buna bağılı olarak yükselen enerji talebi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacın ve FV sistemlere yönelik ilginin önemli ölçüde artmasına

neden olmuştur. FV paneller, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. FV panellerinin çalışma verimliliğini artırmak için, MGN’de çalışmaları gerekmektedir. FV panellerinin verimliliği, değişen ışıınım ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir.

Bu tez çalışmasında bir FV panelin çıkış gücünü en yüksek noktaya ulaştırabilmek için Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNI) yöntemlerinden Değişir & Gözle (D&G), Bulanık Mantık Tabanlı Değişir Gözle (BM- D&G), Artırımlı İletkenlik (AI) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmaları kullanılarak MATLAB/Simulink programında bir benzetim çalışması yapılmıştır. Çalışmada FV panelin farklı sıcaklık ve güneş ışıınım değerlerine göre değişimleri MGNI ile analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen akım, gerilim ve güç eğrilerinin FV panel performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. FV panelin düşürücü ve yükseltici dönüştürücülerle yapılan benzetim sonuçlarının MGN etrafında olduğu görülmüştür.

Mikro şebekeler, yerleştirilmiş dağıtık enerji kaynaklarını kullanarak enerji üretimi, dağıtımı ve düzenlenmesi için en verimli yöntemlerdir. Ancak, güneş ve rüzgâr enerjisi üretiminin tutarsız olması nedeniyle mikro şebekelerde optimal ekonomik yük dağıtımı ve güç kalitesi iyileştirmesi sağlamak önemli ve zorlu bir konudur.

Bu çalışmada, çeşitli MGNI algoritmaları hibrit enerji sistemlerinde kullanılmak üzere bir araya getirilmiş ve etkinlikleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, geleneksel D&G, BM- D&G, AI, PSO olmak üzere dört farklı MGNI yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Söz konusu algoritmalar, farklı işletim koşulları altında değerlendirilerek performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, MGNI algoritmalarının hibrit sistemlerde güç üretimini en üst düzeye çıkarmada önemli bir etkinlik sağladığını ortaya koymaktadır. Bu analizler, enerji sistemlerinin tasarımı ve yönetimi süreçlerinde daha verimli ve güvenilir enerji üretimini mümkün kılacak stratejik kararların alınmasına katkı sunmaktadır.

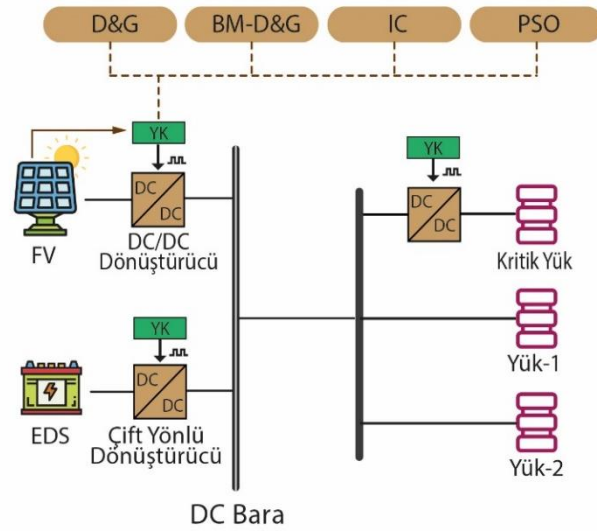
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu tez çalışmasında, FV panellerin standart test koşullarında elde edilen katalog verileri kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında bir model oluşturulmuştur. FV sistemlerde çıkış gücünün en yüksek noktaya ulaşmasını sağlamak amacıyla MGNİ tabanlı bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, farklı sıcaklık değerleri ve değişken güneş ışıınım şiddetleri altında MGNİ algoritmalarının performansı analiz edilmiş ve bu analizler sonucunda elde edilen karakteristik eğriler kullanılarak panel akımı, gerilimi ve gücü üzerindeki etkiler ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan MGNİ algoritmaları olan D&G, BM-D&G, Aİ ve PSO yöntemleri birbiriyle karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı algoritmaların dinamik ve kararlı durum koşullarında sağladıkları verim, tepki süresi ve uyarlanabilirlik açısından performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2.1. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasının kapsamı, hibrit FV sistemlerde MGNİ algoritmalarının performanslarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesine dayanmaktadır. Bu doğrultuda kullanılan yöntemler, farklı çevresel koşullar ve işletim senaryoları altında değerlendirilmiştir. Çalışmada algoritmaların dinamik yanıt süreleri, kararlı durum hassasiyetleri, uyarlanabilirlik özellikleri ve enerji verimliliğine katkıları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, elde edilen simülasyon verileri üzerinden hibrit enerji sistemlerinin tasarımında kullanılabilecek en uygun MGNİ stratejisinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu kapsamda tez, yalnızca algoritmaların teorik yönlerini değil gerçek uygulamalara yönelik potansiyel katkılarını da ele alarak yenilenebilir enerji sistemlerinin güvenilirliği ve sürdürülebilirliği açısından önemli sonuçlar ortaya koymayı amaçlamaktadır.



Şekil 2.1 Tasarımı Gerçekleştirilen Sistemin Genel Blok Diyagramı

Benzetimi gerçekleştirilen yenilenebilir enerji sistemine ait blok diyagram Şekil 2.1’de sunulmuş, literatürde yer alan benzer çalışmalarla gerçekleştirilen karşılaştırmalı analiz sonuçları ise Çizelge 2.1’de sunulmuştur. Bu tablo, tasarımı gerçekleştirilen sistemin performansını mevcut yaklaşımlar ile nicel ve nitel açıdan karşılaştırarak, literatürdeki konumunu ve üstünlüklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Çizelge 2.1 Çalışmanın Literatürdeki Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

	Önerilen	(Rai & Rahi, 2022)	(Ullah vd., 2023)	(Abouobaida vd., 2023)	(Gawande vd., 2021)
D&G	✓	X	✓	✓	X
BM-D&G	✓	✓	✓	✓	X
IC	✓	X	X	✓	✓
PSO	✓	X	X	X	✓

Bu araştırma ile hibrit FV sistemlerde kullanılmak üzere çeşitli algoritmaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan yöntemlerin, MGNİ performanslarını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında D&G, BM- D&G, Aİ ve PSO gibi yaygın olarak kullanılan farklı MGNİ yöntemleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu algoritmaların performansları; değişken ışıınım şiddeti, sıcaklık farklılıkları ve yük

koşulları altında kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen bulgular, hibrit sistemlerde güç üretim verimliliğini artırmak amacıyla hangi MGNI stratejisinin daha etkili olabileceğine ilişkin önemli çıkarımlar sunmaktadır. Ayrıca, algoritmaların tepki süreleri, kararlı durum hassasiyetleri ve dinamik uyarlanabilirlikleri karşılaştırılarak, gerçek zamanlı uygulamalara yönelik uygunlukları ortaya konmuştur. Böylece çalışma, yenilenebilir enerji sistemlerinde hibrit yapıların daha güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde tasarlanmasına katkı sağlayacak bilimsel bir çerçeve sunmaktadır.

2.2. Literatür Taraması

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi hem küçük ölçekli uygulamalarda hem de büyük ölçekli endüstriyel tesislerde geniş bir kullanım alanına sahip olup son yıllarda önemini giderek artıran bir üretim teknolojisi haline gelmiştir. Bununla birlikte, FV sistemlerin enerji dönüşüm verimliliğinin görece düşük olması ve güneş enerjisinden elektrik üretiminin termal ve nükleer enerji üretimine kıyasla daha yüksek maliyetli olması, bu alandaki temel kısıtlar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla, FV sistemlerden elde edilebilecek maksimum gücün belirlenmesi ve bu doğrultuda sistem verimliliğinin artırılmasına yönelik yöntemlerin geliştirilmesi, günümüzde hem akademik hem de endüstriyel açıdan kritik bir araştırma konusu hâline gelmiştir(Cheng vd., 2015)

Güneş enerjisi, güneş ışıınımı ve sıcaklık gibi çevresel parametreler dikkate alınarak FV paneller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş hücreleri ile yük arasına, güç akışını düzenlemek amacıyla genellikle güç dönüştürücüleri yerleştirilmektedir (Shiau vd., 2015). Doğrusal olmayan bir I-V karakteristiğine sahip FV dizilerde, değişken çevresel koşullar altında sürekli olarak maksimum gücün elde edilebilmesi için MGNI kontrol stratejileri kullanılmaktadır(Rai & Rahi, 2022)

Son yıllarda FV sistemlerin verimliliğini artırmaya yönelik araştırmalarda, YZ tabanlı MGNI algoritmaları önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu algoritmalar, her

çevrimde gerilim-akım karakteristiklerini analiz ederek MGN'yi dinamik biçimde belirlemekte ve uyarlanabilir gerilim aralıkları sayesinde sistem performansını optimize etmektedir. Geleneksel MGNİ yöntemleri, değişken ışıınım ve sıcaklık koşullarında MGN'yi doğru şekilde izlemekte yetersiz kaldığından, YZ tabanlı yaklaşımlar daha etkili ve esnek bir alternatif sunmaktadır. Literatürdeki karşılaştırmalı çalışmaları, karar ağacı tabanlı MGNİ algoritmasının diğer YZ tabanlı yöntemlere kıyasla daha istikrarlı ve tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermektedir (Sharma vd., 2024)

(Kumaraswamy & Naik, 2025), kısmi gölgelenme koşullarında FV sistemlerin MGNİ performansını ve genel verimliliğini artırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda, FV dizilerinde küresel MGNİ doğru ve hızlı bir şekilde izlenmesi sağlanmış, sistemin güç çıkışı ve kararlılığı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Deneysel bulgular, yöntemin %68'e kadar güç artışı, %98,5 verimlilik ve 0,35 s'nin altında yakınsama süresi elde ettiğini ortaya koymuştur. Böylece, önerilen yaklaşım FV sistemleri için yüksek verimlilik, dayanıklılık ve gerçek zamanlı MGNİ sağlamaktadır.

Literatürde, FV sistemlerde MGNİ performansını artırmaya yönelik çalışmalar arasında, değiştirilmiş Aİ tabanlı yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada, değiştirilmiş Aİ yönteminin performansı D&G algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. Değiştirilmiş Aİ yönteminin uyarlanabilir adım boyutu sayesinde daha hızlı yakınsama, daha az salınım ve yüksek izleme verimliliği sunduğunu ortaya koymaktadır. Benzetim sonuçları, yöntemin enerji verimliliğini maksimize ettiğini, güç kalitesini artırdığını ve şebeke bağlantılı FV sistemlerinin güvenilirliğini geliştirdiğini göstermektedir (Dinesh & Eti, 2024)

(Endiz, 2024), MGNİ özellikli düşük güçlü bir güneş şarj kontrolörü, hızlı prototipleme yöntemi kullanarak bir sistem tasarlamış ve uygulamıştır. Önerilen modifiye edilmiş Aİ algoritması, FV modülün MGN'de çalışmasını sağlayarak bataryaya maksimum enerji aktarımını temin etmektedir. MATLAB/Simulink benzetimleri ve laboratuvar prototip testleri, önerilen yöntemin geleneksel Aİ yaklaşımına kıyasla daha yüksek izleme verimi (%96,59) ve daha düşük kararlı durum salınımı sağladığını ortaya koymuştur. Bu sistem, farklı güneş ışıınımı koşullarında batarya şarjını etkin biçimde gerçekleştirerek, düşük

güçlü elektrikli cihazlar için güvenilir bir şarj altyapısı çözümü sunmaktadır.

FV sistemlerin tasarım ve işletiminde MGNİ, sistem verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir kontrol algoritması olarak öne çıkmaktadır. MGNİ algoritmaları, dönüştürücünün görev oranını FV hücrelerinin anlık çıkış koşullarına uyarlayarak, güç çıkışının sürekli olarak en yüksek noktada tutulmasını hedeflemektedir. Literatürde yaygın olarak kullanılan D&G yöntemi, uygulama kolaylığı ve düşük hesaplama gereksinimleri nedeniyle öne çıkmakla birlikte, MGN'ye yakın bölgelerde meydana gelen salınımlar sebebiyle hata oranının artması önemli bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir.

Günümüzde en sık tercih edilen MGNİ algoritmaları arasında sabit voltaj yöntemi, D&G, AI, güç geri besleme yöntemi, optimal gradyan yöntemi ve BM tabanlı kontrol yaklaşımları yer almaktadır. Bu yöntemlerin her biri, farklı çevresel koşullarda ve yük profillerinde çeşitli avantajlar ve sınırlılıklar sunmakta olup, araştırmacılar tarafından özellikle geçici rejim performansı, dinamik cevap süresi, sistem kararlılığı ve uygulama maliyeti açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir(Yan vd., 2012).

BM tabanlı MGNİ teknikleri, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında çevresel koşullardaki ani değişimlere daha hızlı ve etkin bir biçimde uyum sağlayabilme kapasitesi ile dikkat çekmektedir. Bu yöntemler, dış donanım gerektirmemesi ve sistem parametreleri hakkında ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duymaması sayesinde mevcut FV sistemlere görece daha kolay entegre edilebilmektedir. Ayrıca, BM kontrol algoritmaları yüksek izleme hızına sahip olmaları nedeniyle geçici rejim koşullarında hızlı bir tepki verebilmekte, aynı zamanda kararlı durum hassasiyetini artırarak sistem verimliliğini yükseltmektedir.

BM tabanlı MGNİ yöntemlerinin özellikle ışıınım ve sıcaklık değerlerinin hızlı değişkenlik gösterdiği ortamlarda daha istikrarlı performans sergilediğini ve geleneksel algoritmalara kıyasla enerji kayıplarını azalttığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, algoritmanın tasarımında kullanılan üyelik fonksiyonları ve kural tabanının seçimi, elde edilen performans üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Bisht & Sikander, 2022).

Mikro şebekelerde güç kalitesi ve ekonomik yük dağıtımının optimizasyonu, özellikle YEK'lerin değişken doğası nedeniyle literatürde önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Zulu et al., 2025). Bu kapsamda geliştirilen BM ve yapay arı kolonisi (BM-YAK) tabanlı MGNİ kontrol yaklaşımı, FV ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla YZ destekli optimizasyon stratejilerini bir araya getirmektedir. Önerilen model, dağıtılmış üretim birimlerinin dinamik özelliklerini dikkate alarak BM-YAK algoritmasının küresel yakınsama yeteneğini geliştirmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, BM-YAK tabanlı kontrolörün geleneksel BM ve YAK yöntemlerine kıyasla daha yüksek güç verimliliği ve sistem kararlılığı sağladığı belirlenmiştir.

(Chaibi vd., 2024), FV sistemlerin verimliliğini ve kararlılığını artırmak amacıyla, Takagi–Sugeno (T–S) tipi BM kontrolör tasarımı gerçekleştirmiştir. Doğrusal matris eşitsizlikleri temelli bu yaklaşım, değişken iklim koşullarında dahi MGNİ'yi yüksek doğrulukla sağlamaktadır. MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetimler, yöntemin sistem dinamiklerini geniş bir çalışma aralığında doğru biçimde modellediğini göstermiştir. Sonuçlar, geliştirilen kontrolörün izleme süresini azalttığını ve MGN çevresindeki salınımları ortadan kaldırarak sistem performansını artırdığını ortaya koymuştur.

FV sistemlerde MGNİ performansını artırmak amacıyla çeşitli kontrol stratejileri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Bu bağlamda, BM ve Model Öngörülü Kontrol (MÖK) yöntemleri incelenmiştir (Ławryńczuk vd., 2025). Literatürde, BM'nin değişimlere karşı hızlı tepki ve yüksek güvenilirlik sağladığı, MÖK'ün ise tahmine dayalı yapısı sayesinde uzun vadeli performans optimizasyonu için uygun olduğu belirtilmektedir.

Son dönemlerde MGNİ algoritmalarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar, literatürde giderek artan bir önem kazanmış ve araştırmacıların başlıca odak noktalarından biri hâline gelmiştir. (Boughdiri vd., 2025), FV sistemlerde MGNİ performansını iyileştirmeye yönelik olarak PSO temelli bir kontrol yaklaşımı önermektedir. PSO

algoritması, değişken ışıınım ve kısmi gölgelenme koşullarında MGN'ye hızlı ve kararlı bir şekilde yakınsama yeteneği sayesinde sistemin enerji dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçları, önerilen yöntemin daha kısa dinamik tepki süresi, düşük salınım genliği ve %99,85 oranında güç izleme verimliliği ile üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

(Ullah vd., 2023), D&G ve BM algoritmalarını karşılaştırmış ve BM'nin sistem performansında %97'lik bir verimlilik sağladığını gözlemlemişlerdir. (Alhusseini vd., 2025), FV sisteminin etkinliğini artırmak amacıyla iyileştirilmiş tarım arazisi verimliliği için BM algoritmasını kullanarak yeni bir MGNİ algoritması önerilmiştir.

Kabalıcı ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada, YEK'e dayalı bir hibrit mikro şebeke sistemi incelenmiştir. Sistem, 33 kW'lık FV panelleri, 100 kW'lık yakıt hücresi ve 50 kW'lık bir rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Güç yönetimi için AI-MGNİ algoritması kullanılmış, rüzgâr ve yakıt hücresi sistemleri PI kontrolörleriyle yönetilmiştir. Sistem test edilerek doğrulanmıştır (Kabalci vd., 2018). Fan ve arkadaşları ise Mikrobiyal Yakıt Hücresi (MYH) olarak bilinen, atıksu arıtma ve biyoenerji üretme yeteneğine sahip bir yenilenebilir enerji sisteminde BM algoritması ile MGNT gerçekleştirmişlerdir. (Fan vd., 2022)

Ammar ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada verimliliği üst noktada tutmak için AI yöntemini kullanarak MGNİ sağlamışlardır (Ammar vd., 2019). Aynı şekilde MGNİ'de verimliliği üst noktada tutmayı hedefleyen Kayisli, Tip-2 BM yöntemiyle çalışmasını gerçekleştirmiştir (Kayisli, 2023). Özellikle batarya şarj sürelerinde, PI kontrol stratejilerinin kullanımı ile birlikte, BM ve MÖK tabanlı MGNİ yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır. (Lawry'nczuk vd., 2025)

(Siddique vd., 2025), kısmi gölgelenme koşullarında geleneksel MGNİ yöntemlerinin küresel MGNİ'yi tespit etmede yetersiz kaldığı ve çoğunlukla yerel MGNİ'de takılıp kaldığı sorununu ele alınmıştır. Bu amaçla, D&G-MÖK algoritması geliştirilmiş ve MATLAB/Simulink ortamında modellenerek gerçek zamanlı donanım uygulamalarıyla doğrulanmıştır. Çeşitli güneşlenme koşulları altında yapılan testler, D&G-MÖK

algoritmasının hızlı yakınsama süresi, %99,46 gibi yüksek izleme verimliliği ile MGNİ'yi kararlı bir şekilde izlediğini göstermiştir. Bulgular, yöntemin özellikle karmaşık kısmı gölgelenme koşullarında literatürde öne çıkan etkili bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur.

(Celi vd., 2026), Araç Entegre Fotovoltaik (AEF) sistemlerinde dinamik ışınlam ve yönelim değişimlerine uyum sağlayan MGNİ algoritmalarının performansını incelemiştir. Her 0,5 s'de I-V eğrileri ile ışınlam ve sıcaklık verilerini kaydedebilen taşınabilir bir yüksek hızlı I-V izleyici geliştirilmiş ve yaklaşık 30.000 veri seti elde edilmiştir. D&G ve patentli AEF'ye özgü yöntem karşılaştırılmıştır. Bulgular, MGNİ geriliminin sabit kaldığını ancak akımın dinamik olarak değiştiğini göstermiştir. Sonuç olarak, AEF'ye özgü algoritma dinamik koşullarda %2-8 daha yüksek enerji verimliliği sağlamıştır.

(Barakat vd., 2025), konut tipi FV sistemlerde maksimum güç elde etmek için kuazi-rezonanslı yükseltici dönüştürücüler ve PSO tabanlı MGNİ yöntemi önermişlerdir. Tasarlanan sistem, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve İşlemci Döngüsü (İD) yöntemiyle gerçek zamanlı olarak doğrulanmıştır. Simülasyon ve İD sonuçları, sistemin yüksek doğruluk ve enerji kalitesiyle maksimum güç çekebildiğini göstermiştir.

(Naima vd., 2025), FV inverterlerde güç kalitesi, kararlılık ve dinamik performansı artırmak amacıyla değiştirilmiş sonlu kontrol kümesi ve MÖK ile uyarlamalı D&G algoritmasının birleştirildiği yeni bir MGNİ stratejisi önermişlerdir. MATLAB/Simulink ortamında doğrulanan sistem, farklı çalışma koşullarında test edilmiş ve geleneksel D&G algoritmasına kıyasla önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, toplam harmonik bozulmanın %6'dan %1,22'ye düştüğünü, izleme süresinin %35 hızlandığını ve aşma değerinin %28 azaldığını göstermektedir. Böylece önerilen yaklaşımın, güç elektroniği tabanlı yenilenebilir enerji sistemlerinde güçlü bir alternatif oluşturduğu vurgulanmaktadır. 1000 W/m² ışınlam, 25 °C sıcaklık altında yapılan çalışmalarda, BM tabanlı MGNİ'nin ortalama %98,3 verimlilik ve 12 ms tepki süresi sağladığı raporlanmıştır. Aynı koşullar altında MÖK tabanlı MGNİ ise %96,6 verimlilik ve 25 ms tepki süresi ile performans göstermiştir. Dinamik ışınlam değişimleri sırasında ise BM'nin

maksimum takip hatası %2,4 iken, MÖK’de bu hata %4,6 olarak gözlenmiştir.

(Iskandar vd., 2020), AI algoritmasının buck-boost ve zeta dönüştürücü devre modellemesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı bir analiz yöntemi ile incelemiştir. Benzetimler, 100 ile 1000 W/m² arasında değişen çeşitli ışıınım koşulları ve 25°C sıcaklıkta standart test koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan her iki DC-DC dönüştürücü, şebeke bağlantılı 1 kWp PV sistemi için tasarlanmıştır. Modelleme sonuçlarında, zeta dönüştürücü ve buck-boost dönüştürücü verimliliklerinin, AI algoritması ile maksimum verimde tutulduğu gözlemlenmiştir.

(Abouobaida vd., 2023), ışıınım ve sıcaklık gibi hızlı değişen çevresel koşullarda MGN takibinin güvenilirliğini artırmak için AI algoritmasının optimizasyonu önermektedir. Bu önerilen yöntem, değişken adım boyutuyla adaptif bir yaklaşım sunarak FV sistemlerinin performansını iyileştirmeyi hedeflemiştir. Dinamik sistem evrimine bağlı olarak ayarlanan adım boyutu, MGN etrafındaki dalgalanmaları sınırlamakta ve hızlı ve doğru MGN tespiti arasında denge sağlamıştır.

(Alhusseini vd., 2025)FV sistemlerde değişken ışıınım koşullarında daha verimli güç takibi sağlamak için Uyarlamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu (UPSO) ile MÖK tabanlı hibrit bir MGNİ algoritması geliştirmiştir. Önerilen UPSO-MÖK yöntemi, minimum sensör kullanarak daha hızlı yakınsama, daha az salınım ve küresel MGN’ye kararlı şekilde ulaşma yeteneği göstermiştir. MATLAB/Simulink benzetimleri, yöntemin kısmi gölgeleme ve hızlı ışıınım değişimlerinde geleneksel algoritmalarından daha üstün performans sergilediğini ortaya koymuştur.

3. MATERYAL ve METOT

3.1. Fotovoltaik Sistem

Güneş enerjisinden yararlanmaya başlamamız çok eski zamanlara dayanmaktadır. Sokrates M.Ö. 400 yıllarında güneş ışığının evin güney cephesine denk gelmesi gerektiğini söylemiştir. 1600'lü yıllarda Galileo tarafından merceğin geliştirilmesi, güneş ışığının özelliklerine yönelik bilimsel çalışmaların artmasına öncülük etmiştir. Bu gelişmeleri takiben, 19. yüzyılda güneş enerjisinden yararlanılarak buhar makineleri için buhar üretimi gerçekleştirilmiş ve böylece güneş enerjisinin endüstriyel süreçlerde kullanılabilirliği ilk kez ortaya konmuştur.

19 yaşında 1839'da, Edmund Becquerel adında genç bir Fransız bilim insanı, laboratuvarında bir elektrolit içine yerleştirilmiş iki metal elektrottan oluşan bir elektrolitik hücre üzerinde araştırma yaparken FV etkiyi keşfetmiştir. Hücre ışığa maruz bırakıldıktan sonra enerjisi artmıştır. Becquerel, elektrolit içerisine yerleştirilen elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit yüzeyine düşen güneş ışığına bağlı olarak değiştiğini gözlemlemiş ve bu bulgular doğrultusunda fotovoltaik etkiyi ilk kez ortaya koymuştur.

Willoughby Smith, "Elektrik Akımı Geçiş Sırasında Işık Selenyum Üzerindeki Etkisini" ilk olarak Nature dergisinin Şubat 1873 sayısında yayınlanan bir makalede tanımlamıştır. Bu olay, Charles Fritts tarafından ilk katı hal FV hücresinin üretilmesinden altı yıl önceydi. Fritts, bağlantı noktalarını oluşturmak için yarı iletken selenyumu ince bir altın tabakasıyla kapladı. Ortaya çıkan bu yapı yalnızca yaklaşık %1 verimliydi. Hareketli parçası olmayan katı bir malzemenin güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılabileceğini gösteren ilk yapıydı.



Şekil 3.1 Charles Fritts, 1884'te New York şehrinde çatıya ilk güneş panellerini kurmuştur.

Albert Einstein, 1905 yılında fotoelektrik etki ile ışık kaynaklı taşıyıcı uyarım mekanizmasını açıklayan bir makale yayımlamış ve bu çalışmasıyla 1921 yılında Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüştür. Einstein'ın makalesine bir yanıt niteliğinde William J. Bailey 1908 yılında bakır kolektörü icat etmiştir. Bu kolektör, yalnızca bakır yalıtım kullanılarak mevcut kolektör yönteminin verimliliğini artırmış, elde edilen bu yenilikler günümüz FV ekipmanlarında hâlen uygulanmaya devam etmektedir.

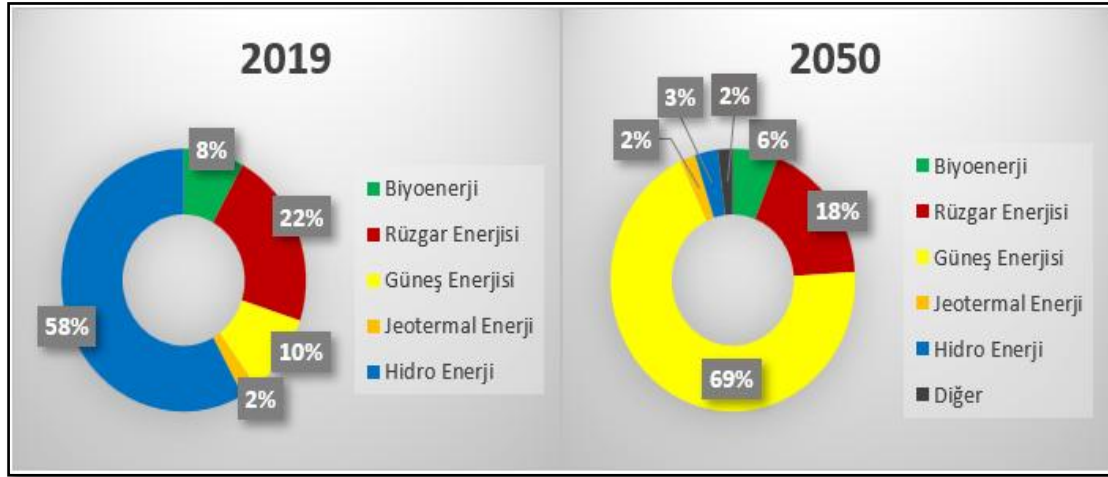
Modern bağlantı yapısına sahip yarı iletken güneş hücresinin patenti ise 1946 yılında Russell Ohl tarafından alınmıştır. Bilim insanları tarafından selenyum gibi katı malzemelerde de benzer etkiler gözlemlenmiştir. Ancak esas kayda değer gelişmeler, 1940'ların sonunda ilk silikon güneş hücrelerinin geliştirilmesi ve yaklaşık %6 verime sahip endüstriyel cihazların tasarımıyla başlamıştır.

FV uygulamaların yeterli verim seviyesine ulaşabilmesi uzun bir süre gerektirmiştir. İlk silikon güneş hücresi tasarımları, FV dizilerin pratik ek özelliklere sahip güç dönüştürme birimleri olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta geliştirilen silikon hücreler, bağımsız bir şekilde ve modüler bir tasarım anlayışıyla üretilmiştir. 1950'li yıllarda güneş hücreleri hızlı bir gelişim sürecine girmiş ve uzay programları ve uydularda kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemdeki uygulamalarda, verim oranı %6 ile %10

arasında değişen kristal silikon güneş hücreleri tercih edilmiştir.

2000 yılından itibaren güneş enerjisi alanındaki araştırma ve yatırımlar kayda değer biçimde artış göstermiştir. 2009 yılında Spectrolab, %41,6 verimlilik oranına sahip üç eklemlili FV hücreler üreterek güneş paneli imalatında dünya rekoru kırmıştır. Elektrik üretiminde fosil yakıtlardan uzaklaşma hedefi, iklim krizi ile mücadele ve enerji alanında dışa bağımlılığı azaltma çabaları, güneş enerjisi sistemlerine yönelik yatırımların ivmelenmesinde belirleyici olmuştur. Bütün bu gelişmelerden yola çıkılarak güneş enerjisi alanının giderek daha da genişleyeceği düşünülmektedir.

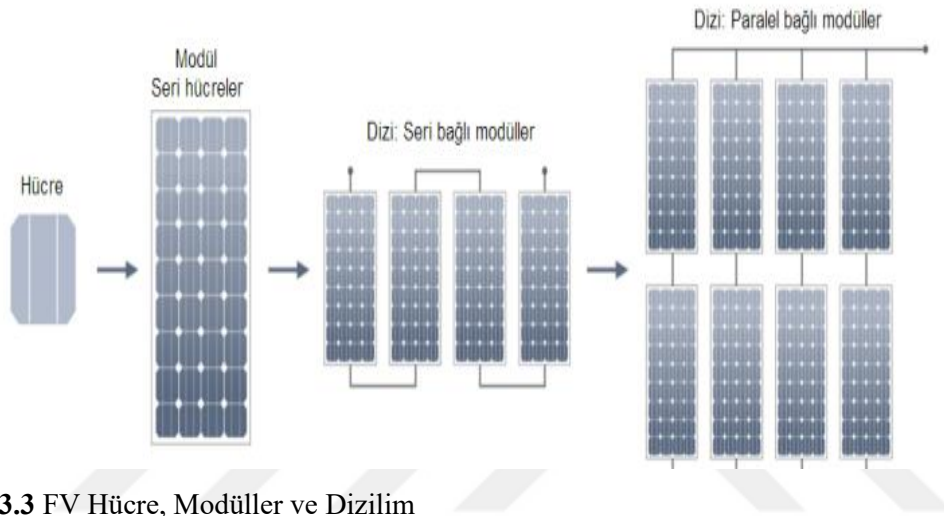
Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) verileri incelendiğinde, 2025 yılı Ekim ayı itibarıyla Türkiye'nin kurulu toplam güneş enerjisi kapasitesinin 121.084 MW seviyesine ulaştığı görülmektedir. Aynı dönemde, ülke genelinde günlük ortalama güneşlenme süresi 7,58 saat olarak kaydedilmiştir. Mevcut teknik ve ekonomik koşullar ile özellikle çatı üstü ve açık alan güneş enerjisi projelerinin yaygınlaşma eğilimi göz önüne alındığında, Türkiye'nin güneş enerjisi kurulu kapasitesinin 2030 yılına kadar yaklaşık 30 GW düzeyine erişeceği öngörülmektedir.



Şekil 3.2 2019 ve 2050 yılındaki enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları.

Şekil 3.2’de, küresel ölçekte FV enerji potansiyelinin dağılımını ve gelecek yıllara yönelik öngörülen artış eğilimini ortaya koymaktadır. 2019 yılı itibarıyla toplam

yenilenebilir enerji üretimi içerisindeki güneş FV sistemlerinin payı yaklaşık %10 seviyesindeyken, yapılan projeksiyonlara göre bu oranın 2050 yılına kadar %69'a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu öngörü, FV sistemlerin yenilenebilir enerji kaynakları arasında sahip olduğu yüksek teknik ve ekonomik potansiyeli açıkça göstermekte ve gelecekte enerji arzında güneş tabanlı teknolojilerin belirleyici bir rol üstleneceğine işaret etmektedir.(Sawin vd., 2018)



Şekil 3.3 FV Hücre, Modüller ve Dizilim

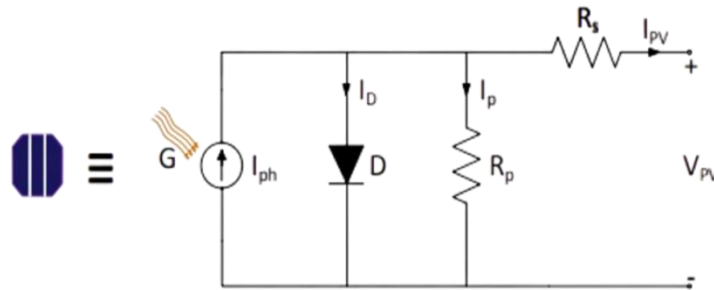
Şekil 3.3'te gösterilen FV hücreler, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen, hareketli mekanik bileşen içermeyen, bakım gereksinimi düşük ve uzun çalışma ömrüne sahip sistemlerdir. Yarı iletken malzemelerden oluşan bu hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme işleviyle FV teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan FV hücre, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik dönüştürür. Güneş enerjisi, FV hücrenin yapısına göre %5 ile %20 arasında bir verimle elektriğe dönüştürülebilir.

FV hücrelerin yüzey geometrileri çoğunlukla kare, dikdörtgen veya dairesel formdadır. Hücre alanları genellikle 60–160 cm² aralığında değişmekte olup ortalama olarak yaklaşık 100 cm² düzeyindedir. Kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm arasında olup oldukça ince bir yapıya sahiptir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda FV hücre, seri veya paralel

olarak birbirine bağlanarak belirli bir yüzey üzerine monte edilir ve bu bütünleşik yapı FV modül olarak adlandırılır. Güç ihtiyacına bağlı olarak FV modüller farklı konfigürasyonlarda bir araya getirilerek seri veya paralel bağlanır. Böylece birkaç watt seviyesinden mega watt ölçeğine kadar çıkabilen FV diziler oluşturulur.

FV hücreler, genellikle yaklaşık 0,5 V mertebesinde düşük gerilim üretimi gerçekleştiren yarı iletken elemanlardır. Daha yüksek güç ve gerilim elde edebilmek amacıyla, birden fazla FV hücre seri ve/veya paralel bağlantı konfigürasyonlarıyla bir araya getirilerek FV modüller oluşturulmaktadır. Çerçeveselendirilmiş tek bir FV modül, genellikle FV panel olarak adlandırılmaktadır. Çoğu FV panel tek bir modül içerirken, daha yüksek güç gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanan bazı paneller birden fazla modülden oluşabilmektedir. Güç talebine bağlı olarak, FV panellerin seri ve/veya paralel biçimde bağlanmasıyla FV dizi yapıları oluşturulmaktadır(Öztürk, 2008)

FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi, Şekil 3.4'te gösterilmektedir. “Tek diyot eşdeğer devre modeli” olarak da adlandırılan bu modelde; I_{ph} , ışıınım ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak üretilen fotoakımı; I_D , diyot akımını; R_p , diyot ve fotoakım ile paralel konumda yer alan, kaçak akımların akmasına imkân tanıyan paralel (şönt) direnci; R_s ise FV hücreden üretilen akımı çıkışa ileten seri direnci ifade etmektedir. Yüksek değere sahip R_p direnci, bazı eşdeğer devre modellerinde sonsuz kabul edilerek devre daha basit bir forma indirgenebilmektedir. R_s değeri ise genellikle mili-ohm (mΩ) mertebesinde (Chan & Phang, 1987)



Şekil 3.4 PV Hücre ile Tek Diyot Eşdeğer Devresi

Düğüm gerilimleri yöntemi kullanılarak elde edilen I_{PV} akımı ifadesi, Denklem (1)'de verilmiştir. Buna göre FV hücre çıkış akımı; ışıınım ve sıcaklık koşullarına bağlı olarak

üretile I_{ph} fotoakımı, şönt direnç üzerinden akan I_p akımı ve I_D diyot akımının bileşenlerinden oluşmaktadır.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_P \quad (1)$$

Denklem (2)'deki ifade incelendiğinde, ışıınım değeriinin pozitif yönde artması fotoakımın da artmasına neden olurken; sıcaklık değeriinin pozitif yönde artması fotoakımın azalmasına yol açmaktadır. Bunun nedeni, FV hücrenin kısa devre akımı sıcaklık katsayısı K_1 'in negatif işaretli olmasıdır. Dolayısıyla fotoakım değeri sıcaklık artışıyla azalmakta, ışıınım artışıyla ise yükselmektedir.

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_1(T_c - T_{ref})] \frac{G}{1000} \quad (2)$$

$$I = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{V + I.R_s}{a.V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (3)$$

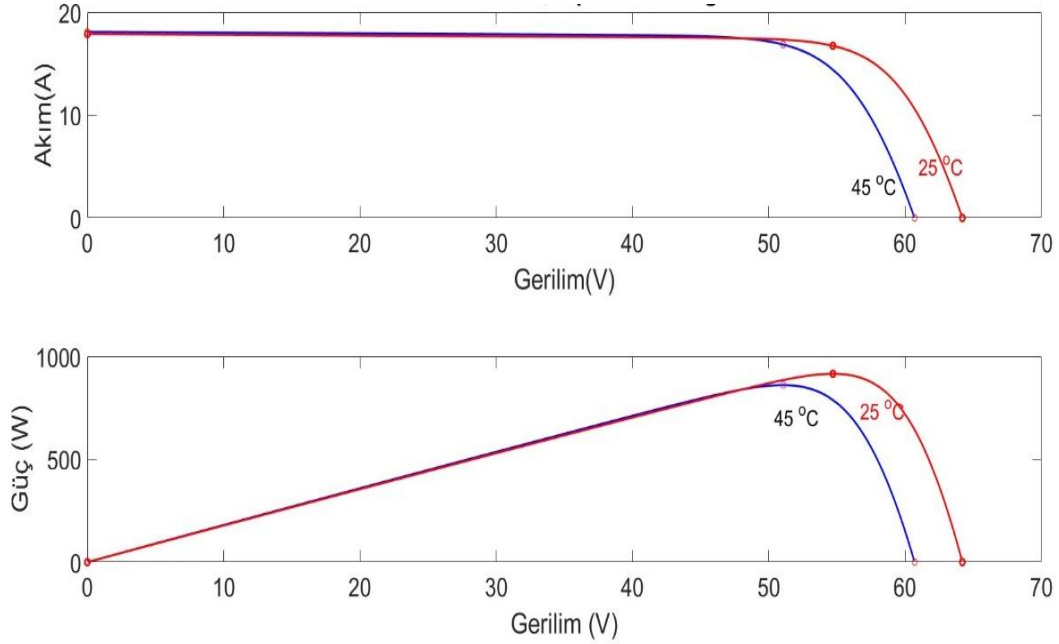
Denklem (3)'de I , hücrenin çıkış akımını; a , ideal diyot faktörünü; R_s , hücrenin seri direncini; R_p , hücrenin paralel direncini; V_{th} , hücrenin termal gerilimini; K , Boltzman sabiti; T_c , hücre sıcaklığını ve q elektron yükünü temsil etmektedir(Atıcı vd., 2019). Mevcut sistemimizde, güneş enerjisi üretiminde SunPower SPR-305E-WHT-D panel tercih edilmiş olup 3 adet modül paralel bağlanarak konfigürasyon oluşturulmuştur. Sistemin nominal gücü, 25°C ortam sıcaklığı ve 1000 W/m² güneş ışımasında 915 Watt'tır.

Benzetimde kullanılan modüllere ait teknik özellikler Çizelge 3.1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu bilgiler, modelin gerçek çalışma koşullarına uygunluğunu değerlendirmek ve performans analizlerini sağlıklı biçimde gerçekleştirmek açısından temel bir referans niteliği taşımaktadır.

Çizelge 3.1 SunPower SPR-30E-WHT-D modül bilgileri

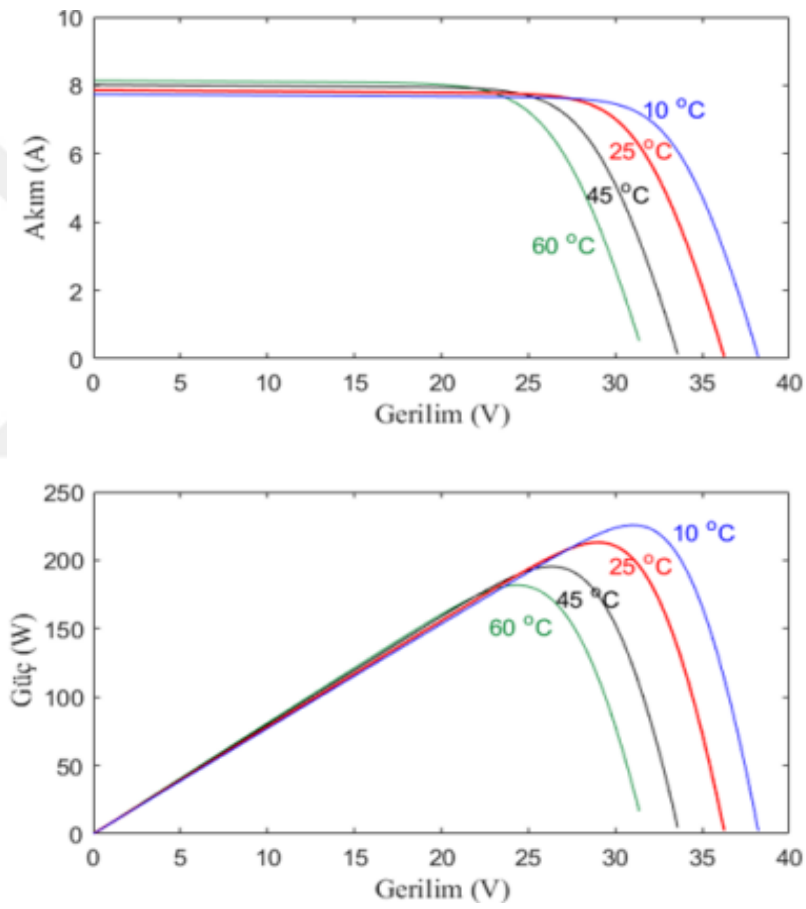
Tanım	Değer
Modüldeki hücre sayısı	$N_s = 96$
Açık devre gerilimi	$V_G = 64,2 \text{ V}$
Kısa devre akımı	$I_G = 5,96 \text{ A}$
Diyot satürasyon akımı	$I_0 = 6,3076e^{-12} \text{ A}$
Şönt direnç	$R_{sh} = 393,2054 \Omega$
Seri direnç	$R_s = 0,37428 \Omega$
MGN'deki gerilim	$V_{mpp} = 54,7 \text{ V}$
MGN'deki akım	$I_{mpp} = 5,58 \text{ A}$

Şekil 3.5'te FV modülün akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri verilmiştir. Buna göre, 25 °C nominal sıcaklıktaki MGN için akım değeri 16,74 A ve FV çıkış gerilimi 54,7 V olarak gözlenmektedir. Aynı koşullar altında, güç-gerilim grafiğinden elde edilen verilere göre MGN'de modülün çıkış gücü ise 915 W olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5 FV Dizinin Gerilim-Akım ve Gerilim-Güç Grafikleri

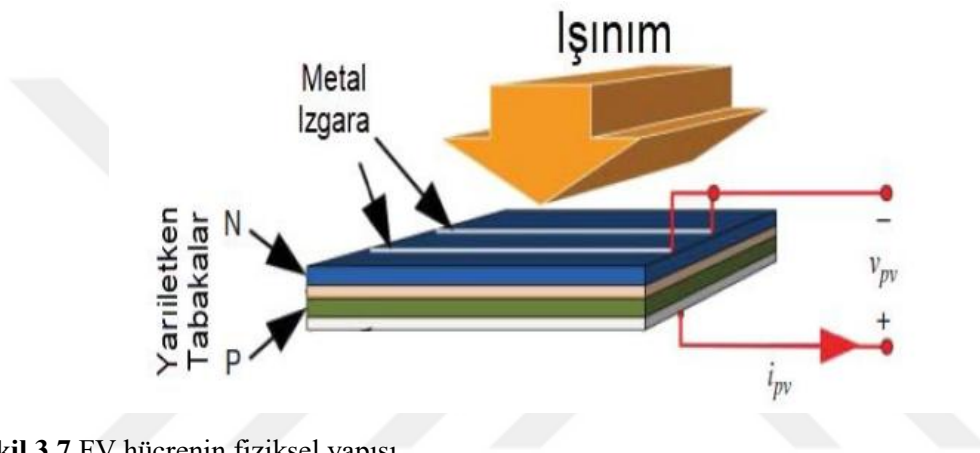
Şekil 3.6’da bir FV panelin 1000 W/m^2 ışınım şiddeti altında, 10°C , 25°C , 45°C ve 60°C sıcaklık değerlerindeki MGN karakteristikleri incelenmektedir. Analiz sonuçları, sıcaklık artışının panelden elde edilebilecek maksimum gücü azalttığını ortaya koymaktadır. Sıcaklık değeri ile MGN arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. FV panellerin çalışma esnasında maruz kaldıkları sıcaklık artışı, yarıiletken malzemenin verimini olumsuz etkileyerek sistemin genel enerji dönüşüm etkinliğinde düşüşe neden olmaktadır.



Şekil 3.6 FV Dizinin Gerilim-Akım ve Gerilim-Güç Grafikleri

FV hücrelerin çalışma prensibi, güneş ışınımının emilmesi, P-N eklemi üzerinde serbest taşıyıcıların (elektron ve oyukların) oluşturulması ve bu taşıyıcıların hücrenin uçlarında toplanarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi süreci olarak tanımlanabilir. FV hücreler, çeşitli üretim teknikleriyle elde edilen farklı yarıiletken malzemelerden imal edilmektedir. Ancak, üretim maliyeti, verimlilik ve ticari erişilebilirlik kriterleri göz

önünde bulunduğunda, en yaygın olarak kullanılan hücre tipleri monokristal ve polikristal silisyum tabanlı yapılardır. Şekil 3.7’de FV hücre fiziksel yapısı görülmektedir. FV paneller tek başına kullanılabileceği gibi, ihtiyaç duyulan güç seviyesine, kullanılacak dönüştürücü tipine ve kapasitesine bağlı olarak seri, paralel veya seri-paralel konfigürasyonlarda bağlanarak hedeflenen çıkış gücüne ulaşılabilir. FV panellerden veya FV dizilerden depolama ünitelerine üretilen gücün iletimi için özel tip kablolar kullanılmaktadır. Bu kabloların, yüksek akım taşıma kapasitesine ve gerekli yalıtım özelliklerine sahip olması gerekmektedir (Atıcı vd., 2019).



Şekil 3.7 FV hücresinin fiziksel yapısı.

3.2. Enerji Depolama Sistemleri

Lityum tabanlı bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür gibi belirgin özellikler sunarlar. Bu özellikler, taşınabilir cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmalarını sağlar. Yüksek enerji depolama kapasiteleri, lityum bataryaların daha uzun kullanım ömrü ve daha etkili enerji depolama sağlamasıyla sonuçlanır. Bu da endüstriyel ve tüketici gereksinimlerine cevap verir.

Günümüzde lityum bazlı bataryalar, elektrikli sistemlerin enerji gereksinimlerini karşılamak amacıyla en ekonomik ve verimli çözümlerden biri olarak ön plana çıkmaktadır. Yüksek enerji ve güç yoğunluğu, yaklaşık %100 seviyesine ulaşan Coulomb verimliliği, uzun çevrim ömrü, hafıza etkisinin bulunmaması ve düşük iç deşarj kapasitesi gibi üstün özellikler, bu bataryaların tercih edilmesindeki temel etkenleri

oluşturmaktadır(Akgundogdu vd., 2017).

Çizelge 3.2 Lityum-iyon batarya teknik verileri

Tanım	Değer
Nominal gerilim	$V_b = 48 V$
Nominal kapasite	$Q_{nom} = 54 Ah$
Nominal deşarj akımı	$I_{dis} = 2,1739 A$
Başlangıç şarj seviyesi	$SOC = \%70$
Batarya iç direnci	$R_b = 0,096 \Omega$

Çizelge 3.2’de sunulan lityum-iyon batarya verilerine göre bataryanın nominal gerilimi 48 V ve kapasitesi 54 Ah’dır. Batarya çıkış büyüklüğü Denklem (4) ile ifade edilmektedir. Denklem (5) ise batarya model parametrelerinin batarya akımı I_b ve şarj durumu SOC ile nasıl değiştiğini açıklamaktadır. Başka bir deyişle, modelde kullanılan eşdeğer devre parametreler, I_b ve SOC ’a bağlı olarak güncellenmekte ve böylece farklı yük profilleri ile çalışma koşulları altında bataryanın gerilim-tepki karakteristiği gerçeğe daha yakın biçimde temsil edilmektedir.

$$V_b = V_0 - R_s I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^1 I_b dt} + A \exp(-B \int_0^1 I_b dt) \quad (4)$$

$$SOC = SOC_{ini} - \int_0^1 \frac{\eta I_b}{Q} dt \quad (5)$$

Burada, V_b batarya terminal gerilimini, V_0 ve I_b batarya açık devre gerilimini ve nominal akımını, R_s batarya iç direncini, K polarizasyon sabitini, Q batarya kapasitesini, SOC_{ini} bataryanın başlangıçtaki şarj durumunu, η batarya verimliliğini, A ve B batarya üstel gerilimini ve kapasitesini tanımlar (Kaysal vd., 2022).

FV sistemlerde, güneş ışığının yetersiz olduğu ya da gece saatlerinde enerji talebinin devam ettiği durumlarda bataryalar devreye girerek yedek enerji kaynağı işlevini üstlenmektedir. Bu yönüyle lityum-iyon bataryalar, güneş enerjisi tabanlı sistemlerin güvenilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Tasarım ve analiz sürecinde MATLAB/Simulink kütüphanesinde yer alan batarya modellerinin

kullanımı, sistem davranışlarının farklı çalışma koşullarında benzetiminin yapılmasına olanak tanımakta ve böylece sistemin daha verimli, optimize edilmiş ve gerçeğe yakın bir şekilde geliştirilmesini sağlamaktadır.

3.3. Fotovoltaik Sistem Uygulamalarında Verimi Etkileyen Faktörler

Çizelge 3.3'te bir FV sistemin verimini etkileyen unsurlar listelenmiştir. Burada iklim, coğrafi koşullar, çevresel, meteorolojik koşullar ve sistem özellikleri verimi etkileyen faktörlerdendir. Ayrıca, üretim sürecindeki farklılıklar nedeniyle aynı tip FV panellerin elektriksel özelliklerinde belirli sapmalar görülebilmektedir. Modüller arasındaki bu farklılıklar, sistem bütününde performans kayıplarına yol açabilmektedir.

Çizelge 3.3 FV sistem verimi etkileyen faktörler.

Sistem Özellikleri	FV hücre malzemesi
	Şarj kontrolörünün I-V karakteristikleri üzerindeki etkileri
	Akü verimi
	FV panel eğim açısı, azimut açısı
	Kablo direnci
	FV panel sıcaklığı
	FV panelin yaşı ve degradasyon oranı
Çevresel Koşullar	Gölgeleme faktörü
	Güneş ışıınımı ve güneşlenme süresinin etkisi
	Kirlilik faktörü
	Hava sıcaklığı, rüzgâr hızı
	Kurulumun yapıldığı lokasyon

Özellikle büyük kapasiteli ve yüksek maliyetli FV enerji sistemlerinin kurulumu söz konusu olduğunda, sistemin maksimum verimlilikle çalıştırılması ve böylece yatırımın geri dönüş oranının en üst düzeye çıkarılması büyük önem taşımaktadır. FV sistemlerin verimliliği; çevresel ve meteorolojik koşullar, kullanılan ekipman ve kurulum kalitesi, invertör verimliliği, güneş ışınlarının atmosferde kat ettiği yolun uzunluğu, hava kirlilik düzeyi, yansıtılmış ışıının katkısı, güneş ışınlarının geliş açısı, FV hücre yapısında kullanılan malzemelerin türü ve özellikleri, ortam sıcaklığı ve güneşlenme süresi gibi

birçok faktörden etkilenmektedir (Akhan vd., 2025).

Artan sıcaklığın, FV sistem verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Elektrik üretimi için temel enerji kaynağı güneş ışıınımı olmakla birlikte, ışıınım yoğunluğundaki artış genellikle sıcaklık yükselmesine neden olmakta ve bu durum ise FV panellerin veriminde düşüşe yol açmaktadır. Bir FV panelinin ideal çalışma sıcaklığı yaklaşık 300 K olarak kabul edilmektedir. Bu değerin üzerindeki her bir derece sıcaklık artışı, panel çıkış gücünü amorf hücrelerde yaklaşık %0,25, kristal yapılu hücrelerde ise %0,4–%0,5 oranında azaltmaktadır. Güneş panellerinde aşırı ısınmanın önlenmesi amacıyla, pasif veya aktif soğutma yöntemlerine dayalı termal yönetim sistemlerinin kullanılması önerilmektedir(Dubey vd., 2013).

FV hücre yapısında kullanılan silikonun tek kristalli veya çok kristalli formda olması ve hücrede tercih edilen malzemenin özellikleri, verimlilik değeri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Literatürde, polikristal silikon hücrelerin verimlilikleri %13–16, monokristal silikon hücrelerin verimlilikleri %18–24 ve ince film teknolojilerinin verimlilikleri %7–13 aralığında rapor edilmiştir (Akhan vd., 2025). Geleneksel silikon tabanlı teknolojilere ek olarak geliştirilen perovskit tabanlı güneş hücreleri, %25'in üzerinde enerji dönüşüm verimliliği elde ederek FV sistemlerde kayda değer bir performans artışı sağlamıştır (Vineetha vd., 2024).

Şebekeden bağımsız FV sistemlerde paneller genellikle bir enerji depolama birimine (batarya grubuna) bağlanmaktadır. Bu tür sistemlerde, enerji depolama biriminin her zaman tam şarjlı durumda olması ideal olmakla birlikte pratikte mümkün değildir. Batarya gerilimini mümkün olduğunca istenen maksimum değere yakın tutmak ve sistem verimliliğini artırmak için MGNİ tabanlı bir şarj kontrol cihazına ihtiyaç duyulmaktadır. MGNİ, panel gerilimini sürekli olarak MGN'ye yakın bir seviyede tutmayı hedefleyerek, oldukça düşük güç kaybıyla DA–DA dönüştürücü üzerinden gerilim dönüştürme işlevini yerine getirmektedir.

Şebekeye bağı FV sistemlerde invertör, doğrudan elektrik şebekesine bağlanmakta ve MGN takip ederek doğru akımı alternatif akıma dönüştürmektedir. Bu dönüşümün

sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, üretilen AA'nın şebeke ile aynı gerilim seviyesinde ve frekansta olması gerekmekte, dolayısıyla invertörün şebeke ile senkron çalışması zorunlu hale gelmektedir. MGN takibi için invertörlerde çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanlar; D&G, AI, Kısa Devre Akımı Yöntemi, Açık Devre Gerilimi Yöntemi ve son yıllarda geliştirilen MÖK tabanlı yaklaşımlardır. Söz konusu algoritmaların temel amacı, farklı ışıınım ve sıcaklık koşullarında FV panellerin güç üretimini mümkün olan en yüksek seviyede tutmaktır.

3.4. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmaları

Güneş ve rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde yararlanma konusu, araştırmacılar arasında ilgi uyandıran ve günümüzde oldukça popüler bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu amaç doğrultusunda, özellikle enerji ve elektrik mühendisliği alanlarında, güç elektroniği tabanlı verim artırma uygulamaları geliştirilmektedir. Donanımsal olarak farklı DA-DA çevirici devre yapıları tasarlanmakta, yazılımsal olarak ise çeşitli algoritma yapıları uygulanarak güneş ve rüzgâr enerjisinden maksimum güç elde edilmesi hedeflenmektedir (Lokhande vd., 2024).

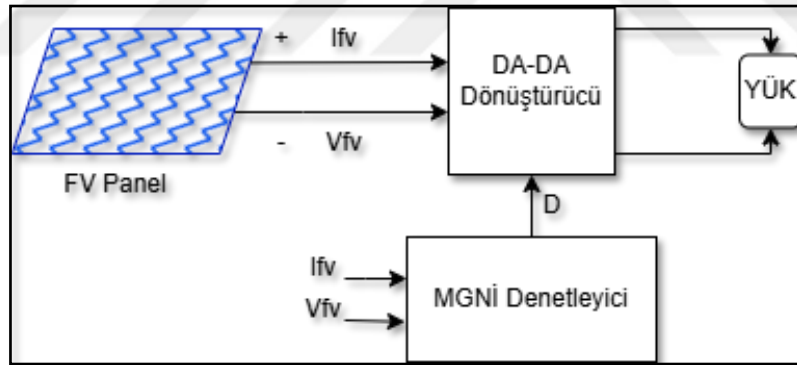
Güç elektroniği alanında yaygın olarak kullanılan DA-DA dönüştürücüler; düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici ve bunların türevleri olmak üzere çeşitli topolojilere sahiptir. Bu dönüştürücüler, giriş gerilimini istenilen düzeye uyarlayarak yükün veya enerji depolama biriminin gereksinim duyduğu gerilim seviyesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. FV sistemlerde, güneş panellerinden elde edilen doğru akım gerilimi genellikle sabit olmadığından, dönüştürücüler sistem performansının kararlılığı ve enerji verimliliği açısından kritik bir işlev üstlenmektedir.

MGNİ sürecinde DA-DA dönüştürücüler, panel çıkış geriliminin sürekli olarak ayarlanmasını sağlayarak sistemin en yüksek güç noktasında çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda dönüştürücü, yalnızca enerji dönüşümünü gerçekleştiren bir devre elemanı değil, aynı zamanda MGNİ algoritmasının etkinliğini doğrudan etkileyen bir kontrol bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Kullanılan dönüştürücü topolojisinin türü; sistemin dinamik tepkisi, verimlilik düzeyi, anahtarlama kayıpları ve genel güç

kalitesi üzerinde belirleyici olmaktadır.

Sonuç olarak, FV sistemlerde kullanılan DA-DA dönüştürücüler, enerji dönüşümünün sürekliliğini ve kararlılığını sağlamakla birlikte, güneş ışıınımı ve sıcaklık gibi çevresel değişimlere karşı sistemin hızlı adaptasyon göstermesinde temel bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, uygun dönüştürücü topolojisinin seçimi ve buna entegre edilen kontrol algoritmasının etkinliği, sistemin genel performansını belirleyen en önemli unsurlardan biridir.

MGN, bir FV sistemin belirli çevresel koşullar altında ulaşabileceği maksimum güç değerini ifade etmektedir. Bununla birlikte, güneş ışıınımı yoğunluğu, ortam sıcaklığı ve yük karakteristikleri gibi parametrelerin sürekli değişkenlik göstermesi nedeniyle MGN, zaman içerisinde dinamik bir yapı sergilemektedir. Bu durum, FV sistemlerin her an MGN’de çalışmasını temin etmek amacıyla, MGNİ olarak adlandırılan algoritmaların uygulanmasını gerekli kılmaktadır.

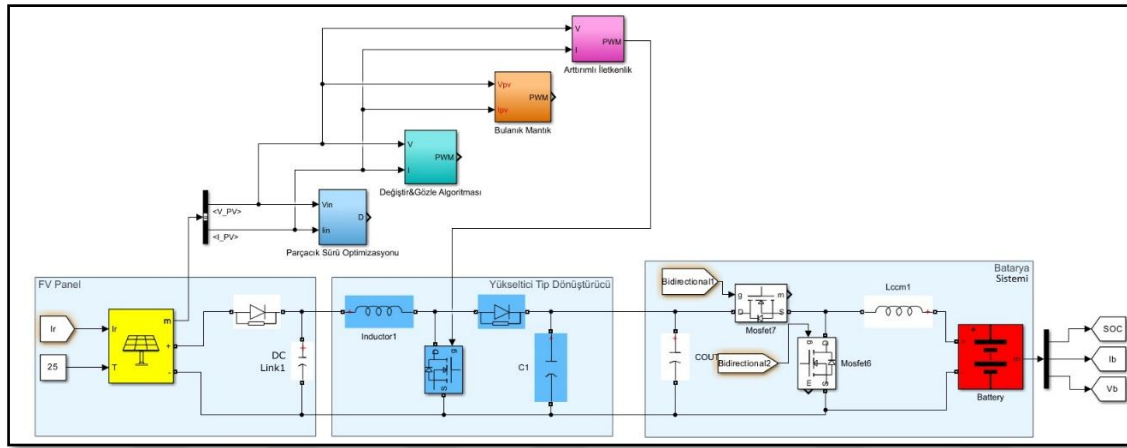


Şekil 3.8 MGNİ Sistem Genel Yapısı

MGNİ, FV panelin çalışma noktasını gerçek zamanlı olarak izleyip ayarlayarak, sistemin MGN’de faaliyet göstermesini temin eder. Depolamalı FV sistem MATLAB/Simulink benzetim modeli blok diyagramı Şekil 3.9’de sunulmuştur. Sistem, FV panel, güç dönüştürücüsü, denetleyici ve yük birimi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. FV panel, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürken, dönüştürücü bu enerjiyi sistem gereksinimlerine uygun biçimde düzenlemektedir. Denetleyici, MGN’de çalışma koşullarını sağlayarak sistem performansını optimize ederken, yük birimi üretilen enerjiyi

tüketim noktalarına iletmektedir. Bu yapı, MGNİ sistemlerinin etkin ve güvenilir bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır.

FV sistemlerde, enerji verimliliğini maksimize etmek amacıyla çeşitli MGNİ algoritmaları incelenmiştir. MGNİ algoritmaları, FV panellerin çevresel koşullar ve güneş ışınımı gibi dış etkenlere bağlı olarak değişen performansını optimize ederek, sistemden alınabilecek maksimum gücü sürekli olarak saptar. Düzensiz güneş ışınımı ve değişken ortam sıcaklıkları bu algoritmaların kullanılmasını gerektiren faktörlerdendir.

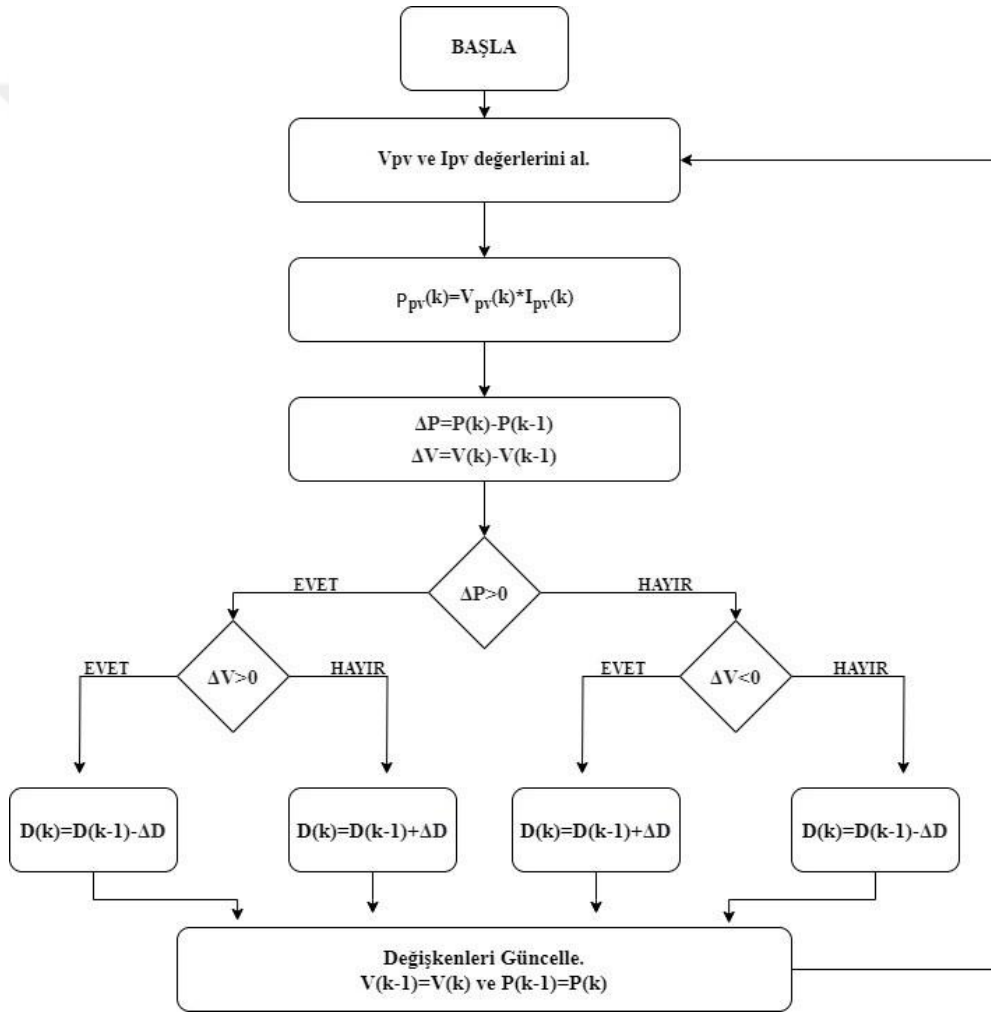


Şekil 3.9 Depolamalı FV sistem Simulink benzetim modeli

Bu tez çalışmasında geliştirilen MATLAB/Simulink modeline ilişkin genel yapı Şekil 3.9'da sunulmuştur. Sistemin FV bileşenleri ile batarya tarafına ait alt birimler ayrıntılı bir biçimde gösterilmektedir. Model kapsamında kullanılan ve performans karşılaştırmalarının gerçekleştirildiği MGNİ yaklaşımlarına ait bloklar ise DG, BM-DG, AI ve PSO olarak tanımlanmıştır. Bu bloklar, her bir yöntemin dinamik davranışlarını ve karar verme süreçlerini temsil edecek şekilde yapılandırılmış olup, modelin bütüncül çalışma prensiplerini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, oluşturulan MATLAB/Simulink ortamı hem yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılmasına hem de sistemin genel performansının analiz edilmesine uygun bir altyapı sunmaktadır.

3.4.1. Değiştir Gözle Algoritması

D&G, yaygın olarak kullanılan ve literatürde sıkça karşılaşılan bir algoritma türüdür. Bu yöntemde, FV modülünün güç değişimi sürekli olarak izlenir ve ardından modülün gerilim değişiminin işareti kontrol edilir. Bu bilgiler temel alınarak, sonraki güncelleme ve düzeltmeler için görev döngüsü ayarlanır. Genellikle, modülün güç ve gerilim karakteristiği, modül çıkış gücünün işletme noktasının seyrini takip etmek için kullanılır (Katche vd., 2023).



Şekil 3.10 D&G Algoritması iş akış şeması

Şekil 3.10’da MGNİ’de kullanılan D&G algoritmasının iş akış diyagramı gösterilmektedir. Bu yöntemde, her bir kontrol döngüsünde kontrol birimi, FV panelden elde edilen gücü hesaplamakta ve ardından görev periyodunu değiştirerek güç ile

gerilimdeki değişimleri izlemektedir. Eğer ölçülen güç ve gerilim değerleri, bir önceki duruma göre eş zamanlı olarak artış göstermiş veya eş zamanlı olarak azalmış ise, algoritma gerilim artırma yönünde ilerlemektedir. Buna karşın, ölçülen güç değeri artmış ancak gerilim azalmışsa ya da güç değeri azalmış fakat gerilim artmışsa, algoritma bu durumda gerilim azaltma yönünde hareket etmektedir.

Bu süreç, FV panelin çalışma noktası MGN'ye ulaşınca kadar sürekli olarak tekrarlanmaktadır. Çizelge 3.4'de ise D&G algoritmasının karar verme sürecinde değerlendirdiği adımlar ve koşullar özetlenmiştir.

Çizelge 3.4 Değişir gözle algoritmasının karar verme adımları

Güç değişimi (ΔP)	Gerilim değişimi (ΔV)	Referans Gerilim Değişim Yönü
$\Delta P > 0$	$\Delta V > 0$	Artır
$\Delta P < 0$	$\Delta V < 0$	Artır
$\Delta P > 0$	$\Delta V < 0$	Azalt
$\Delta P < 0$	$\Delta V > 0$	Azalt

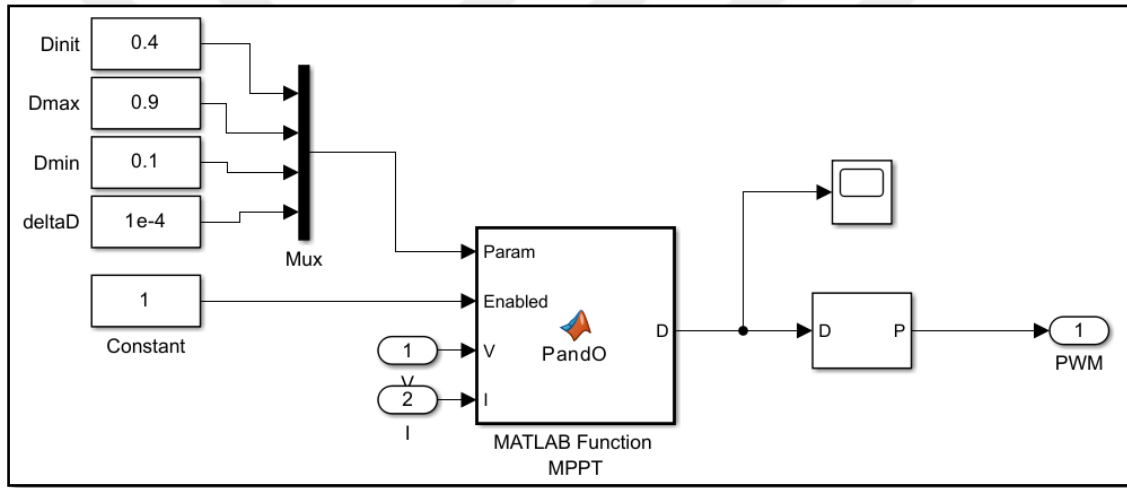
D&G yöntemi, basit algoritma yapısı ve uygulama kolaylığına sahip olmasına rağmen, etkinliğini sınırlandıran bazı kısıtlamalara sahiptir. Arama adımlarında gerçekleşen gerilim artış veya azalışları, MGN çevresinde salınımlara yol açmakta ve bu durum, sistemin MGN'ye tam olarak ulaşip ulaşmadığını belirleyememesine neden olmaktadır. Dolayısıyla salınımlar sürekli olarak devam etmektedir.

Güneş ışınlamının ciddi oranda azalması, FV panelin güç-gerilim eğrisinin belirgin biçimde düzleşmesine neden olmaktadır. Bu durumda ortaya çıkan güç değişimlerinin oldukça düşük seviyelerde kalması, D&G yönteminin MGN'yi doğru bir şekilde algılamasını güçleştirmekte ve yöntemin takip performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Eltawil ve Zhao, 2013).

D&G algoritması, kapalı hava koşullarında MGN takibinde güçlükler yaşasa da basit yapısı, düşük hesaplama gereksinimi ve kolay uygulanabilirliği sayesinde günümüzde hâlâ yaygın olarak kullanılan MGNİ yöntemlerinden biridir. Anlık güç değişimlerine hızlı

tepki verebilmesi ve gerçek zamanlı sistemlerle uyumlu çalışması da pratik uygulamalarda tercih edilme nedenleri arasındadır. Düşük ısıtım koşullarındaki performans sınırlılıklarına ve salınım eğilimine rağmen, maliyet etkinliği ve yapısal sadeliği yöntemin kullanımını sürdürmesini sağlamaktadır.

Şekil 3.11’de, depolamalı FV sistemine entegre edilen D&G algoritmasının MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen ayrıntılı model yapısı gösterilmektedir. Bu model, algoritmanın dinamik davranışlarını, FV sistem üzerindeki etkilerini ve MGNI sürecindeki performansını bütüncül bir biçimde analiz edebilmek amacıyla oluşturulmuştur.



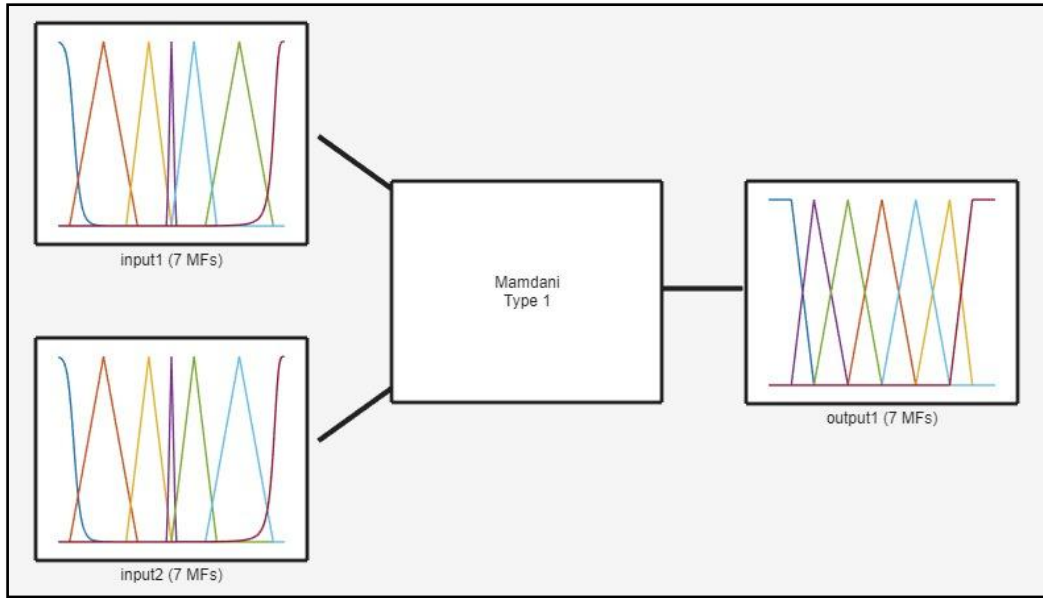
Şekil 3.11 MATLAB/Simulink’te D&G algoritmasının modeli

3.4.2. Bulanık Mantık Tabanlı Değiştir Gözle Algoritması

BM kavramı, ilk olarak 1965 yılında California Üniversitesinden Azerbaycan asıllı bilim insanı Prof. Lotfi Zadeh’in konuya ilişkin çalışmalarını yayımlamasıyla literatüre kazandırılmıştır. İkili mantık yaklaşımına alternatif olarak geliştirilen bu yöntem, günlük yaşamda karşılaşılan belirsizlik içeren değişkenlere üyelik dereceleri atayarak olayların gerçekleşme düzeylerini tanımlamayı amaçlamaktadır. İnsan düşünce yapısına klasik mantık sistemlerine kıyasla daha yakın bir model sunması nedeniyle, BM çeşitli mühendislik ve kontrol uygulamalarında önemli bir yöntem olarak kabul edilmektedir (İsen, 2018).

BM, belirsizlik içeren problemleri çözmek için kullanılan bir YZ yaklaşımıdır. Geleneksel metotlardan farklı olarak, bu yöntem belirli bir kural seti altında girdi verilerini "bulanık" kavramlar altında değerlendirir. BM algoritmaları, bu bulanık kavramları kullanarak sistemli bir şekilde çıkarımlar yapar ve sonuçları elde eder. Bu yöntem, belirsizlikleri ele alabilme kabiliyeti, karmaşık sistemlerin modellenmesi ve gerçek dünya verileriyle başa çıkabilme esnekliği gibi avantajlara sahiptir. Bu nedenle, endüstriyel kontrol sistemleri, YZ uygulamaları ve karar verme süreçlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

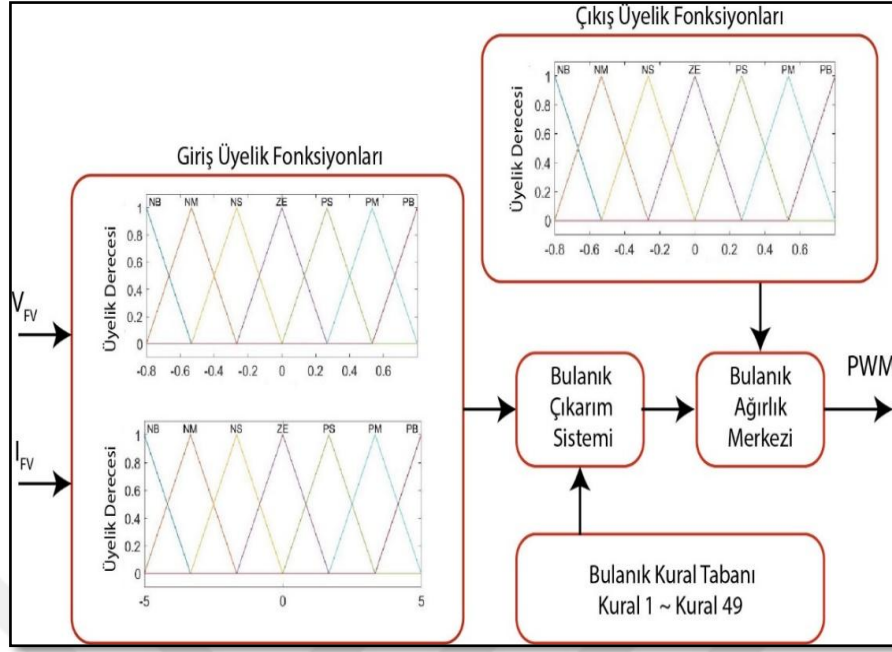
BM tabanlı MGNİ algoritmaları, değişken çevresel koşullar altında dahi güvenilir ve kararlı sonuçlar üretebilmektedir. Bunun temel nedeni, BM yapısında kullanılan hata ve kural tabanlarının sistemin dinamiklerine uygun şekilde tasarlanmasıdır. Klasik kontrol yöntemlerinde, kontrol edilecek sistemin matematiksel olarak tam ve ayrıntılı biçimde modellenmesi gerekirken, BM yaklaşımı giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi kendi bulanık çıkarım mekanizmasıyla değerlendirdiği için ek bir sistem tanımlamasına ihtiyaç duymamaktadır. Bu özellik, FV sistemlerde BM tabanlı MGNİ yöntemlerinin tercih edilme oranını artırmaktadır (Yılmaz & Şahin, 2023)



Şekil 3.12 Bulanık çıkarım sistemi arayüzünde Mamdani yöntemi

BM’de en yaygın kullanılan yöntemlerden biri Mamdani tipi çıkarım yöntemidir. Çalışmada kullandığımız bu yöntemin MATLAB/Simulink genel modeli Şekil 3.12’de verilmiştir. Mamdani tipi yaklaşım, farklı türdeki problemlere ek bir modelleme gereksinimi olmaksızın uygulanabilmesi ve geniş bir kullanım alanı sunması nedeniyle literatürde sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem, giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması, kural tabanının işletilmesi ve elde edilen sonuçların durulaştırılması adımlarından oluşan yapısı sayesinde özellikle kontrol uygulamalarında yüksek esneklik ve yorumlanabilirlik sağlamaktadır.

BM kontrol algoritmasının blok diyagramı Şekil 3.13’de verilmiştir. Şekilde görülen Mamdani tipi bulanık girişim yapısı, giriş-çıkış üyelik fonksiyonları, bulanık kurallar kümesi, bulanık çıkarım motoru ve durulaştırıcı olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır. BM kontrolör iki giriş ve bir çıkış fonksiyonundan oluşmaktadır. Giriş değişkenleri, hata ve hatadaki değişimi oluştururken çıkış değişkeni ise anahtarlama elemanının sürülmesinde kullanılan darbe genişlik modülasyonuna sahip tetikleme sinyalidir. Her iki giriş BM kullanılarak bulanıklaştırılır. BM, negatif büyük (NL), negatif orta (NM), negatif küçük (NS), sıfır (ZE), pozitif küçük (PS), pozitif orta (PM) ve pozitif büyük (PL) dilsel değişkenleri olmak üzere yedi bulanık alt kümeden oluşmaktadır (Rai & Rahi, 2022).



Şekil 3.13 Bulanık çıkarım sistemi blok diyagramı

BM’de üçgen, yamuk, çan eğrisi, gauss ve sigmoid gibi çeşitli üyelik fonksiyonları bulunmaktadır. Bu çalışmada, Şekil 3.13’de gösterilen üçgen üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Bu fonksiyon türünde başlangıç (a), bitiş (c) ve en yüksek üyelik derecesi (b) olmak üzere üç ana parametreye dayanır ve Denklem (6)’da tanımlanmıştır. Son olarak durulaştırma sürecinde bulanık çıkış, keskin kontrol sinyaline dönüştürülür. Bu işlem, Denklem (7)’de tanımlanan ağırlık merkezi yöntemini kullanır.

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} \frac{(x - a)}{(b - a)} & \text{eğer } a \leq x \leq b \\ \frac{(c - x)}{(c - b)} & \text{eğer } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{eğer } a < x \text{ || } x > c \end{cases} \quad (6)$$

$$x_{COG}^* = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (7)$$

Burada x_i i_{th} bulanık kuralın çıkışı, $\mu(x_i)$ i_{th} bulanık kuralın çıkarım sonucu, x_{COG}^* bulanık kontrolörün çıkışıdır. BM’de giriş ve çıkış değerlerini belirlemek için uygulanan bir kural tablosuna sahiptir.

Çizelge 3.5'te, BM kontrol sisteminde giriş ve çıkış değerlerini belirlemek için uygulanan kural tablosu görülmektedir. Bir BM kural tablosu, belirli bir giriş kombinasyonuna karşılık gelen çıkışları belirlemek için kullanılan bir araçtır. Bu tablo, BM denetleyicisinin davranışını tanımlar ve hangi koşullarda hangi çıkışın olması gerektiğini belirler.

Çizelge 3.5 Bulanık çıkarım sistemi kural tablosu

E/DE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	ZE	NB	NB	NB	NB
NM	ZE	ZE	ZE	NM	NM	NM	NM
NS	NS	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS
ZE	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
PS	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE	PS
PM	PM	PM	PM	PM	ZE	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	PB	ZE	ZE	ZE

Yapılan çalışmalarda, BM ile kontrol edilen MGNİ'lerin farklı hava koşullarında başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak burada önemli bir nokta, BM yapısının veriminin, tasarımı yapan kişinin üyelik fonksiyonlarını ve kural tabanını nasıl belirlediğine bağlı olmasıdır. Yani bu yöntemin başarısı sadece algoritmaya değil, aynı zamanda tasarım sırasında yapılan ayarlamalara ve kullanıcı bilgisinin düzeyine de bağlıdır (Esrām & Chapman, 2007)

3.4.3. Artırmalı İletkenlik Algoritması

Aİ algoritması, adaptif kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımı ifade eder. Bu algoritma, sistem davranışını optimize etmek için iteratif bir süreci temsil eder. İlk adımda, sistem başlangıç durumu belirlenir ve ardından hedefler tanımlanır. Başlangıçta, sistemin mevcut durumunu temsil eden bir tahmin yapılır ve bu tahmin üzerinden kontrol sinyali hesaplanır. Hesaplanan kontrol sinyali sisteme uygulanır ve sistemin durumu güncellenir. Daha sonra, sistemin davranışı incelenir ve hedeflere ulaşıp ulaşılmadığı değerlendirilir. Eğer hedeflere henüz ulaşılmamışsa veya belirlenmiş kriterler karşılanmamışsa, algoritma tekrar kontrol hesaplaması ve uygulaması yapar.

Belirli bir sonlanma koşulu karşılanıncaya kadar bu adımlar tekrarlanır ve sonunda sistem belirlenen hedeflere ulaşır ve kontrol stratejisi optimize edilir.

$$\frac{di}{dv} = -\frac{I}{V} \quad (8)$$

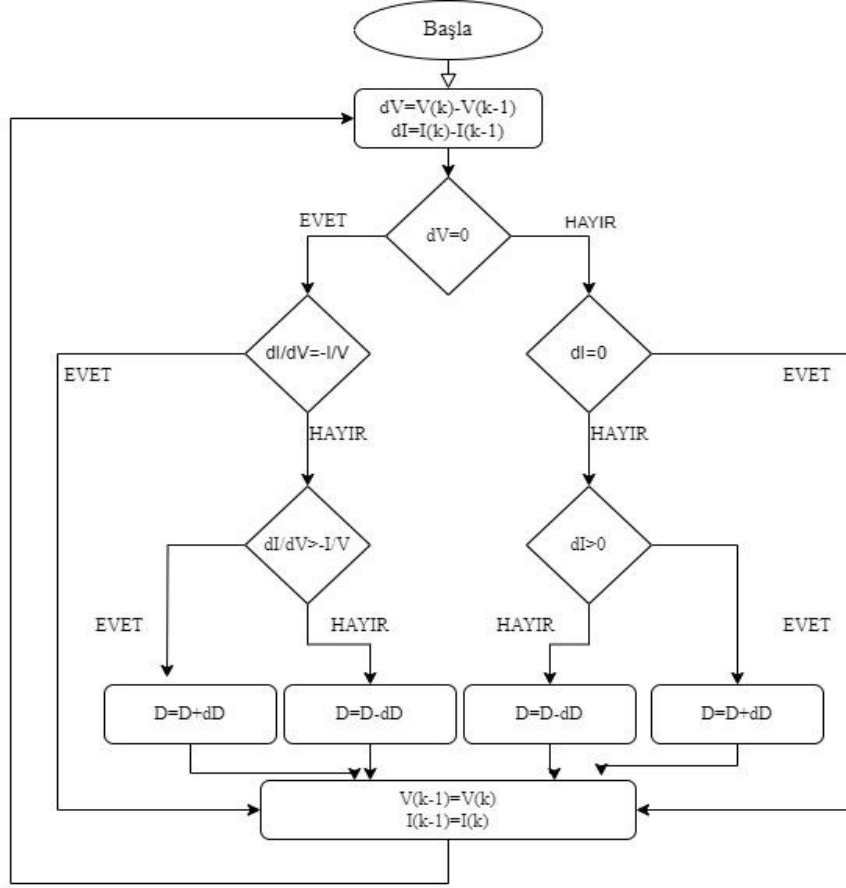
$$\frac{di}{dv} > -\frac{I}{V} \quad (9)$$

$$\frac{di}{dv} < -\frac{I}{V} \quad (10)$$

$$I + V \frac{di}{dv} = 0 \quad (11)$$

Aİ algoritması, FV modülün P–V eğrisi üzerindeki MGN’yi tespit etmek için eğimin işaretini ve büyüklüğünü kullanmakta ve bu amaçla anlık iletkenlik (I/V) ile artımlı iletkenliği (dI/dV) birlikte değerlendirmektedir. P–V eğrisinin tepe noktasında $dP/dV=0$ koşulu sağlandığından, bu durum Denklem (8)’de ifade edildiği gibi $dI/dV=-I/V$ ilişkisine karşılık gelmekte ve FV modülün MGN’de çalıştığını göstermektedir. Denklem (9) ve (10)’da tanımlanan koşullar ise, söz konusu eşitliğin sağlanıp sağlanmamasına bağlı olarak, FV modülün P–V eğrisinde MGN’nin sol veya sağ tarafında çalıştığını belirtmektedir.

Geleneksel Aİ algoritması, MGN’yi tespit etmek için Denklem (11)’de verilen karar ifadesini kullanır. Bu kapsamda, FV modülün gerilimi ve akımı MGNİ sisteminin kontrol birimi tarafından sürekli ölçülür. Eğer Denklem (9) veya (10)’daki koşullar geçerliyse, dönüştürücünün görev oranı sırasıyla azaltılmakta veya artırılmakta, Denklem (11)’in sağlandığı durumda ise görev oranında herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır (Shang vd., 2020). Şekil 3.14, Aİ algoritmasının akış şemasını göstermektedir.



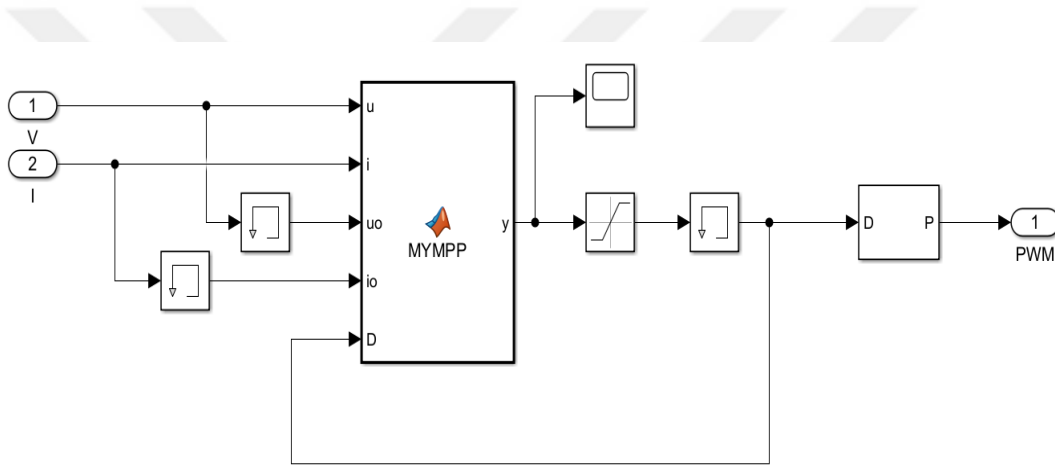
Şekil 3.14 Artırımlı İletkenlik Algoritması Akış Şeması

FV panelden elde edilen akım ve gerilim ölçülerek güç hesaplanır. Aİ yöntemi, mevcut güç ve gerilim ile akımın artırılması veya azaltılması durumunda güç değişimini inceler. Eğer güç değişimi sıfıra eşitse, bu nokta MGN olarak kabul edilir ve maksimum güç elde edilir. Güç artarsa, genellikle gerilim artırılarak daha fazla güç elde edilebileceği belirlenir. Güç azalırsa, genellikle gerilim azaltılarak daha fazla güç elde edilebileceği tespit edilir. Bu işlem, panelin MGN etrafında sürekli olarak tekrarlanır. Böylece farklı hava koşullarına ve güneş ışığı yoğunluğundaki değişikliklere yanıt verilir ve maksimum verim sağlanır.

Aİ algoritması, hızlı değişen çevresel koşullara tepki verme konusunda sınırlı bir performans sergilemektedir. Kısmi gölgelenme durumlarında, birden fazla MGN oluştuğunda algoritma genellikle en yüksek MGN noktasına değil, en yakın noktaya yönelerek güç kayıplarına neden olmaktadır. Ayrıca, MGN'ye ulaşma hızı algoritmada kullanılan adım büyüklüğüne doğrudan bağlıdır. Adım büyüklüğünün artırılması,

MGN'ye daha hızlı ulaşılmasını sağlasa da bu durum MGN çevresinde salınımların artmasına yol açmaktadır. Artan salınımlar sonucunda ise sistemin kararlılığı azalmakta ve FV panelin genel verimliliği düşmektedir(Huynh, 2012).

Bu algoritmanın en önemli üstünlüğü, değişken ve dinamik hava koşulları altında dahi yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilmesidir. Optimizasyon sağlandığında, Aİ yöntemi ile D&G yöntemlerinin etkinliği temelde benzer seviyelerde olmakla birlikte, MGN çevresindeki salınımların Aİ yönteminde daha az gerçekleştiği görülmektedir. Bu özellik, sistemin kararlılığını artırmakta ve özellikle hızlı ışıyım değişimlerinin yaşandığı durumlarda bu yöntemi daha avantajlı hale getirmektedir(Salas vd., 2006).



Şekil 3.15 MATLAB/Simulink'te Aİ algoritmasının modeli

Şekil 3.15'te, oluşturulan depolamalı FV sisteme entegre edilen Aİ algoritmasının MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş ayrıntılı model yapısı sunulmaktadır. Bu model, Aİ yönteminin anlık iletkenlik ve değişim iletkenliğine dayalı karar mekanizmasını, FV sistem üzerindeki dinamik etkilerini ve MGN takibindeki performansını kapsamlı bir şekilde analiz edebilmek amacıyla oluşturulmuştur. Böylece, algoritmanın hem kararlı hem de değişken çevresel koşullar altındaki davranışları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilebilmektedir.

3.4.4. Parçacık Sürü Optimizasyon Yöntemi

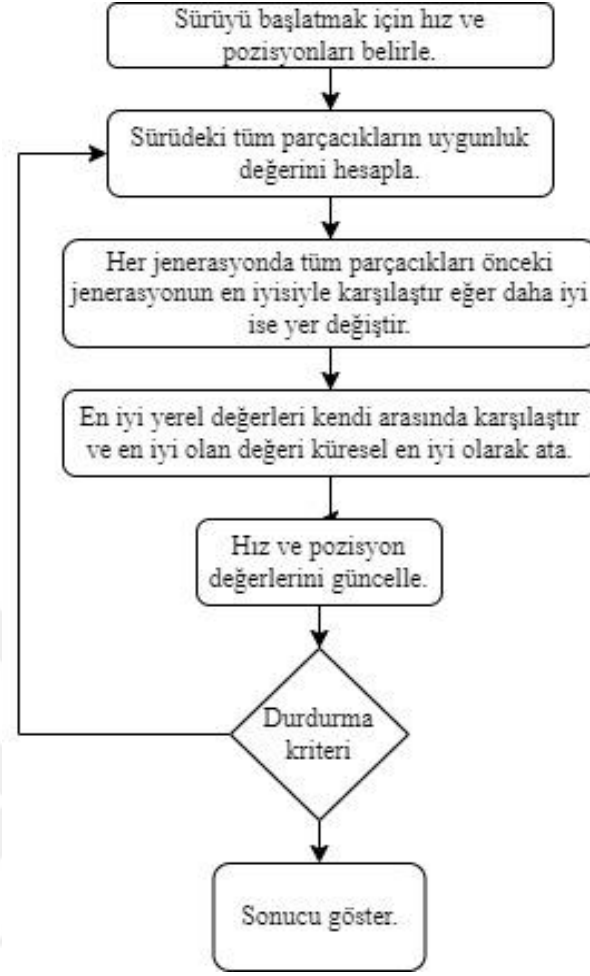
Sosyal psikoloji temelli bir optimizasyon yaklaşımı olan PSO algoritması, “parçacık” olarak adlandırılan bireysel çözümlerin, tek bir popülasyonun yürüttüğü kolektif bir

arama süreci aracılığıyla en uygun çözümü keşfetmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda her parçacık, arama uzayı içerisindeki konumunu ve buna karşılık gelen uygunluk değerini sürekli olarak değerlendirmektedir.

PSO algoritmasında her iterasyon, parçacık hızının güncellenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu güncelleme, parçacığın hem kendi en iyi deneyiminden hem de popülasyonun genel en iyi deneyiminden yararlanarak optimal çözüme doğru yönelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, algorithma her parçacık için bağımsız ve rastgele belirlenen ivme katsayıları kullanılmakta olup bu katsayılar arama sürecinin çeşitliliğini artırmaktadır (Karthikeyan vd., 2025).

PSO, FV sistemde MGNİ’de denetleyici algoritmalar arasında kabul görmüş bir yaklaşımdır. Bu algoritma, değişken iklim koşullarında maksimum güç çıkışını elde etmek için geliştirilmiştir. Geleneksel PSO algoritması, kuş veya balık sürülerinin davranışlarından esinlenerek oluşturulmuştur. PSO yöntemi, çok boyutlu bir arama alanında hareket eden parçacık sürüsünü kullanarak en uygun çözümü bulmayı amaçlar. Bu yöntem, FV sistem kontrolünde MGN’de istikrarlı bir şekilde takibini sağlamak ve düşük frekanslı dalgalanmalarla etkili bir şekilde başarılı olmuştur. MGN’yi takip etmek için parçacıkların konumu ve hızı, yükselten dönüştürücünün çalışma döngüsünü sürekli olarak güncelleyerek optimize edilir (Ben Regaya vd., 2024).

Başlangıçta, bu yöntem rastgele bir parçacık popülasyonu ile başlar. Her bir parçacık kendi hızına ve potansiyel bir çözümü temsil eder. Parçacıkların hızı ve konumu, güncelleme denklemleri kullanılarak değiştirilir. Bu denklemler insan ve karşılıklı deneyim geçmişini dikkate alır (Gawande vd., 2021).



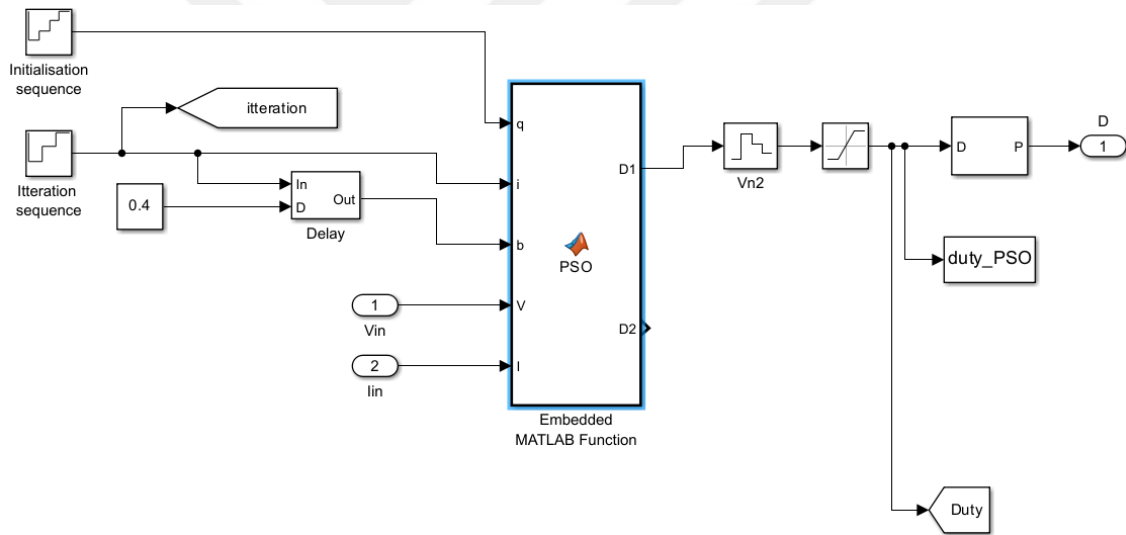
Şekil 3.16 Parçacık Sürü Optimizasyon Akış Şeması

Şekil 3.16 incelendiğinde PSO, bir grup parçacığın bir problemdeki en iyi çözümü bulmak için birlikte çalıştığı bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. FV panellerinde MGNİ için PSO kullanıldığında, her bir parçacık FV panelinin çalışma koşullarını temsil eden parametreleri ayarlamak için kullanılır. Parçacıklar, problem alanında hareket ederken, en iyi çözüme doğru evrilirler. Sonuç olarak, panelden maksimum güç çıkışı elde edilir. Bu şekilde, PSO güneş enerjisi sistemlerinde verimliliği artırmak için etkili bir araç olarak kullanılabilir.

PSO algoritmasında, sistem performansını doğrudan etkileyen parametreler literatüre dayanarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, bilişsel ve sosyal hızlanma katsayıları olarak adlandırılan c_1 ve c_2 parametreleri 2 olacak şekilde tercih edilmiştir. Bu değerler, PSO algoritmasının temel yapısını ilk ortaya koyan Kennedy ve Eberhart tarafından önerilmiş

olup, parçacıkların bireysel en iyi deneyimleriyle sürünün küresel en iyi çözümünden dengeli bir şekilde faydalanmalarını amaçlamışlardır. Literatürde yaygın olarak benimsenen $c_1 = c_2 = 2$ seçimi, algoritmanın keşif ve sömürü yetenekleri arasında ideal bir denge sağlayarak hızlı ve kararlı bir yakınsama süreci sergilemesine imkân sunmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle sık ışınlım ve yük değişimleri gözlemlenen FV MGNI uygulamalarında, MGN'nin etkin ve istikrarlı bir şekilde izlenmesine önemli ölçüde katkı sunmaktadır.

Şekil 3.17'de, depolamalı FV sisteme entegre edilen PSO algoritmasının MATLAB/Simulink ortamındaki modeli gösterilmektedir. Model, PSO'nun parçacık temelli arama mekanizmasını ve FV sistem üzerindeki MGN takibi performansını analiz edebilmek amacıyla oluşturulmuştur.



Şekil 3.17 MATLAB/Simulink'te PSO algoritmasının modeli

4. BULGULAR

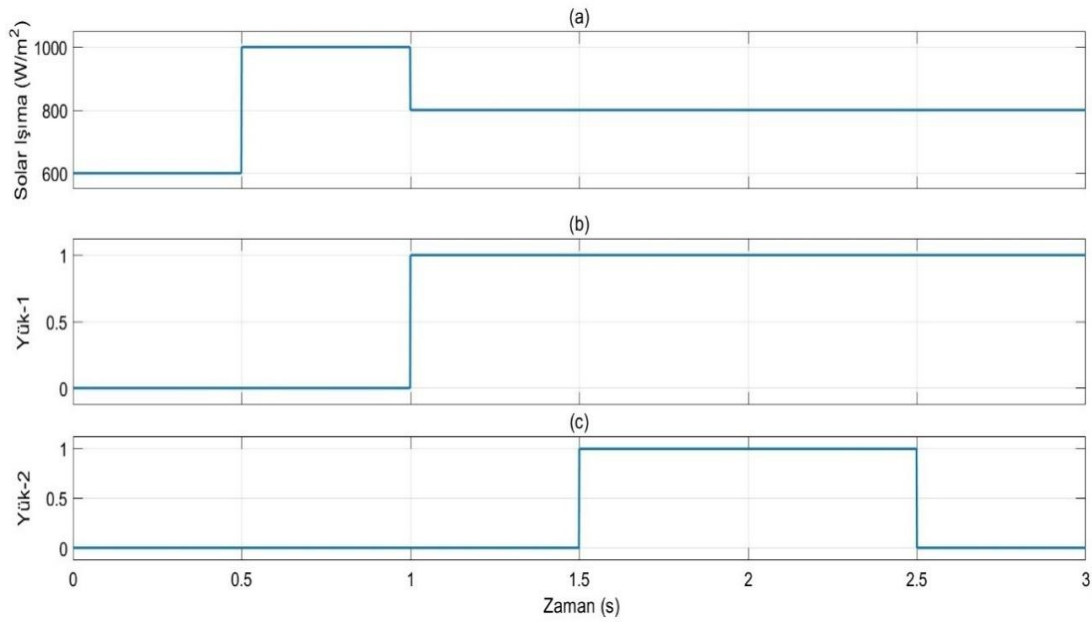
Bu çalışma, FV sistemlerde güç üretiminde kullanılan MGNİ tekniklerinin karşılaştırılmasını içermektedir. Modelleme ve benzetim işlemleri MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, bu sistem dört farklı çalışma koşulunu ele almıştır. İlk olarak, sıklıkla tercih edilen D&G algoritması kullanılmıştır. Ardından, BM-D&G, AI ve PSO yöntemleriyle sistem yeniden modellenmiştir. Çalışmada, Çizelge 3.1’de yer alan panel ve Çizelge 3.2’de belirtilen enerji depolama biriminden yararlanılmıştır. Sistemin performansı, dört farklı simülasyon koşulunda ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Verimlilik ve kararlılık açısından ele alınan bu yöntemler, MGNİ kontrol yaklaşımının optimizasyonu için kritik öneme sahip verilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen analizler, FV sistemlerin dinamik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına ve değişken çevresel koşullar altında sistem performansının iyileştirilmesine katkı sunmaktadır.

Benzetim çalışmasında, enerji depolama biriminin başlangıç SOC %70 olarak belirlenmiştir. Bu başlangıç seviyesi, hem sistemin enerji arz güvenliğini hem de batarya sağlığını doğrudan etkileyen kritik bir parametre olarak seçilmiştir. %70’lik başlangıç değeri, bataryanın ne tamamen dolu ne de tamamen boş olduğu bir çalışma aralığını temsil ettiğinden, sistemin hem şarj hem de deşarj modlarında dinamik davranışının gözlemlenebilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca bu seviye, ani ısıtım değişimlerinde bataryanın devreye girme ve çıkma tepki sürelerini daha gerçekçi biçimde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

Her bir algoritma, enerji depolamalı FV sistem modelinde aynı başlangıç koşulları altında çalıştırılarak karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır. Bu analiz, özellikle algoritmaların geçici rejimlerdeki tepkilerini, kararlılık düzeylerini ve MGN’ye ulaşma hızlarını değerlendirmeye yöneliktir. Ayrıca, batarya SOC seviyesinin zamana bağlı değişimi ve güç dalgalanmalarına karşı verilen tepkiler de ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Böylece, her bir kontrol stratejisinin enerji yönetimi etkinliği, kararlılık kabiliyeti ve sistem bütünlüğüne olan katkısı hem nicel hem de nitel olarak ortaya konmuştur.

Değişken güneş ışınlamı ve sıcaklık koşulları altında elde edilen sonuçlar, algoritmaların adaptif davranışlarını değerlendirmek üzere karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme, farklı MGNİ stratejilerinin hem kısa vadeli dinamik performansını hem de uzun vadeli enerji verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel doğrulamalara ve pratik uygulamalara yönelik değerli bir temel oluşturmuştur.



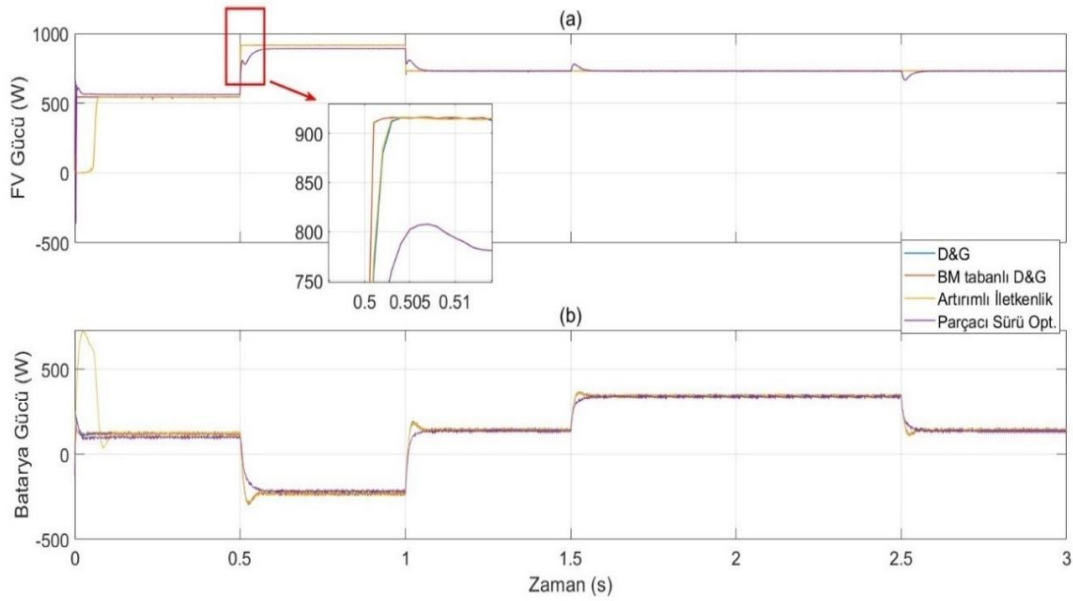
Şekil 4.1 Depolamalı FV sistemine ait senaryoların zamana bağlı değişimi

Yüklerin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.1’de incelenmiştir. Benzetim çalışması, sistemin geçici rejim ve kararlı durum tepkilerinin kapsamlı bir biçimde incelenebilmesi amacıyla toplam 3 s’lik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Benzetimin başlangıcında FV panele uygulanan güneş ışınlamı seviyesi 600 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Bu değer, sistemin düşük ışınlamı koşullarındaki davranışını değerlendirmek için uygun bir başlangıç noktası sağlamaktadır.

Benzetim 0,5. s’de iken güneş radyasyon seviyesi ani bir artışla 1000 W/m^2 seviyesine yükseltilmiştir. Bu değişim, güneşlenme koşullarında meydana gelen hızlı bir artışı temsil etmekte olup, algoritmaların ani güç değişimlerine karşı tepki hızlarını ve izleme doğruluklarını test etmek amacıyla uygulanmıştır. Ardından, 1. s’de radyasyon seviyesi 800 W/m^2 ’ye düşürülerek, çevresel koşullarda meydana gelen kısmi bulutlanma veya

ışınım azalışı gibi durumlar modellenmiştir. Bu ışınım profili, tüm MGNİ algoritmaları için sabit tutulmuş ve her biri aynı çevresel koşullar altında değerlendirilmiştir. Böylece, algoritmalar arasındaki performans farklarının yalnızca izleme yöntemlerinden kaynaklanması sağlanmıştır.

Sistemde 600 W'lık kritik yüke ek olarak 200 W kapasiteli Yüke-1 ve Yüke-2'de sisteme dahil edilmiştir. Yüklerin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.1-(b) ve (c)'de görülmektedir. Farklı algoritmaların FV ve batarya gücü üzerindeki etkileri, enerji transferinin optimizasyonu ve sistem dinamiklerine olan tepkileri Şekil 4.2'de detaylı bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.2 (a) ve (b)'de sırasıyla FV gücünün ve lityum tabanlı batarya gücünün zamana bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 4.2 Depolamalı FV sistemi güçlerindeki değişim

Şekil 4.2 (a)'da verilen sonuçlar incelendiğinde, benzetim sürecinin başlangıcında BM-D&G algoritmasının, diğer yöntemlere kıyasla belirgin biçimde üstün bir dinamik tepki performansı sergilediği görülmektedir. Uzman görüşüne dayalı olarak çıkarım mekanizması sayesinde BM-D&G algoritması, sistemin geçici rejim evresine hızlı bir şekilde uyum sağlamış ve yalnızca 1 ms gibi son derece kısa bir sürede 543 W düzeyindeki güç talebine ulaşarak MGN'yi başarıyla izleyebilmiştir.

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, geleneksel D&G algoritmasıyla işletilen sistemin, MGN'ye ulaşma süresinin yaklaşık 6 milisaniye olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, klasik yöntemin periyodik dalgalanma temelli izleme yapısından kaynaklanan daha yavaş geçici tepki davranışını ortaya koymaktadır. Buna karşın, Aİ algoritması ile çalışan sistemde, MGN'ye ulaşma süresinin yaklaşık 75 ms gibi oldukça uzun bir süre aldığı belirlenmiştir. Bu gecikme, Aİ yönteminin eğim tabanlı karar verme yapısının yüksek ışıyım değişim hızlarına karşı duyarlılığının sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Depolamalı FV sistemde bara gerilimlerinin dinamik performansı, Çizelge 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Algoritmaların performans değerlendirmesi kapsamında, başlangıç tepkisi, geçici rejim kararlılığı ve tepe değerleri gibi kritik parametreler dikkate alınmıştır. Sistem, 96 V nominal gerilime sahip ortak bir DA baraya bağlanmış olup, tüm algoritmalar aynı referans gerilim ve başlangıç koşulları altında test edilmiştir.

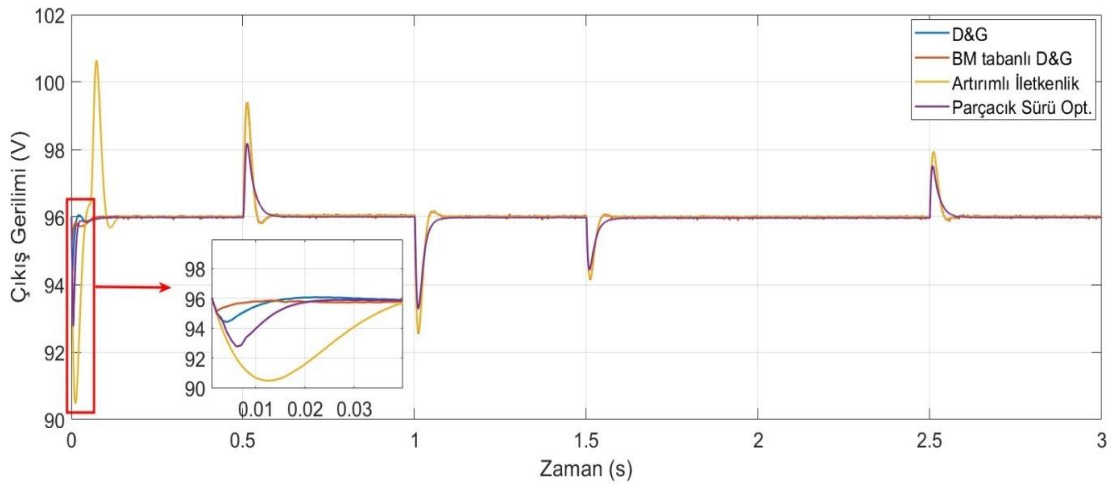
Çizelge 4.1'e göre, benzetimin başlama anında BM-D&G algoritması altında bara gerilimi 95,13 V olarak ölçülmüş ve hemen ardından hızla nominal değere yaklaşarak kararlılığını sürdürmüştür. Geleneksel D&G algoritmasında bara gerilimi başlangıçta 94,39 V, PSO algoritmasında 92,76 V, Aİ algoritmasında ise 90,47 V olarak kaydedilmiştir. Tüm algoritmalar, başlangıçtaki gerilim düşüşünün ardından hızlı bir toparlanma göstererek referans DA baraya yakın sabit bir gerilim seviyesi elde etmişlerdir.

Çizelge 4.1 Depolamalı FV sistemde farklı MGNİ algoritmalarının DA bara başlangıç gerilimleri ve kararlılık performansı

Algoritma	Başlangıç Bara Gerilimi (V)	Nominal Gerilime Ulaşma Hızı	Geçici Rejim Kararlılığı
D&G	94,39	Hızlı	Orta düzey
BM-D&G	95,13	Çok hızlı	Yüksek kararlılık
PSO	92,76	Orta	Orta-İyi
Aİ	90,47	Yavaş	Düşük-Orta

Bu bulgular, BM-D&G algoritmasının geçici rejimde daha düşük gerilim düşüşü ve hızlı toparlanma ile iyi bir gerilim kararlılığı sağladığını göstermektedir. Karşılaştırmalı analiz, klasik algoritmaların özellikle başlangıçta ortaya çıkan geçici davranışlar açısından farklılık gösterdiğini, PSO ve Aİ algoritmalarının ise başlangıçta daha büyük gerilim sapmaları yaşadığını ortaya koymaktadır. Böylece, algoritmaların bara gerilimine etkisi, sistemin güç dağılımı ve enerji depolama biriminin katkısıyla birlikte değerlendirilebilmiştir.

Sistem incelendiğinde, yük değişimleri esnasında BM-D&G algoritmasının, diğer MGNI yöntemlerine kıyasla referans DA bara gerilimini çok daha hızlı bir şekilde geri kazandığı, Şekil 4.3'te açık bir biçimde gözlemlenmektedir. Bu durum, BM-D&G algoritmasının geçici rejimlerde yüksek tepki hızı ve üstün kararlılık sağlayan BM tabanlı kontrol yapısının bir sonucu olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.3 FV panel çıkış geriliminin farklı algoritmalar için karşılaştırmalı grafikleri

Karşılaştırmalı analizler, diğer algoritmaların yük değişimlerine tepki sürelerinin daha uzun olduğunu ve geçici gerilim dalgalanmalarının BM-D&G'ye kıyasla daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Benzetim süresince farklı algoritmalar kullanılarak elde edilen DA bara gerilimindeki değişiklikler en yüksek pozitif ε_k^+ ve en düşük negatif ε_k^- gerilim regülasyonu değerleri Denklem (12)'ye göre hesaplanmıştır(Yan vd., 2012).

$$\begin{aligned}\varepsilon_k^+ &= \frac{\bar{u}_k - \min(u_k)}{\bar{u}_k} \cdot 100 \\ \varepsilon_k^- &= \frac{\bar{u}_k - \max(u_k)}{\bar{u}_k} \cdot 100\end{aligned}\tag{12}$$

Burada, $\bar{u}_k$ referans bara gerilimini ve u_k işletme anındaki gerilim değerini temsil etmektedir. Sistem kararlı duruma ulaştıktan sonra, senaryolar ve yük değişimleri kaynaklı olarak DA bara geriliminde meydana gelen geçici salınımlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler, en yüksek pozitif salınının simülasyonun 0,5. s'de, en büyük negatif salınının ise 1. s'de ortaya çıktığını göstermektedir. Bu sonuçlar, özellikle yük değişikliklerinin ve geçici rejim koşullarının bara gerilimi üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır.

Yaklaşık 80 ms'lik kısa süreli salınımlar dikkate alındığında, AI algoritmasının en yüksek gerilim sapmalarını ürettiği belirlenmiştir. Pozitif ve negatif maksimum gerilim salınımları sırasıyla $\varepsilon_k^+ = \%3,44$ ve $\varepsilon_k^- = \% -3,54$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, IEEE 1547-2003 standardı tarafından belirlenen sınırlar dahilinde olup, sistemin güvenli çalışma koşullarını koruduğunu göstermektedir.

MGNİ algoritmalarının birim basamak cevabına tepkileri, aşım, yükselme süresi ve yerleşme süresi gibi kritik performans metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı analiz sonuçları, Çizelge 4.2'de sunulmuştur. PSO algoritması, gerilim genliğinde $\%9,57$ ile en düşük aşım değerini elde ederek geçici rejimde en iyi performansı sergilemiştir. Bu durum, PSO algoritmasının birim basamak cevabına karşı duyarlılığı yüksek olmasına ve geçici salınımları minimize etmesine bağlıdır. Öte yandan, BM-D&G algoritması, 14,281 ms'lik yükselme süresi ve 51,606 ms'lik yerleşme süresi ile özellikle geçici tepki ve sistem kararlılığı açısından öne çıkmaktadır.

Aşım değerleri açısından PSO algoritması, BM-D&G algoritmasına kıyasla yaklaşık $\%56,03$ oranında daha iyi bir performans göstermektedir. Benzer şekilde, yükselme süresi açısından BM-D&G algoritması, geleneksel D&G algoritmasına göre yalnızca $\%3,708$ oranında daha hızlı bir performans sergileyerek, nominal değerine ulaşmada oldukça

etkili bir yanıt sağlamaktadır. Yerleşme süresi açısından da BM-D&G algoritmasının hızlı kararlılık sağladığı ve geçici salınımları minimize ettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 MGN takibi algoritmalarının performans karşılaştırması

Parametre	D&G	BM-D&G	AI	PSO
Aşım (%)	17,40	17,08	21,56	9,57
Yükselme zamanı (ms)	14,831	14,281	30,954	15,407
Yerleşme zamanı (ms)	52,057	51,606	97,605	68,668

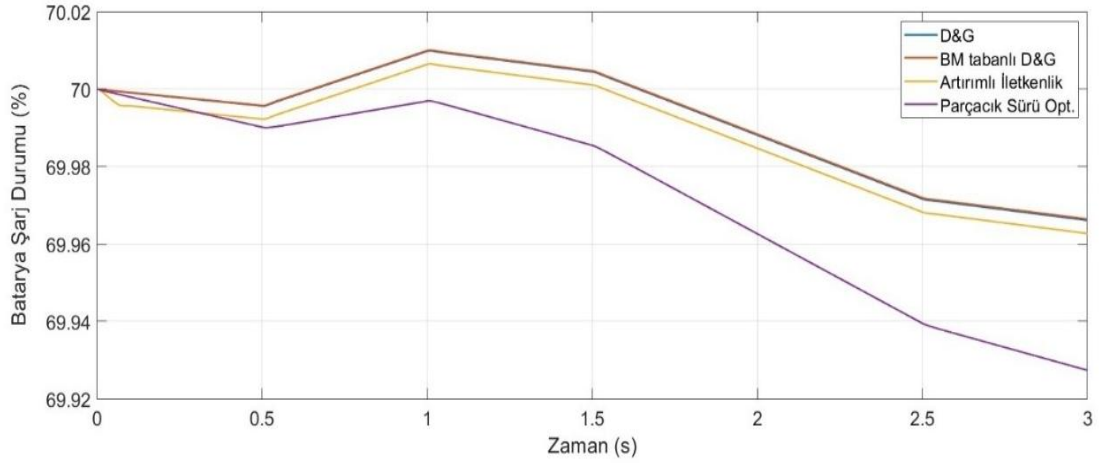
Elde edilen bulgular, BM-D&G algoritmasının geleneksel D&G algoritmasına kıyasla geçici rejim performansı ve kararlılık açısından belirgin üstünlükler sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, enerji depolamalı FV sistemlerde özellikle değişken çevresel koşullara hızlı adaptasyon ve yüksek sistem kararlılığı sağlama açısından BM-D&G algoritmasının üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

FV sistemde yapılan benzetim çalışmalarında, batarya şarj durumu seviyelerindeki (SOC) değişimler Şekil 4.4’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. SOC değerinin başlangıçta %70 seviyesinde belirlenmesiyle birlikte, yük tarafından talep edilen güç, FV panel ve enerji depolama birimi tarafından ortak olarak karşılanmıştır. Bu çalışma sürecinde, enerji talebinin bir kısmının batarya tarafından sağlanması, doğal olarak SOC seviyesinde kademeli bir azalmaya neden olmuştur.

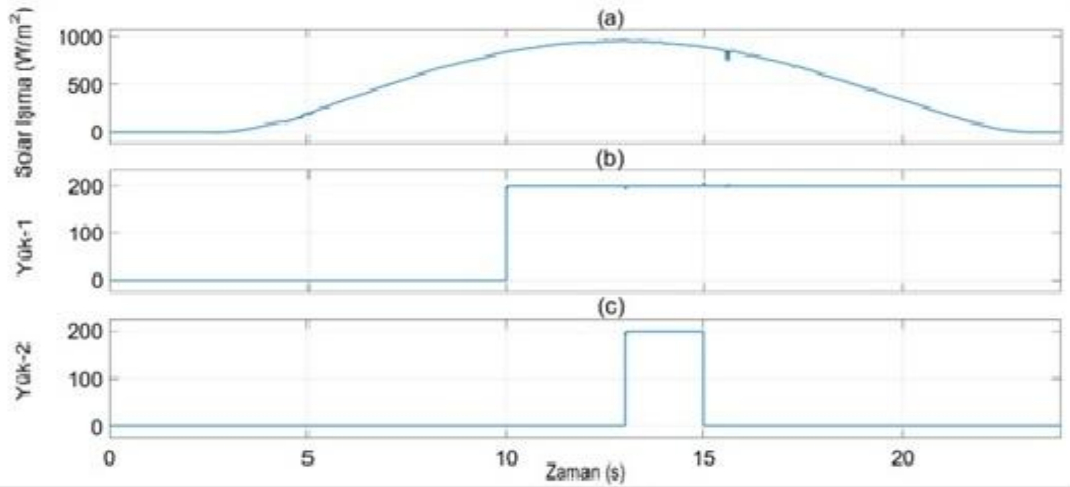
Benzetimin 0,5. s’de güneş radyasyonunun 600 W/m^2 ’den 1000 W/m^2 ’ye yükselmesiyle birlikte, sistemde üretilen güç artmış ve bu sayede hem kritik yüklerin kesintisiz beslenmesi sağlanmış hem de batarya şarj moduna geçmiştir. Bununla birlikte, 1. s’de Yük-1’in devreye alınması ve aynı anda güneş radyasyonunun 800 W/m^2 seviyesine düşmesi sonucunda, FV sistemin ürettiği güç, toplam yük talebini karşılamada yetersiz kalmış ve sistem otomatik olarak batarya deşarj moduna geçmiştir. Bu durum, sistemin değişken çevresel koşullara ve yük dalgalanmalarına adaptif tepkisini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.4’e göre, farklı MGNİ algoritmaları arasında BM-D&G yönteminin, SOC

%69,9664 seviyesinde tutarak en yüksek performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgu, BM-D&G algoritmasının hem güç yönetimi verimliliği hem de enerji depolama kararlılığı açısından üstün bir kontrol yeteneğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



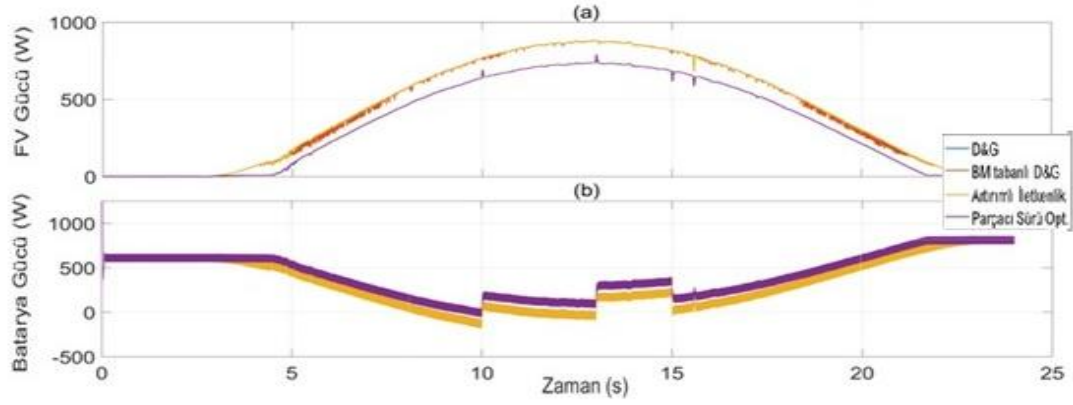
Şekil 4.4 Değişken yük koşullarında SOC seviyelerindeki değişim



Şekil 4.5 Gerçek güneş verileri ile Yük1 ve Yük2'nin zamana bağlı değişimi.

Çalışmada kullanılan 24 saatlik güneşlenme verileri, Şekil 4.5'de sunulduğu üzere bir piranometre aracılığıyla ölçülmüş olup 0–960 W/m² aralığında değişmektedir. Elde edilen gerçek çevresel veriler, FV sisteminin performansının doğal koşullar altında daha kapsamlı ve ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Ayrıca, günlük güneşlenme değerleri 24 s'lik bir zaman ölçeğine dönüştürülerek benzetim çalışmalarında bu biçimiyle kullanılmıştır.

FV güç üretimi ile batarya güç akışına ilişkin sonuçlar Şekil 4.6’da sunulmuştur. Elde edilen değerlendirmeler, PSO algoritmasının diğer yöntemlere göre MGN’yi tam olarak izleyemediğini ve yük değişimlerinden daha belirgin biçimde etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 4.6 Fotovoltaik sistem ve enerji depolama birimindeki güç değişimi.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışma, farklı kontrol ve izleme stratejilerine sahip meta-sezgisel MGNI algoritmalarının performansını sistematik biçimde analiz ederek enerji depolamalı FV sistemler için en uygun çözümün belirlenmesini amaçlamıştır. Gerçekleştirilen benzetimlerde BM-D&G algoritması, klasik D&G, AI ve PSO yöntemleriyle karşılaştırılmış ve özellikle dinamik çevresel koşullara adaptasyon, hızlı izleme kabiliyeti ve enerji verimliliği açısından dikkat çekici bir üstünlük ortaya koymuştur.

PSO algoritmasının değişken yük profillerine karşı başarılı bir tepki verebildiği, buna karşın AI algoritmasının diğer yöntemlere göre daha büyük gerilim saptmaları ürettiği ancak tüm algoritmaların standart sınırlar içinde kalarak sistem kararlılığını sağlayabildiği görülmüştür. Bu bulgular, FV sistemlerde kullanılan kontrol yaklaşımlarının geçici rejim dayanıklılığı ve standart uyumluluğu açısından değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bulanık çıkarım tabanlı yapısı sayesinde BM-D&G yönteminin daha düşük yükselme süresi, azalmış salınım ve yüksek kararlılık sunması, geçici rejim performansı bakımından FV sistemlerde etkili bir izleme stratejisi olduğunu göstermektedir. Bu algoritmanın, özellikle ışınım şiddetindeki ani değişimlere karşı hızlı adaptasyon yeteneği ve kararlı çalışma koşullarını uzun süre koruyabilme kapasitesi, onu diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı kılmaktadır. Dolayısıyla, yüksek doğruluk, hızlı izleme kabiliyeti ve uzun vadeli kararlılığın kritik öneme sahip olduğu FV sistem uygulamalarında BM-D&G algoritmasının tercih edilmesi, bilimsel ve mühendislik açısından rasyonel bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

BM-D&G algoritmasının, diğer yöntemler olan geleneksel D&G, AI ve PSO algoritmalarına kıyasla hem geçici rejim performansı hem de enerji verimliliği açısından belirgin bir üstünlük sağladığını göstermektedir.

Lityum esaslı enerji depolama birimlerinin FV sistemlere entegrasyonu; kararlılığın korunması, ani güç dalgalanmalarının dengelenmesi ve genel verimliliğin artırılması

açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hızlı tepki verme özellikleri sayesinde bu depolama teknolojileri, MGNI performansının iyileştirilmesine doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Her ne kadar çalışma MATLAB/Simulink ortamında yürütülmüş olsa da söz konusu MGNI algoritmalarının gerçek dünya koşullarında doğrulanması, pratik etkinliklerinin ve güvenilirliklerinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Farklı FV sistem konfigürasyonları, değişken ışıınım seviyeleri, sıcaklık dalgalanmaları ve kısmi gölgelenme gibi çevresel faktörler altında gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar, algoritmaların dayanıklılığı, adaptasyon yeteneği ve kararlılık performansı hakkında kapsamlı ve güvenilir veriler sağlayacaktır.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, BM-D&G algoritmasının hem geçici rejim performansı hem de enerji yönetimi verimliliği açısından diğer yöntemlere kıyasla daha güçlü bir kontrol stratejisi sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, hızlı tepki, yüksek doğruluk ve kararlı çalışma gerektiren FV uygulamalarında BM-D&G yönteminin tercih edilmesinin mühendislik açısından rasyonel bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, ileri kontrol tekniklerinin ve meta-sezgisel algoritmaların MGNI performansına etkilerinin araştırılması için gelecekte yapılacak deneysel çalışmalar ve saha uygulamalarına temel oluşturacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abouobaida, H., Mchaouar, Y., Abouelmahjoub, Y., Mahmoudi, H., Abbou, A., & Jamil, M. (2023). Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems. *Optik*, 278.
- Akgundogdu, A., Karadeniz, O., Sahin, U., Tiryaki, H., Erdogan, G., Yahya YILMAZ, M., Kocaarslan, I., Kelimeler-Batarya, A., Paketi, B., & Yönetim Sistemi, B. (t.y.). Elektrikli Araçlar için Batarya Paketi ve Batarya Yönetim Sisteminin Gerçeklenmesi Implementation of Battery Pack and Battery Management System for Electric Vehicles.
- Akhan, H., Ezik, İ., & Emirali, S. (2025). Fotovoltaik Sistemlerde Verimi Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 17-32.
- Alhusseini, H., Abdali, L. M., Issa, H. A., & Velkin, V. I. (2025). Adaptive particle swarm optimization based model predictive control MPPT algorithm for PV systems under partial shading conditions. *Results in Engineering*, 28.
- Ammar, H. H., Azar, A. T., Shalaby, R., & Mahmoud, M. I. (2019). Metaheuristic Optimization of Fractional Order Incremental Conductance (FO-INC) Maximum Power Point Tracking (MPPT). *Complexity*, 2019(1), 7687891.
- Atıcı, K., Altın, N., & Sefa, İ. (2019). Fotovoltaik Sistemler için Bozkurt Optimizasyonu Tabanlı MPPT Yöntemi Tasarımı. *SETSCI Conference Proceedings*, 4, 158-163.
- Barakat, S., Mesbahi, A., N'hili, B., Nouaiti, A., & Abouyaakoub, M. (2025). High-efficiency MPPT Using ZVS quasi-resonant converter and PSO algorithm: Simulation and PIL validation. *Scientific African*, 28.
- Ben Regaya, C., Hamdi, H., Farhani, F., Marai, A., Zaafouri, A., & Chaari, A. (2024). Real-time implementation of a novel MPPT control based on the improved PSO algorithm using an adaptive factor selection strategy for photovoltaic systems. *ISA transactions*, 146, 496-510.
- Bisht, R., & Optik, A. S.-. (2022). An improved method based on fuzzy logic with beta parameter for PV MPPT system. *Optik*.
- Boughdiri, B., Bouazizi, M. H., & Hmidet, A. (2025). A Solar PV System Based on a New Hybrid MPPT Technique for Efficient Power Supply of an Oxygen Concentrator. 2025 International Conference on Control, Automation and

Diagnosis, ICCAD 2025.

- Celi, E., Minuto, A., Rizzi, S., Timò, G., Dolara, A., & Avella, A. (2026). Experimental platform for PV generator characterization and MPPT algorithm simulation in vehicle integrated photovoltaic applications under real operating conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 294.
- Chaibi, R., EL Bachtiri, R., El Hammoumi, K., & Yagoubi, M. (2024). Observer-based fuzzy T–S control with an estimation error guarantee for MPPT of a photovoltaic battery charger in partial shade conditions. *Results in Control and Optimization*, 17.
- Chan, D. S. H., & Phang, J. C. H. (1987). Analytical Methods for the Extraction of Solar-Cell Single-and Double-Diode Model Parameters from I-V Characteristics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34(2), 286-293.
- Cheng, P. C., Peng, B. R., Liu, Y. H., Cheng, Y. S., & Huang, J. W. (2015). Optimization of a Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm Using the Particle Swarm Optimization Technique. *Energies* 2015, Vol. 8, Pages 5338-5360, 8(6), 5338-5360.
- Dinesh, M. N., & Eti, M. (2024). Optimized Incremental Conductance MPPT for Grid-Connected PV Systems with Battery and Supercapacitor Integration. 8th IEEE International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions, CSITSS 2024.
- Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy procedia*, 33, 311-321.
- Eltawil, M., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and sustainable energy reviews*.
- Endiz, M. S. (2024). Design and implementation of microcontroller-based solar charge controller using modified incremental conductance MPPT algorithm. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 17(2), 100938.
- Esram, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449.
- Fan, L. ping, Chen, Q. peng, & Guo, Z. qiang. (2022). An Fuzzy improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for Microbial Fuel Cells. *International Journal of Electrochemical Science*, 17.

- Frison, L., De Schutter, J., & Diehl, M. (2023). Model predictive control for renewable energy systems Lecture Notes at University of Freiburg.
- Gawande, M. K., Ghulaxe, S. G., Mahatme, T. R., Salvi, A. S., & Bagewadi, M. D. (2021). Modern approach for hybridization of PSO-INC MPPT methods for efficient solar power tracking. 2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology, GCAT 2021.
- Huynh, D. C. (2012). An Improved Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm for Solar Photovoltaic Panels. *International Journal of Science and Research*, 3, 2319-7064.
- İsen, E. (2018). Anfis ve bulanık c-ortalamalar yöntemleri tabanlı çok kriterli envanter sınıflandırma modeli.
- Iskandar, H. R., Prasetya, A., Zainal, Y. B., Hidayat, M. R., Taryana, E., & Megiyanto, G. (2020). Comparison Model of Buck-boost and Zeta Converter Circuit using MPPT Control Incremental Conductance Algorithm. *Proceeding - 2020 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application: Sustainable Energy and Transportation: Towards All-Renewable Future, ICSEEA 2020*, 185-190.
- Kabalci, E., Irgan, H., & Kabalci, Y. (2018). Hybrid Microgrid System Design with Renewable Energy Sources. *Proceedings - 2018 IEEE 18th International Conference on Power Electronics and Motion Control, PEMC 2018*, 387-392.
- Karthikeyan, D., Anish John Paul, M., Rajesh, K., Subharathna, N., Jayakumar, T., & Sasikumar, M. (2025). Enhanced MPPT for Solar Systems Using Chaotic PSO and DC-DC Luo Converter. *International Conference on Smart Systems for Applications in Electrical Sciences, ICSSSES 2025*.
- Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., & Adaramola, M. S. (2023). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 2206, 16(5), 2206.
- Kayisli, K. (2023). Super twisting sliding mode-type 2 fuzzy MPPT control of solar PV system with parameter optimization under variable irradiance conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(1).
- Kaysal, A., Koroğlu, S., & Oğuz, Y. (2022). Hierarchical energy management system with multiple operation modes for hybrid DC microgrid. *International Journal of*

- Electrical Power & Energy Systems, 141.
- Kumaraswamy, M., & Naik, K. A. (2025). Data-driven regression controller-based MPPT with image encryption inspired solar PV array reconfiguration under partial shading conditions. *Next Energy*, 9.
- Ławry'nczuk, Ł. Ł., Astolfi, D., Hua, W., Li, Z., Dewantoro, G., Xiao, T., & Swain, A. (2025). A Comparative Analysis of Fuzzy Logic Control and Model Predictive Control in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking. *Electronics* 2025, Vol. 14, Page 1009, 14(5), 1009.
- Lokhande, K. R., Raviteja, P., & Narasimharaju, B. L. (2024). Solar PV Integrated MPPT Controlled High Gain DC-DC Converter. 2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, SEFET 2024.
- Naima, B., Belkacem, B., Ahmed, T., Benbouhenni, H., Riyadh, B., Samira, H., Sarra, Z., Elbarbary, Z. M. S., & Mohammed, S. A. (2025). Enhancing MPPT optimization with hybrid predictive control and adaptive P&O for better efficiency and power quality in PV systems. *Scientific Reports*, 15(1).
- Öztürk, H. H. (2008). GÜNEŞ ENERJİSİNDEN FOTOVOLTAİK YÖNTEMLE ELEKTRİK ÜRETİMİNDE GÜÇ DÖNÜŞÜM VERİMİ VE ETKİLİ ETMENLER.
- Rai, R. K., & Rahi, O. P. (2022). Fuzzy Logic based Control Technique using MPPT for Solar PV System. 2022 1st International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies, ICEEICT 2022.
- Salas, V., Olías, E., Barrado, A., & Lázaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar energy materials and solar cells*, 90(11), 1555-1578.
- Salau, A. O., & Alitasb, G. K. (2024). MPPT efficiency enhancement of a grid connected solar PV system using Finite Control set model predictive controller. *Heliyon*, 10(6), e27663.
- Sawin, J. L., Rutovitz, J., Sverrisson, F., Murdock, H. E., & Adib, R. (2018). Renewables 2018 global status report in perspective. İçinde *Renewables 2018: Global Status Report*. REN21 Secretariat.
- Shang, L., Guo, H., & Zhu, W. (2020). An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5(1).

- Sharma, V., Gupta, A. K., Raj, A., & Verma, S. K. (2024). AI-Driven MPPT: A Paradigm Shift in Solar PV Systems for Achieving maximum Efficiency. ICAAAEEI 2024 - 1st International Conference of Adisutjipto on Aerospace Electrical Engineering and Informatics: Shaping the Future Work for the Aerospace Technology in Science, Engineering, and Industry in the Disruptive Era.
- Shiau, J. K., Wei, Y. C., & Chen, B. C. (2015). A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables. *Algorithms* 2015, Vol. 8, Pages 100-127, 8(2), 100-127.
- Siddique, M. A. B., Zhao, D., Ouahada, K., Rehman, A. U., & Hamam, H. (2025). Performance validation of global MPPT for efficient power extraction through PV system under complex partial shading effects. *Scientific Reports*, 15(1).
- Ullah, K., Ishaq, M., Tchier, F., Ahmad, H., & Ahmad, Z. (2023). Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system. *Results in Engineering*, 20.
- Vineetha, P. K., Nair, P. V., Sruthy, S. P., & Anas, S. (2024). Benzodithiophene-Based Copolymers as Dopant-Free Hole-Transporting Materials for Perovskite Solar Cells. *Energy Technology*, 12(8), 2400591.
- Xiao, W., & Dong, N. (2026). A two-stage MPPT control for PV system under complex partial shading conditions. *Solar Energy*, 303.
- Yan, S., Yuan, J., & Xu, L. (2012). Fuzzy logic control of MPPT for photovoltaic power system. *Proceedings - 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2012*, 448-451.
- Yılmaz, H., & Şahin, M. E. (2023). Bulanık Mantık Kavramına Genel Bir Bakış. *Takvim-i Vekayi*, 11(1), 94-129.
- Zulu, M. L. T., Sarma, R., & Tiako, R. (2025). Modified fuzzy logic and artificial bee colony: An artificial intelligence approach to optimization and power quality improvement in an MPPT-based system. *Scientific African*, 28.

İnternet Kaynakları

- 1) https://www.emo.org.tr/ekler/6339b97f492c1bd_ek.pdf 18.11.2025
- 2) https://www.emo.org.tr/etkinlikler/etuk/etkinlik_bildirileri_detay.php?etkinlikkod=272&bilkod=6860 18.11.2025
- 3) <https://www.renewableenergyhub.co.uk/> 18.11.2025

